平成 23 年度
環境研究総合推進費補助金　研究事業
総合研究報告書

廃石膏ボードリサイクル技術の総合化に関する研究

Ｋ２１４４，Ｋ２２１０１，Ｋ２３５９

平成 24 年 4 月

研究代表者　福岡大学　佐藤研一

補助事業名　　平成23年度環境研究総合推進費補助金研究事業(平成21年度～平成23年度)

所　　管　　環境省

国庫補助金　　42,473,000円（複数年度の総計）

研究課題名　　廃石膏ボードリサイクル技術の総合化に関する研究

研究期間　　平成21年4月28日　～　平成24年3月31日

研究代表者名　　佐藤研一　（福岡大学）

研究分担者名　　押方利郎　（福岡大学）

武下俊宏　（福岡大学）

目次

第 1 章　序論---------- 1
1-1　研究の背景---------- 1
1-2　研究の目的---------- 2
1-3　本論文の構成---------- 4

第２章　再生半水石膏の有効利用の現状と課題---------- 5
2-1　概説---------- 5
2-2　廃石膏ボードの現状と課題---------- 5
2-2-1　石膏ボードの生成過程---------- 5
2-2-2　石膏ボードの利用現況と課題---------- 6
2-3　廃石膏ボードの分別解体手法について---------- 10
2-4　再生半水石膏について---------- 15
2-4-1　石膏ボードの生成過程---------- 15
2-4-2　再生半水石膏の生成過程---------- 17
2-4-3　再生半水石膏の固化特性の特徴と課題---------- 18
2-4-4　再生半水石膏の溶出特性---------- 18
2-4-5　硫化水素発生特性---------- 19
2-5　再生半水石膏の地盤改良固化特性及び環境安全性に及ぼす諸要因---------- 19
2-5-1　土質材料の違いによる影響---------- 22
2-5-2　再生半水石膏の品質の違いによる影響---------- 24
2-5-3　養生条件の違いによる影響---------- 26
2-5-4　セメント等の種類の違いによる影響---------- 28
2-5-5　再生半水石膏により固化された処理土の再泥化挙動---------- 30
2-5-6　再生半水石膏からのふっ素溶出特性---------- 31
2-5-7　再生半水石膏利用に伴う硫化水素発生特性---------- 33
2-6　本章のまとめと本研究の着眼点---------- 35
2-6-1　既往の研究における課題---------- 35
2-6-2　本研究の着眼点---------- 36

第３章　再生半水石膏による地盤改良固化特性---------- 38
3-1　概説---------- 38
3-2　実験に用いた試料と物理特性---------- 38
3-3　固化処理土の強度・変形特性---------- 40
3-3-1　実験概要及び結果---------- 40
3-3-2　土質材料の違いが力学特性に及ぼす影響---------- 52
3-3-3　含水比の違いが力学特性に及ぼす影響---------- 52
3-3-4　固化材及び補助固化材添加量の違いが力学特性に及ぼす影響---------- 53
3-3-5　補助固化材（生石灰、高炉セメント B 種）の種類の違いが力学特性に及ぼす影響---------- 56
3-3-6　養生日数の違いが力学特性に及ぼす影響---------- 57
3-3-7　固化材及び補助固化材添加量の違いがコーン指数に及ぼす影響---------- 60
3-3-8　補助固化材（生石灰、高炉セメントＢ種）の種類の違いが一軸圧縮強さとコーン指数の関係に及ぼす影響---------- 61

3-4　再生半水石膏の種類が強度・変形特性に及ぼす影響――― 61
3-4-1　実験概要――― 61
3-4-2　発生現場の違いが強度・変形特性に及ぼす影響――― 63
3-4-3　破砕方法の違いが強度・変形特性に及ぼす影響――― 64
3-5　再生半水石膏地盤改良土の耐久性の検討――― 65
3-5-1　耐久性試験概要――― 65
3-5-2　固化材添加量の違いが体積及び質量に及ぼす影響――― 67
3-5-3　固化材添加量の違いが力学特性に及ぼす影響――― 68
3-6　再生半水石膏地盤改良土の膨張性――― 69
3-6-1　吸水膨張試験概要――― 69
3-6-2　固化材添加量の違いが膨張量に及ぼす影響――― 70
3-7　再生半水石膏地盤改良土の再泥化の検討――― 71
3-7-1　再泥化試験概要――― 71
3-7-2　土質材料の違いが再泥化特性に及ぼす影響――― 73
3-7-3　固化材及び補助固化材添加量の違いが再泥化特性に及ぼす影響――― 74
3-8　地盤改良固化特性の評価――― 74

第４章　再生半水石膏を用いた地盤改良材としての環境安全性の評価――― 76
4-1　概説――― 76
4-2　実験概要――― 76
4-3　ふっ素溶出挙動の把握――― 79
4-3-1　実験概要――― 79
4-3-2　固化材添加量の違いが溶出挙動に及ぼす影響――― 80
4-4　ふっ素溶出特性に及ぼす影響因子の把握――― 80
4-4-1　固化材及び補助固化材添加量の違いが溶出特性に及ぼす影響――― 81
4-4-2　セメント等の種類の違いが溶出特性に及ぼす影響――― 83
4-4-3　養生日数の違いが溶出特性に及ぼす影響――― 84
4-4-4　再生半水石膏の種類の違いが溶出特性に及ぼす影響――― 84
4-4-5　土質材料の違いがふっ素溶出特性に及ぼす影響――― 85
4-5　実地盤に適用した際のふっ素溶出特性――― 90
4-5-1　カラム試験概要――― 90
4-5-2　覆土によるアルカリ分及びふっ素吸着特性効果――― 93
4-6　再生半水石膏地盤改良土の硫化水素発生特性――― 94
4-6-1　土質材料の違いが硫化水素発生特性に及ぼす影響――― 94
4-6-2　固化材添加量の違いが硫化水素発生特性に及ぼす影響――― 98
4-7　環境安全性の評価――― 101

第５章　ふっ素不溶化材の開発への取り組み――― 103
5-1　概説――― 103
5-2　実験概要及び結果――― 103
5-3　不溶化材の種類の違いが溶出特性に与える影響――― 105
5-4　ふっ素不溶化材の評価――― 107

第６章　再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用マニュアルの検討――― 108
6-1　再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用方法の検討――― 108
6-2　再生半水石膏地盤改良土の目標強度の設定――― 108
6-3　再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用フロー――― 110

第７章　分別解体工法の提案――――――――――――――――――――――――――――――― 112
7-1　研究の背景―――――――――――――――――――――――――――――――――――― 112
7-2　分別解体工法の手順の考え方―――――――――――――――――――――――――――― 113
7-3　分別解体工法の手順の提案―――――――――――――――――――――――――――――― 114
7-3-1　対象物件の把握―――――――――――――――――――――――――――――――――― 114
7-3-2　石膏ボードが施工された部位等の現況調査・確認―――――――――――――――――― 114
7-3-3　作業場所の確認―――――――――――――――――――――――――――――――――― 114
7-3-4　解体・撤去・分別工事――――――――――――――――――――――――――――――― 115
7-3-5　廃石膏ボードの搬出―――――――――――――――――――――――――――――――― 115
7-4　まとめ――――――――――――――――――――――――――――――――――――――― 115

第８章　結論―――――――――――――――――――――――――――――――――――――― 116

参考文献―― 120

発表論文リスト―――――――――――――――――――――――――――――――――――― 123

第１章　序論

1-1　研究の背景

現在までに石膏ボードは、耐火性、遮音性、断熱性、施工性に優れ、経済的にも低廉なことから、高度経済成長期以降、建築物の安全性と居住性向上に長きに渡って貢献している（図-1.1）。しかし、今後、建築物の耐用年数の関係から高度経済成長期に建設された建物が解体され、図-1.2 に示すように廃石膏ボードが排出されることが予想されている[1)]。

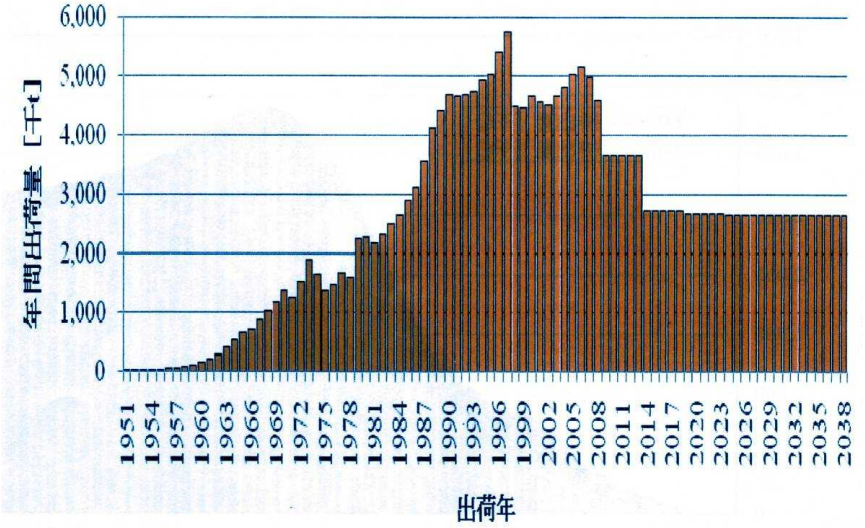


図-1.1　石膏ボード出荷量の実績と予測[2)]

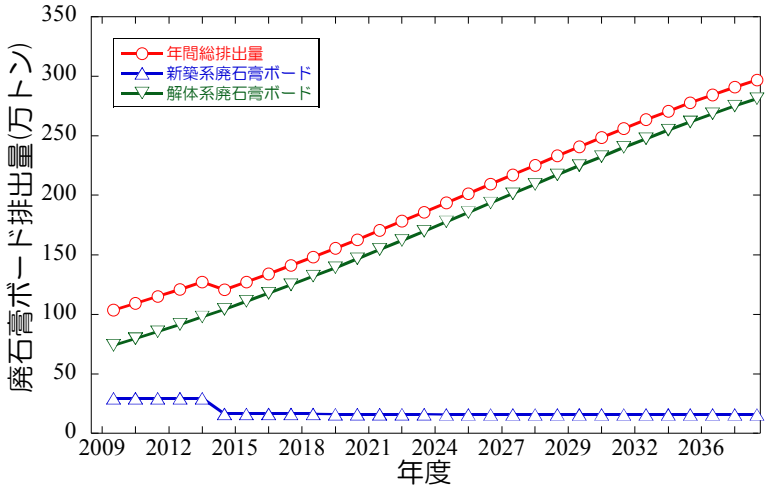


図-1.2　廃石膏ボードの年間総排出量の推計結果[1)]

2006 年 6 月 1 日、石膏ボードの全面管理型廃棄物指定が施行される以前は、廃石膏ボードは安定型最終処分場へと処分されていた。しかし、硫化水素ガスが発生し、作業員が死亡するという事故が発生して以降、紙と石膏に分離して管理型最終処分場に処分することが義務付けられており、それに伴う最終処分場の残余容量の逼迫が問題となっている。さらに、硫化水素が発生する問題もあり、廃石膏ボードの受入れを嫌がる処分場も多く存在している。また、処理コスト等についても課題が残されている。中間処理業者の解体系廃石膏ボード処理費は 1 万円～1.5 万円/m^3(2 万円～4 万円/t)が中心価格とされているが、一部中間処理業者の中にはこの約半額で処理を請け負い、不正処理を行っている安価処理業者がいる。そのため、価格が相対的に割高であるリサイクルを行う中間処理業者には物量が集まらず、安価な処理業者の存在がリサイクル進展の阻害要因となっている[1)]。そこで現在は、この問題を打開するために、廃石膏ボードのリサイクル・再利用技術の研究が盛んに行われている。有効利用の用途としては、肥料・セメント原料等が挙げられるが、最近では、大量に消費できる分野であることや、建設資源が枯渇していることから、廃石膏の地盤改良材としての有効利用が注目されている。

排出される廃石膏ボードは、二水石膏($CaSO_4・2H_2O$)の状態で存在しており、これを120℃以上で加熱することにより、半水化された石膏($CaSO_4・1/2H_2O$以下、再生半水石膏)が生成される。焼成して得られる再生半水石膏は、水を加えると水和反応を起こし二水石膏に変化するが、その際に短時間で硬化する（**式-1.1**）という性質を有しており、このような硬化作用が地盤改良効果に期待できる。さらに石膏自体は中性を示すことから、現在までのセメントによる地盤改良材よりも環境に良い固化材として期待されている。力学面での課題としては、加水に伴う凝結硬化の際にわずかに膨張する。さらに、石膏の硬化体は水に対して弱く(水溶性)、石膏を地盤改良材として用いる場合には、雨水・地下水の影響で石膏中の重金属が溶出する可能性が懸念される。環境面においても、化学石膏に含有されている Fの溶出や、硫化水素の発生等の課題がある。そのため、耐水性または撥水性の添加物を混合し、耐水性を向上させ重金属等の溶出を抑制する研究が必要である。

$$\underset{\text{二水石膏}}{CaSO_4・2H_2O} \underset{\text{②加水}}{\overset{\text{①加熱}}{\rightleftarrows}} \underset{\text{半水石膏}}{CaSO_4・1/2H_2O} + \underset{\text{脱水蒸発}}{3/2H_2O} \qquad \cdots (1.1)$$

(硫酸カルシウム・2水和物)　(硫酸カルシウム半水和物)

1-2　研究の目的

前述した研究背景から、再生半水石膏を用いた地盤改良材の適用性の検討を目的とし、地盤改良固化特性、環境安全性の把握を行い、それぞれ評価した後、実地盤に適用する際の利用マニュアルの作成を検討する。以下に、それぞれの検討項目の詳細を示す。

Ⅰ. 地盤改良固化特性の把握

(1) 再生半水石膏により固化処理された材料の改良効果

再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用マニュアルを作成するため、土質試料、養生日数、添加量等の様々な要因が強度・変形特性に及ぼす影響について検討する。

(2) 再生半水石膏により固化処理された材料の再泥化特性

既往の研究より、再生半水石膏のみを添加した固化処理土は、水溶性があるものの、耐水性または撥水性の添加物を混合することで水浸に対する安全性が向上することを明らかにしている。しかし、土質材料の違いや具体的な添加量については検討されていないため、その詳細を明確にする必要がある。

(3) 補助固化材を添加した際の改良効果

再生半水石膏の利用範囲を拡大するために、強度増加及び耐水性を向上させる必要がある。そのため、セメント等による再生半水石膏の硬化作用を補助する固化材を添加した際の改良効果を把握する必要がある。

(4) セメント等の種類の違いによる影響

実施工への適用を想定した際、セメント等の種類の違いによる固化特性を明確にする必要がある。そこで本検討では、生石灰と高炉セメントB種を用い検討する。さらに、既往の研究から、長期耐久性については明確にされていないことからその点についても着目する。

(5) 再生半水石膏の種類による影響

廃石膏ボードは、新築系と解体系の2種類に分別される。今後、高度経済成長期に建設された建物が耐用年数の関係より、建て替えられ、大量の石膏ボードが排出されることが予想されている。そのため、それらの石膏の種類の違いによる諸特性を把握する必要がある。

(6) 再生半水石膏により固化処理された材料の耐久性

実施工では、改良土が気象条件（降雨や日照）の影響を受けるため、耐久性が懸念される。そこで、厳しい条件下で耐久性の検討を行い評価する。

(7) 再生半水石膏により固化処理された材料の膨張性

再生半水石膏とセメント系固化材を混合することで、エトリンガイトの生成反応が促進されることが既往の研究から報告されている。しかし、過剰な生成反応は膨張の原因となり長期養生後での事故に繋がり兼ねない。従って、再生半水石膏を混入したセメント改良土を用いて、膨張性を把握する。

Ⅱ. 環境安全性の把握

(1) 再生半水石膏添加量の影響

再生半水石膏を地盤改良材として用いる際、リサイクルの障壁となっているのが、排煙脱硫石膏由来のふっ素の溶出である。そのため、再生半水石膏のみ添加した場合、補助固化材を添加した場合でのふっ素溶出特性を把握する必要がある。

(2) ふっ素溶出挙動の把握

既往の研究では、実地盤に適用した際の溶出挙動については明らかにされていない。実際の実地盤では、覆土によってアルカリ成分やふっ素が吸着される可能性があるため、実地盤を想定した際のアルカリ成分及びふっ素溶出挙動を検討する。そのため、乾湿繰返し下における耐久性を検討する。

(3) 再生半水石膏の種類による影響

再生半水石膏の種類の違いによるふっ素溶出特性への影響を把握するため、溶出特性を明確にする必要がある。

(4) 再生半水石膏の種類による影響

実施工では、改良土が気象条件（降雨や日照）の影響を受けアルカリ成分が溶出し、硫化水素ガスが発生しやすい条件へと推移していく可能性がある。また、乾湿繰返しにより供試体内部で硫化水素が発生して硫化物を形成することで強度低下が生じる恐れもある。
そのため、乾湿繰返し下での硫化水素発生試験を行う必要がある。

Ⅲ. ふっ素不溶化材開発への取り組み

再生半水石膏のみを添加した場合の改良土は、土壌含水比を低下させるため、添加量や養生期間を長くすることで、固化材としての効果がより顕著になることが既往の研究より報告されているが、ふっ素の溶出が懸念されていることが実情である。しかし、ふっ素不溶化処理された再生半水石膏を搬出することで、リサイクルがより促進されると考えられる。そこで天然鉱物、工業製品、産業廃棄物を用いたふっ素不溶化剤の開発を検討する。

1-3　本論文の構成

本論文は全 8 章で構成されている。**図-1.3** に本研究のフローチャートを示す。各章の主な内容は以下のとおりである。

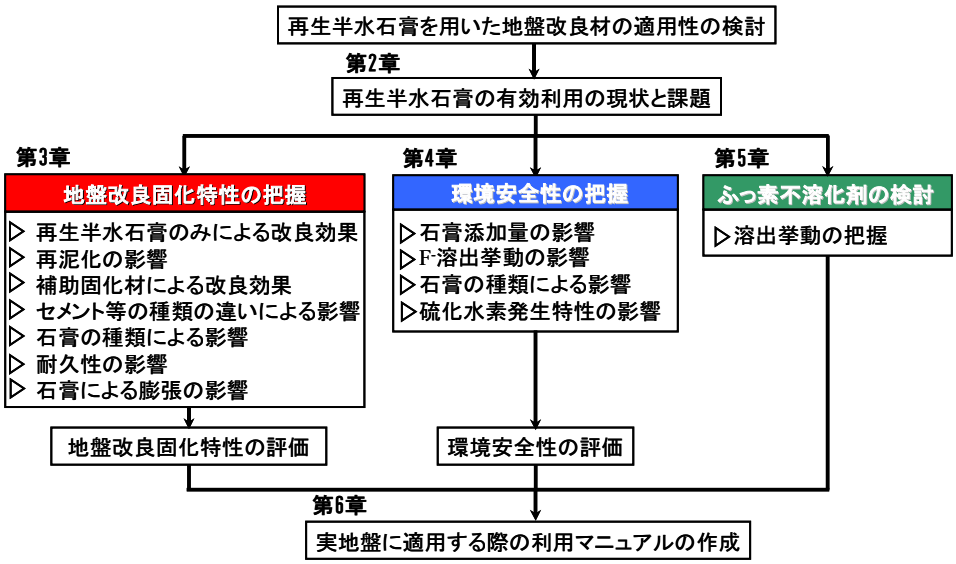


図-1.3　本研究のフローチャート

第 1 章　序論

この章では、本研究の背景として廃石膏ボードの現状を示し、再生半水石膏を用いた地盤改良材の開発を行うため、本研究の目的とその構成についてまとめた。

第 2 章　再生半水石膏の有効利用の現状と課題

この章では、石膏ボードの現状と課題、再生半水石膏を有効利用する際の長所と短所、さらに再生半水石膏を用いた地盤改良材の有効利用に関する既往の研究についてまとめ、本研究の着眼点についてもまとめている。

第 3 章　再生半水石膏による地盤改良固化特性

この章では、再生半水石膏を用いた地盤改良材による改良効果を確認するため、土質材料を改良した際の力学特性について検討した。その中で一軸圧縮試験とコーン指数試験について評価している。

第 4 章　再生半水石膏を用いた地盤改良材としての環境安全性の評価

この章では、再生半水石膏を用いた地盤改良材により固化処理されたものについて、環告 46 号法試験によりふっ素溶出特性を、硫化水素発生試験により硫化物及び硫化水素ガスについて実験的検討を行い、環境安全性を評価している。

第 5 章　ふっ素不溶化材の開発

この章では、ふっ素不溶化処理済みの再生半水石膏の搬出を目的とし、溶出試験による実験的検討を行った結果について述べている。

第 6 章　再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用マニュアルの検討

この章では再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用マニュアルを作成するため、第 5 章までに得られた実験結果を基に、目標強度及び利用フローについて述べている。

第 7 章　分別解体工法の提案

この章では、廃石膏ボードは再資源化されずに最終処分される事例が多いと推察。実態調査を実施し、分別解体工法の手順について述べている。

第 8 章　結論

この章では、本論文の総括を行い、今後の研究課題について述べている。

第 2 章　再生半水石膏の有効利用の現状と課題

2-1　概説

本研究では、廃石膏ボードから得られる再生半水石膏の有効利用に向けて、大量消費が考えられる地盤改良材として利用した際のマニュアルの作成を目的としている。そこで本章では、石膏ボードの現状と課題、再生半水石膏を有効利用する際の長所と短所、さらに再生半水石膏を用いた地盤改良材の有効利用に関する既往の研究についてまとめている。

2.2 節では、石膏ボードの生成過程、利用状況と課題について述べている。さらに、高度経済成長期から建築物の内装材として普及した石膏ボードが家屋の解体とともに廃材として大量発生していることについてもまとめている。2.3 節では、廃石膏ボードの分別解体手法の現況についてまとめている。2.4 節では、石膏の種類と物性について述べている。また、廃石膏リサイクル装置の現場見学で得た再生半水石膏の生成過程についてもまとめている。さらに、再生半水石膏を地盤改良材として有効利用する際の課題についても述べている。2.5 節では、再生半水石膏の固化特性及び環境安全性について 6 つの点に着目し、既往の研究等を用いて様々な影響について述べている。2.6 節では、これらの現状を踏まえ、本研究の着眼点についてまとめている。

2-2　廃石膏ボードの現状と課題

石膏ボードとは、石膏を芯材として両面をボード用原紙で被覆し、板状に成型したものであり、耐火性、遮音性、断熱性、施工性に優れ、経済的にも低廉であることから、建築用内装材として広く普及している。日本では 1921 年に製造が開始され、1940 年代後半から 60 年代前半にかけて、性能面や生産体制の確立、品質管理、新工法の開発等により戦後の住宅復興需要に支えられ、一貫して成長を続けている [1)]。原料石膏は、国内副産石膏(火力発電所からの排煙脱硫石膏等)を主に用い、オーストラリア、タイ等からの輸入天然石膏、新築現場から回収された石膏を使用している。また、ボード用原紙はほぼ全量ダンボール、新聞等の回収古紙を使用している。これらのことから、石膏ボードは建築資材としてその特徴を生かし建築物の安全性と居住性向上に貢献するとともに、リサイクル原料を大量に使用することで地球環境保護に貢献している。しかし近年、循環型社会形成推進基本法が 2000 年(平成 12 年)6 月 2 日公布、施行され、さらに建設リサイクル法が 2002 年(平成 14 年)5 月 30 日に施行されたため、新築現場から排出される廃石膏(新築系廃石膏)、解体現場から排出される廃石膏(解体系廃石膏)のリサイクル処理に焦点が当てられている。現在、各石膏ボード産業関係者は、廃石膏を主として石膏ボード用原料として使用するリサイクルに取り組んでいるが、膨大な量を捌くのは容易ではなく、他の分野でのリサイクル用途の開発が課題となっている。この問題に関しては、過去様々な所で、リサイクル用途が検討されてきているが、現実にはほとんど実績がないのが現状である。さらに、廃石膏ボードは 2006 年(平成 18 年)に紙と石膏に分離して管理型最終処分場に処分することが義務付けられたため、一段とリサイクル用途の開発が要求されることになった。

2-2-1　石膏ボードの生成過程

図-2.1 に石膏ボードの製造工程を示す [2)]。製造工程の概略は以下のとおりである。

①加熱炉で加熱し二水石膏を焼石膏とする。
②粉砕機で適正な粒度に粉砕する。
③焼石膏タンクに貯蔵する。
④焼石膏、水、混和材、添加剤を加え、ミキサーで混練し、上下 2 枚の石膏ボード用原紙の間に流し込む。
⑤フォーミングロールで所定の厚さに成型する。
⑥ベルトコンベア上で焼石膏は水和反応により硬化する。
⑦ほぼ固化したボードはベルトの末端で粗切断する。
⑧ドライヤーを通して余剰水分を乾燥させる。
⑨所定の寸法に裁断し製品となる。

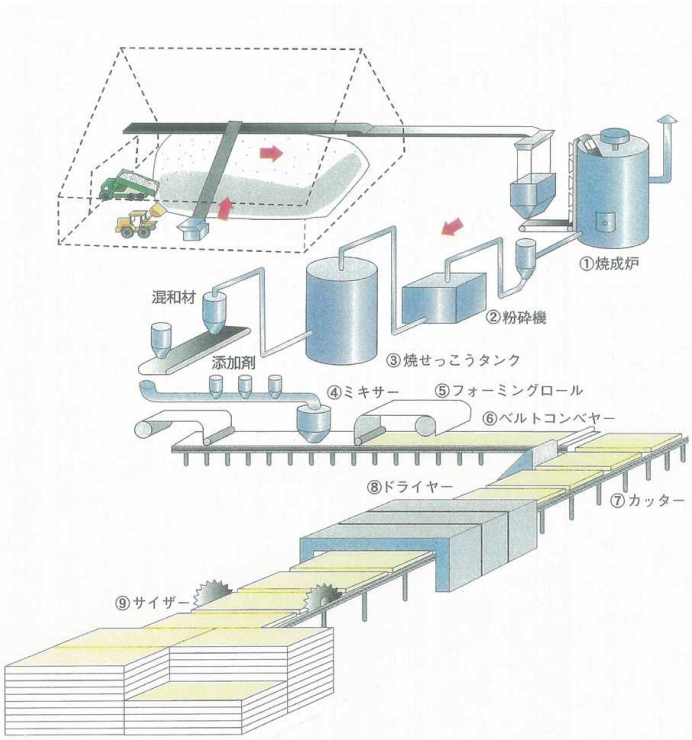


図-2.1　石膏ボード製造工程[3)]

2-2-2　石膏ボードの利用現況と課題

(1)石膏ボードの生産量

図-2.2 に石膏ボード工業会による石膏ボード出荷量の実績と予測を示す。図に示すように、高度経済成長期以降から出荷量は年々増加し 1996 年にピークを迎えた後、減少しほぼ横ばいに推移していることがわかる。また、石膏ボード工業会の今後の出荷量の予測では、2014 年以降は少子化により新設住宅着工戸数が減少することで、石膏ボードの出荷量も減少するとされている[2)]。

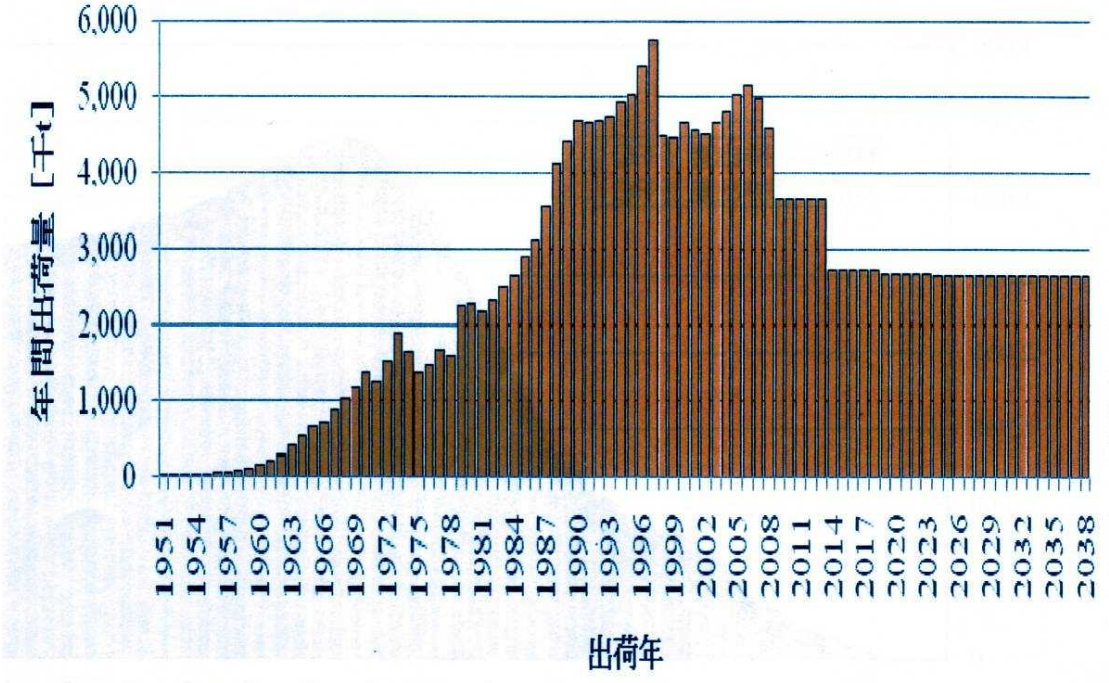


図-2.2　石膏ボード出荷量の実績と予測[2)]

(2)廃石膏ボードについて [1)]

廃石膏ボードは、新築系廃石膏ボードと解体系廃石膏ボードの 2 種類に分類されている。具体的に、新築現場において寸法の合わない箇所を切断して発生したものを新築系廃石膏ボード、耐用年数が過ぎた建築物等を解体する際に発生するものを解体系廃石膏ボードと呼ばれている。**図-2.3** に廃石膏ボードの年間総排出量の石膏ボード工業会による推計結果を示す。図に示すように、新築系廃石膏ボードは 1997 年を境に低下傾向にあり、2004 年度から横ばいに推移していることがわかる。このように新築系廃石膏ボードが減少傾向にあるのは、1995 年に広域再生利用指定制度が制定され、石膏ボード業界が他産業に先駆けて再生資源活用業者の指定を受け、大口建築現場等で発生する廃石膏ボードの回収、再利用を個別企業間の契約に基づき実施したためである。現在、新築現場で発生する廃石膏ボードはこのような対応で建築会社の大口現場を中心として、発生量の 6～7 割程度がメーカーに回収されボード用原料として再利用されている。次に、解体系廃石膏ボードに着目すると、排出量は右肩上がりに上昇していることがわかる。これは解体系廃石膏ボードのリサイクルがほとんどされていない実情を示しており、2006 年 6 月の環境省通達により、紙と石膏に分離して管理型処分場へ処分することが義務付けられた事が大きな要因となっている。今後、建築物の耐用年数の関係から高度経済成長期に建設されたものが、解体され更に廃石膏ボードが排出されることが予想される [1)]。
～160℃であり、間接焼成方式と同様で費用はかかるが半水化率が高く、二酸化炭素削減にも役立っている。

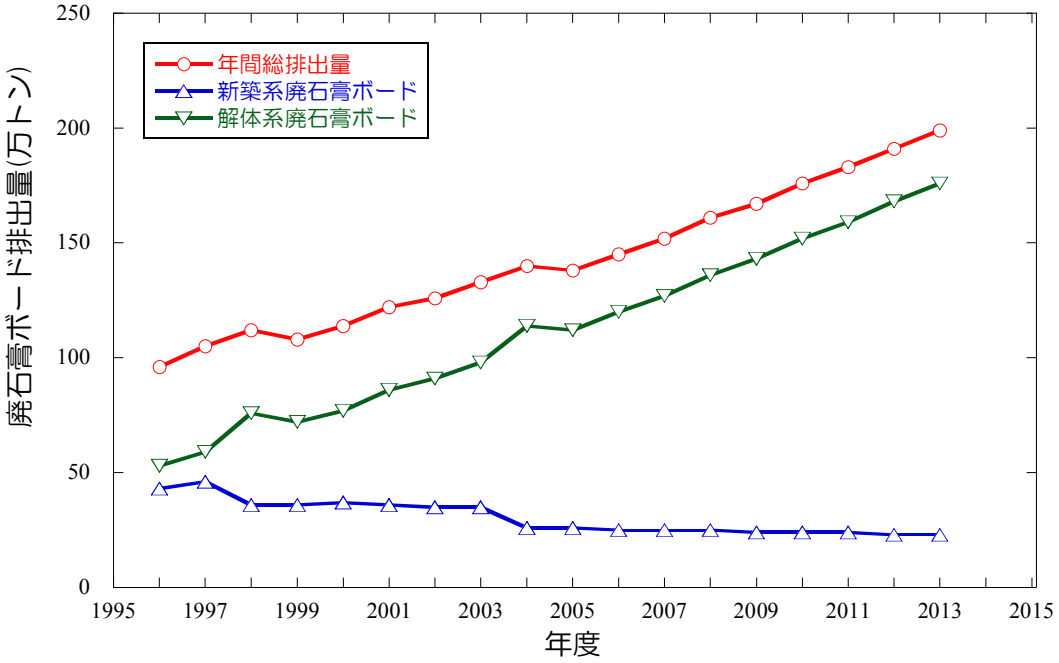


図-2.3　廃石膏ボードの年間総排出量の推計結果 [1)]

(3)廃石膏ボード処理の課題について

現在、廃石膏ボードは紙と石膏に分類して管理型最終処分場に処分することが義務付けられており、それに伴う最終処分場の残余容量の逼迫が問題となっている [4)]。さらに、硫化水素が発生する問題もあり、廃石膏ボードの受入れを嫌がる処分場も多く存在している。また、処理コスト等についても課題が残されている。中間処理業者の解体系廃石膏ボード処理費は 1 万円～1.5 万円/m^3 (2 万円～4 万円/t) が中心価格とされているが、一部中間処理業者の中にはこの約半額で処理を請け負い、不正処理を行っている安価処理業者がいる。そのため、価格が相対的に割高であるリサイクルを行う中間処理業者には物量が集まらず、安価な処理業者の存在がリサイクル進展の阻害要因となっている [1)]。**図-2.4** に最終処分場の残余容量と残余年数の関係を示す。ここで残余年数とは新しい最終処分場が整備されず、当該年度の最終処分量により埋立が行われた場合に、埋立処分が可能な期間(年)であり、(当該年度末の残余容量)÷(当該年度の最終処分量÷埋立ごみ比重)により算出するものである [4)]。(埋立ごみ比重は、0.8163 とする。)図より、残余容量は年々減少しているものの、残余年数は増加していることがわかる。これは、リサイクルを推進する法律が制定され、処分する廃棄物の量が減少したためであると考えられる。

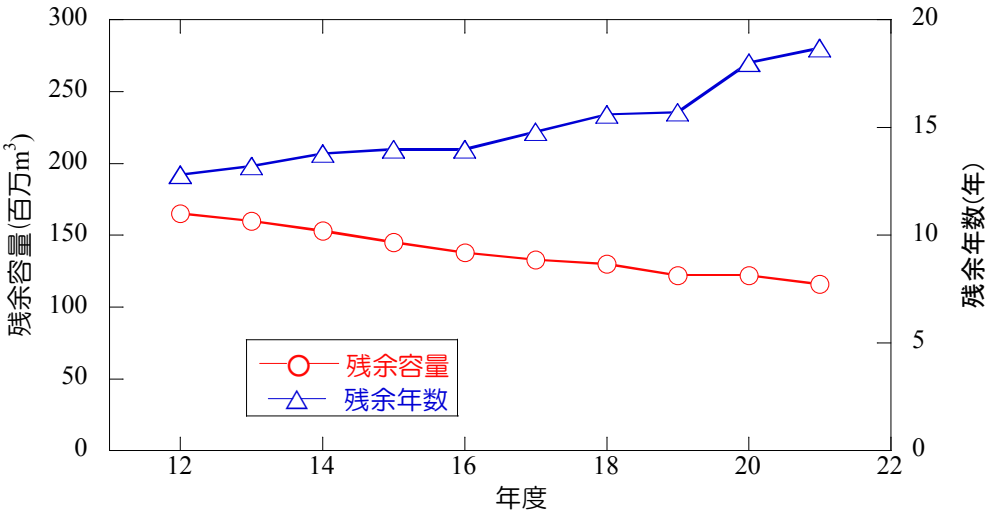


図-2.4　最終処分場の残余容量と残余年数の関係 [4]

(4)廃石膏ボードの処理費用とリサイクル状況について

現在、中間処理業者や石膏ボードメーカーによる廃石膏ボードの処理費用は様々である。新築系廃石膏ボードの処理費用では、都市部の石膏ボードメーカーによる処理費は 1.0 万円/t(石膏ボード工業会ヒアリング)、中間処理業者による処理費は 1.5～3.0 万円/t(中間処理業者アンケート)、管理型処分場による処理費は 2.0～3.0 万円/t(管理型処分場アンケート)、高いところでは 4.0～5.0 万円/t(中間処理業者ヒアリング)と、石膏ボードメーカーが最も安価であるため、石膏ボードメーカーでの処理が多く選択されている [2]。さらに、収集運搬費用の点で、都市部では建設工事の現場から石膏ボード工場までの距離が管理型処分場までの距離に対して近いことも起因していると考えられている。**図-2.5** に新築系廃石膏ボードの処理フローを示す。図中の値は新築系排出量 40 万 t を母数とした構成比、ヒアリング及びアンケートによる概算である。図に示すように石膏ボードメーカーが全て回収し、リサイクルされているのではなく中間処理業者などによっても処理されていることがわかる。

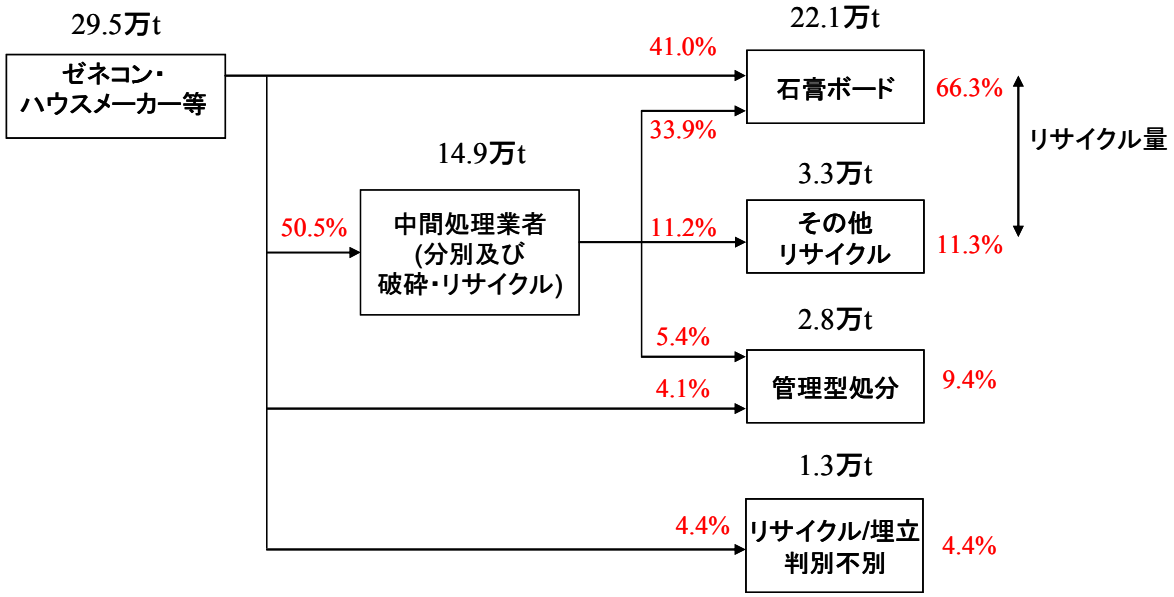


図-2.5　新築系廃石膏ボードの処理フロー [2]

また、解体系廃石膏ボードの処理費用については、中間処理業者による処理費用の 1.2 万円/m^3 が相場となっている。現在、廃石膏ボードを処理し、製品化できる中間処理業者は、各都道府県に多くても 5 社程度であることが環境省によるヒアリング調査で明らかとなっており、全国的に中間処理後の製品製造を行う事業者数が排出量に見合っていない状況であると考えられている。これらの背景から、解体系廃石膏ボードを混合廃棄物として処理を請け負う安価混廃処理業者に処理を依頼するゼネコン・ハウスメーカー等が存在すると報告されている。安価混廃処理業者の処理費は極めて安く、解体系廃石膏ボードを適正にリサイクルする際に必要となる費用の半額程度の場合(5 千円/m^3～6 千円/m^3)の箇所も存在している。安価混廃処理業者による廃石膏ボードのミンチ処理は意図的であり、安定型処分場等への搬入等の不適正処理を行っている。こうした安価処理を行う処理業者が存在するために、必要な集荷が得られず、効率良くリサイクル施設が稼働しないことは、リサイクルが進まない大きな要因の一つとなっている。**図-2.6** に解体系廃石膏ボードの処理フローを示す。図中の値は排出量 74.0 万 t を母数とした構成比を示している。この処理フローからも、新築系廃石膏ボードよりもリサイクルが進んでいないことがわかる。

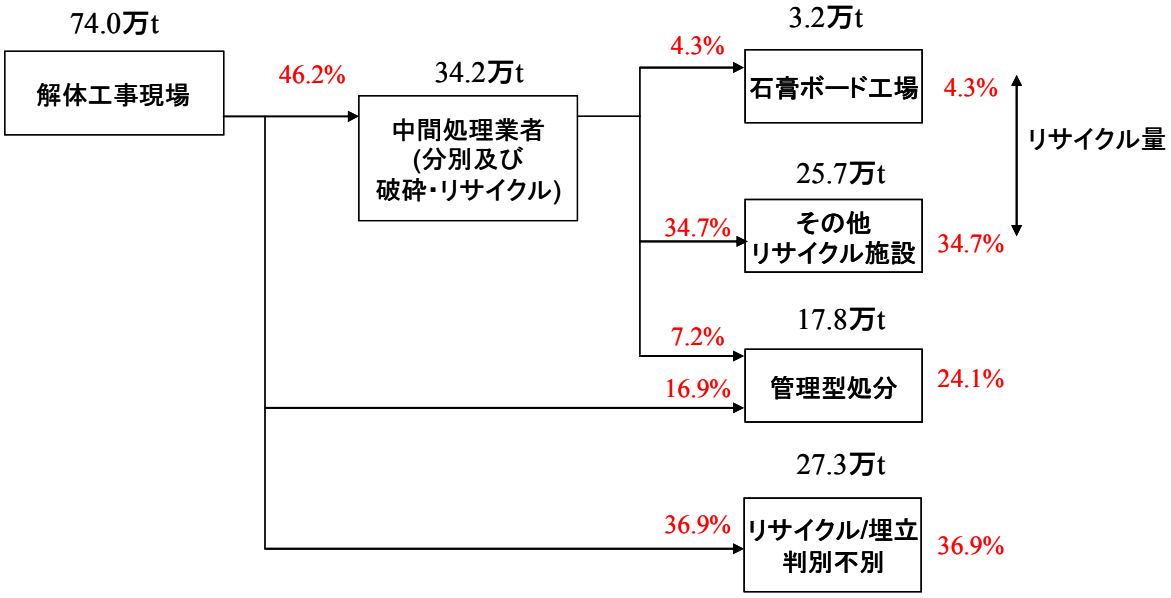


図-2.6　解体系廃石膏ボードの処理フロー [2)]

一般的に、リサイクル製品については、地方自治体の販売促進支援や、公的機関による環境物品等の調達を推進するとともに、再生品市場創出のためのグリーン購入法に基づく取り組みも進められている。解体系廃石膏ボードについても一部製品が自治体のリサイクル製品として認定されているものの、市場の形成がほとんど進んでいない状況にある。例として、土壌固化材メーカーについては、製品の品質にばらつきが出ることや、安定供給の面を危惧しており、現状で特別支障がないことから敢えて再生品を使うまでに至らないという実態がある [4)]。

これらのことから、今後廃石膏ボードを適正にリサイクルしていくためには、石膏ボードメーカーへの受入れを積極的に行うようにしていかなければならない。具体的には、自治体または国からの支援を行い、ゼネコン・ハウスメーカー等に受入れを促していくべきである。さらに、地盤改良材として実地盤へ使用する際の利用マニュアル等を作成して廃石膏ボードのリサイクルを促進することも一つの方法であると考えられる。

2-3　廃石膏ボードの分別解体手法について

(1) 概要

現在、廃石膏ボードの年間総排出量は年々増加している。その内、約 8 割は解体系石膏であり総排出量の大部分を占めている。そのため、解体現場から排出される解体系廃石膏ボードのリサイクルが急務とされている。解体現場から排出する廃石膏ボードは、約半分が中間処理施設へ、分別できないものは管理型最終処分場へと移送されている。しかし、中間処理施設に搬入される廃石膏ボードは不純物などが付着したままであり、分離・選別作業に多くの時間を費やしているため、リサイクルが効率良く進んでいない現状がある。そこで、今後廃石膏ボードのリサイクルを普及させていくには、中間処理業者に移送する前段階である解体現場での分離・選別作業を実施し、処理コストを削減することがリサイクル普及への対策と考えられる[5]。

押方らは、これまでに廃石膏ボードの分別解体手法の実態調査及び実証試験を行っている。ここでは、その研究結果について報告する。昨年度までに、廃石膏ボードが中間処理施設に搬入された時点での組成に関する実態調査を実施した結果、**図-2.7** に示すように、搬入された解体系廃石膏ボード中には、廃石膏ボード単体のものは 40.9%でしかなかった。その他は、ビニールクロス等が付着したものが 58.4%と最も多く混入していた。その他の混入物としては、電線や廃プラスチック類等が 0.1%、モルタル等の付着物 0.4%、木くず 0.1%、金属くず 0.1%であった。このように実際に解体現場から中間処理施設に搬入された廃石膏ボード中には、多くの不純物が付着したまま搬入されていることを明らかにした。

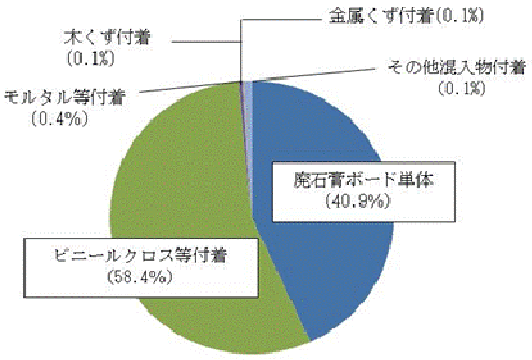


図-2.7　解体系廃石膏ボードの組成結果[5]

このため、廃石膏ボードの中間処理施設では 2～3 名の作業員が手選別で不純物の分離・選別作業を行っている。このような選別作業には多くの手間と労力を要していることから、この不純物の分離・選別作業を解体現場で実施できないかと考えた。そこで、本年度は、廃石膏ボード解体工事の実態調査を行い、分別解体工法の検討および分別解体工法の実証試験を実施した。

(2) 調査研究の目的

解体工事の実態を把握し、廃石膏ボードリサイクル施設での前処理（破砕・選別機に投入する前に不純物除去）作業の軽減を目的に、分別解体手法の検討と分別解体工法の実証試験を行う。

(3) 調査方法と調査項目

解体工事の実態調査は 7 物件で実施した。解体工事の実態調査及び分別解体工法の実証試験の調査項目は、①対象物件の用途、②構造、③築後年数、④延床及び建築面積、⑤石膏ボードが施工された部位（壁、柱・梁、天井）の現況調査（表面仕上げ材の種類、下地材、取り付け工法、施工面積）、⑥分別方法、⑦粉じん防止対策のための散水の有無、⑧廃石膏ボード解体撤去・分別作業に要した延べ作業員数、⑨解体現場での保管方法、⑩処理・処分方法、⑪廃石膏ボード排出量とした。**図-2.8** に分別解体工法の手順を示す。

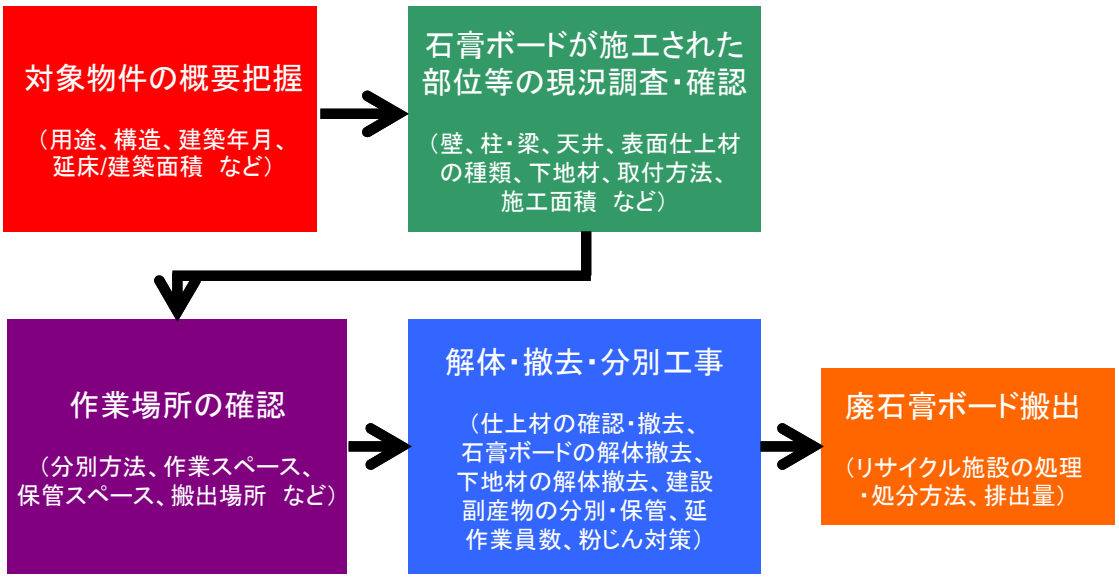


図-2.8　分別解体工法の手順[5]

(4) 調査結果及び考察

①解体工事物件

実証試験の対象とした解体工事物件の概要を**表-2.1** に示す。建築物の用途は事務所 2 箇所、教育施設 2 箇所、住宅 3 箇所であった。建築物の構造は、事務所（2 箇所）が RC 造、教育施設（2 箇所）が S 造、住宅はいずれも木造であった。また、延床面積では、RC 造の事務所ビルが 2,066m^2 と 319m^2、S 造の教育施設が 132m^2 と 250m^2、住宅は 159m^2、94m^2、170m^2 であり、今回の調査対象物件は比較的規模が小さなものが多かった。さらに、工事の種類は解体工事 5 件、改築工事 2 件であった。

表-2.1　実証試験の対象とした解体物件の概要[5]

物件 No.	建物仕様			面積（㎡）		工事の種類
	用途	構造	築後年数	延床面積	建築面積	
1	事務所	RC造	不明	2, 066	1, 024	解体工事
2	事務所	RC造	40年	319	187	解体工事
3	教育施設	S造	不明	132	—	改築工事
4	教育施設	S造	12年	250	250	改築工事
5	住宅	木造	20年	159	101	解体工事
6	住宅	木造	不明	—	94	解体工事
7	住宅	木造	不明	—	170	解体工事

表-2.2 は実態調査対象物件での作業内容を取りまとめて示している。解体現場での分別は、表面仕上材、下地材（木製、金属製）、取り付け器材、石膏ボードとその他の建設廃材に分別した。なお、分別した建設廃材は種類ごとに集積・保管した。粉じん防止対策としては、散水あり 2 か所、散水なしが 5 か所であった。なお、散水ありの場合はシート掛けをして廃石膏ボードの水濡れ防止に努めていたと報告されている。

石膏ボードの解体撤去及び分別作業に要した延べ作業工数は、できるだけ撤去作業と分別作業に分けて報告するように調査を指示したが、残念ながら撤去分別併用との回答が 7 現場中 3 現場から報告された。撤去作業と分別作業に分けて報告された 4 現場の平均延べ作業時間は、撤去作業に 60%を要し、分別作業に 40%が割かれていた。この 40%に相当する人件費が分別解体工事費を割高にする要因になると示唆された。

次に、保管方法であるが、屋内保管が 6 現場、屋外保管が 1 現場であった。また、フレコンバッグによる保管が 6 現場と最も多かった。さらに、処理・処分方法は、自社処分場（石膏と紙に分離する中間処理施設）への搬出が 5 現場、他社処分場への搬出が 2 現場であった。なお、現場から廃石膏ボードが排出されるときは容量標記（m^3）であるが、中間処理施設ではトラックスケールを介して計量・受け入れされるため重量標記（t もしくは kg）になる。

表-2.2　実態調査対象物件での作業内容まとめ[5)]

物件No.	分別方法				粉じん防止		作業に要した工数			保管方法		処理・処分方法		廃石膏ボード排出量（m^3）
	表面仕上材	下地材	取り付け器材	石膏ボードとその他の建設廃材を分別	散水あり	散水なし	撤去作業のみ	分別作業のみ	撤去分別併用	屋内保管	屋外保管	自社処分場	他社処分場	
1	吸音テックス	木製，金属製	—	—		○	延べ48時間（6人×8時間/人）	延べ32時間（4人×8時間/人）		野積み			○	25
2	—	金属製	—	—		○	延べ16時間（2人×8時間/人）	延べ16時間（2人×8時間/人）		フレコンバッグ			○	4
3	—	木製，金属製	—	○		○			延べ40時間（5人×8時間/人）	フレコンバッグ		○		2
4	—	木製，金属製	—	○	○				延べ64時間（8人×8時間/人）		フレコンバッグ	○		21
5	—	木製	—	○		○			延べ8時間（1人×8時間/人）	フレコンバッグ		○		3
6	紙クロス	木製	ビス	○		○	延べ10時間（2人×5時間/人）	延べ3時間（1人×3時間/人）		フレコンバッグ		○		25
7	紙クロス	木製	くぎ	○	○		延べ8時間（1人×8時間/人）	延べ4時間（1人×4時間/人）		フレコンバッグ		○		4

表-2.3 は石膏ボードが施工された部位（壁、柱・梁、天井）ごとに表面仕上材、下地材、取り付け工法、施工面積について現況を調べた結果を示した。今回の実態調査を行った現場で石膏ボードが使用されていた部位は、壁と天井であった。また、今回の調査では大型現場であった物件 No.1 は、部屋の利用目的により表面仕上材、下地材に違いがあることがわかる。その他の現場では、表面仕上材として紙クロスが使用されていた。下地材は建築物の構造による違いは見られず、木製及び金属製下地材が使用されていた。取り付け工法は木製下地材の場合はくぎ止め工法が、金属製下地材の場合はビス止め工法が採用されている。

表-2.3　石膏ボードが施工された部位の現況調査結果[5)]

物件No.	部位			表面仕上材	下地材	取り付け工法	施工面積（m^2）
	壁	柱・梁型	天井				
1	○			紙クロス	木製	くぎ止め	65
	○			なし	木製	くぎ止め	430
	○			なし	金属製	くぎ止め	25
			○	吸音テックス ロックウール吸音板	金属製 石膏ボード	ビス止め	155
			○	なし	金属製	ビス止め	620
2			○	紙クロス	金属製	ビス止め	158
3			○	不明	木製 金属製	くぎ止め ビス止め	132
4			○	不明	木製	くぎ止め ビス止め	230
5			○	紙クロス	木製	くぎ止め ビス止め	31
6	○			紙クロス	木製	ビス止め	15
7	○			紙クロス	木製	くぎ止め	57

表-2.4 は廃石膏ボードから石膏と紙に分離する中間処理施設に搬入された時点で組成調査を実施した結果を示している。受入時の荷姿は現場で保管されていた状況、すなわちフレコンバッグで保管していた現場からはそのままフレコンバッグを 4 トン車もしくは 2 トン車に積み替えて搬入されている。一方、屋内に野積みしていた現場からは、4 トン車にバラ積みし、その上にシーを掛けて搬入された。受入時点の廃石膏ボードの組成は、7 現場を個別にみると廃石膏ボード単体（付着物なし）は 81.6%～100%となっている。前述のとおり昨年度の調査結果は図 1 に示したように廃石膏ボード単体は 40.9%であったので、今回の実態調査対象現場ではきちんと石膏ボードの撤去作業ならびに分別作業がなされていたと考えられる。また、7 現場の平均では廃石膏ボード単体が 98.5%、その他表面仕上げ材付着物が 1.4%、石膏ボード以外の建設廃材（混入物）が 0.1%であった（**図-2.9** 参照）。

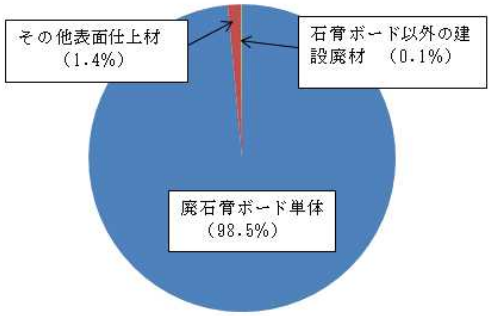


図-2.9 解体現場から搬出された廃石膏ボードの組成調査結果 [5)]

表-2.4 実態調査対象物件から搬入された廃石膏ボード組成調査結果 [5)]

物件No.	受入時の荷姿	運搬車両	受入れ時の廃石膏ボード重量（ｋｇ）	受入れ時の廃石膏ボード組成（ｋｇ）							
				廃石膏ボード単体（付着物なし）	ビニールクロス付	その他表面仕上材付	木製下地材付	金属製下地材付	クリップ付	その他取り付け器具	石膏ボード以外の建設廃材（混入物）
1	バラ（シート掛け）	４ｔ車（フックロール車）	8,580	8,573.4	0	0	0	0	0	0	6.6
2	フレコンバッグ	４ｔ車（トラック）	1,350	1,350	0	0	0	0	0	0	0
3	フレコンバッグコンテナ（シート掛け）	４ｔ車（フックロール車）	920.3	920	0	0	0	0	0	0	0.3
4	フレコンバッグその他（荷台シート掛け）	４ｔ車（トラック）	2240.4	2,234.8	0	0	0	0	0	0	5.6
5	フレコンバッグ	２ｔ車（フックロール車）	170	167.8	0	0	0	0	0	0	2.2
6	フレコンバッグ	４ｔ車（トラック）	441	359.9	0	紙クロス８０	0	0	0	0	1.1
7	フレコンバッグ	４ｔ車（トラック）	950	827	0	紙クロス１２０	0	0	0	0	3

表-2.5 は中間処理施設で破砕・選別機に投入する前に行う不純物の除去作業後の組成調査結果を示した。この前処理作業の目的は、破砕・選別機の損傷や磨耗及び回収した石膏の品質確保に支障をきたす原因になる不純物を機械に投入する前に取り除くことである。そこで、不純物を事前に除去するために、選別すべき対象物は次の 5 品目を設定した。

①表面仕上材（ビニールクロス、壁布など）
②下地材（木製、金属製、ボードなど）
③取り付け器材（クリップ）
④石膏ボードとその他の建設廃材（混入物）
⑤選別しない

この選別作業に要した工数は搬入廃棄物量と必ずしも比例していないが、2～3 人の作業員が前処理作業に従事した。ここで、物件 No.2 は**表-2.4** では廃石膏ボード単体（付着物なし）100%として搬入された。しかしながら、前処理の結果、石膏ボード単体は 96.91%、ビニールクロス付着 2.96%、木くず 0.04%、金属くず 0.04%、ビニール・プラスチック

類 0.01%、モルタル・タイル類 0.04%であった。このことから、現場ではよく分別しているように見えても、中間処理施設ではこれらの不純物が除去されていることがわかる。また、7 現場の平均では廃石膏ボード単体が 99.43%、ビニールクロス付着 0.37%、その他表面仕上材付着が 0.06%、木くず 0.04%、金属くず 0.05%、ビニール･プラスチック類 0.01%、モルタル・タイル類が 0.04%であった。

昨年度実施した中間処理施設での前処理後の組成調査結果は、廃石膏ボード単体が 97.0%、ビニールクロス付着が 0.9%、モルタル・タイル類が 0.7%、木くずが 0.3%、金属くずが 0.3%、その他混入物が 0.8%であった。今回の実態調査結果のほうが廃石膏ボード単体の占める割合は高くなっているが、同様な不純物の種類が混入しており大きく異なっている結果にはならなかった。

表-2.5　前処理（破砕・選別機に投入する前の選別作業）の結果[5)]

物件No.	選別方法	選別作業に要した工数	選別後の組成（ｋｇ）							
			廃石膏ボード単体	ビニールクロス	その他表面仕上材	木くず	金属くず	ビニール・プラスチック類	モルタル・タイル類	合計
1	・下地材（木製、金属製）の選別 ・取り付け器材（クリップ）を選別 ・石膏ボードとその他の建設廃材（混入物）を選別	延べ27時間（3人×9時間/人）	8,573.4	0	0	2.7	3.5	0.4	0	8,580
2	・下地材（木製、金属製）を選別 ・石膏ボードとその他の建設廃材（混入物）を選別	延べ24時間（3人×8時間/人）	1,308.3	40	0	0.5	0.5	0.2	0.5	1,350
3	・下地材（木製）を選別 ・取り付け器材（クリップ）を選別 ・石膏ボードとその他の建設廃材（混入物）を選別	延べ4時間（2人×2時間/人）	920	0	0	0.1	0.1	0.1	0	920.3
4	・表面仕上材（ビニール）を選別 ・下地材（木製、金属製）を選別 ・取り付け器材（クリップ）を選別 ・石膏ボードとその他の建設廃材（混入物）を選別	延べ16時間（2人×8時間/人）	2,220	14.8	0	0.7	2.8	0.5	1.6	2,240.4
5	・下地材（木製）を選別 ・石膏ボードとその他の建設廃材（混入物）を選別	延べ2時間（1人×2時間/人）	167.8	0	0	0.6	0	0.2	1.4	170
6	・表面仕上材（紙クロス）を選別 ・下地材（木製）を選別 ・取り付け器材（クリップ）を選別 ・石膏ボードとその他の建設廃材（混入物）を選別	延べ5時間（2人×2.5時間/人）	433.5	0	（紙クロス）6.4	0.5	0.5	0.1	0	441
7	・表面仕上材（紙クロス）を選別 ・下地材（木製）を選別 ・取り付け器材（クリップ）を選別 ・石膏ボードとその他の建設廃材（混入物）を選別	延べ12時間（3人×4時間/人）	944.7	0	（紙クロス）2.8	0.4	0.05	0.25	1.8	950
合計			14567.7	54.8	9.2	5.5	7.45	1.75	5.3	14651.7

以上の結果をまとめると、今回の実態調査は、在来工法で解体を行っていると思われる 7 現場を調査対象としたが、実態調査に入ると事前に通告していたことや（社）福岡県建造物解体工業会のメンバー企業を調査対象にしたこともあり、いずれの現場でも当初予想していた一部ミンチ解体工法は採用されておらず、いずれでもきちんと分別解体（撤去・分別）がなされていた。

ここでは、実態調査の一実施例を報告する。

1）解体工事等の概要

① 対象物件の用途：事務所ビル

② 構造：RC 造

③ 築後年数：40 年

④ 延床面積：319.61 m^2

⑤ 建築面積：319.61 m^2

⑥ 石膏ボード敷設面積：158m^2

⑦ 石膏ボードの現況調査：部位（天井）、表面仕上げ材（紙クロス）、下地（鋼製）、取り付け方法（ビス止め）

⑧ 廃石膏ボード解体現場の延べ作業時間：48 時間（撤去作業）、32 時間（分別作業）

⑨ 粉じん防止対策のための散水の有無：なし

⑩ 現場での分別の有無：あり

⑪ 解体現場での保管方法：屋内保管（フレコンバッグ）

⑫ 処理委託先：他社（民間処理業者）

⑬ 廃石膏ボード排出量：4m^3

2) 中間処理施設に搬入された廃石膏ボード中の不純物調査

① 搬入量：1,350kg

② 搬入された廃石膏ボードの種類：クロス類付廃石膏ボード

③ 搬入された廃石膏ボードに混入している不純物の選別作業に要した延べ作業時間：24 時間

④ 前処理後の廃石膏ボードの組成

ア．廃石膏ボード単体：1,308.3kg（96.91%）

イ．ビニールクロス(石膏ボードの紙も含む)：40.0kg（2.96%）

ウ．木くず：0.5kg（0.04%）

エ．金属くず：0.5kg（0.04%）

オ．モルタル・タイル類：0.5kg（0.04%）

カ．ビニール・プラスチック類：0.2kg（0.01%）

(5) まとめ

7 現場の平均では廃石膏ボード単体が 98.5%となり、中間処理施設での前処理により付着・混入していた不純物を取り除いた結果と同程度の組成割合であった。このことから、今回の実証試験対象現場では石膏ボードの解体撤去および分別作業が概ね適正になされていたと考えられる。しかしながら、実証試験 7 現場を個別にみると廃石膏ボード単体（付着物なし）は 81.6%～100%の範囲となっており、①作業ルールの徹底、②解体撤去および分別する品目の再確認と周知方法、③保管方法の再確認と徹底、④調査票への記入上の留意点の再確認と徹底が今後の課題である。

2-4 再生半水石膏について

2-4-1 石膏の物性と種類

(1) 石膏の物性

石膏は硫酸カルシウムの一般名として知られる物質で、古代からアラバスタ(雪花石膏)或いはセレナイト(透石膏)を用いた工芸品をはじめ、天然石材、積石の目地用の石膏モルタル或いは石膏プラスターとして用いられたのに始まる[6]。以来、二水石膏は焼き石膏製造原料として、ポルトランドセメント系セメントの凝結緩和材用、農業用、更に無水石膏とともに顔料、フィラー、硫酸根資材として広く利用されている。また、半水石膏は焼き石膏として、その水和硬化性を利用して建築材料として多量に用いられ、更に陶磁器工業、金属精密鋳造、歯科、外科医療、美術工芸などにおける型材などとしても広く使用されている。

石膏は結晶形ごとに物性が異なる。硫酸カルシウム(石膏)の相としては、二水石膏、半水石膏、3 種類の無水石膏があり、さらに相律上の相としてではないが、半水石膏とⅢ型無水石膏にそれぞれα、β型の 2 種類があり、全体では 7 種類に分類することができる。**表-2.6** に硫酸カルシウムの各形態の生成条件と物性を示す。

表-2.6 硫酸カルシウムの各形態の生成条件と物性[6]

	二水石膏	半水石膏		Ⅲ型無水石膏		Ⅱ型無水石膏		Ⅰ型無水石膏
		α	β	α	β	難溶性	不溶性	
平衡生成温度(℃)		>97 水中	>45 大気中	>50真空中 100大気中	107大気中	α型半水石膏から177 β型半水石膏から300		>1180
工業的生成温度(℃)		105～150	125～160	110～220	180～220	>350	>400	
示性式	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	α-$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$	β-$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$	Ⅲα-$CaSO_4$	Ⅲβ-$CaSO_4$	Ⅱ-$CaSO_4$		Ⅰ-$CaSO_4$
式量	172.17	145.15	145.15	136.14	136.14	136.14		136.14
結晶水(%) 理論値	20.92	6.21		0		0		0
結晶水(%) 実験値	20.92	6.21～8.0	6.21～8.9	0.02～0.05	0.2～0.9	0		0
比 重(g/cm3)	2.315	2.757	2.619～2.637	2.587	2.484	2.93～2.98		
比 熱(cal/mol)	21.84+0.076T	16.95+0.039T	1.148+0.061T	14.10+0.33T		14.10+0.33T		
水和熱(cal/mol)		4100±20	4600±20	6150±20	7210±10	4030±20		
溶解度 3℃	0.1810	0.825	1.006		1.15	0.377		
溶解度 50℃	0.2038	0.426	0.426		0.48	0.184		

石膏硬化体の強度に影響する因子のうち最大のものは含有水分である。その他、混錬温度、混錬時間、混錬強さ、添加物などがある。石膏硬化体の強度は、含有する自由水の量によって著しく影響されるので、セメント系の硬化体の場合と著しく相違する。つまり、わずか1～2%の自由水の含有によって強度は急激に低下して乾燥強度の40%程度となる。それ以上は水分が増加してもほとんど変わらない。これにより硬化体を形成している二水石膏のからみ合った結晶が、僅かの水分によって湿潤し、結晶間の摩擦抵抗や結晶吸引作用が弱められると考えられている[6]。各種石膏の物理化学的性質を**表-2.7**に示す。

表-2.7　各種石膏の物理化学的性質[6]

項　目		α-半水石膏	β-半水石膏	Ⅱ-無水石膏[*1]
比表面積 (cm^2/g)		3490	5790	7840
比　重		2.74	2.59	2.93
標準混水量 (%)		36.7	84.7	35
フロー値 (mm)		226	276	170
凝結[*1] h-min	始発	0-18	0-8	0-22
	終結	0-50	0-18	0-35
曲げ強さ (kg/cm^2)	2hまたは1d	77.2(2h)	30.4(2h)	73.3(1d)
	7d	147.7	45.0	82.1
圧縮強さ (kg/cm^2)	2hまたは1d	175(2h)	37(2h)	333(1d)
	7d	398	73	381

(2)化学石膏の種類

化学石膏は、リン酸石膏、チタン石膏、フッ酸石膏、排煙脱硫石膏、硬水・精錬石膏など多岐に渡り産出する業種は様々なものがある。化学石膏は微粉であるため、焼成前の粉砕は必要としないが、生産する業種により石膏の粒子に遊離酸分、水溶性塩類、有機物等、石膏の凝結を妨げる物質が付着している場合が多いので、フローテーション、洗浄などを行い有害物質を取り除く必要がある[6]。さらに、付着水分を多く含むため水分の調整や均一化を図るため乾燥機で乾燥する場合がある。**表-2.8**に石膏原料の消費量・構成比を示す。表に示すように、排煙脱硫石膏は全体産出量の33%を占めていることがわかる。

表-2.8　石膏原料の消費量・構成比[6]

単位:トン($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 10 0%換算)

	年度	国産							輸入				廃せっこうボード					合計
		りん酸石膏	排脱石膏	チタン石膏	フッ酸石膏	鉱水 精錬石膏	その他	小計	天然石膏	りん酸石膏	その他	小計	工場 加工	新築現場回収	解体現場回収	その他	小計	
統計	平成18年	514,396	1,703,508	266,468	0	255,503	439,536	3,179,411	1,784,074	860	0	1,784,934	116,075	260,766	22,352	2,155	285,273	5,249,618
	19年	493,610	1,581,044	270,885	0	232,074	457,314	3,034,927	1,537,306	900	0	1,538,206	107,590	267,341	20,509	3,565	291,415	4,864,548
	20年	459,160	1,570,480	266,400	0	251,570	476,900	3,024,510	1,386,902	900	0	1,387,802	100,335	246,106	20,170	4,800	271,076	4,683,388
	上	227,890	769,940	126,160	0	125,960	220,300	1,470,250	695,865	450	0	696,315	49,049	121,348	10,085	2,400	133,867	2,300,432
	下	231,270	800,540	140,240	0	125,610	256,600	1,554,260	691,037	450	0	691,487	51,286	124,758	10,085	2,400	137,209	2,382,956
	21年	463,810	1,545,300	273,100	0	251,700	445,400	2,979,310	1,434,680	900	0	1,435,580	102,769	247,231	20,220	4,800	272,251	4,687,141
構成比(%)	平成18年	9.80%	32.45%	5.08%	0.00%	4.87%	8.37%	60.56%	33.98%	0.02%	0.00%	34.00%		4.947%	0.43%	0.04%	5.43%	100.0%
	19年	10.15%	32.50%	5.57%	0.00%	4.77%	9.40%	62.39%	31.60%	0.02%	0.00%	31.62%		5.540%	0.42%	0.07%	5.99%	100.0%
	20年	9.80%	33.53%	5.69%	0.00%	5.37%	10.18%	64.58%	29.61%	0.02%	0.00%	29.63%		5.255%	0.43%	0.10%	5.79%	100.0%
	上	9.91%	33.47%	5.48%	0.00%	5.48%	9.58%	63.91%	30.25%	0.02%	0.00%	30.27%		5.288%	0.44%	0.10%	5.82%	100.0%
	下	9.71%	33.59%	5.89%	0.00%	5.27%	10.77%	65.22%	29.00%	0.02%	0.00%	29.02%		5.233%	0.42%	0.10%	5.76%	100.0%
	21年	9.90%	32.97%	5.83%	0.00%	5.37%	9.50%	63.56%	30.61%	0.02%	0.00%	30.63%		5.297%	0.43%	0.10%	5.81%	100.0%

※20年度は19年度までの実績値から予測

出典:経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課資料

2-4-2　再生半水石膏の生成過程

石膏ボードメーカーや中間処理業者は、新材の製造過程において排出される端材や解体現場から発生した廃石膏ボードを回収し、リサイクル可能のものは再利用を、不可能なものについては管理型最終処分場にて処分している。リサイクル装置は主に直接焼成方式、間接焼成方式、IH 焼成方式の 3 種類に分類されている。その中でもここでは、平成 23 年 7 月に見学した㈲大牟田エコクリーンでの IH 式廃石膏半水化装置についてまとめる。

廃石膏処理施設に搬入される廃石膏ボードは、紙と石膏が付着した状態である。紙が付着した状態では良質な再生半水石膏は生成されないため、まず分別機にて紙と石膏に分離し、粉砕する工程が行われる。**写真-2.1** に搬入された廃石膏ボード、**写真-2.2** に分別機に投入する様子、**写真-2.3** に粉砕ローラー、**写真-2.4** に分別、粉砕された廃石膏粉(二水石膏)を示す。

写真-2.1　搬入された廃石膏ボード

写真-2.2　投入されている様子

写真-2.3　粉砕ローラー

写真-2.4　分別・破砕後の廃石膏粉

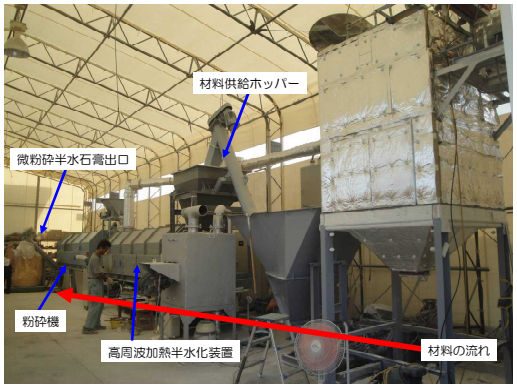


写真-2.5　IH 式焼成装置

写真-2.6　再生半水石膏

分別・破砕機で得られた廃石膏粉(二水石膏)は、半水化装置に投入される。IH 式廃石膏半水化装置とは、回転キルンを高周波で外部加熱することにより、化石燃料のバーナーでの加熱脱水する方式であった直接焼成方式の問題点であった焼成温度のばらつきを無くし、良質な再生半水石膏を安定的に製造できる。さらに、熱効率が高く、電気のみで稼動する IH 方式を採用しているため、作業環境が大幅に改善され、バーナー式と比べてランニングコストを低く抑える

ことができる。**写真-2.5** に IH 式焼成装置の全景を示す。作業工程としては、材料供給ホッパーに分別・破砕後の廃石膏を投入し高周波加熱半水化装置で焼成した後、粉砕して搬出される流れとなっている。得られた再生半水石膏を**写真-2.6** に示す。本研究では IH 式焼成装置で得られた再生半水石膏を改良材として使用している。

2-4-3　再生半水石膏の固化特性の特徴と課題

図-2.7 に石膏の化学反応式を示す。再生半水石膏は、水を加えると水和反応を起こし二水石膏に変化するが、その際に短時間で硬化するという性質を有しており、このような硬化作用が地盤改良効果に期待できる。また、石膏は中性無害であり、従来使用されてきた強アルカリの石灰やセメント系固化材に比べ、環境に優しい固化材であるといえる。力学面での課題としては、加水に伴う凝結硬化の際にわずかに膨張する。さらに、石膏の硬化体は水に対して弱く(水溶性)、石膏を地盤改良材として用いる場合には、雨水・地下水の影響で石膏中の重金属が溶出する可能性が懸念される。環境面においても、化学石膏に含有されている Fの溶出や、硫化水素の発生等の課題がある。そのため、耐水性または撥水性の添加物を混合し、耐水性を向上させ重金属等の溶出を抑制する研究が必要である。

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O \underset{②加水}{\overset{①加熱}{\rightleftharpoons}} CaSO_4 \cdot 1/2H_2O + 3/2H_2O$$

二水石膏 (硫酸カルシウム・2水和物)　　半水石膏　脱水蒸発 (硫酸カルシウム半水和物)

・・・式-1.1　石膏の化学反応式 ※再掲

2-4-4　再生半水石膏の溶出特性

再生半水石膏から Fが含有している原因として、火力発電所から副産物として発生する排煙脱硫石膏が石膏ボード原材料として使用されていることが考えられる。**図-2.8** に排煙脱硫石膏のメカニズムを示す。まず、火力発電所から排出された硫黄酸化物やフッ化水素を含む排ガスをボイラに投入し、脱硫剤として SO_2 に対して吸収性のある石灰石を添加する。そして図に示す化学反応式のような反応が起こる。排ガスは清浄な状態で排出し、亜硫酸カルシウムは酸化して石膏となるが、それと同時にフッ化水素と消石灰が反応してフッ化カルシウムを生成し排煙脱硫石膏中に混入することが考えられている。

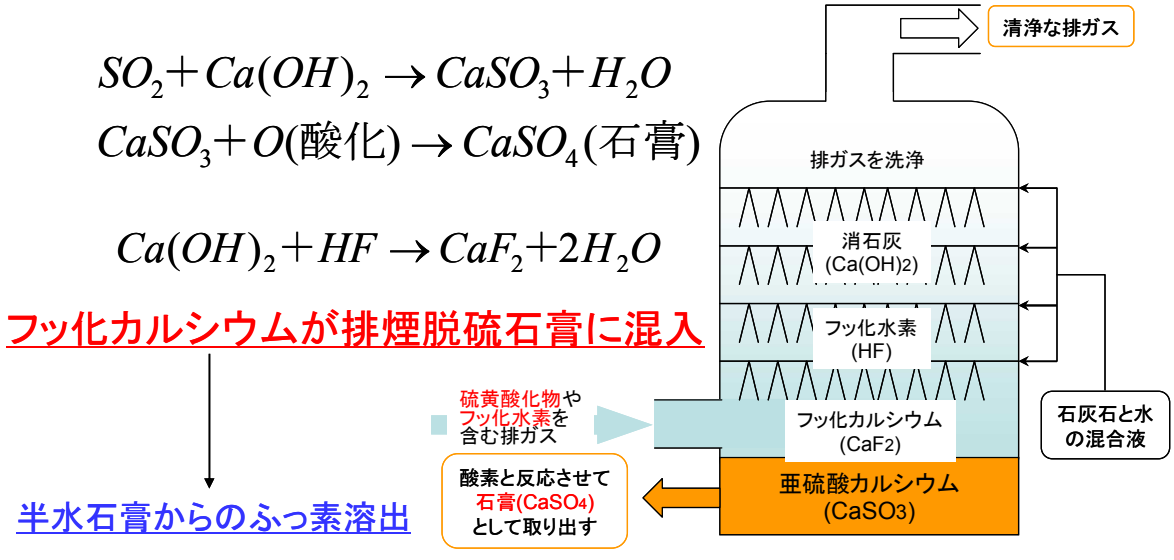


図-2.8　排煙脱硫石膏のメカニズム

2-4-5　硫化水素発生特性

(1) 硫化水素ガスに対する発生抑制の検討背景

平成 11 年 10 月、福岡県筑紫野市の安定型最終処分場の浸透水排水ピット内において、浸透水の水質検査のためサンプリング作業の際、硫化水素中毒と疑われる作業員 3 名の死亡事故が発生した。その後の処分場内部のボーリング調査により、最高で 15000ppm の硫化水素ガスが検出された。環境省はこの事故を受けて、安定型最終処分場における硫化水素発生の原因究明と必要な当面の対策の検討を行った。その後、紙を除去した後の石膏ボードからも高濃度の硫化水素が発生する恐れがあることが明らかとなり、紙と石膏に分離して管理型最終処分場に処分することが義務付けられた。

(2) 硫化水素発生条件と発生メカニズム

硫化水素ガスが発生するには、①硫酸塩（S）の存在、②硫酸塩還元菌の存在、③硫酸塩還元菌の基質となる有機物の存在、④滞留水の存在、⑤嫌気性の環境の存在（水没状態で酸素のない状態）の 5 つの全ての条件が揃う必要があり、発生条件を一つでも欠如することで発生を抑制することができる。

硫化水素発生要因は硫酸還元によるものである。硫酸還元は、同化的硫酸還元と異化的硫酸還元の 2 パターンに分かれる。前者の同化的硫酸還元とは、生物が必要とする有機硫黄化合物を作るための還元で、同化作用による硫酸還元のことを言う。この有機硫黄化合物もやがて分解されるが、分解には 2 系統あり、亜硫酸を経て硫酸へ戻る好気的な分解と、微生物によって嫌気的に分解され硫化水素として放出される嫌気的な分解に分けられる。後者の異化的硫酸還元とは無酸素領域で起きる硫酸還元菌による還元のことを指す。この嫌気的な条件で起こる異化的硫酸還元により、硫酸還元菌は無酸素領域で有機物をエネルギーとして硫酸イオン（SO_4^{2-}）を還元し硫化水素を生成する。

(3) 硫化水素抑制対策方法

硫化水素発生抑制対策として可能と考えられている方法は、硫酸塩還元菌の働きを抑制させることである。具体的に、発生条件を欠如させる抑制方法例としては、石灰添加による対策がある。石灰を添加することで強アルカリ環境となり、硫酸塩還元菌の生育を阻害し、硫化水素の発生を抑制することが可能である。しかし、近年強アルカリ環境でも活発に生育可能な硫酸塩還元菌が確認されており、強アルカリ制御の信頼性を検討する必要があるとされている[6)]。

次に発生した硫化水素の対する拡散防止方法例としては、鉄粉（酸化鉄）の添加による対策が挙げられる。硫化水素は金属と反応して捕捉されることが知られており、還元時に非結晶性の酸化鉄が溶解して水酸化鉄となり、硫化鉄の沈殿を起こすことで硫化水素を捕捉安定化させることができる。これは、硫化水素発生条件を欠如させる考えとは異なり、発生した硫化水素に対する対策となる。

現在、廃石膏ボードから得られる再生半水石膏を用いた地盤改良材の有効利用が求められているが、実地盤での施工を行う際には硫化水素の発生リスクを極力抑えることが望ましいとされている。そのため、滞留水の存在や嫌気性の環境など施工場所や条件に十分留意した上で、添加材による発生抑制を施すことが必要である。特に、腐敗性の有機物を多量に含む場合は、硫酸塩還元菌の基質となる有機物が含有されている可能性があり、さらに石膏を添加することにより硫酸根も多量に含有することになる。

2-5　再生半水石膏の地盤改良固化特性及び環境安全性に及ぼす諸要因

前章で述べたように再生半水石膏を地盤改良材として有効利用する際には、耐水性または撥水性の添加物を混合しなければならない。そこで本節では、これまでに行われてきた再生半水石膏を用いた地盤改良材に関する研究の分析を行い、現在までに把握されていることをまとめている。主に、土質材料の違いによる影響、石膏の品質の違いによる影響、養生日数の違いによる影響、セメント等の種類による影響、再泥化特性、溶出特性の 6 つの影響因子に着目して考察している。

表-2.9～表-2.12 に既往の研究により把握されている基本的物性値をまとめたものを示す。

表-2.9　再生半水石膏を用いた地盤改良材の基本物性一覧（その1）[7)～10)]

タイトル	排煙脱硫石膏を主材とした中性土質改良材による軟弱土の改良実験[7)]	半水石膏を利用した流動性処理土の検討[8)]	再生石膏中性固化材の地盤改良材としての適用性評価[9)]	再生石膏中性固化材の地盤改良材としての適用性評価[10)]
著書	柴田ら：2002年	武藤ら：2009年	吉田ら：2008年	鈴木ら：2009年
土質試料の物性	○対象土　粒度　礫：砂：シルト＝2.7：65.8：31.5 ρ_s＝2.794(g/cm^3) ○含水比：w=39.5～43.0%	○関東ローム ρ_s＝2.68(g/cm^3)	○有明粘土　砂：シルト：粘土＝38：35：27 ρ_s＝2.62(g/cm^3) ○蓮池粘土　砂：シルト：粘土＝3：32：65　ρ_s＝2.45(g/cm^3) ○含水比：w=100%	○有明粘土　砂：シルト：粘土＝38：35：27 ρ_s＝2.62(g/cm^3) ○佐世保粘性土　砂：シルト：粘土＝57：18：25 ρ_s＝2.6(g/cm^3) ○諫早砂質土　砂：シルト：粘土＝79：12：9 ρ_s＝2.8(g/cm^3) ○含水比：有w=170,120,80% 粘w=52% 砂w=40%
補助固化材	セメント系固化材、Al系中和剤	高炉セメントB種	なし	なし
配合比	○60～300kg/m^3	○セメント添加率5,10% ○半水石膏添加率0～25%	○50～300kg/m^3	○有：100～300kg/m^3 ○粘：60～150kg/m^3 ○砂：60～150kg/m^3
強度	コーン指数：材齢28日 ○半水石膏のみ：200kN/m^2 ○中性固化材：700kN/m^2	○圧縮強さ：材齢28日 50～400kN/m^2	○圧縮強さ：材齢7日 100～750kN/m^2 ○圧縮強さ：材齢28日 600～1300kN/m^2	○圧縮強さ：材齢7日 粘：50～300kN/m^2　砂：200～300 kN/m^2 有：50～300kN/m^2 ○圧縮強さ：材齢28日 粘：950～1700kN/m^2　砂：850～1000kN/m^2 有：170～400kN/m^2
pH	○7.6～9.0		○7.2程度	
再泥化	○半水石膏単体では水浸に対し弱いが、中生改良材では、水浸に対する安全性が向上する			
その他	○q_c=400kN/m^{2}以上（第2種改良土）を満たす中性改良材添加量は30～240kg/m^{3}の範囲にある。	○半水石膏混入率が多くなると時間に伴うフロー値の低下が大きくなる。	○風乾を行うことで含水比を低下させ強度を飛躍的に増加させる ○土壌環境基準値を超えるフッ素の溶出	○養生を重ねるごとに石膏のみでも強度増進効果が得られる ○粘性土の場合、含水比による影響が大きい ○フッ素は溶出しない

表-2.10　再生半水石膏を用いた地盤改良材の基本物性一覧（その2）[11)～14)]

タイトル	半水石膏の地盤改良材としての有効利用 -廃石膏ボードの再利用-[11)]	廃石膏ボードから再生した半水石膏を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮強さ[12)]	半水石膏を利用したセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす養生期間の影響 -廃石膏ボードの有効利用-[13)]	高炉セメントB種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発[14)]
著書	亀井ら：2007年	亀井ら：2007年	亀井ら：2009年	亀井ら：2009年
土質試料の物性	○MCクレー ○粒度　シルト：粘土＝35.3：64.7 ρ_s＝2.679(g/cm^3) ○含水比：w＝120%	○豊浦標準砂 ○MCクレー ○粒度　シルト：粘土＝35.3：34.7 ρ_s＝2.679(g/cm^3) ○含水比：最適含水比	○MCクレー ○粒度　シルト：粘土＝35.3：64.7 ρ_s＝2.679(g/cm^3) ○含水比：w＝140%	○MCクレー ○粒度　シルト：粘土＝35.3：64.7 ρ_s＝2.679(g/cm^3) ○含水比：w＝120,140%
補助固化材	普通ポルトランドセメント	高炉セメントB種	高炉セメントB種	高炉セメントB種
配合比	○セメント添加率5,10% ○半水石膏添加率0～20%	○セメント添加率5% ○半水石膏添加率0～20%	○セメント添加率10% ○半水石膏添加率0～40%	○セメント添加率5～10% ○半水石膏添加率0～50%
強度	圧縮強さ：材齢28日 ○110～250kN/m^2	○圧縮強さ：材齢28日 砂：400～800kN/m^2 粘：700～800kN/m^2	○圧縮強さ： 材齢1日25～100kN/m^2 材齢7日75～175kN/m^2 材齢28日100～200kN/m^2	圧縮強さ：材齢28日 ○w=120%：120～240kN/m^2 ○w=140%：80～200kN/m^2
pH				○材齢1日6.8～11.9 ○材齢28日6.0～11.7
その他	○半水石膏添加率が増加するにつれて強度は低下するものの、5%以上では直線的に強度が増加する。	○半水石膏添加による締固め曲線の変化 砂：低乾燥密度・高含水比 粘：高乾燥密度・低含水比	○半水石膏を混入したセメント安定処理土は粘り強い材料になる ○半水石膏を40%程度混入することで強度発現が早くなる	○高炉セメントB種を5%添加することで、フッ素溶出量を満足できる

表-2.11　再生半水石膏を用いた地盤改良材の基本物性一覧（その3）[15)～18)]

タイトル	港湾浚渫土の粒状固化における石膏系固化材の適用性について[15)]	中性固化材を用いた軟弱改良に関する実験（改良土の強度, pH）[16)]	石膏系中性域改良材による旧堤体土の遮水材への再利用に向けた室内配合試験[17)]	廃石膏・浄水汚泥混合による石灰安定処理土の強度発現特性[18)]
著書	今山ら：2009年	森ら：2005年	松浦ら：2005年	角ら：2009年
土質試料の物性	○三重県四日市港の浚渫土 ○粒度　礫：砂：シルト：粘土＝0.87：3.42：42.95：52.76 ρ_s＝2.766(g/cm^3) ○含水比：w＝93.1%	○原土 ○粒度　砂：シルト：粘土＝9.3：35.5：55.3 ρ_s＝2.904(g/cm^3) ○含水比：w=110,120%	○旧堤体土　シルト（ML） ρ_s＝2.710(g/cm^3) ○新鋼土　礫まじり細粒分質砂(SF-G) ρ_s＝2.716(g/cm^3) ○含水比：w=20.3%	○宇ノ気土　砂：シルト：粘土＝46.3：38.5：15.2　ρ_s＝2.657(g/cm^3) ○含水比：w=30.0～38.0% 締固め度90～80%
補助固化材	PS灰と石灰	MgO, $Al(OH)_3$	なし	消石灰
配合比	○石膏系：300～500kg/m^3 ○石灰系50～200kg/m^3 ○石灰系50+石膏系200,300kg/m^3	○100～200kg/m^3	○3～10%	○石灰50%：石膏25%（二水or半水） 浄水汚泥25%を5～10%
強度	圧縮強さ：材齢28日 ○石膏系：25～125kN/m^2 ○石灰系：75～240kN/m^2 ○石灰系2：50～100kN/m^2	○圧縮強さ：材齢7日 150～350kN/m^2 ○コーン指数：材齢7日 1500～2800kN/m^2	○圧縮強さ：材齢7日 220～550kN/m^2	○圧縮強さ：材齢28日 二水系300～800kN/m^2 半水系300～1000kN/m^2
pH	○石膏系：7.1～7.9 ○石灰系：11.0～12.5 ○石灰系2：9.2～9.6	○8以下	○8.0～8.4	
その他	○全ての条件において土壌環境基準値を満足するフッ素溶出濃度が確認	○含水比120%の場合は約20%の強度低下	○石膏系中生域改良材を添加することで、しない場合（4.25×10^{-7}）と比べ透水係数は低下する（1.13×10^{-7}）。	○土に混合する固化材が半水石膏の場合は、強度発現にある程度の遅れが生じるものの、最終的には二水系よりも高い強度が得られる。

表-2.12　再生半水石膏を用いた地盤改良材の基本物性一覧（その4）[19)～22)]

タイトル	石こうを用いた弱アルカリ性固化材に関する基礎的研究[19)]	石こう系固化材による軟弱土の改良に関する実験的研究（その2）-改良土の諸性状-[20)]	石こう系固化処理土適用性に関する実験的研究[21)]	石こう系固化材による土質改良の配合設計に関する実験的研究（その2）[22)]
著書	小林ら：2002年	市原ら：2003年	市原ら：2002年	小林ら：2005年
土質試料の物性		○福岡県三池港の浚渫土 ○粒度　砂：シルト：粘土＝3.8：61.4：34.8 ρ_s＝2.663(g/cm^3) ○含水比：w=153.4%	○沖積層の粘性土 礫：砂：シルト：粘土＝2.9：35.4：29.2：32.5　ρ_s＝2.69(g/cm^3) ○砂質土　礫：砂：シルト：粘土＝2.0：74.5：11.4：12.2 ρ_s＝2.71(g/cm^3) ○含水比：粘w=60.3% 砂w=30.1%	○山砂　礫：砂：シルト：粘土＝0.2：82.2：8.4：9.2　ρ_s＝2.70(g/cm^3) ○粘性土 砂：シルト：粘土＝2.9：40.3：56.8　ρ_s=2.69(g/cm^3) ○関東ローム 礫：砂：シルト：粘土＝0.3：11.0：65.5：23.2 ρ_s＝2.69(g/cm^3) ○含水比：砂w=21.2% 粘w=91.9%
補助固化材	高炉水砕スラグ	水硬性混和材	高炉水砕スラグ	高炉水砕スラグ
配合比	○水：石膏：スラグ （1：0.5：（0～0.5））	○0～500kg/m^3	○水：石膏：スラグ （1：0.5：（0～0.5）） ○粘性土：100～430kg/m^3 ○砂質土：180～450kg/m^3	○水：石膏：スラグ （1：0.5：（0～0.5）） ＝1.5, 2.0, 3.0
強度	○圧縮強さ：材齢28日 200～5000kN/m^2	○コーン指数：材齢28日 2000kN/m^2	○圧縮強さ：材齢28日 砂＝50～650kN/m^2 粘＝50～520kN/m^2	○圧縮強さ：材齢28日 200～5000kN/m^2
pH	○石膏のみ 8.4程度 ○スラグ混入 11程度	○8.1～8.3 ○固化材量が250kg/m^{3}以下であればpHは水質基準内	○8.0～8.4	
再泥化		○添加量100kg/m^{3}では1ヶ月後でも再泥化は起こらない		
その他	○スラグ混入により水中溶解性を改善 ○遅延剤により硬化時間が容易に調節可能	○改良土を乾燥させることで固化材量の減容化が可能であり、浚渫土等に有効	○qu=400kN/m^{2}以上の供試体は乾湿繰返しにおける重量の変化が小さい	○石膏系固化材を用いた土質改良は、土質の種類や性状に依存しないことから適用可能

2-5-1　土質材料の違いによる影響

この節では、**表-2.9, 12** に示す小寺ら[21]、亀井ら[11]、鈴木ら[9]の既往の研究に着目する。

1）小寺ら[21]は、異なる 2 種類の土質材料に対して石膏系固化材を添加し、力学特性について検討している。実験に用いた試料は、神奈川県横浜市で掘削された沖積層の粘性土（Ac1）と砂質土（As1）である。固化材として半水石膏とスラグを主成分としたものを用い、粘性土で 100～430kg/m^3、砂質土で 180～450kg/m^3 添加している。

図-2.9 に水固化材比と一軸圧縮強さの関係を示す。また、強度は全て材齢 28 日での条件を示している。図に示すように、一軸圧縮強さは水固化材比に密接に関連しており、土質による相違が見られないことがわかる。この結果より、固化強度は、水固化材比を用いることでほぼ一義的に決定でき、配合試験の簡素化が可能であることを明らかにしている。

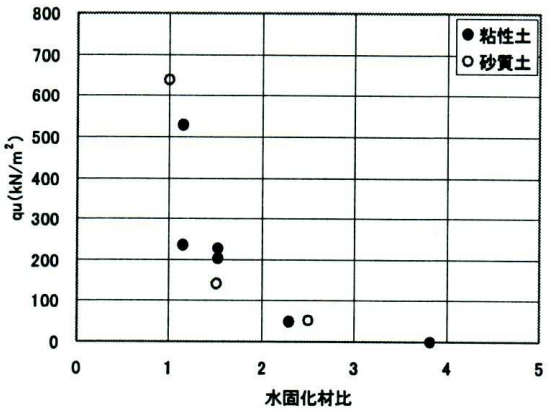


図-2.9　水固化材比と一軸圧縮強さ[21]

2）亀井ら[11]は、2 種類の標準試料を用いて締固め特性や一軸圧縮特性について検討を行っている。実験に用いた試料は、砂質土として豊浦標準砂を、粘性土として成分調整された MC クレーを使用している。固化材として半水石膏、強度安定材として普通ポルトランドセメントを使用し、普通ポルトランドセメントの添加率(C/S)は 5%と一定値に固定し、標準砂と MC クレーそれぞれに半水石膏添加率(B/S)を 0, 5, 10, 15, 20%と変化させ検討している。

図-2.10 に豊浦標準砂、**図-2.11** に MC クレーそれぞれが半水石膏添加率の違いによって締固め曲線に及ぼす影響を示す。図に示すように半水石膏の添加により、豊浦標準砂の締固め曲線は低乾燥密度・高含水比側にシフトし、MC クレーの締固め曲線は、高乾燥密度・低含水比にシフトしていることがわかる。このような結果が現れたのは、砂質土系では、含水比測定の際に再生半水石膏の凝結硬化作用により二水化されていた石膏の大部分は再び半水石膏に戻るため、水の重量として処理されたためであると考察している。粘性土については、半水石膏を添加することにより、試料は幅広い粒度分布を有することとなり、間隙が小さくなるためと考察している。

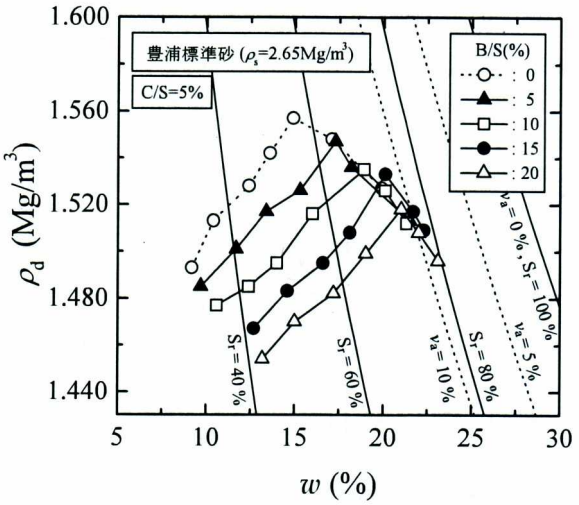


図-2.10　豊浦標準砂の締固め曲線[11]

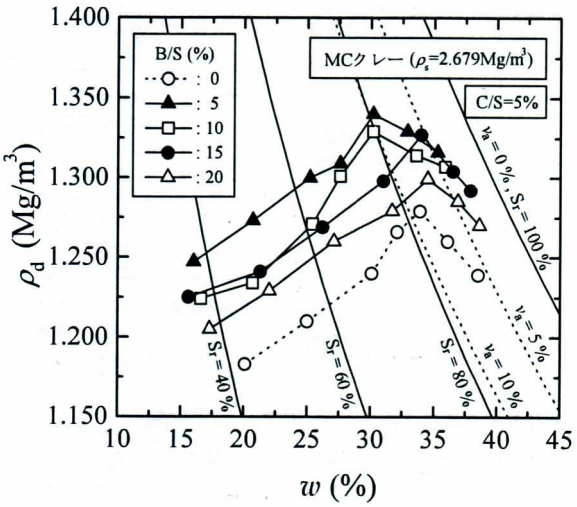


図-2.11　MC クレーの締固め曲線[11]

図-2.12、図-2.13 にそれぞれ豊浦標準砂及びMCクレーの一軸圧縮試験結果を示す。値は材齢28日を示している。図に示すように豊浦標準砂の一軸圧縮強さは、半水石膏添加率が10%程度までは、半水石膏を添加しない場合よりも小さいものの、添加率を増加させることによって徐々に増加する傾向を示している。一方、締固めたMCクレーの一軸圧縮強さは、半水石膏添加によってある程度改善できていることがわかる。

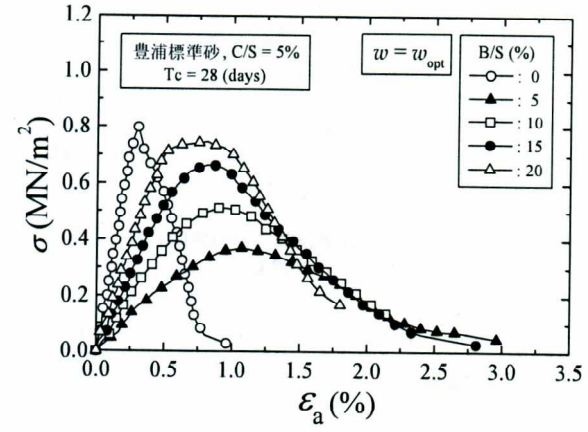


図-2.12 一軸圧縮試験結果（豊浦標準砂）[11]

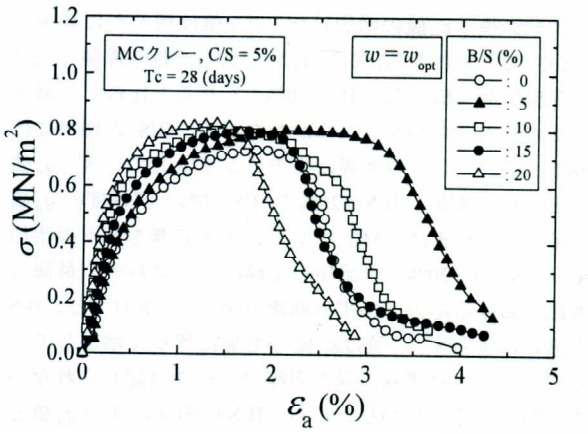


図-2.13 一軸圧縮試験結果（MCクレー）[11]

3）鈴木ら[9]は、性質の異なる3種の土質材料に対し、高含水比粘性土を改良することを目的とし、力学試験を行っている。用いた土質材料は、有明粘土（高含水比粘性土）、佐世保日野川（粘性土）、諫早バイパス（砂質土）である。また、固化材として再生半水石膏のみを用いて検討している。試料の物理特性値を**表-2.13** に、配合条件を**表-2.14** に示す。

表-2.13 対象土の物性値[9]

項目		単位	有明粘土	佐世保日野川	諫早BP
土粒子の密度	ρ_s	g/cm^3	2.62	2.6	2.8
自然含水比	W_n	%	170	52	40
粒度分布	砂	%	38	57	79
	シルト	%	35	18	12
	粘土	%	27	25	9
液性限界	W_L	%	125	55	47
塑性限界	W_P	%	45	42	32

表-2.14 配合条件[9]

case	建設発生土	添加量 (kg/m^3)	含水比 (%)	材齢（日）
PC	佐世保日野川（粘性土）	60、100、150	52	7、28
PS	諫早BP（砂質土）	60、100、150	40	7、28
PA	有明粘土（高含水比粘性土）	100、200、300	170	7、28
			120	
			80	

図-2.14 にそれぞれのCaseでの一軸圧縮試験結果を示す。図に示すように養生期間が長くなるに伴い、強度発現が大きくなっていることがわかる。しかし、Case PSの場合は、材齢7日でほぼ同程度の値を示している。これは、自然含水比が低かったため、石膏本来の固化材としての効果が小さかったためであると考察している。**図-2.15** にCase PAの一軸圧縮試験結果を示す。図に示すように、含水比の低下に伴い、強度発現が大きくなっていることがわかる。これより石膏を粘性土に用いる際には含水比の影響が大きく、強度発現が含水比に大きく依存することを明らかにしている。

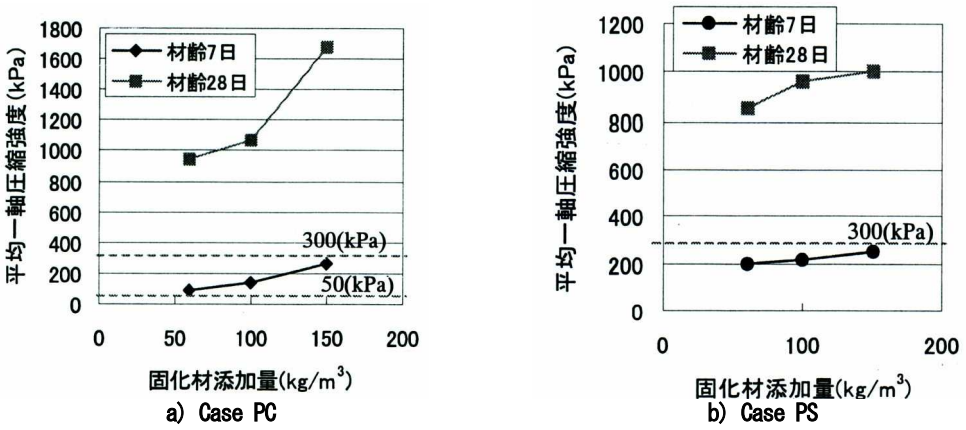


図-2.14 Case PC の一軸圧縮試験結果[9)]

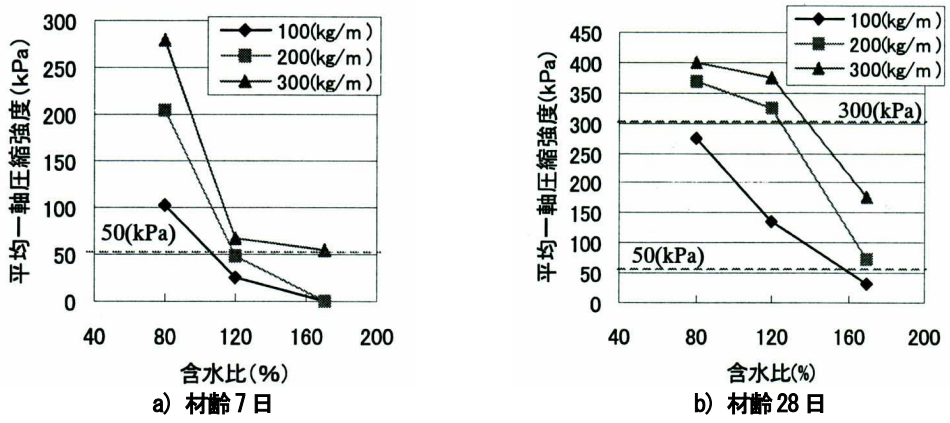


図-2.15 Case PA の一軸圧縮試験結果[9)]

以上の 3 つの既往の研究を総活する。再生半水石膏と補助固化材を混合した地盤改良材による改良土は、材齢 28 日の砂質土において、セメントあるいは、高炉水砕スラグを補助固化材として添加することで q_u=650～1000kN/m^2、粘性土の場合では q_u=520～1700kN/m^2 と大きな強度発現を示す。この結果から、再生半水石膏を用いた地盤改良材は、要求強度を満足するための強度設定を補助固化材の添加量によって決定することが可能であると考えられる。しかし、石膏を粘性土に用いる際には含水比の影響が大きく、強度発現が含水比に大きく依存する。このように、土質試料の違いによって固化効果が異なるため、施工前の段階で土の性状を把握し、配合量を室内試験によって決定する必要がある。

2-5-2 再生半水石膏の品質の違いによる影響

この節では、**表-2.11** に示す角ら[18)]の既往の研究に着目する。

1) 角ら[18)]は、廃石膏・浄水汚泥混合による石灰安定処理土の強度発現特性について検討を行っている。実験試料は、石川県浄水場において発生した汚泥を脱水・乾燥処理することによって得られた浄水汚泥を使用している。また石膏の品質の違いに着目して、固化材として二水石膏と、半水石膏を用いている。**表-2.15** に固化材原料の比率を示す。

表-2.15 固化材原料の比率[18)]

固化材	石灰	廃石膏		浄水汚泥
		二水	半水	
二水系	50%	25%	ー	25%
半水系	50%	ー	25%	25%

固化材の種類および供試体の締固め度の違いが強度発現に及ぼす影響を把握するため、一軸圧縮試験を実施している。**図-2.16～図-2.18** にそれぞれの締固め度での二水系、半水系の一軸圧縮試験結果を示す。

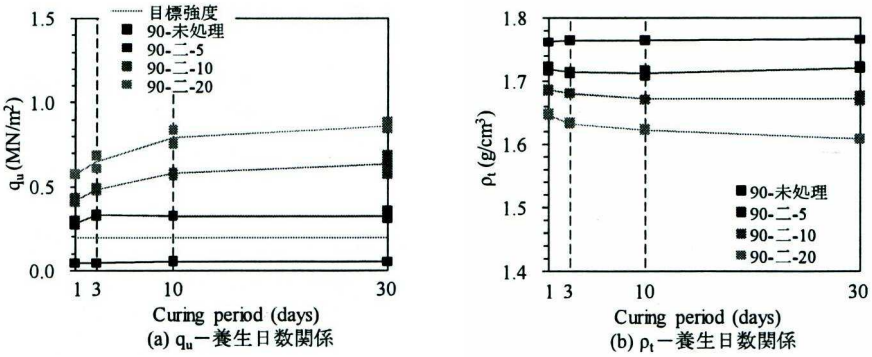


図-2.16　一軸圧縮試験結果(Cd=90%, 二水系) [18)]

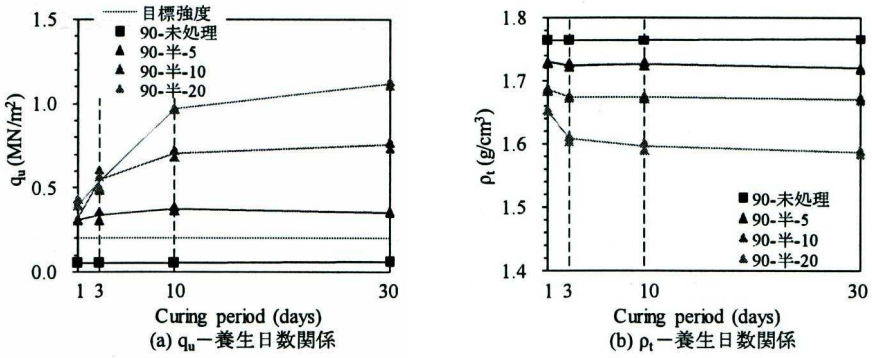


図-2.17　一軸圧縮試験結果(Cd=90%, 半水系) [18)]

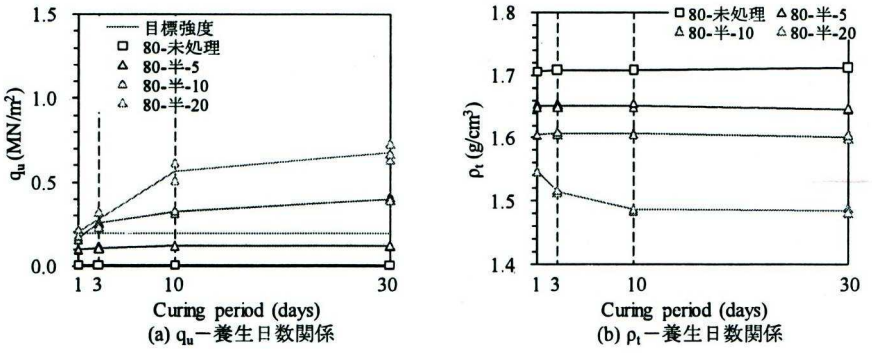


図-2.18　一軸圧縮試験結果(Cd=80%, 半水系) [18)]

図に示すように全ての条件において、混合率 5%は二水系・半水系ともに養生初期の段階で強度が収束していることがわかる。また、混合率 10%と 20%については、二水系・半水系どちらを混合しても、顕著な強度増加が確認できる。しかしながら、強度の発現性は両者の間で大きく異なることがわかる。混合率 20%における二水系と半水系を比較すると、養生初期においては、二水系を混合した供試体（90-二-20）の方が半水系を混ぜ合わせた供試体（90-半-20）よりも高い強度を得ているが、養生 10 日以降になると、逆に 90-半-20 の方が 90-二-20 よりも高い強度を得ている。同様の傾向が 10%でも見られる。これらのことから、混ぜ合わせる固化材が半水系の場合は強度発現にある程度の遅れが生じるものの、最終的には二水系よりも高い強度が得られることが明らかとなった。

次に供試体の湿潤密度に着目すると、二水系・半水系ともに混合率が高くなるほど大きく低下していることがわかる。この湿潤密度の低下は供試体の膨張を意味する。

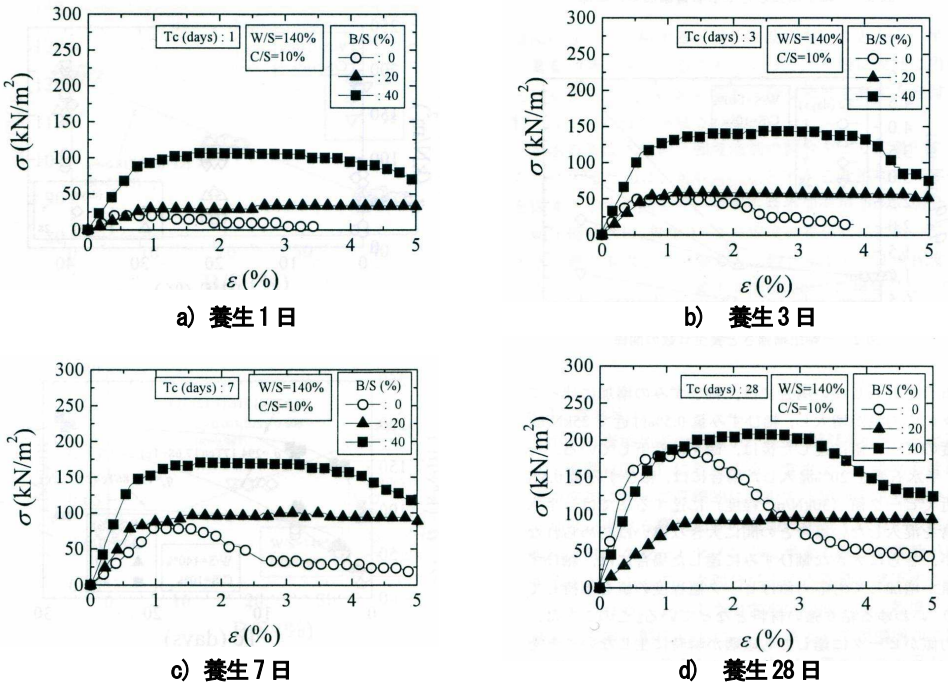
以上の結果を総括する。材齢 28 日での一軸圧縮強さは二水石膏の場合 q_u=300～800 kN/m^2、半水石膏の場合 q_u=300～1000 kN/m^2 と半水石膏を混合したものが大きな強度発現を示すことを明らかとしている。しかし、材齢 7 日では、二水石膏系の方が高い強度を得る結果が示されている。これらのことから、土に混ぜ合わせる固化材が半水系の場合は、強度発現にある程度の遅れが生じるものの、材齢日数を重ねるにつれて、二水系よりも高い強度が得られることが判明した。また、その際土の膨張は二水系よりも半水系を混ぜ合わせたほうに顕著に現れるため、膨張性について検討していく必要があるとされている。さらに、同じ半水系を使用した場合においても、固化材混合時の締固め度によって土の強度発現が異なることを明らかにしているため、今後検討が必要である。

2-5-3　養生条件の違いによる影響

この節では、**表-2.9, 10** に示す亀井ら[13]と吉田ら[10]の既往の研究に着目する。

1）亀井ら[13]は、半水石膏を利用したセメント安定処理土の一軸圧縮強さに及ぼす養生期間の影響を検討している。実験に用いた試料は、成分調整された MC クレーを使用している。超軟弱地盤を想定した試料に固化材として半水石膏を、強度安定材として高炉セメント B 種を使用し、セメント添加率 10%でセメント安定処理する際に半水石膏を 0%～40%混入し、1 日～28 日養生したものを一軸圧縮試験にて力学特性を検討している。

図-2.19 にそれぞれの養生日数における一軸圧縮試験結果を示す。全ての条件において、半水石膏添加率が増加するにつれて、ひずみに伴う最大圧縮応力が増加していることがわかる。これは、半水石膏を添加していない条件と比較しても明らかであることがわかる。また、半水石膏混入に伴い、応力値がピークに達しても破壊が瞬時に生じない材料の粘り強さが確認できる。これらの結果より、半水石膏を混入することで材料形態を変化させ、粘り強い材料となることが明らかとなった。



a) 養生 1 日　　b) 養生 3 日

c) 養生 7 日　　d) 養生 28 日

図-2.19　一軸圧縮試験結果[13]

図-2.20 に一軸圧縮試験と養生日数の関係を示す。図に示すように半水石膏を混入したものの一軸圧縮強さは、養生初期において大きく増加し、養生日数が経過するごとに徐々にその増加が緩やかになる傾向が認められる。また、半水石膏を 40%混入することによって、養生 7 日程度で養生 28 日の一軸圧縮強さに達していることがわかる。したがって、半水石膏を混入することで、短期間に強度が増加することから、施工現場においては早期にトラフィカビリティーが改善され、工期の短縮が可能であると考察している。

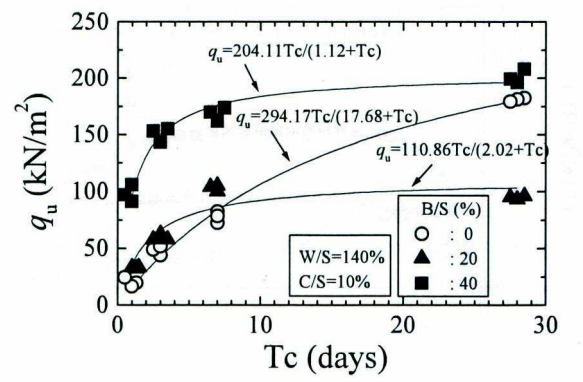


図-2.20　一軸圧縮強さと養生日数の関係 [13)]

2）吉田ら[10)]は、異なる 2 種類の土質材料に対し、再生石膏を添加し、力学特性について検討している。実験に用いた試料は、含水比 100%に設定した有明粘土と蓮池粘土である。固化材として再生石膏を用い、添加量を 50～300kg/m^3 と変化させ検討している。また、養生日数を 7～56 日としている。

図-2.21 に一軸圧縮強さと養生日数の関係を示す。図に示すように、再生石膏は添加量、養生期間が多くなるほど、固化材としての効果が顕著に現れ、発現強度が大きくなっていることがわかる。これは、所定日数養生後、24 時間風乾させたため含水比が低下し、強度が増進したことが考えられる。

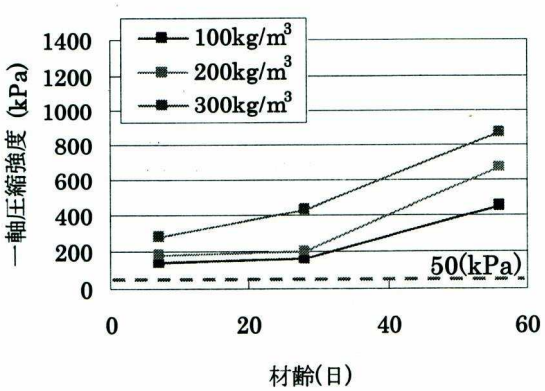


図-2.21　一軸圧縮強さと養生日数の関係 [10)]

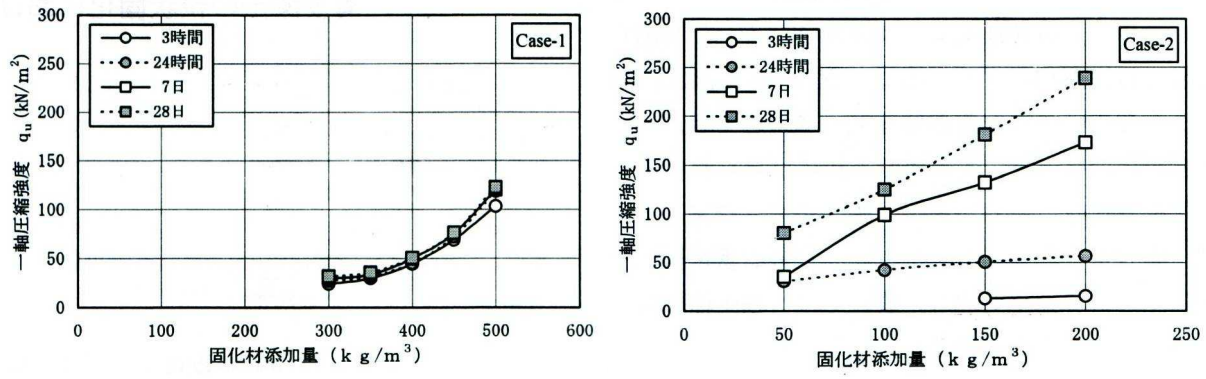
以上の 2 つの既往の研究を総括する。補助固化材を粘性土に混合した条件においての材齢 1 日の一軸圧縮強さは、q_u=25～100 kN/m^2、材齢 7 日では q_u=75～175kN/m^2、材齢 28 日では q_u=100～200kN/m^2 程度の強度発現を示す。また、再生半水石膏のみを添加した場合の一軸圧縮強さは材齢 1 日で q_u=100～750 kN/m^2、材齢 28 日では q_u=600～1300kN/m^2 という強度発現を示す。このように再生半水石膏のみ添加した場合の方で強度が大きくなったのは、試料を風乾し含水比を低下させたため、強度が飛躍的に増加したためであると報告している。また、粘性土の場合、再生半水石膏の硬化特性は含水比による影響が大きいことも明らかにしている。さらに、再生半水石膏を混入したセメント安定処理土は、粘り強い材料となり延性的なものに形態変化し、養生後も安定した強度が得られることが明らかとなった。

2-5-4　セメント等の種類の違いによる影響

この節では、**表-2.11，12** に示す今山ら[15]、森ら[16]の既往の研究に着目する。

1）今山ら[15]は、廃石膏を有効利用した中性無害の石膏系固化材と PS 灰と石灰を主成分とする石灰系固化材を用いて港湾浚渫土（CH）を粒状固化処理し、一軸圧縮試験にて力学特性を検討している。固化材として石膏系固化材（Case 1）、石灰系固化材（Case 2）、石灰固化材に石膏系固化材を混合したもの（Case 3）を用いている。

図-2.22 に固化材添加量と一軸圧縮強度の関係を示す。図に示すように、Case 1 では、添加後 3 時間後と 28 日後の一軸圧縮強度には大きな差は認められないことがわかる。しかし、Case 2 では材齢とともに強度増加が著しいことがわかる。また、q_u=50kN/m^2 の強度（第四種処理土）を得るために必要な固化材添加量を比較すると、石膏系固化材で第四種処理土を生成するためには石灰系固化材の 2.7～6.7 倍の添加量が必要であることがわかる。



a) Case 1　　b) Case 2

図-2.22　固化材添加量と一軸圧縮強度の関係[15]

図-2.23 に石灰と石膏を添加した改良土の一軸圧縮強度の経時変化を示す。図に示すように、養生 7 日以内の強度は、石膏系固化材を加えることにより大きくなるが、養生 28 日の強度は石膏系固化材の添加の有無に関わらずほぼ同程度の値を示している。これは、石膏系固化材添加による強度発現は、添加直後に収斂することに起因していると考察している。これらのことから、石膏系固化材の強度増加を図るためには、少量の石灰やセメントを添加することが必要であるとしている。

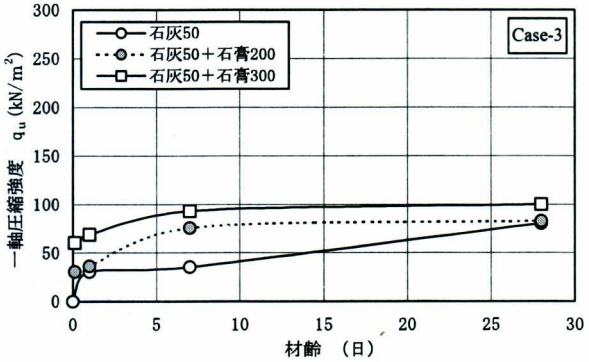


図-2.23　石灰と石膏を添加した改良土の一軸圧縮強度[15]

2）森ら[16]は、石膏系固化材を用いて軟弱土を改良する固化材を開発する研究を行っている。固化材として、低アルカリ性の水硬性材料である軽焼マグネシア（MgO）と石膏、pH 調整・抑制効果及び凝集効果のある非晶質水酸化アルミニウム（$Al(OH)_3$）を主な材料としたものを使用している。また、土質材料は横浜市で採取した砂混じり火山灰質粘性土を使用している。

図-2.24 に一軸圧縮強さと固化材添加量の関係、**図-2.25** にコーン指数と固化材添加量の関係を示す（どちらも材齢 7 日の値を示している）。まず、**図-2.24** に着目すると、含水比 110%調整土に中性固化材を添加したときの一軸圧縮強さは、固化材添加量 150kg/m^3 では固化材無添加時の 2 倍、添加量 200kg/m^3 では 3 倍の強度となり、改良効果が確認できる。また、含水比 120%調整土に対して添加した条件では、添加量 200kg/m^3 において 100kN/m^2 以上の強度発現が確認できる。次に**図-2.25** に着目すると、110%調整土に中性固化材を添加したときのコーン指数は、添加量 100kg/m^3 で固化材無添加時の 5 倍以上の強度となり、少ない添加量での改良効果がより顕著であることが判明した。また、含水比 120%調整土に対して添加した場合 2 割程度の強度低下も確認されている。

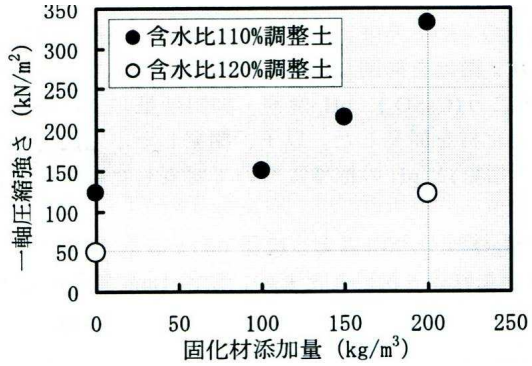


図-2.24　一軸圧縮強さと固化材添加量[16]

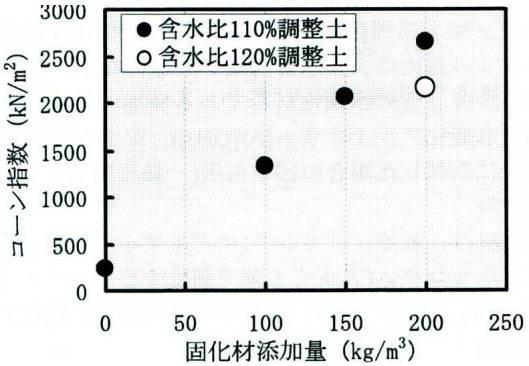


図-2.25　コーン指数と固化材添加量[16]

以上の 2 つの既往の研究を総括する。まず、㈱アイコが行った研究について見ると、石膏系を添加した場合の材齢 28 日における一軸圧縮強さは、q_u=25～125 kN/m^2、石灰系では q_u=50～240kN/m^2、石膏と石灰を混合したものでは q_u=50～100kN/m^2 程度の強度発現を示した。この結果から、石膏と石灰を混合した条件より、石膏のみの条件の方が高い強度発現を示すことが明らかとなった。次に村樫石灰工業㈱が行った研究について着目すると、補助固化材として酸化マグネシウムと酸化アルミニウムを混合した条件での材齢 7 日における一軸圧縮強さは、q_u=150～350 kN/m^2 の強度発現を示した。このように補助固化材の種類の違いで再生半水石膏を用いた地盤改良材の強度発現は大きく異なることが明らかとなった。そのため、早期に高強度が必要な場合は補助固化材の種類を選定しなければならない事が示唆される。

2-5-4 までに示した既往の研究での添加量と一軸圧縮強さの関係をまとめたグラフを**図-2.26** 及び**図-2.27** に示す。

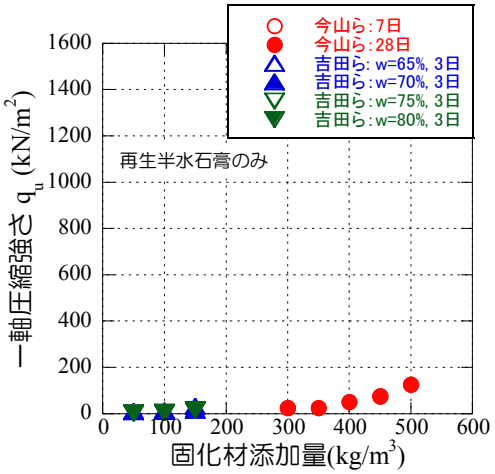


図-2.26　固化材添加量と一軸圧縮強さ（再生半水石膏のみ）

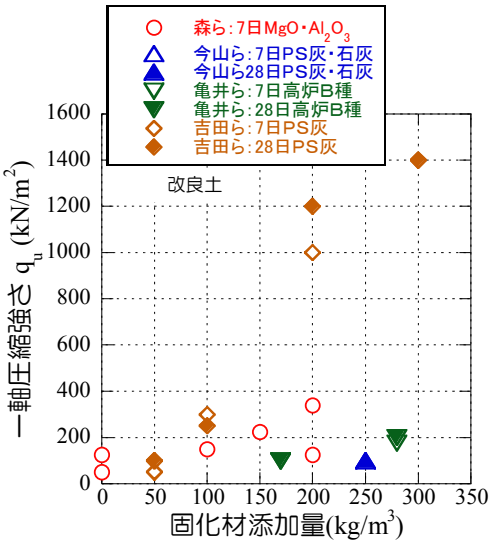


図-2.27　固化材添加量と一軸圧縮強さ（改良土）

以上の結果より、再生半水石膏のみを添加した場合では改良土は 200kN/m^2 以下の強度を示し、石膏のみの地盤改良には限界があることがわかる。しかし、補助固化材としてセメント等の添加材を加えた改良土は、石膏のみと比較して強度発現が大きいことから、再生半水石膏を地盤改良材として使用する際にはセメント等の固化材を用いる必要があることがわかる。このような結果を踏まえ、再生半水石膏を用いた地盤改良材の適用性の評価を行う必要がある。

2-5-5　再生半水石膏により固化された処理土の再泥化挙動

この節では、**表-2.9** と**表-2.12** に示す柴田ら[7]、市原ら[20]の既往の研究に着目する。

1）柴田ら[7]は、泥土に対し、固化材として半水石膏とセメント系材料を用いて、養生条件の違いに着目し、改良効果を検討している。養生条件は、気中養生と水浸養生の 2 種類としている。

図-2.28 に改良を水中及び気中で養生した試料の一軸圧縮強さ比と材令の関係を示す。なお、No.2 は半水石膏を添加した条件、No.5 は中性改良材を添加した条件である。また、含水比、添加量ともに 39.5%、180kg/m^3 と同条件である。図に示すように、中性改良材は、半水石膏単独と比較して強度低下が小さく、改良土の水浸に対する安定性が向上していることがわかる。この結果から、半水石膏を地盤改良材として使用する際には施工場所の環境条件を把握することが重要であり、セメント系固化材を添加することで水浸に対する安全性が増すことが明らかとなった。

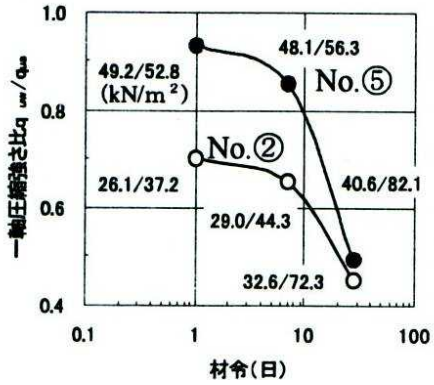


図-2.28　石灰と石膏を添加した改良土の一軸圧縮強度[7]

2）市原ら[20]は、石こう系固化材を混合した軟弱土を、天日乾燥させて改良土を作製し、土工材料としての適用性を検討するために、突固め試料による水浸時の劣化について検証している。

表-2.16 に突固めた試料を 3 日水浸させた後のコーン指数を示す。表に示すように、締固め直後と水浸時のコーン指数を比較すると固化材無添加の試料は、コーン指数が 1 割程度まで低下しているが、固化材を添加し天日乾燥させた試料はコーン指数の低下が認められていないことがわかる。また、乾燥後の試料を水浸させたときの状況を**図-2.29** に示す。図に示すように、固化材無添加の試料が 1 日後に崩壊したが、固化材を 100kg/m^3 添加した試料は、約 1 ヶ月後も崩壊せず変化が認められなかったことを明らかにしている。

表-2.16　水浸時のコーン指数[20]

添加量	コーン指数（kN/m²）	
	締固め直後	3日水浸後
0kg/m^3	1235	104
100kg/m^3	388	388
200kg/m^3	216	208

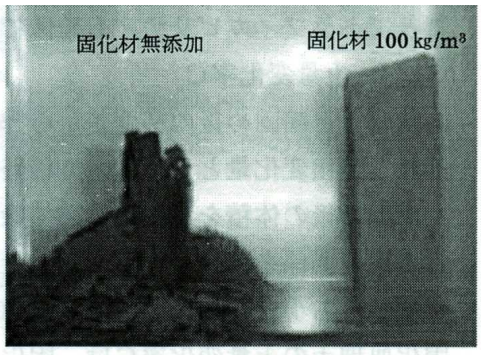


図-2.29　水浸時の状況[20]

以上の 2 つの既往の研究を総括する。高含水比の浚渫土に半水石膏と高炉水砕スラグを混合したものを添加して再泥化試験を行った結果、添加量 100kg/m^3 では 1 ヶ月後でも再泥化は起こらない。また、半水石膏のみでは水浸に対して弱いが、中性改良材では水浸に対する安全性が向上する。これらの結果から、再生半水石膏のみを添加した固化処理土は、水溶性があるものの、耐水性または撥水性の添加物を混合することで水浸に対する安全性が向上することが明らかとなった。しかし、添加量によって耐水性は異なるため、実地盤での施工環境を把握し添加量を設定しなければならないことが示された。

2-5-6　再生半水石膏からのふっ素溶出特性

この節では、**表-2.9, 10, 11** に示す吉田ら[9]、今山ら[15]、亀井ら[14]の既往の研究に着目する。

1）吉田ら[9]は、再生石膏単体に対し、化学的特性評価を行っている。用いた再生半水石膏は、固化材焼成温度が 160℃及び 210℃と異なる。

表-2.17 に重金属溶出試験結果を示す。表に示すように、全ての条件においてふっ素溶出濃度は、土壌環境基準値を大きく上回る値を示している。また、pH 測定試験を行った結果、再生石膏は pH の値が 7.2 とほぼ中性であったため、セメント系および石灰系固化材で問題になっているアルカリ性の問題は極めて小さいとしている。この結果から、再生半水石膏を地盤改良材として使用する際には、ふっ素の溶出が懸念されるため、溶出抑制方法を検討していく必要があると考察している。

表-2.17　重金属溶出試験結果（単位:mg/l）[9]

	Cd	Pb	Cr^{6+}	As	Se	T-Hg	F	B
環境基準値	0.001	0.01	0.05	0.01	0.01	0.0005	0.8	1
再生石膏(160℃)	N.D	0.005	0.028	N.D	0.004	N.D	6.4	0.06
再生石膏(210℃)	N.D	0.001	N.D	0.006	0.004	N.D	3.9	0.03

2）今山ら[15]は、廃石膏を有効利用した中性無害の石膏系固化材と PS 灰と石灰を主成分とする石灰系固化材を用いて港湾浚渫土（CH）を粒状固化処理したものに対し、pH 測定試験、溶出試験を行い溶出特性について検討している。固化材として石灰系固化材、石灰固化材に石膏系固化材を混合したものを用いている。

図-2.30 に改良土の pH の経時変化を示す。石膏系固化材による改良土の pH は 7.1～7.9 の中性域にあるのに対し、石灰系固化材による改良土の pH は 11.0～12.5 の強アルカリ性を呈していることがわかる。石灰系固化材を 50kg/m^3 添加し改良した土の pH は中性域に達しないが、それぞれ材齢 58 日で 9.6 と 9.2 まで低下しており、石膏系固化材に中和能力があることが確認された。

また、今山らが使用した石膏系固化材はふっ素の溶出抑制を施したものであったため、300～500kg/m^3 添加の改良土において、0.1～0.2mg/l のふっ素溶出濃度と土壌環境基準値を満足する値が確認された。

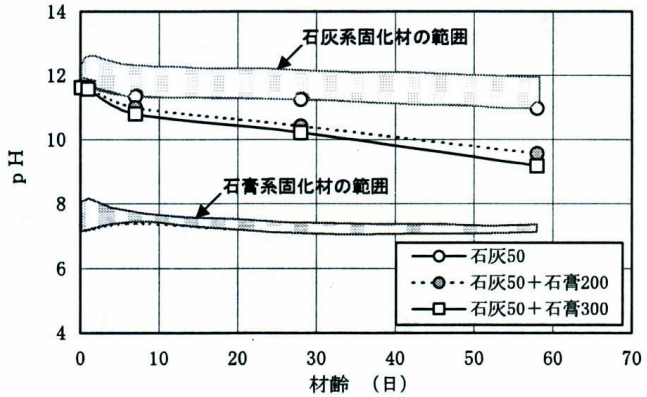


図-2.30　改良土の pH の経時変化[15]

3）亀井ら[14]は、高炉セメントB種による半水石膏のふっ素不溶化技術を開発する研究を行っている。土質試料は成分調整されたMCクレーを用いている。実験条件は、含水比140%に設定した軟弱粘性土に、高炉セメントB種を5, 10%、半水石膏を0, 10, 20, 30, 50%添加し、環告13号法に基づきふっ素の溶出試験を行っている。

図-2.31 に高炉セメントB種のみ少量の5%添加した供試体、**図-2.32** に高炉セメントB種と半水石膏の両者を少量の5%ずつ添加した供試体についてエトリンガイト生成の有無を確認したX線回折の結果を示す。両者の図を比較すると、**図-2.32** では、X線照射角が16°～17°にエトリンガイト特有のX線回折ピークが明瞭に現れているが、**図-2.31** の同じ箇所にはX線回折ピークが明瞭に現れていない。エトリンガイトの析出が認められる供試体には、ふっ素溶出の抑制効果が作用していることから、エトリンガイトの析出に高炉セメントB種と半水石膏が関与していることが示された。

図-2.33 に養生1日の石膏添加量とpH濃度の関係を、**図-2.34** に養生28日の石膏添加量とおpH濃度の関係を示す。図に示すように、養生日数及び半水石膏添加率が増加するにつれてpH値が急激に低下していることがわかる。これは高炉セメントB種に含まれる酸化カルシウムと酸化アルミとが、硫酸カルシウムと反応してエトリンガイトを生成させたためであり、酸化カルシウムがエトリンガイト生成に消費されたためと考察している。

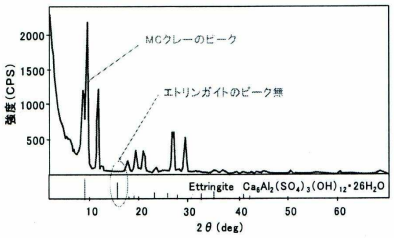


図-2.31　養生期間28日，C/S=5%, B/S=0%のX線回折結果[14]

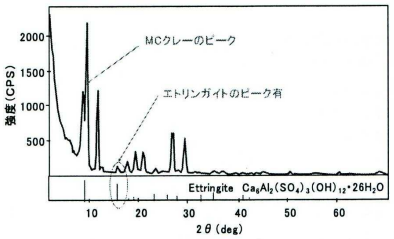


図-2.32　養生期間28日，C/S=5%, B/S=10%のX線回折結果[14]

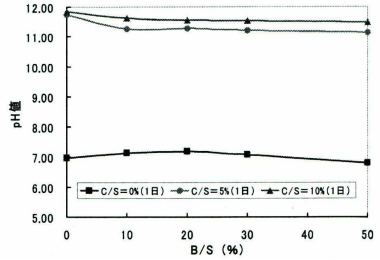


図-2.33　養生期間1日の石膏添加量とpH濃度の関係[14]

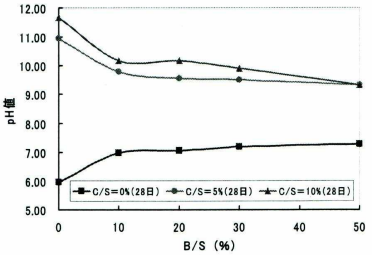


図-2.34　養生期間28日の石膏添加量とpH濃度の関係[14]

以上の3つの既往の研究を総括する。まず、長崎大学が行った再生半水石膏のみで固化処理した研究に着目すると、pHは7.2程度の中性を示すことが判明している。しかし、再生半水石膏由来のふっ素により、固化処理土から土壌環境基準値を大きく上回るふっ素の溶出が確認されている。次に㈱アイコが行った石膏系、PS灰と石灰を主成分とする石灰系固化材を用いた研究に着目すると、pHは石膏系では7.1～7.9の中性域に、石灰系固化材では11.0～12.5の強アルカリ性を示すことが判明した。これらの固化材により固化処理されたものは、全ての条件でふっ素は土壌環境基準値を満足する値が得られている。この研究で使用した石膏系固化材は、あらかじめふっ素の溶出抑制を施したものであるため、このような結果が得られたと考えられる。次に、島根大学が行った半水石膏と高炉セメントB種で固化処理した研究に着目すると、養生日数に関係なくpHは10～11のアルカリ性を示すことが判明している。さらに、高炉セメントB種を5%添加することで、ふっ素溶出量を満足することが確認されている。以上の結果から、再生半水石膏を地盤改良材として用いる場合、中性固化材としての特徴を現すものの、土壌環境基準値を上回るふっ素の溶出が確認されることが明らかとなった。しかし、セメント等の添加材によりふっ素の溶出は抑制されることが確認された。

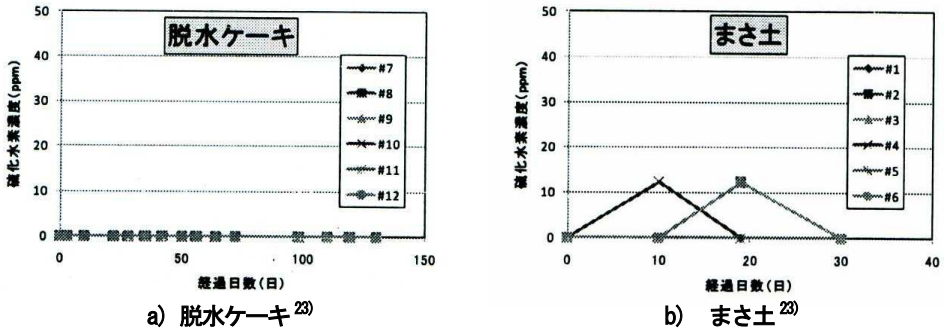
2-5-7　再生半水石膏利用に伴う硫化水素発生特性

1）武下ら[23]は、リサイクル石膏を混合した試料からの硫化水素発生について検討を行っている。用いた土質材料は、まさ土、脱水ケーキ、しらす、博多粘土、黒ボク、赤土の6種類である。また、固化材として、ロータリーキルン間接加熱方式で焼成されたものと、IH加熱方式で焼成されたものを使用している。**表-2.18**に配合条件を示す。

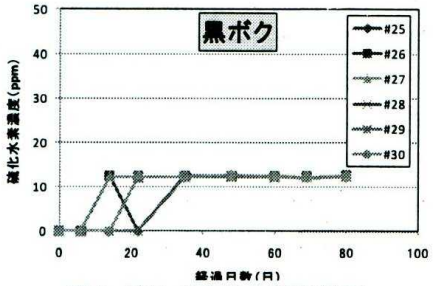
表-2.18　配合条件[23]

Case #	土質材料	半水石膏		混水量(%)
		種類	添加率(%)	
1	まさ土	石膏A	10	143
2			15	
3			20	
4		石膏B	10	116
5			15	
6			20	
7	脱水ケーキ	石膏A	10	143
8			15	
9			20	
10		石膏B	10	116
11			15	
12			20	
13	しらす	石膏A	10	143
14			15	
15			20	
16		石膏B	10	116
17			15	
18			20	
19	博多粘土	石膏A	10	143
20			15	
21			20	
22		石膏B	10	116
23			15	
24			20	
25	黒ボク	石膏A	10	143
26			15	
27			20	
28		石膏B	10	116
29			15	
30			20	
31	赤土	石膏A	10	143
32			15	
33			20	
34		石膏B	10	116
35			15	
36			20	

図-2.35に硫化水素発生試験結果を示す。図に示すように、Ⅰ硫化水素ガスが全く発生しない、Ⅱ硫化水素ガスの発生が一時的に確認されるがその後消失する、Ⅲ硫化水素ガスの発生が確認されさらにその濃度が維持される、3つのパターンがあることが明らかとなった。実験結果をこのパターンに分類すると、脱水ケーキ、しらす、赤土の試料からは、硫化水素ガスの発生は全く認められなかったためⅠに該当する。まさ土、博多粘土については硫化水素ガスが全く発生しない試料も見られたが、硫化水素ガスの発生が一時的に確認されるがその後消失する試料も見られたため、Ⅱに該当する。黒ボクについては全ての試料について硫化水素ガスの発生が確認され、その濃度が維持される傾向が見られたため、Ⅲに該当する。また、リサイクル石膏と土壌を混合して空気との接触期間を十分に設定した試料からは、硫化水素の発生が認められなかったため、石膏混合資材に対しても十分な空気接触と養生期間を設定することが硫化水素発生対策となりうる可能性が示されている。



a) 脱水ケーキ[23)]　　b) まさ土[23)]



c) 黒ボク[23)]

図-2.35　硫化水素発生試験結果[23)]

2) 遠藤ら[24)]はこれまでに、再生石膏の地盤工学的有効利用を目的として、硫化水素ガス発生抑制対策について検討を行うため、再生石膏、生石灰、酸化鉄粉を用いた地盤改良材による硫化水素ガス発生ポテンシャルについて検討している。**図-2.36** に硫化水素ガス培養試験結果を示す。再生石膏添加率に着目すると添加率が上昇するにつれて硫化水素濃度が上昇していることが確認できる。これは、硫化水素発生の原因となる石膏中のデンプン質が増加していることに起因するものと考えられる。次に生石灰添加量との比率に着目すると、比率 0.5 以上では硫化水素ガス濃度が検出されておらず、再生石膏添加量の 50%以上の生石灰を添加すれば硫化水素ガスの発生を抑制できることが示された。

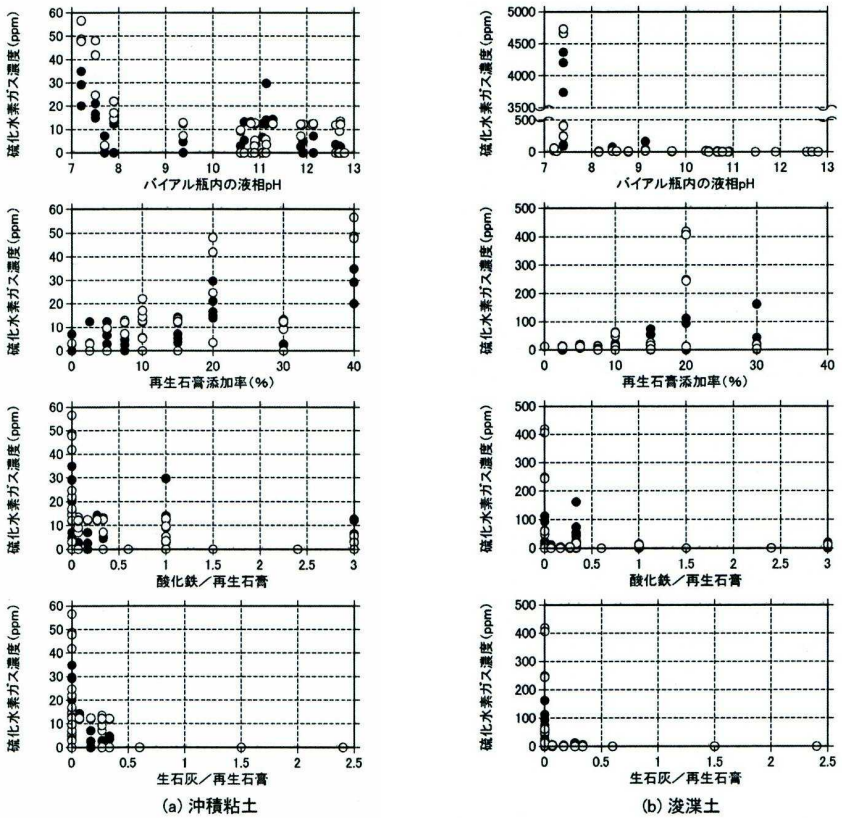


図-2.36　硫化水素ガス培養試験結果図中の●は 2 週間後、○は 4 週間後の培養結果[24)]

以上の 2 つの既往の研究を総括する。再生半水石膏を用いて改良された土質材料は、土質試料の種類の違いによって硫化水素ガス発生特性が大きく異なる。そのため、実施工において適用する際には、土の性状を把握することが必要である。しかし、再生半水石膏添加量の 50%以上の生石灰を混合することで硫化水素ガスの発生は抑制できるため、安全策を考慮して、再生半水石膏のみ添加するのではなく、硫化水素発生抑制安定材を混入するべきであると言える。

2-6　本章のまとめと本研究の着眼点

2-6-1　既往の研究における課題

前章で紹介した既往の研究により、廃石膏ボードから得られる再生半水石膏を混入したセメント改良土の力学、溶出特性に関する実験的検討から、地盤改良材としての適用性の提案がなされている。しかし、現状において把握されていない研究課題も見受けられる。ここでは、それらの課題についてまとめている。

1）土質材料の違いによる影響

再生半水石膏を用いた地盤改良材の強度発現は、自然含水比に大きく依存する。具体的に、含水比 40%の砂質土に半水石膏を 60, 100, 150kg/m^3 添加した場合では、養生 7 日で 200～250kPa の強度発現を示す。さらに、含水比 120%の高含水比粘性土に半水石膏を 100, 200, 300kg/m^3 添加した場合では、養生 7 日で 20～65kPa の強度発現を示す。

要求強度を満足するための強度設定を補助固化材の添加量によって決定することが可能である。しかし、石膏を粘性土に用いる際には含水比の影響が大きく、強度発現が含水比に依存する。そのため、土質試料の違いによって固化効果が異なるため、施工前の段階で土の性状を把握し、配合量を室内試験によって決定する必要がある。このことから、強度と添加量の関係を明確にする必要がある。

2）再生半水石膏の品質の違いによる影響

土に混ぜ合わせる固化材が半水系の場合は、強度発現にある程度の遅れが生じるものの、材齢日数を重ねるにつれて、二水系よりも高い強度が得られる。また、その際土の膨張は二水系よりも半水系を混ぜ合わせたほうに顕著に現れる。具体的に、二水系では、養生 1 日から 30 日にかけて、供試体の湿潤密度が 1.65 から 1.62 への低下が見られた。半水系では、同条件で供試体の湿潤密度が 1.65 から 1.59 への低下が見られた。以上の結果より膨張性について検討していく必要がある。さらに、同じ半水系を使用した場合においても、固化材混合時の締固め度によって土の強度発現が異なる。このように、半水石膏の種類によって固化効果が異なるため、様々な影響因子（例えば焼成方式や発生場所等）に着目し検討する必要がある。

3）養生条件の違いによる影響

粘性土の場合、含水比 120%の供試体を 7 日間養生させた一軸圧縮強さは 50kPa 程度の強度発現を示すため、再生半水石膏の硬化特性は含水比による影響が大きいといえる。さらに、再生半水石膏を混入したセメント安定処理土は、粘り強い材料となり延性的なものに形態変化し、28 日養生後も安定した強度が得られる。しかし、長期耐久性については検討されていないため、長期養生の条件下で耐久性を証明する必要がある。

4）補助固化材の種類の違いによる影響

補助固化材の種類の違い（高炉セメント B 種、普通ポルトランドセメント、高炉水砕スラグ、石灰等）で再生半水石膏を用いた地盤改良材の強度発現は大きく異なる。そのため、早期に高強度が必要な場合は補助固化材の種類を選定しなければならない事が示唆される。そこで、同条件でセメント等の種類の違いによる固化特性及び環境安全性を明確にする必要がある。

5）再生半水石膏により固化された処理土の再泥化挙動

再生半水石膏のみを添加した固化処理土は、水溶性があるものの、耐水性または撥水性の添加物を混合することで水浸に対する安全性が向上する。また、添加量によって耐水性は異なるため、実地盤での施工環境を把握し添加量を設定しなければならない。そのため、土質材料の違いによる影響や、強度安定材の具体的な添加量を把握する必要がある。

6）再生半水石膏からのふっ素溶出特性

再生半水石膏からのふっ素の溶出は、あらかじめ半水石膏からのふっ素の溶出抑制を施したものであれば抑制できる。また、ふっ素の溶出を抑制していない固化処理土においても、高炉セメントＢ種を外割り配合で 5%添加することで、ふっ素の溶出を抑制できる。以上のことから、再生半水石膏を地盤改良材として用いる場合、中性固化材としての特徴を現すものの、土壌環境基準値を上回るふっ素の溶出が確認されるため、セメント等の添加材によりふっ素の溶出を抑制させる必要がある。しかし、実地盤に適用した際のふっ素溶出挙動については明らかにされていないため、検討する必要がある。

7）再生半水石膏利用に伴う硫化水素発生特性

再生半水石膏を用いて改良された土質材料は、土質試料の種類の違いによって硫化水素ガス発生特性が大きく異なる。その差は、40ppm～400ppm と 10 倍以上にのぼる。そのため、実施工において適用する際には、土の性状を把握することが必要である。また、再生半水石膏添加量の 50%以上の生石灰を混合することで硫化水素ガスの発生は抑制できるため、安全策を考慮して、再生半水石膏のみ添加するのではなく、硫化水素発生抑制安定材を混入するべきであると言える。しかし、硫化水素ガスが発生する状態で検討しなければ、安全性は証明できないため、比較的発生しやすい条件下で検討する必要がある。

2-6-2　本研究の着眼点

現在、石膏ボードは建築資材としてその特徴を生かし建築物の安全性と居住性向上に貢献するとともに、リサイクル原料を大量に使用することで地球環境保護に貢献している[13)]。
しかし近年、循環型社会形成推進基本法や、建設リサイクル法が施行されたため、新築現場から排出される廃石膏(新築系廃石膏)、解体現場から排出される廃石膏(解体系廃石膏)のリサイクル処理に焦点が当てられている。このような問題を背景に、廃石膏ボードのリサイクル技術の研究が進められている。そこで本研究では、地盤改良材として再生半水石膏をリサイクルすることを念頭に置き、浅層混合処理工法への適用を想定した際のマニュアルの作成を目的とする。本論文では、再生半水石膏による地盤改良固化特性と環境安全性に焦点を当て検討を行う。以下に本研究の着眼点を示す。

⑴）再生半水石膏により固化処理された材料の強度・変形特性

再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用マニュアルを作成するため、様々な要因が強度・変形特性に及ぼす影響について検討する。

⑵）再生半水石膏により固化処理された材料の耐久性

実施工では、改良土が気象条件（降雨や日照）の影響を受けるため、耐久性が懸念される。そこで、厳しい条件下で耐久性の検討を行い評価する。

⑶）再生半水石膏により固化処理された材料の膨張性

再生半水石膏とセメント系固化材を混合することで、エトリンガイトの生成反応が促進されることが既往の研究から報告されている。しかし、過剰な生成反応は膨張の原因となり長期養生後での事故に繋がり兼ねない。従って、再生半水石膏を混入したセメント改良土を用いて、膨張性を把握する。

⑷）再生半水石膏により固化処理された材料の再泥化特性

既往の研究より、再生半水石膏のみを添加した固化処理土は、水溶性があるものの、耐水性または撥水性の添加物を混合することで水浸に対する安全性が向上することを明らかにしている。しかし、土質材料の違いや具体的な添加量については検討されていないため、その詳細を明確にする必要がある。

(5) 再生半水石膏により固化処理された材料の環境安全性

これまでの既往では、実地盤に適用した際の溶出挙動については明らかにされていない。実際の実地盤では、覆土によってアルカリ成分やふっ素が吸着される可能性があるため、実地盤を想定した際のアルカリ成分及びふっ素溶出挙動を検討する。さらに、実施工では、改良土が気象条件（降雨や日照）の影響を受けアルカリ成分が溶出し、硫化水素ガスが発生しやすい条件へと推移していく可能性がある。また、乾湿繰返しにより供試体内部で硫化水素が発生して硫化物を形成することで強度低下が生じる恐れもある。そのため、乾湿繰返し下における耐久性及び硫化水素発生試験を行う。

(6) ふっ素不溶化材の開発

再生半水石膏のみを添加した場合の改良土は、土壌含水比を低下させるため、添加量や養生期間を長くすることで、固化材としての効果がより顕著になることが既往の研究より報告されているが、ふっ素の溶出が懸念されていることが実情である。しかし、ふっ素不溶化処理された再生半水石膏を搬出することで、リサイクルがより促進されると考えられる。そこで天然鉱物、工業製品、産業廃棄物を用いたふっ素不溶化剤の開発を検討する。

(7) 再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用マニュアルの作成

再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用マニュアルを作成するため、第5章までに得られた実験結果を基に、目標強度及び利用フローについて述べる。

第 3 章　再生半水石膏による地盤改良固化特性

3-1　概説

本章では、再生半水石膏を用いた地盤改良材による改良効果を確認するため、土質材料を改良した際の力学特性について検討した。それぞれの検討項目の詳細について以下に示す。

(1) 固化処理された材料の強度・変形特性

ここでは、土質材料、含水比、固化材添加量、セメント等の種類、養生日数の 5 つの要因に着目し、一軸圧縮試験及びコーン試験により検討した。

(2) 再生半水石膏の種類が強度・変形特性に及ぼす影響

今後、高度経済成長期時代の廃石膏ボードの排出の拡大が予想されるため、再生半水石膏のリサイクルを促進させる上で、種類の違いによる影響を把握する必要がある。そこで、発生場所と破砕方法の違いに着目して検討を行った。

(3) 耐久性の検討

実施工では、改良土が気象条件（降雨や日照）の影響を受けるため、耐久性が懸念される。そこで、乾湿繰返し試験を行い、再生半水石膏添加量の違いによって、強度、体積及び質量に影響があるのか検討した。

(4) 膨張の検討

再生半水石膏とセメント系固化材を混合することで、エトリンガイトの生成反応が促進されることが既往の研究から報告されている。そこで、再生半水石膏を混入したセメント改良土を用いて吸水膨張試験を行い、再生半水添加量の違いによる膨張性への影響を検討した。

(5) 再泥化の検証

再生半水石膏のみを添加した固化処理土は、水溶性があるものの、耐水性または撥水性の添加物を混合することで水浸に対する安全性が向上する。そこで、土質材料の違い、及び固化材添加量の違いに着目し検討した。

3-2　実験に用いた試料と物理特性

(1) 実験に用いた土質材料

土質材料として再生半水石膏の種類の違いによる影響（3-4、3-6）では、粒度調整されたカオリン粘土を用いた。その他の検討では、一般的な土木土質材料として利用されるまさ土、土質材料に建設発生土の有効利用手法の 1 つである洗浄処理時に発生する脱水ケーキ、福岡市内の現場で採取した海成の博多粘土を 2mm ふるいにて粒度調整したものを使用した。**写真-3.1** にまさ土、**写真-3.2** に脱水ケーキ、**写真-3.3** に博多粘土、**写真-3.4** にカオリン粘土を示す。

写真-3.1　まさ土

写真-3.2　脱水ケーキ

写真-3.3　博多粘土

写真-3.4　カオリン粘土

⑵ 固化材（再生半水石膏）

固化材として IH 式半水化装置(130℃～160℃で一定加熱)で焼成されたβ型再生半水石膏を用いた。**写真-3.5** に再生半水石膏を示す。

写真-3.5　再生半水石膏

⑶ 補助固化材（高炉セメント B 種、生石灰）

補助固化材には、高炉セメント B 種を用いた。また、補助固化材の種類の違いによる再生半水石膏を用いた地盤改良材への力学特性の影響を把握するため、3-3-4, 3-3-8 では生石灰を用いている。**写真-3.6** に高炉セメント B 種、**写真-3.7** に生石灰を示す。

写真-3.6　高炉セメントB種

写真-3.7　生石灰

(4) 実験に用いた試料の物理特性

本研究で用いた試料の粒径加積曲線を**図-3.1** に示す。図に示すようにまさ土は粒径幅が広く、粒度分布の良い試料であることがわかる。博多粘土、脱水ケーキ、カオリン粘土及び再生半水石膏は粘土・シルト分で構成されていることが分かる。

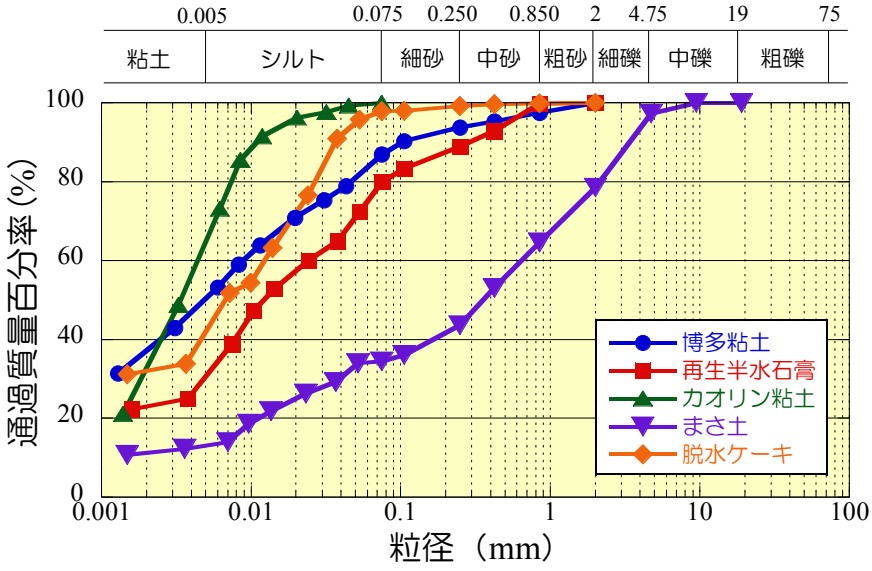


図-3.1　粒径加積曲線

表-3.1 に試料の物理特性を示す。博多粘土及び脱水ケーキは、高有機質土であることがわかる。

表-3.1　物理特性値

	博多粘土	まさ土	脱水ケーキ	カオリン粘土	IH式再生半水石膏
粒子密度ρ_s(g/cm^3)	2.737	2.721	2.620	2.731	2.951
細粒分含有率Fc(%)	86.9	17.4	100.0	100.0	80.0
液性限界w_L(%)	79.65	44.90	58.54	52.10	-
塑性限界w_P(%)	30.94	33.79	37.56	22.60	-
塑性指数I_P	48.71	11.11	20.98	29.46	-
強熱減量(%)	9.79	4.14	18.40	3.11	-
pH	8.08	-	-	-	7.46
F^-(mg/l)	1.21	-	-	-	5.94

3-3　固化処理土の強度・変形特性

3-3-1　実験概要及び結果

(1-1) 盛土材等への適用を想定した固化処理土の作製方法

①質材料を風乾させたものを準備する。その後、土質材料に対する重量比で配合条件に応じて添加材を混合する。

②土質材料と添加材が均一になるように混合した後、混合後の試料が最適含水比となるように水を加え混合し含水比を調整する（**写真-3.8, 3.9**）。

写真-3.8　試料混合の様子

写真-3.9　混合後の試料

③含水比調整した試料の供試体の密度はいずれも D=95%(D= ρ_d / ρ_{dmax})とする。**表-3.2** に締固め特性値を示す。

表-3.2　締固め特性値

土質材料	再生半水石膏 添加量(kg/m^3)	最大乾燥密度 ρ_{dmax}(g/cm^3)	最適含水比 w_{opt}(%)	締固め密度 ρ_{dmax}(g/cm^3)
まさ土	0	1.934	12.14	1.84
	200	1.873	13.59	1.78
	280	1.826	16.16	1.73
脱水ケーキ	0	1.396	26.69	1.33
	200	1.377	30.87	1.31
	280	1.377	30.86	1.31

④試料を配合条件に従い混合した後、直径 5cm、高さ 10cm の円柱モールドに締固め密度 D=95%となるように試料を計量する。計量後、モールドに 5 層に分けて突き固める(**写真-3.10, 3.11**)。

写真-3.10　モールドの様子

写真-3.11　突き固めの様子

⑤表面を成型後、モールドから脱型し、ラップで密封して恒温室にて一定期間養生する(**写真-3.12, 3.13**)。

写真-3.12　成型の様子

写真-3.13　養生の様子

（1-2）高含水比軟弱地盤改良を想定した固化処理土の作製方法

①土質材料が設定含水比になるよう水を加え、約 1 分間撹拌し調整する（**写真-3.14**）。その後、添加材を加え、さらに約 5 分間混合する（**写真-3.15**）。

写真-3.14　撹拌の様子

写真-3.15　添加材投入の様子

②供試体については、安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法[25](JGS0821-2000)に準じて、直径φ5×高さh10(cm)の塩ビ製モールドに打設した。このとき、供試体に空隙が残らないように各層 30 回モールドを床にタッピングして振動を与えた。タッピングの様子を**写真-3.16** に示す。

a）試料の投入の様子

b）タッピングの様子

写真-3.16　モールドに打設する様子

③打設の翌日に供試体上部を整形、翌々日に脱型し、ラップに包み 20℃一定の恒温室で所定日数養生させた。**写真-3.17** に成型、脱型、養生の様子を示す。

a）成型

b）脱型

c）養生

写真-3.17　成型から養生までの流れ

（2）一軸圧縮試験方法（JIS A 1216）

養生後の供試体の質量を量り、ノギスで高さと直径を 3 箇所ずつ読む。その後、一軸圧縮試験機に設置し、ひずみ速度 1%/min にて一軸圧縮試験を行う。圧縮力が最大となってから、引き続きひずみが 2%以上生じるか、圧縮力が最大値の 2/3 程度に減少するか、又は圧縮ひずみが 15%に達したら圧縮を終了した。試験終了後の供試体から、破壊した破片を採り含水比を測定した。**写真-3.18** に一軸圧縮試験装置を示す。

写真-3.18　一軸圧縮試験装置

(3) コーン指数試験（JIS A 1228）概要

(1) で示したように試料を作製した後、直径φ10×高さ h12.5(cm)の塩ビ製モールドに 3 層に分けて突固めて作製した打設した。なお、モールド内に突固める際は、一軸圧縮試験と同様の締固め度 D=95%（$D=\rho_d/\rho_{dmax}$）になるように試料の質量を測り、タンピング法にて供試体を作製した（**写真-3.19**）。その後、供試体表面をラップに包み 20℃一定の恒温室で所定日数養生させた（**写真-3.20**）。

写真-3.19　タンピングの様子

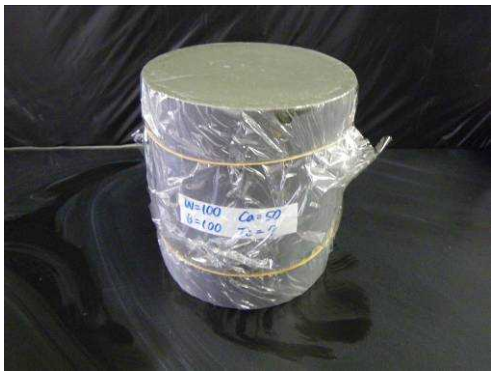


写真-3.20　供試体作製後の様子

供試体作製後、供試体質量を測定する。その後、コーン指数試験機に設置し、1cm/s の貫入速度で貫入する（**写真-3.21**）。その際、コーンが 5cm, 7.5cm, 10cm 連続的に押し込んだときの貫入抵抗力を平均し、平均貫入力 Qc（N）を求める。その後モールドから供試体を取り出し、含水比 w（%）を測定する。

写真-3.21　コーン貫入時の様子

(4) 実験条件

以下に示す各々の安定材の添加量は、乾燥土 $1m^3$ に対する質量比を示している。

Ⅰ土質材料の違いが力学特性に及ぼす影響（3-3-2）

表-3.3 に土質材料の違いが、再生半水石膏の凝結硬化作用に及ぼす影響を把握することを目的とし行った一軸圧縮試験の配合条件を示す。含水比は、まさ土、脱水ケーキは最適含水比、博多粘土は軟弱地盤を想定して 65%とした。

表-3.3　土質材料の違いに着目した配合条件

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)
まさ土	w_{opt}	0, 200, 280	7
脱水ケーキ	w_{opt}		
博多粘土	65%	75, 100, 150	

Ⅱ含水比の違いが力学特性に及ぼす影響（3-3-3）

表-3.4 に再生半水石膏の凝結硬化作用と含水比の影響を把握することを目的とし行った一軸圧縮試験の配合条件を示す。含水比を 65～100%の 5%ピッチ、再生半水石膏添加量を 50～150kg/m^3 とした。また、養生日数は再生半水石膏の速硬性を考慮し、養生日数に影響されないとして 3 日とした。

表-3.4　含水比の違いに着目した配合条件

土質試料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)
博多粘土	65 70 75 80 85 90 95 100	50 75 100 150	3

Ⅲ固化材及び補助固化材添加量の違いが力学特性に及ぼす影響（3-3-4）

表-3.5 に固化材及び補助固化材添加量の違いの影響を把握することを目的とし行った一軸圧縮試験の配合条件を示す。補助固化材の添加量を 35～75kg/m^3 とした。

表-3.5　固化材及び補助固化材添加量の違いに着目した配合条件

土質材料	含水比 w(%)	再生半水石膏 B(kg/m^3)	高炉セメントB種 B_C(kg/m^3)	養生日数 t_c(day)
博多粘土	80 100 120	75 150	35 45 55 65 75	7 28

Ⅳセメント等の種類の違いが力学特性に及ぼす影響（3-3-5、3-3-8）

表-3.6 に補助固化材の種類の違いによる影響を把握するため行った、一軸圧縮試験とコーン試験の配合条件を示す。

表-3.6　補助固化材の種類の違いに着目した配合条件

土質材料	含水比 w(%)	再生半水石膏 B(kg/m^3)	生石灰 高炉セメントB種 C_A, B_C(kg/m^3)	養生日数 t_c(day)
博多粘土	100	0 100 200	50 75 100	7 14 28

Ⅴ養生日数の違いが力学特性に及ぼす影響（3-3-5）

表-3.7 に養生日数の違いによる影響を把握するために行った、一軸圧縮試験の配合条件を示す。養生日数については、7～182 日まで変化させた。また、高炉セメントＢ種については固化材添加量 0kg/m^3、補助固化材添加量 75kg/m^3 は検討していない。

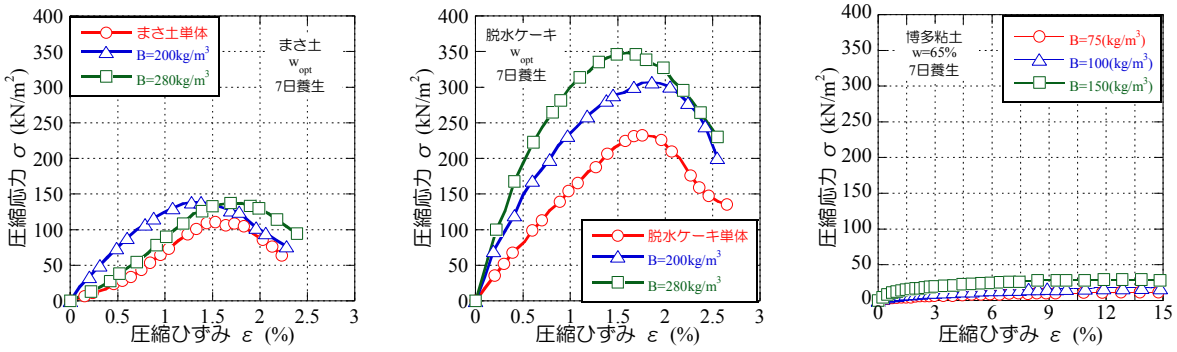
表-3.7　養生日数の違いに着目した配合条件

土質材料	含水比 w(%)	再生半水石膏 B(kg/m^3)	生石灰 高炉セメントB種 C_A, B_C (kg/m^3)	養生日数 t_c(day)
博多粘土	100	100 200	50 75 100	7, 14, 28, 56 72, 91, 136, 182

(5) 実験結果

Ⅰ土質材料の違いに着目した一軸圧縮試験結果

土質材料であるまさ土、脱水ケーキ、博多粘土に再生半水石膏のみを添加した際の一軸圧縮試験結果を**図-3.2 a)～c)** に示す（各データは代表値を示している）。



a)　まさ土　　b)　脱水ケーキ　　c)　博多粘土

図-3.2　一軸圧縮試験結果（7 日養生）

図に示すようにまさ土、脱水ケーキは再生半水石膏添加量の増加に伴ってせん断に伴う圧縮応力が大きくなっていることがわかる。これは、再生半水石膏の凝結硬化作用によるものであると考えられる。また、再生半水石膏を添加しない場合には圧縮ひずみの増加に伴って圧縮応力が増加し、圧縮ひずみ量 1.5～2%でピーク値に達した後は、急激に低下している。再生半水石膏を添加した場合にも、添加しない場合との間に大きな違いは見られないことがわかる。次に博多粘土に着目すると、強度発現を示していないことがわかる。このことから、再生半水石膏の凝結硬化作用は、含水比に大きく依存していると考えられる。

Ⅱ含水比の違いに着目した一軸圧縮試験結果

土質材料である博多粘土に再生半水石膏のみを添加した際の一軸圧縮試験結果を**図-3.3（a）～（h）**に示す（各データは代表値を示している）。また、**図-3.4**に含水比と湿潤密度の関係を示す。

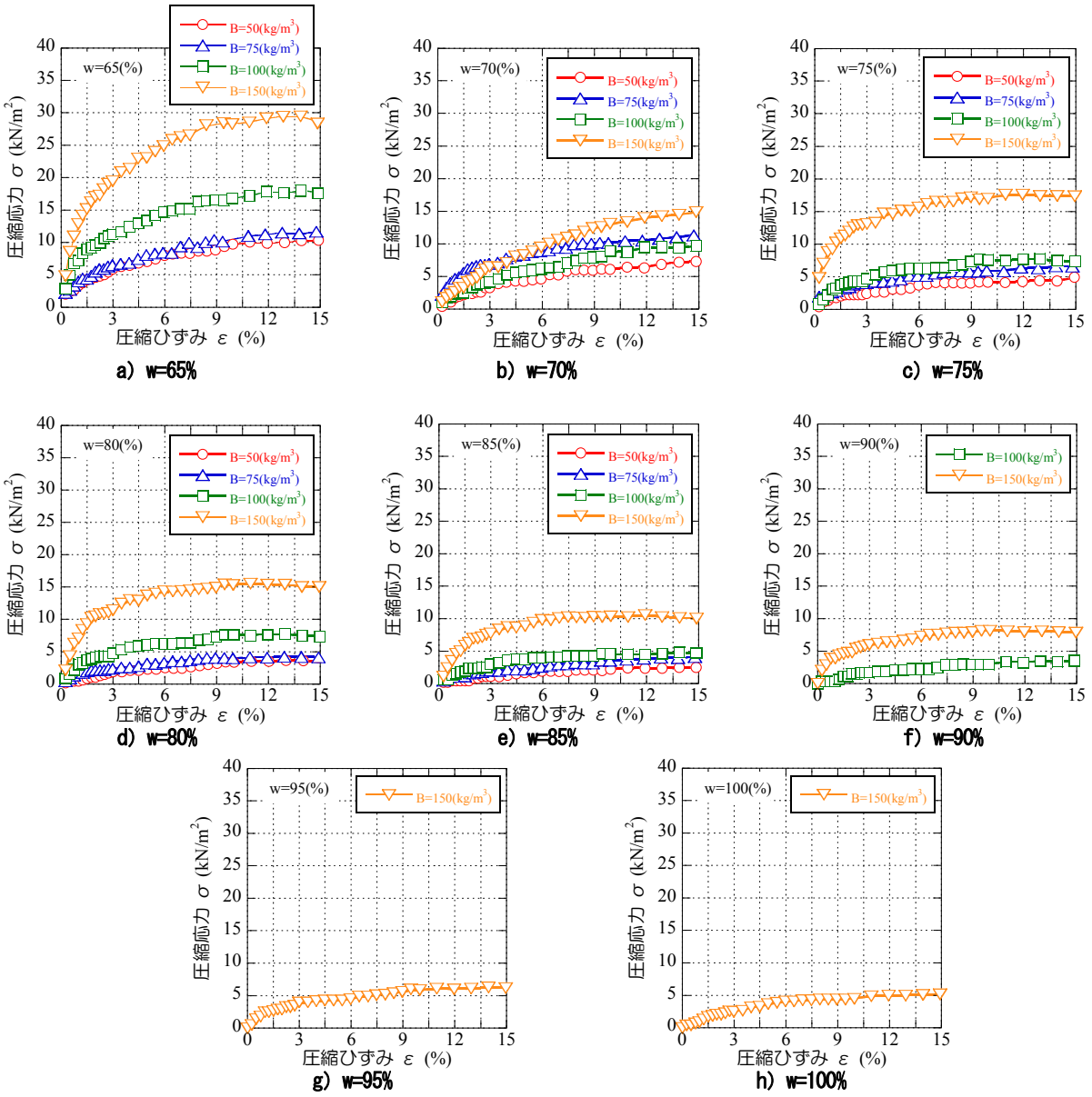


図-3.3　一軸圧縮試験結果（再生半水石膏のみ）

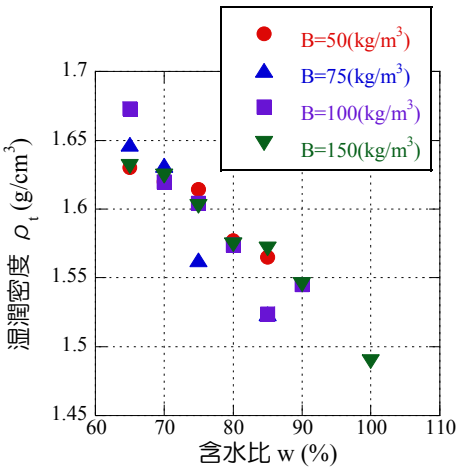


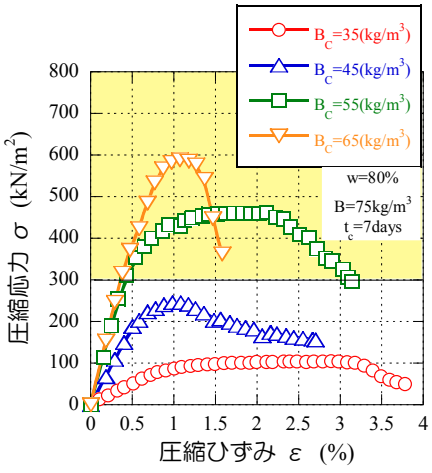
図-3.4　含水比と湿潤密度の関係

図-3.3 より、再生半水石膏添加量の増加に伴い、せん断に伴う圧縮応力も増加していることが分かる。また、全ての条件において設定含水比の増加に伴い、圧縮応力は減少している。これは、**図-3.4** より、含水比の増加に伴い土全体の液相の割合が増加し、湿潤密度が低下しているため、強度が低下したと考えられる。さらに、設定含水比 w＝100(%)において硬化作用が発揮したのは、再生半水石膏添加量 B=150(kg/m^3)の場合のみであった。また、再生半水石膏添加量 B=50, 75(kg/m^3)では w=90(%)、B=100(kg/m^3)では w=95(%)まで含水比を増加させると脱型した際に供試体が自重によって変形した。**写真-3.12** に自重によって変形した供試体を示す。

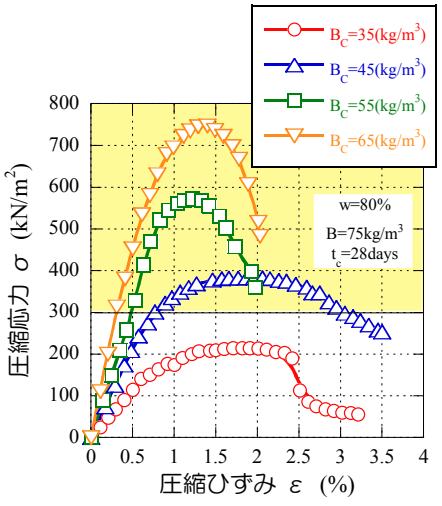
写真-3.22　自重によって変形した供試体

Ⅲ再生半水石膏と補助固化材（高炉セメント B 種）を添加した一軸圧縮試験結果

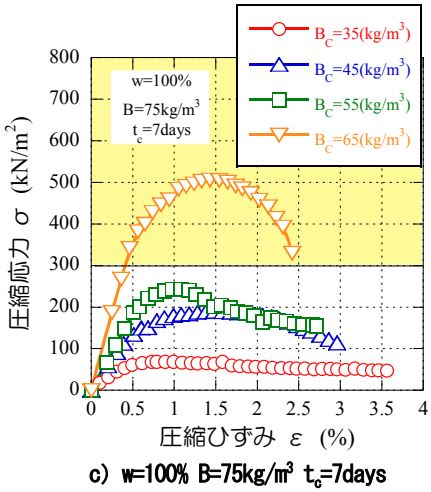
図-3.5（a）～（j）に補助固化材を添加した際の一軸圧縮試験結果を示す。ここで、図中の色枠は浅層混合処理としての改良地盤の要求強度である 300(kN/m^2)以上を示している（各データは代表値を示す）。



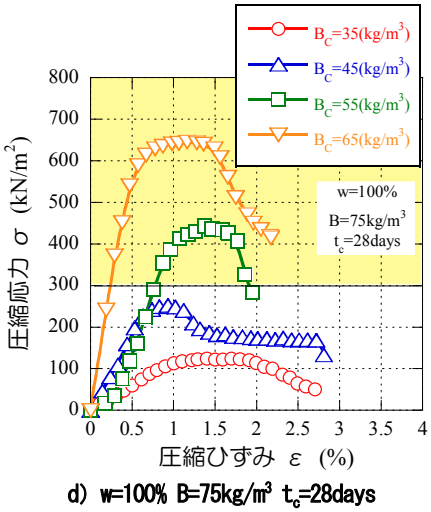
a）w=80% B=75kg/m^3 t_c=7days



b）w=80% B=75kg/m^3 t_c=28days



c）w=100% B=75kg/m^3 t_c=7days



d）w=100% B=75kg/m^3 t_c=28days

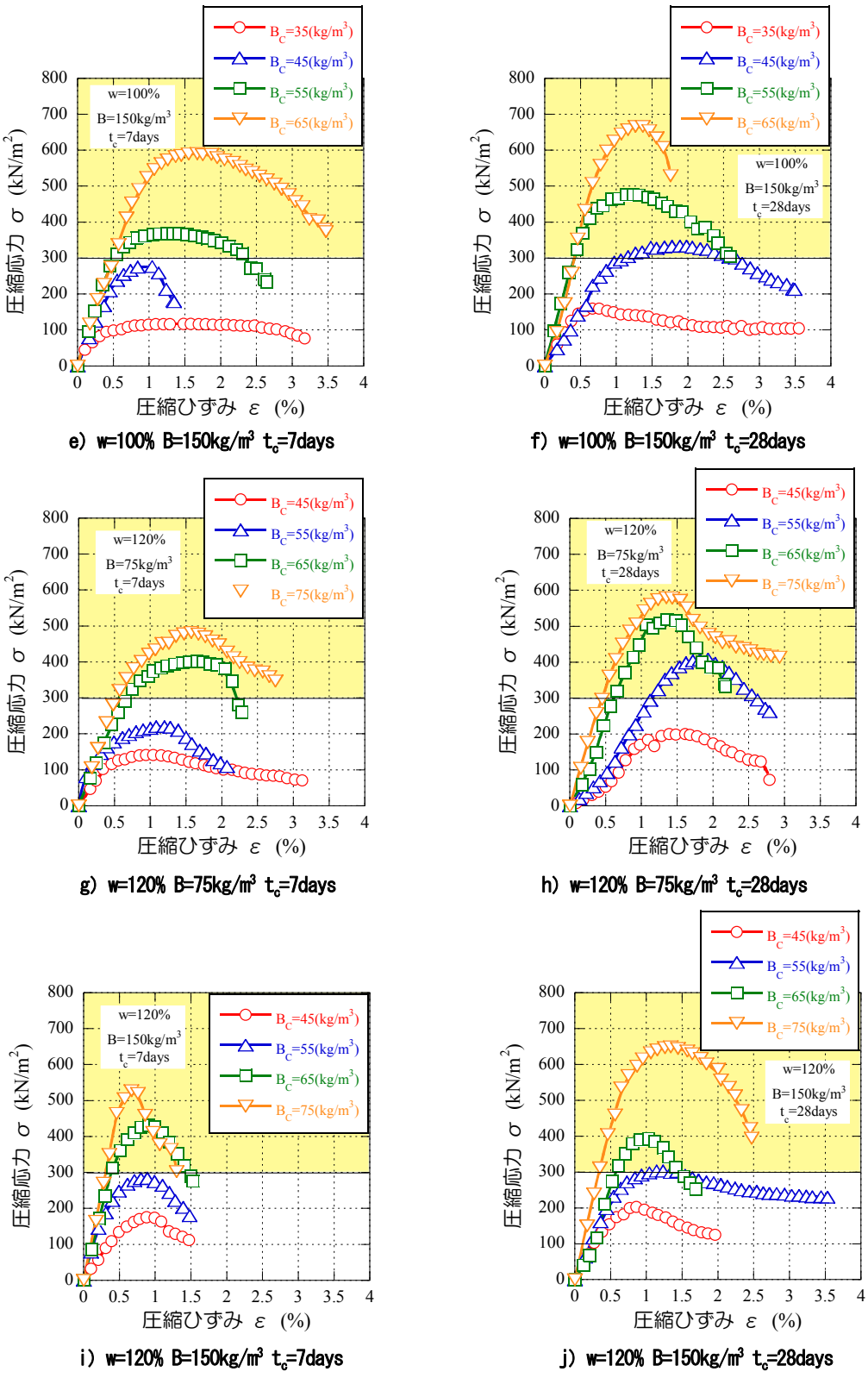
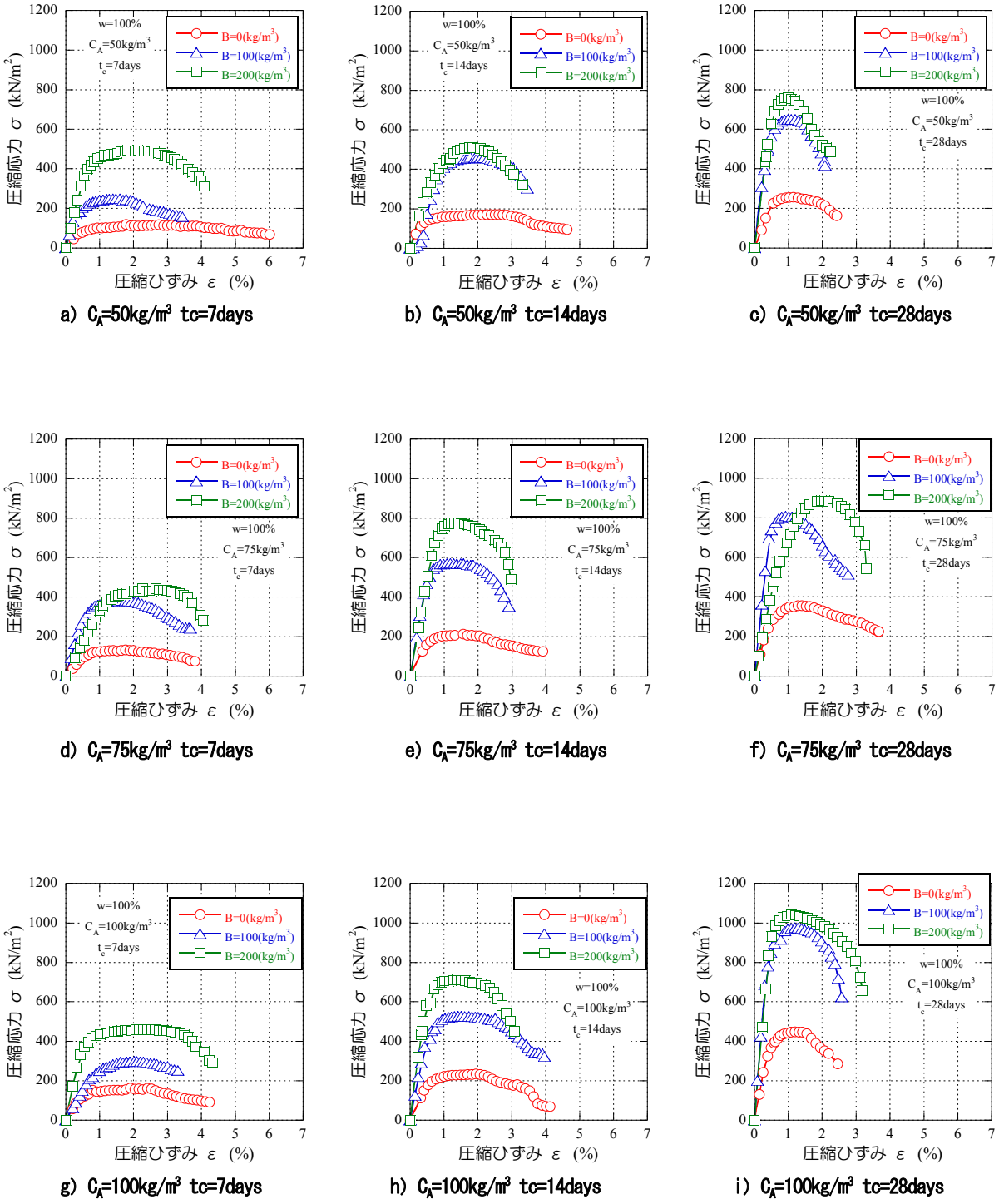


図-3.5　一軸圧縮試験結果（補助固化材添加）

図-3.5 より、再生半水石膏の添加量の増加に伴い、せん断に伴う最大圧縮応力が増加していることが分かる。次に、破壊形態に着目すると、再生半水石膏添加量が増加すると延性的な破壊形態を示していることがわかる。これは、再生半水石膏の特徴である材料特性の改善作用が現れていると考えられる。含水比に着目すると、博多粘土の含水比の増加に伴い、せん断に伴う最大圧縮応力は減少しているが、補助固化材を添加することにより、再生半水石膏のみを添加した際と比べ、大きな強度発現を示すことが明らかとなった。また、養生 7 日の場合において、補助固化材添加量 B_C=35, 45(kg/m^3)では、軟弱地盤の浅層混合処理材料としての改良された地盤の一軸圧縮強度である 300(kN/m^2)を満足できないことが判明した。

Ⅳ補助固化材の種類（生石灰、高炉セメントＢ種）の違いに着目した一軸圧縮試験結果

図-3.6（a）～（i）に補助固化材として生石灰を添加した場合、**図-3.7（a）～（d）**に高炉セメント B 種を添加した場合の一軸圧縮試験結果を示す。

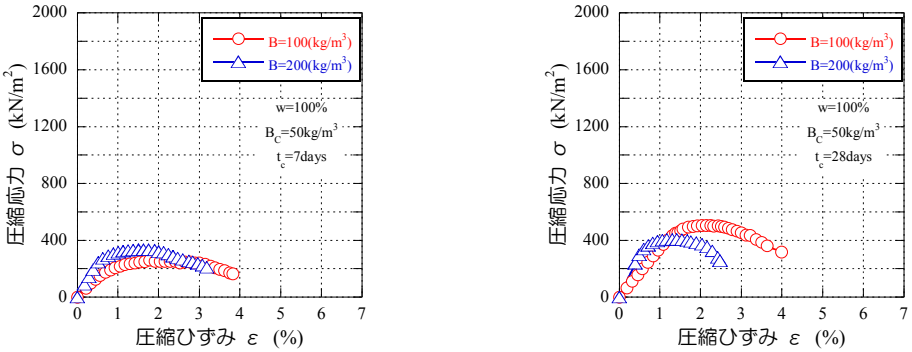


a）C_A=50kg/m³ tc=7days　b）C_A=50kg/m³ tc=14days　c）C_A=50kg/m³ tc=28days

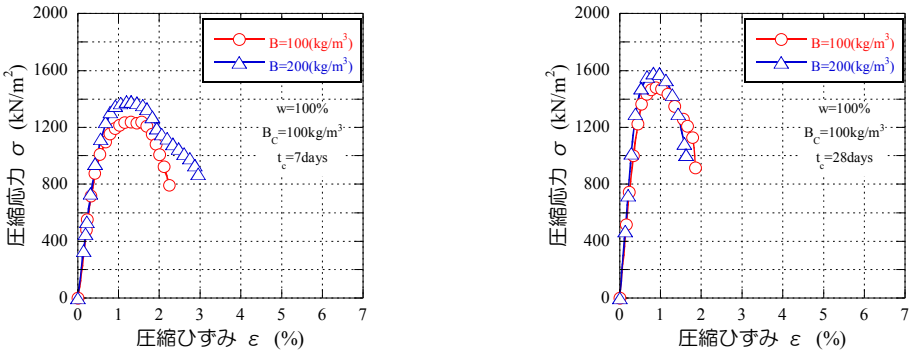
d）C_A=75kg/m³ tc=7days　e）C_A=75kg/m³ tc=14days　f）C_A=75kg/m³ tc=28days

g）C_A=100kg/m³ tc=7days　h）C_A=100kg/m³ tc=14days　i）C_A=100kg/m³ tc=28days

図-3.6　一軸圧縮試験結果（生石灰添加）



a) B_C=50kg/m³ tc=7days　　b) B_C=50kg/m³ tc=28days



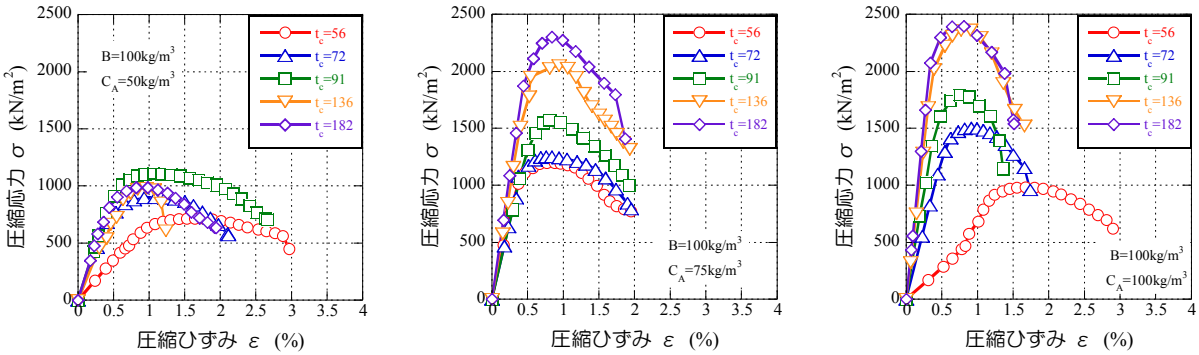
c) B_C=100kg/m³ tc=7days　　d) B_C=100kg/m³ tc=28days

図-3.7　一軸圧縮試験結果（高炉セメントB種添加）

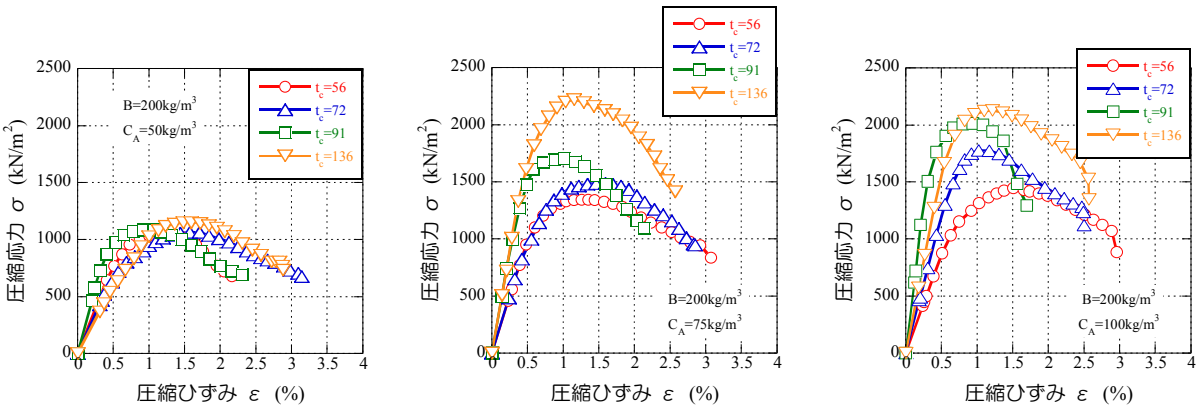
図-3.6 及び**図-3.7** より、補助固化材添加量が増加するにつれて、せん断に伴う最大圧縮応力が増加していることが分かる。またその傾向は、再生半水石膏添加量が多い条件で顕著であり、添加していない条件と比較しても明らかであることが分かる。これは、再生半水石膏の特徴である凝結硬化作用が働いたためであると考えられる。次に養生日数に着目すると、全ての条件において最大圧縮応力が増加する傾向が示された。このことから、長期的にも安定した強度が得られることが示唆される。次に、補助固化材の種類に着目すると、補助固化材添加量 50kg/m³ の場合は、生石灰を添加した条件の方が大きな強度発現を示しているが、補助固化材添加量 100kg/m³ の場合は、高炉セメント B 種の方が大きな強度発現を示していることがわかる。このことから、再生半水石膏添加量と補助固化材添加量には強度を発現するための最適な配合があると考えられる。

V長期養生条件下での一軸圧縮試験結果

図-3.8（a）～（f）に補助固化材として生石灰を添加した場合、**図-3.9（a）～（d）**に高炉セメントB種を添加した場合の長期養生日数においての一軸圧縮試験結果を示す。

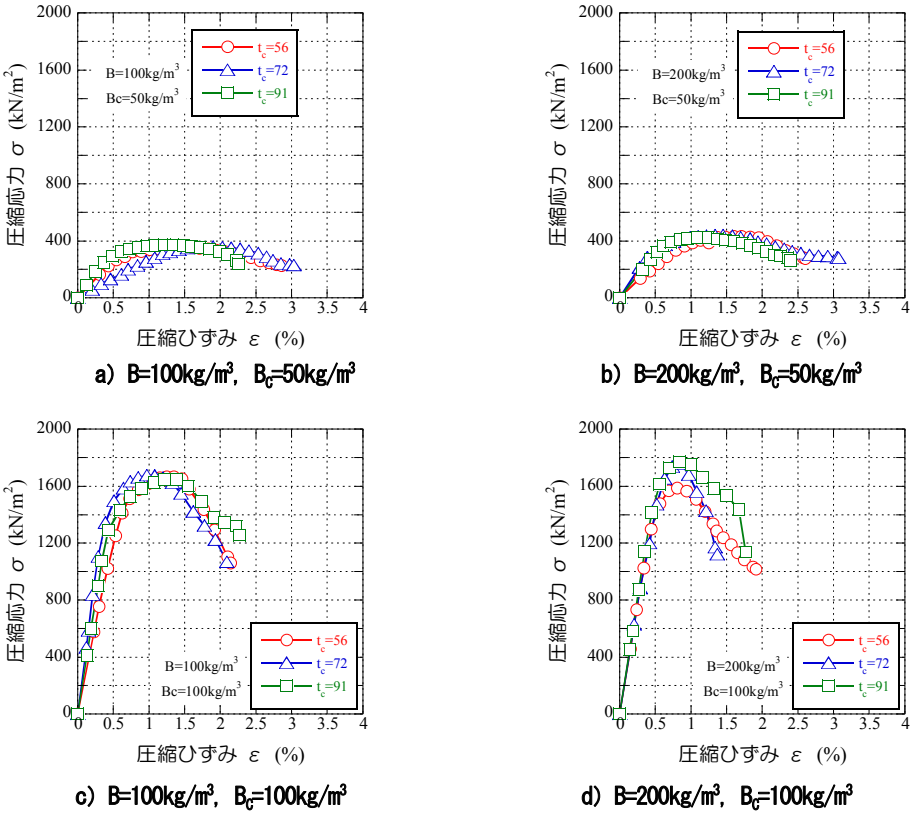


a) B=100kg/m³, C_A=50kg/m³　　b) B=100kg/m³, C_A=75kg/m³　　c) B=100kg/m³, C_A=100kg/m³



d) B=200kg/m³, C_A=50kg/m³　　e) B=200kg/m³, C_A=75kg/m³　　f) B=200kg/m³, C_A=100kg/m³

図-3.8　一軸圧縮試験結果（生石灰添加、長期養生日数）



a) B=100kg/m³, B_C=50kg/m³　　b) B=200kg/m³, B_C=50kg/m³

c) B=100kg/m³, B_C=100kg/m³　　d) B=200kg/m³, B_C=100kg/m³

図-3.9　一軸圧縮試験結果（高炉セメントＢ種添加、長期養生日数）

図-3.8 及び**図-3.9** より、養生日数の増加に伴い全ての条件において最大圧縮応力が増加する傾向が示された。また、再生半水石膏添加量に着目すると、長期養生後も、添加量が多い条件の方が強度が増進していることがわかる。このことから、再生半水石膏を用いた地盤改良材は、長期的にも安定した強度が得られることが明らかとなった。

3-3-2　土質材料の違いが力学特性に及ぼす影響

図-3.10 に再生半水石膏のみ添加した材料の再生半水石膏添加量と一軸圧縮強さの関係、**図-3.11** に破壊ひずみ、**図-3.12** に変形係数の結果を示す（各データは平均値を示す）。

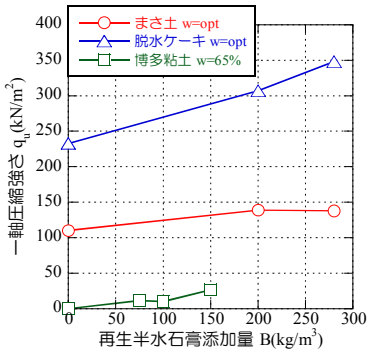


図-3.10　再生半水石膏添加量と一軸圧縮強さの関係

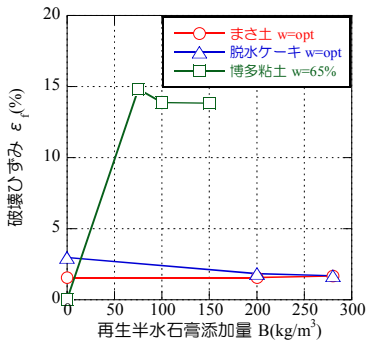


図-3.11　再生半水石膏添加量と破壊ひずみの関係

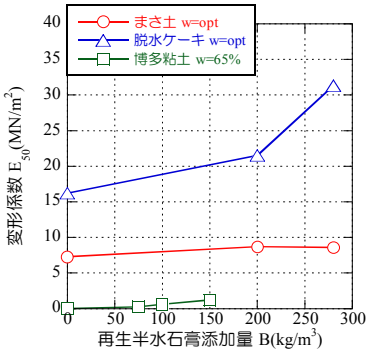


図-3.12　再生半水石膏添加量と変形係数の関係

図-3.10 に示すようにまさ土及び脱水ケーキは、一般盛土材としての目標強度である q_u=100kN/m^2 を満足していることがわかる。一方で博多粘土は、泥土と判断される q_u=50kN/m^2 以下の強度を示している。これは、**図-3.2** に示す一軸圧縮試験結果からも同様なことが言える。さらに、**図-3.11** と**図-3.12** に示す破壊ひずみと変形係数の結果より、土質試料の違いにより力学特性に変化があることがわかる。以上の結果より、再生半水石膏のみを地盤改良材として高含水比粘性土に用いる場合、強度発現が含水比に依存することが明らかとなった。さらに、土質材料の違いによって再生半水石膏による凝結硬化作用が異なることから、施工前の段階で土の性状を把握し、配合量を決定する必要がある事が示唆される。

3-3-3　含水比の違いが力学特性に及ぼす影響

(1) 含水比と一軸圧縮強さの関係

図-3.13 に博多粘土に半水石膏のみを添加した際の再生半水石膏添加量と一軸圧縮強さの関係を示す（各データは平均値を示す）。

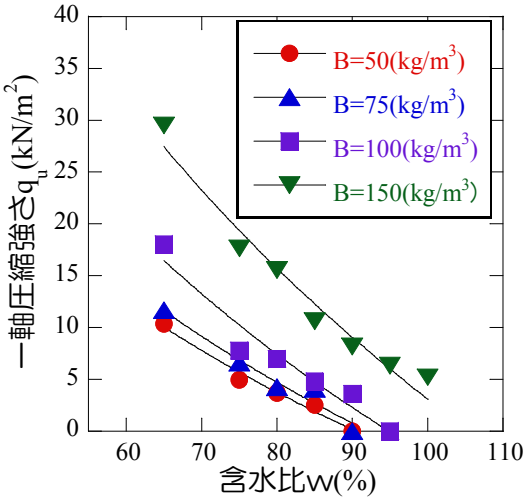
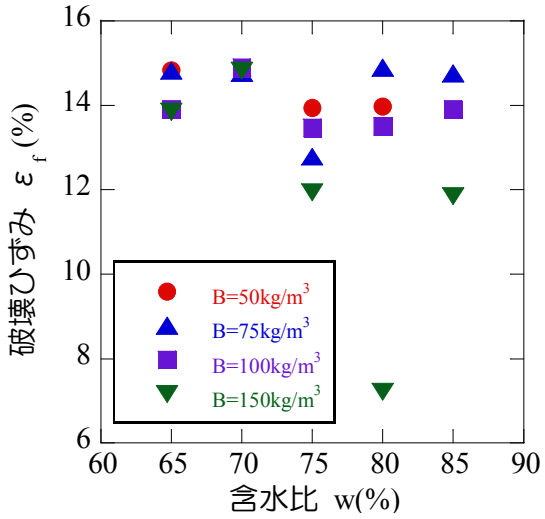


図-3.13　含水比と一軸圧縮強さの関係

博多粘土の初期含水比の増加に伴い、一軸圧縮強さは低下していることが分かる。これは**図-3.3** の一軸圧縮試験結果からも同様なことが言える。また、w=100(%)において再生半水石膏の凝結硬化作用が働いたのは再生半水石膏添加量 B=150(kg/m^3)の場合のみであり、再生半水石膏の凝結硬化作用は、対象土の設定含水比に大きく依存しており、再生半水石膏の凝結硬化作用に対する限界の含水比が存在することが示された。

(2) 含水比と破壊ひずみの関係

図-3.14 に土質試料である博多粘土に半水石膏のみを添加した際の半水石膏添加量と破壊ひずみの関係を示す（各データは平均値を示している）。



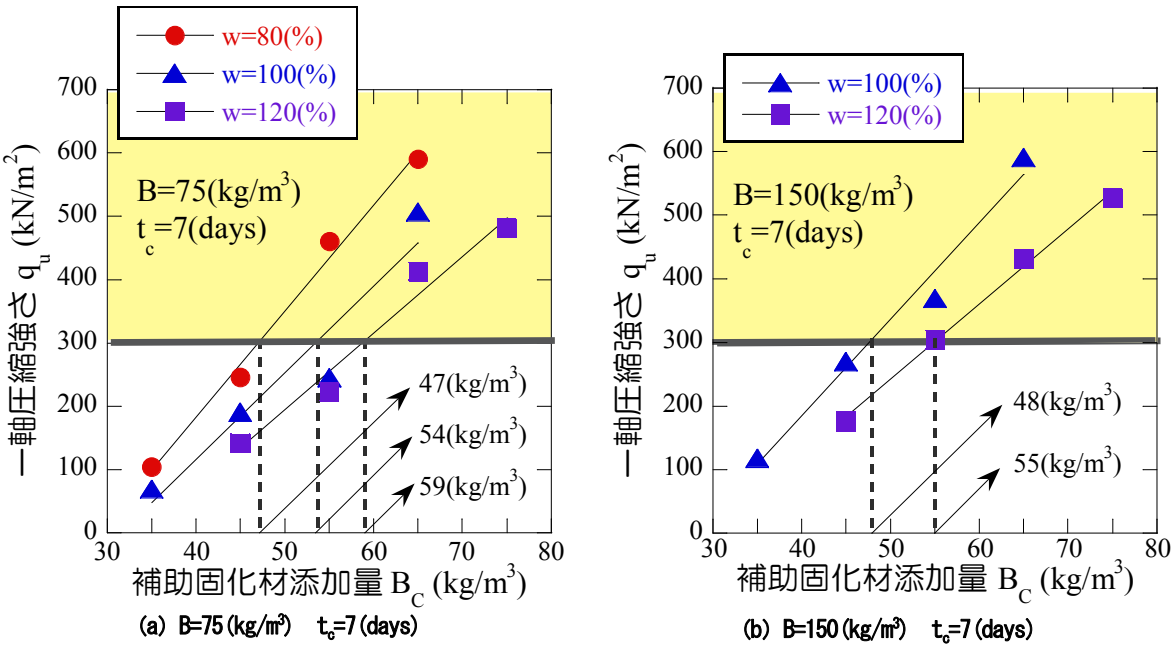
図－3.14　含水比と破壊ひずみの関係

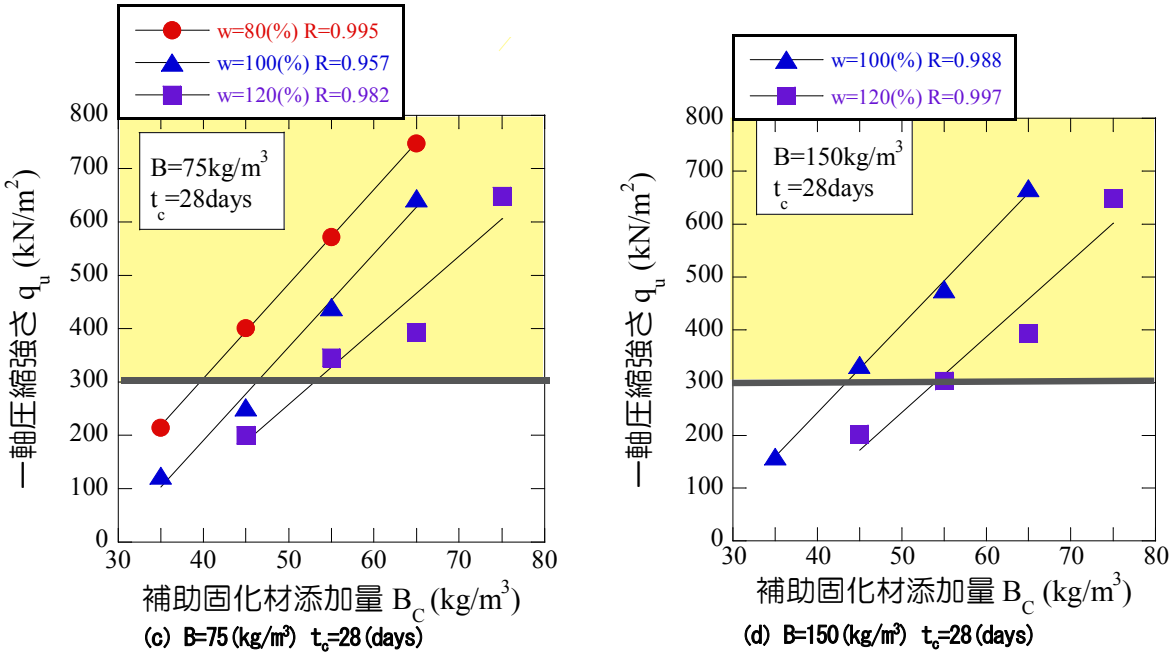
博多粘土の含水比の増加に伴い、破壊ひずみは全体的に減少傾向にあることが分かるが、含水比 w=70～85(%)にかけて破壊ひずみは増加している。また、含水比 w=70(%)においては、全ての添加量においてほぼ同一の値を示した。

3-3-4　固化材及び補助固化材添加量の違いが力学特性に及ぼす影響

(1) 補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係

図-3.15 (a) ～ (j) に示す一軸圧縮試験結果を基に作成した、再生半水石膏と補助固化材（高炉セメントB種）を添加した際の養生 7, 28 日の補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係を**図-3.13** に示す。（各データは代表値を示している）





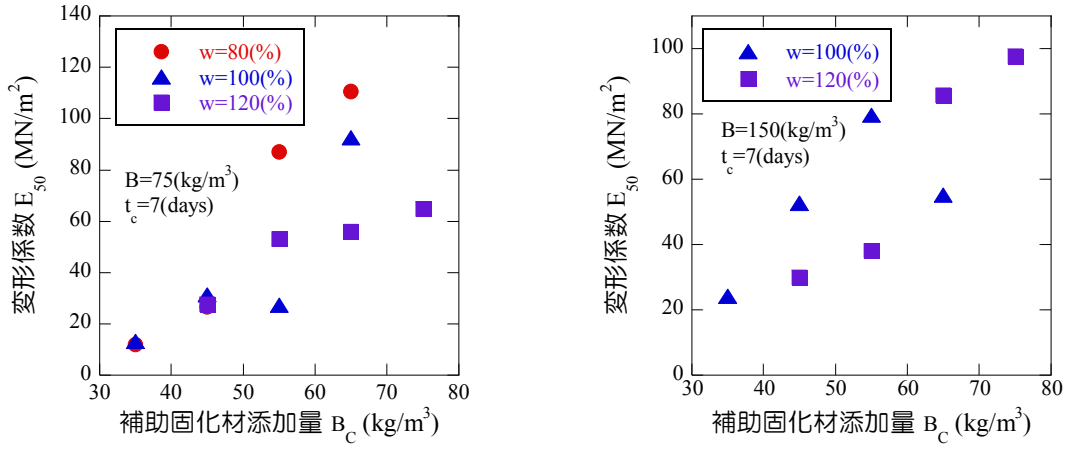
(c) B=75(kg/m³) t_c=28(days)　(d) B=150(kg/m³) t_c=28(days)

図−3.15　補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係

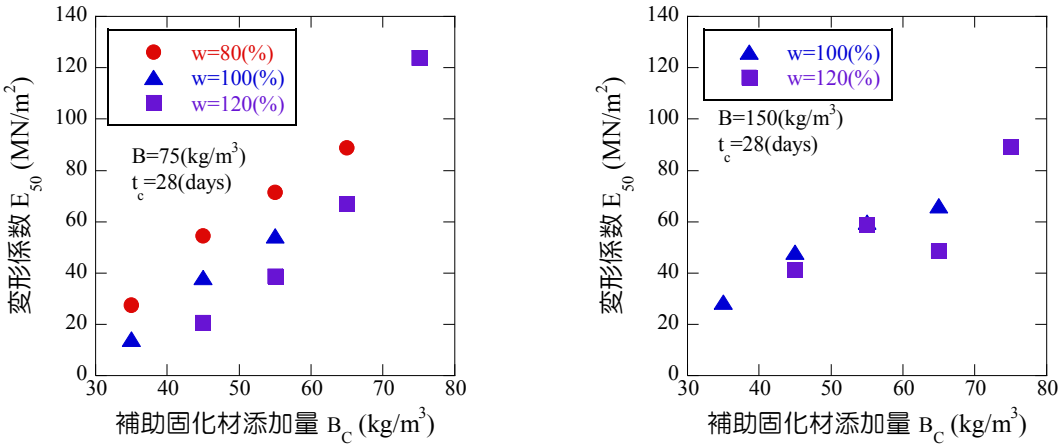
図-3.13 に補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係を示す。図中の色枠は浅層混合処理工法の要求強度である 300kN/m^2 以上を示している。いずれの条件ともに、補助固化材添加量が増加するにつれて大きな強度発現を呈していることが分かる。これは、再生半水石膏のみの強度発現と比較しても明らかである。また、全ての条件において補助固化材添加量と一軸圧縮強さの相関性が良く、目標強度である養生 7 日において 300kN/m^2 を満足する補助固化材の最低添加量を近似式を用いて推測することができる。a), b)の図中に要求強度を満足する補助固化材の最低添加量の検討結果を示す。含水比に着目すると、含水比の増加に伴い要求強度に必要な最低添加量が増加していることがわかる。これは、水セメント比(W/C)の関係によるものと考えられ、近似式を利用して要求値を満足する W/C を導出するとほぼ 13～15 以下であった。次に、再生半水石膏添加量に着目し、a), b)を比較すると、再生半水石膏添加量が増加するに伴って図中に示す要求強度を満足する補助固化材最低添加量が減少していることがわかる。これは、再生半水石膏の凝結硬化作用が改良効果に働いたためであると考えられる。実施工を想定した場合、再生半水石膏を添加することで要求強度に必要なセメント量を減少することが可能になると考えられる。

(2) 補助固化材添加量と変形係数の関係

再生半水石膏と補助固化材を添加した際の養生 7, 28 日の補助固化材添加量と変形係数の関係を**図-3.16** に示す(各データは平均値を示している)。



(a) B=75(kg/m³)　t_c=7(days)　(b) B=150(kg/m³)　t_c=7(days)



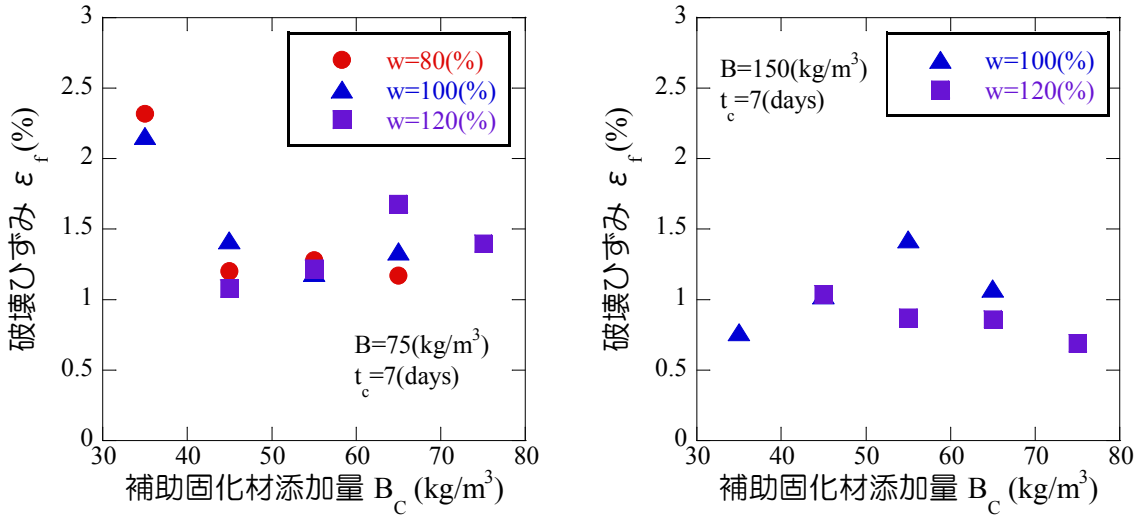
(c) B=75(kg/m³) t_c=28(days)　　(d) B=150(kg/m³) t_c=28(days)

図—3.16　補助固化材添加量と変形係数の関係

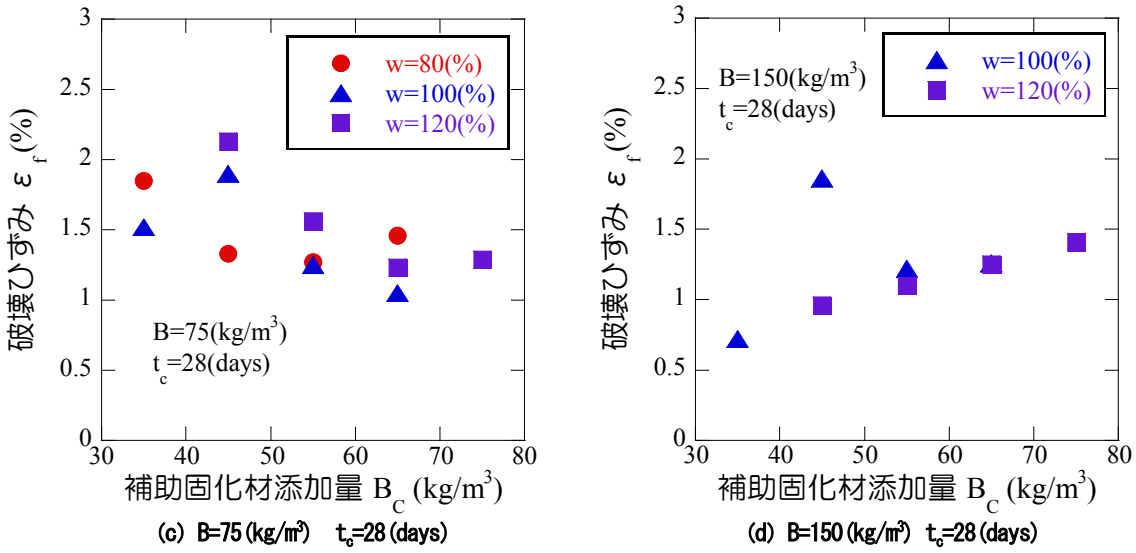
補助固化材添加量が増加するに伴い、変形係数も増加していることが分かる。また、半水石膏添加量の増加、土質試料の含水比の低下においても、変形係数は増加している。これらのことから、再生半水石膏と補助固化材によって改良された材料では、補助固化材の添加量の増加、再生半水石膏の添加量の増加、博多粘土の含水比の低下に伴い、初期剛性が上昇することが示された。

(3) 補助固化材添加量と破壊ひずみの関係

再生半水石膏と補助固化材を添加した際の養生 7, 28 日の補助固化材添加量と破壊ひずみの関係を**図-3.17** に示す(各データは平均値を示している)。



(a) B=75(kg/m³)　t_c=7(days)　　(b) B=150(kg/m³)　t_c=7(days)



(c) B=75(kg/m³) t_c=28(days)　(d) B=150(kg/m³) t_c=28(days)

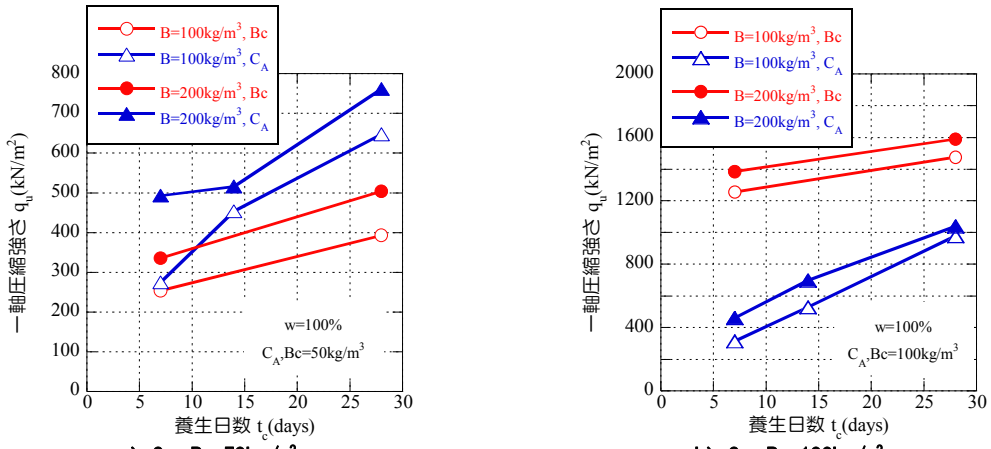
図−3.17　補助固化材添加量と破壊ひずみの関係

値にばらつきが見られるものの、補助固化材添加量が増加するに伴い、破壊ひずみは減少傾向を示している。また、再生半水石膏添加量の増加に伴い、わずかではあるが破壊ひずみは減少していることが分かる。

3-3-5　補助固化材（生石灰、高炉セメントB種）の種類の違いが力学特性に及ぼす影響

(1) 養生日数と一軸圧縮強さの関係

図-3.18に補助固化材添加量50, 100kg/m³における養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す(値は平均値を示している)。凡例は、C_A：生石灰、Bc：高炉セメントB種を示す。



a) C_A, Bc=50kg/m³　b) C_A, Bc=100kg/m³

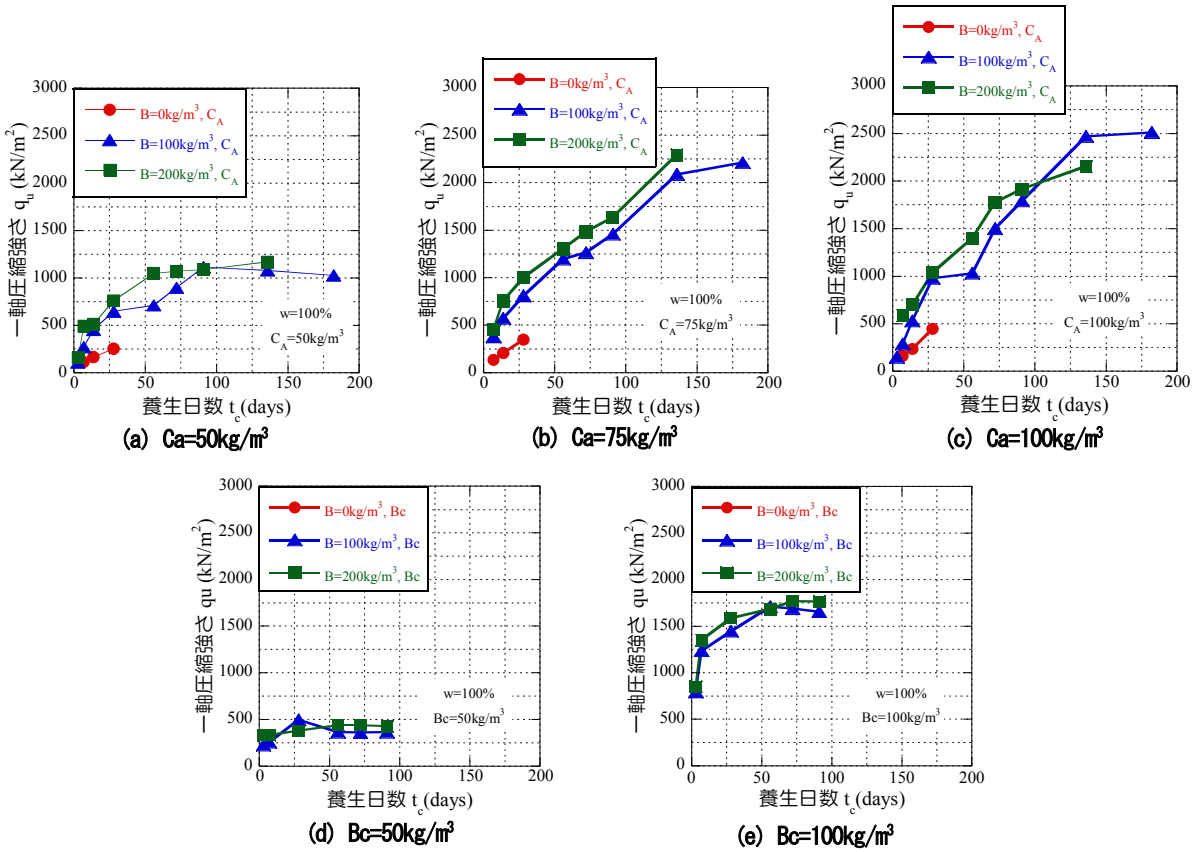
図−3.18　養生日数と一軸圧縮強さの関係

図に示すように、a)の条件では、生石灰、b)の条件では、高炉セメントB種を添加した条件の方が、養生日数を重ねるにつれて大きな強度発現を示していることがわかる。また、その傾向は再生半水石膏添加量が多い条件で顕著であることがわかる。このように、補助固化材の添加量の違いによって強度発現が異なることから、要求強度に応じての適切な補助固化材の配合が必要であると考えられる。そのため、実地盤に適用する際には、要求強度を把握した上での配合が必要であると示唆される。

3-3-6　養生日数の違いが力学特性に及ぼす影響

(1) 養生日数と一軸圧縮強さの関係

図-3.19 に一軸圧縮強さと養生日数の関係を示す。なお、各データは平均値を示す。



(a) Ca=50kg/m³　(b) Ca=75kg/m³　(c) Ca=100kg/m³

(d) Bc=50kg/m³　(e) Bc=100kg/m³

図-3.19　一軸圧縮強さと養生日数の関係

図-3.19 に示すように、養生日数の経過に伴い、一軸圧縮強さの増加が確認できる。また、再生半水石膏の添加量が多いほど、一軸圧縮強さの増加が見られる。また、長期養生後も安定した強度発現があることから、再生半水石膏を添加した改良土は、長期的にも安定した改良土になるということが言える。

次に、セメントの種類の違いに着目すると、生石灰を用いた条件の場合、養生日数の経過における強度増加が大きいことがわかる。これは、生石灰の長期的な特徴である、ポゾラン反応の影響と考えられる。また、高炉セメントB種を用いた条件の場合では、養生日数の経過における強度増加は小さいという結果が出ている。よって、再生半水石膏に生石灰を混合することで、高強度な地盤に改良することができると考えられる。

(2) 養生日数と変形係数の関係

図-3.20 に変形係数と変形係数の関係を示す。なお、各データは平均値を示す。

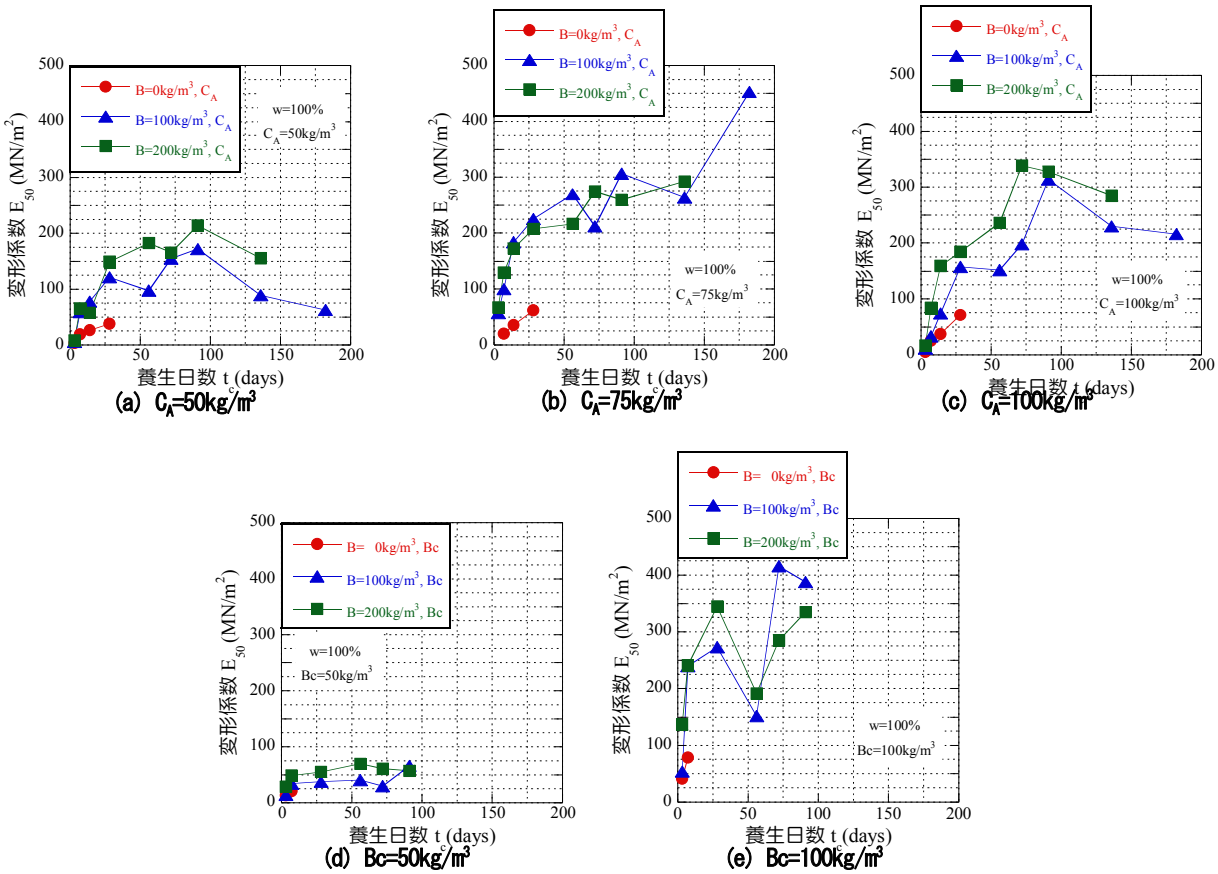
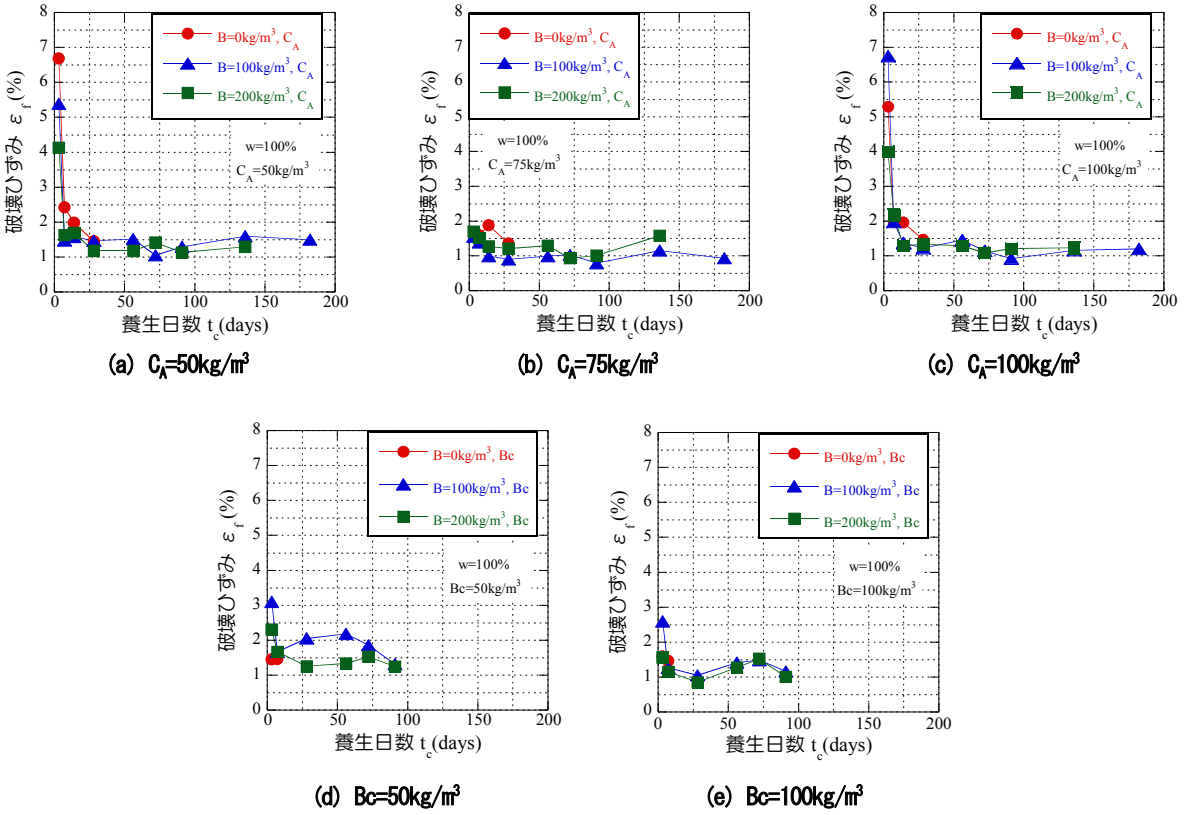


図-3.20　変形係数と養生日数の関係

図-3.20 のグラフを見ると、値にばらつきがあるものの、全条件において養生日数の経過に伴い、変形係数は増加していることが分かる。また、生石灰を添加した条件の場合、養生 91 日までは変形係数が増加傾向にある。これは、生石灰の長期的な特徴であるポゾラン反応が養生 91 日頃から発現してくることにより、高強度な改良土になるためであると考えられる。(d)の条件の場合、長期養生における大きな強度変化はなかったため、変形係数についても大きな変化は見られなかった。

(3) 養生日数と破壊ひずみの関係

図-3.21 に破壊ひずみと養生日数の関係を示す。なお、各データは平均値を示す。



(a) C_A=50kg/m³　(b) C_A=75kg/m³　(c) C_A=100kg/m³

(d) Bc=50kg/m³　(e) Bc=100kg/m³

図-3.21　破壊ひずみと養生日数の関係

図-3.21 のグラフを見ると、値にばらつきがあるものの、全条件において短期的に破壊ひずみが減少し、それ以降は一定の値で上下しており、破壊ひずみに大きな変化は見られないという結果が出ている。よって、長期養生による破壊ひずみの低下はほとんどないと考えてよいのではないかと思われる。また、再生半水石膏の添加量、セメントの種類による違いについても、破壊ひずみに大きな違いは見られなかった。

3-3-7　固化材及び補助固化材添加量の違いがコーン指数に及ぼす影響

(1) 再生半水石膏添加量とコーン指数の関係

図-3.22 に再生半水石膏添加量とコーン指数の関係を示す。各データは平均値を示している。

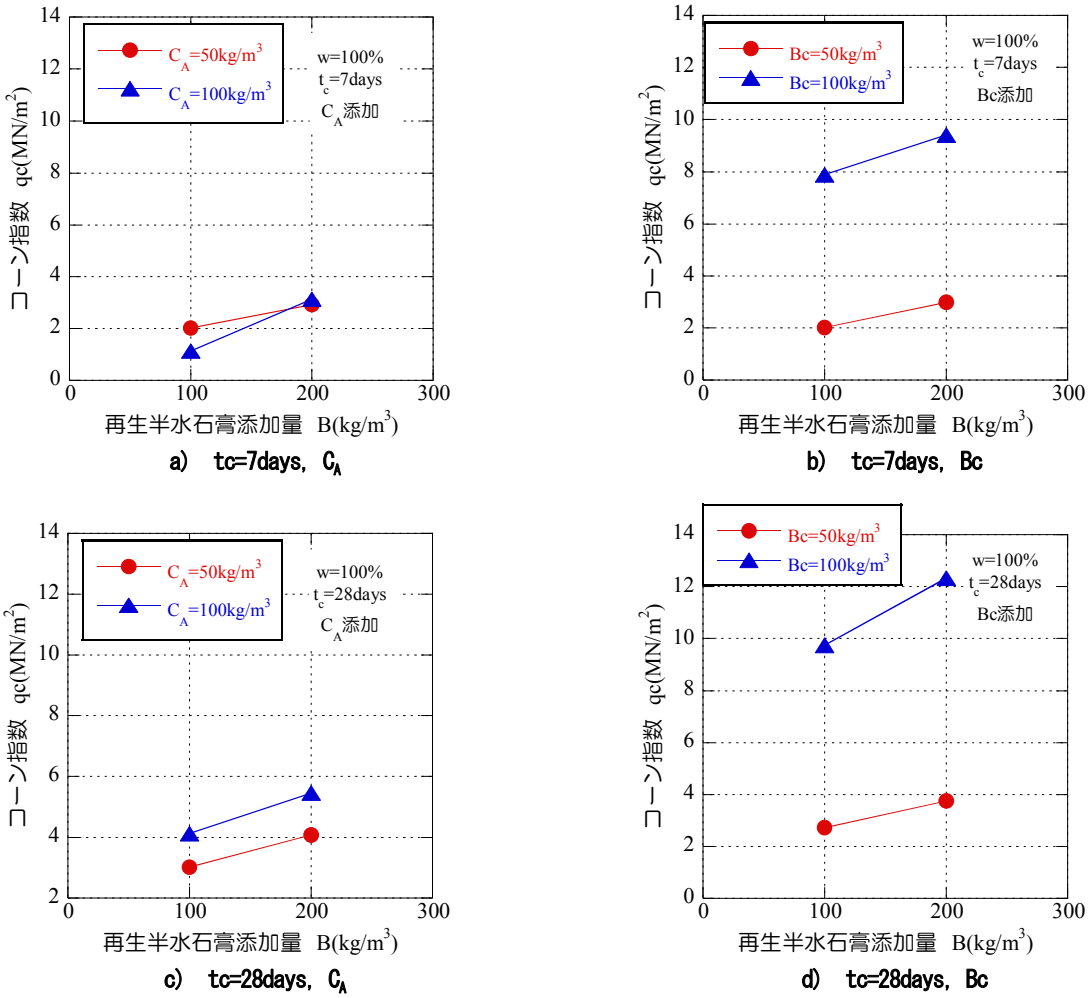


図-3.22　再生半水石膏添加量とコーン指数の関係

図に示すように、再生半水石膏添加量が増加するにつれて、コーン指数が増加していることがわかる。さらに、補助固化材添加量についても同様なことが言える。その傾向は、高炉セメントB種を添加した条件で顕著であり、コーン指数と一軸圧縮強さの関係に影響を及ぼすと考えられる。そこで、補助固化材の種類の違いが一軸圧縮強さとコーン指数の関係に及ぼす影響について検討した。

3-3-8　補助固化材（生石灰、高炉セメントＢ種）の種類の違いが一軸圧縮強さとコーン指数の関係に及ぼす影響

図-3.23 に、一軸圧縮強さとコーン指数の関係を示す。なお、各データは平均値を示す。

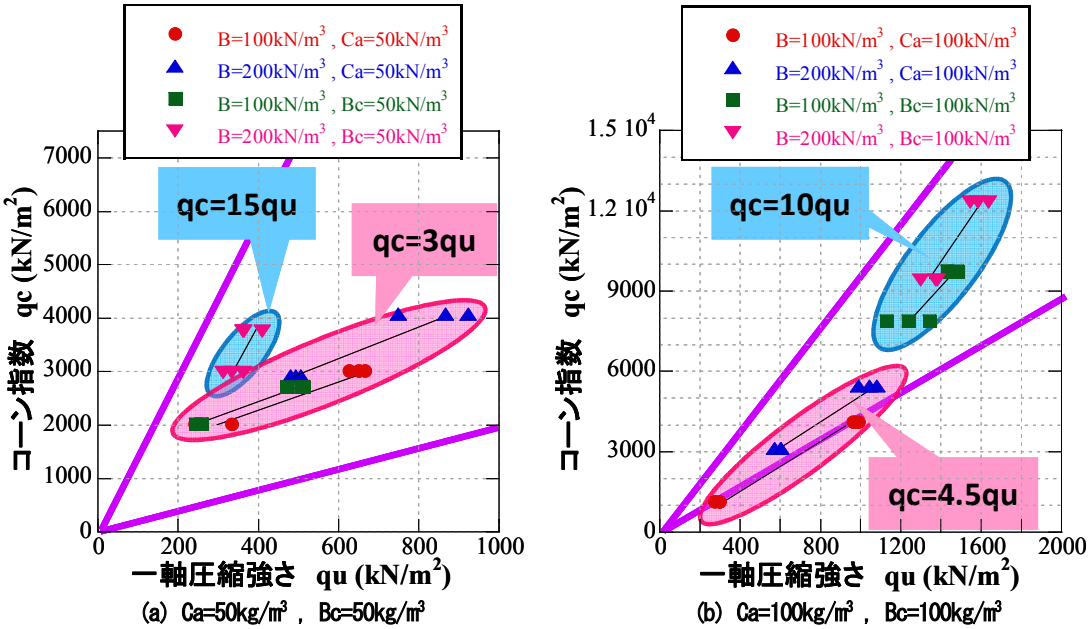


図-3.23　一軸圧縮強さとコーン指数の関係

図-3.23 のグラフを見ると、全条件においてコーン指数が 800kN/m^2 を示していることが分かる。このことから、再生半水石膏及びセメントを添加した高含水比の軟弱地盤は、養生 7 日で第 2 種処理土以上に改良できることが示唆された。よって、実地盤への適用も可能であると考えられる。また、関係式に着目すると、以下のように示すことができる。

生　　石　　灰　：　qc=3~4.5qu

高炉セメントＢ種　：　qc=10~15qu　(B=100kg/m^3,Bc=50kg/m^3 を除く)

この結果を見ると、補助固化材の種類の違いによって回帰式に明確な差が出ている事が分かる。よって、補助固化材の種類の違いによって、そのため、補助固化材の種類の違いによってコーン指数から強度を算定する際に考慮が必要であると考えられる。

3-4　再生半水石膏の種類が強度・変形特性に及ぼす影響

3-4-1　実験概要

(1) 実験条件

供試体作製は、3-3-1 で示した安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法[25](JGS0821-2000)に準じて、直径φ5×高さ h10(cm)の塩ビ製モールドに打設した。所定日数養生した供試体について一軸圧縮試験を行い、力学特性を評価した。

本検討では、発生現場、破砕方法の 2 つ違いに着目して検討した。それぞれの配合条件を**表-3.8**、**表-3.9** に示す。発生現場の違いでは、新築系廃石膏（**写真-3.23**）、解体系廃石膏（**写真-3.24**）、そして新築・解体系をミックスしたもの（**写真-3.25**）を間接加熱キルンで焼成した再生半水石膏を使用した。また、破砕方法の違いでは、IH 式焼成方式で焼成された、焼成直後（**写真-3.26**）、ミル直後（細かく破砕したもの）（**写真-3.27**）、分級機直後（紙などの不純物を取り除いたもの）（**写真-3.28**）の再生半水石膏を使用して検討した。

表－3.8　発生現場の違いに着目した配合条件

Case No.	石膏の種類	土質材料	設定含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 B_C (kg/m^3)	養生日数 t_c (days)
1	新築系	カオリン粘土	100	100	50	7
2	解体系					
3	新築＆解体					

表－3.9　破砕方法の違いに着目した配合条件

Case No.	石膏の種類	土質材料	設定含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 B_C (kg/m^3)	養生日数 t_c (days)
4	焼成直後	カオリン粘土	100	100	50	7
5	分級直後					
6	ミル直後					

写真－3.23　新築系廃石膏

写真－3.24　解体系廃石膏

写真－3.25　新築系+解体系

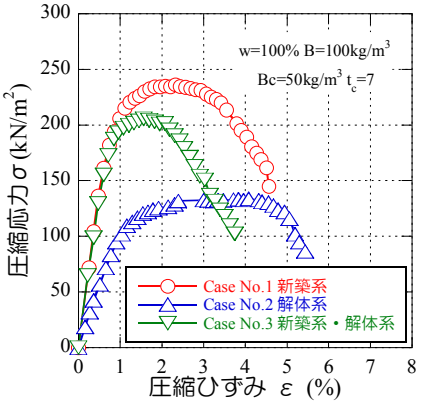
写真－3.26　焼成直後

写真－3.27　ミル直後

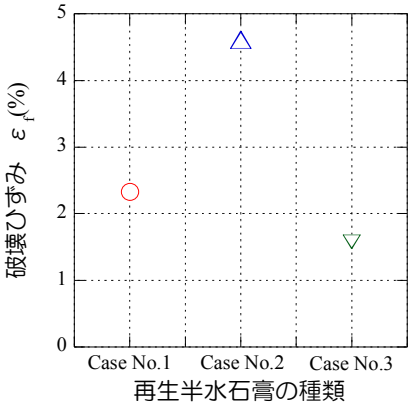
写真－3.28　分級機直後

3-4-2　発生現場の違いが強度・変形特性に及ぼす影響

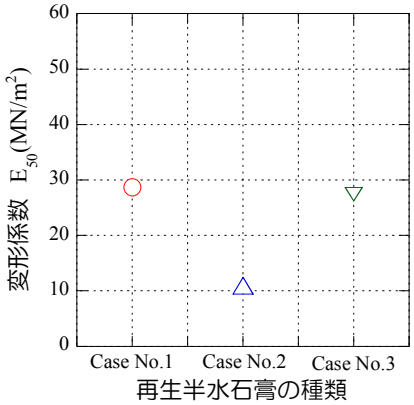
図-3.24 に発生現場の違いに着目した再生半水石膏を用いた際の一軸圧縮試験結果、**図-3.25** に破壊ひずみ、**図-3.26** に変形係数、**図-3.27** に湿潤密度の結果を示す（値は3供試体の代表値を示している）。



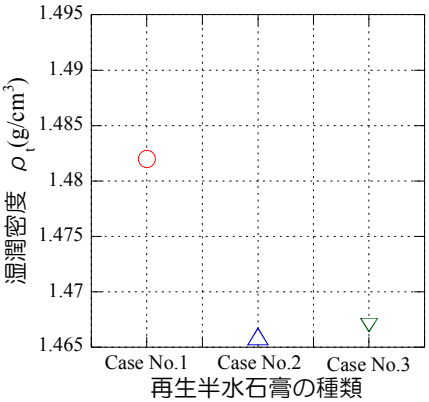
図－3.24　一軸圧縮試験結果（発生現場の違い）



図－3.25　再生半水石膏の種類と破壊ひずみの関係



図－3.26　再生半水石膏の種類と変形係数の関係

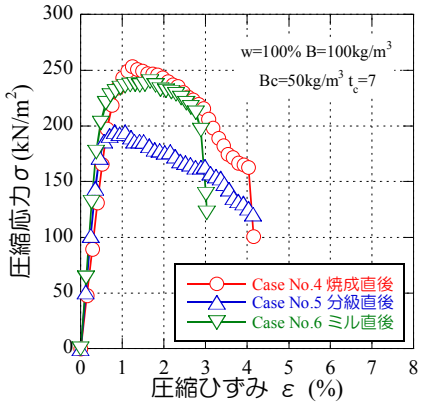


図－3.27　再生半水石膏の種類と湿潤密度の関係

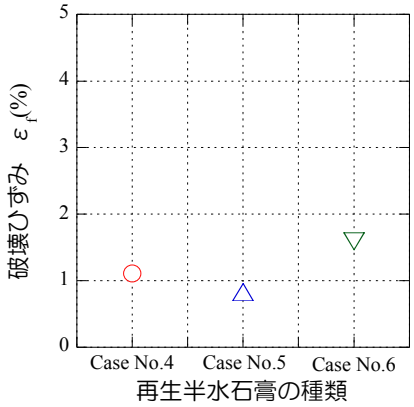
図に示すように明らかに新築系と解体系石膏で圧縮応力に差があることがわかる。このような強度の差は、再生半水石膏の凝結硬化作用が生じていないためであると予想できる。しかし、3 条件の含水比は最大で 1%程度しか差が見られなかったことから、一概にも肯定できない。一方で、解体系廃石膏に含有されている何らかの不純物が、高炉セメントB種の水和反応を阻害したとも考えられる。今後 X 線回折などによりメカニズムを解明する必要がある。

3-4-3　破砕方法の違いが強度・変形特性に及ぼす影響

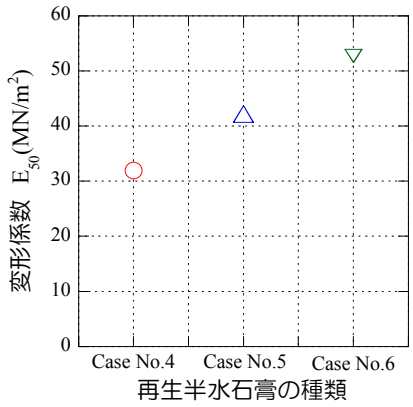
図-3.28 に破砕方法の違いに着目した再生半水石膏を用いた際の一軸圧縮試験結果、**図-3.29** に破壊ひずみ、**図-3.30** に変形係数、**図-3.31** に湿潤密度の結果を示す（値は3供試体の代表値を示している）。



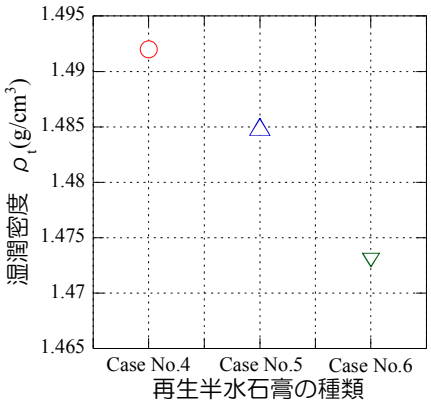
図−3.28　一軸圧縮試験結果（破砕方法の違い）



図−3.29　再生半水石膏の種類と破壊ひずみの関係



図−3.30　再生半水石膏の種類と変形係数の関係



図−3.31　再生半水石膏の種類と湿潤密度の関係

図に示すように廃石膏に付着している不純物を取り除いた分級機直後のもののみ圧縮応力が小さいことがわかる。また、ミルによって粒径が細かくなった再生半水石膏は、土質試料との付着面積が大きくなり強度が発現することが予想されたが、焼成直後とミル直後の条件は、同程度の強度発現を示している。

3-5　再生半水石膏地盤改良土の耐久性の検討

3-5-1　耐久性試験(ASTM D-4843)概要

供試体作製は、3-3-1 で示した安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法（JGS0821-2000）[3]に準じて、直径φ5×高さ h10(cm)の塩ビ製モールドに打設した。実験手順については、ASTM D-4843[26] (Wetting and Drying Test of Soil Wastes)に従った。以下に手順の流れを示す。

（1）耐久性試験（ASTM D-4843）方法

a) 乾燥過程

所定日数養生した供試体の高さ及び質量を計測する。その後 60℃一定に保った恒温乾燥炉内に 24 時間静置する。**写真-3.29** に恒温乾燥炉内に静置する様子を示す。

写真－3.29　乾燥過程

b) 湿潤過程

静置していた恒温乾燥炉内から供試体を取り出し、高さ及び質量を計測し乾燥前後の質量値から含水比を算出する。次に、L/S=10 に設定した pH5.8～6.3 の蒸留水(20℃)中に 23 時間静置した。浸漬水の量は、養生初期の含水比と乾燥過程後の含水比から算出している。**写真-3.30** に恒温乾燥炉内から供試体を取り出し後の様子、**写真-3.31** に供試体を浸漬する様子を示す。

写真－3.30　乾燥過程後の供試体

写真－3.31　浸漬した供試体

湿潤過程を終えた供試体を 1 時間室内(20±3℃)で空気中に放置し、供試体の質量及び高さを計測した後、再び乾燥過程を繰り返すサイクルを最長で 15 サイクル行った。所定のサイクル数を終えた供試体について、一軸圧縮試験(JIS A 1216)を行い、耐久性を評価した。

(2) 実験条件

配合条件を**表-3.10** に示す。本節での検討では、再生半水石膏添加量の違いに着目した。
実験条件を**表-3.11** に示す。また、乾湿繰返し試験の概要図を**図-3.32** に示す。

表－3.10　配合条件（耐久性の検討）

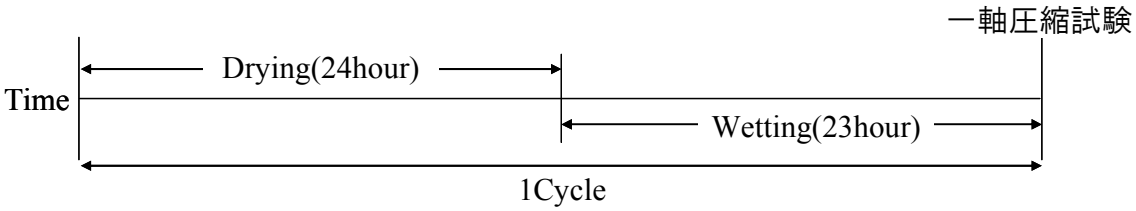
土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 B_C (kg/m^3)	養生日数 t_c (days)
博多粘土	100	100 200	50	7

表－3.11　乾湿繰返し試験の実験条件

供試体サイズ	φ50mm×h100mm	
暴露条件	乾燥過程	湿潤過程
温度・時間	60℃一定で24時間炉乾	純水に23時間浸漬
液固比	ー	10
サイクル数	15	
pH	5.8～6.3	

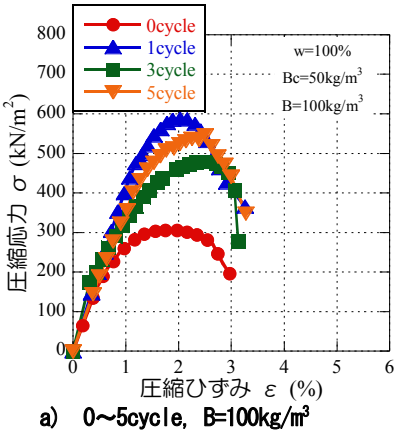
なお、本節では供試体の膨張傾向を検討するため、供試体の高さ及び質量から体積変化率を算出している。計算式を**式 3.1** に示す。

$$体積変化率 = V_{DRY}\ or\ V_{WET} \ / V_0 \times 100 - 100(\%) \cdots (式3.1)$$

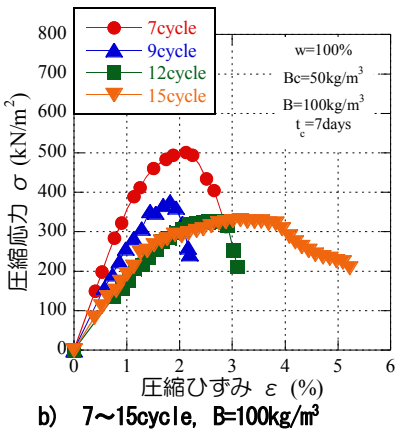


図－3.32　乾湿繰返し試験の概要図

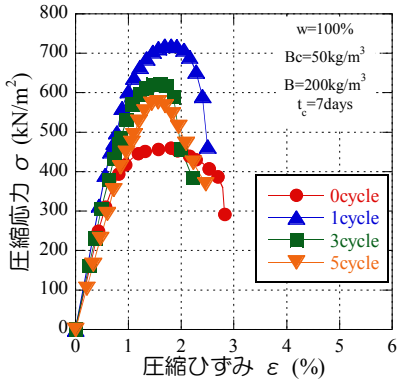
(3) 一軸圧縮試験結果



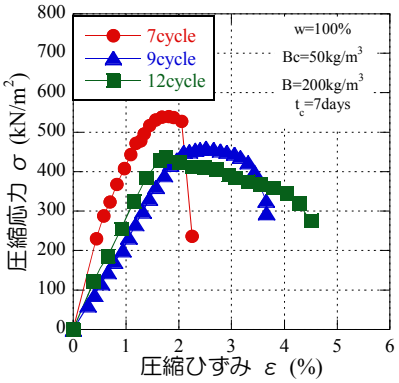
a)　0～5cycle, B=100kg/m³



b)　7～15cycle, B=100kg/m³



c） 0～5cycle, B=200kg/m³



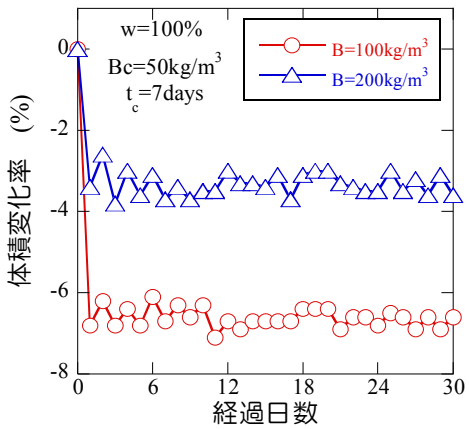
d） 7～12cycle, B=200kg/m³

図-3.33 一軸圧縮試験結果

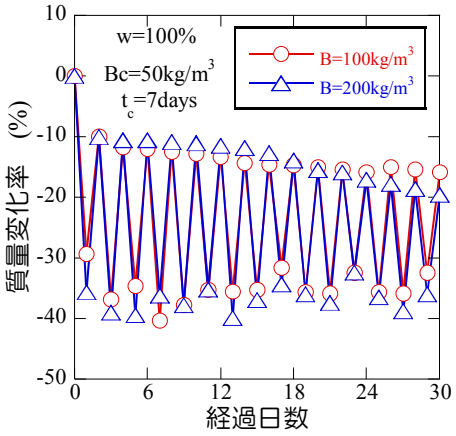
これらの試験結果から、固化材添加量の違いが体積及び質量に及ぼす影響と力学特性に及ぼす影響について考察を行う。

3-5-2 固化材添加量の違いが体積及び質量に及ぼす影響

図-3.34 に乾湿繰返しに伴う体積変化率を、**図-3.35** に質量変化率を示す（値は 3 供試体の平均値を示している）。



図―3.34 乾湿繰返しに伴う体積変化率



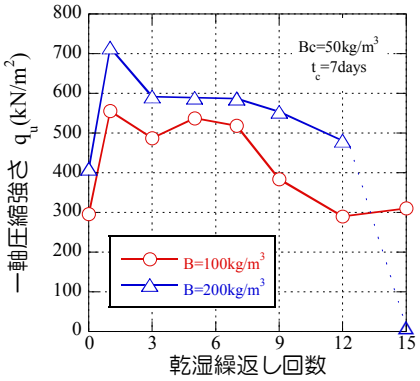
図―3.35 乾湿繰返しに伴う質量変化率

両条件ともに、乾湿繰返し作用を受けることによって体積または質量の収縮・膨張を繰り返す傾向が見られる。しかし体積変化率については、日数が経過するにつれて一定の値に推移していることから、長期的には体積変化はあまり変動せず一定値に収束していくことが予想される。また、再生半水石膏添加量に着目すると、添加量が多い条件のものが膨張比は低い傾向を示していることがわかる。これは、再生半水石膏の添加による固結力の増加により、膨張に対する引張抵抗力が生じたためであると考えられる。

3-5-3　固化材添加量の違いが力学特性に及ぼす影響

(1) 乾湿繰返し回数と一軸圧縮強さの関係

図-3.36 に乾湿繰返し回数と一軸圧縮強さの関係を示す（プロットは3供試体の平均値を示す）。さらに、**図-3.37** に浸漬水への供試体からの Ca^{2+} の溶脱を確認した Ca^{2+} とサイクル数の関係を示す。



図－3.36　乾湿繰返し回数と一軸圧縮強さの関係

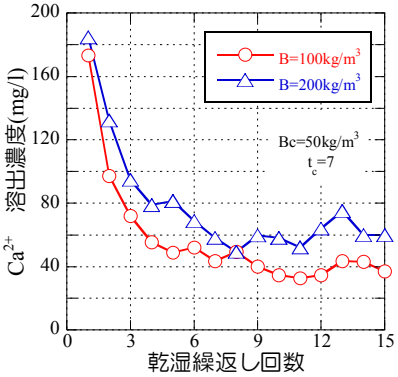


図-3.37　Ca^{2+} とサイクル数の関係

図に示すように、全ての条件において養生7日（繰返し回数0回）の値と比較して乾湿繰返し後初期に大きな強度発現が見られる。これは、乾燥による収縮と高温養生による安定処理効果に起因していると考えられる。その後、乾湿繰返しサイクルを重ねるにつれて一軸圧縮強さが低下していることがわかる。強度が低下した原因として、2つの要因が考えられる。1つ目は、乾燥過程において間隙中の水分が脱水し、乾燥収縮により土粒子の結合（サクション）が切れクラックが発生[27]し、乾湿繰返しにより強度が低下したことである。2つ目として、**図-3.28** に示すように水浸過程において供試体内部あるいは表面から Ca2+が溶出し、供試体に形成されていたエトリンガイト等の水和鉱物が破壊されたためであると考えられる。**写真-3.32** に所定サイクル経過後の劣化した供試体を示す。

a) 1サイクル後

b) 3サイクル後

c) 7サイクル後

d) 15サイクル後

写真-3.32　所定サイクル後の供試体の様子

(2) 乾湿繰返し回数と破壊ひずみ及び変形係数の関係

図-3.38, 39 に乾湿繰返し回数と破壊ひずみ及び変形係数の関係を示す（値は3供試体の平均値を示している）。

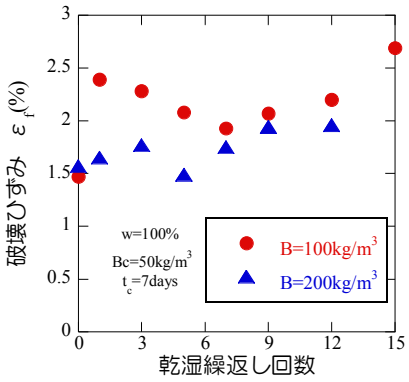


図-3.38 乾湿繰返し回数と破壊ひずみの関係

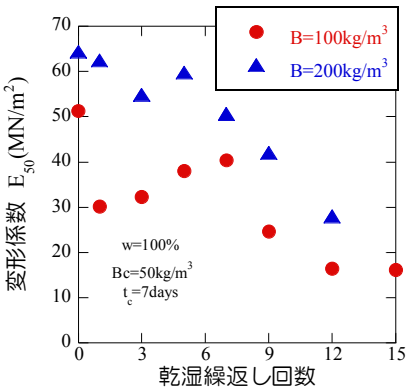


図-3.39 乾湿繰返し回数と変形係数の関係

まず、破壊ひずみに着目する。図に示すように、両条件ともに乾湿繰返し初期以降、破壊ひずみは増加していることがわかる。また、変形係数についても乾湿繰返し初期以降、減少していることがわかる。このような結果は、乾湿繰返し作用により剛性が失われたためであり、一軸圧縮強さが減少していることに寄与していると考えられる。

3-6 再生半水石膏地盤改良土の膨張性

3-6-1 吸水膨張試験概要

1)供試体作製方法

試料を配合条件に従い混合・最適含水比に合わせた試料を、直径15cm、高さ17.5cmのモールドに各層67回で突き固め、供試体を作製する。(**写真-3.33及び3.34**)

写真-3.33 モールド

写真-3.34 供試体

2)吸水・膨張の測定

①96 時間水中に静置させ、通常 1,2,4,8,24,48,72,96 時間後に膨張量を記録する。**(写真-3.35)**

②水中から供試体を取り出し、静かに傾け 15 分静置させ質量を測る。

写真-3.35　吸水・膨張試験の様子

3-6-2　固化材添加量の違いが膨張量に及ぼす影響

表-3.12 に配合条件兼実験結果を示す。

表-3.12　配合条件兼実験結果

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B(kg/m^3)	高炉セメントB種 Bc(kg/m^3)	養生日数 tc(days)	膨張比(%)
脱水ケーキ	w_{opt}	200	50	0	0.02
		280			0.02
カオリン粘土	100	100		7	0
		200			0

表-3.12 より、脱水ケーキについては、石膏を 280kg/m^3 添加しているにもかかわらず、両材料ともに膨張比が 0.02%と 1%を下回っていることがわかる。また、軟弱地盤改良を想定したカオリン粘土の条件においては、全く膨張しない結果が得られた。**表-3.13** に膨張比と路床の状態についての関係を示す。表より膨張比が 1 以下であれば路床として採用する際、その路床は良好な状態である。したがって、再生半水石膏及び補助固化材を添加した材料は、路床として良好な状態で用いることができ、膨張しひび割れが生じる可能性は低いことが明らかとなった。

表-3.13　膨張比と路床の状態

路床の状態	膨張比（%）
良好な状態	1以下
通常の状態	2以下
不良な状態	3以下
腐植土	7～20

3-7　再生半水石膏地盤改良土の再泥化の検討

3-7-1　再泥化試験概要

表-3.14 に配合条件を示す。供試体作製は、博多粘土は 3-3-1 で示した安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法 [25](JGS0821-2000)に準じて、脱水ケーキは含水比を最適含水比に調整し、締固め試験結果から締固め密度 D (ρ_d/ρ_{dmax})=95%とし、直径φ5×高さ h10(cm)の塩ビ製モールドに打設した。実験手順の流れを示す。

表-3. 14 配合条件（再泥化）

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 B_c (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)
脱水ケーキ	w_{opt}	0, 200, 280	0 60 100	7
博多粘土	65%	75, 100, 150		

1)再泥化の測定

溶媒水に蒸留水を用いた。容器の中に蒸留水 1500g 入れ、養生後の供試体を水浸させる(**写真-3.36**) 。なお測定時間は、1、2、5、10、15、30、60、120、240 分後、1、7 日後とし、**表-3.15** に示す再泥化区分に従い分類を行った。

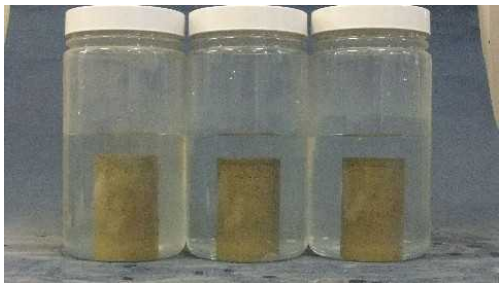


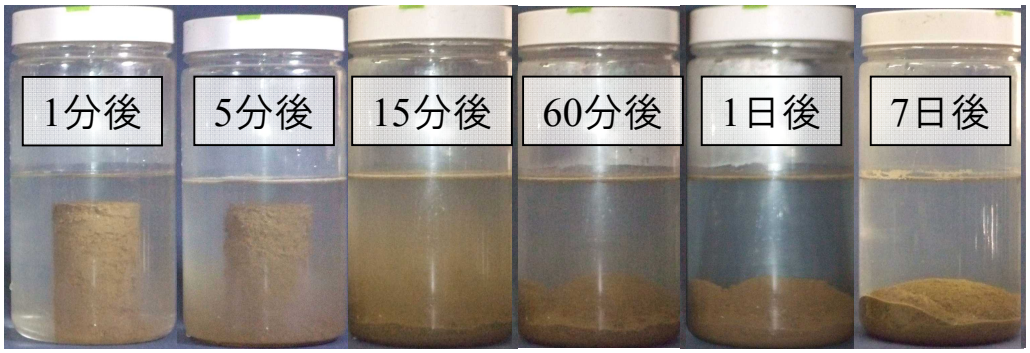
写真-3.36 再泥化試験の様子

表-3.15 再泥化区分

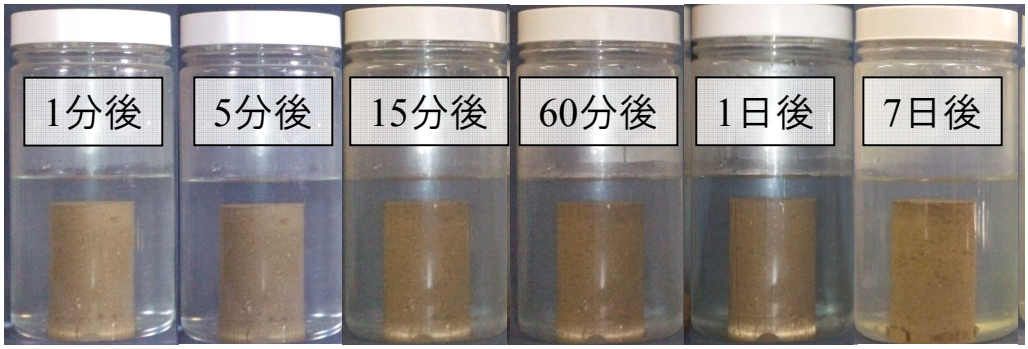
区分	1	2	3	4	5	6
形状						
状態	変化なし	角が崩れる程度	周囲のひび割れが顕著	再泥化開始	半分が再泥化	完全に再泥化

2）実験結果

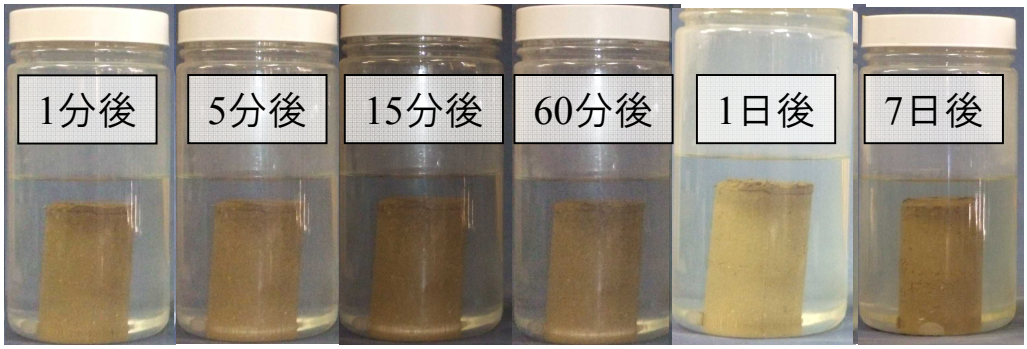
写真-3.37 の **a)～f)** に再泥化試験中の供試体の変化を示す。この結果を再泥化区分に当てはめて考察する。



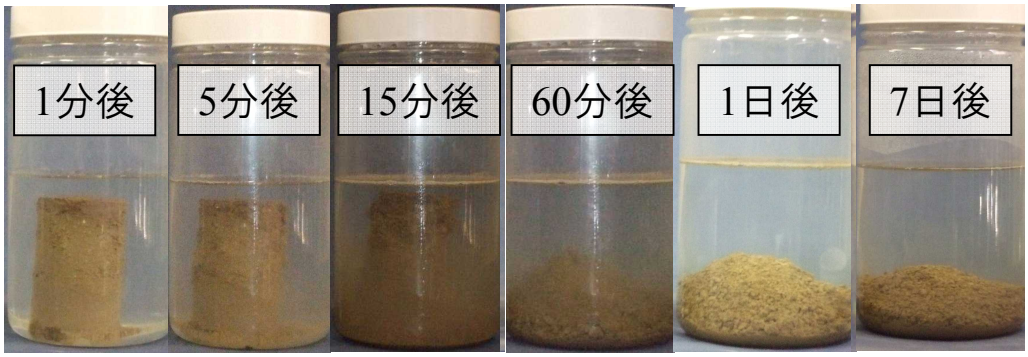
a)　供試体の経時変化（B=200kg/m³，Bc=0kg/m³）



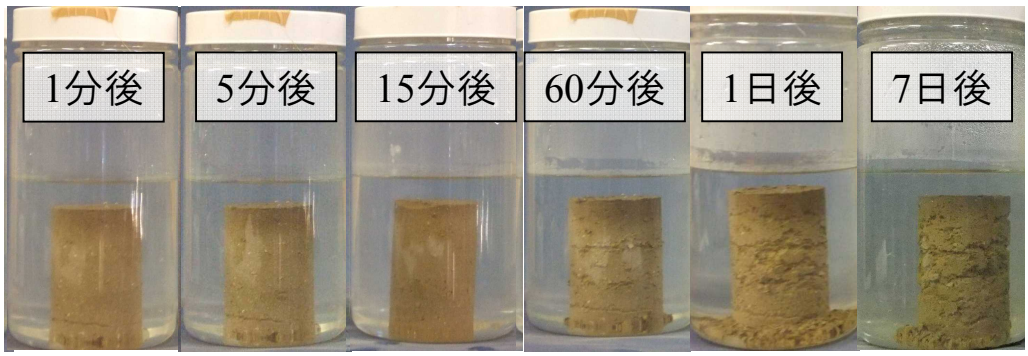
b)　供試体の経時変化（B=200kg/m³，Bc=60kg/m³）



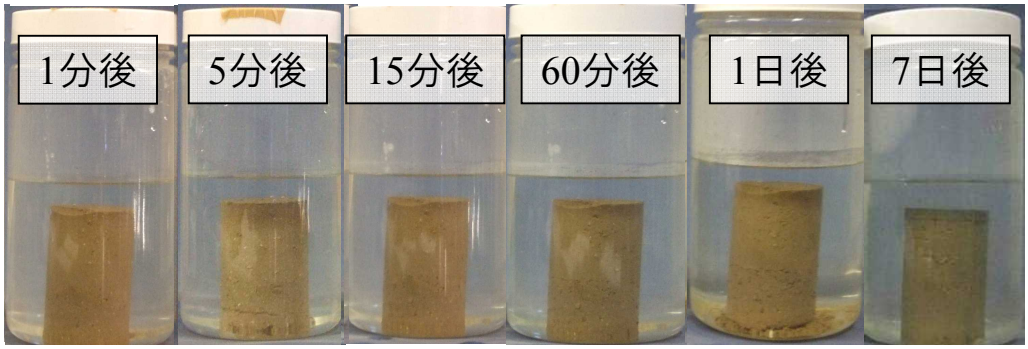
c)　供試体の経時変化（B=200kg/m³，Bc=100kg/m³）



d)　供試体の経時変化（B=280kg/m³，Bc=0kg/m³）



e)　供試体の経時変化（B=280kg/m³，Bc=60kg/m³）



f)　供試体の経時変化（B=280kg/m³，Bc=100kg/m³）

写真-3.37　供試体の経時変化

3-7-2　土質材料の違いが再泥化特性に及ぼす影響

図-3.40 に再生半水石膏のみを添加した場合の再泥化試験結果を示す。図より、脱水ケーキ単体では、水浸直後に再泥化が開始し、水浸 10 分後には完全に再泥化していることがわかる。再生半水石膏のみ添加した材料では、脱水ケーキは水浸直後に角が崩れ、水浸 1 日後までには再泥化しているが、博多粘土は再泥化が起こっていない事がわかる。これは、土質試料の透水係数が大きく寄与していると考えられる。

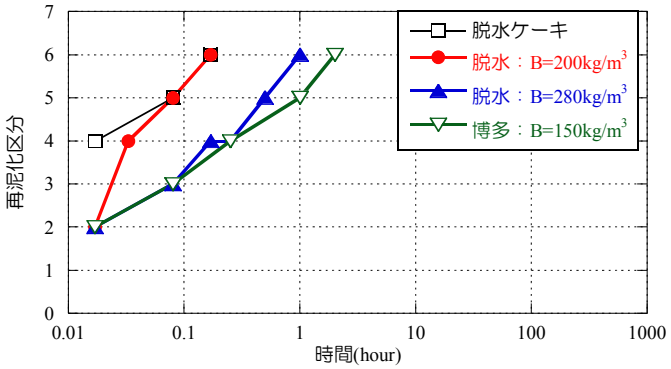


図-3.40　再泥化試験結果（再生半水石膏のみ）

3-7-3　固化材及び補助固化材添加量の違いが再泥化特性に及ぼす影響

図-3.41 に再生半水石膏と補助固化材として高炉セメントB種を添加した場合の再泥化試験結果を示す。図より、再生半水石膏と高炉セメントB種により改良された材料では、周囲にひび割れが見られるものもあったが、水浸7日後でも完全な再泥化は見られなかった。さらに、補助固化材添加率の増加に伴いひび割れが抑制されていることもわかる。したがって、補助固化材として高炉セメントB種を添加することで再泥化抑制が可能であることが示された。

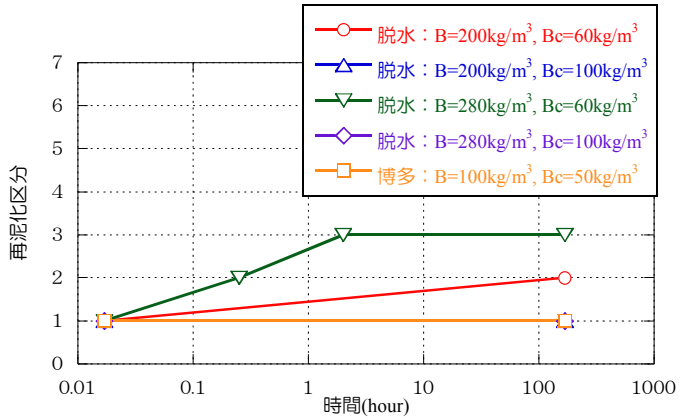


図-3.41　再泥化試験結果（補助固化材添加）

3-8　地盤改良固化特性の評価

本章では、再生半水石膏を用いた地盤改良材による改良効果を確認するため、土質材料を改良した際の地盤改良固化特性について検討した。以下に本章で得られた知見を示す。

1）土質材料の影響

まさ土及び脱水ケーキ等の砂質土に、再生半水石膏を添加して締固めた固化処理土は、一般盛土材としての目標強度である q_u=100kN/m^2 を満足した。しかし、高含水比軟弱地盤を想定した博多粘土は、泥土と判断される q_u=50kN/m^2 以下の強度を示した。以上より、再生半水石膏のみを地盤改良材として高含水比粘性土に用いる場合、強度発現が含水比に依存することが明らかとなった。さらに、土質材料の違いによって再生半水石膏による凝結硬化作用が異なることから、施工前の段階で土の性状を把握し、配合量を室内試験によって決定する必要がある事が示唆される。

2）初期含水比の影響

博多粘土を用いた初期含水比が固化特性に及ぼす影響を検討した結果、初期含水比の増加に伴い、再生半水石膏を用いた改良土の一軸圧縮強さは低下することが明らかとなった。また、w=100(%)において再生半水石膏の凝結硬化作用が働いたのは再生半水石膏添加量 B=150(kg/m^3)の場合のみであり、再生半水石膏の凝結硬化作用は、対象土の設定含水比に大きく依存しており、再生半水石膏の凝結硬化作用に対する限界の含水比が存在することが示された。

3）補助固化材添加量及び補助固化材の種類の違いの影響

軟弱な粘土に対し、再生半水石膏のみを用いた改良では、土構造物における要求強度が得られないことから、補助固化材として高炉セメントB種及び生石灰を用いて検討した。その結果、補助固化材を用いた改良土の補助固化材添加量と一軸圧縮強さの相関性は良く、目標強度である養生7日において 300kN/m^2 を満足する補助固化材の最低添加量を近似式を用いて推測することができることが明らかとなった。また、再生半水石膏添加量が増加するに伴って要求強度を満足する補助固化材最低添加量が減少することが明らかとなった。さらに、補助固化材の種類の違いによる影響では、セメントと石灰では補助固化材添加量の違いによって強度発現が異なることから、要求強度に応じての適切な補助固化材の配合が必要であることが明らかとなった。そのため、実地盤に適用する際には、要求強度を把握した上での配合が必要であると示唆される。

4）補助固化材を用いた地盤改良土の養生日数の違いによる影響

再生半水石膏を用いた地盤改良土の長期的な強度発現については、既往の研究においても行われていないため検討し

た。その結果、再生半水石膏に補助固化材を一定量添加した改良土は、養生日数の経過に伴い一軸圧縮強さは増加する傾向を示すことが明らかとなった。また、6 ヶ月に及ぶ長期養生後も安定した強度発現があることから、再生半水石膏を添加した改良土は、補助固化材を添加することで長期的にも安定した改良土になることが明らかとなった。

5）固化材及び補助固化材添加量の違いがコーン指数に及ぼす影響

一般的に現場ではコーン指数によって要求強度を算定することが多いため、コーン試験により検討した。その結果、補助固化材として生石灰と高炉セメント B 種を用いた場合、一軸圧縮強さから得られるコーン指数算定式の値が大きく異なることが明らかとなった。また、補助固化材の種類によってコーン指数の値は異なることが判明したため、補助固化材の種類を考慮した上でコーン指数による強度の算定が必要であると考えられる。

6）発生現場及び破砕方法の異なる再生半水石膏が力学特性に及ぼす影響

発生現場の異なる新築系と解体系石膏では、最大圧縮応力に差が生じることが明らかとなった。また、破砕方法の異なる再生半水石膏では、ミルによって粒径が細かくなった再生半水石膏は、土質試料との付着面積が大きくなり強度が発現することが予想されたが、焼成直後とミル直後の条件は、同程度の強度発現を示した。今後 X 線回折などによりメカニズムを解明する必要がある。

7）再生半水石膏地盤改良土の耐久性

乾湿繰返し作用を受けることによって体積または質量の収縮・膨張を繰り返す傾向が見られた。しかし体積変化率については、長期的には体積変化はあまり変動せず一定値に収束していくことが予想される。また、再生半水石膏添加量が多い条件のものが固結力の増加により、膨張に対する引張抵抗力が生じたため膨張比は低い傾向を示す。以上より、実施工では、適用箇所の環境面などを考慮した上で適用しなければならないことが示唆される。

8）再生半水石膏地盤改良土の膨張性

今回検討した再生半水石膏 280kg/m^3 及び高炉セメント B 種 50kg/m^3 を混合した固化処理土は、路床として良好な状態で用いることができ、膨張しひび割れが生じる可能性は低いことが明らかとなった。

9）再生半水石膏地盤改良土の再泥化

脱水ケーキ単体では、水浸直後に再泥化が開始し、水浸 10 分後には完全に再泥化する。再生半水石膏のみ添加した材料では、脱水ケーキは水浸直後に角が崩れ、水浸 1 日後までには再泥化するが、博多粘土は再泥化は起こらない。再泥化には土質試料の透水係数が大きく寄与しており、再生半水石膏と高炉セメント B 種により改良された材料では、周囲にひび割れが見られるものもあったが、水浸 7 日後でも完全な再泥化は見られなかった。

第 4 章　再生半水石膏を用いた地盤改良材としての環境安全性の評価

4-1　概説

本章では、再生半水石膏を用いた地盤改良材により固化処理されたものについて、環告 46 号法試験（バッチ試験）によりふっ素溶出特性を、硫化水素発生試験により硫化物及び硫化水素ガスについて実験的検討を行い、環境安全性を評価している。それぞれの検討項目を以下に示す。

⑴ ふっ素溶出挙動の把握

環境安全性の初期段階として、供試体を水浸させた際のふっ素の溶出を確認した。なお、過酷な条件で検討するため、乾湿繰返し試験で使用した浸漬液を用いて評価した。

⑵ ふっ素溶出特性に及ぼす影響因子の把握

ここでは、固化材及び補助固化材添加量の違い、セメント等の種類の違い、養生日数の違い、再生半水石膏の種類の 4 つの要因に着目し、バッチ試験によりふっ素溶出濃度を確認した。

⑶ 実地盤に適用した際のふっ素溶出特性の検討

実地盤において浅層混合処理での適用を想定した場合、周辺地盤により、再生半水石膏を用いた固化処理土はどのような溶出挙動を示すのかカラム試験により評価した。

⑷ 再生半水石膏地盤改良土の硫化水素発生特性

セメントを添加することにより pH がアルカリ性になれば、硫化水素ガスの発生要因である硫酸塩還元菌の働きが鈍くなる。しかし、実地盤では降雨などにより空気中に溶けている炭酸ガスを吸収して微生物が動きだす可能性がある。そこで、乾湿繰返し試験で使用した供試体について硫化水素発生試験及びヨウ素滴定試験を行い評価した、

4-2　実験概要

⑴ 実験に用いた試料

本章では、先述した第 3 章.再生半水石膏による地盤改良固化特性で用いた供試体を使用している。再生半水石膏を用いた地盤改良材の溶出特性を検討する前の前提条件として、試料単体からの溶出特性を把握しなければならない。**表-4.1** に用いた試料単体のふっ素溶出試験結果を示す。

表-4.1　試料単体のふっ素溶出試験結果

試料	博多粘土	再生半水石膏	土壌環境基準値
pH	8.08	7.46	－
F^-(mg/l)	1.21	5.94	0.80

表より、博多粘土、再生半水石膏共に土壌環境基準値である 0.8mg/l を大きく上回るふっ素が含有していることがわかる。また、pH に着目すると、再生半水石膏は中性固化材としての特徴を表していることがわかる。

(2) 溶出試験手順(環境庁告示 46 号法試験)

①一軸圧縮強度を測定した後の供試体をプラスチックハンマーで破砕し 2mm ふるいを通過させる。これをバッチ試験用の試料とする。(**写真-4.1 及び写真-4.2**)

写真-4.1 粉砕の様子

写真-4.2 2mm ふるい

②所定の日数養生し、2mm ふるいを通過した試料の含水比を測定する。その後、試料と純水(pH5.8～6.3 に設定したもの)を液固比 10 に設定し混合する。(**写真-4.3**)

写真-4.3 試料と純水の混合

③振とう機を用いて 6 時間連続振とう(振とう回数 200 回、振とう幅 4～5cm、平行振とう)する。振とう終了後、10 分間静置する。(**写真-4.4**)

写真-4.4 振とうの様子

④静置後、20 分間遠心分離機(3000rpm)にかける。その後メンブレンフィルター(孔径 0.45μm)を用いて上澄み液のみ真空圧をかけてろ過する。(**写真-4.5 及び写真-4.6**)

写真-4.5　遠心分離の様子

写真-4.6　ろ過の様子

④イオンクロマト ICS-3000、ICP プラズマ発光分析装置(ICPS-7000Ver.2)を用いて重金属の溶出濃度の測定を行った。(**写真-4.7 及び写真-4.8**)

写真-4.5　イオンクロマト ICS-3000

写真-4.6　ICP プラズマ発光分析装置

4-3　ふっ素溶出挙動の把握

4-3-1　実験概要

(1) 実験手順

実験試料は、3-5-1 で示した耐久性試験(ASTM D-4843)において、水浸過程で得られた浸漬水及び、所定サイクルで一軸圧縮試験を行った後の供試体の破壊断片を使用した。浸漬水についてはろ過、破壊断片についてはバッチ試験を行って溶出挙動を評価した。ここでは、水浸過程における Ca^{2+}溶出濃度についても計測している。

(2) 実験条件

配合条件を**表-4.2** に示す。本節での検討では、再生半水石膏添加量の違いに着目した。
実験条件を**表-4.3** に示す。(再掲)

表－4.2　配合条件（耐久性の検討）

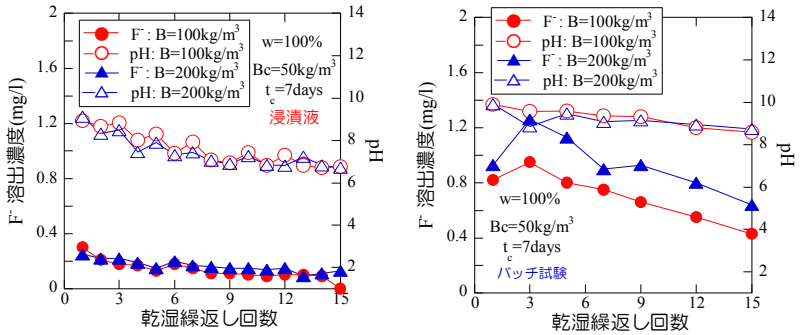
土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 B_C (kg/m^3)	養生日数 t_c (days)
博多粘土	100	100 200	50	7

表－4.3　乾湿繰返し試験の実験条件

供試体サイズ	φ50mm×h100mm	
暴露条件	乾燥過程	湿潤過程
温度・時間	60℃一定で 24時間炉乾	純水に23時間 浸漬
液固比	ー	10
サイクル数	15	
pH	5.8～6.3	

4-3-2　固化材添加量の違いがふっ素の溶出挙動に及ぼす影響

図-4.1 に浸漬液及びバッチ試験における乾湿繰返し回数と F溶出濃度と pH の関係を示す。さらに、**図-4.2** に乾湿繰返し回数と Ca^{2+}溶出濃度の関係を示す（再掲）。



a）浸漬液　　b）バッチ試験

図-4.1　乾湿繰返し回数と F⁻溶出濃度と pH の関係

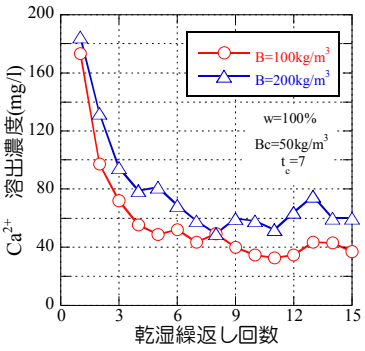


図-4.2　Ca^{2+}とサイクル数の関係（再掲）

まず pH に着目すると、全ての条件においてサイクル数の増加に伴い中性域にシフトしていることがわかる。これは、**図-4.2** に示す Ca^{2+}とサイクル数の関係からもわかるように、間隙水中の Ca^{2+}溶出に伴い、$Ca(OH)_2$ や C-S-H の溶解を引き起こしたため、乾湿繰返し初期にアルカリ性を示し、サイクルを重ねるごとに Ca^{2+}溶出が減少していったため中性域に推移したと考えられる。次に F溶出濃度に着目する。浸漬液においては再生半水石膏添加量に関係なく 0.2mg/l 程度の低濃度の溶出が確認できる。これは、湿潤過程における水浸時に、供試体表面から微量の F^-が溶出し続けたためであると考えられる。次にバッチ試験においての F溶出濃度に着目すると、乾湿繰返し初期から土壌環境基準値を大きく上回る溶出が確認できる。また、その傾向は再生半水石膏添加量の違いによって値が大きく異なる。このような結果が見られたのは、改良体内部から Ca^{2+}が溶出し、セメントの水和反応により生成していたエトリンガイトの針状結晶が破壊され、水和物によって固定されていた F が溶出したためであると考えられる。

4-4　ふっ素溶出特性に及ぼす影響因子の把握

本節では、3-3-4、3-3-5、3-3-6、3-4 で使用した供試体を用いて溶出試験を行った結果を示し、それぞれの要因について考察している。実験条件を**表-4.4**～**表-4.8** に示す。（再掲）

表-4.4　固化材及び補助固化材添加量の違いに着目した配合条件

土質材料	含水比 w(%)	再生半水石膏 B(kg/m³)	高炉セメントB種 B_C(kg/m³)	養生日数 t_c(day)
博多粘土	80	75	35	7
			45	
	100		55	
		150	65	28
	120		75	

表-4.5　補助固化材の種類の違いに着目した配合条件

土質材料	含水比 w(%)	再生半水石膏 B(kg/m³)	生石灰 高炉セメントB種 C_A, B_C(kg/m³)	養生日数 t_c(day)
博多粘土	100	0	50	7
		100	75	14
		200	100	28

表-4.6　養生日数の違いに着目した配合条件

土質材料	含水比 w(%)	再生半水石膏 B(kg/m^3)	生石灰 高炉セメントB種 C_A, B_C (kg/m^3)	養生日数 t_c(day)
博多粘土	100	100 200	50 75 100	7, 14, 28, 56 72, 91, 136, 182

表-4.7　発生現場の違いに着目した配合条件

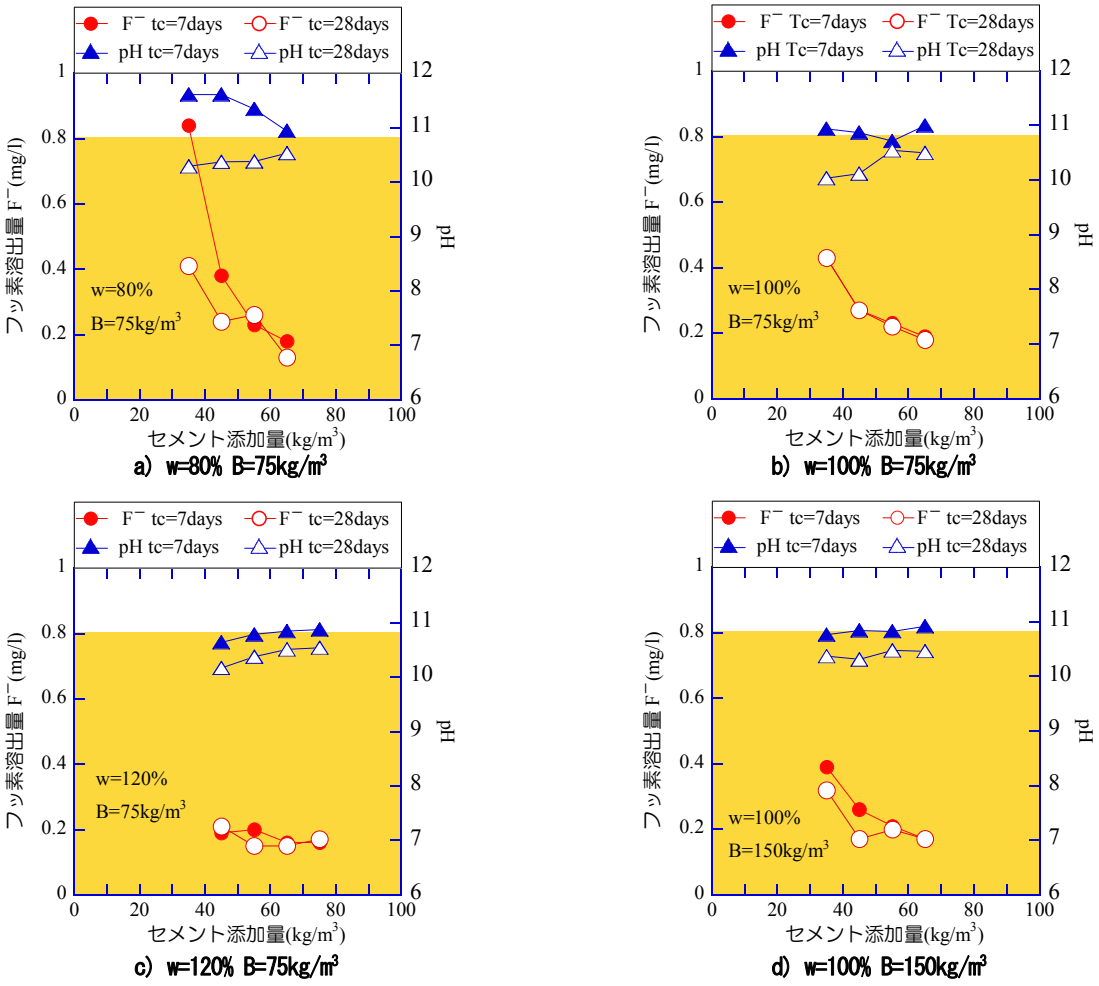
Case No.	石膏の種類	土質材料	設定含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 B_C (kg/m^3)	養生日数 t_c (days)
1	新築系	カオリン粘土	100	100	50	7
2	解体系					
3	新築＆解体					

表-4.8　破砕方法の違いに着目した配合条件

Case No.	石膏の種類	土質材料	設定含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 B_C (kg/m^3)	養生日数 t_c (days)
4	焼成直後	カオリン粘土	100	100	50	7
5	分級直後					
6	ミル直後					

4-4-1　固化材及び補助固化材添加量の違いが溶出特性に及ぼす影響

図-4.3 にセメント添加量とふっ素溶出濃度及びpHの関係を示す(色枠はふっ素の土壌環境基準値0.8mg/lを示す)。



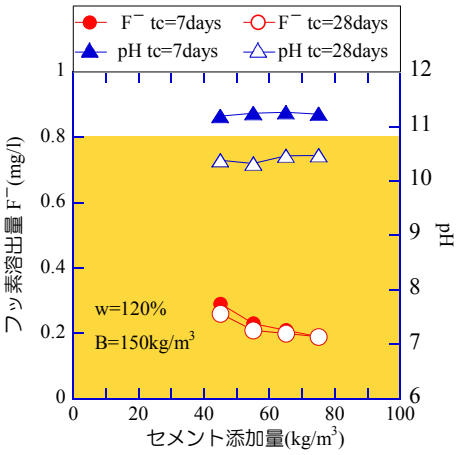


図 4.3　セメント添加量とふっ素溶出濃度及び pH の関係

まず、図に示す pH に着目するといずれの条件においても 10～11 の弱アルカリ性を示していることがわかる。廃石膏ボードを地盤改良材として再利用する場合、課題として挙げられているのが硫化水素ガスの発生である。また、硫化水素発生抑制対策として、pH 値を弱アルカリ性に設定することが挙げられている [28]。これを踏まえ、養生日数に着目すると、経過日数が増加するにつれて、pH 値は中性側に変化していることがわかる。このことから、今後長期的な養生日数に伴う pH の変化を確認し硫化水素ガス発生の評価を行う事が実施工に適用する際の課題として挙げられる。ふっ素溶出濃度に着目すると、全ての条件においてセメント添加量が増加するにつれて漸次低下していることがわかる。これは昨年度までの研究成果と同様なことが言え、高炉セメント B 種の水和反応により生成する水和鉱物にふっ素イオンが固定され、再生半水石膏からのふっ素の溶出が抑制されたと考えられる [14]。**写真-4.7** に硬化体中のエトリンガイトを、**図-4.4** にエトリンガイトの骨格構造を示す。3 つの Ca 原子および 2 つの Al 原子で囲まれた大きな空間が存在する鴉籠の中に大きな原子を許容する能力があり、これを利用して有害金属を固定することができるとされているため、改良体からのふっ素の溶出が抑制されたと考えられる [29]。また、**a) w=80% B=75kg/m³** の条件については、顕著に溶出濃度が低下している値が確認できる。このような顕著な溶出濃度の低下が見られた理由は、ふっ素溶出抑制効果に必要なセメント添加量が不足していたためであると考えられると同時に、抑制効果に必要な最低セメント添加量が存在すると推察できる。

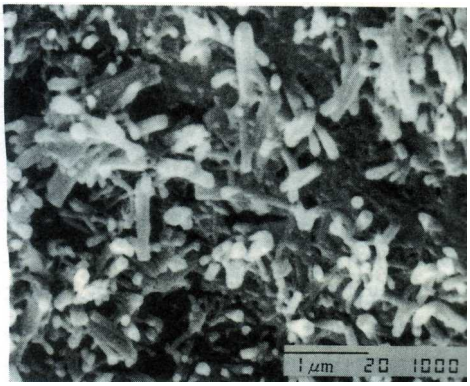


写真-4.7　硬化体中のエトリンガイト [29]

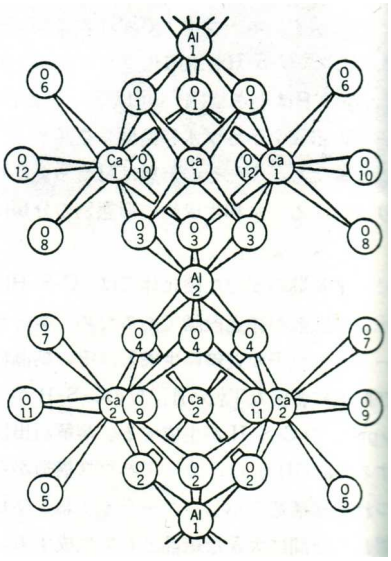


図-4.4　エトリンガイトの骨格構造 [29]

4-4-2　セメント等の種類の違いが溶出特性に及ぼす影響

図-4.5 にふっ素溶出濃度、養生日数及び pH の関係を示す。

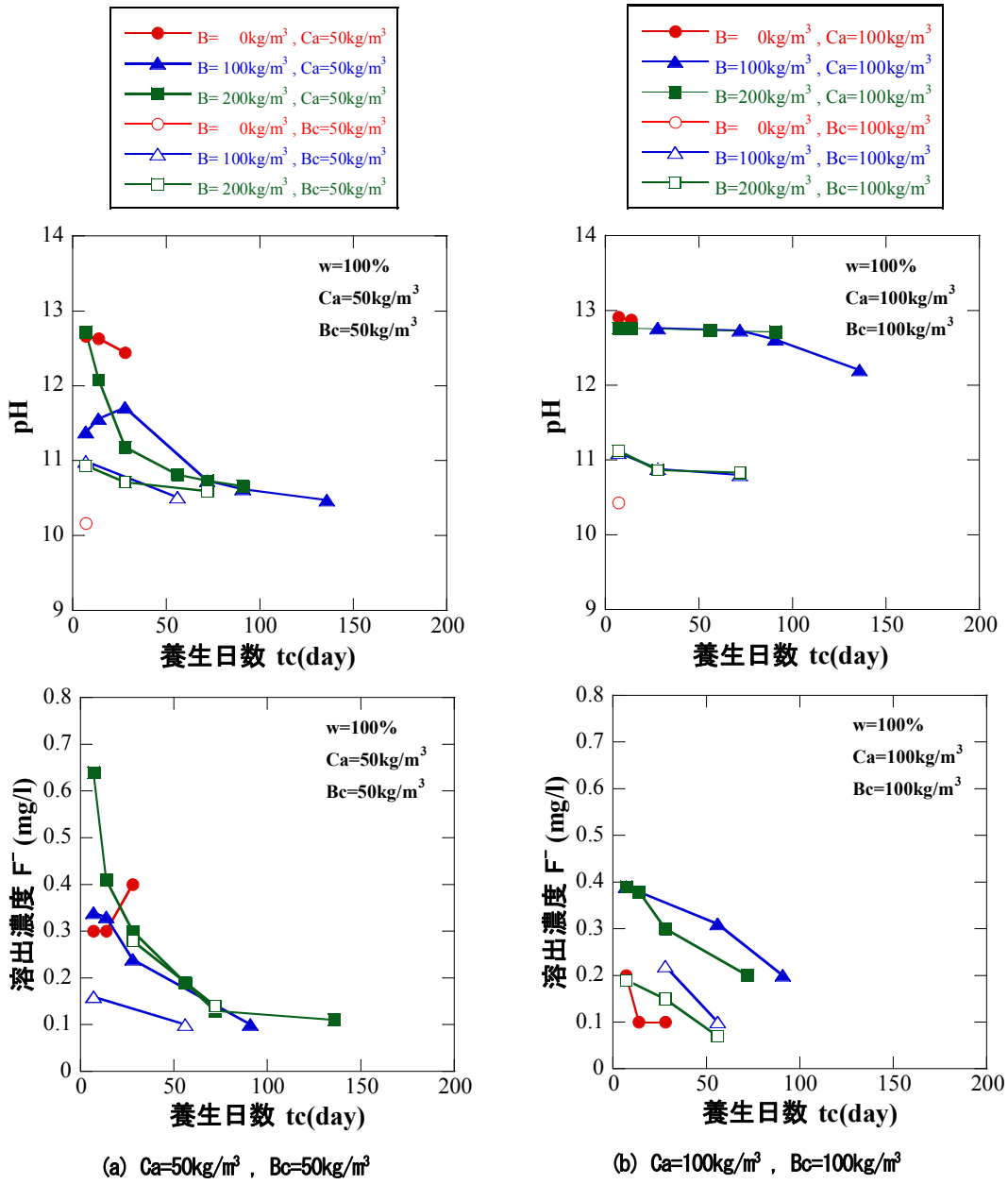


図-4.5　ふっ素溶出濃度、養生日数及び pH の関係

図-4.5 の pH に着目すると、高炉セメント B 種を添加した条件の場合、生石灰と比べて pH が低い値を示している。ふっ素溶出濃度に着目すると、全ての条件において、土壌環境基準値である 0.8mg/l 以下を示していることが分かる。これは、生石灰の場合、水と反応して消石灰となった後、土中の粘土鉱物と結びつき、エトリンガイトが生成されることによってふっ素が固定され、土中へのふっ素の溶出を抑制したためであると考えられる。高炉セメント B 種の場合も、含有している生石灰によって同じ効果が働いたと考えられる。よって、再生半水石膏に生石灰を添加することにより、ふっ素の溶出を抑制できるため、実地盤への適用性は高いと考えられる。

4-4-3　養生日数の違いが溶出特性に及ぼす影響

図-4.5 の pH に着目すると、全条件で強アルカリ性を示していることが分かる。生石灰添加量 50kg/m^3 の場合、養生日数を重ねるにつれ、徐々に強アルカリ性から中性域へと移行していることから、配合条件によっては、実地盤への適用を想定した際でも硫化水素は発生しにくくなると考えられる。

ふっ素溶出濃度に着目すると、値にばらつきがあるものの、養生日数が経過するにつれて溶出濃度が低下、もしくは一定の数値で上下していることが分かる。よって、再生半水石膏を用いた改良土は、長期養生後も環境に優しい材料となることが示唆される。

4-4-4　再生半水石膏の種類の違いが溶出特性に及ぼす影響

表-4.9 に再生半水石膏の種類の違いに着目した石膏単体及び改良土の溶出試験結果を示す。

表-4.9　溶出試験結果（再生半水石膏の種類の違い）

Case No.	石膏の種類	石膏単体		改良土	
		pH	F^-	pH	F^-
1	新築系	8.26	3	11.74	0.24
2	解体系	7.72	21.6	11.68	0.66
3	新築＆解体	8.37	7.5	11.71	0.28
4	焼成直後	7.59		10.09	
5	分級直後	7.62	3.7	10.08	nd
6	ミル直後	7.61	3.8	10.19	nd

まず、pH に着目すると、全ての廃石膏において中性を示していることがわかる。また、ふっ素溶出濃度については、表に示すように発生場所の異なる廃石膏によって溶出特性が異なっていることがわかる。肴倉ら[30]は、廃石膏溶出液の pH は、試料中に不純物として含まれる H_3PO_4 によって決まり、最近は P 全体の量が減少傾向にあるため pH は上昇傾向にあり、さらに F溶出濃度も経年的に減少していると報告している。本実験結果においても、解体系石膏では pH が低い値を示し F溶出濃度も高濃度を示したため、同様の結果が得られたと考えられる。次に改良土の溶出試験結果に着目すると、高炉セメント B 種によるセメント水和物によってふっ素が固定され溶出が抑制されていることがわかる。また、全ての条件において土壌環境基準値を下回っているものの、単体からの溶出特性と同様に解体系石膏が高濃度を示した。以上のことから、石膏の種類や破砕方法の違いによって諸特性は変化することが明らかとなった。今後データの蓄積を行い、検討していく予定である。

4-4-5　土質材料の違いがふっ素溶出特性に及ぼす影響

(1)実験に用いた土質材料

　土質材料は、引き続きまさ土、脱水ケーキ、鹿児島県で採取したしらす、福岡県で採取した博多粘土、風化土、熊本県で採取した黒ボクを用いた。本章で新たに用いた土質材料を**写真-4.8～4.13** に示す。

写真-4.8 まさ土

写真-4.9 脱水ケーキ

写真-4.10　しらす

写真-4.11　博多粘土

写真-4.12　風化土

写真-4.13　黒ボク

再生半水石膏に関しては、焼成方式の違いに着目し、間接焼成方式で焼成された再生半水石膏（以下、石膏 A）、IH 焼成方式で焼成された再生半水石膏（以下、石膏 B）を用い、添加率を変化させて実験を行った。**図-4.6** に試料の粒径加積曲線を示し、**表-4.10** に物理特性値を示し、**表-4.11** に石膏の溶出試験結果を示す。

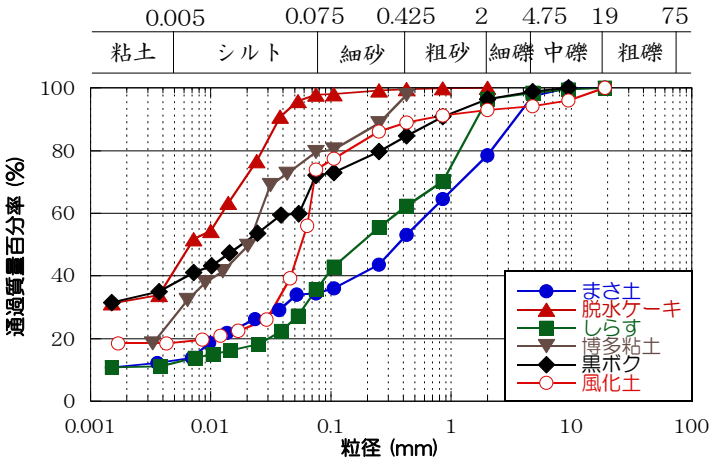


図-4.6 試料の粒径加積曲線

表-4.10 試料の物理特性値

	まさ土	脱水ケーキ	しらす	博多粘土	黒ボク	風化土
土粒子密度 ρ_s(g/cm^3)	2.642	2.620	2.415	2.759	2.389	2.721
初期含水比(%)	3.0	15.0	12.0		22.0	4.5
細粒分含有率F_c(%)	34.4	100.0	43.0	90.0	79.9	72.2
塑性指数I_p(%)	-	21.0	-	41.6	-	38.5
強熱減量(%)	3.7	18.4	5.6	43.0	23.7	10.9

表-4.11 石膏の溶出試験結果

試料名	pH	F(mg/l)	SO_4^{2-}(mg/l)	B(mg/l)	Cr^{6+}(mg/l)	Cd(mg/l)	Pb(mg/l)
石膏A	6.97	4.84	2422.36	0.14	N.D	N.D	N.D
石膏B	7.46	5.94	2432.15	0.07	N.D	N.D	N.D
土壌環境基準	-	0.80	-	1.00	0.05	0.01	0.01

図および表より、しらすは粒径幅の広い試料であることがわかる。また、黒ボク、赤土、博多粘土は細粒分含有率が高い試料であることがわかる。さらに、黒ボクおよび博多粘土は有機物を多く含む試料であることがわかる。また、溶出試験結果より石膏のふっ素溶出濃度は環境基準値を 5～6 倍に相当する高い値を示していることがわかる。さらに、硫酸イオンは 2000mg/ℓを超える溶出濃度を示しており、硫酸還元菌が活動できる条件下では硫化水素の発生が懸念される。また両石膏共に pH 値は中性を示している。

(2)試料混合方法

①2mm ふるいを通過させた試料を準備する。その後、土質材料に対する重量比で配合条件に応じて再生半水石膏及び水を計量する。

②ミキサーで試料を 1 分間混合攪拌する。(**写真-4.14 及び 4.15**)

写真-4.14　試料混合の様子

写真-4.15　混合した試料の様子

③チャック付の袋に入れ、恒温室にて所定期間養生を行う。(**写真-4.16**)

写真-4.16　養生の様子

(3)実験条件

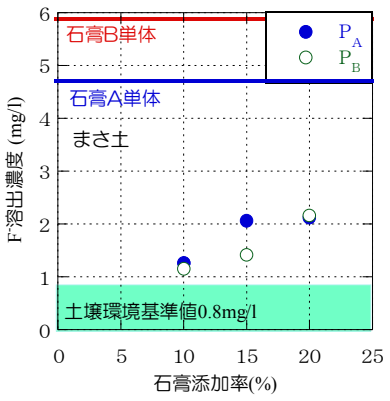
表-4.12 に土質材料の種類及び再生半水石膏の添加率の影響把握を目的に行った溶出試験の配合条件を示す。実験では、再生半水石膏を 10,15,20%と変化させ、養生日数は、1,7,28 日と変化させることにより溶出特性の把握を行った。材料の混合は、土質材料の乾燥重量に対する重量比で行った。ここで、混水量は、JIS R 9112 により求めた石膏に用いる最適量の水の量である。

表-4.12 実験条件

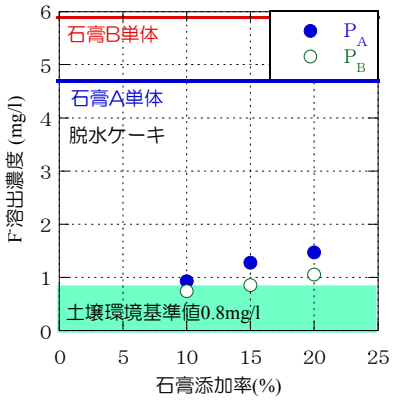
土質材料	半水石膏		混水量(%)
	種類	添加率(%)	
まさ土 脱水ケーキ しらす 博多粘土 黒ボク 風化土	石膏A	10	143
		15	
		20	
	石膏B	10	116
		15	
		20	

(4)石膏添加率とふっ素溶出濃度の関係

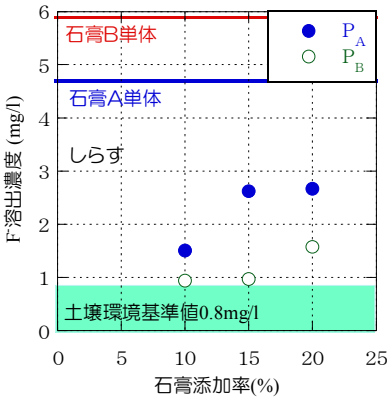
図-4.7 に養生 1 日後の石膏添加率とふっ素(F)溶出濃度の関係を示す。



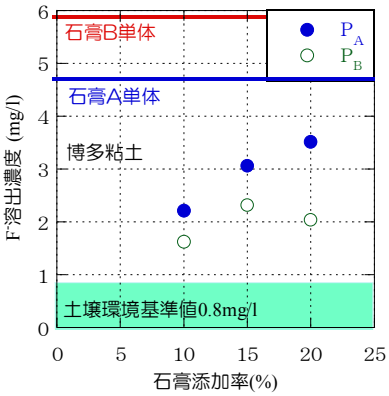
(a) まさ土



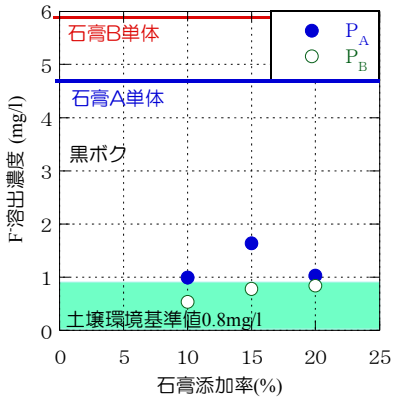
(b) 脱水ケーキ



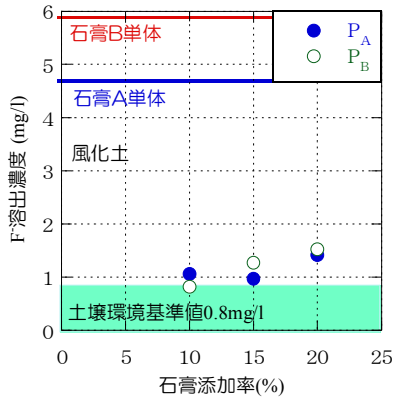
(c) しらす



(d) 博多粘土



(e) 黒ボク



(f) 風化土

図-4.7　石膏添加率とふっ素溶出濃度の関係

図より、石膏添加率の増加に伴いふっ素溶出濃度が増加している。これは、**表-4.18** に示すようにもともと石膏自体が土壌環境基準値の 5～6 倍に相当するふっ素の溶出が認められることに起因しているものと考えられる。これは、**表-4.20** に示すように、各養生後の結果も同様のことがわかる。また、土質材料の種類によってふっ素溶出濃度に違いが見られる。

図-4.8 に石膏 A 添加率 20%の各土質材料における養生日数とふっ素溶出濃度の関係を示す。

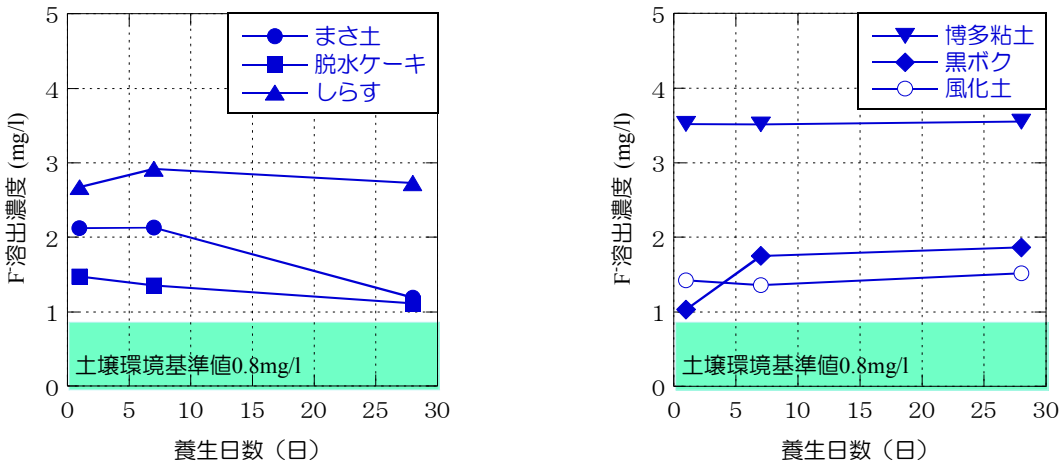


図-4.8　養生日数とふっ素溶出濃度の関係（P_A=20%）

脱水ケーキとまさ土では養生日数の経過に伴いふっ素の溶出濃度が低下していることがわかる。これに対し、それ以外の土質材料では、養生日数に関係なくふっ素溶出濃度はほぼ一定値を示している。**表-4.20** から、各石膏添加率においても同様のことがわかる。

図-4.9 に 1 日養生後における細粒分含有率 F_c とふっ素溶出濃度の関係を示す。

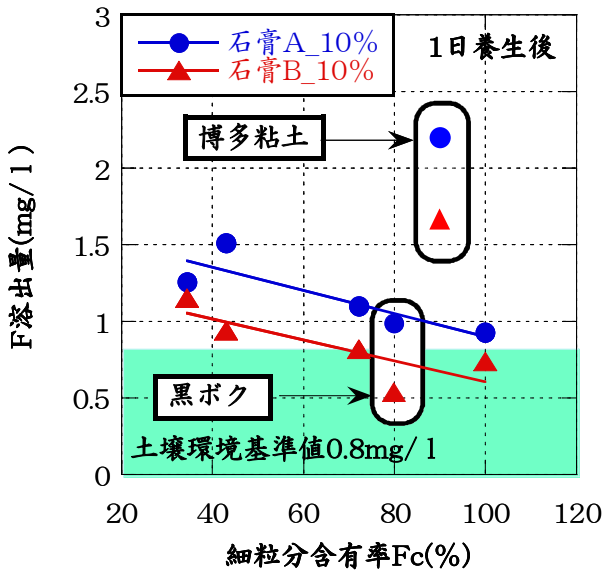


図-4.9　Fc とふっ素溶出濃度の関係

細粒分含有率の増加に伴ってふっ素の溶出濃度が低下していることがわかる。これは、細粒分がふっ素を吸着したことに起因するものと考えられる。ここで、黒ボクに着目すると、細粒分含有率が 100%の脱水ケーキと同等もしくはそれ以上の溶出濃度の低下が見られる。これは、黒ボクがホウ素やふっ素といった重金属を吸着しやすい性質を持っていることに起因するものと考えられる。これに対し、ふっ素を多く含有している博多粘土は、細粒分含有率が高いにもかかわらず、ふっ素溶出濃度が高いことがわかる。

4-5　実地盤に適用した際のふっ素溶出特性

4-5-1　カラム試験概要

実験は、廃棄物資源循環学会標準試験[31] (草案)の規格に従って行った。この廃棄物学会規格溶出試験は、廃棄物や、廃棄物を減量とする建設系再生資材・製品に含まれる無機系有害物質の、土壌や地下水への溶出挙動を評価するための統一的な試験方法を規定したものである。本実験で用いたカラム試験装置を**写真-4.17**に、概略図を**図-4.10**に示す。

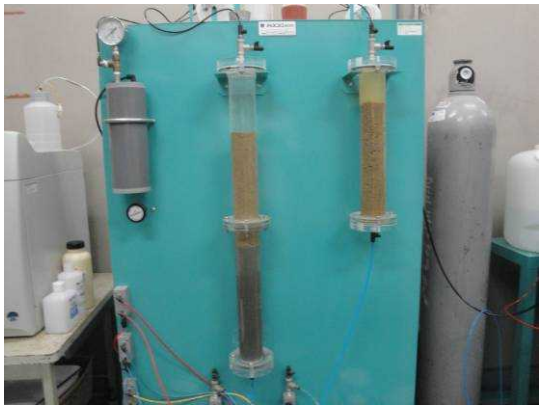


写真-4.17　カラム試験装置

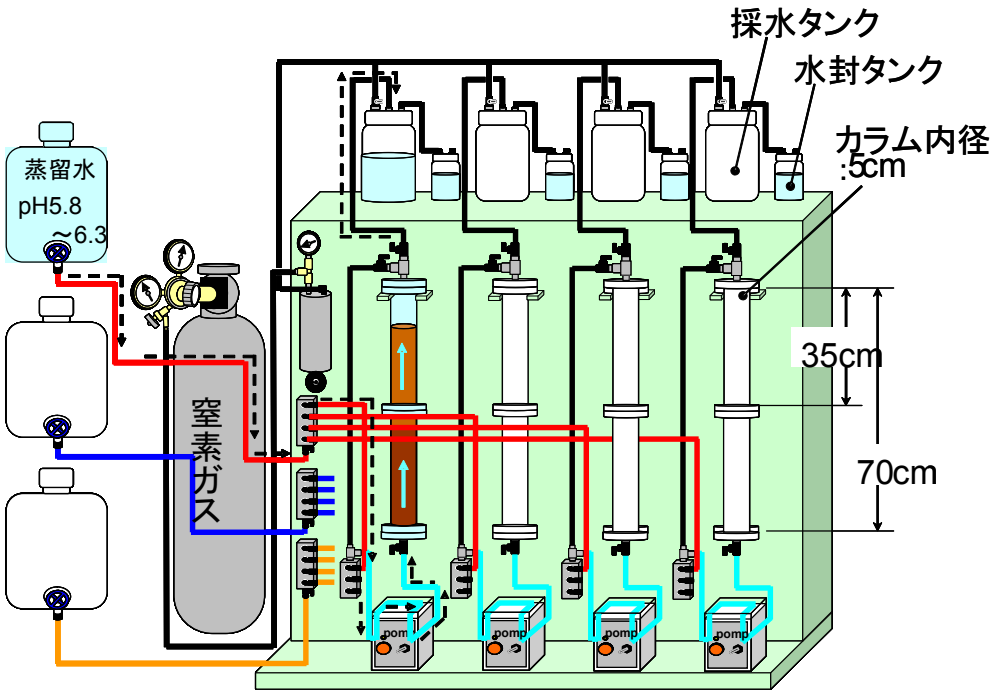


図-4.10　カラム試験装置概略図

(1) 試料の準備

一軸圧縮試験を終えた供試体をプラスチックハンマーで破砕し、2mm ふるいを通過させたものを準備する。ここで2mm ふるいを通過させたのは、セメント改良土では透水
係数が低いため通水が困難であることを考慮して、最も溶出しやすい危険な状態を想定したためである。

(2) 試料の充填

表-4.13 に突固め条件を示す。俠径カラム(5cm)に対し、125g のランマーを落下高さ約 20cm、落下回数 3 回として充填高さが 30cm になるように 5 層に分けて突き固めて作製した。**写真-4.18** に突固めの様子を示す。試料を充填後、カラム全体の重量を 1g 単位まで測定する。

表-4.13　突固め条件

条件	ランマー質量 (g)	ランマー落下高 (cm)	モールド内径 (cm)	各層の突固め回数	最大粒径 (mm)
まさ土	125	20	5	3	9.5
粘土					2.0

写真-4.18　突固めの様子

(3) 試験開始

溶媒には、pH5.8～6.3 に設定した蒸留水を用い、試料を通過する流出液の速度はポンプを用い 12mL/h になるように調整した。ポンプまたは静水圧により、水でカラムを飽和状態にさせる。飽和状態となったらポンプを停止し、または、静水圧を取り除く。このとき、平衡状態にするために、カラムを 3 日間放置する。3 日後ポンプを始動し、空のカラムで流速が 12mL/h となるように流速を設定する。また、採水の条件は**表-4.14** の採水条件に従い、全分画を 7 分画とし累積 L/S=10 となるまで採水し、ろ過を行った後、イオンクロマトグラフによりふっ素溶出濃度を測定した。

表-4.14　採水条件

分画	分画体積(L) (=L/S比×試料乾燥重量)	累積L/S比 (L/kg乾燥試料)
1	$(0.1\pm0.02)\times m_0$	0.1±0.02
2	$(0.1\pm0.02)\times m_0$	0.2±0.04
3	$(0.3\pm0.05)\times m_0$	0.5±0.08
4	$(0.5\pm0.1)\times m_0$	1.0±0.15
5	$(1.0\pm0.2)\times m_0$	2.0±0.3
6	$(3.0\pm0.2)\times m_0$	5.0±0.4
7	$(5.0\pm0.2)\times m_0$	10.0±0.1

(4) 配合条件

表-4.15 にカラム試験の配合条件を示す。本検討では、実地盤に適用した際の周辺地盤によるふっ素吸着効果を確認するため、覆土としてまさ土を用いた。**図-4.11** にカラムの詳細図を示す。

表-4.15　配合条件（カラム試験）

Case No	土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 B_c (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)	覆土
1	博多粘土	100	100	50	7	なし
2						まさ土
3			200			なし
4						まさ土
5	まさ土	初期含水比	0	0	0	

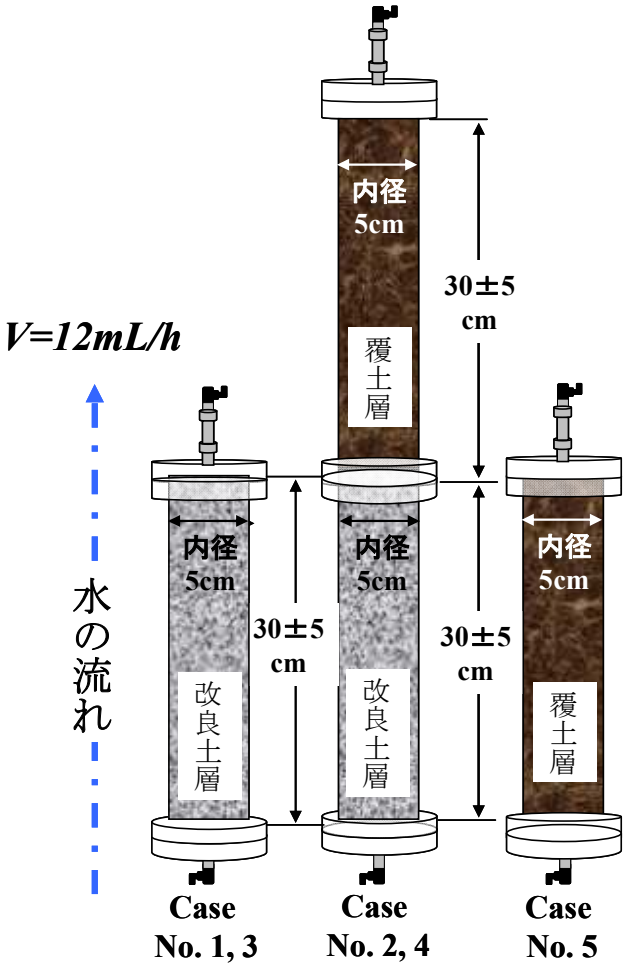


図-4.11　カラム詳細図

4-5-2　覆土によるアルカリ分及びふっ素吸着特性効果

図-4.12 にカラム試験による pH と L/S の関係、**図-4.13** に累積 F溶出濃度と L/S の関係を示す。

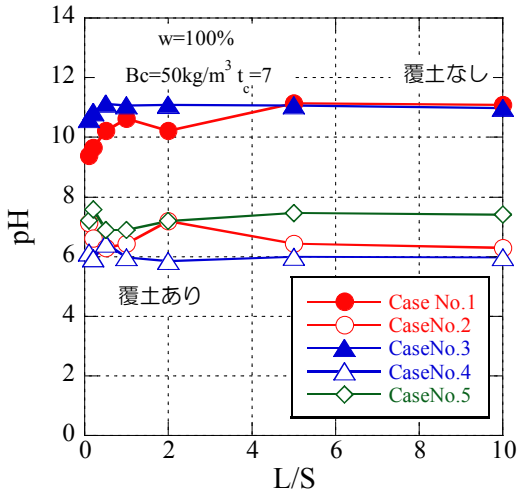


図-4.12　pH と L/S の関係

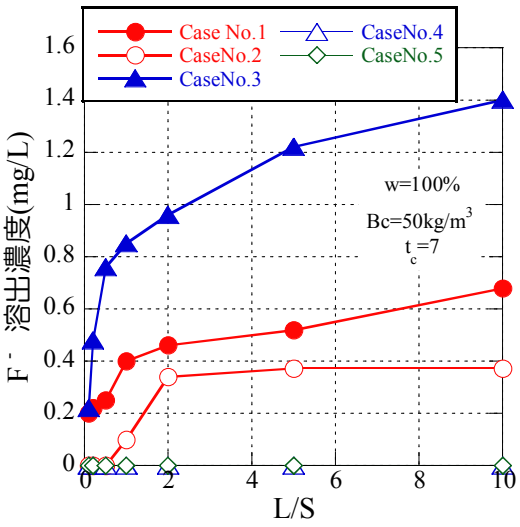


図-4.13　累積 F⁻溶出濃度と L/S の関係

図-4.12 の pH の変化に着目する。Case No.1, 3 の覆土なしの条件では、高炉セメント B 種を添加した影響からアルカリ性を示していることがわかる。次に、Case No.2, 4 の覆土ありの条件に着目すると、Case No.1 のまさ土のみの条件と同様に溶媒の pH と同等の中性を保っていることがわかる。次に**図-4.13** の F溶出濃度に着目すると、再生半水石膏添加量が多い条件ほどふっ素の溶出が確認できる。しかし、Case No.2, 4 の覆土ありの条件での F溶出濃度は、Case No.1, 3 の覆土なしの条件と比べて著しく低下していることがわかる。このような結果が現れたのは、改良土から溶出したアルカリ成分や Fが、まさ土によって吸着されたためであると考えられる。実地盤への適用を想定した場合、改良土表面からは Fの溶出や、pH の低下が予想されるが、透水性が低いため改良土内部のアルカリ分や重金属等は溶出しにくいことが考えられる。そのため、今回比較的溶出しやすい条件を想定した検討結果において環境的に安全な結果が得られたことから、実地盤への適用を想定した場合、改良土表面からはふっ素の溶出や、pH の低下が予想されるが、透水性が低いため、移流による改良土内部のアルカリ分や重金属等は溶出しにくいことが考えられる。今後、拡散による溶出について評価していく事も重要である。

4-6　再生半水石膏地盤改良土の硫化水素発生特性

4-6-1　土質材料の違いが硫化水素発生特性に及ぼす影響

(1) 実験概要

本検討では、再生半水石膏により改良された固化処理土が、土質材料の違いによって硫化水素ガス発生にどのような影響を及ぼすのか検討した。用いた試料は、4-4-5 で使用した、まさ土、脱水ケーキ、しらす、博多粘土、黒ボク、赤土の 6 種類の土質試料である。硫化水素発生試験用の試料(28 日間養生)は、一軸圧縮強度を測定した後の破壊断片を回収して粉砕し、目開き 2mm 篩を通過したものを用いた。なお、篩い分けした試料は試験に供するまでの間、チャック付きのビニール袋に一時保存した。試験方法は、試料 50g を秤取った物と純水 200ml を 500ml 容器のデュラン瓶に入れ、種菌として大型実験槽(安定型廃棄物充填)の浸透水 1ml を添加する。次に、内部のガスを高純度窒素で置換(2L/分で 1 分)、シリコン栓で密栓、そしてよく撹拌した後、容器を 35℃の恒温槽に静置する。その後、シリンジで内部のガスを 0.5ml 採取し、ガスクロマトグラフを用いて、硫化水素発生の検証を行った。また、内部に発生した硫化水素ガスの濃度を均一にするため、サンプリングの前に内容物をよく撹拌した。**図-4.14** に硫化水素発生試験手順を示す。

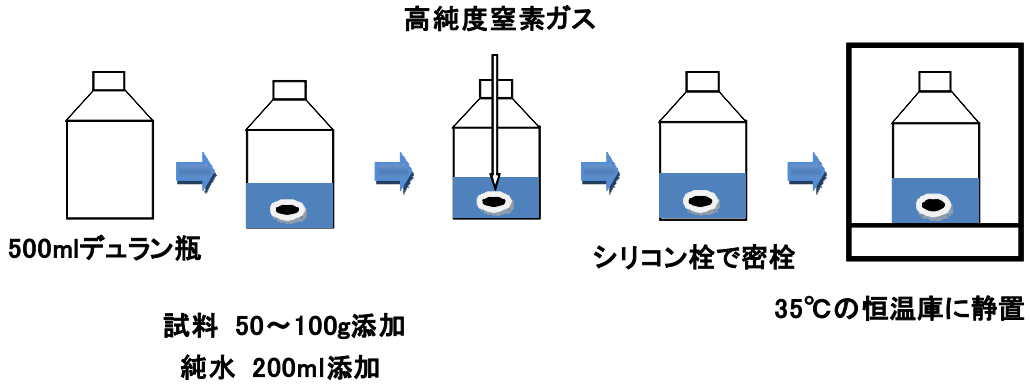


図-4.14　硫化水素発生試験手順

表-4.16 に配合条件を示す。

表-4.16　配合条件

Case #	土質材料	半水石膏		混水量(%)
		種類	添加率(%)	
1	まさ土	石膏A	10	143
2			15	
3			20	
4		石膏B	10	116
5			15	
6			20	
7	脱水ケーキ	石膏A	10	143
8			15	
9			20	
10		石膏B	10	116
11			15	
12			20	
13	しらす	石膏A	10	143
14			15	
15			20	
16		石膏B	10	116
17			15	
18			20	
19	博多粘土	石膏A	10	143
20			15	
21			20	
22		石膏B	10	116
23			15	
24			20	
25	黒ボク	石膏A	10	143
26			15	
27			20	
28		石膏B	10	116
29			15	
30			20	
31	赤土	石膏A	10	143
32			15	
33			20	
34		石膏B	10	116
35			15	
36			20	

(2) 実験結果

以後、各試料の表記を簡略化するため、例えばCase1 試料の表記は#1 と示す。**図-4.15** に脱水ケーキ（#7～12）、**図-4.16** にシラス（#13～18）、**図-4.17** に赤土（#31～36）を半水石膏を用いて改良した材料からの硫化水素試験結果について示す。

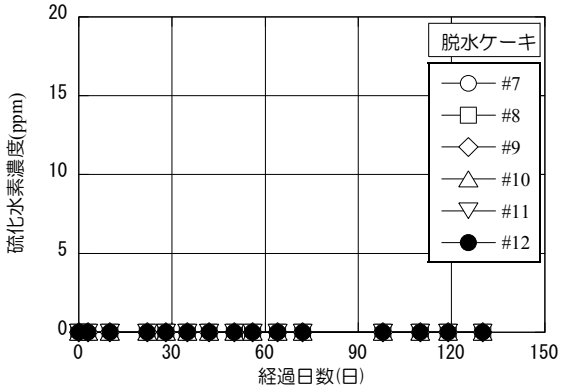


図-4.15　脱水ケーキ

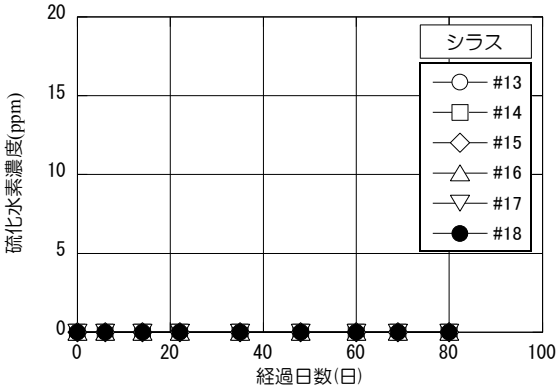


図-4.16　シラス

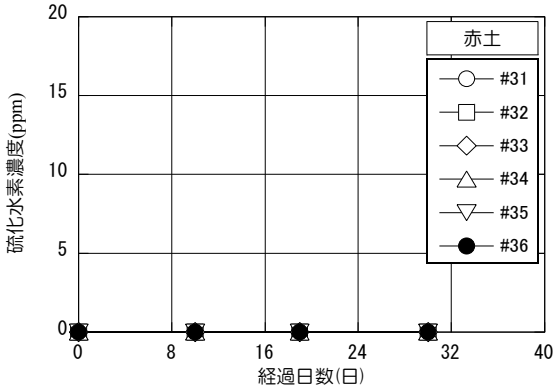


図-4.17　赤土

脱水ケーキの半水石膏改良物については130 日間、シラスの半水石膏改良物については80 日間、赤土の半水石膏改良物については30 日間の試験期間中一度も硫化水素の発生は確認されなかった。

次に、**図-4.18** にまさ土（＃1～6）、**図-4.19** に博多粘土（＃19～24）、そして**図-4.20** に黒ボクの半水石膏改良物（＃25～30）の結果を示す。

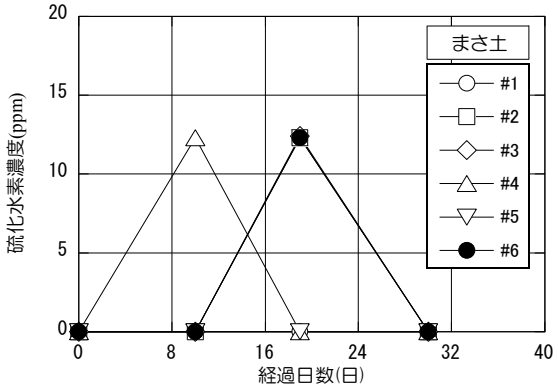


図-4.18　まさ土

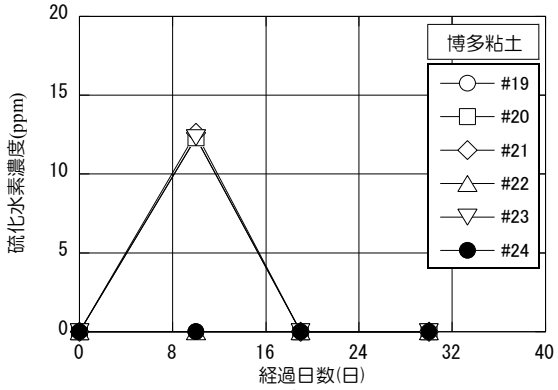


図-4.19　博多粘土

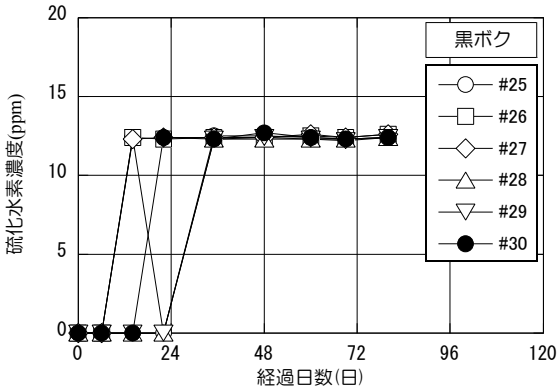


図-4.20　黒ボク

いずれの試料についても測定開始後 10～20 日の間に硫化水素の発生が確認された。しかし、その後は発生した硫化水素ガスの濃度が維持される事なく消失する傾向が見られた。これらの試料については実験開始 14～35 日の間に硫化水素の発生が確認され、さらにその後、発生した硫化水素ガスの濃度が維持される傾向が見られた。以上の実験の結果から、本試験方法を用いて土壌の半水石膏改良土から硫化水素ガスが発生する場合、実験開始から一月以内にガスが発生していることから、一月間硫化水素ガスの発生を調べることでガス発生の有無を判定可能と考えた。また、土壌の半水石膏改良物からの硫化水素発生は、その特徴から次の 3 つに分類されることが明らかとなった。

a) 脱水ケーキ、シラス、赤土の半水石膏改良物の様に、硫化水素の発生が確認されないもの。
b) まさ土、博多粘土の半水石膏改良物の様に、一度硫化水素が発生するがその後消失するもの。
c) 黒ボクの半水石膏改良物の様に、一度硫化水素が発生しその後も硫化水素の濃度が維持されるもの。

これらの硫化水素の発生パターンは、a) 発生した硫化水素が直ちに硫化物として固定されたり、アルカリ性の水溶液に吸収されてガスとして発生しない場合、b) 硫化水素の発生が硫化水素の固定や吸収に追いつかず一時的にガスとして発生する場合、c) 発生した硫化水素に対し硫化水素の固定や吸収の能力が低い場合などの原因が考えられる。これには土壌の重金属（鉄）含有量、粒度分布（粒子径や比表面積）、pH、水分含量などが影響していると考えられるため、さらに詳細な関連性を調べる必要がある。一方、硫化水素ガスが発生しなくても硫化水素が硫化物や水に吸収されていることがあるため、硫化水素ガス発生試験終了後に試料に塩酸等の強酸を添加して、弱酸の硫化水素を遊離させ硫化水素ガス発生の有無を確認する必要がある。また、硫化水素ガスの発生が一時的、あるいは継続的に観察された土壌試料（まさ土、博多粘土、黒ボク）については鉄材の添加やpH調整等で発生抑制される可能性があり、安全利用の面からも今後の課題としたい。

以上の結果を受けて、硫化水素ガスの発生を促進させる試験の方法の確立、セメント等の補助固化材を添加した場合での硫化水素ガスの確認を行った。次節に検討結果を示す。

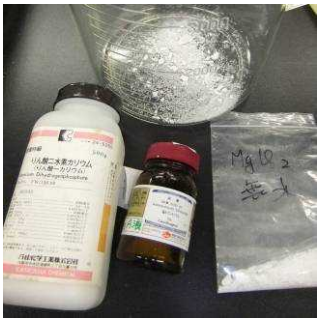
4-6-2　固化材添加量の違いが硫化水素発生特性に及ぼす影響

本節では、硫化水素ガス発生試験及びよう素滴定試験についての実験手順を示す。

(1) 硫化水素ガス発生試験

実験試料は、4-3 で使用した一軸圧縮試験終了後の供試体を 2mm ふるいに通過させたものを用いた。この試料を選定した理由は、pH が中性域に推移し硫化水素ガスが発生しやすい最も危険な状態を想定したためである。準備段階として、KH_2PO_4, $MgCl_2$, NH_4Cl の無機栄養成分をそれぞれ 0.5g/L, 0.8g/L, 1.0g/L 量り純水と混合する（ミネラル水）。その後、pH を 7 に調整しミネラル水を 200ml 量ったものと、試料 50g をデュアル瓶に入れ混合する。従来の試験方法では、無機栄養成分は投入せず純水を用いていたが、今回の試験では、より微生物の活性を高め硫化水素ガスの発生を促進させるため上記の方法で検討した。**写真-4.19** に試料を混合するまでの流れを示す。

a) 試料を 50g 量る



b) ミネラル水を作製

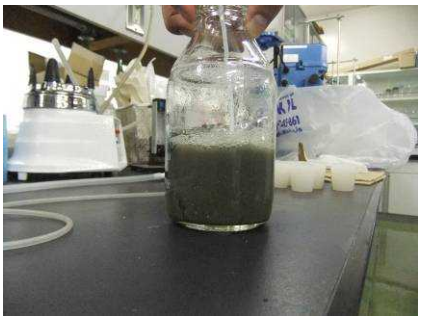
c) pH を 7 に設定

d) 混合

写真-4.19　試料を混合する流れ

次に種菌として硫酸還元菌を 1mL 添加する。その後、内部のガスを高純度窒素で置換（2L/分で 1 分）し、シリコン栓で密栓したものを、35℃の恒温槽に静置する。最後に、ガスクロマトグラフィーG6800 により硫化水素ガスを測定する。**写真-4. 20** に測定までの流れを示す。

a）硫酸還元菌を添加する



b）窒素で置換する

c）恒温槽に静置

d）ガスクロマトグラフ

写真-4. 20　測定までの流れ

⑵ よう素滴定試験

一般的に、硫化水素ガスが発生して直ぐに、土中の酸化鉄と反応して硫化物となり硫化水素ガスが発生しにくくなるとされている。そこで、よう素滴定試験を行い、硫化物を確認した。実験試料は I と同様のものを使用している。

試験手順を以下に示す。

①2 個の吸収フラスコ 300ml に酢酸亜鉛溶液（200g/l）5ml を水で 100ml に薄めたものを半量ずつ入れる。

②試料に硫酸 10ml を加えて酸性とし、不活性ガスを送気して発生した硫化水素ガスを酢酸亜鉛溶液に固定する。

③吸収液に固定した硫化物と反応するのに十分な過剰の 0.025mol/l よう素溶液を加え、さらに塩酸 5ml を加えてよく振り混ぜる。

④この溶液を一つの吸収フラスコに集め、でんぷん溶液を指示薬として 0.025mol/l チオ硫酸ナトリウム溶液で滴定する。

⑤最初に加えた 0.025mol/l よう素溶液の ml 数(a)と測定に要した 0.025mol/l チオ硫酸ナトリウム溶液の ml 数(b)とから、4.1 式によって、試料中の硫化物の濃度(mgS/l)を算出する。

写真-4. 21 に試験中の様子を示す。

$$硫化物(mgS/L) = (aF_1 - bF_2) \times \frac{1000}{試料ml} 0.400 \times 1.005 \qquad (4.1)$$

$F_1 : 0.025mol/L$よう素溶液のファクター

$F_2 : 0.025mol/L$チオ硫酸ナトリウム溶液のファクター

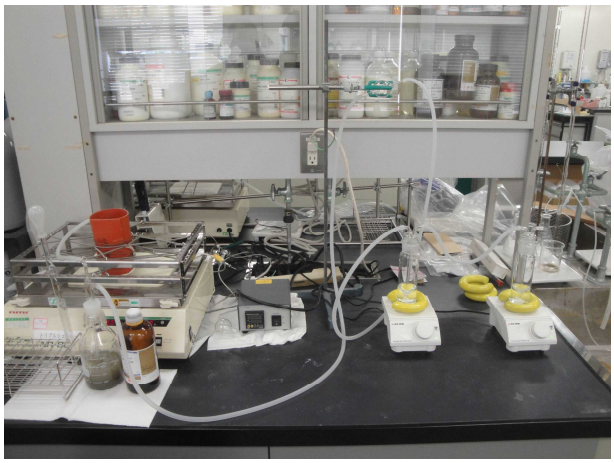


写真-4.21　よう素滴定試験

(3) 実験条件

表-4.17 に実験条件を示す。(再褐) 所定のサイクル数を終えた供試体についてそれぞれ試験を行った。

表-4.17　配合条件（硫化水素発生試験）

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 B_C (kg/m^3)	養生日数 t_c (days)
博多粘土	100	100 200	50	7

(4) 実験結果

表-4.18 に硫化水素発生試験結果を、**図-4.21** にサイクル数と硫化物の関係を示す。

表-4.18　硫化水素発生試験結果

土質材料	含水比 w(%)	高炉セメントB種 Bc(kg/m^3)	再生半水石膏添加量 B(kg/m^3)	サイクル数 C(time)	硫化水素ガス (ppm)
博多粘土	100	50	100	1	0
				3	0
				5	0
				7	0.2
				9	0.2
				12	0.1
				15	0
			200	1	0
				3	0
				5	0
				7	0.1
				9	0.3
				12	0.1
				15	0.1

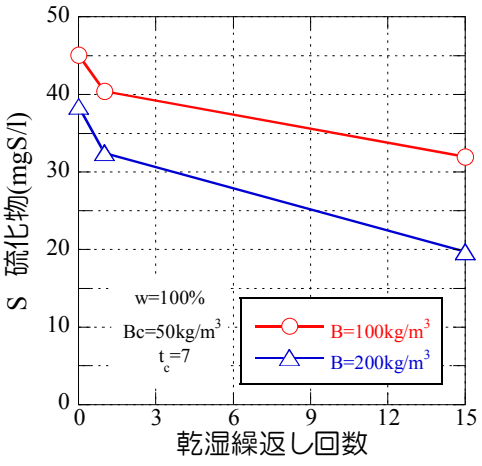


図-4.21　サイクル数と硫化物の関係

表-4.25 に示すように硫化水素ガスはほとんど発生していないことがわかる。これは、博多粘土の場合、微粒子なので比表面積が大きく土中の酸化物と硫化水素が反応して硫化物として固定されたためであると考えられる。これを踏まえ、**図-4.21** に示す硫化物の測定結果を見ると、一般的に硫化水素ガスが発生して硫化物として固定された場合、初期値の数倍以上の差が出るため、この結果からは、硫化物は発生していないことが言える。サイクル数が増えるほど値が小さくなっているが、これは元々の博多粘土中に硫化物が含まれており、繰返し試験の際に硫化物を含む微粒子が脱落したためであると考えられる。硫化物が発生していない原因として、改良土の pH が弱アルカリ性を呈していたためであると考えられる。そのため硫酸塩還元菌の動きが鈍くなり、硫化水素ガスの発生量が少なくなったため、有意差として硫化物量が得られなかったと示唆される。

4-7　環境安全性の評価

⑴ ふっ素溶出挙動の把握

地盤改良材として再生半水石膏を実地盤に適用した際のふっ素溶出挙動を把握するために、乾湿繰返し試験で得られた浸漬水を用いて検討した。その結果、供試体表面から微量のふっ素が溶出し続けることが明らかとなった。しかし、溶出濃度は 0.2mg/l 程度と低濃度であり、土壌環境基準値を満足している。また、実地盤では周辺地盤へふっ素が吸着されることが予想されるため、環境への影響は低いと考えられる。以上より、実施工では、適用する環境を考慮しなければならないことが示唆される。

⑵ 固化材（再生半水石膏）及び補助固化材（高炉セメント B 種）添加量が再生半水石膏地盤改良土からのふっ素溶出特性に及ぼす影響

再生半水石膏により改良された地盤改良土のふっ素の溶出を抑制するため、高炉セメント B 種を添加し、抑制効果を確認した。その結果、ふっ素溶出濃度はセメント添加量が増加するにつれて低下することが明らかとなった。加えて、ふっ素溶出抑制効果に必要な最低セメント添加量が存在するため、溶出を抑制する補助固化材の最低添加量の把握が必要であることも明らかとなった。

⑶ 補助固化材の種類の違い（高炉セメント B 種、生石灰）がふっ素溶出特性に及ぼす影響

再生半水石膏により改良された地盤改良土からのふっ素の溶出を抑制する補助固化材が、種類の違いによって不溶化効果が異なるのか検討した。その結果、pH は、高炉セメント B 種を添加した条件の場合、生石灰と比べて低い値を示すこと、ふっ素溶出濃度は、再生半水石膏添加量 200kg/m^3 の条件においても、補助固化材として高炉セメント B 種あるいは生石灰を 50kg/m^3 添加することにより、土壌環境基準値を満足することが明らかとなった。以上のことから、環境安全性の面では、生石灰及び高炉セメント B 種どちらにおいても、ふっ素溶出を抑制する補助固化材として期待できることが示された。

⑷ 養生日数の影響

再生半水石膏により改良された地盤改良土からのふっ素の溶出を抑制する補助固化材が、長期養生後もふっ素抑制効果が現れるのか確認した。その結果、再生半水石膏による改良土の pH は、補助固化材を添加することにより長期養生後も強アルカリ性を示すことが明らかとなった。また、ふっ素溶出濃度は、値にばらつきがあるものの、養生日数が経過するにつれて溶出濃度が低下、もしくは一定の数値で上下することが明らかとなった。よって、再生半水石膏を用いた改良土は、補助固化材を添加することにより、長期養生後も環境に優しい材料となることが示唆される。

⑸ 再生半水石膏の種類の影響

再生半水石膏により改良された地盤改良土は、再生半水石膏の種類の違いによりふっ素の溶出特性に影響を及ぼすのか検討した。その結果、発生場所の異なる廃石膏によってふっ素溶出特性は異なり、石膏の種類や破砕方法の違いによってふっ素溶出特性は変化することが明らかとなった。このことから、リサイクルを促進していく上で今後データの蓄積を行う必要があることが示唆される。

(6) 土質材料の影響

再生半水石膏により改良された地盤改良土は、土質材料の違いによってふっ素溶出特性が異なるのか検討した。その結果、まさ土と脱水ケーキに再生半水石膏を添加した材料では、養生日数の経過に伴いふっ素溶出濃度は低下するが、それ以外の土質材料では、養生日数に関係なくふっ素溶出濃度はほぼ一定値を示すことが明らかとなった。さらに、ふっ素溶出濃度は、土質材料の種類によって異なり、細粒分含有率が高い土質材料ほどふっ素溶出濃度が低下する傾向にあることが示された。

(7) 実地盤に適用した際のふっ素溶出特性の検討

再生半水石膏により改良された地盤改良材を実地盤に適用した際のふっ素溶出特性を把握するため、カラム試験により溶出挙動を確認した。その結果、浅層改良工法へ再生半水石膏を用いた際の地盤改良土から溶出されるふっ素は、周辺地盤においてその移動を抑制できることが明らかとなった。また、実地盤への適用を想定した場合、改良土表面からはふっ素の溶出や、pH の低下が予想されるが、透水性が低いため、移流による改良土内部のアルカリ分や重金属等は溶出しにくいことが考えられる。今後、拡散による溶出について評価していく事も重要であることが示唆される。

(8) 再生半水石膏地盤改良土の硫化水素発生特性

再生半水石膏により改良された地盤改良土は、条件が揃うと硫化水素ガスが発生する危険性がある。そこで、乾湿繰返し試験により供試体の pH を低下させ、比較的ガスが発生しやすい条件下で硫化水素ガス発生試験を行った。その結果、セメントを添加し、改良土を弱アルカリ性に設定することで硫酸塩還元菌の動きが鈍くなり、硫化水素ガスの発生量が少なくなることが明らかとなった。さらに、博多粘土は微粒子であり、比表面積が大きいため、硫化水素が吸着されやすいことから、再生半水石膏の有効利用に寄与できる土質材料であると考えられることも示唆される。

第 5 章　ふっ素不溶化材の開発への取り組み

5-1　概説

再生半水石膏の再利用は、再生半水石膏に含有するふっ素の溶出量が土壌環境基準値を上回る場合があることから、ふっ素の溶出を抑制させる研究が必要不可欠である。そこで本章では、ふっ素不溶化処理済みの再生半水石膏の搬出を目的とし、溶出試験による実験的検討を行った結果について述べている。

5-2　実験概要及び結果

(1) 実験概要

実験試料は、主材料として焼成方式の違いに着目し、IH ヒーターを用いて製造したものと、間接加熱キルンで製造したものを使用した。半水石膏を 100g に設定し、その重量比から不溶化材の添加量を算出した。

(2) 実験方法

実験方法は、環境庁告示 46 号法試験に準拠した方法で行った。再生半水石膏と不溶化材を混合した試料を L/S10 となるよう pH5.8～6.3 に設定した溶媒に加え 6 時間振とうし、ろ過、遠心分離を経て検液を作製した。また、ふっ素の不溶化効果の確認には、イオンクロマト ICS-3000 を用いてふっ素の溶出濃度の変化に着目した。

(3) 配合条件

配合条件を**表-5.1** に示す。本検討では、産業廃棄物や天然鉱物などを用いた低コストのふっ素不溶化材の開発を目的としている。

添加材Ａ～N での詳細を以下に示す。
添加材Ａ：Ca 、Fe 、Si 、Al 化合物を含むフライアッシュ
添加材Ｂ：Na、Si 化合物を主成分とする汚泥
添加材Ｃ：Na、Si 化合物を主成分とする汚泥(B と発生場所が異なる汚泥)
添加材 D：Ca 、Si 化合物を主成分とする汚泥
添加材 E+F：$Ca(OH)_2$+$Al_2(SO_4)^3$
添加材 G：Mn、Zn、K 化合物を含む汚泥
添加材 H：Ca、Fe、Si、Al 化合物を主成分とする工業材料
添加材 I：粘性土を主体とする汚泥
添加材 J：多孔質で細粒分が多いと考えられる新燃岳火山灰
添加材 K：細粒分の多い石粉
添加材 L：発生場所の異なるアルミニウム含有汚泥
添加材 M：発生場所の異なるアルミニウム含有汚泥(L と発生場所が異なる汚泥)
添加材 N：炭酸カルシウム

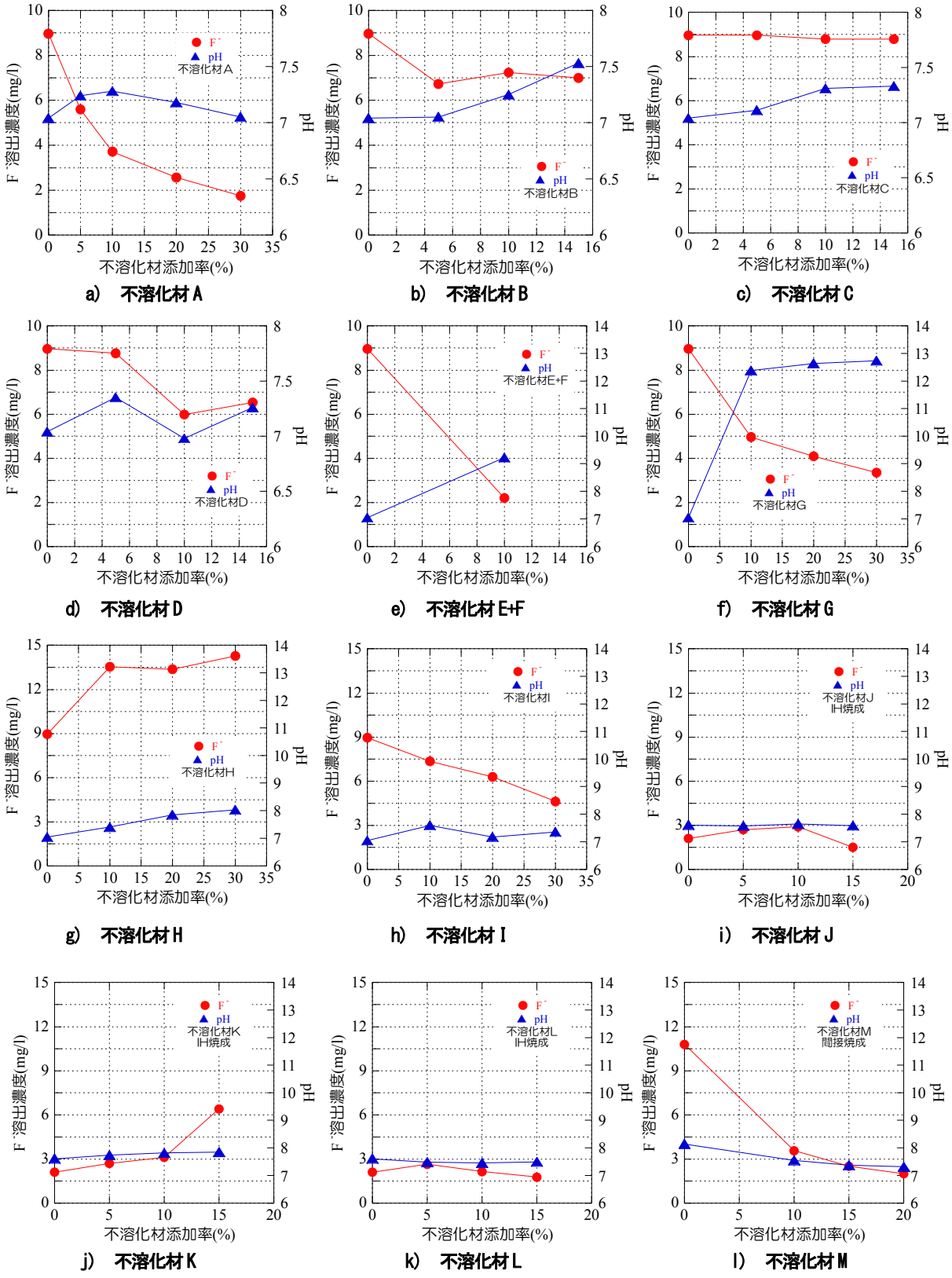
これら 13 種類の添加材を用いて再生半水石膏からのふっ素不溶化効果について検討した。

表-5.1　配合条件

Case No.	再生半水石膏(g)	不溶化材(%)	備考
1	100	0	Blank
2		5	添加材 A
3		10	
4		20	
5		30	
6		5	添加材 B
7		10	
8		15	
9		5	添加材 C
10		10	
11		15	
12		5	添加材 D
13		10	
14		15	
15		5+5	添加材 E + 添加材 F
16		10	添加材 G
17		20	
18		30	
19		10	添加材H
20		20	
21		30	
22		10	添加材I
23		20	
24		30	
25	100	0	IHヒーター
26	0	100	添加材 J
27	100	5	
28	100	10	
29	100	15	
30	0	100	添加材 K
31	100	5	
32	100	10	
33	100	15	
34	0	100	添加材 L
35	100	5	
36	100	10	
37	100	15	
38	100	0	間接焼成
39	100	10	添加材M
40	100	15	
41	100	20	
42	0	100	添加材 N
43	100	5	
44	100	10	
45	100	15	

5-3　不溶化材の種類の違いが溶出特性に与える影響

図-5.1 の **a)～n)** に不溶化材添加率とふっ素溶出濃度の関係を示す。

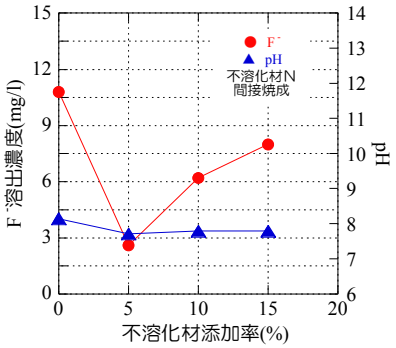


a)　不溶化材 A　　**b)　不溶化材 B**　　**c)　不溶化材 C**

d)　不溶化材 D　　**e)　不溶化材 E+F**　　**f)　不溶化材 G**

g)　不溶化材 H　　**h)　不溶化材 I**　　**i)　不溶化材 J**

j)　不溶化材 K　　**k)　不溶化材 L**　　**l)　不溶化材 M**



m） 不溶化材 M

図-5.1 不溶化材とふっ素溶出濃度の関係

まず、a)～h)の条件に着目して考察する。pH について、不溶化材 E+F、不溶化材 G 以外のものは、添加率に関わらず一定して中性を呈している。次に、不溶化材添加率の増加に伴い、顕著なふっ素溶出濃度の低下を示したものに着目する。図より不溶化材 A においてはふっ素の溶出濃度は、不溶化材添加率 5%以降から添加率の増加に伴い顕著に低下していることがわかる。不溶化材 E+F においては顕著な溶出濃度の低下が見られたが、添加することで pH がアルカリ側に変化していることがわかる。不溶化材 A、E+F においてこのように顕著に溶出濃度が低下した理由は、エトリンガイトの生成により、ふっ素の溶出を抑制させることに起因していると考えられる。既往の研究[33]より、高炉セメント B 種と半水石膏により生成されるエトリンガイトによるふっ素不溶化効果が確認されており、不溶化材 A、E+F においても、エトリンガイトを生成する化合物が含まれており、これらと半水石膏を混合することにより、添加率が増加するにつれてエトリンガイトの生成を促進させたものと考えられる。さらに、他の添加材と比べて、エトリンガイトを生成する化合物が多く含まれていることにも起因していると考えられる。また、不溶化材 G, I においては、添加率の増加に伴い、溶出濃度は低下しているが、不溶化材 G では pH は強アルカリ側に変化していることがわかる。不溶化材 G, I においてこのように顕著に溶出濃度が低下した理由は、両添加材ともに細粒分を多く含む廃棄物を混合した不溶化材のため、細粒分がふっ素を吸着させたことに起因していると考えられる[33]。また、不溶化材 G において pH が強アルカリ性を示したのはアルカリ金属であるカリウム(K)が多く含まれていたためであると推測される。分析結果に多少のばらつきはあるものの、顕著な溶出濃度の低下を示した 4 種の不溶化材は、不溶化材添加率の増加に伴いふっ素の溶出濃度は低下傾向にあることがわかる。しかし、4 種の条件において土壌環境基準値を下回る結果は得られなかった。これは、今回使用した半水石膏単体のふっ素溶出濃度が、通常の半水石膏単体のふっ素溶出濃度の約 2 倍であったため土壌環境基準値を満足できなかったと考えられる。不溶化材 E+F 以外の不溶化材は様々な重金属を含有している廃棄物なので、ふっ素以外の溶出を防ぐ検討を行わなければ実用化は難しいと考えられる。今後、得られた結果をもとに、新たな不溶化材を開発していく予定である。

次に i)～m)の条件に着目する。まず、pH に着目すると、全ての条件において中性を示していることがわかる。さらに、半水石膏の違いで比較しても、大きな変化は見られないことから、pH は焼成方式に影響されないことが判明した。次にふっ素溶出濃度に着目する。新燃岳火山灰を用いた添加材 J の条件では添加率が増加するにつれて低下していることがわかる。これは添加材が多孔質で細粒分が多い試料のため、ふっ素が吸着されたと考えられる[33]。石粉を用いた添加材 K も同様に細粒分が多い試料であったため、溶出濃度は低下すると予測していたが、添加率の増加に伴い溶出濃度が増加する傾向が見られた。次に、発生場所の異なるアルミニウム含有汚泥を用いた添加材 L, M の条件に着目すると、添加率の増加に伴い溶出濃度が漸次低下していることがわかる。これは、半導体工場において、水酸化アルミウムによりフッ化カルシウムを凝集させ、凝集したフッ化カルシウムを沈降分離させる排水処理方法と同様な効果が得られたと考えられる[34]。また、その傾向は間接加熱キルンで焼成した半水石膏において顕著であることがわかる。さらに、IH ヒーターにより加熱焼成させた半水石膏は、初期ふっ素溶出濃度を低減させ搬出することが可能であるという知見が得られた。次に、炭酸カルシウムを用いた添加材 N の条件に着目すると、添加率 5%では溶出濃度は低下するものの、添加率が増加するにつれて溶出濃度が増加していることがわかる。これは次式の化学反応式「$CaCO_3+2HF \rightarrow CaF_2+H_2CO_3$」に示す反応が起き、フッ化物イオンをフッ化カルシウムとして固定させたと考えられる。さらに、フッ化カルシウムは乾燥状態では非常に安定で無害であるが、Ca のイオン化傾向が大きいため、水の存在で溶解してふっ素の溶出濃度が環境基準を超過し、水溶液中にふっ素イオンが溶解したため溶出濃度が増加したと推察できる[33]。

5-4　ふっ素不溶化材の評価

ふっ素不溶化処理済みの再生半水石膏の搬出を目的とし、産業廃棄物や天然鉱物などを不溶化材として用い、溶出試験により実験的検討を行った。その結果、酸化カルシウム(CaO、生石灰)と酸化アルミニウム(Al_2O_3、アルミナ)とが、硫酸カルシウム($CaSO_4$、石膏)と反応して生成されるエトリンガイト($Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}\cdot 26H_2O$)によるふっ素不溶化効果は、不溶化材 A において顕著なふっ素溶出濃度の低下が見られたことから本研究でも既往の研究と同様の不溶化効果が現れたと考えられる。また、本研究では廃棄物を用いたふっ素の不溶化の検討を行っているため、廃棄物自体に含有している重金属などについても検討が必要である。

本検討では全ての条件においてふっ素の土壌環境基準値を満足する値が確認できなかった。今後の検討課題として、基準値を満足するまで不溶化させる新たな不溶化材が必要である。

なお、再生半水石膏自体が中性であり、環境にやさしい固化材であることに着目し、中性のフライアッシュ（不溶化材 A と同様に Ca、Si、Al、Fe 系化合物を含む）を用いてふっ素の不溶化効果の確認試験を行った。試験は 2 種類の再生半水石膏に対して不溶化材（フライアッシュ）の添加率を 0%、10%、20%、30%及び 40%の 5 種類で行った。その結果を表-5.3 に示す。

表-5.3　ふっ素溶出試験結果　　［単位：mg/L］

不溶化材の添加率（%）	再生半水石膏	
	サンプルA	サンプルB
0	3.3	5.0
10	1.0	1.3
20	0.6	1.2
30	0.5	1.0
40	0.3	0.9

この試験に用いた再生半水石膏自体からのふっ素溶出濃度は、サンプル A が 3.3mg/L、サンプル B が 5.0mg/L といずれも土壌環境基準の溶出基準値 0.8mg/L をオーバーしていた。

また、不溶化材のふっ素溶出防止効果は、再生半水石膏のサンプル A の場合は不溶化材の添加率 20%で土壌環境基準の溶出基準値 0.8mg/L に適合した。しかし、サンプル B では不溶化材の添加率 40%でも土壌環境基準の溶出基準値 0.8mg/L を僅かながらオーバーした。

この原因としては、廃石膏ボードの製造年、再生半水石膏の製造方法や製造後の保管状況、ふっ素含有量の違い等、あるいは不溶化材として用いたフライアッシュの化学組成のバラツキなどが考えられる。このことについては、今後もさらに検討が必要である。

第 6 章　再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用マニュアルの検討

6-1　再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用マニュアルの検討

再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用マニュアルを作成するため、第 5 章までに得られた実験結果を基に、再生半水石膏を用いる際の目標強度の設定方法及び地盤材料として用いる場合の環境安全性に関して有効利用法のガイドライン案について述べる。

6-2　再生半水石膏地盤改良土の目標強度の設定

表-6.1 に土木利用に関する用途目的別の要求強度を示す。

表-6.1　利用目的別の要求強度

用途			軟弱地盤 トラフィカビリティー	浅層改良		道路用盛土		河川築堤		堤体用盛土材	堤体用基礎地盤
				埋立地	住宅地	路床	路体	高規格堤防	一般堤防		
用途ごとの要求品質	材料規定	最大粒径	－	－	－	－	－	100mm以下	150mm以下	－	－
		粒度	－	－	－	－	－	粒径37.5mm以上の混入率40%以下	(Fc=15～50%)	高い密度を与える粒度分布であり、適度に細粒分が含まれている	－
		コンシステンシー	－	－	－	－	－	－	－	収縮性が小さく、適度に塑性を有する	－
		比重	－	－	－	－	－	－	－	比重2.6以上	－
		透水度	－	－	－	－	－	－	－	目標：1×10^{-5}cm/s	1×10^{-4}cm/s以下
		要求強度	普通ブルドーザー：qc≥490kN/m^2 ダンプトラック：qc≥1176kN/m^2	トラフィカビリティーの確保 qc≥2000kN/m^2	qu≥300kN/m^2 （養生7日）	規定のCBR値以上	－	qc≥400kN/m^2	－	せん断強さ：cとφ	qc=500kN/m^{2}程度
	施工管理規定	施工含水比	－	－	－	最適含水比とDc≥90%の得られる湿潤側の含水比の範囲	最適含水比とDc≥90%の得られる湿潤側の含水比の範囲	最適含水比より湿潤側で規定の乾燥密度が得られる範囲	最適含水比とDc≥90%の得られる湿潤側の含水比の範囲	－	－
		締固め度	－	－	－	Dc≥90～95%	Dc≥90%	R計器：締固め度平均値≥90% 砂置換法：締固め度最低値Dc≥85%	締固め度平均値≥90% 締固め度品質下限値Dc≥85%	－	－
		空気間隙率または飽和度	－	－	－	－	粘性土Va≤10% Sr≥85% 砂質土Va≤15%	粘性土Va≤2～10% Sr≥85～95%	粘性土Va≤2～10% Sr≥85～95%	－	－
		1層の仕上がり厚さ	－	1m～3m未満	1m～3m未満	30cm以下	30cm以下	30cm以下	30cm以下	－	－

表に示すように、用途別の要求強度のチェックにはその多くがコーン指数により規定されていることがわかる。再生半水石膏を地盤改良材として用いる場合、高含水比の軟弱地盤では、再生半水石膏の凝結硬化作用は対象土の含水比に大きく依存する。また本研究でも明らかなように要求強度を満足するためには、補助固化材としてセメント等を添加することが必要である。

これまでに述べた研究結果より、再生半水石膏のみにより改良された地盤改良土は、高含水比の粘性土では、十分な強度発現を示さないこと、締固めが可能な砂質土では、再泥化が懸念されることが明らかとなった。さらに、環境面においても改良土からのふっ素の溶出や硫化水素ガスが発生することが明らかとなった。しかし、耐水性、強度増加、ふっ素溶出抑制、そして硫化水素ガス抑制効果を期待し、高炉セメント（補助固化材）を添加することで上記に示した再生半水石膏のみによる改良効果を改善できることが明らかとなった。また、高炉セメントを添加した改良土の一軸圧縮強さとコーン指数の関係は、一義的な関係にあることから、実地盤で目標強度を設定する際にも、室内試験により関係性を確認して配合量を決定する必要があることが考えられる。さらに、環境面においても周辺地盤により移動は抑制されると考えられるため安全である。また、硫化水素ガスについても、セメントを添加することにより pH がアルカリ性を示すため安全であるが、適用箇所の環境について把握することが重要である。

上記の結果は室内試験のみによるものであるため、現場施工の際には室内と現場の強度比を考慮して用いる必要がある。以上の目標強度の提案から、次節に再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用フローについて力学、環境安全性の 2 つの視点から提案する。なお、本研究で検討した利用用途は、軟弱地盤改良を想定した浅層混合処理工法と盛土材としての適用である。そのため、提案するフローはこの 2 点への適用を考えている。**図-6.1** に浅層混合処理工法、**図-6.2** に盛土工法の 1 例を示す。

写真-6.1　浅層混合処理工法

写真-6.2　盛土

6-3　再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用フロー

本研究で提案するフローについては、石炭灰混合材料の有効利用ガイドラインに基づいて作製している。各産業廃棄物の委員会では、高炉スラグや石炭灰等の産業廃棄物のリサイクルについては、地盤改良材としての力学的な材料特性とさらに産業廃棄物を用いる際の環境安全性を考慮するため、検査方法等のガイドラインが提案されている[34)]。そこで、本研究で着目してきた再生半水石膏についても同様に、特に環境安全性の検査方法に準拠したフローを提案するべきであると考える。**図-6.1**に石炭灰混合材料の港湾工事利用におけるライフサイクルと微量物質の放出イベントを示す[34)]。再生半水石膏を用いた地盤改良材の「最も配慮すべき暴露環境」は、利用環境そのものとして設定する。

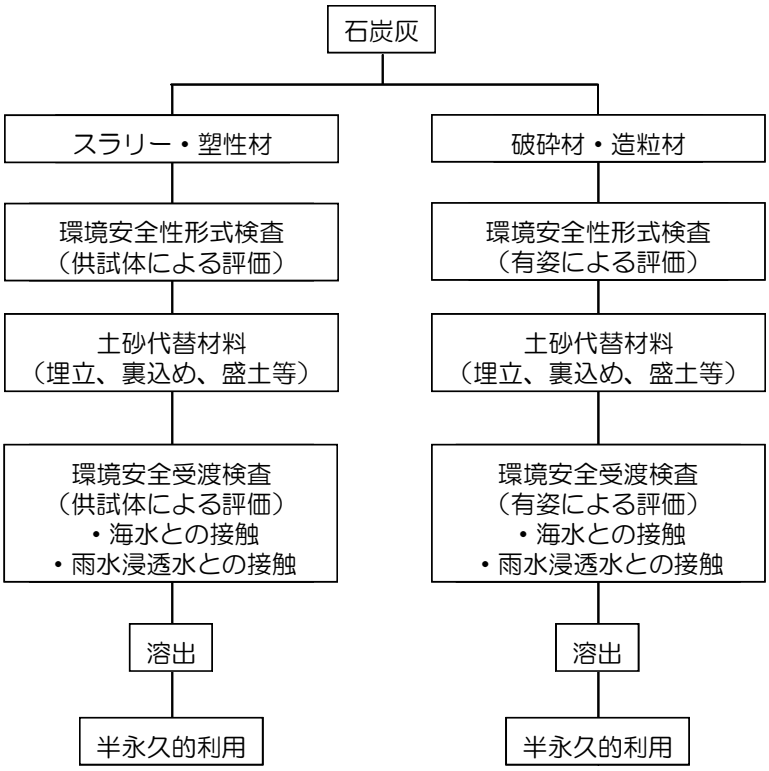


図-6.1　石炭灰混合材料の港湾工事利用におけるライフサイクルと微量物質の放出イベント[34)]

これまでに作製されたガイドラインを参考に再生半水石膏を地盤材料として用いる場合のマニュアル案を提案する。**図-6.2**に本研究で提案する再生半水石膏を用いた地盤改良材の力学試験フローについて示す。また、ここでは主に地盤改良材と盛土材としての利用に着目しフローを作製している。

浅層地盤改良については、再生半水石膏のみによる地盤改良では**表-6.1**に示すような要求強度は満足できないことが第3章より明らかとなっている。そこで、セメント等の補助固化材を添加することを前提条件としている。始めに室内配合試験により一軸圧縮試験及びコーン指数試験を行い、それらの関係性を把握する。次に目標強度を満足するのか、環告46号法試験により、pH・ふっ素溶出濃度を満足しているのか確認し、満足できないものについては、セメント等の補助固化材の添加量を増加させ再度室内試験を行う。その後、硫化水素ガスが発生しにくい施工環境を満足しているのか（※第2章参照、嫌気状態等）検討し、満足できないものについては既存の地盤改良材を用いなければならないと考えられる。

盛土材への適用は、第3章より再生半水石膏のみでも目標強度を満足できることが明らかとなっているため、検討を適用する初期段階では再生半水石膏のみ添加することを前提条件としている。再生半水石膏を混合し締固めた地盤材料は、水の影響により再泥化してしまうため、施工場所が地下水位より浅いのか把握する必要がある。そこで、この条件が満足できないものについては、セメント等の補助固化材を添加し室内配合試験を行う。その後要求強度を満足するのか把握する。また、再生半水石膏の有効利用の課題として、ふっ素の溶出が懸念されているため、地盤改良材として利

用する再生半水石膏単体でのふっ素の溶出濃度の確認を行わなければならない。

図-6.3 に再生半水石膏を用いた地盤改良材の溶出試験フローを示す。溶出濃度を確認した後、セメント等の補助固化材を添加し、溶出濃度を再度確認し利用するべきである。また現場では任意の量に対してコアサンプリングを行い、溶出試験によって環境基準値を満足しているか確認する必要がある。また、試験方法についても浅層改良においては環告 46 号法試験、盛土材の場合はタンクリーチング試験を提案している。

今回提案するフローにしがって、廃石膏ボードから得られる再生半水石膏を地盤改良材料として有効利用することが出来ると、廃石膏ボード処分による最終処分場の逼迫、建設資源の枯渇などの問題が解消されると考えられる。

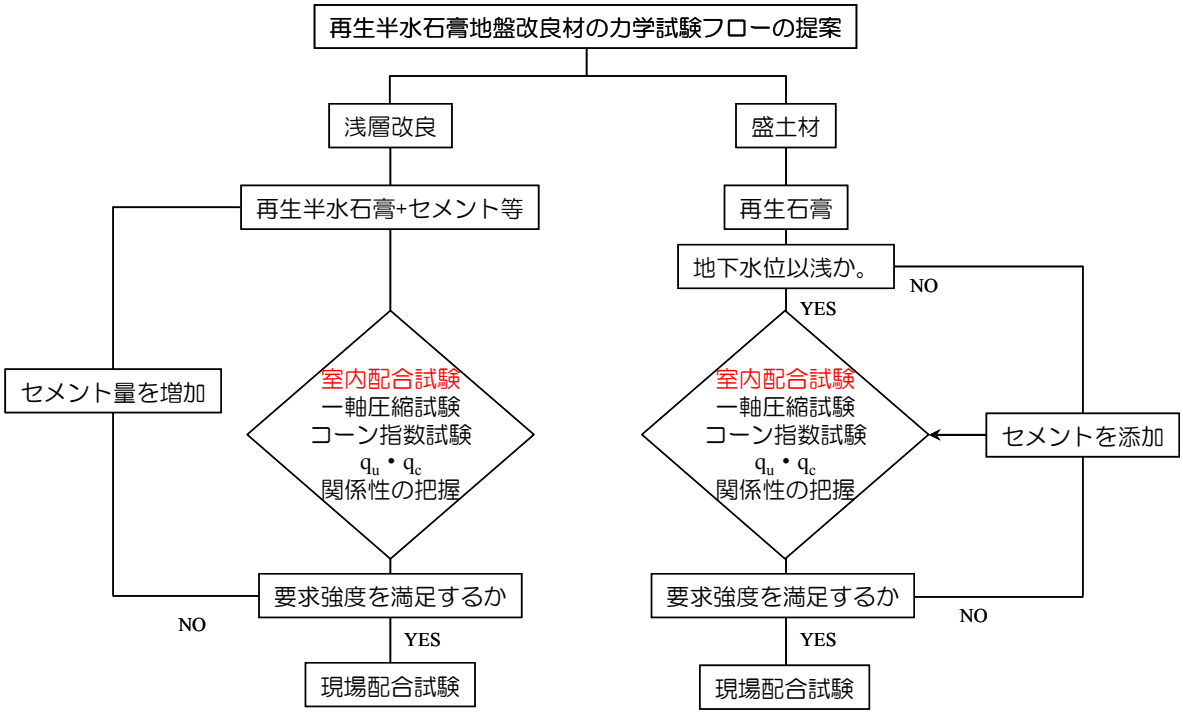


図-6.2　再生半水石膏利用のフロー図（力学特性）

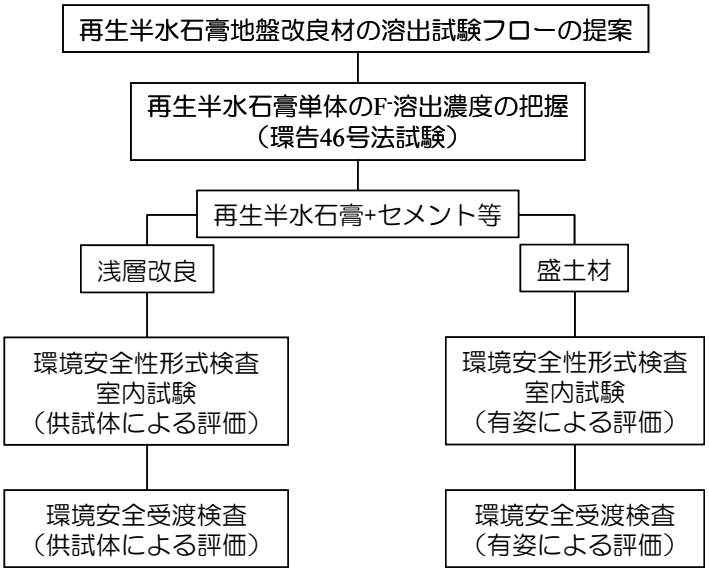


図-6.3　再生半水石膏利用のフロー図（環境安全性）

第 7 章　分別解体工法の提案

7-1　研究の背景

建設リサイクル法が施行され、解体工事では木くず、金属くず、コンクリート塊等は事前に分別され場外へ搬出されている。しかしながら、廃石膏ボードは特定建設資材に指定されていないことから、特に解体系の廃石膏ボードは混合廃棄物として中間処理施設に搬入され、再資源化されずに最終処分される事例が多いと推察されている。

本研究はこのような現状を踏まえて、廃石膏ボードから紙と分離した二水石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)を加熱・脱水して半水石膏($CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$)を製造し、この半水石膏（以下リサイクル石膏という）を地盤改良工事等における固化材として再利用することを目的に平成 21 年度から行っている。

一方、リサイクル石膏を製造する中間処理施設では、搬入された廃石膏ボード中に木くず、金属くず、ビニールクロス等やモルタル等の不純物が付着・混入している事例が多くみられる。これらの不純物が混入したまま中間処理施設に投入すると、破砕・選別工程の機械装置の損傷や摩耗および回収した紙と石膏粉に不純物が混じり、リサイクル品の品質確保に支障をきたす原因となる。

そこで、平成 21 年度は稼働中の中間処理施設を対象に実態調査を実施した。その結果、中間処理施設では 2～3 名の作業員を配置し、作業員が手作業で不純物の分離・選別作業を行っていた。中間処理施設ではこのように選別作業に多くの手間と労力を要していることが確認できた。この実態調査結果から、廃石膏ボード解体工事現場では分別撤去、廃棄物の種類別の選別及び分別搬出の必要性が示唆された。

したがって、平成 22 年度は解体工事現場の実態調査を行った。実態調査は、在来工法での解体工事の実態把握及び分別解体工法の実証試験を実施した。その結果、在来工法及び分別解体工法により搬出された廃石膏ボードの組成は、平成 21 年度に実施した前処理後の組成調査結果と比較してみると、廃石膏ボード単体の占める割合には大差がなかった。また、中間処理施設での前処理（破砕・選別機に投入する前に不純物を除去する）作業で不純物の選別作業に要した延べ作業時間を在来工法及び分別解体工法と比較すると、作業員の削減は図れていないことが示唆された。

このことは、平成 22 年度に実施した実態調査は、在来工法での解体現場でも実態調査に入ると事前に通告していたことや、（社）福岡県建造物解体工業会のメンバー企業を調査対象に選定したこともあり、いずれの現場でも当初予想していた一部ミンチ解体工法は採用されておらず、いずれの解体工事現場でも分別解体（撤去・分別）がなされていたためと考えられる。

このことから、実証試験に採用した分別解体作業を整理して、ここでは分別解体工法の手順を提案する。

7-2　分別解体工法の手順の考え方

図-7.1 はリサイクル石膏を製造する中間処理施設に搬入された解体系廃石膏ボードの組成調査結果である。図のように木くず、金属くず、ビニールクロスやモルタル等の不純物が付着・混入したまま搬入されている。

図-7.2 は中間処理施設での前処理作業後の廃石膏ボードの組成調査結果を示したものである。図から前処理により付着・混入していた不純物が取り除かれ、廃石膏ボード単体が 97%となり、ビニールクロス等が付着したものが 0.9%、その他混入物が 0.8%、モルタル等の付着物が 0.7%、木くずが 0.3%、金属くずが 0.3%となった。これは、新築工事現場から搬入された組成調査結果とほぼ同程度にまで改善されていた（**図-7.3** 参照）。

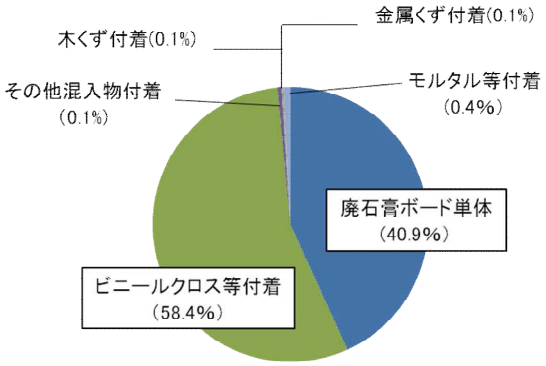


図-7.1　解体系廃石膏ボードの組成調査結果

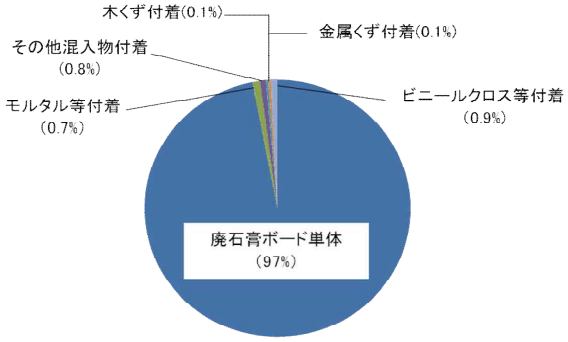


図-7.2　解体系廃石膏ボード前処理後の組成調査結果

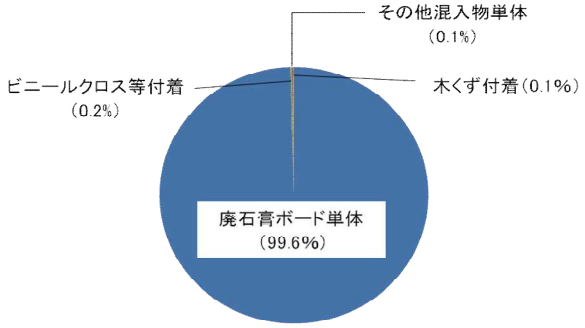


図-7.3　新築系廃石膏ボードの組成調査結果

つぎに、平成 22 年度に分別解体工法を採用した実態調査結果を**図-7.4** に示す。この**図-7.4** は 7 現場の平均であるが、廃石膏ボード単体は 98.5%を占めていた。この図から、中間処理施設において前処理により付着・混入していた不純物を取り除いた後の組成（**図-7.2**）と同程度の割合になっていた。

すなわち、調査対象の解体工事現場では、廃石膏ボードの分別・撤去や現場での選別及び分別搬出が徹底されており、中間処理施設での前処理作業後の廃石膏ボードの組成調査結果と同程度の組成になったと考えられる。このように、解体工事現場では、廃石膏ボードの分別・撤去や現場での選別及び分別搬出の徹底が重要である。

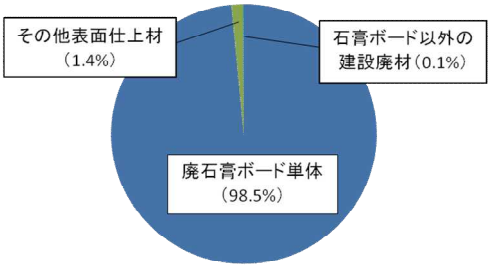


図-7.4　解体現場から搬出された廃石膏ボードの組成調査結果

7-3　分別解体工法の手順の提案

本研究では平成 22 年度に廃石膏ボードが木くずや金属くず等と同様に将来特定建設資材に追加されることを念頭に分別解体工法の実態調査を実施した。この時、現場から搬出される廃石膏ボード単体の混入率は、中間処理施設での前処理作業により付着・混入していた不純物が取り除かれ後の組成（**図-7.2**）を目標値とした。その結果、前述のとおり解体現場から搬出された廃石膏ボードの組成は、廃石膏ボード単体が 98.5%と良好な結果が得られた。

ここでは廃石膏ボードを再資源化することを目的とした分別解体工法の手順―すなわち、解体前の確認・把握調査、解体時の解体・撤去・分別工事、解体後の搬出・処理・処分の各段階について―を**図-7.5** に示す。以下に、各項目を整理して述べる。

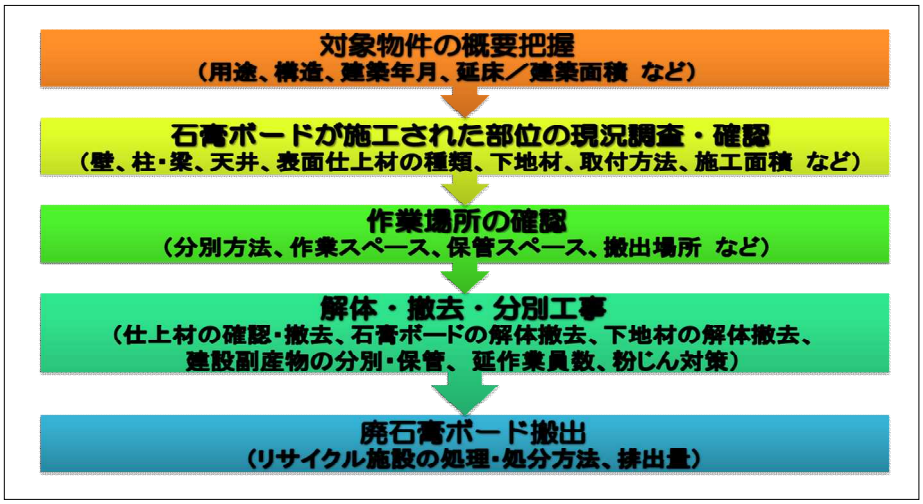


図-7.5　分別解体工法の手順

7-3-1　対象物件の把握

解体工事では、対象物件の事前調査が重要である。調査項目は以下のとおりである。

① 対象物件の名称
② 用途（事務所、教育施設、病院、ホテル、店舗、工場、倉庫、住宅、集合住宅、その他）
③ 設計図書等の有無
④ 構造（S 造、RC 造、SRC 造、木造、その他）
⑤ 築後年数
⑥ 延床面積
⑦ 建築面積

7-3-2　石膏ボードが施工された部位等の現況調査・確認

石膏ボードが施工されている部位、表面仕材や下地材の種類、取付方法、敷設面積等を把握する。

① 施工されている部位（天井、壁、柱型・梁型）
② 表面仕上材（ビニールクロス、紙クロス、布クロス、化粧ボード、その他）
③ 下地材（木製、鋼製、石膏ボード、コンクリート、ALC 板、その他）
④ 取付方法（くぎ止め、ビス止め、クリップ止め、接着剤・ファスナー併用、接着剤・ステープル併用、接着剤のみ、直張用接着剤、自立壁、その他）
⑤ 敷設面積（m^2）

7-3-3　作業場所の確認

廃石膏ボードを他の種類の廃棄物と分別して搬出するために、解体・撤去に必要な作業スペース、選別した廃石膏ボードを搬出するまでに保管しておくスペースおよび現場で分別した建設廃棄物を中間処理施設に搬出するまで種類別に集積・保管しておく搬出場所を事前に確認しておく必要がある。

7-3-4　解体・撤去・分別工事

解体工事は次の手順で行う。また、作業時の留意点を下記に示す。

①　表面仕上材（クロス類）の撤去と種類別分別・保管

②　石膏ボードの分別解体・撤去・保管

③　下地材、取付金具等の解体・撤去・種類別分別・保管

④　粉じんの飛散防止のため湿潤化や散水を行う場合は、水濡れ防止シート掛けを行う。

⑤　搬出場所は、石膏ボードにコンクリート塊や他の産業廃棄物が混合しないように分別して集積する。

⑥　石膏ボードを濡らさないように、屋内で保管するかシート掛け等を行う。

7-3-5　廃石膏ボードの搬出

分別・保管された廃石膏ボードは、種類別・搬送先　（中間処理施設）ごとに積載する。小量だからといって混載しないように、例えば写真のようにフレコンバッグ等に袋詰めして搬出する。

7-4　まとめ

提案した分別解体工法の手順は、平成 22 年度に実施した実証試験において作業員への教育、訓練を行うことにより精度良く解体現場で廃棄物の種類別分別並びに中間処理施設への積み込み・搬出が可能であることが確認できた。

今後は、今回の調査に協力いただいた（社）福岡県建造物解体工業会のメンバー企業に引き続き提案した手順を試行していただき、そのデーターに基づき作業性、経済性の両面から見直しを含めてさらに検討したいと考えている。

第 8 章　結論

本論文は今後建築物の耐用年数の関係から高度経済成長期に建設で使用された石膏ボードが大量に排出されるため、廃石膏粉を焼成して得られる再生半水石膏の凝結硬化作用を利用し、大量に消費できる土木分野での地盤改良材としての適用性の評価を実験的検討により明らかにしたものである。

以下に本研究で得られた結果を示し、本研究で提案する再生半水石膏を用いた地盤改良材の適用性の評価を行う。

1）再生半水石膏を用いた地盤改良固化特性

⑴ 土質材料の影響

まさ土及び脱水ケーキ等の砂質土に、再生半水石膏を添加して締固めた固化処理土は、一般盛土材としての目標強度である q_u=100kN/m^2 を満足した。しかし、高含水比軟弱地盤を想定した博多粘土は、泥土と判断される q_u=50kN/m^2 以下の強度を示した。以上より、再生半水石膏のみを地盤改良材として高含水比粘性土に用いる場合、強度発現が含水比に依存することが明らかとなった。さらに、土質材料の違いによって再生半水石膏による凝結硬化作用が異なることから、施工前の段階で土の性状を把握し、配合量を室内試験によって決定する必要がある事が示唆される。

⑵ 初期含水比の影響

博多粘土を用いた初期含水比が固化特性に及ぼす影響を検討した結果、初期含水比の増加に伴い、再生半水石膏を用いた改良土の一軸圧縮強さは低下することが明らかとなった。また、w=100(%)において再生半水石膏の凝結硬化作用が働いたのは再生半水石膏添加量 B=150(kg/m^3)の場合のみであり、再生半水石膏の凝結硬化作用は、対象土の設定含水比に大きく依存しており、再生半水石膏の凝結硬化作用に対する限界の含水比が存在することが示された。

⑶ 補助固化材添加量及び補助固化材の種類の違いの影響

軟弱な粘土に対し、再生半水石膏のみを用いた改良では、土構造物における要求強度が得られないことから、補助固化材として高炉セメント B 種及び生石灰を用いて検討した。その結果、補助固化材を用いた改良土の補助固化材添加量と一軸圧縮強さの相関性は良く、目標強度である養生 7 日において 300kN/m^2 を満足する補助固化材の最低添加量を近似式を用いて推測することができることが明らかとなった。また、再生半水石膏添加量が増加するに伴って要求強度を満足する補助固化材最低添加量が減少することが明らかとなった。さらに、補助固化材の種類の違いによる影響では、セメントと石灰では補助固化材添加量の違いによって強度発現が異なることから、要求強度に応じての適切な補助固化材の配合が必要であることが明らかとなった。そのため、実地盤に適用する際には、要求強度を把握した上での配合が必要であると示唆される。

⑷ 補助固化材を用いた地盤改良土の養生日数の違いによる影響

再生半水石膏を用いた地盤改良土の長期的な強度発現については、既往の研究においても行われていないため検討した。その結果、再生半水石膏に補助固化材を一定量添加した改良土は、養生日数の経過に伴い一軸圧縮強さは増加する傾向を示すことが明らかとなった。また、6 ヶ月に及ぶ長期養生後も安定した強度発現があることから、再生半水石膏を添加した改良土は、補助固化材を添加することで長期的にも安定した改良土になることが明らかとなった。

⑸ 固化材及び補助固化材添加量の違いがコーン指数に及ぼす影響

一般的に現場ではコーン指数によって要求強度を算定することが多いため、コーン試験により検討した。その結果、補助固化材として生石灰と高炉セメント B 種を用いた場合、一軸圧縮強さから得られるコーン指数算定式の値が大きく異なることが明らかとなった。また、補助固化材の種類によってコーン指数の値は異なることが判明したため、補助固化材の種類を考慮した上でコーン指数による強度の算定が必要であると考えられる。

⑹ 発生現場及び破砕方法の異なる再生半水石膏が力学特性に及ぼす影響

発生現場の異なる新築系と解体系石膏では、最大圧縮応力に差が生じることが明らかとなった。また、破砕方法の異なる再生半水石膏では、ミルによって粒径が細かくなった再生半水石膏は、土質試料との付着面積が大きくなり強度が発現することが予想されたが、焼成直後とミル直後の条件は、同程度の強度発現を示した。今後 X 線回折などによりメカニズムを解明する必要がある。

(7) 再生半水石膏地盤改良土の耐久性

乾湿繰返し作用を受けることによって体積または質量の収縮・膨張を繰り返す傾向が見られた。しかし体積変化率については、長期的には体積変化はあまり変動せず一定値に収束していくことが予想される。また、再生半水石膏添加量が多い条件のものが固結力の増加により、膨張に対する引張抵抗力が生じたため膨張比は低い傾向を示す。以上より、実施工では、適用箇所の環境面などを考慮した上で適用しなければならないことが示唆される。

(8) 再生半水石膏地盤改良土の膨張性

今回検討した再生半水石膏 280kg/m^3 及び高炉セメント B 種 50kg/m^3 を混合した固化処理土は、路床として良好な状態で用いることができ、膨張しひび割れが生じる可能性は低いことが明らかとなった。

(9) 再生半水石膏地盤改良土の再泥化

脱水ケーキ単体では、水浸直後に再泥化が開始し、水浸 10 分後には完全に再泥化する。再生半水石膏のみ添加した材料では、脱水ケーキは水浸直後に角が崩れ、水浸 1 日後までには再泥化するが、博多粘土は再泥化は起こらない。再泥化には土質試料の透水係数が大きく寄与しており、再生半水石膏と高炉セメント B 種により改良された材料では、周囲にひび割れが見られるものもあったが、水浸 7 日後でも完全な再泥化は見られなかった。

2) 再生半水石膏を地盤改良材として用いた際の環境安全性

(1) ふっ素溶出挙動の把握

地盤改良材として再生半水石膏を実地盤に適用した際のふっ素溶出挙動を把握するために、乾湿繰返し試験で得られた浸漬水を用いて検討した。その結果、供試体表面から微量のふっ素が溶出し続けることが明らかとなった。しかし、溶出濃度は 0.2mg/l 程度と低濃度であり、土壌環境基準値を満足している。また、実地盤では周辺地盤へふっ素が吸着されることが予想されるため、環境への影響は低いと考えられる。以上より、実施工では、適用する環境を考慮しなければならないことが示唆される。

(2) 固化材（再生半水石膏）及び補助固化材（高炉セメント B 種）添加量が再生半水石膏地盤改良土からのふっ素溶出特性に及ぼす影響

再生半水石膏により改良された地盤改良土のふっ素の溶出を抑制するため、高炉セメント B 種を添加し、抑制効果を確認した。その結果、ふっ素溶出濃度はセメント添加量が増加するにつれて低下することが明らかとなった。加えて、ふっ素溶出抑制効果に必要な最低セメント添加量が存在するため、溶出を抑制する補助固化材の最低添加量の把握が必要であることも明らかとなった。

(3) 補助固化材の種類の違い（高炉セメント B 種、生石灰）がふっ素溶出特性に及ぼす影響

再生半水石膏により改良された地盤改良土からのふっ素の溶出を抑制する補助固化材が、種類の違いによって不溶化効果が異なるのか検討した。その結果、pH は、高炉セメント B 種を添加した条件の場合、生石灰と比べて低い値を示すこと、ふっ素溶出濃度は、再生半水石膏添加量 200kg/m^3 の条件においても、補助固化材として高炉セメント B 種あるいは生石灰を 50kg/m^3 添加することにより、土壌環境基準値を満足することが明らかとなった。以上のことから、環境安全性の面では、生石灰及び高炉セメント B 種どちらにおいても、ふっ素溶出を抑制する補助固化材として期待できることが示された。

(4) 養生日数の影響

再生半水石膏により改良された地盤改良土からのふっ素の溶出を抑制する補助固化材が、長期養生後もふっ素抑制効果が現れるのか確認した。その結果、再生半水石膏による改良土の pH は、補助固化材を添加することにより長期養生後も強アルカリ性を示すことが明らかとなった。また、ふっ素溶出濃度は、値にばらつきがあるものの、養生日数が経過するにつれて溶出濃度が低下、もしくは一定の数値で上下することが明らかとなった。よって、再生半水石膏を用いた改良土は、補助固化材を添加することにより、長期養生後も環境に優しい材料となることが示唆される。

(5) 再生半水石膏の種類の影響

再生半水石膏により改良された地盤改良土は、再生半水石膏の種類の違いによりふっ素の溶出特性に影響を及ぼすのか検討した。その結果、発生場所の異なる廃石膏によってふっ素溶出特性は異なり、石膏の種類や破砕方法の違いによってふっ素溶出特性は変化することが明らかとなった。このことから、リサイクルを促進していく上で今後データの蓄

積を行う必要があることが示唆される。

⑹ 土質材料の影響

再生半水石膏により改良された地盤改良土は、土質材料の違いによってふっ素溶出特性が異なるのか検討した。その結果、まさ土と脱水ケーキに再生半水石膏を添加した材料では、養生日数の経過に伴いふっ素溶出濃度は低下するが、それ以外の土質材料では、養生日数に関係なくふっ素溶出濃度はほぼ一定値を示すことが明らかとなった。さらに、ふっ素溶出濃度は、土質材料の種類によって異なり、細粒分含有率が高い土質材料ほどふっ素溶出濃度が低下する傾向にあることが示された。

⑺ 実地盤に適用した際のふっ素溶出特性の検討

再生半水石膏により改良された地盤改良材を実地盤に適用した際のふっ素溶出特性を把握するため、カラム試験により溶出挙動を確認した。その結果、浅層改良工法へ再生半水石膏を用いた際の地盤改良土から溶出されるふっ素は、周辺地盤においてその移動を抑制できることが明らかとなった。また、実地盤への適用を想定した場合、改良土表面からはふっ素の溶出や、pH の低下が予想されるが、透水性が低いため、移流による改良土内部のアルカリ分や重金属等は溶出しにくいことが考えられる。今後、拡散による溶出について評価していく事も重要であることが示唆される。

⑻ 再生半水石膏地盤改良土の硫化水素発生特性

再生半水石膏により改良された地盤改良土は、条件が揃うと硫化水素ガスが発生する危険性がある。そこで、乾湿繰返し試験により供試体の pH を低下させ、比較的ガスが発生しやすい条件下で硫化水素ガス発生試験を行った。その結果、セメントを添加し、改良土を弱アルカリ性に設定することで硫酸塩還元菌の動きが鈍くなり、硫化水素ガスの発生量が少なくなることが明らかとなった。さらに、博多粘土は微粒子であり、比表面積が大きいため、硫化水素が吸着されやすいことから、再生半水石膏の有効利用に寄与できる土質材料であると考えられることも示唆される。

3）ふっ素不溶化材の開発への取り組み

産業廃棄物を使用した不溶化材によるふっ素不溶化効果は見られたものの、全ての条件においてふっ素の土壌環境基準値である 0.8mg/l 以下を下回る溶出濃度の結果は得られなかった。今後今回の結果を参考に不溶化材を用いて検討していく。

4）再生半水石膏を用いた地盤改良材の利用マニュアルの検討

今回再生半水石膏を地盤改良材料として用いる場合のフローチャートを提案した。このフローに従って室内及び現場において地盤改良固化特性と環境安全性を管理することが出来れば、利用目的に応じて再生半水石膏を有効かつ安全に利用することが出来る。また、この手法に用いて廃石膏ボードから得られる再生半水石膏を地盤改良材料として有効利用することが出来ると、廃石膏ボード処分による最終処分場の逼迫、建設資源の枯渇などの問題が解消されると考えられる。

5）分別解体工法の提案

提案した分別解体工法の手順は、現場における作業員への教育、訓練を行うことにより精度良く解体現場で廃棄物の種類別分別並びに中間処理施設への積み込み・搬出が可能であることが確認できた。

今後は、解体業者に提案した手順を試行していただき、そのデータに基づき作業性、経済性の両面から見直しを含めてさらに検討する予定である。

最後に、以上の研究結果を踏まえ今後の課題を示す。

①堤体用盛土材としての適用を想定した強度定数の把握

再生半水石膏を用いた地盤改良材を堤体用盛土材に適用する際、円弧すべり面法により安定計算を行い、いくつかの円についての計算から最小安全率を求める。その際、すべり面上の土の粘着力 c と内部摩擦角 φ の強度定数が必要となる。また、堤防の長期安定性や、浸透流解析によって浸潤線が上昇して地下水の影響を受ける場合は、有効応力法の解析が用いられる。そのため、再生半水石膏により改良された土質材料の強度定数を把握するために、圧密非排水せん断試験を行う必要がある。

②添加方式の検討

本研究では全て粉体で土質材料と混合させて検討を行った。今後利用箇所を拡大させて有効利用を促進させていくためにも、柱状固化処理を想定した、スラリー混合による検討が必要となる。

③再生半水石膏の種類によるデータの蓄積

発生場所の異なる廃石膏によって溶出特性が異なるため、今後データの蓄積を行うことが一つの指標となると考えられるため検討する必要がある。

④拡散溶出試験の検討

再生半水石膏を用いた地盤改良材は、実地盤への適用を想定した場合、改良土表面からはふっ素の溶出や、pH の低下が予想されるが、透水性が低いため、移流による改良土内部のアルカリ分や重金属等は溶出しにくいことが考えられる。そのため、拡散係数を算出し、溶出挙動を把握する必要がある。

参考文献および参考資料

1)　廃石膏ボードの対策について,社団法人石膏ボード工業会,（2010 年）

2)　石膏ボード業界の概況, 社団法人石膏ボード工業会,（2012 年）

3）http://www.ceramic.or.jp/museum/contents/pdf/2008_02_02.pdf#search='石膏ボード 製造工程'

4）環境省ホームページ

5）廃石膏ボードの分別解体手法の研究, 押方利郎

6）平成 21 年年度廃石膏ボードの再資源化促進方策検討業務調査報告書,平成 22 年 3 月,環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部

7）柴田靖：排煙脱硫石膏を主材とした中性土質改良材による軟弱土の改良実験, 土木学会第 57 回年次学術講演会（2002 年）

8）武藤優：半水石膏を利用した流動性処理土の検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会,（2010 年）

9）吉田友則：再生石膏中性固化材の地盤改良材としての適用性評価, 土木学会第 64 回年次学術講演会（2009 年）

10）鈴木良太：再生石膏中性固化材の地盤改良材としての適用性評価, 第 43 回地盤工学研究発表会,（2008 年）

11）亀井健史：半水石膏の地盤改良材としての有効利用－廃石膏ボードの再利用－,地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, 245-252

12）亀井健史：廃石膏ボードから再生した半水石膏を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮強さ,地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, 237-244

13）亀井健史：半水石膏を利用したセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす養生期間の影響－廃石膏ボードの有効利用－, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, 99-105

14）亀井健史：高炉セメント B 種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, 91-98

15）今山真治：港湾浚渫土の粒状固化における石膏系固化材の適用性について, 土木学会第 64 回年次学術講演会,（2009 年）

16）森宏介：中性固化材を用いた軟弱改良に関する実験（改良土の強度, pH）, 第 40 回地盤工学研究発表会（2005 年）

17）松浦慎一：石膏系中性域改良材による旧堤体土への遮水材への再利用に向けた室内配合試験, 第 40 回地盤工学研究発表会,（2005 年）

18）角一平：廃石膏・浄水汚泥混合による石灰安定処理土の強度発現特性, 第 44 回地盤工学研究発表会,（2009 年）

19）小林学：石こうを用いた弱アルカリ性固化材に関する基礎的研究, 土木学会第 57 回年次講演会,（2002 年）

20）小寺秀則：石こう系固化材による軟弱土の改良に関する実験的研究（その 2）－改良土の諸性状－, 土木学会第 58 回年次学術講演会,（2003 年）

21）小寺秀則：石こう系固化処理土の適用性に関する実験的研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会, （2002 年）

22）石原慎太郎：石こう系固化材による土質改良の配合設計に関する実験的研究（その 2）, 第 40 回地盤工学研究発表会, （2005 年）

23）武下俊宏：リサイクル石膏を混合した土木資材の硫化水素発生に関する研究, 第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, （2010 年）

24）遠藤和人：廃石膏・石灰系地盤改良における硫化水素ガス発生ポテンシャル試験に関する考察,第 9 回地盤改良シンポジウム論文集, pp181-184; （2010 年）

25）地盤工学会,土質試験の方法と解説－第一回改正版－,「安定処理土の締固めをしない供試体作製」, PP.308-316, （2000 年）

26）ASTM D-4843(Wetting and Drying Test of Soil Wastes)

27）森治夫：繊維質処理土の乾湿繰返し試験による耐久性に関する実験的研究, 資源と素材 Vol.121 p.37-43(2005 年)

28）Xu, Qiyong, Townsend, T., and Reinhart, D.(2010): Attenuaction of hydrogen sulfide at construction and demolition debris landfills using alternative cover materials, Waste Management, Vol.30, No.4, pp.660-666.

29）C&C エンサイクロペディア「セメント・コンクリート化学の基礎解説」, PP.34, 2004.3

30）肴倉ら: 廃石膏ボード 20 試料の微量元素組成と溶出特性の類型化, 第 9 回環境地盤工学シンポジウム,（ 2011 年）

31）廃棄物資源循環学会標準試験(草案)　JWS-020X　(2006-11-30 DRAFT)

32）伊藤恵輔: 平成 21 年度　福岡大学工学研究科修士論文　廃石膏ボードから得られる再生半水石膏による地盤改良材の開発と基礎的研究

33）石原達夫: 石灰を利用したフッ素含有排水の処理技術, 平成 15 年度石灰工業技術大会, （2003 年）

34)港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン, 財団法人　石炭エネルギーセンター, 平成 23 年 3 月, (2011 年)

平成 21 年度発表論文リスト

査読付論文

1. 伊藤恵輔，佐藤研一，押方利郎，大山勝久：廃石膏ボードから得られる半水石膏の地盤改良材への適用性の検討，地盤工学会，第 8 回環境地盤工学シンポジウム論文集，pp. 99-102，2009，7 月．

学会発表論文

2. 伊藤恵輔，佐藤研一，押方利郎：半水石膏による高含水比発生土の地盤改良材効果，第 44 回地盤工学研究発表会，pp. 99-102，2009，2009 年 8 月

3. 伊藤恵輔，佐藤研一，押方利郎：半水石膏による高含水比発生土の地盤改良効果の検討，土木学会平成 21 年度全国大会第 64 回年次学術講演会，pp. 919-920，2010 年 9 月

4. 佐藤研一，伊藤恵輔，押方利郎：半水石膏により改良された土質材料の力学及び溶出特性，第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 189-190，2009 年 9 月

5. 伊藤恵輔，松崎数馬，佐藤研一，押方利郎，大山勝寿，坂本晃一，森田博史：再生半水石膏を用いた地盤改良材の環境安全性の検討，平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会，pp. 329-330，2010 年 3 月

6. 松崎数馬，佐藤研一，押方利朗，大山勝寿，坂本晃一，森田博史：再生半水石膏より改良された土質材料の力学特性，平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会，pp. 451-452，2010 年 3 月

7. 武下俊宏，三浦　麻，押方利朗，樋口壮太郎：リサイクル石膏を用いた土木資材の硫化水素発生試験方法の検討と安全評価，第 31 回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集，pp. 104-106，2010 年 1 月

1. 伊藤恵輔，佐藤研一，押方利郎，大山勝久

廃石膏ボードから得られる半水石膏の地盤改良材への適用性の検討

地盤工学会，第 8 回環境地盤工学シンポジウム，pp. 99-102，2009 年 7 月

廃石膏ボードから得られる半水石膏の地盤改良材への適用性の検討

○伊藤恵輔[1]・佐藤研一[2]・押方利郎[3]・大山勝久[4]
[1]福岡大学大学院・[2]福岡大学工学部・[3]福岡大学大牟田産学連携推進室・[4]ふくおか石膏ボードリサイクル研究会

1. はじめに 石膏ボードは、耐火性、遮音性、機密性、断熱性等の特徴を有しており、経済的にも低廉なことから住宅から超高層ビルまで建築物の種類に限定されない建築材料として幅広く利用されている[1)]。そのため、建築現場からは、新築及び解体時に大量の廃石膏ボードが発生している。しかし、廃石膏ボードの処理処分状況は、一部リサイクルされているものの、大部分は管理型の産業廃棄物最終処分場に処分され、2013 年には廃石膏ボードの年間総排出量は約 200 万トンと言われている[1)]。このような背景から、廃石膏ボードのリサイクル・有効利用が実施されはじめてきている。廃石膏ボードから分離した石膏(二水石膏)を焼成して得られる再生半水石膏は亀井ら[2)3)]の研究によって、締固め材料や地盤改良材として十分に適用できる可能性がある程度明らかになっている。そこで本研究では、廃石膏ボードのリサイクルを推進するため、廃石膏ボードから分離した石膏(二水石膏)を焼成して得られる再生半水石膏を建築用資材(中性固化材)として有効に利用する技術システムの確立を目指し、研究開発を行っている。本報告では、高含水比かつ粘性分の多い建設発生土に対して、固化材として半水石膏を混合させ①早期固化挙動の把握、②高含水比地盤材料への適用性、③溶出特性及びセメント固化材との比較等の実験的な検討結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 実験に用いた試料 実験には、土質材料として、福岡県前原市と熊本県あさぎり町の建設発生土の 2 種類を使用した。また、固化材として、間接焼成方式(焼成温度約 300℃)と IH 式石膏半水化装置(焼成温度約 125～160℃) で焼成されたそれぞれ焼成方法の異なる 2 種類の半水石膏 (以下、石膏 A、石膏 B と呼ぶ) 、セメント固化材として、高炉セメント B 種を使用した。**図-1** に土質材料の粒径加積曲線を、**表-1** に試料の物理特性値を示す。両発生土ともに細粒分が 8 割程度と多く、シルト、粘土分で構成されていることが分かる。特に、前原発生土はシルト、粘土分を多く含んでおり、コーン指数 984.5kN/m^2 と第 3 種建設発生土である。一方、あさぎり発生土は、コーン値を求めることができない泥土であり、火山灰質粘性土で強熱減量が 25.7%と高有機質である。

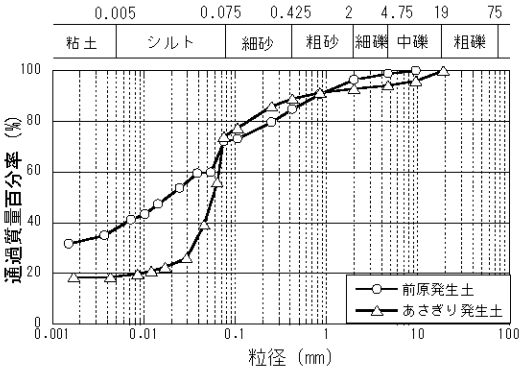


図-1 試料の粒径加積曲線

表-1 土質材料及び石膏の物理特性値

	前原建設発生土	あさぎり建設発生土	石膏A	石膏B	高炉B種
土粒子の密度(g/cm^3)	2.7205	2.3695	2.835	2.951	3.05
初期含水比(%)	34.89	76.9	–	–	–
細粒分含有率Fc(%)	72.17	74.06	1.061	0.740	–
最大粒径(mm)	4.75	9.5	4.75	4.75	–
均等係数Uc	–	–	3.333	3.150	–
曲率係数Uc'	–	–	1.24	1.09	–
塑性指数Ip	38.54	N.P	–	–	–
強熱減量(%)	7.7	25.7	–	–	–
コーン指数(kN/m^2)	984.53	–	–	–	–

表-2 コーン指数試験配合条件

土質材料	固化材		含水比(%)
	種類	添加率(%)	
前原発生土	石膏A	10 15 20	40 60
	石膏B		

表-3 一軸圧縮試験配合条件

土質材料	固化材		含水比(%)
	種類	添加率(%)	
前原発生土	石膏A	10 15 20	40
	石膏B		
	高炉B種		
あさぎり発生土	石膏A		80
	石膏B		
	高炉B種		

2-2 実験条件 **表-2** にコーン指数試験、**表-3** に一軸圧縮試験の供試体作成条件を示す。力学的な検討では所定の条件で作成された供試体を用いて、コーン指数試験、一軸圧縮試験を行った。試料の配合は、土質材料を所定の含水比に調整し、その後、固化材を添加した。ここで固化材添加率は、土質材料に対する重量比であり、添加率と含水比は経済性と施工性を考慮し決定したものである。コーン指数試験の供試体作成方法は材料混合後、w=40%については、モールドに 25 回・3 層にわけてランマーで突き固め、w=60%については、締固めが不可能であったためモールドに流し込み、直径 10cm、高さ 12.5cm の供試体を作製した。一軸圧縮試験の供試体作成方法は、直径 5cm、高さ 10cm のモールドに 1 層あたり 5 回の同一エネルギーにての締固め法 {E_c=50(k J/m^3)} で突き固め、計 4 層にて行った。所定の養生期間(0, 7, 28 日)にて気中養生を行った後、一軸圧縮試験を行った。一方、溶出特性に

Application of bassanite produced from waste plasterboard as soil improvement materials
Keisuke Ito[1], Kenichi Sato[2], Toshiro Osikata[3],Ooyama Katsuhisa[4]([1]Graduate School, Fukuoka University, Fukuoka, Japan, [2]Department of Civil Engineering , Fukuoka University,[3]Omuta Office of Fukuoka University Academic, Industrial and Governemtal Liaiosn Center, [4]Fukuoka Plasterboard Recycling Workshop)
KEY WORDS: Waste plasterboard, Soil improvement materials, Bassanite, Cone index

ついては、力学試験と同一試料を用いて環境庁告示 46 号法試験、pH 測定からの検討を行った。

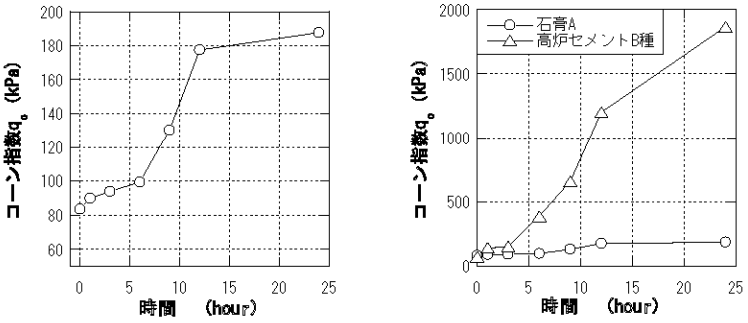
表-4　実験条件

土質材料	固化材	固化材添加率(%)	含水比(%)	養生日数(時間)
前原建設発生土	石膏A	10	60	0 1 3 6 9 12 24
	高炉セメントB種			

3. 力学特性の把握

3-1 早期固化挙動の把握　高含水比発生土における半水石膏による早期固化の挙動を把握するため、**表-4** に示す実験条件でコーン指数試験を行った。ここで、養生時間を 0、1、3、6、9、12、24 時間とした。さらに、固化材の比較として、高炉セメントＢ種も用いた。

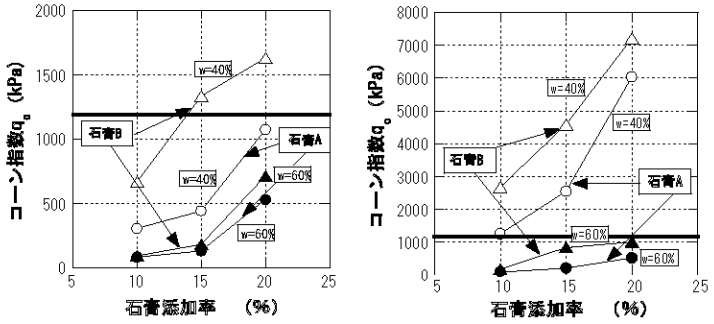
図-2 に時間の経過に伴うコーン指数の変化を示す。石膏Ａは、時間の経過に伴いコーン指数が増加しており、特に 6～１２ 時間にかけて顕著な強度増加が見られる。しかし、その後、石膏混合材料の強度増加は見られず、ほぼ一定強度になっている。また、高炉セメントＢ種の結果を比較すると、0～3 時間は同程度の強度であったが、6 時間以降は高炉セメントＢ種の強度発現が大きいことがわかる。



(a) 石膏Ａによる初期固化挙動　(b)コーン指数に及ぼす固化材の影響

図-2　時間の経過に伴うコーン指数の変化

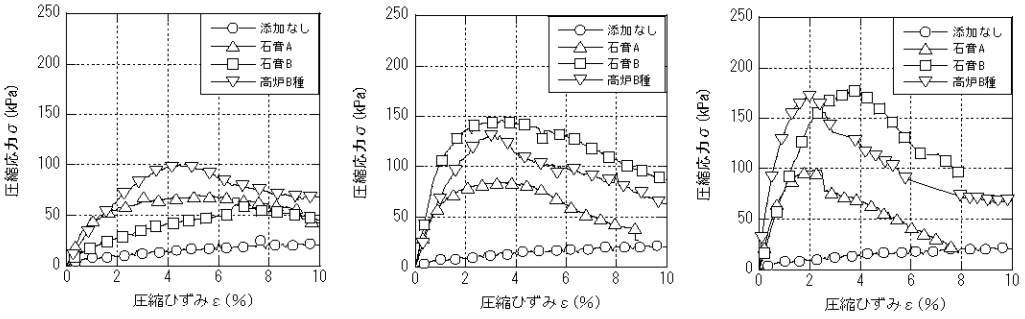
3-2 コーン指数に及ぼす固化材添加率の影響　**図-3** にコーン指数と固化材添加率の関係を示す。図中の黒線は様々な重機の走行に必要なトラフィカビリティーを保つための地盤強度[4] (q_c＝1200kPa 以上)を示す。図より、石膏添加率の増加に伴い、石膏の種類及び含水比の違いにかかわらず、コーン指数が増加していることがわかる。さらに、0 日養生においては、石膏 B の石膏添加率 15、20%、含水比 w=40%の改良土ではトラフィカビリティーを十分に満たしている。また、7 日養生では、両石膏ともに含水比 w=40%においてトラフィカビリティー強度を上回り、十分な強度発現が見られる。一方、含水比 w=60%の改良土では強度発現が見られなかったことから、含水比が高くなると半水石膏の固結効果が期待できないと考えられる。このように半水石膏による改良は、土質材料の含水比が低く、締固めが可能な含水比状態であれば、養生を伴うことで強度発現を期待できる固化材であることが示された。



(a) 0 日養生　(b)7 日養生

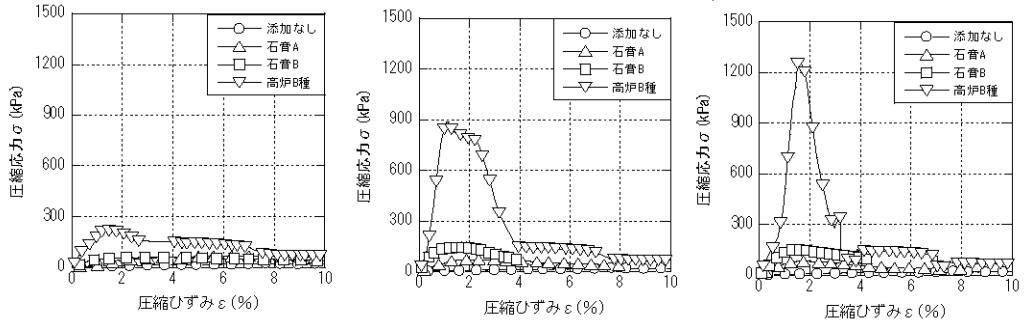
図-3　コーン指数と添加率の関係

3-3 一軸圧縮試験特性　**図-4、図-5** に前原発生土、**図-6、図-7** にあさぎり発生土の養生 0、7 日の一軸圧縮試験結果を示す。養生日数 0 日の場合は、「前原」は供試体作成直後にも関わらず、半水石膏及びセメント固化材の添加率の増加に伴って、一軸圧縮強さ及び供試体の剛性が増加していることがわかる。特に固化材添加率 20%では石膏 B においてセメントと同等の強度を有している。これは、



(a)固化材添加率 10%　(b)固化材添加率 15%　(c)固化材添加率 20%

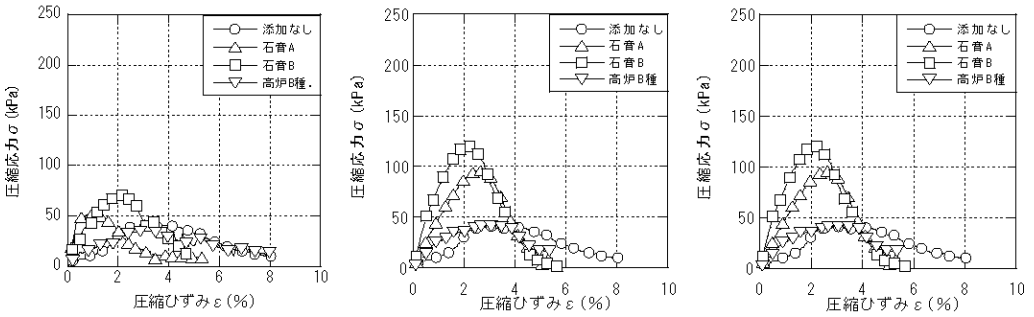
図-4　一軸圧縮試試験結果(前原、0 日養生)



(a)固化材添加率 10%　(b)固化材添加率 15%　(c)固化材添加率 20%

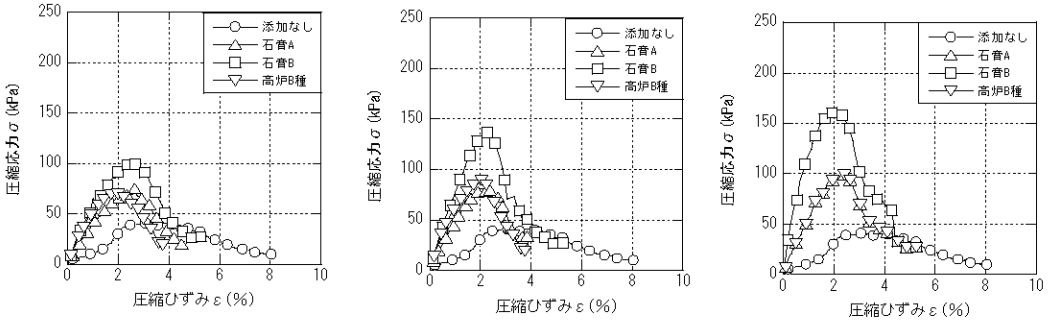
図-5　一軸圧縮試試験結果(前原、7 日養生)

初期含水比 w=40％の土質材料に乾燥した石膏添加に伴う吸水性及び締固めに伴う強度発現が要因と考えられる。一方、高有機質土である「あさぎり」は、「前原」と比較すると強度発現が小さい。しかしながら、「前原」において強度発現の大きかった高炉セメントにはほとんど効果が見られなかった。半水石膏は固化材の添加率の増加に伴って一軸圧縮強さ及び供試体の剛性が増加していることから、半水石膏は高有機質土においても有効であることがわかる。養生日数 7 日の結果を見ると、「前原」においては、半水石膏とセメントの強度発現の違いが明確に現れていることがわかる。一方、「あさぎり」においては石膏 A とセメントは同程度の強度を有しているが、石膏 B に関しては、大きな強度発現が見られ、高有機質土である発生土に有効であることが明らかになった。



(a)固化材添加率 10%　(b)固化材添加率 15%　(c)固化材添加率 20%

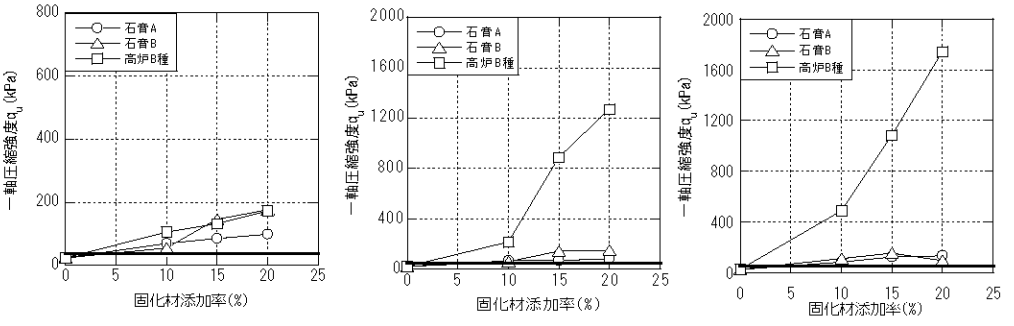
図-6　一軸圧縮試試験結果（あさぎり、0 日養生）



(a)固化材添加率 10%　(b)固化材添加率 15%　(c)固化材添加率 20%

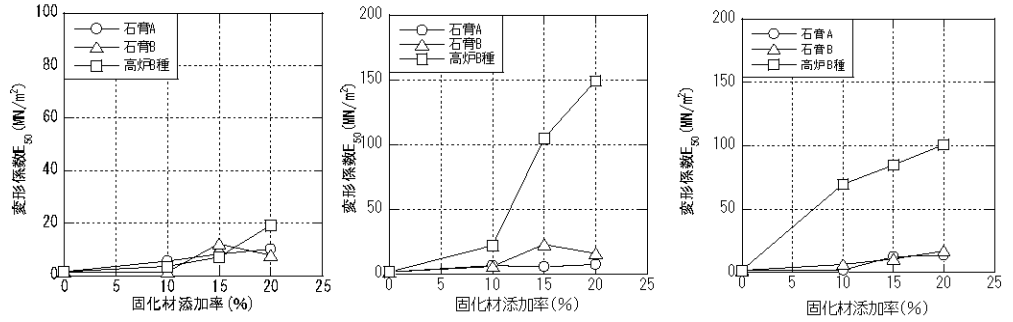
図-7　一軸圧縮試試験結果（あさぎり、7 日養生）

3-4 一軸圧縮強度及び変形係数に及ぼす固化材添加率の影響　図-8、図-9 に前原発生土、図-10、図-11 にあさぎり発生土の一軸圧縮強度及び変形係数 E_{50} と固化材添加率の関係を示す。図中の黒線は発生土をトラックにて運搬する際に必要な一軸圧縮強さを示す。「前原」の結果から、高含水比土の発生直後に石膏を添加することにより、セメントと同程度の強度改善ができることを示しており、石膏 B では要求強度の３倍の強度を発揮していることがわかる。さらに、変形係数の結果からもセメントと同程度の剛性の強さを発揮していることがわかる。しかしながら、養生に伴う強度増加、剛性の強さについては、セメントほど大きな増加は見込めないこともわかる。一方、「あさぎり」の結果を見ると、添加率の伴う強度と剛性増加は石膏に比べ、セメントは小さく、養生日数が経過してもその傾向は変わらないことがわかる。これは、半水石膏に多く含有するカルシウム分が、有機物を多く含む「あさぎり」発生土を質的に改良したことが理由として考えら



(a)0 日養生　(b)7 日養生　(c)28 日養生

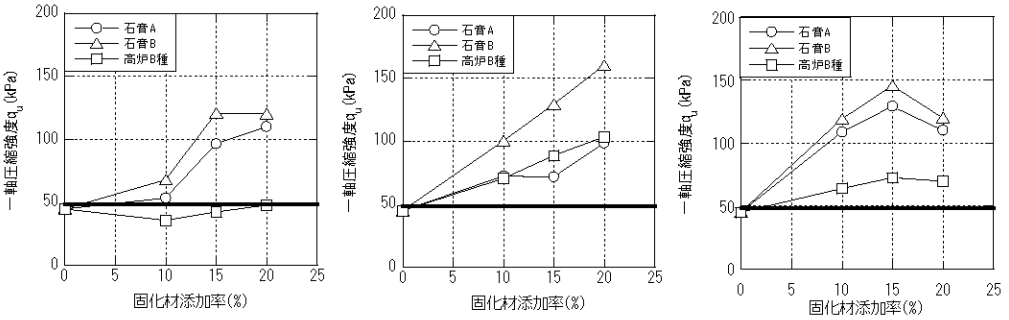
図-8　一軸圧縮強度と固化材添加率の関係（前原）



(a)0 日養生　(b)7 日養生　(c)28 日養生

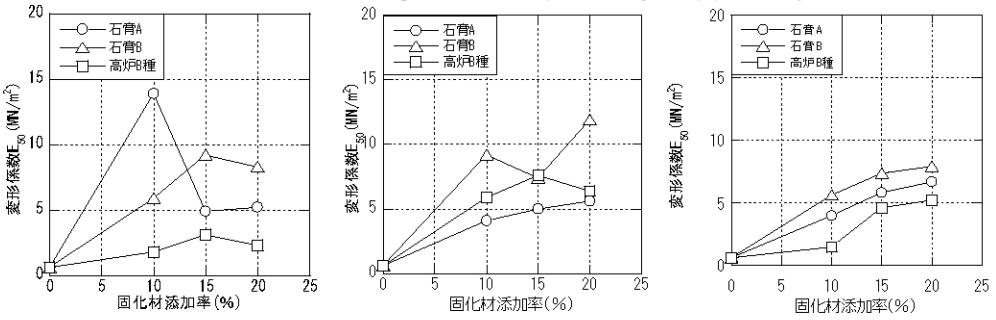
図-9　変形係数と固化材添加率の関係（前原）

れる。また、28 日養生、石膏添加率 20%において石膏による改良土の強度は低下している。一般に、石膏は添加率が 15～20%で強度がピークに達すると言われている。今回の検討においても、混合率の限界値付近における改良土の強度にバラツキが見られる。今後、適正な石膏混合率について検討する必要があると言える。



(a)0 日養生　(b)7 日養生　(c)28 日養生

図-10　一軸圧縮強さと固化材添加率の関係(あさぎり)



(a)0 日養生　(b)7 日養生　(c)28 日養生

図-11　変形係数と固化材添加率の関係(あさぎり)

4-1 溶出試験結果　**表-6** に 7 日養生後の改良土の溶出試験結果を示す。表より、両発生土及び半水基準値を超える重金属の溶出は見られなかった。さらに、材料混合後も基準値を超える重金属の溶出は見られなかった。

表-6　溶出試験結果(7 日養生)

土質材料	固化材 種類	固化材 添加率	pH	B	Cr^{6+}	Cd	Pb
前原	石膏A	10	7.18	0.098	N.D	N.D	N.D
	石膏B		7.03	0.069	N.D	0.001	0.004
	高炉B種		11.46	0.074	-	N.D	N.D
	石膏A	20	7.2	0.105	N.D	N.D	N.D
	石膏B		7.07	0.048	N.D	0.001	0.002
	高炉B種		11.69	0.062	-	N.D	N.D
あさぎり	石膏A	10	5.74	0.044	N.D	0.002	0.007
	石膏B		5.84	0.144	N.D	0.002	0.004
	高炉B種		9.31	0.024	-	N.D	0.027
	石膏A	20	5.86	0.104	N.D	0.001	0.005
	石膏B		6.06	0.084	N.D	0.002	0.004
	高炉B種		9.72	0.030	-	N.D	0.009
環境基準値			-	1.00	0.05	0.01	0.01

mg/l)

4-2 pHに及ぼす固化材添加率の影響　**図-12** に pH と固化材添加率の関係を示す。図中の色枠は一律排水基準値 [5](pH=5.8～8.3)を示している。図より、半水石膏を用いた改良土は、固化材添加率が増加しても pH は中性域を示し、一律排水基準値を十分満たしていることがわかる。一方、高炉セメントB種による改良土は固化材添加率の増加に伴い pH が急激に増加しており、アルカリ性域を示している。よって半水石膏は、周辺地盤環境に与える影響は小さいことがわかる。

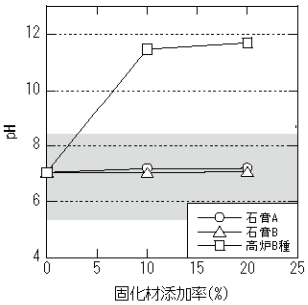


図-12　pH と固化材添加率の関係

5. 結論　今回の実験より以下のことがわかった。

1. 半水石膏は、発生直後の高含水比発生土及び高有機発生土に対して、効果的な改良効果が期待できる。

2.固化材添加後 0 日養生において、半水石膏を用いた改良土は高炉セメント B 種と同程度の改良効果が得られる。

3. 養生に伴う改良土の強度、剛性の強さは、養生に伴う変化が少なく、石膏添加直後に決定されることが示された。

4.半水石膏を用いた改良土は、中性域を示し、周辺地盤環境に与える影響の小さい固化材である。

謝辞：本研究の実施にあたっては、「ふくおか石膏ボードリサイクル研究会」の坂本晃一氏、森田博史氏、平山祐二氏に多大なご協力をいただいた。記して謝意を表する。

【参考文献】

1)(社)石膏ボード工業会；工業会統計 http://www.gypsumboard-a.or.jp/toukei.shtml　2)亀井健史：地盤改良材としての半水石膏使用の可能性 - 廃石膏ボードのリサイクリング - 島根大学総合理工学部紀要．シリーズ A, Vol.41 ,pp.1-15. 2007.12. 3)亀井健史：廃石膏ボードの地盤改良材への再利用．INDUST，Vol.23, No.10, pp.22-25, 2008.10.　4)日本道路協会：道路土工-施工指針、p.47、1986.　5)環境省 HP；水環境関係 http://www.env.go.jp/water/mizu.html

2. 伊藤恵輔，佐藤研一，押方利郎

半水石膏による高含水比発生土の地盤改良材効果

第44 回地盤工学研究発表会，pp. 99-102，2009 年8 月

半水石膏による高含水比発生土の地盤改良材効果

廃石膏ボード　地盤改良材　コーン指数

福岡大学大学院　学生会員　○伊藤恵輔
福岡大学　国際会員　佐藤研一
福岡大学大牟田産学連携推進室　非会員　押方利郎

1. はじめに　石膏ボードは、耐火性、遮音性、機密性、断熱性等の特徴を有しており、経済的にも低廉なことから住宅から超高層ビルまで建築物の種類に限定されない建築材料として幅広く利用されている [1]。そのため、建築現場からは、新築及び解体時に大量の廃石膏ボードが発生している。しかし、廃石膏ボードの処理処分状況は、一部リサイクルされているものの、大部分は管理型の産業廃棄物最終処分場に処分され、2013 年には廃石膏ボードの年間総排出量は約 200 万トンと言われている [1]。このような背景から、廃石膏ボードのリサイクル・有効利用が実施されはじめてきている。廃石膏ボードから分離した石膏(二水石膏)を焼成して得られる再生半水石膏は亀井ら [2)3)] の研究によって、締固め材料や地盤改良材として十分に適用できる可能性がある程度明らかになっている。そこで本研究では、廃石膏ボードのリサイクルを推進するため、廃石膏ボードから分離した石膏(二水石膏)を焼成して得られる再生半水石膏を建築用資材(中性固化材)等として有効に利用する技術システムの確立を目指し、研究開発を行っている。本報告では、高含水比かつ粘性分の多い建設発生土に対して、固化材として半水石膏を混合させ①固化のメカニズムの検討、②固化材添加率の影響、③養生日数の経過に伴う材料の強度発現に関する実験的な検討結果について報告する。

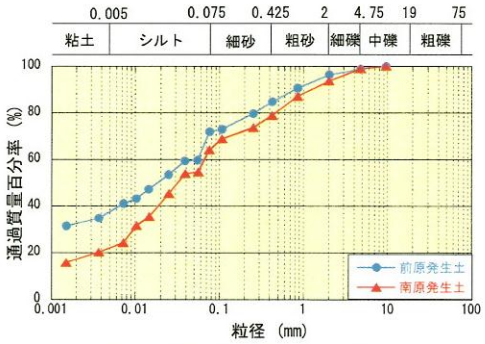


図-1　試料の粒径加積曲線

2. 実験概要

2-1 実験に用いた試料　実験には、土質材料として、福岡県前原市と南九州自動車道南原トンネル工事現場の建設発生土の 2 種類を使用した。また、中性固化材として、焼成方法の異なる 2 種類の半水石膏（以下、石膏A、石膏B と呼ぶ）を使用した。**図-1** に土質材料の粒径加積曲線を、**表-1** に試料の物理特性値を、**表-2** に石膏の溶出特性を示す。両発生土ともに細粒分が 7 割程度と多く、シルト、粘土分で構成されていることが分かる。特に、前原発生土は粘土分を多く含んでおり、コーン指数が 984.5kN/m² の第 3 種建設発生土である。一方、南原発生土は、コーン指数が 349.2kN/m² と低く第 4 種建設発生土に分類される。また、両石膏は細粒分含有率が低くいことがわかる。また、両石膏を比較すると、最大粒径は同じであるが、石膏 B の方が密度が大きいこともわかる。両石膏の溶出特性については、ともに土壌環境基準値以上の重金属の溶出は見られなかった。また、両石膏とも pH は 7 程度と中性を示していることがわかる。一般的な森林土壌の pH は 6.0 前後である [4]ことから、周辺地盤に与える影響は少なく環境的にも良いと考えられる。

表-1　土質材料及び石膏の物理特性値

	前原	南原	石膏A	石膏B
土粒子の密度(g/cm³)	2.721	2.665	2.835	2.951
初期含水比(%)	34.89	31.80	–	–
細粒分含有率Fc(%)	72.17	64.3	1.061	0.740
最大粒径(mm)	4.75	4.75	4.75	4.75
均等係数Uc	–	–	3.333	3.150
曲率係数Uc'	–	–	1.24	1.09
塑性指数Ip	38.54	17.50	–	–
強熱減量(%)	7.7	7.3	–	–
コーン指数(kN/m²)	984.53	349.2	–	–

表-2　石膏の溶出特性

	pH	Cr^{6+}	Zn	Cd	Pb
石膏A	7.48	0.008	0.069	0.003	0.004
石膏B	7.20	0.003	0.016	N.D	0.004
環境基準値	–	0.05	0.01	0.01	0.01

単位：mg/l

2-2 実験条件　**表-3** にコーン指数試験の供試体作成条件及び材料混合後の湿潤密度 ρ_t と pH を示す。力学的な検討では所定の条件で作成された供試体を用いて、コーン指数試験を行った。試料の配合は、土質材料を所定の含水比に調整し、その後、固化材を添加した。ここで固化材添加率は、土質材料に対する重量比であり、添加率と含水比は経済性と施工性を考慮し決定したものである。コーン指数試験の供試体作成方法は材料混合後、w=40%については、モールドに 25 回・3 層にわけてランマーで突き固め、w=60%については、締固めが不可能であったためモールドに直接流し込み、直径 10cm、高さ 12.5cm の供試体を作製した。特に前原については w=60% において供試体密度が小さいことがわかる。所定の養生期間

表-3　コーン指数試験供試体作成条件及び材料混合後の ρ_t と pH

固化材	添加率 (%)	含水比 (%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm³)		pH	
			前原	南原	前原	南原
石膏A	10	40	1.769	1.805	7.18	7.17
	15		1.798	1.780	–	–
	20		1.806	1.751	7.20	7.19
	10	60	1.621	1.838	–	–
	15		1.642	1.865	–	–
	20		1.594	1.841	–	–
石膏B	10	40	1.867	1.729	7.03	7.07
	15		1.884	1.719	–	–
	20		1.873	1.716	7.07	7.10
	10	60	1.691	1.700	–	–
	15		1.680	1.701	–	–
	20		1.665	1.727	–	–

Effect of soil improvement of surplus soil with high water content using bassanaite

ITO, Keisuke Graduate School, Fukuoka University
SATO, Kenichi Fukuoka University
OSHIKATA Toshiro Omuta Office of Fukuoka University Academic, Industrial and Governmental Liaiosn Center

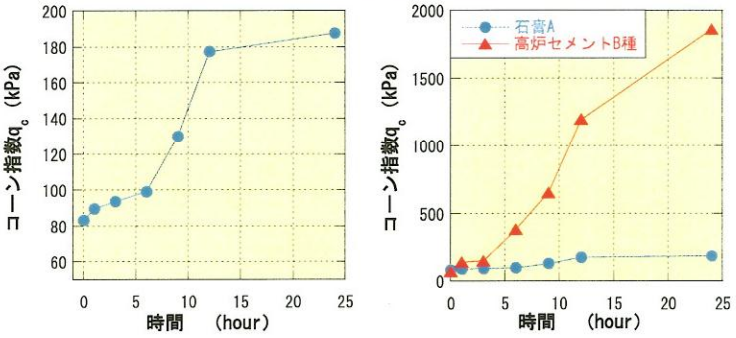
(0, 7日)にて気中養生を行った後、コーン指数試験を行った。また、表より材料混合後のpHについては、両発生土ともに中性を示していることがわかる。

表-4 実験条件

土質材料	固化材	固化材添加率(%)	含水比(%)	養生日数(時間)
前原	石膏A	10	60	0 1 3 6 9 12 24
	高炉セメントB種			

3. 力学特性の把握

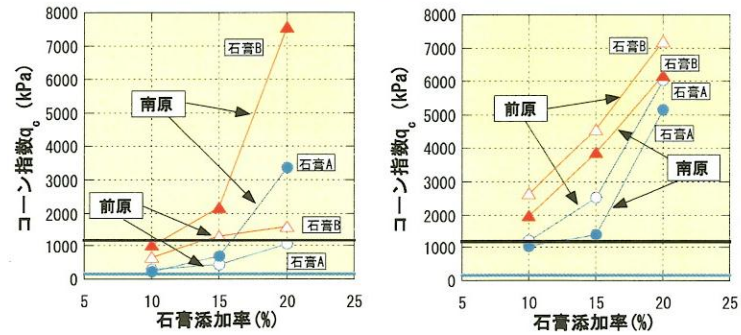
3-1 早期固化のメカニズムの検討 高含水比発生土における半水石膏による早期固化のメカニズムを把握するため、**表-4**に示す実験条件でコーン指数試験を行った。ここで、養生時間を0、1、3、6、9、12、24時間とした。さらに、固化材の比較として、高炉セメントB種も用いた。**図-2(a), (b)**に時間の経過に伴うコーン指数の変化を示す。石膏Aは、時間の経過に伴いコーン指数が増加しており、特に6～12時間にかけて顕著な強度増加が見られる。しかし、その後、石膏混合材料の顕著な強度増加は見られず、ほぼ一定強度になっている。また、高炉セメントB種の結果と比較すると、0～3時間は同程度の強度を示しているが、6時間以降は高炉セメントB種の強度発現が大きいことがわかる。このように半水石膏は、早急な強度発現が必要な現場において有効であることがわかる。



(a) 石膏Aによる初期固化挙動 (b) コーン指数に及ぼす固化材の影響

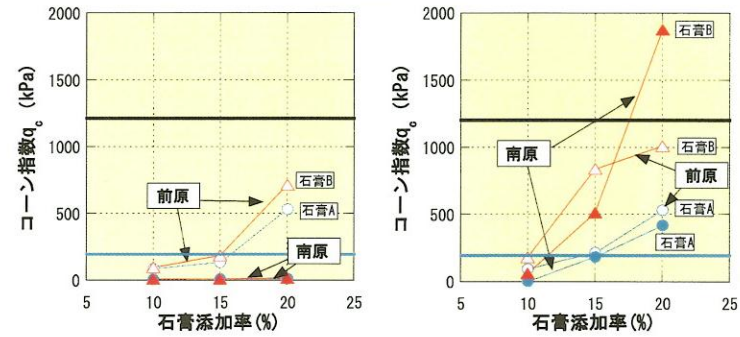
図-2 時間の経過に伴うコーン指数の変化

3-2 コーン指数に及ぼす固化材添加率の影響 **図-3、図-4**に改良土のコーン指数と固化材添加率の関係を含水比別に示す。図中の黒線は、様々な重機の走行に必要なトラフィカビリティーを保つための地盤強度[5] (q_c=1200kPa以上)を示し、青線は、標準ダンプトラックで運搬が可能で人が歩ける地盤強度[6] (q_c=200kPa以上)を示す。図より、いずれの含水比においても、養生日数の増加に伴って強度増加が見られ、w=40%では、養生7日、石膏添加率10%以上において、どちらの発生土もトラフィカビリティーを確保できる強度発現が見られる。この強度発現は、供試体作成時において行った締固め効果も影響していると言える。一方、締固めが行えなかったw=60%では、7日養生においても1200kPaを超えるまでの強度発現をさせることは難しいことがわかる。しかし、0日では、第3種建設発生土の前原において添加率15%以上で、7日では、両発生土ともに添加率15%以上でq_c=200kPaを越え、トラック運搬に必要な強度発現が得られている。今回の実験において、石膏は高含水比発生土の強度発現には有効的であるが、発生土の含水比が大きく影響することが示された。したがって、高含水比発生土については、他の固化材等の併用も合わせて今後検討する必要があると思われる。さらに、第4種建設発生土のような低質な発生土においても第3種発生土と同様に十分な強度発現が見られたことから、石膏固化材は、低質な発生土に対しても効果的であり、焼成方法の違いが強度発現に影響を及ぼすことから、このことについても今後の検討課題である。



(a) 0日養生 (b) 7日養生

図-3 コーン指数と添加率の関係(含水比w=40%)



(a)0日養生 (b)7日養生

図-4 コーン指数と添加率の関係(含水比w=60%)

4. 結論

今回の実験により以下のことがわかった。

①半水石膏は6～12時間にかけて顕著な強度増加が見られる。②半水石膏は、発生直後の高含水比発生土に対して、効果的な改良効果が得られるが、発生土の含水比に大きく影響する。③半水石膏は、第4種建設発生土のような低品質な発生土に対しても石膏の添加量と養生によって改良することができる。

参考文献 1)(社)石膏ボード工業会；工業会統計 http://www.gypsumboard-a.or.jp/toukei.shtml 2) 亀井健史：地盤改良材としての半水石膏使用の可能性-廃石膏ボードのリサイクリング-島根大学総合理工学部紀要. シリーズA, Vol.41,pp.1-15.2007.12.. 3)亀井健史：廃石膏ボードの地盤改良材への再利用. INDUSY,Vol.23,No10,pp.22-25,2008.10. 4) 土壌の化学的性質：http:www2u.biglobe.ne.jp/~gn/31/3112a.htm 5) 日本道路協会：道路土工-施工指針、p.47、1986. 6)建設汚泥処理土利用技術基準;；http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/01/010612/04.pdf#search='コーン指数 基準 運搬"

3. 伊藤恵輔，佐藤研一，押方利郎

半水石膏による高含水比発生土の地盤改良効果の検討

土木学会平成 21 年度全国大会第 64 回年次学術講演会，pp. 919-920，2010 年 9 月

半水石膏による高含水比発生土の地盤改良効果の検討

福岡大学大学院　学生会員　○伊藤　恵輔
福岡大学工学部　正会員　佐藤　研一
福岡大学大牟田産学連携推進室　非会員　押方　利郎

1. はじめに　廃石膏ボードは、安定型処分場から、管理型処分場への移行や、住宅・社会資本の更新に伴う建設副産物排出量の逼迫により、廃石膏ボードの処理費用は今後莫大なものになると考えられる。そのため、建築現場から排出される廃石膏ボードのリサイクル・再利用技術の開発が急務である。そこで著者ら[1),2)]は、廃石膏ボードから分離した石膏を焼成して得られる再生半水石膏の地盤の地盤材料への適用について検討を進めてきた。その結果、比較的含水比の高い地盤材料において混合早期の改良効果があることを示してきた。本報告では、高含水比かつ高有機質建設発生土に対して、固化材として半水石膏を混合させ、一軸圧縮試験、pH 測定試験を行った結果について報告する。

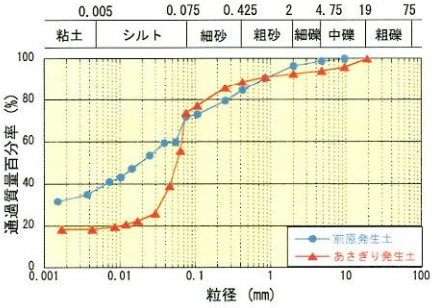


図-1　試料の粒径加積曲線

2. 実験概要

2-1 実験に用いた試料　実験には、土質材料として、福岡県前原市と熊本県あさぎり町の建設発生土の 2 種類を使用した。また、中性固化材として、焼成方法の異なる 2 種類の半水石膏 (以下、石膏 A、石膏 B と呼ぶ) 、また比較するため、セメント固化材として、高炉セメント B 種を使用した。**図-1** に土質材料の粒径加積曲線を、**表-1** に試料の物理特性値を示す。両発生土ともに細粒分が 8 割程度と多く、シルト、粘土分で構成されていることが分かる。特に、前原発生土はシルト、粘土分を多く含んでおり、コーン指数 984.5kN/m^2 と第 3 種建設発生土である。一方、あさぎり発生土は、コーン値を求めることができない泥土であり、火山灰質粘性土で強熱減量が 25.7%と高有機質である。

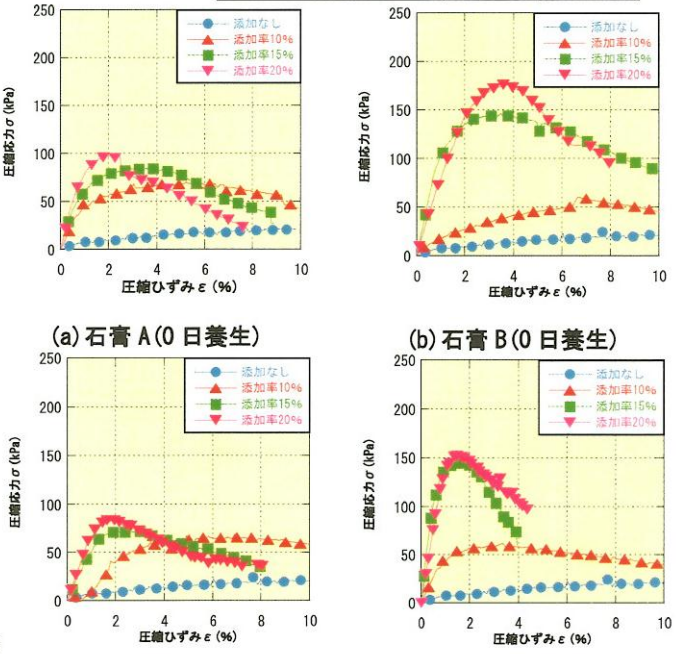
表-1　土質材料及び石膏の物理特性値

	前原	あさぎり	石膏A	石膏B	高炉B種
土粒子の密度(g/cm^3)	2.721	2.370	2.835	2.951	3.050
初期含水比(%)	34.89	76.9	-	-	-
細粒分含有率Fc(%)	72.17	74.06	1.061	0.740	-
最大粒径(mm)	4.75	9.5	4.75	4.75	-
均等係数Uc	-	-	3.333	3.150	-
曲率係数Uc'	-	-	1.24	1.09	-
塑性指数Ip	38.54	N.P	-	-	-
強熱減量(%)	7.7	25.7	-	-	-
コーン指数(kN/m^2)	984.53	-	-	-	-

表-2　一軸圧縮試験供試体作成条件

土質材料	固化材 種類	固化材 添加率(%)	含水比(%)
前原	石膏A	10	40
	石膏B		
	高炉B種	15	
あさぎり	石膏A		80
	石膏B	20	
	高炉B種		

2-2 実験条件　**表-2** に一軸圧縮試験の供試体作成条件を示す。力学的な検討では所定の条件で作成された供試体を用いて、一軸圧縮試験を行った。試料の配合は、土質材料を所定の含水比に調整し、その後、固化材を添加した。ここで固化材添加率は、土質材料に対する重量比であり、添加率と含水比は経済性と施工性を考慮し決定したものである。所定の養生期間(0，7，28 日)にて気中養生を行った後、せん断試験を行った。一軸圧縮試験の供試体作成方法は、直径 5cm、高さ 10cm のモールドに 1 層あたり 5 回の同一エネルギーにての締固め法 {E_c=50(k J/m^3)}で突き固め、計 4 層にて行った。一方、環境影響評価については、力学試験と同一試料を用いて、pH 測定試験からの検討を行った。



(a) 石膏 A(0 日養生)　(b) 石膏 B(0 日養生)

(c) 石膏 A(28 日養生)　(d) 石膏 B(28 日養生)

図-2　応力ひずみ曲線(前原)

3. 実験結果及び考察

3-1 一軸圧縮試験結果　**図-2** に前原発生土、**図-3** にあさぎり発生土の 0、28 日養生の一軸圧縮せん断試験結果を示す。「前原」は供試体作直後にもかかわらず、また半水石膏

キーワード　廃石膏ボード，半水石膏，地盤改良材，一軸圧縮試験
連絡先　〒814-0180　福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1　福岡大学工学部　道路・土質研究室　TEL092-871-6631

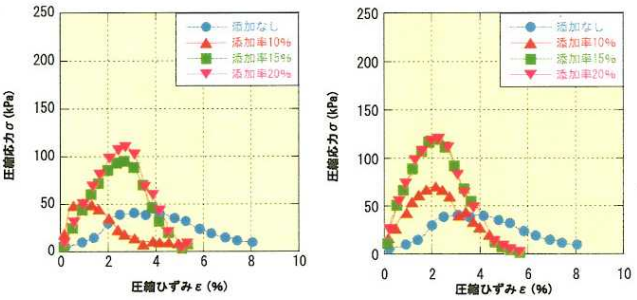
固化材の種類にもよらず添加率の増加に伴って改良効果が見られる。また、養生日数の経過に伴って、一軸圧縮強さ及び供試体の剛性が増加していることがわかる。特に石膏 B の方が改良効果が大きいことがわかる。一方、高有機質土である「あさぎり」は、「前原」と比較すると養生に伴う強度発現が小さい。しかしながら、半水石膏の固化材添加率の増加に伴って一軸圧縮強さ及び供試体の剛性が増加していることから、半水石膏は高有機質土においても有効であることがわかる。また、石膏の違いについても、「前原」同様石膏 B の方が若干であるが養生に伴う改良効果が大きいこともわかる。

固化材添加に伴う強度増加の割合をより定量的に明らかにするために、**図-4** に前原発生土、**図-5** にあさぎり発生土における q_u/q_i(q_i：添加なしの一軸圧縮強度)と固化材添加率の関係を示す。ここで、図中の黒線は、未改良土の場合の強度を示す。「前原」の結果から、28 日間程度の養生期間においては、両石膏ともに、固化材を混入しない場合と比較して2～6倍程度改良効果が見られる。また、改良直後では、高炉セメント B 種と同程度の強度を有していることがわかる。しかしながら、養生に伴う強度増加に関しては、セメントほど大きな増加は見込めないことがわかる。一方、高有機質土である「あさぎり」では、「前原」と比較すると、0.7～3 倍程度と改良効果が小さいことがわかる。しかしながら、「前原」で改良効果の大きかった高炉セメント B 種では、1～2 倍程度とほとんど効果は見られなかった。一方、両半水石膏に関しては、養生日数の増加に伴い、3 倍程度とセメント以上の強度改善が見られることがわかる。このことから、半水石膏は高含水比かつ高有機質土に対して有効であり、地盤改良効果が期待できることがわかる。また、石膏添加率の増加に伴い、強度が低下していることがわかる。今後、「あさぎり」は適切な石膏配合量を検討していく必要があることを示唆している。

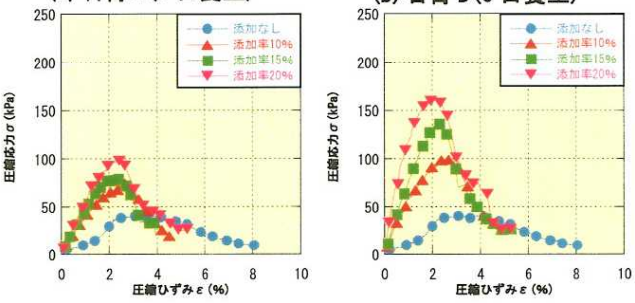
3-2 pH 測定試験結果　**図-6** に pH と固化材添加率の関係を示す。半水石膏を用いた改良土は、固化材添加率が増加しても pH は中性を示していることがわかる。また、その状態は養生日数の経過に伴って変化しないこともわかる。一方、高炉セメント B 種による改良土は、固化材添加率の増加に伴い pH が急激に増加しており、アルカリ性領域を示している。このことから、半水石膏は高炉セメント B 種より土壌環境に優しい固化材であることがわかる。

4. 結論　今回の実験により以下のことがわかった。

1.半水石膏は、発生直後の高含水比発生土及び高有機発生土に対して、効果的な地盤改良効果が期待できる。2.固化材添加後 0 日養生において、半水石膏を用いた改良土は、高炉セメント B 種と同程度の改良効果が期待できる。3.半水石膏を用いた改良土は pH が中性域を示し、土壌環境に優しい固化材である。

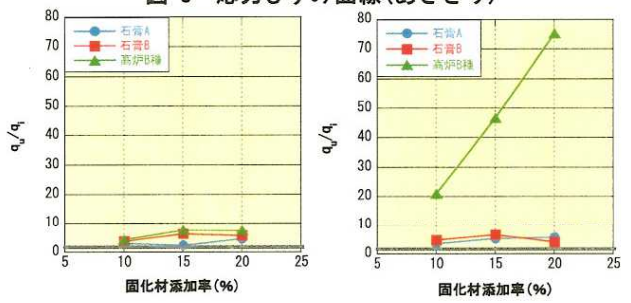


(a) 石膏 A (0 日養生)　(b) 石膏 B (0 日養生)



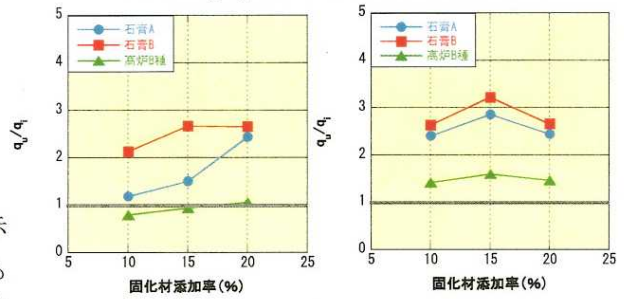
(c) 石膏 A (28 日養生)　(d) 石膏 B (28 日養生)

図-3　応力ひずみ曲線(あさぎり)



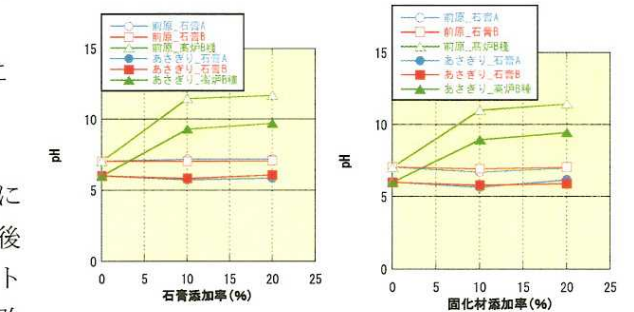
(a) 0 日養生　(b) 28 日養生

図-3　q_u/q_i と固化材添加率の関係(前原)



(a) 0 日養生　(b) 28 日養生

図-4　q_u/q_i と固化材添加率の関係(あさぎり)



(a) 7 日養生　(b) 28 日養生

図-6　pH と固化材添加率の関係

参考文献

1)亀井健史：半水石膏を利用したセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす養生期間の影響　地盤工学ジャーナル　Vol.4,No.1,99-105　2)伊藤恵輔：半水石膏による高含水比発生土の地盤改良効果．第 44 回地盤工学会

4. 佐藤研一，伊藤恵輔，押方利郎

半水石膏により改良された土質材料の力学及び溶出特性

第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 189-190，2009 年 9 月

B3−4

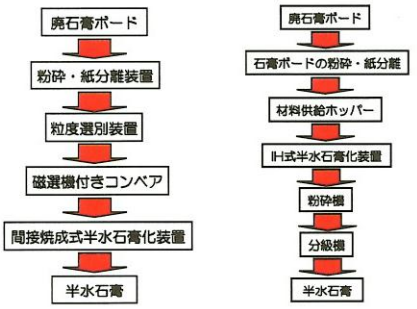
半水石膏により改良された土質材料の力学及び溶出特性

○（正）佐藤研一[1)]、伊藤恵輔[2)]、押方利郎[3)]
1)福岡大学工学部、2)福岡大学大学院、3)福岡大学大牟田産学連携推進室

1. はじめに　廃石膏ボードは、安定型処分場から、管理型処分場への移行や、住宅・社会資本の更新に伴う建設副産物排出量の逼迫により、廃石膏ボードの処理費用は今後莫大なものになると考えられる。そのため、建築現場から排出される廃石膏ボードのリサイクル・再利用技術の開発が急務である。そこで著者ら[1),2)]は、廃石膏ボードから分離した石膏を焼成して得られる再生半水石膏の地盤の地盤材料への適用について検討を進めてきた。その結果、比較的含水比の高い地盤材料において混合早期に改良効果があることを示してきた。本報告では、高含水比かつ高有機質建設発生土に対して、固化材として半水石膏を混合させ、材料の改良効果を調べるため一軸圧縮試験、半水石膏により改良された土の溶出特性を調べるために、環境庁告示 46 号法試験を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 実験に用いた半水石膏　実験に用いた半水石膏は、**図-1** に示す 2 つの製造過程で製造されたものを用いた。間接焼成方式で焼成された半水石膏（以下、石膏 A と呼ぶ）は**写真-1** に示すように、キルン型の焼成装置を用いる方式で、焼成時の温度は約 300℃である。IH ヒーター焼成方式で焼成された半水石膏(以下、石膏 B と呼ぶ)は、**写真-2** に示す装置を用いる方式で、焼成時の温度は、約 125～160℃である。また、今回の検討では、比較材として高炉セメント B 種を用いた。



(a) 間接焼成方式　(b) IH 焼成方式

図-1　半水石膏製造過程

2-2 実験に用いた土質材料　土質材料は、福岡県前原市と熊本県あさぎり町の建設発生土の 2 種類を使用した。**図-3** に土質材料の粒径加積曲線を、**表-1** に土質材料の物理特性値を示す。両発生土ともに細粒分が 8 割程度と多く、シルト、粘土分で構成されていることが分かる。特に、前原発生土はシルト、粘土分を多く含んでおり、自然含水比におけるコーン指数は、984.5kN/m^2 と第 3 種建設発生土である。一方、あさぎり発生土は、コーン値を求めることができない泥土であり、火山灰質粘性土で強熱減量が 25.7%と高有機質である。

写真-1　間接焼成式半水石膏化装置

写真-2　IH 式半水石膏化装置

2-3 実験条件　**表-2** に一軸圧縮試験の供試体作成条件を示す。力学的な検討では所定の条件で作成された供試体を用いて、一軸圧縮試験を行った。試料の配合は、土質材料を所定の含水比に調整し、その後、固化材を添加した。ここで固化材添加率は、土質材料に対する重量比である。所定の養生期間(0，7，28 日)にて気中養生を行った後、一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験の供試体作成方法は、直径 5cm、高さ 10cm のモールドに 1 層あたり 5 回の同一エネルギーにての締固め法{E_c=50(k J/m^3)}で突き固め、計 4 層にて行った。一方、環告 46 号法試験については、力学試験と同一試料を用い、環告 46 号法試験の前処理手順に基づき作製した検液を分光光度計、ICP プラズマ発光分析装置で溶出濃度の計測を行った。

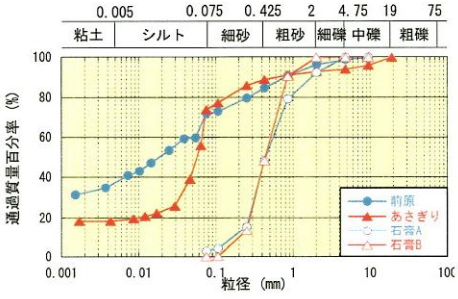


図-1　試料の粒径加積曲線

3. 実験結果及び考察

3-1 一軸圧縮試験結果　固化材添加に伴う強度増加の割合をより定量的に明らかにするために、**図-3、図-4** に前原発生土とあさぎり発生土における、各添加率の一軸圧縮強度 q_u と、添加率 0%の q_i

表-1　土質材料の物理特性値

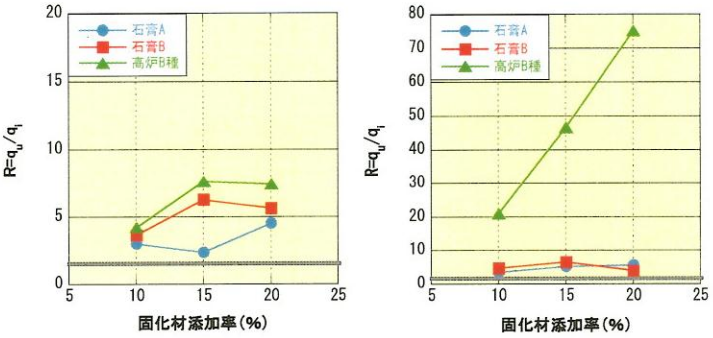
	前原	あさぎり
土粒子の密度(g/cm^3)	2.721	2.370
初期含水比(%)	34.89	76.9
細粒分含有率Fc(%)	72.17	74.06
最大粒径(mm)	4.75	9.5
均等係数Uc	-	-
曲率係数Uc´	-	-
塑性指数Ip	38.54	N.P
強熱減量(%)	7.7	25.7
コーン指数(kN/m^2)	984.53	-

表-2　一軸圧縮試験供試体作成条件

土質材料	固化材		含水比(%)
	種類	添加率(%)	
前原	石膏A	10	40
	石膏B		
	高炉B種	15	
あさぎり	石膏A		80
	石膏B	20	
	高炉B種		

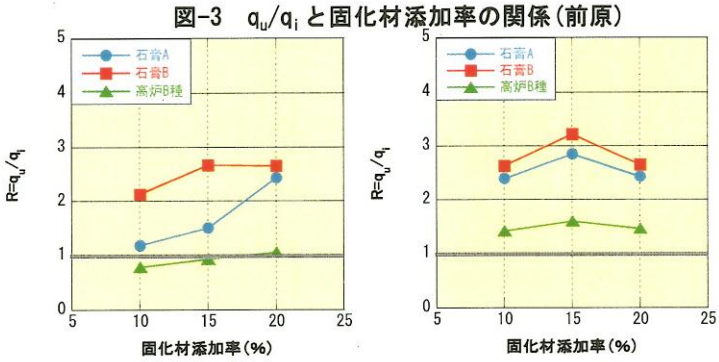
【連絡先】〒814-0180　福岡市城南区七隈 8-19-1　福岡大学工学部社会デザイン工学科
佐藤研一　Tel：092-871-6631　FAX：092-865-6031　e-mail：sato@fukuoka-u.ac.jp
【キーワード】半水石膏、溶出試験、一軸圧縮試験

を用いて正規化した強度増減率 $R=q_u/q_i$ と固化材添加率の関係を示す。ここで、図中の黒線は、未改良土(R＝1.0)の強度を示す。「前原」では、改良直後では、高炉セメントB種と同程度の強度を有していることがわかる。一方、28日間程度の養生期間においては、両石膏ともに、固化材を混入しない場合と比較して2～6倍程度改良効果が見られる。半水石膏による改良土では、養生に伴う強度増加において、セメントほど大きな増加は見込めないことが示された。一方、高有機質土である「あさぎり」では、「前原」と比較すると、0.7～3倍程度と改良効果が小さいことがわかる。しかしながら、「前原」で改良効果の大きかった高炉セメントB種では、養生しても1～2倍程度とほとんど効果は見られなかった。一方、半水石膏は、養生日数の増加に伴い、3倍程度とセメント以上の強度改善が見られる。このことから、半水石膏は高含水比かつ高有機質土に対して有効であり、地盤改良効果が期待できる。また、石膏添加率20%において、改良土の強度が低下しており、これは、地盤改良を行うにあたり最適な石膏添加率があることを示唆している。



(a)0日養生　(b)28日養生

図-3　q_u/q_i と固化材添加率の関係(前原)



(a)0日養生　(b)28日養生

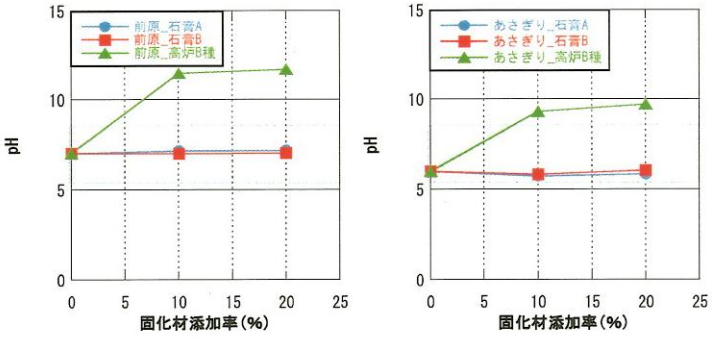
図-4　q_u/q_i と固化材添加率の関係(あさぎり)

4-2 溶出試験結果　**表-3** に7日養生後の改良土の溶出試験結果を示す。表より、両発生土及び半水石膏の単体の結果からは、基準値を超える重金属の溶出は見られなかった。さらに、材料混合後も基準値を超える重金属の溶出は見られなかった。**図-5** にpHと固化材添加率の関係を示す。図中の色枠は一律排水基準値[3](pH=5.8～8.3)を示している。図より、半水石膏を用いた改良土は、固化材添加率が増加してもpHは中性域を示し、一律排水基準値を十分満たしていることがわかる。一方、高炉セメントB種による改良土は固化材添加率の増加に伴いpHが急激に増加しており、アルカリ性域を示していることがわかる。したがって半水石膏は、一般固化材と比較すると、周辺地盤環境に与える影響は小さいことが示された。

表-4　溶出試験結果(7日養生)

土質材料	固化材 種類	固化材 添加率	pH	B	Cr^{6+}	Cd	Pb
前原	石膏A	10	7.18	0.098	N.D	N.D	N.D
	石膏B		7.03	0.069	N.D	0.001	0.004
	高炉B種		11.46	0.074	-	N.D	N.D
	石膏A	20	7.2	0.105	N.D	N.D	N.D
	石膏B		7.07	0.048	N.D	0.001	0.002
	高炉B種		11.69	0.062	-	N.D	N.D
あさぎり	石膏A	10	5.74	0.044	N.D	0.002	0.007
	石膏B		5.84	0.144	N.D	0.002	0.004
	高炉B種		9.31	0.024	-	N.D	0.027
	石膏A	20	5.86	0.104	N.D	0.001	0.005
	石膏B		6.06	0.084	N.D	0.002	0.004
	高炉B種		9.72	0.030	-	N.D	0.009
環境基準値			-	1.00	0.05	0.01	0.01

mg/l)



(a)前原　(b)あさぎり

図-5　pHと固化材添加率の関係(7日養生)

5. 結論　今回の実験より以下のことがわかった。

1)固化材添加後0日養生において、半水石膏を用いた改良土は高炉セメントB種と同程度の改良効果が得られる。2)半水石膏は、発生直後の高含水比発生土及び高有機発生土に対して、効果的な改良効果が期待できる。3)半水石膏を用いた改良土は、中性域を示す。

謝辞　本研究を行うにあたり、「ふくおか石膏ボードリサイクル研究会」のメンバーの協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1)亀井健史,半水石膏を利用したセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす養生期間の影響,地盤工学ジャーナル,Vol.4,No.1,99-105.2)伊藤恵輔,半水石膏による高含水比発生土の地盤改良効果. 第44回地盤工学会.3)環境省 HP URL:水環境関係 http://www.env.go.jp/water/mizu.html

5. 伊藤恵輔，松崎数馬，佐藤研一，押方利郎，大山勝寿，坂本晃一，森田博史

再生半水石膏を用いた地盤改良材の環境安全性の検討

平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会，pp. 329-330，2010 年 3 月

再生半水石膏を用いた地盤改良材の環境安全性の検討

福岡大学 学生会員 ○伊藤恵輔 松崎数馬
福岡大学　正会員　佐藤研一 押方利郎
ふくおか石膏ボードリサイクル研究会　非会員　大山勝寿 坂本晃一 森田博史

1. はじめに　廃石膏ボードは、安定型処分場から、管理型処分場への移行や、高度経済長期の住宅・社会資本の更新に伴う建設副産物排出量の増加により、今後廃石膏ボードの処理費用は今後莫大なものになると考えられる。このことから、建築現場から排出される廃石膏ボードのリサイクル・再利用技術の開発がなされている[1),2)]。そこで筆者らも、廃石膏ボードから分離した石膏を焼成して得られる再生半水石膏の地盤材料への適用について検討を進めてきた。しかし、再生半水石膏の地盤材料への利用においては、土壌環境基準値を超えるフッ素の溶出が懸念されている。本研究では、環境庁告示 46 号法試験を行い、再生半水石膏を混合した材料における環境安全性の検討を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 実験に用いた試料　本研究では土質材料として①まさ土、②建設発生土のリサイクル工場から排出される脱水ケーキ、③しらす、④博多粘土、⑤黒ボク、⑥風化土の九州各地で発生し使用が予想される 6 種類の土質材料を使用した。また、再生半水石膏には間接焼成方式で焼成された再生半水石膏（以下、石膏 A）と IH 焼成方式で焼成された再生半水石膏(以下、石膏 B)の 2 種類の再生半水石膏を使用した。さらに、補助固化材として高炉セメント B 種(以下、高炉 B 種)を使用した。**表-1** に物理特性値を、**図-1** に粒径加積曲線を示す。脱水ケーキ、博多粘土、黒ボク及び風化土は細粒分含有率が 70%以上と高く、有機物を多く含んでいる材料である。一方、まさ土としらすは粒径幅が広く、粒度分布の良い試料であることがわかる。

2-2 検討内容

検討①：フッ素溶出特性に及ぼす土質材料の影響　**表-2** に配合条件を示す。ここで、石膏の添加率は乾燥状態の土質材料に対する重量比(%)、混水量は、JIS R 9112 により規定された石膏の固化に最適な水の量のことで、石膏に対する重量比(%)である[3)]。試料作成方法は、土質材料と石膏と水をミキサーで 1 分間混合攪拌したのち、チャック付の袋に入れ、恒温室(室温 20±2℃) にて所定期間養生(1、7、28 日)を行った。その後、各養生後に環境庁告示 46 号法試験に従い、イオンクロマトによりフッ素(F)の測定を行った。

検討②：固化試料からのフッ素溶出特性　**表-3** に配合条件を示す。ここで試料の配合は絶乾状態の土質材料に対する重量比(%)である。試料作成方法は、別報[4)]と同一の供試体を用い、恒温室(室温 20±2℃)で 28 日間気中養生した後、環告 46 号法試験を行いイオンクロマトによりフッ素(F)の測定を行った。

表-1 試料の物理特性値

	まさ土	脱水ケーキ	しらす	博多粘土	黒ボク	風化土	再生半水石膏	
							石膏A	石膏B
土粒子密度 ρ_s(g/cm^3)	2.64	2.62	2.42	2.76	2.39	2.72	2.62	2.61
初期含水比(%)	3.0	15.0	12.0	83.3	22.0	4.5	-	-
細粒分含有率F_c(%)	34.4	100.0	43.0	90.0	79.9	72.2	-	-
塑性指数I_p	-	21.0	-	41.6	-	38.5	-	-
強熱減量(%)	3.7	18.4	5.6	43.0	23.7	10.9	-	-

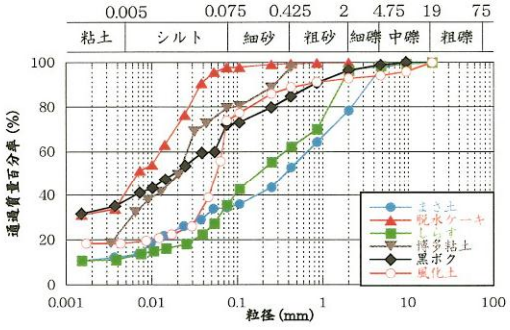


図-1 試料の粒径加積曲線

表-2 配合条件（検討①）

土質材料	半水石膏 種類	半水石膏 添加率(%)	混水量(%)
まさ土 脱水ケーキ しらす 博多粘土 黒ボク 風化土	石膏A	10	143
		15	
		20	
	石膏B	10	116
		15	
		20	

表-3 配合条件（検討②）

土質材料	半水石膏 種類	半水石膏 添加率(%)	補助固化材 添加率(%)
脱水ケーキ	石膏A	10	0
			3
			5
	石膏B	15	0
			3
			5

3. 半水石膏を混合した材料の環境安全性の検討　**表-4** に試料の溶出試験結果を示す。表より、石膏には土壌環境基準値の 5～6 倍、博多粘土からは土壌環境基準値を超えるフッ素の溶出が確認された。

3-1 フッ素溶出特性に及ぼす土質材料の影響　**図-2** に1日養生後の石膏添加率とフッ素溶出量の関係を示す。図より、石膏添加率の増加に伴いフッ素溶出量が増加している。これは、**表-4** に示すようにもともと石膏自体が土壌環境基準値の 5～6 倍に相当するフッ素の溶出が認められることに起因しているものと考えられる。また、土質材料の種類によってフッ素溶出量に違いが見られる。**図-3** に石膏 A 添加率 20%の各土質材料における養生日数とフッ素溶出量の関係を示す。図より、脱水ケーキとまさ土では養生日数の経過に伴いフッ素の溶出量が低下していることがわかる。これに対し、それ以外の土質材料では、養生日数に関係なくフッ素溶出量はほぼ一定値を示している。**図-4** に1日養生後における細粒分含有率 F_c とフッ素溶出量の関係を示す。図より、細粒分含有率の増加に伴ってフッ素の溶出量が低下していることがわかる。これは、細粒分がフッ素を吸着したことに起因するものと考えられる。ここで、黒ボクに着目すると、細粒分含有率が 100%の脱水ケーキと同等もしくはそれ以上の溶出量の低下が見られる。これは、黒ボクがホウ素やフッ素といった重金属を吸着しやすい性質を持っていることに起因するものと考えられる[5]。これに対し、フッ素を多く含有している博多粘土は、細粒分含有率が高いにもかかわらず、フッ素溶出量が高いことがわかる。

表-4　試料の溶出試験結果

試料	pH	F(mg/l)
まさ土	6.81	N.D
脱水ケーキ	8.57	0.54
しらす	4.03	N.D
博多粘土	7.71	1.23
黒ボク	6.00	0.56
風化土	5.03	N.D
石膏A	6.97	4.84
石膏B	7.46	5.94
土壌環境基準値	-	0.80

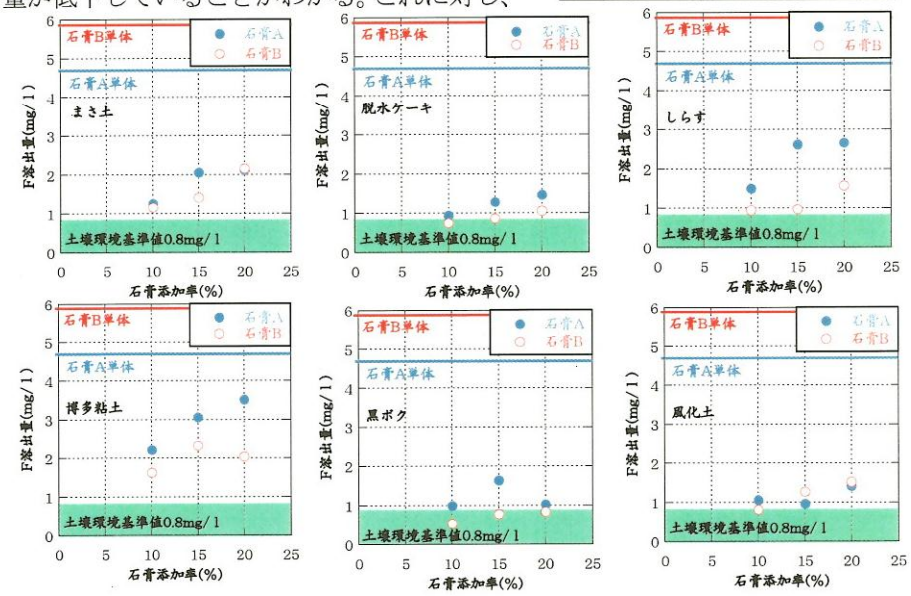


図-2　石膏添加率とフッ素溶出量の関係

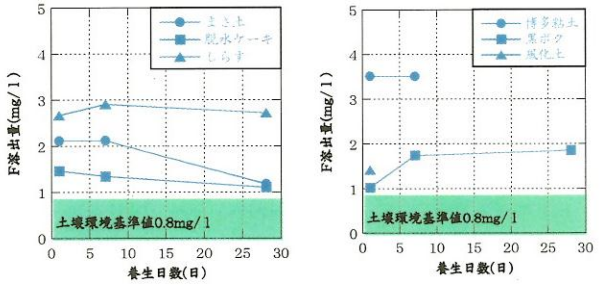


図-3　養生日数とフッ素溶出量の関係（石膏 A：添加率 20%）

3-2 固化試料からのフッ素溶出特性　**表-5** に養生 28 日後の石膏 B 添加率 15%の溶出試験結果を示す。表より、補助固化材を添加したことによりフッ素溶出量が低下していることがわかる。これは、セメント水和鉱物が結晶中に重金属イオンが固定されることに起因するものと考えられる[6]。したがって、補助固化材を添加することによりフッ素の溶出抑制が可能であることが明らかとなった。また、**図-5** に養生形態とフッ素溶出量の関係を示す。試料の養生形態の差によるフッ素溶出量を比較すると、溶出量に大きな差は見られない。したがって、フッ素溶出量は試料の養生形態に影響されないことが明らかとなった。

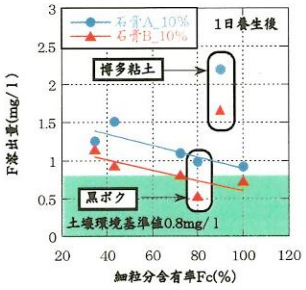


図-4　Fc とフッ素溶出量の関係

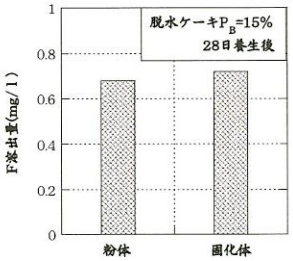


図-5　養生形態とフッ素溶出量の比較

表-5　溶出試験結果

土質材料	半水石膏 種類	半水石膏 添加率(%)	補助固化材 添加率(%)	環告46号法試験 pH	環告46号法試験 F(mg/l)
脱水ケーキ	石膏B	15	0	7.85	0.72
			3	11.20	0.64
			5	11.45	0.22
土壌環境基準値				-	0.80

4. 結論　実験行った結果、以下の知見が得られた。

①石膏添加率の増加に伴い、改良材からのフッ素溶出量は増加する。②土質材料の違いによってフッ素溶出特性は異なり、細粒分含有率とフッ素の吸着量は高い相関性が見られた。③補助固化材を添加することで、フッ素の溶出抑制が可能である。④試料の養生形態の違いによってフッ素の溶出量に影響は受けない。

【参考文献】 1)亀井ら;半水石膏の地盤改良材としての有効利用，地盤工学ジャーナル，vol.2, No.3, pp.245-252, 2007　2)亀井ら;廃石膏ボードから再生した半水石膏を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮強さ，地盤工学ジャーナル, vol.2, No.3, pp.237-244 2007　3) JIS R 9112 陶磁器型材用せっこうの物理試験方法　4)松崎ら;再生半水石膏より改良された土質材料の力学特性の検討 5) 杉田;ホウ素およびフッ素の土壌吸着に関する研究　6)亀井ら;高炉セメントB種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発，地盤工学ジャーナル, vol.4, No.1, pp.91-98 2007

6. 松崎数馬，佐藤研一，押方利朗，大山勝寿，坂本晃一，森田博史

再生半水石膏より改良された土質材料の力学特性

平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会，pp. 451-452，2010 年 3 月

再生半水石膏より改良された土質材料の力学特性

福岡大学 学生会員 ○松﨑数馬 伊藤恵輔
福岡大学 正会員 佐藤研一 押方利郎
ふくおか石膏ボードリサイクル研究会 非会員 大山勝寿 坂本晃一 森田博史

1. はじめに　石膏ボードとは、石膏を主成分とした素材を板状にして、両面をボード用原紙で被覆成型した建築用内装材料である。耐火性、遮音性、断熱性、施工性に優れており、経済的にも低廉なことから建築物の壁や天井に広く用いられている。しかしながら、建築現場からは、新築及び解体時に廃棄物として発生する廃石膏ボードの排出量が年々増加しており、2013 年には廃石膏ボードの年間総排出量は約 200 万トンになると言われている[1)]。そこで本研究では、廃石膏ボードから分離した二水石膏を焼成して得られる再生半水石膏を地盤改良材として有効利用することを目的とし、再生半水石膏混合材料の力学特性の検討を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 実験試料　本研究では土質材料として、福岡市内で採取されたまさ土と建設発生土を洗浄し再利用する過程で発生する脱水ケーキを使用した。また、再生半水石膏として間接焼成方式で焼成された再生半水石膏(以下、石膏 A)と IH 焼成方式で焼成された再生半水石膏(以下、石膏 B)の 2 種類を使用し、補助固化材として高炉セメント B 種(以下、高炉 B 種)を使用した。凡例の記号はそれぞれ P_A：石膏 A、P_B：石膏 B、C：高炉 B 種を示している。**図-1** に粒径加積曲線を、**表-1** に物理特性値を示す。まさ土は、粒径幅の広い良く締固められる材料であることがわかる。また、脱水ケーキは細粒分含有率が高く、強熱減量の結果から有機分の多い試料である。

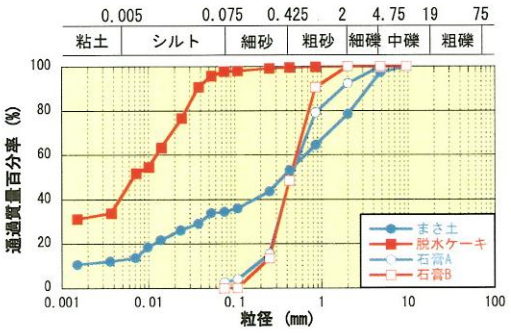


図-1　試料の粒径加積曲線

表-1　試料の物理特性値

	まさ土	脱水ケーキ
土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.642	2.620
細粒分含有率 F_c (%)	34.40	100.00
液性限界 w_L (%)	-	58.54
塑性限界 w_p (%)	-	37.56
塑性指数 I_p (%)	-	20.98
強熱減量 (%)	3.66	18.40

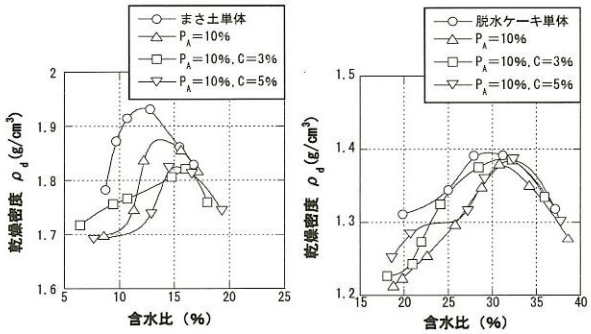
2-2 検討内容　実験は、**表-2** に示す実験条件により一軸圧縮試験から検討を行った。ここで試料の配合は絶乾状態の土質材料に対する重量比(%)である。まず、各混合材料の締固め試験(A-a 法)を行い最大乾燥密度及び最適含水比を求めた(**図-2**)。一軸圧縮試験の供試体については、含水比を最適含水比に調整し、締固め試験結果から締固め密度 D(ρ_d/ρ_{dmax})=95%とし、直径 ϕ=5cm、高さ h=10cm のモールドに 5 層で突き固めて作製した。養生は、恒温室(室温 20±2℃)で所定期間(7、28、56 日)行った。

表-2　実験条件

土質材料	半水石膏		補助固化材(高炉B種)	養生日数 (day)
	種類	添加率(%)	添加率(%)	
まさ土 脱水ケーキ	石膏A 石膏B	0 10 15	0 3 5	0 7 28 56

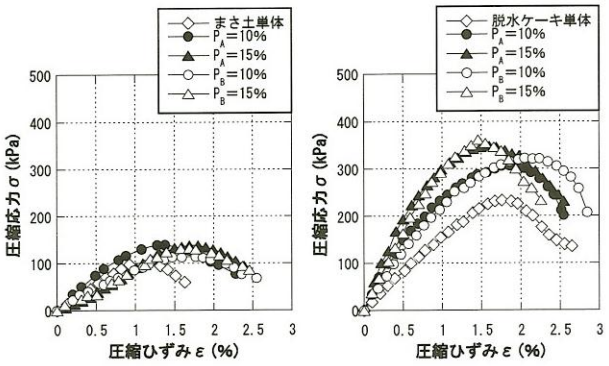
3. 実験結果及び考察

3-1 一軸圧縮試験結果　**図-3** に再生半水石膏により改良されたまさ土と脱水ケーキの一軸圧縮試験結果を示す。結果からわかるように再生半水石膏混合後に締固めた材料の一軸圧縮強さは土質材料の影響を受け、まさ土より脱水ケーキの方の改良効果が大きい事がわかる。また、いずれの土質材料も半水石膏添加に伴ってせん断強度は増加しており、P=15%混合させたものは、材料の初期剛性の増加も確認できる。また、いずれの土質材料ともに破壊時の圧縮ひずみが大きくなっていることから、半水石膏の添加によって粘り強い材料になっていることも確認できる[2)]。しかし結果より、大きな材料強度の増加は望めない改良材である事もわかる。**図-4** に再生半水石膏にさらに補助固化材を混合した供試体の一軸圧縮試験結果を示す。結果から補助固化材を混合させることによって



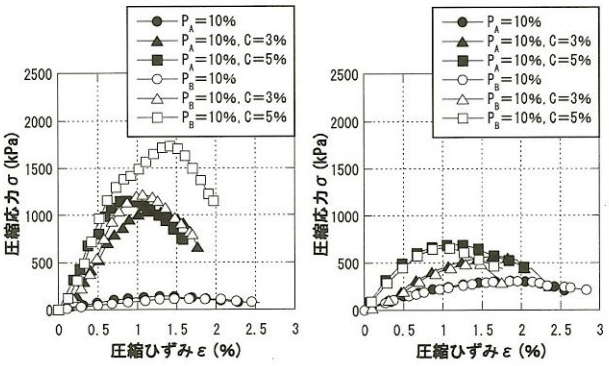
(a) まさ土　　(b) 脱水ケーキ

図-2　締固め曲線(石膏 A10%)



(a)まさ土　　(b)脱水ケーキ

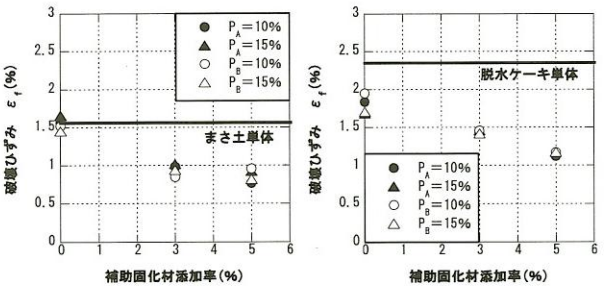
図-3 一軸圧縮試験結果(7 日養生 石膏のみ)



(a)まさ土　　(b)脱水ケーキ

図-4 一軸圧縮試験結果(7 日養生 補助固化材あり)

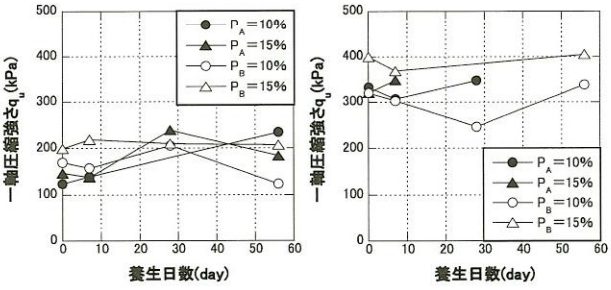
材料の強度増加が見込める事がわかる。またその傾向は、まさ土の方が強度増加は顕著である。これに対し、脱水ケーキは土中の有機分によってセメントによる強度発現効果を阻害していることが推測される。**図-5** に補助固化材添加率と破壊ひずみの関係を示す。補助固化材の添加率の増加に伴い破壊ひずみが減少していることがわかる。したがって補助固化材を添加することにより大幅な強度と材料剛性の増加は見込めるが、半水石膏の特性である粘り強さを減少させることを示している。



(a)まさ土　　(b)脱水ケーキ

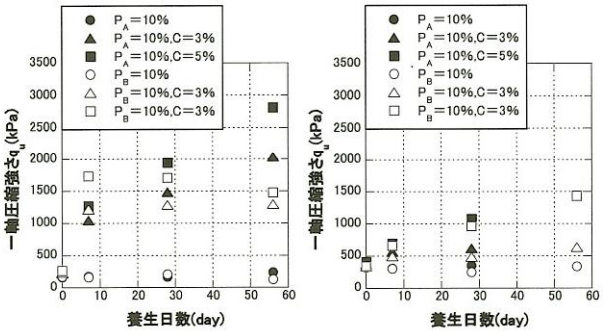
図-5　補助固化材添加率と破壊ひずみの関係

3-2 養生日数と一軸圧縮強さの関係　**図-6、7** に両土質材料の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。石膏のみの添加に着目すると、土質材料の種類によらず、混合直後の一軸圧縮強さと養生日数の経過に伴う一軸圧縮強さはほぼ一定値を示していることがわかる。このように半水石膏の添加によって土質材料の種類に関係なく、混合直後に土質材料の強度増加が見込まれる。したがって、軟弱土壌の施工現場における半水石膏の利用は、早期にトラフィカビリティーが改善され、工期の短縮が望める改良材である。一方、補助固化材の効果は、養生 7 日後において一軸圧縮強さが増加し、養生日数が経過するごとに徐々にその増加が緩やかになる傾向が見られる。まさ土では養生日数の経過に伴い大きな強度増加が見られるが、脱水ケーキではまさ土ほどの強度増加は見られなかった。これは先述したように脱水ケーキの土中の有機分に起因すると考えられる。



(a)まさ土　　(b)脱水ケーキ

図-6　養生日数と一軸圧縮強さの関係(石膏のみ)



(a)まさ土　　(b)脱水ケーキ

図-7　養生日数と一軸圧縮強さの関係(補助固化材あり)

4. 結論　実験の結果、以下の結論を得ることができた。

①土質材料に再生半水石膏を混合し、締固めることによって、混合材料の強度を増加させることができ、粘り強い材料となる。また、この改良効果は、材料混合直後に発揮され、養生に伴って変化しないことも明らかとなった。②補助固化材の添加によって、混合材料の強度増加が期待でき、さらに、有効利用時に必要な強度を設定することが可能であることが示された。また、脱水ケーキにおいて高炉セメント B 種の効果は、有機分の含有によって阻害されるものの、養生による強度増加が見込まれることも示された。

【参考文献】1) 社団法人石膏ボード工業会 2)亀井ら;半水石膏の地盤改良材としての有効利用，地盤工学ジャーナル，vol.2, No.3, pp.245-252, 2007

7. 武下俊宏，三浦 麻，押方利朗，樋口壯太郎

リサイクル石膏を用いた土木資材の硫化水素発生試験方法の検討と安全評価

第 31 回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集，pp. 104-106，2010 年 1 月

リサイクル石膏を用いた土木資材の硫化水素発生試験方法の検討と安全性評価

福岡大学　○武下俊宏，三浦麻，押方利郎，樋口壮太郎

はじめに

廃石膏ボードの埋立処分は硫化水素発生問題が顕著化したため次第に規制強化され，平成18年6月1日以降は石膏ボードから紙を除去した石膏部分についても管理型産業廃棄物とされ，管理型処分場への埋立処分が義務化された[1)]．廃石膏ボード排出量の推計[2)]によると，廃石膏ボードの総排出量は今後増加すると見込まれている．さらにその内訳を見てみると，新築系廃石膏ボードの排出量は微減すると見込まれているものの，今後多くの建物が建て替え需要の時期を迎えることから，解体系廃石膏ボードの排出量は増加すると見込まれている．廃石膏ボード総排出量の増加は将来的な最終処分場逼迫の要因ともなるため，廃石膏ボードのリサイクル技術開発および用途開発が必要とされている．様々なリサイクルが検討されているが，このうちリサイクル石膏を土壌改良材や地盤改良材などの土木資材として使用する場合，廃石膏ボードの埋立処分において問題となった硫化水素の発生が懸念され，施工後の安全性について疑問視されてきた．そこで，本研究は廃石膏ボードから製造されたリサイクル石膏およびリサイクル石膏を混合した土木資材について硫化水素発生試験方法を検討し，同方法を用いて硫化水素発生の状況を確認することを目的とした．

本研究では，まず容易に入手可能な実験器具を用い，リサイクル石膏およびリサイクル石膏を含む土木資材を対象とした硫化水素発生試験方法を検討した．さらに本方法を用いて，二水石膏と半水石膏の硫化水素発生試験，解体系二水石膏と新築系二水石膏の硫化水素発生試験，植菌の有無による硫化水素発生の影響，半水石膏により改良した無機汚泥の硫化水素発生試験，等について検討を行った．

実験方法

本実験では，共同研究者である「ふくおか石膏ボードリサイクル研究会」より提供の半水石膏，二水石膏および無機汚泥を使用した．このうち二水石膏については本実験のために新築系と解体系に分けて準備した試料を使用した．無機汚泥については土木工事現場より発生した泥土の一部を回収保管したものを使用した．土壌改良試料については無機汚泥1kgに対して半水石膏200～400gを加えて混合し，7日間養生した固化物を使用した．各試料は粉砕の後目開き2mmの篩で篩分し，その篩下を硫化水素発生試験用の試料とした．硫化水素の発生試験は，洗浄した500ml容の肉厚ガラス容器（デュラン瓶）に前述の試料50gと純水200mlを添加し，ヘッドスペースガスを窒素置換してシリコン栓で密封し，35℃の恒温庫に静置して行った．用いたガラス容器や試料，水等については殺菌操作を行わずそのまま使用した．また，植菌についても特に断らない限り行っていない．なお，比較のため植菌を行った実験については，硫化水素の発生履歴のある当研究所敷地内の大型実験槽の浸透水を採取し，その1mlを容器に添加した．ガラス容器内に発生した硫化水素の濃度は，ヤナコ製のFPDガスクロマトグラフィーで分析した．

実験結果

1．二水石膏および半水石膏の硫化水素発生試験結果

図1，2に二水石膏および半水石膏を用いて硫化水素発生試験を行った結果を示す．図1はA社提供の試料を用いた場合，図2はB社提供の試料を用いた場合の結果をそれぞれ示している．なお，用いた試料の詳細は以下の通りである；

① ：廃石膏ボードからボード紙を除去した石膏部分を粉砕した焼成前の二水石膏．
② ：①の二水石膏を焼成炉で焼成し粉砕した半水石膏．
③ ：②に最適含水比（A社；143%，B社116%）となるように加水して固化形成し，材令7日目に粉砕した二水石膏．

両図に示すように，①の試料からは高濃度の硫化水素が発生する事が確認された．一方，A社②の試料からも硫化水素の発生が確認されたが，①の試料の発生濃度と比較しても低濃度で推移し，いったん硫化水素濃

度が上昇したがその後は減少した．B社②の試料からは硫化水素の発生は確認されなかった．さらに，A社③の試料についてはA社②の試料よりさらに硫化水素濃度が低濃度で推移する傾向が見られた．B社③の試料についてはB社②の試料同様，硫化水素の発生は確認されなかった．

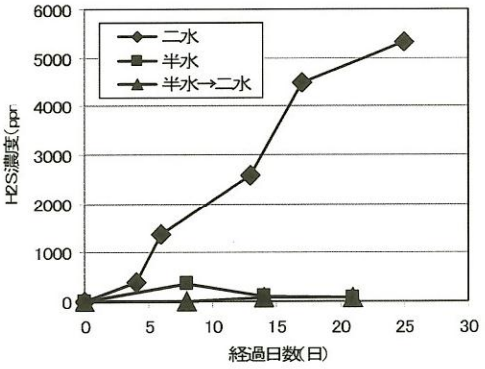


図1．A 社の二水石膏(◆)，半水石膏(■)および半水石膏に加水固化した二水石膏(▲)の硫化水素発生結果．

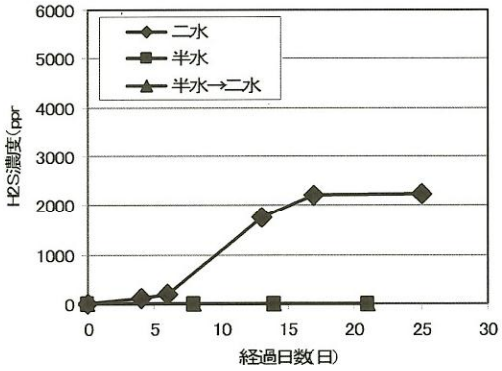


図2．B社の二水石膏(◆)，半水石膏(■)および半水石膏に加水固化した二水石膏(▲)の硫化水素発生結果．

2．新築系二水石膏と解体系二水石膏の硫化水素発生試験結果

図3，4に新築系二水石膏と解体系二水石膏からの硫化水素の発生結果を示す．図3はA社提供の試料を用いた場合，図4はB社提供の試料を用いた場合の結果をそれぞれ示している．両図に示すように，解体系の二水石膏からは高濃度の硫化水素が発生することが確認された．一方，新築系の二水石膏からも硫化水素の発生が確認されたが，いずれの場合も発生濃度は解体系二水石膏よりも低濃度で推移する事が確認された．

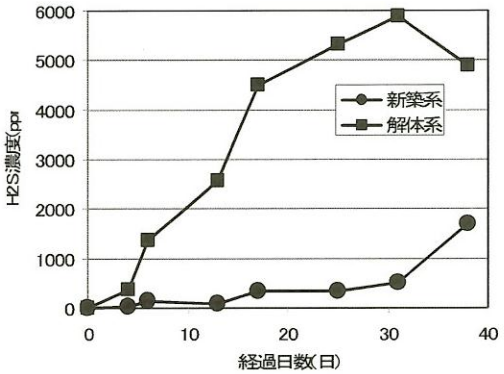


図3．A 社の新築系二水石膏(●)および解体系二水石膏(■)の硫化水素発生結果．

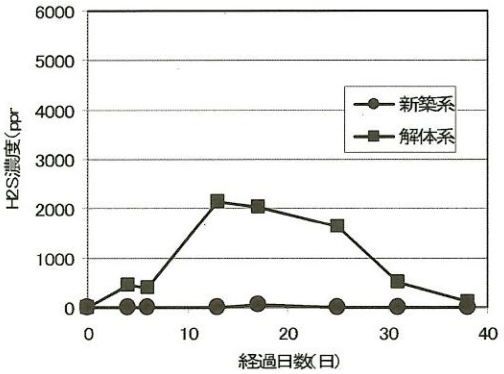


図4．B 社の新築系二水石膏(●)および解体系二水石膏(■)の硫化水素発生結果．

3．植菌の有無による硫化水素発生試験結果

図5，6に植菌の有無による新築系二水石膏からの硫化水素発生試験結果を示す．A社の新築系二水石膏は，植菌により硫化水素の発生が促進され，約30日経過時点において最大5000ppm近い硫化水素が発生した．植菌なしの試料についても同時期の30日経過時点において500ppm程度の濃度の硫化水素発生が確認され，その後硫化水素濃度が増加した．一方，B社の新築系二水石膏は植菌の有無にかかわらず硫化水素の発生はほとんど確認されなかった．

次に，解体系二水石膏についても植菌の有無の影響を確認した．図7，8に植菌の有無による解体系二水石膏からの硫化水素発生試験結果を示す．A社の解体系二水石膏については植菌を行わない場合でも6000ppm近い濃度の硫化水素が発生し，植菌によりさらに高濃度の硫化水素が発生することが確認された．一方，B社の解体系二水石膏からも2000ppmを超える硫化水素が発生したが，植菌の有無による硫化水素発生への影響は顕著には現れていない．

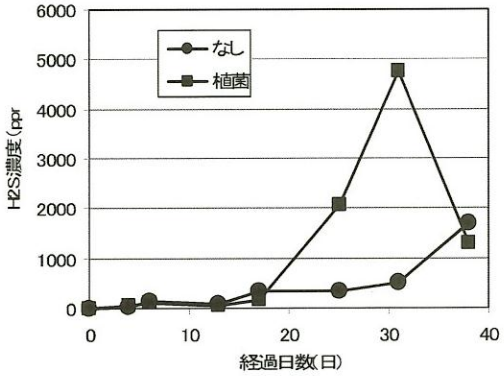


図5. 植菌の有無による A 社の新築系二水石膏の硫化水素発生結果.

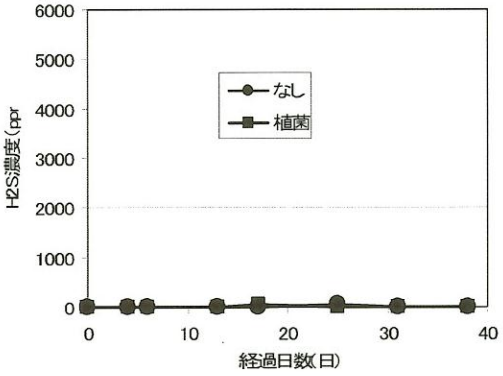


図6. 植菌の有無によるB社の新築系二水石膏の硫化水素発生結果.

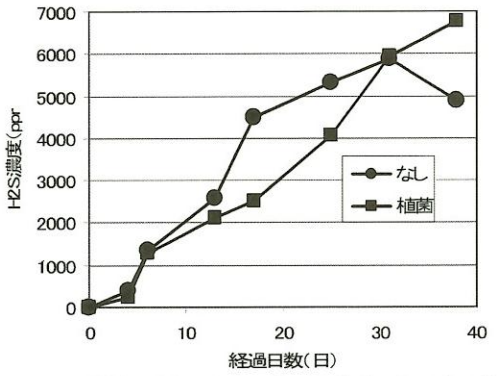


図7. 植菌の有無による A 社の解体系二水石膏の硫化水素発生結果.

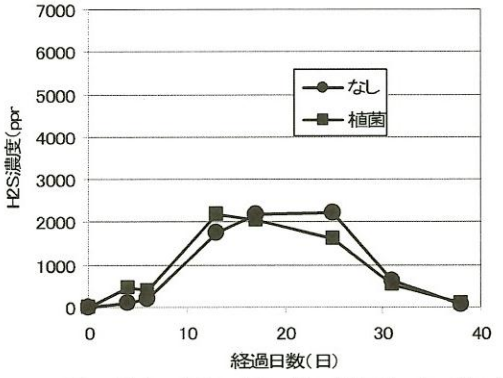


図8. 植菌の有無によるB社の解体系二水石膏の硫化水素発生結果.

4. 半水石膏の添加により改良した無機汚泥の硫化水素発生試験結果

無機汚泥(含水率62.8%)1kgにA社およびB社の半水石膏を200g, 300g, 400g混合した固化試料を作製し, これらの試料について硫化水素の発生試験を行った. 本実験では植菌を施した. しかし, 14日経過時点では硫化水素の発生は確認されていない(データは示さない). 蛍光X線分析の結果, この無機汚泥には10.6%のFeが含まれていることが明らかとなり, 発生した硫化水素がFeと反応して硫化物として固定されたことも考えられる. しかし, 硫化物の生成による試料の黒色変化は確認できていない. 今後, 本試験を継続して硫化水素の発生を追跡調査し, 試験終了時には濃塩酸を添加して硫化物として固定された硫化水素を遊離させる方法で, 硫化水素が検出されるかについても確認する予定である.

まとめ

石膏ボードからボード紙を除去した二水石膏からは硫化水素の発生が顕著であったが, 二水石膏を新築系と解体系に分別した場合には解体系二水石膏から高濃度の硫化水素が発生した. 二水石膏を焼成して製造した半水石膏からも硫化水素の発生が確認されたが, 二水石膏ほど高濃度に発生することはなかった. また, 本実験の範囲内では半水石膏を無機汚泥と混合した試料からは硫化水素の発生は確認されなかった.

謝辞

本研究は「平成21年度　北九州市環境未来技術開発助成」により行われた. また, 本研究は「ふくおか石膏ボードリサイクル研究会」より提供された試料を用いて行われた. ここに記して関係各位に深く感謝の意を表する.

引用

1)環境省HP;廃石膏ボードから付着している紙を除去したものの取扱いについて（通知).
2)(社)石膏ボード工業会HP.

平成 22 年度発表論文リスト

査読付論文

1. 佐藤研一，吉田英史，押方利郎，武下俊宏，大山勝久：再生半水石膏を用いた地盤改良効果と環境安全性の検討，日本材料学会，第 9 回地盤改良シンポジウム論文集，pp. 81-86，2010.

2. Kenichi Sato and Toshiro Oshikata : Mechanical and Leaching Characteristics of Soil Materials Improvement with Bassanaite, Proceedings of the 6th International Congress on Environmental Geotechnics (6ICEG), pp. 1451-1456, 2010

学会発表論文

3. 伊藤恵輔，佐藤研一，押方利郎：再生半水石膏により改良された土質材料の基本特性の検討，第 45 回地盤工学研究発表会，pp. 96-97，2010 年 8 月

4. 佐藤研一，押方利郎，伊藤恵輔，大山勝寿，坂本晃一，森田博史：再生半水石膏により改良された土質材料の環境安全性の検討，土木学会平成 22 年度全国大会第 65 回年次学術講演会，pp. 437-438，2010 年 9 月

5. 武下俊宏，酒田雅央，大山勝寿，森田博史，押方利郎，佐藤研一，樋口壮太郎：リサイクル石膏を混合した土木資材の硫化水素発生に関する研究，第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 197-198，2010 年 11 月

6. 佐藤研一，押方利郎，武下俊宏：再生半水石膏により改良された土質材料の力学・溶出特性，第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 201-202，2010 年 11 月

7. 吉田英史，松崎裕太，佐藤研一，押方利朗，武下俊宏，大山勝寿，森田博史：再生半水石膏を用いた軟弱地盤改良におけるフッ素溶出特性，平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会，pp. 351-352，2011 年 3 月

8. 松崎裕太，吉田英史，佐藤研一，藤川 拓朗，押方利朗，廣田武次，山崎伸幸：再生半水石膏による軟弱地盤改良技術の検討，平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会，pp. 353-354，2011 年 3 月

1. 佐藤研一，吉田英史，押方利郎，武下俊宏，大山勝久

再生半水石膏を用いた地盤改良効果と環境安全性の検討

日本材料学会，第 9 回地盤改良シンポジウム論文集，pp. 81-86，2010.

再生半水石膏を用いた地盤改良効果と環境安全性の検討

佐藤研一[1]・○吉田英史[2]・押方利郎[3]・武下俊宏[1]・大山勝久[4]
[1]福岡大学・[2]福岡大学大学院・[3]福岡大学大牟田産学連携推進室・[4]福岡石膏ボードリサイクル研究会

1. はじめに

石膏ボードは，耐火性，遮音性，機密性，断熱性等の特徴を有しており，経済的にも低廉なことから住宅から超高層ビルまで建築物の種類に限定されない建築材料として幅広く利用されている[1)]。そのため，建築現場からは，新築及び解体時に大量の廃石膏ボードが発生している。しかし，廃石膏ボードの処理処分状況は，一部リサイクルされているものの，大部分は管理型の産業廃棄物最終処分場に処分され，2013 年には廃石膏ボードの年間総排出量は約 200 万トンと言われている。このような背景から，廃石膏ボードのリサイクル・有効利用が実施されはじめてきている。廃石膏ボードから分離した石膏(二水石膏)を焼成して得られる再生半水石膏は亀井ら[1), 2)]の研究によって，締固め材料や地盤改良材として十分に適用できる可能性がある程度明らかになっている。そこで本研究では，廃石膏ボードのリサイクルを推進するため，廃石膏ボードから分離した石膏(二水石膏)を焼成して得られる再生半水石膏を建設用資材(中性固化材)として有効に利用する技術システムの確立を目指し，研究開発を行っている。本報告では再生半水石膏を用いた地盤改良材の開発のために研究を行った結果について報告する。

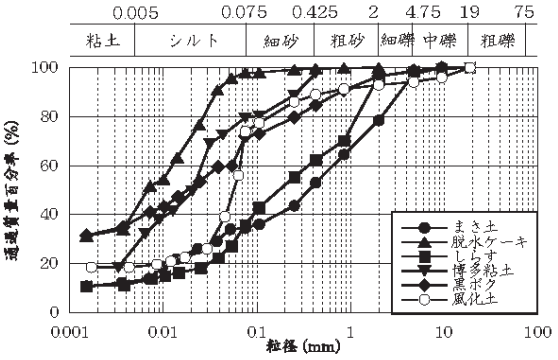


図-1 実験に用いた試料の粒径加積曲線

表-1 試料の物理特性値

物理特性	まさ土	脱水ケーキ
土粒子密度 ρ_s(g/cm^3)	2.64	2.62
初期含水比(%)	3.0	15.0
細粒分含有率F_c(%)	34.4	100.0
塑性指数I_p	-	21.0
強熱減量(%)	3.7	18.4

2. 再生半水石膏

再生半水石膏を焼成する方法は，直接焼成方式，間接焼成方式，IH 焼成方式の 3 種類がある。現在では，間接及び IH 焼成方式が主流となっている。そこで本研究では，間接焼成方式で焼成された再生半水石膏(以下，石膏 A)と IH 焼成方式で焼成された再生半水石膏(以下，石膏 B)の 2 種類の再生半水石膏を使用した。凡例の記号はそれぞれ P_A：石膏 A，P_B：石膏 B，C：高炉セメント B 種を示している。

3. 地盤改良効果の検討

3-1 実験に用いた試料

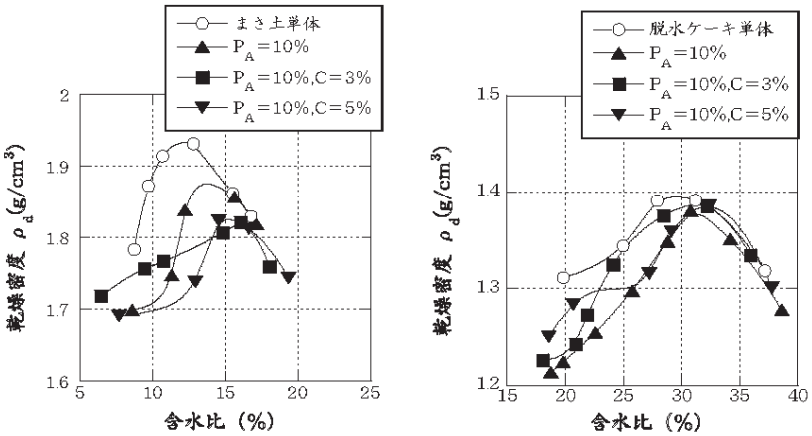
再生半水石膏による地盤改良効果の検討では**図-1** に示す試料の中から福岡市内で採取されたまさ土，建設発生土を洗浄し再利用する過程で発生する脱水ケーキを使用した。**表-1** に試料の物理特性値を示す。脱水ケーキは細粒分含有率が高く，有機物を多く含んでいる材料である。一方，まさ土は粒径幅が広く，粒度分布の良い試料であることがわかる。

3-2 実験概要

表-2 に配合条件を示す。実験では補助固化材として高炉セメントＢ種を用

表-2 配合条件

土質材料	再生半水石膏		補助固化材	
種類	種類	添加率(%)	種類	添加率(%)
まさ土 脱水ケーキ	石膏A 石膏B	10, 15	高炉B種	0, 3, 5



(a)まさ土　(b)脱水ケーキ

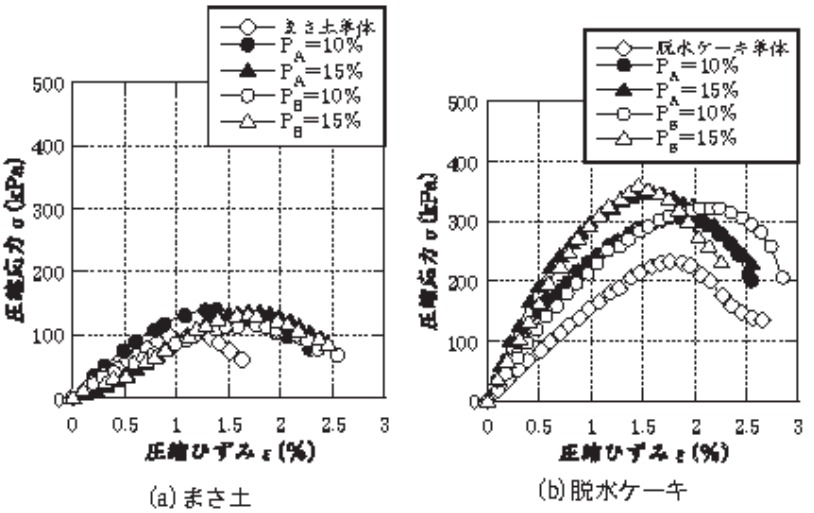
図-2 締固め曲線(石膏 A10%)

Deliberation of environment and foundation improvement effect used waste plaster board
Kenichi Sato[1], Hidefumi Yoshida[2], Toshiro Oshikata[3], Toshihiro Takeshita[1], Katsuhisa Ooyama[4] ([1] Fukuoka University, [2]Graduate School, Fukuoka University, [3] Omuta Office of Fukuoka University Academic, Industrial and Governmental Liaiosn Center, [4]Fukuoka Plasterboard Recycling Workshop)

いた。締固めが可能な土質材料に対し，一軸圧縮試験を行い強度・変形特性の把握を行った。まず，各混合材料の締固め試験(A-a 法)を行い最大乾燥密度及び最適含水比を求めた(図-2)。一軸圧縮試験の供試体については，含水比を最適含水比に調整し，締固め試験結果から締固め密度 D (ρ_d/ρ_{dmax})=95%とし，直径 ϕ=5cm，高さ h=10cm のモールドに 5 層で突き固めて作製した。養生は，恒温室(室温 20±2℃)で所定期間(0,7,28,56 日)行った。さらに，脱水ケーキに関しては，再泥化試験，変水位透水試験も行った。

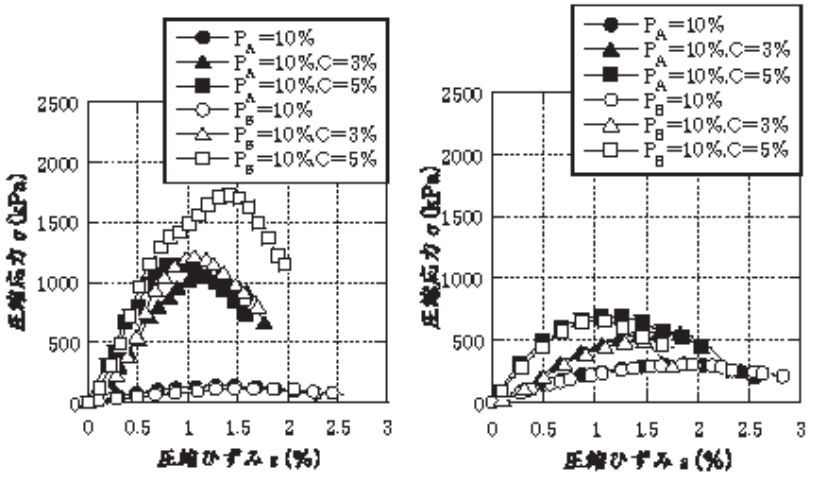
3-3　一軸圧縮特性

図-3 に再生半水石膏のみ添加した材料の 7 日養生後の応力ひずみ曲線を示す。結果からわかるように，いずれの土質材料も半水石膏添加に伴ってせん断強度は増加し，材料の初期剛性の増加も確認できる。しかし結果より，大きな材料強度の増加は望めない改良材である事もわかる。図-4 に再生半水石膏にさらに補助固化材を混合した供試体の一軸圧縮試験結果を示す。結果から補助固化材を混合させることによって材料の強度増加が見込める事がわかる。またその傾向は，まさ土の方が強度増加は顕著である。これに対し，脱水ケーキは土中の有機分によってセメントによる強度発現効果を阻害していることが推測される。図-5 に再生半水石膏のみ添加した材料の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。図中の黒線は，一般盛土材の目標強度(q_u=100kPa)を示す。結果からわかるように，土質材料の種類によらず，混合直後の一軸圧縮強さと養生日数の経過に伴う一軸圧縮強さはほぼ一定値を示し，一般盛土材の目標強度も満足していることがわかる。このように半水石膏の添加によって土質材料の種類に関係なく，混合直後に土質材料の強度増加が見込まれる。したがって，施工現場における半水石膏の利用は，早期にトラフィカビリティーが改善され，工期の短縮が望める改良材である。図-6 に補助固化材を添加した材料の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。補助固化材の効果は，養生 7 日後において一軸圧縮強さが増加し，養生日数が経過するごとに徐々にその増加が緩やかになる傾向が見られる。まさ土では養生日数の経過に伴い大きな強度増加が見られるが，脱水ケーキではまさ土ほどの強度増加は見られなかった。これは先述したように脱水ケーキの土中の有機分に起因すると考えられる。



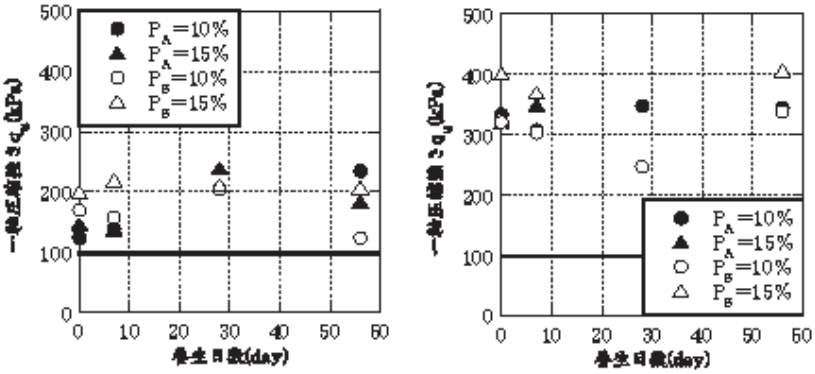
(a) まさ土　　(b) 脱水ケーキ

図-3 一軸圧縮試験結果(7 日養生 石膏のみ)



(a) まさ土　　(b) 脱水ケーキ

図-4 一軸圧縮試験結果(7 日養生 補助固化材あり)



(a) まさ土　　(b) 脱水ケーキ

図-5　養生日数と一軸圧縮強さの関係(石膏のみ)

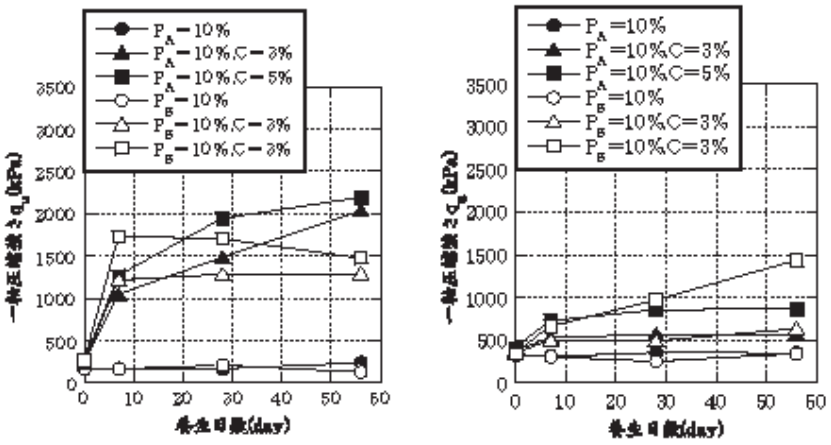
3-4　再泥化特性

再泥化試験は供試体作製後 7 日間気中養生を行った後，蒸留水(1500g)に供試体を水浸させ，1, 2, 5, 10, 15, 30, 60, 120,

240 分, 1 日, 7 日後に観察, 記録し, 表-3 に示す再泥化区分に従い分類を行った。図-7 に再泥化試験結果を示す。図より，脱水ケーキ単体では，水浸直後に再泥化が開始し，水浸 10 分後には完全に再泥化していることがわかる。再生半水石膏のみ添加した材料では，石膏添加率の増加に伴い，再泥化するまでの時間が増加していることがわかる。また，水浸直後に角が崩れ，水浸 1 日後までには全て再泥化していることがわかる。一方，補助固化材を添加した材料では，周囲にひび割れが見られるものもあったが，水浸 7 日後でも完全な再泥化は見られなかった。したがって，補助固化材として高炉セメント B 種を添加することで再泥化を抑制する事が可能であることが示された。

3-5　透水特性

柔壁型変水位透水試験(ASTM D 5084)を用いて，ϕ=10cm×h=3cm のモールドに 3 層に突き固めて供試体

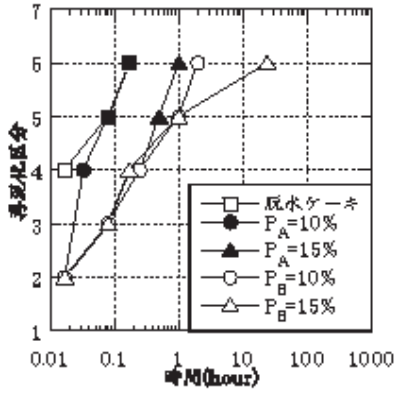


(a)まさ土　　(b)脱水ケーキ

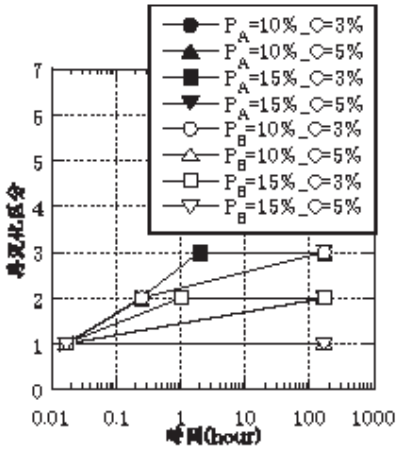
図-6　養生日数と一軸圧縮強さの関係(補助固化材あり)

表-3　再泥化区分

区分	1	2	3	4	5	6
形状						
状態	変化なし	角が崩れる程度	周囲のひび割れが顕著	再泥化開始	半分が再泥化	完全に再泥化



(a)再生半水石膏のみ



(b)補助固化材添加

図-7　再泥化試験結果

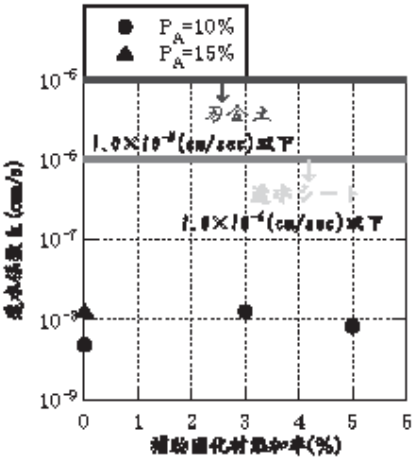


図-8　透水試験結果

を作製し，養生 7 日間気中養生後，柔壁型変水位透水試験機を用いて測定した。図-8 に透水試験結果を示す。図中の色枠は，刃金土及び遮水シートの透水係数の目標値を示している。図より，脱水ケーキに再生半水石膏及び補助固化材を添加した材料は，刃金土及び処分場の遮水土としての要求性能を満たしている。また，補助固化材による影響はほとんどなく，再生半水石膏及び補助固化材を添加した材料において十分に難透水性を示していることがわかる。

4. 半水石膏を混合した材料の環境安全性

4-1　実験に用いた試料

本節では土質材料として①まさ土，②脱水ケーキに加えて，③しらす，④博多粘土，⑤黒ボク，⑥風化土の九州各地で発生し使用が予想される 6 種類の土質材料を使用した。引

表-5 試料の物理特性値

物理特性	まさ土	脱水ケーキ	しらす	博多粘土	黒ボク	風化土
土粒子密度 ρ_s(g/cm³)	2.64	2.62	2.42	2.75	2.39	2.72
初期含水比(%)	3.0	150	12.0	83.3	22.0	45
細粒分含有率 F_c(%)	34.4	100.0	43.0	90.0	79.9	72.2
塑性指数 I_p	-	21.0	-	41.5	-	38.5
強熱減量(%)	3.7	18.4	5.5	43.0	23.7	10.9

き続き，石膏 A，石膏 B，高炉セメント B 種を使用した。**図-1** に粒径加積曲線を，**表-5** に物理特性値を示す。脱水ケーキ，博多粘土，黒ボク及び風化土は細粒分含有率が 70%以上と高く有機物を多く含んでいる材料である。一方，まさ土としらすは粒径幅が広く，粒度分布の良い試料であることがわかる。

4-2　改良土からのフッ素溶出特性

表-6 に配合条件を示す。ここで，石膏の添加率は乾燥状態の土質材料に対する重量比(%)，混水量は，JIS R 9112 により規定された石膏の固化に最適な水の量のことで，石膏に対する重量比(%)である[3]。試料作製方法は，土質材料と石膏と水をミキサーで 1 分間混合撹拌したのち，チャック付の袋に入れ，恒温室(室温 20±2℃) にて所定期間養生(1, 7, 28 日)を行った。その後，各養生後に環境庁告示第 46 号法試験に従い，イオンクロマトグラフによりフッ素(F)の測定を行った。固化試料からのフッ素溶出特性についての試料は一軸圧縮試験と同一の供試体を用い，恒温室(室温 20±2℃)で 28 日間気中養生した後，環告 46 号法試験を行いイオンクロマトグラフによりフッ素(F)の測定を行った。なお，脱水ケーキについてのみ実験を行った。

4-2-1　フッ素溶出特性に及ぼす土質材料の影響

図-9 に 1 日養生後の石膏添加率とフッ素溶出量の関係を示す。図より，石膏添加率の増加に伴いフッ素溶出量が増加している。これは，**表-7** の試料の溶出試験結果に示すように，もともと石膏自体が土壌環境基準値の 5～6 倍に相当するフッ素の溶出が認められることに起因しているものと考えられる。また，土質材料の種類によってフッ素溶出量に違いが見られる。**図-10** に P_A=20%の各土質材料における養生日数とフッ素溶出量の関係を示す。図より，脱水ケーキとまさ土では養生日数の経過に伴いフッ素の溶出量が低下していることがわかる。これ

表-6 配合条件

土質材料	半水石膏		混水量(%)
	種類	添加率(%)	
まさ土 脱水ケーキ しらす 博多粘土 黒ボク 風化土	石膏A	10	143
		15	
		20	
	石膏B	10	116
		15	
		20	

表-7 試料の溶出試験結果

試料	pH	F(mg/l)
まさ土	6.81	N.D
脱水ケーキ	8.57	0.54
しらす	4.03	N.D
博多粘土	7.71	1.23
黒ボク	6.00	0.56
風化土	5.03	N.D
石膏A	6.97	4.84
石膏B	7.46	5.94
土壌環境基準値	-	0.80

表-8　溶出試験結果

土質材料	半水石膏		補助固化材	46号法試験	
	種類	添加率(%)	添加率(%)	pH	F
脱水ケーキ	石膏A	15	0	8.65	1.235
			3	11.11	1.040
			5	11.35	N.D
	石膏B		0	7.85	0.722
			3	11.20	0.640
			5	11.45	0.216

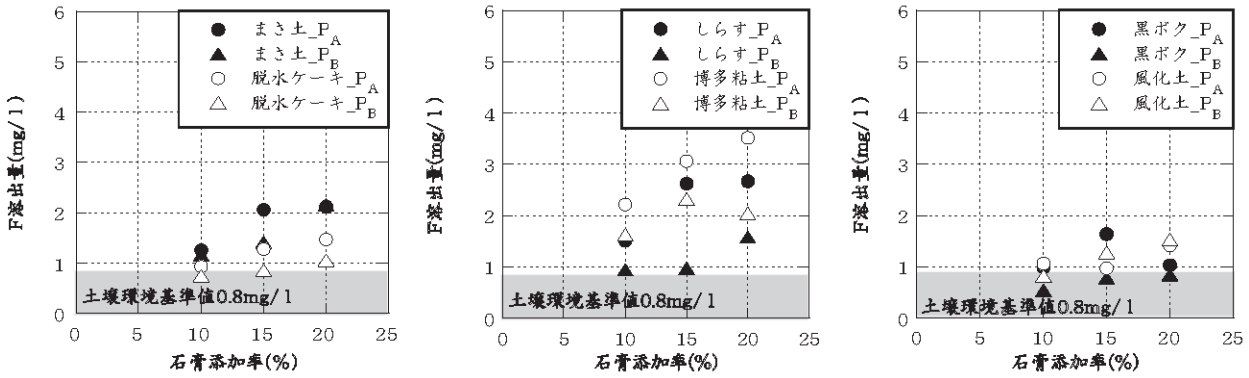


図-9　石膏添加率とフッ素溶出量の関係

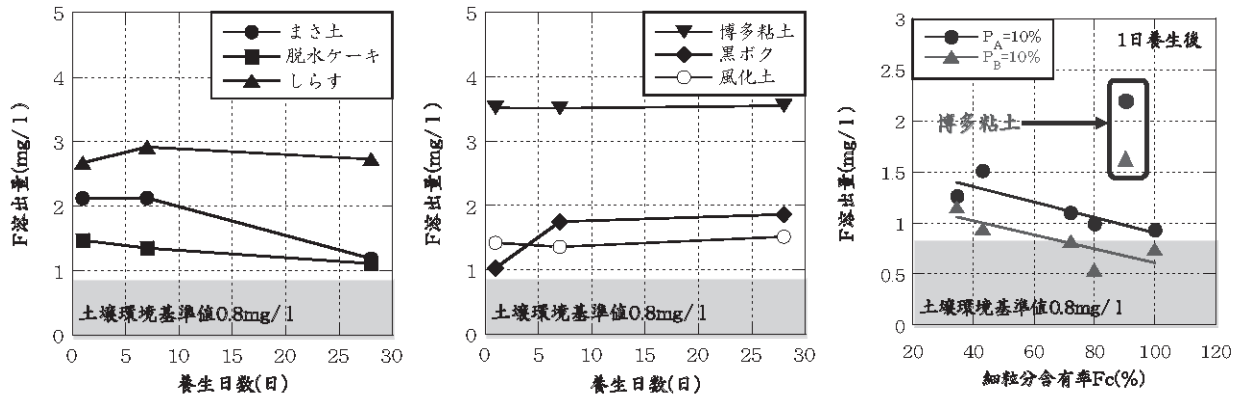


図-10　養生日数とフッ素溶出量の関係(P_A=20%)

図-11　Fc とフッ素溶出量の関係

に対し，それ以外の土質材料では，養生日数に関係なくフッ素溶出量はほぼ一定値を示している。図-11 に 1 日養生後における細粒分含有率 F_c とフッ素溶出量の関係を示す。このフッ素の溶出量は，表-7 の結果より土質材料そのものの溶出も含まれる。しかしながら，F_c の増加より溶出量が減少していることがわかる。これは，細粒分がフッ素を吸着したことに起因するものと考えられる。

4-2-2　固化試料からのフッ素溶出特性

表-8 に養生 28 日後の P=15%の溶出試験結果を示す。表より，補助固化材を添加したことによりフッ素溶出量が低下していることがわかる。これは，フッ素イオンをエトリンガイトに固定することでフッ素の溶出を抑制するものと考えられる[2)]。したがって，補助固化材を添加することによりフッ素の溶出抑制が可能であることが明らかとなった。

4-3　改良土からの硫化水素発生特性に及ぼす土質材料の影響

硫化水素発生試験用の試料(28 日間養生)は，一軸圧縮強度を測定した後の破壊断片を回収して粉砕し，目開き 2mm 篩を通過したものを用いた。なお，篩い分けした試料は試験に供するまでの間，チャック付きのビニール袋に一時保存した。試験方法は、試料 50g を秤取った物と純水 200ml を 500ml 容器のデュラン瓶に入れ，種菌として大型実験槽(安定型廃棄物充填)の浸透水 1ml を添加する。次に、内部のガスを高純度窒素で置換(2L/分で 1 分)、シリコン栓で密栓、そしてよく撹拌した後、容器を 35℃の恒温槽に静置する。その後、シリンジで内部のガスを 0.5ml 採取し、ガスクロマトグラフを用いて，硫化水素発生の検証を行った。また，内部に発生した硫化水素ガスの濃度を均一にするため，サンプリングの前に内容物をよく撹拌した。表-9 に配合条件を示す。以後，各試料の表記を簡略化するため，例えば Case1 試料の表記は#1 と示す。図-13～15 に脱水ケーキ（#7～12），図-14 にシラス（#13～18），図-15 に赤土（#31～36）を半水石膏を用いて改良した材料からの硫化水素試験結果について示す。脱水ケーキの半水石膏改良物については 130 日間，シラスの半水石膏改良物については 80 日間，赤土の半水石膏改良物については 30 日間の試験期間中一度も硫化水素の発生は確認されなかった。次に，図-16，17 にまさ土（#1～6）と，博多粘土（#19～24）の結果を示す。いずれの試料についても測定開始後 10～20 日の間に硫化水素の発生が確認された。しかし，その後は発生した硫化水素ガスの濃度が維持される事なく消失する傾向が見られた。図-18 に黒ボクの半水石膏改良物（表-9 の#25～30）の結果を示す。これらの試料については実験開始 14～35 日の間に硫化水素の発生が確認され，さらにその後，発生した硫化水素ガスの濃度が維持される傾向が見られた。以上の実験の結果から，本試験方法を用いて土壌の半水石膏改良土から硫化水素ガスが発生する場合，実験開始から一月以内にガスが発生していることから，一月間硫化水素ガスの発生を調べることでガス発生の有無を判定可能と考えた。また，土壌の半水石膏改良物からの硫化水素発生は，その特徴から次の 3 つに分類されることが明らかとなった。

①．脱水ケーキ，シラス，赤土の半水石膏改良物の様に，硫化水素の発生が確認されないもの。

②．まさ土，博多粘土の半水石膏改良物の様に，一度硫化水素が発生するがその後消失するもの。

表-9　配合条件

Case #	土質材料	半水石膏 種類	半水石膏 添加率(%)	混水量(%)
1	まさ土	石膏A	10	143
2			15	
3			20	
4		石膏B	10	116
5			15	
6			20	
7	脱水ケーキ	石膏A	10	143
8			15	
9			20	
10		石膏B	10	116
11			15	
12			20	
13	しらす	石膏A	10	143
14			15	
15			20	
16		石膏B	10	116
17			15	
18			20	
19	博多粘土	石膏A	10	143
20			15	
21			20	
22		石膏B	10	116
23			15	
24			20	
25	黒ボク	石膏A	10	143
26			15	
27			20	
28		石膏B	10	116
29			15	
30			20	
31	赤土	石膏A	10	143
32			15	
33			20	
34		石膏B	10	116
35			15	
36			20	

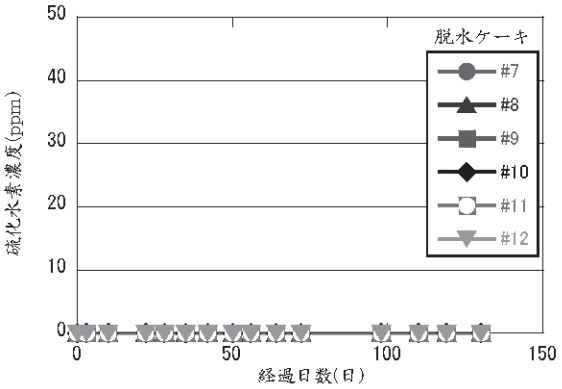


図-13　硫化水素発生濃度(脱水ケーキ)

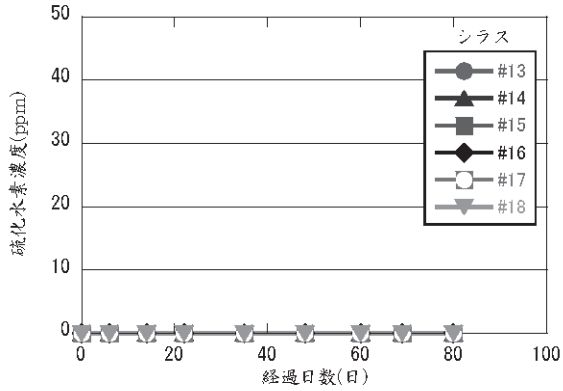


図-14　硫化水素発生濃度(シラス)

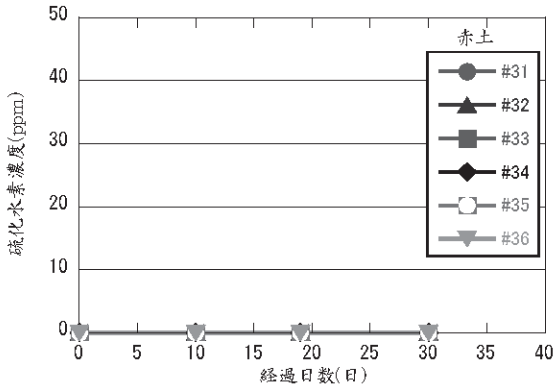


図-15　硫化水素発生濃度(赤土)

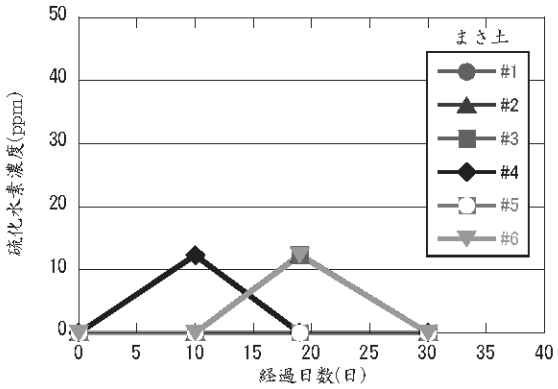


図-16　硫化水素発生濃度(まさ土)

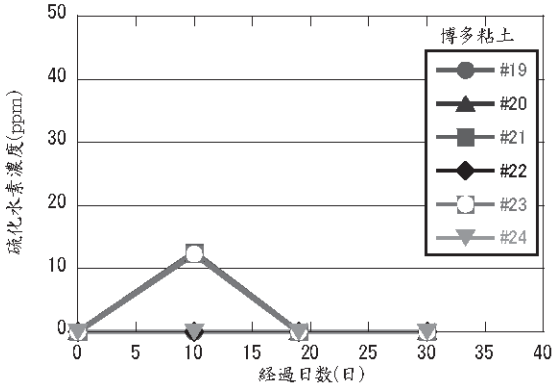


図-17　硫化水素発生濃度(博多粘土)

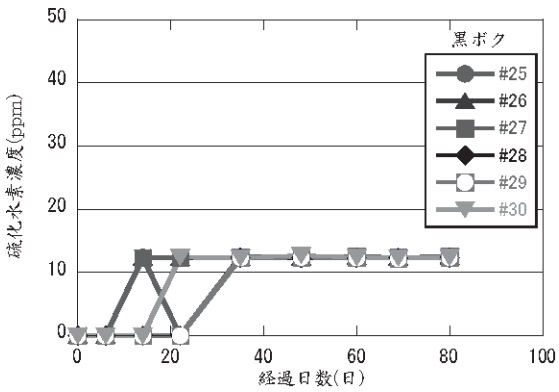


図-18　硫化水素発生濃度(黒ボク)

③．黒ボクの半水石膏改良物の様に，一度硫化水素が発生しその後も硫化水素の濃度が維持されるもの。

これらの硫化水素の発生パターンは，①発生した硫化水素が直ちに硫化物として固定されたり，アルカリ性の水溶液に吸収されてガスとして発生しない場合,②硫化水素の発生が硫化水素の固定や吸収に追いつかず一時的にガスとして発生する場合，③発生した硫化水素に対し硫化水素の固定や吸収の能力が低い場合などの原因が考えられる。これには土壌の重金属（鉄）含有量，粒度分布（粒子径や比表面積），pH，水分含量などが影響していると考えられるため，さらに詳細な関連性を調べる必要がある。一方，硫化水素ガスが発生しなくても硫化水素が硫化物や水に吸収されていることがあるため，硫化水素ガス発生試験終了後に試料に塩酸等の強酸を添加して、弱酸の硫化水素を遊離させ硫化水素ガス発生の有無を確認する必要がある。また，硫化水素ガスの発生が一時的，あるいは継続的に観察された土壌試料（まさ土，博多粘土，黒ボク）については鉄材の添加やpH調整等で発生抑制される可能性があり，安全利用の面からも今後の課題としたい。加えてフッ素の溶出対策を施した試料についても硫化水素の発生試験を行いガス発生の有無を確認する事としたい。

5. 結論

実験の結果，以下の結論を得ることができた。①土質材料に再生半水石膏を混合し，締固めることによって，混合材料の強度を増加させることができる。また，この改良効果は，材料混合直後に発揮され，養生に伴って変化しないことも明らかとなった。②補助固化材の添加によって，混合材料の強度増加が期待でき，さらに，有効利用時に必要な強度を設定することが可能であることが示された。③再生半水石膏のみ添加した材料では，水浸1日後に再泥化してしまうが，補助固化材を添加することで再泥化抑制が可能である。④脱水ケーキに再生半水石膏及び補助固化材を添加した材料は，刃金土及び遮水材料の要求性能を満たすことができ，難透水性を示す。⑤土質材料の違いによってフッ素溶出特性は異なり，細粒分含有率とフッ素の吸着量は高い相関性が見られた。⑥セメント系の補助固化材を添加することによって，フッ素の溶出抑制が可能である。⑦硫化水素の発生は混合する土質材料により発生形態が変化することが示された。

謝辞　本研究は，環境省平成 21 年度循環型社会形成推進科学研究費(No.K2144)および文部科学省化学研究費(No.21560527)の一部として実施された研究である。関係各位に心より感謝申し上げます。

【参考文献】 1)亀井ら:半水石膏の地盤改良材としての有効利用，地盤工学ジャーナル，vol.2, No.3, pp.245-252, 2007. 2) 亀井ら;高炉セメントB種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発，地盤工学ジャーナル, vol.4, No.1, pp.91-98 2007. 3) JIS R 9112-1978 陶磁器型材用石膏の物理試験方法.

2. Kenichi Sato and Toshiro Oshikata

Mechanical and Leaching Characteristics of Soil Materials Improvement with Bassanaite

Proceedings of the 6th International Congress on Environmental Geotechnics (6ICEG)

pp. 1451-1456, 2010

Mechanical and Leaching Characteristics of Soil Materials Improved with Bassanite

Kenichi Sato
Faculty of Engineering, Fukuoka University *(sato@fukuoka-u.ac.jp)*
Toshiro Oshikata
Ohmuta Industry-University Liaison Office, Fukuoka University
(oshikata@adm.fukuoka-u.ac.jp)

ABSTRACT The plaster board is classified into a construction supply has characteristics such as fire endurance, sound insulation, air-tightness and thermal insulation properties and is inexpensiveness. It is, therefore, extensively-utilized as a construction supply without limitation to the kind of buildings such as house and towering building. For such reasons, utilization of bassanite obtained from waste plasterboard. This paper describes the results of examination in terms of following 3 points : (1) Consideration of solidification characteristics, (2) Effect of the difference of soil materials, (3) Evaluation of heavy metal elution characteristics.

1. INTRODUCTION

It is considered that in the future, the cost of processing waste gypsum boards will increase greatly due to the shift from stable disposal facilities to managed-type disposal facilities, and the quantity of building waste associated with renewal of housing and social capital stock. Therefore, the development of recycling and reuse technologies for waste gypsum boards from building sites is an urgent task. Kamei and the author have investigated the use of regenerated bassanite obtained by calcinated gypsum separated from waste plasterboard as a geotechnical material (Kamei et al. 2009, Ito et al. 2009). The results indicated that there is an improvement effect soon after mixing into comparatively high-water-content soil materials. In this paper, we report on the results of Ministry of the Environment Notification No. 46 tests, which were carried out to investigate the leaching characteristics of soil improved by bassanite. Unconfined compression tests were carried out to investigate the materialimprovement effect of mixing bassanite as a hardener into high-water-content and high-organic-content soil generated from construction.

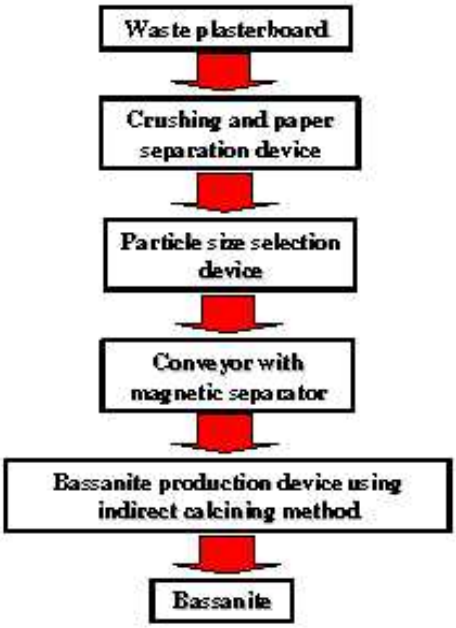
2. OUTLINE OF THE TEST

2.1 Bassanite used in the tests

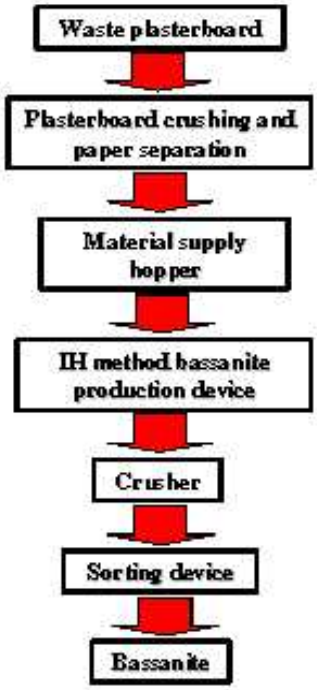
The bassanite used in the tests was produced by the two manufacturing processes shown in Fig. 1. Bassanite calcined by the indirect calcining method ("Bassanite A") was calcined at about 300°C using the kiln type-calcining device, as shown in Photo 1. Bassanite calcined by the IH calcining method ("Bassanite B") was calcined at about 125 to 160°C using the device shown in Photo 2. In addition, in this study, slag cement type B obtained form a blast furnace was used as a comparison material.

2.2 Soil material used in the tests

Two types of soil were used: soil generated from construction in Maebaru City, Fukuoka Prefecture, and in Asagiri-cho, Kumamoto Prefecture. Fig. 2 shows the cumulative particle size distribution of



(a) Indirect calcining method



(b) IH calcining method

Fig. 1 Bassanite reduction process (For colour figure, refer to CD)

Photo.1 Bassanite production device using indirect calcining method (For colour figure, refer to CD)

Photo.2 Bassanite production device using IH method (For colour figure, refer to CD)

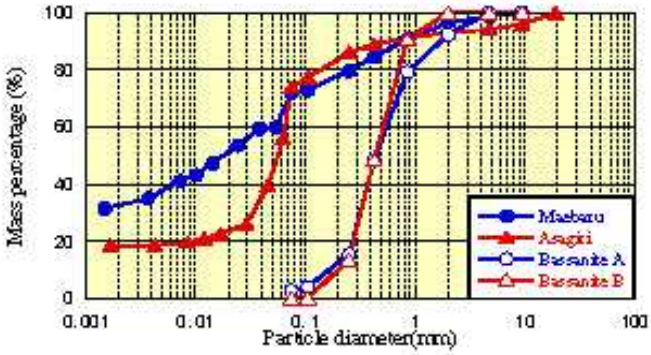


Fig. 2 Cumulative particle size distribution for different materials (For colour figure, refer to CD)
(For colour figure, refer to CD)

the earth materials and Table 1 shows the physical properties of the earth materials. In both earth materials, the percentage of fine particles is high (about 80%), and it can be seen that they consist of

Table.1 Physical properties of soil materials

	Maebaru	Asagiri
Soil particle density(g/cm^3)	2.721	2.370
Initial water content (%)	34.89	76.9
Fine particle content Fc(%)	72.17	74.06
Maximum particle diameter (mm)	4.75	9.5
Uniformity coefficient Uc	-	-
Curvature coefficient Uc´	-	-
Plasticity index Ip	38.54	N.P
Ignition loss (%)	7.7	25.7
Cone index (kN/m^2)	984.53	-

silt and clay. In particular, the earth materials from Maebaru City contains much silt and clay,and its cone index at the natural water content is 984.5 kN/m^2; so it is type 3 construction-generated soil. On the other hand, the construction-generated soil from Asagiri was a muddy soil for which it was not possible to obtain a cone value. It is a volcanic ash clay with an ignition loss of 25.7% and high organic content.

2.3 Test conditions

Table 2 shows the conditions for preparing the test specimens for the unconfined compression tests. For the mechanical property investigation, test specimens prepared under specific conditions were used, and unconfined compression tests were carried out. To prepare the test specimens, the soil material was adjusted to a specific water content, and then the hardener was added. Here, the percentage hardener added is the mass percentage of the soil material. After curing in air for the specific curing period (0, 7, 28 days), the unconfined compression tests were carried out. The method of preparation of the test specimens for unconfined compression tests was to compact by tamping each layer five times with the same energy (E_c = 50 (kJ/m^3)) in a mould with 5 cm diameter and 10 cm height, for a total of four layers. On the other hand, for the Ministry of the Environment Notification No. 46 test, the same material was used as in the mechanical tests, and the concentration of leachate was measured on an assay solution prepared based on the preprocessing procedures of the Ministry of the Environment Notification No. 46 in a spectrophotometer (ICP plasma emission spectrometer).

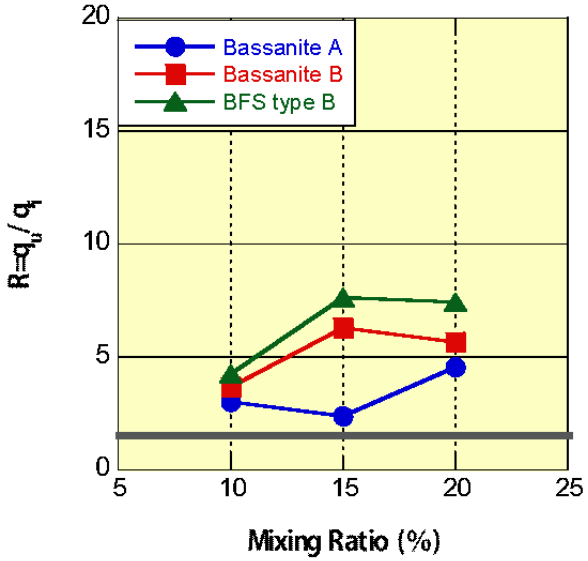
Table.2 Specimens preparation conditions for unconfined compression tests

Soil material	Hardener		Water content (%)
	Type	Percentage added(%)	
Maebaru	Bassanite A	10	40
	Bassanite B		
	Blast furnace slag type B	15	
Asagiri	Bassanite A		80
	Bassanite B	20	
	Blast furnace slag type B		

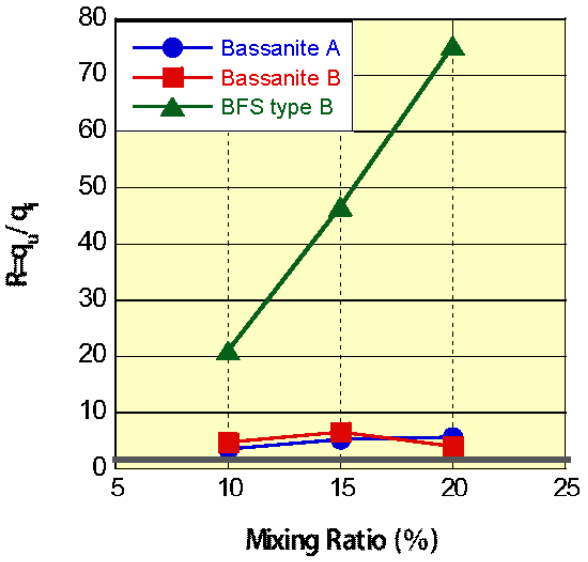
3. TEST RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Unconfined compression test results

In order to quantitatively and clearly show the amount of increase in strength associated with the addition of the hardener, Figs. 3 and 4 show the relationship between the unconfined compressive strength q_u for each hardener content and the strength increase ratio $R = q_u/q_i$ normalized using q_i at 0% hardener content against percentage hardener content. Here, the black line in the figures indicates unimproved soil (R = 1.0). For Maebaru, it can be seen that the after-improvement strength is about the same as for slag cement type B obtained from a blast furnace. On the other hand, after curing for about 28 days, it can be seen that for both bassanites there is an improvement effect of a factor of 2 to 6 compared with the case where hardener is not added. This indicates that in soil improved with bassanite, the strength increase associated with curing is not as large as the increase with cement. On the other hand, in the high-organic-content soil from Asagiri, it can be seen that the improvement effect is of a factor of 0.7 to 3, which is smaller compared with Maebaru. However, with slag cement type B obtained from blast furnace, which showed a large improvement effect with Maebaru soil, the improvement factor was 1 to 2 even after curing. Therefore, there was almost no effect. On the other hand, with bassanite, the strength increased with increase in the number of days of curing, and an improvement factor of about 3 was obtained. Therefore, the strength improvement

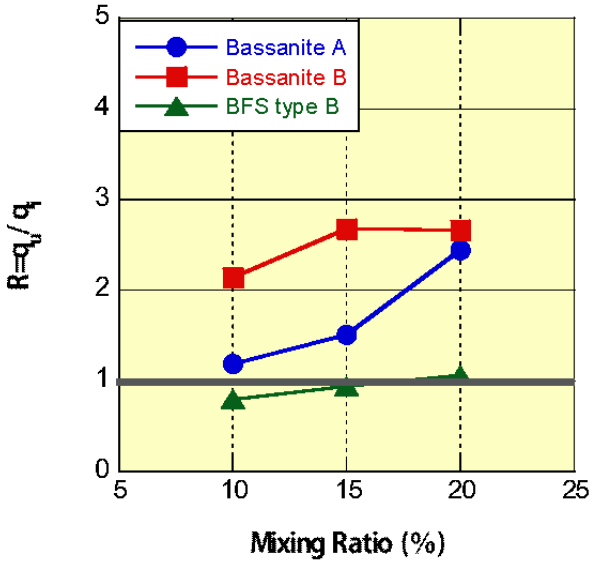


(a) No curing

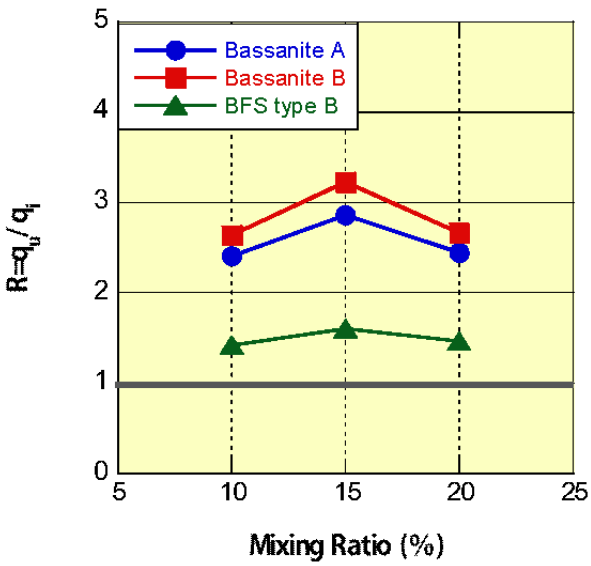


(b) Curing for 28 days

Fig. 3 Relationship between q_u/q_i and hardener percentage (Maebaru) (For colour figure, refer to CD)



(a) No curing



(b) Curing for 28 days

Fig. 4 Relationship between q_u/q_i and hardener percentage (Asagiri) (For colour figure, refer to CD)

was greater than that of cement. From this, it is concluded that bassanite is effective for high-water-content and high-organic-content soils, and a soil improvement effect can be expected. In addition, with 20% hardener added, the strength of the improved soil reduces, which suggests that there is an optimum hardener content for ground improvement.

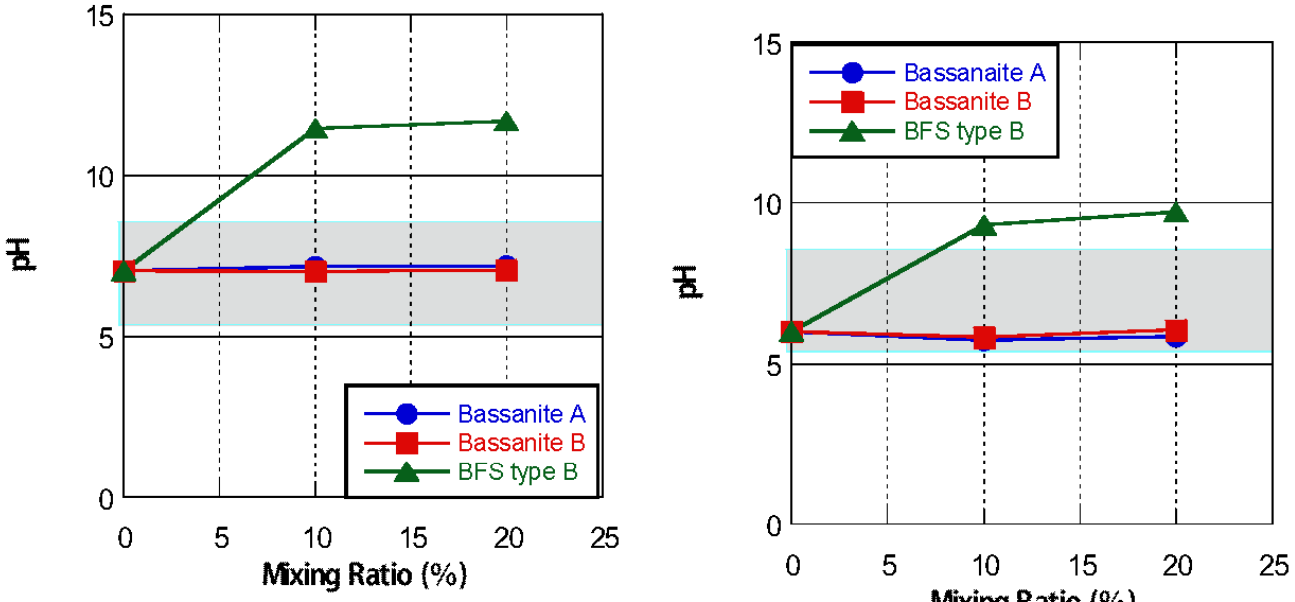
3.2 Results of leaching tests

Table 3 shows the leaching test results on the improved soil after curing for 7 days. From the table, it can be seen that in the results for the two soils and bassanite considered individually,

Table 3 Leaching test results (curing for 7 days)

Soil material	Hardener		pH	B	Cr^{6+}	Cd	Pb
	Type	Percentage					
Maebaru	Bassanite A	10	7.18	0.098	N.D	N.D	N.D
	Bassanite B		7.03	0.069	N.D	0.001	0.004
	BFS type B		11.46	0.074	-	N.D	N.D
	Bassanite A	20	7.2	0.105	N.D	N.D	N.D
	Bassanite B		7.07	0.048	N.D	0.001	0.002
	BFS type B		11.69	0.062	-	N.D	N.D
Asagiri	Bassanite A	10	5.74	0.044	N.D	0.002	0.007
	Bassanite B		5.84	0.144	N.D	0.002	0.004
	BFS type B		9.31	0.024	-	N.D	0.027
	Bassanite A	20	5.86	0.104	N.D	0.001	0.005
	Bassanite B		6.06	0.084	N.D	0.002	0.004
	BFS type B		9.72	0.030	-	N.D	0.009
Environmental criterion value			-	1.00	0.05	0.01	0.01

(mg/l)



(a) Maebaru (b) Asagiri

Fig. 5 Relationship between pH and hardener percentage (curing for 7 days) (For colour figure, refer to CD)

Further, leaching of heavy metals did not exceed the criteria after mixing the materials. Fig. 5 shows the relationship between pH and hardener content. The colored box in the figure indicates the uniform criterion values for waste water[3] (pH = 5.8–8.3). From the figure, it can be seen that the pH of soil improved with bassanite remains in the neutral zone even if hardener content was increased, and the uniform wastewater criterion values were sufficiently satisfied. On the other hand, it can be seen that the pH of soil improved with slag cement type B obtained from blast

furnace increases rapidly as the hardener content is increased, indicating its alkalinity. Therefore, it can be seen that the effect on the surrounding environment of bassanite is smaller compared with normal hardeners.

4. CONCLUSIONS

The following points may be concluded from these tests:

1) Improvement effect for soil improved using bassanite as is equivalent to that obtained with no curing after adding blast furnace slag cement as hardener.

2) A valid improvement effect can be expected with bassanite for high-water-content and high-organic-content soil immediately after generation.

3) Soil improved using bassanite of pH is shown in the neutral zone.

Acknowledgements

We wish to express our gratitude for the cooperation received from members of the "Fukuoka Plasterboard Recycling Research Group" during this research.

REFERENCES

Ito, K., Sato, K. and Oshikata, T. (2009): The Effect of Ground Improvement of High Water Content Soil with Bassanite, *44th Foundation Engineering Research Conference*, pp.431-432. (in Japanese)

Kamei, K., OGAWA, y. and SHIBI, T. (2009), The Effect of Curing Period on the Uniaxial Compression Properties of Cement Stabilized Soil Using Bassanite, *Japanese Geotechnical Journal*, Vol.4, No. 1, 99-105.

3. 伊藤恵輔，佐藤研一，押方利郎

再生半水石膏により改良された土質材料の基本特性の検討

第 45 回地盤工学研究発表会，pp. 96-97，2010 年 8 月

再生半水石膏により改良された土質材料の基本特性の検討

廃石膏ボード　地盤改良材　半水石膏

福岡大学大学院　学生会員　○伊藤恵輔
福岡大学　国際会員　佐藤研一
福岡大学大牟田産学連携推進室　非会員　押方利郎

1.はじめに　石膏ボードは、耐火性、遮音性、機密性、断熱性等の特徴を有しており、経済的にも低廉なことから住宅から超高層ビルまで建築物の種類に限定されない建築材料として幅広く利用されている[1)]。そのため、建築現場からは、新築及び解体時に大量の廃石膏ボードが発生している。しかし、廃石膏ボードの処理処分状況は、一部リサイクルされているものの、大部分は管理型の産業廃棄物最終処分場に処分され、2013年には廃石膏ボードの年間総排出量は約200万トンと言われている[1)]。このような背景から、廃石膏ボードのリサイクル・有効利用が実施されはじめてきている。廃石膏ボードから分離した石膏(二水石膏)を焼成して得られる再生半水石膏は亀井ら[2)3)]の研究によって、締固め材料や地盤改良材として十分に適用できる可能性がある程度明らかになっている。そこで本研究では、廃石膏ボードのリサイクルを推進するため、廃石膏ボードから分離した石膏(二水石膏)を焼成して得られる再生半水石膏を建築用資材(中性固化材)等として有効に利用する技術システムの確立を目指し、研究開発を行っている。本報告では、再生半水石膏により改良された脱水ケーキの①強度・変形特性の検討、②再泥化特性の検討、③透水特性の検討に関する実験的な検討結果について報告する。

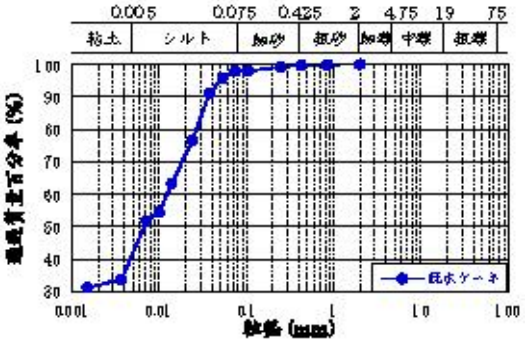


図-1　試料の粒径加積曲線

表-1 試料の物理特性値

物理定数	脱水ケーキ
土粒子密度 ρ_s (g/cm³)	2.52
初期含水比(%)	15.0
細粒分含有率F_c(%)	100.0
塑性指数I_p	21.0
強熱減量(%)	18.4

2.実験概要

2-1 実験に用いた材料　本検討では、建設発生土を洗浄し再利用する過程で発生する脱水ケーキを使用した。**図-1**に試料の粒径加積曲線、**表-1**に試料の物理特性値を示す。脱水ケーキは細粒分含有率が高く、有機物を多く含んでいる材料である。一方、まさ土は粒径幅が広く、粒度分布の良い試料であることがわかる。再生半水石膏には、間接焼成方式で焼成された再生半水石膏を使用した。凡例の記号はそれぞれP：再生半水石膏C：高炉セメントB種を示している。

表-2　配合条件

土質材料	再生半水石膏	補助固化材	
種類	添加率(%)	種類	添加率(%)
脱水ケーキ	10,15	高炉B種	0,3,5

2-2 実験条件　**表-2**に配合条件を示す。本研究では、補助固化材として高炉セメントB種を用いた。まず、各混合材料の締固め試験(A-a法)を行い最大乾燥密度及び最適含水比を求めた(**図-2**)。一軸圧縮試験の供試体については、含水比を最適含水比に調整し、締固め試験結果から締固め密度D (ρ_d/ρ_{dmax})=95%とし、直径 ϕ=5cm、高さ h=10cm のモールドに5層で突き固めて作製した。養生は、恒温室(室温20±2℃)で所定期間(0,7,28,56日)行った。再泥化試験は、一軸圧縮試験と同様の方法で作製した供試体を7日間養生後、蒸留水(1500g)に供試体を水浸させ、1,2,5,10,15,30,60,120,240分;1日,7日後に観察、記録し、**表-3**に示す再泥化区分に従い分類を行った。また、透水試験に関しては、柔壁型変水透水試験(ASTM D 5084)は、ϕ=10cm×h=3cmのモールドに3層に突き固めて供試体を作製し、養生7日間気中養生後、柔壁型変水位透水試験機を用いて測定した。

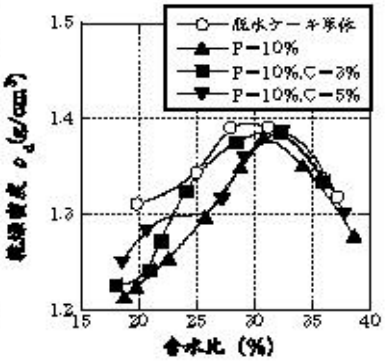


図-2　締固め曲線

表-3　再泥化区分

区分	1	2	3	4	5	6
形状						
状態	変化なし	角が崩れる程度	周囲のひび割れが顕著	再泥化開始	半分が再泥化	完全に再泥化

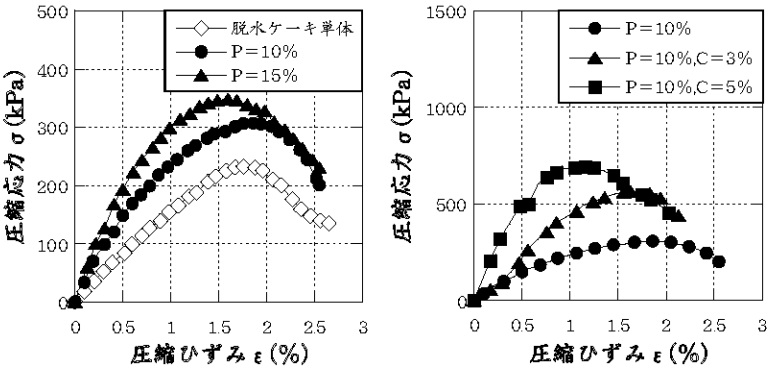
3 実験結果

3-1 強度・変形特性　**図-3(a)**に再生半水石膏のみ添加した材料の7日養生後の一軸圧縮試験結果を示す。いずれの土質材料も半水石膏添加に伴ってせん断強度は増加し、材料の初期剛性の増加も確認できる。しかし、一般的なセメント・石灰改良材ほど大きな材料強度の増加は望めない改良材である事もわかる。**図-3(b)**に再生半水石膏にさらに補助固化材を混合した供試体の一軸圧縮試験結果を示す。

Examination of basic characteristic for bassabite to improvement soil materials

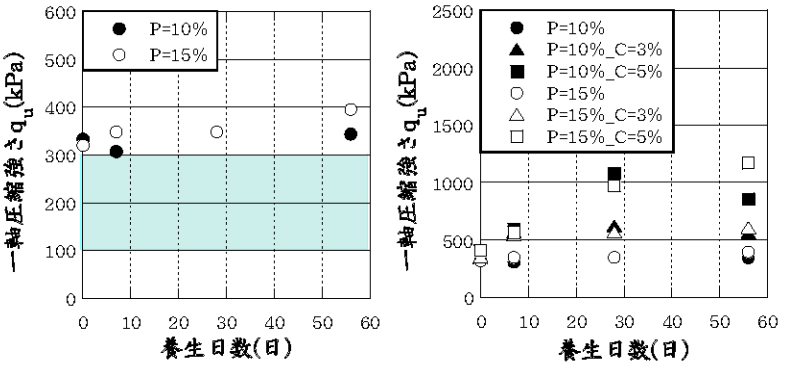
ITO, Keisuke Graduate School, Fukuoka University
SATO, Kenichi Fukuoka University
OSHIKATA Toshiro Omuta Office of Fukuoka University Academic, Industrial and Governmental Liaiosn Center

補助固化材を 5%混合させることによって材料の強度増加が見込める事がわかる。次に、**図-4(a)**に再生半水石膏のみ添加した材料の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。図中の色枠は、一般盛土材の目標強度(q_u=100～300kPa)を示す。土質材料の種類によらず、養生日数の経過に伴う一軸圧縮強さはほぼ一定値を示し、一般盛土材の目標強度も満足していることがわかる。このように半水石膏の添加よる改良効果は、混合直後に土質材料の強度増加が見込まれることがわかる。したがって、施工現場における半水石膏の利用は、早期にトラフィカビリティーが必要な現場に有効的な改良材である。**図-4(b)**に補助固化材を添加した材料の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。補助固化材の効果は、養生7日後において一軸圧縮強さが増加し、養生経過とともに増加している。このことは、改良対象地盤の目標強度の設定をコントロールできることを示している。



(a) 石膏のみ　　(b) 補助固化材あり

図-3　一軸圧縮試験結果(7 日養生)

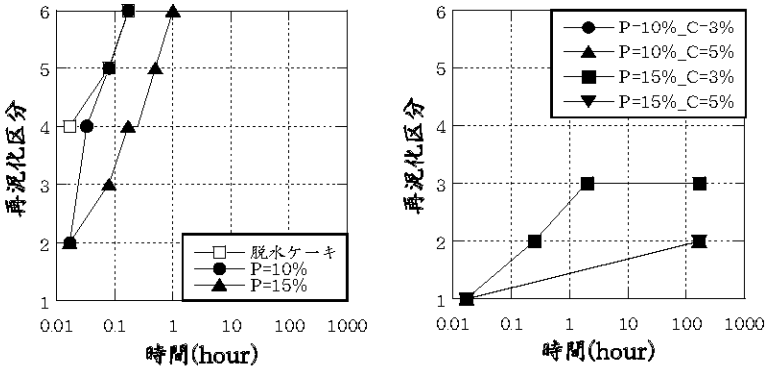


(a) 石膏のみ　　(b) 補助固化材あり

図-4　養生日数と一軸圧縮強さの関係

3-2　再泥化特性　**図-5** に再泥化試験結果を示す。図より、脱水ケーキ単体では、水浸直後に再泥化が開始し、水浸 10 分後には完全に再泥化していることがわかる。再生半水石膏のみ添加した材料では、石膏添加率の増加に伴い、再泥化するまでの時間が増加していることがわかる。また、水浸直後に角が崩れ、水浸 1 日後までには全て再泥化していることがわかる。一方、補助固化材を添加した材料では、周囲にひび割れが見られるものもあったが、水浸 7 日後でも完全な再泥化は見られなかった。したがって、補助固化材として高炉セメント B 種を添加することで再泥化抑制が可能であることが示された。

3-3　透水特性　**図-6** に透水試験結果を示す。図中の色枠は、刃金土の透水係数の目標値である k≦5×10^{-6}cm/s と遮水材の透水係数の目標値である k≦1×10^{-6}cm/s を示す。脱水ケーキに再生半水石膏及び補助固化材を添加した材料は、刃金土及び遮水シートとしての要求性能を十分満たしている。また、補助固化材による影響はほとんどなく、再生半水石膏及び補助固化材を添加した材料は難透水性を示していることがわかる。



(a) 石膏のみ　　(b) 補助固化材添加

図-5　再泥化試験結果

4　結論　実験の結果、以下の結論を得ることができた。

①脱水ケーキに再生半水石膏を混合し、締固めることによって、混合材料の強度を増加させることができる。また、この改良効果は、材料混合直後に発揮され、養生に伴って変化しないことも明らかとなった。②再生半水石膏により改良された脱水ケーキは、一般盛土材の目標強度を満足する。③補助固化材の添加によって、混合材料の強度増加が期待でき、さらに、有効利用時に必要な強度を設定することが可能であることが示された。④再生半水石膏を添加することにより、再泥化しにくくなるが、約 10 時間程度で完全に再泥化してしまう。⑤補助固化材を添加することにより、再泥化が抑制される。⑥脱水ケーキに再生半水石膏及び補助固化材を添加した材料は、刃金土及び遮水シートの要求性能を満たすことができ、難透水性を示す。

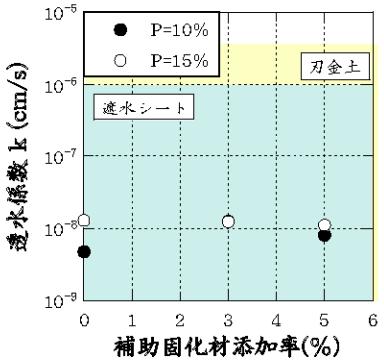


図-6　透水試験結果

謝辞：本研究は、環境省平成 21 年度循環型社会形成推進科学研究費(No.K2144)および文部科学省科学研究費(No.21560527)の一部として実施された研究である。関係各位に心より感謝申し上げます。

【参考文献】1)(社)石膏ボード工業会,　2)亀井ら;半水石膏の地盤改良材としての有効利用，地盤工学ジャーナル，vol.2, No.3, pp.245-252, 2007, 3) 亀井ら;半水石膏を利用したセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす養生期間の影響,地盤工学ジャーナル,Vol.4,No.1,99-105

4. 佐藤研一，押方利郎，伊藤恵輔，大山勝寿，坂本晃一，森田博史

再生半水石膏により改良された土質材料の環境安全性の検討

土木学会平成 22 年度全国大会第 65 回年次学術講演会，pp. 437-438，2010 年 9 月

再生半水石膏により改良された土質材料の環境安全性の検討

福岡大学　正会員　○佐藤研一　正会員　押方利郎
基礎地盤コンサルタンツ（株）　正会員　伊藤恵輔
ふくおか石膏ボードリサイクル研究会　非会員　大山勝寿　坂本晃一　森田博史

1. はじめに　廃石膏ボード処理費用は，管理型処分場への廃棄や高度経済長期の住宅・社会資本の更新に伴う建設副産物排出量の増加により，今後莫大なものになると考えられる．このことから，建築現場から排出される廃石膏ボードのリサイクル・再利用技術の開発がなされている[1),2)]．そこで，廃石膏ボードから分離した石膏を焼成して得られる再生半水石膏の地盤改良材としての有効利用法の検討を進めている[3)]．しかし，再生半水石膏の地盤材料への利用においては，土壌環境基準値を超えるフッ素の溶出が懸念されている．本研究では，環境庁告示 46 号法試験を行い，再生半水石膏を混合した材料における環境安全性の検討を行った結果について報告する．

2. 実験概要

2-1 実験に用いた試料　本研究では，①まさ土，②建設発生土のリサイクル工場から排出される脱水ケーキ，③しらす，④博多粘土，⑤黒ボク，⑥風化土の九州各地で発生し使用が予想される 6 種類の土質材料を使用した．また，再生半水石膏には間接焼成方式で焼成された再生半水石膏(以下，石膏 A)と IH 焼成方式で焼成された再生半水石膏(以下，石膏 B)の 2 種類の再生半水石膏を使用した．さらに，補助固化材として高炉セメント B 種(以下，高炉 B 種)を使用した．**表-1** に物理特性値を，**図-1** に粒径加積曲線を示す．脱水ケーキ，博多粘土，黒ボク及び風化土は細粒分含有率が 70%以上と高く，有機物を多く含んでいる材料である．一方，まさ土としらすは粒径幅が広く，粒度分布の良い試料であることがわかる．

表-1 試料の物理特性値

	まさ土	脱水ケーキ	しらす	博多粘土	黒ボク	風化土	再生半水石膏	
							石膏A	石膏B
土粒子密度 ρ_s(g/cm^3)	2.64	2.62	2.42	2.76	2.39	2.72	2.62	2.61
初期含水比(%)	3.0	15.0	12.0	83.3	22.0	45	-	-
細粒分含有率F_c(%)	34.4	100.0	43.0	90.0	79.9	72.2	-	-
塑性指数I_p	-	21.0	-	41.6	-	38.5	-	-
強熱減量(%)	3.7	18.4	5.6	43.0	23.7	10.9	-	-

2-2 検討内容

検討①：フッ素溶出特性に及ぼす土質材料の影響　**表-2** に配合条件を示す．ここで，石膏の添加率は乾燥状態の土質材料に対する重量比(%)，混水量は，JIS R9112 により規定された石膏の固化に最適な水の量のことで，石膏に対する重量比(%)である[4)]．試料作成方法は，土質材料と石膏と水をミキサーで 1 分間混合攪拌したのち，チャック付の袋に入れ，恒温室(室温 20±2℃) にて所定期間養生(1，7，28 日)を行った．その後，各養生後に環境庁告示 46 号法試験に従い，イオンクロマトによりフッ素(F)の測定を行った．

検討②：締固め固化試料からのフッ素溶出特性　**表-3** に配合条件を示す．ここで試料の配合は絶乾状態の土質材料に対する重量比(%)である．試料作成方法は，含水比を最適含水比に調整し締固め試験結果から締固め密度$D(\rho_d/\rho_{dmax})$=95%となるよう，直径 ϕ=5cm、高さ h =10cm のモールドに 5 層で突き固めて作製した．その後，恒温室(室温 20±2℃)で 28 日間気中養生し，環告 46 号法試験を行いイオンクロマトによりフッ素(F)の測定を行った．

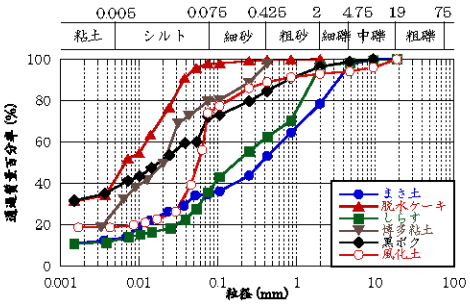


図-1 試料の粒径加積曲線

表-2 配合条件(検討①)

土質材料	半水石膏 種類	半水石膏 添加率(%)	混水量(%)
まさ土 脱水ケーキ しらす 博多粘土 黒ボク 風化土	石膏A	10	143
		15	
		20	
	石膏B	10	116
		15	
		20	

表-3 配合条件(検討②)

土質材料	半水石膏 種類	半水石膏 添加率(%)	補助固化材 添加率(%)
脱水ケーキ	石膏A	10	0
			3
			5
	石膏B	15	0
			3
			5

3. 半水石膏を混合した材料の環境安全性の検討　**表-4** に土質材料及び石膏の溶出試験結果を示す．表より，石膏には土壌環境基準値の 5～6 倍，博多粘土からは土壌環境基準値を超えるフッ素の溶出が確認された．

キーワード　再生半水石膏，地盤改良，土質材料、フッ素，溶出特性
連絡先　〒8140-0180　福岡市城南区七隈 8 丁目 19-1　福岡大学工学部　TEL:092-871-6631

3-1 フッ素溶出特性に及ぼす土質材料の影響　**図-2**に1日養生後の石膏添加率とフッ素溶出量の関係を示す．図より，石膏添加率の増加に伴いフッ素溶出量が増加している．これは，**表-4** に示すようにもともと石膏自体が土壌環境基準値の 5～6 倍に相当するフッ素の溶出が認められることに起因しているものと考えられる．また，土質材料の種類によってフッ素溶出量に違いが見られる．**図-3** に石膏 A 添加率 20%の各土質材料における養生日数とフッ素溶出量の関係を示す．図より，脱水ケーキとまさ土では養生日数の経過に伴いフッ素の溶出量が低下していることがわかる．これに対し，それ以外の土質材料では，養生日数に関係なくフッ素溶出量はほぼ一定値を示している．**図-4** に1日養生後における細粒分含有率F_cとフッ素溶出量の関係を示す．図より，細粒分含有率の増加に伴ってフッ素の溶出量が低下していることがわかる．これは，細粒分がフッ素を吸着したことに起因するものと考えられる．ここで，黒ボクに着目すると，細粒分含有率が100%の脱水ケーキと同等もしくはそれ以上の溶出量の低下が見られる．これは，黒ボクがホウ素やフッ素といった重金属を吸着しやすい性質を持っていることに起因するものと考えられる [5]．これに対し，フッ素を多く溶出する博多粘土は，細粒分含有率が高いにもかかわらず，フッ素溶出量が高いことがわかる．

表-4　試料の溶出試験結果

試料	pH	F(mg/l)
まさ土	6.81	N.D
脱水ケーキ	8.57	0.54
しらす	4.03	N.D
博多粘土	7.71	1.23
黒ボク	6.00	0.56
風化土	5.03	N.D
石膏A	6.97	4.84
石膏B	7.46	5.94
土壌環境基準値	-	0.80

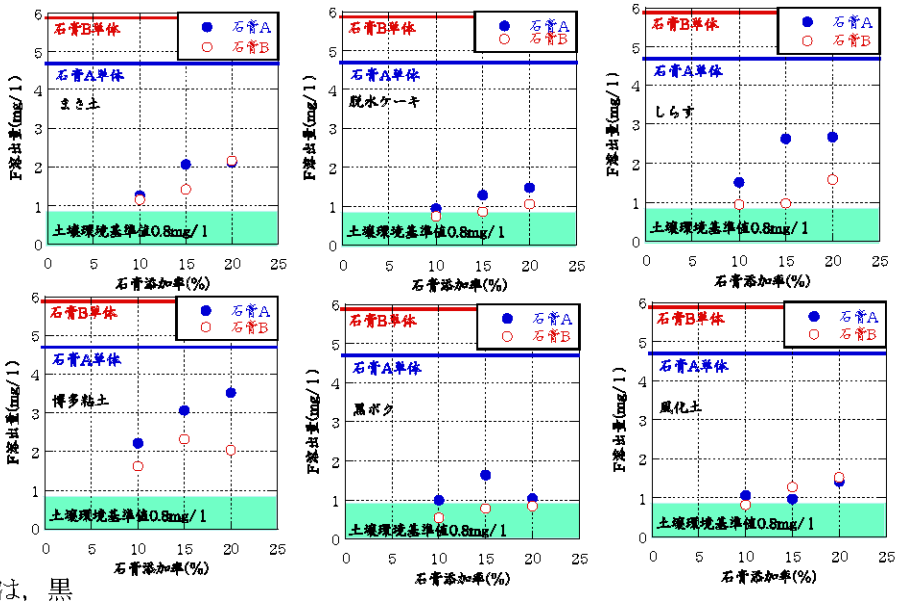


図-2　石膏添加率とフッ素溶出量の関係

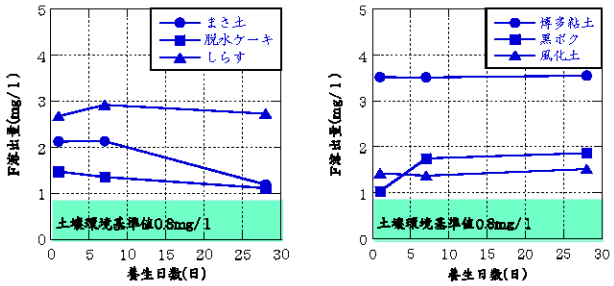


図-3　養生日数とフッ素溶出量の関係(石膏 A:添加率 20%)

3-2 固化試料からのフッ素溶出特性　**表-5**に養生28日後の石膏B 添加率 15%の溶出試験結果を示す．表より，補助固化材を添加したことによりフッ素溶出量が低下していることがわかる．これは，セメント水和鉱物が結晶中に重金属イオンが固定されることに起因するものと考えられる [6]．このことは，補助固化材を添加することによりフッ素の溶出抑制が可能であることを意味している．

表-5　溶出試験結果

土質材料	半水石膏		補助固化材	環告46号法試験	
	種類	添加率(%)	添加率(%)	pH	F(mg/l)
脱水ケーキ	石膏B	15	0	7.85	0.72
			3	11.20	0.64
			5	11.45	0.22
土壌環境基準値				-	0.80

4. 結論　実験行った結果，以下の知見が得られた．①石膏添加率の増加に伴い，改良材からのフッ素溶出量は増加する．②土質材料の違いによってフッ素溶出特性は異なり，細粒分含有率とフッ素の吸着量は高い相関性が見られた．③補助固化材を添加することで，フッ素の溶出抑制が可能である．④試料の養生形態の違いによってフッ素の溶出量に影響は受けない．

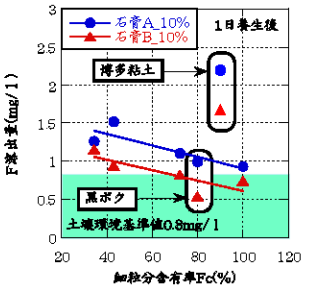


図-4　Fc とフッ素溶出量の関係

謝辞：本研究は、環境省平成 21 年度循環型社会形成推進科学研究費(No.K2144)および文部科学省科学研究費(No.21560527)の一部として実施された研究である。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献 1) 亀井ら:半水石膏の地盤改良材としての有効利用，地盤工学ジャーナル，vol.2, No.3, pp.245-252, 2007.　2) 亀井ら: 廃石膏ボードから再生した半水石膏を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮強さ，地盤工学ジャーナル，vol.2, No.3, pp.237-244 2007　3) 伊藤ら: 半水石膏による高含水比発生土の地盤改良材効果，第 45 回地盤工学研究発表会概要集掲載予定，2010.　4) JIS R 9112 陶磁器型材用せっこうの物理試験方法　5) 杉田創: ホウ素およびフッ素の土壌吸着に関する研究，産業技術総合研究所研究成果報告，2005.　6) 亀井ら: 高炉セメント B 種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発，地盤工学ジャーナル，vol.4, No.1, pp.91-98 2007

5. 武下俊宏，酒田雅央，大山勝寿，森田博史，押方利郎，佐藤研一，樋口壮太郎

リサイクル石膏を混合した土木資材の硫化水素発生に関する研究

第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 197-198，2010 年 11 月

B3-2

リサイクル石膏を混合した土木資材の硫化水素発生に関する研究

○(正)武下俊宏[1)], 酒田雅央[2)], 大山勝寿[3)], 森田博史[4)]
(正)押方利郎[1)], (正)佐藤研一[1)], (正)樋口壯太郎[1)]
1)福岡大学, 2)(株)クリーンセンター, 3)(株)三和興業, 4)(有)大牟田エコクリーン

【1. 緒言】

廃石膏ボードの埋立処分は硫化水素発生問題が顕著化したため次第に規制強化され, 平成18年6月1日以降は石膏ボードから紙を除去した石膏部分についても管理型産業廃棄物とされ, 管理型処分場への埋立処分が義務化された[1)]. 石膏ボード工業会発表の資料[2)]によると, 廃石膏ボードの総排出量は今後増加すると見込まれている. これを新築系解体系の別で見てみると, 新築系廃石膏ボードはリサイクルが進んでいることもあり, 今後排出量は微減すると見込まれている. 一方, 多くの建物が建て替え需要の時期を迎えることから, 今後解体系廃石膏ボードの排出量は増加の一途をたどると見込まれている. 廃石膏ボード排出量の将来的な増加は, 最終処分場の逼迫, 処理コストの上昇, 不法投棄の増加等の懸念材料でもある. しかし, このように廃石膏ボードの将来予測がなされているにもかかわらずリサイクルの実績不足が指摘されており, リサイクル技術開発および用途開発は急務の課題とされている. 本件に関しては, 廃石膏ボードの資源化推進が検討された[3)]ものの, 特定建設資材への追加は見送られた経緯がある.

様々なリサイクル用途が検討されているが, このうちリサイクル石膏を土壌改良材や地盤改良材などの土木資材として使用する場合, 廃石膏ボードの埋立処分において問題となった硫化水素の発生が懸念され, 施工後の安全性について疑問視されてきた. この他, 廃石膏ボードのリサイクルに関しては, アスベストの含有, フッ素の溶出, 重金属やヒ素の含有等, 解決を必要とする課題があるが, ここではリサイクル石膏を混合した試料からの硫化水素発生について検討を行った.

【2. 目的】

本研究は廃石膏ボードから製造されたリサイクル石膏(半水石膏)およびリサイクル石膏を混合した土木資材について硫化水素発生試験方法を検討し, 同方法を用いて硫化水素発生の状況を確認することを目的とした. 本目的のため, 以下の課題について実験を行う.

1. 硫化水素発生試験方法の検討(容易に入手可能な実験器具を用い, リサイクル石膏およびリサイクル石膏を含む土木資材を対象とした硫化水素発生試験方法を検討する).

2. 半水石膏による土壌改良試料の硫化水素発生試験(1. の方法を用いて半水石膏により改良した土壌試料の硫化水素発生試験を行う).

【3. 方法】

図1に石膏試料の硫化水素発生試験方法を検討する手順を示す[4)]. 全容500mlのデュラン瓶に石膏を含む試料50～100gを添加し, さらに実験室の純水製造装置で製造した純水200mlを添加した. 次に高純度窒素ガスを水中に通じ2L/分で1分間曝気しつつヘッドスペースガスを置換した. 置換後はシリコン栓(＃11)で密栓し, 35℃の恒温庫に静置した. リサイクル石膏はA社(ロータリーキルン間接加熱方式), B社(IH加熱方式)提供の試料を用いた.

表1に, 硫化水素発生試験を行った土質材料, 半水石膏の種類と添加率(%), 混水量の組合せ一覧を示す. 以後, 各試料の表記を簡略化するため, 例えばCase1試料の表記は＃1と示す. 各試料は, 混合形成から材令7日目に破砕し, 目開き2mmの篩で篩った篩い下を回収して使用した. なお, 篩い分けした試料は試験に供するまでの間, チャック付きのビニール袋に一時保存した. 植菌は先の実験結果に基づき各試料毎に1.0ml添加した.

硫化水素の発生を確認するため, ヘッドスペースガスを0.005～0.5mlサンプリングし, ヤナコ社製ガスクロマトグラフィーG6800で分析した. なお, 内部に発生した硫化水素ガスの濃度を均一にするため, サンプリングの前に内容物をよくかくはんした.

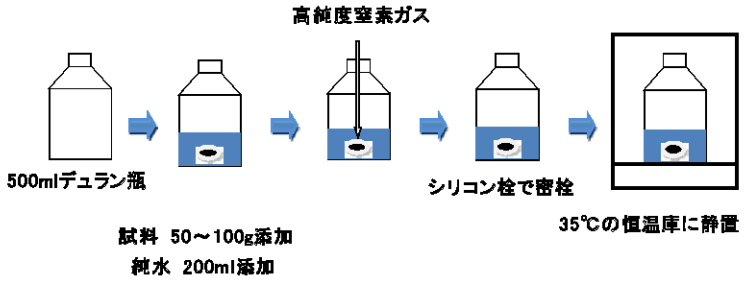


図1 石膏試料の硫化水素発生試験方法の検討手順

【4. 結果と考察】

1. 硫化水素発生試験方法の検討

図1に示す硫化水素発生試験方法を用い, その中に充填する廃石膏試料を 50g, 100g として検討した. 結果, リサイクル石膏試料を100g 添加した場合, 半水石膏製品では添加した水が全て吸収され試料を水没した状態に維持できなくなったことから, 石膏添加量の高い試料についても対応できるよう試料分取量 50g を基準とすることとした.

【連絡先】〒808-0002 福岡県北九州市若松区向洋町 10 福岡大学 資源循環・環境制御システム研究所
武下俊宏 Tel:093-751-9975 Fax:093-751-9976 e-mail:takesita@fukuoka-u.ac.jp
【キーワード】二水石膏, 廃石膏ボード, 半水石膏, リサイクル, 硫化水素

2. 半水石膏による土壌改良試料の硫化水素発生試験

表1. 半水石膏による土壌改良物の種類.

Case #	土質材料	半水石膏		混水量(%)
		種類	添加率(%)	
1	まさ土	石膏A	10	143
2			15	
3			20	
4		石膏B	10	118
5			15	
6			20	
7	脱水ケーキ	石膏A	10	143
8			15	
9			20	
10		石膏B	10	118
11			15	
12			20	
13	しらす	石膏A	10	143
14			15	
15			20	
16		石膏B	10	118
17			15	
18			20	
19	博多粘土	石膏A	10	143
20			15	
21			20	
22		石膏B	10	118
23			15	
24			20	
25	黒ボク	石膏A	10	143
26			15	
27			20	
28		石膏B	10	118
29			15	
30			20	
31	赤土	石膏A	10	143
32			15	
33			20	
34		石膏B	10	118
35			15	
36			20	

表1に示した36種類の試料について図1に示した手法による硫化水素の発生試験を行った. 結果, 硫化水素の発生には, Ⅰ硫化水素ガスが全く発生しない, Ⅱ硫化水素ガスの発生が一時的に確認されるがその後消失する, Ⅲ硫化水素ガスの発生が確認されさらにその濃度が維持される, の3つのパターンがあることが明らかになった(図2). 今回の実験の結果を分類すると, 脱水ケーキ(建設系汚泥)(＃7～12), しらす(＃13～18), 赤土(＃31～36)の試料からは硫化水素ガスの発生は全く認められなかったためⅠに該当した. まさ土(＃1～6), 博多粘土(＃19～24)については硫化水素ガスが全く発生しない試料も見られたが, 硫化水素ガスの発生が一時的に確認されるがその後消失する試料も見られておりⅠおよびⅡに該当した. 黒ボク(＃25～30)については全ての試料について硫化水素ガスの発生が確認され, その濃度が維持される傾向が見られておりⅢに該当した. 硫化水素の発生パターンは土壌の粒度分布, 鉄分の含有量, pH 等の諸条件により, 硫化物生成, ガス吸収, 硫酸塩還元菌の増殖等が影響を受けると考えられるため, 今後より詳細な検討を必要とする.

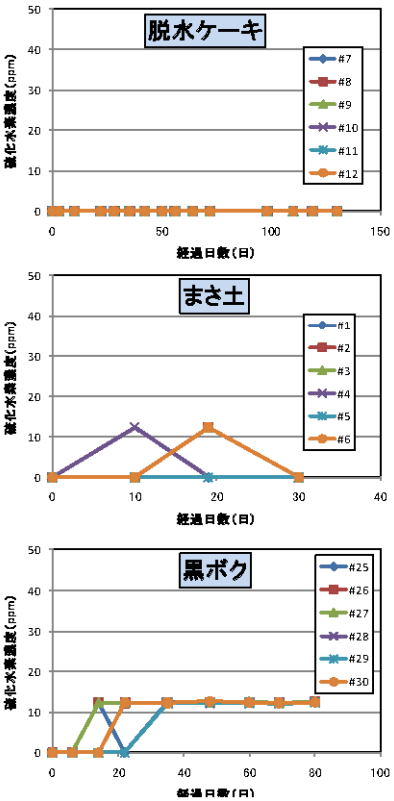


図2. 硫化水素発生試験結果.
(上;脱水ケーキ, 中;まさ土, 下;黒ボク)

表1に示した試料のうち, 石膏Aの添加率の高い＃3, ＃9, ＃15, ＃21, ＃27, ＃33の試料についてはさらに半年間空気接触下に静置し, 図1の方法により硫化水素ガスの発生試験を行った. 結果, 先の実験で硫化水素の発生がみられなかった試料(＃9, ＃15, ＃33)からは硫化水素ガスの発生が確認されなかったが, 先の実験で硫化臭素ガスの発生がみられた試料(＃3, ＃21, ＃27)からも硫化水素ガスの発生は確認されなかった(図3). これは, 半水石膏を土壌と混合し空気接触下で保存したため, 試料に含まれる有機物が好気性微生物により分解されて無機化された為と考えられる. また, この試料を酸素の供給を遮断した環境下においても有機物が少ないため好気性微生物の増殖に伴う酸素の消費が抑制されるため嫌気条件となりにくいことや, 嫌気条件となっても有機物が少ないため硫酸塩還元菌による硫化水素の発生が抑制される等の理由が考えられる.

本研究により, リサイクル石膏と土壌を混合して空気との接触期間を十分に設定した試料からは硫化水素の発生は認められなかったことから, 石膏混合資材に対しても十分な空気接触と養生期間を設定することが硫化水素発生対策となりうる可能性が示された.

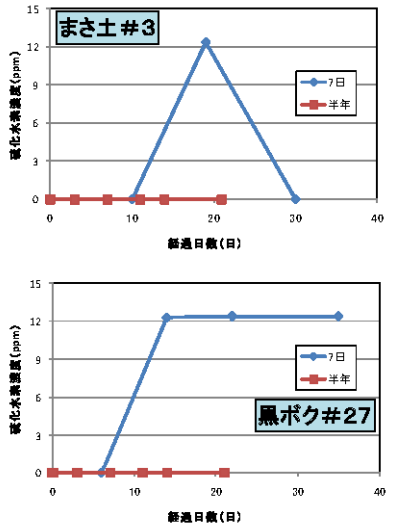


図3. 硫化水素発生試験結果.
(上;まさ土＃3, 下;黒ボク＃27)

【5. 謝辞】

本研究は平成21年度 循環型社会形成推進科学研究費補助金「石膏ボードリサイクル技術の総合化に関する研究(K2144)」により行われた. また, 実験に使用した各種試料は「ふくおか石膏ボードリサイクル研究会」の厚意により供されたものである. ここに記して感謝の意を表す.

【6. 引用文献等】

1) 環境省 HP, 廃石膏ボードから付着している紙を除去したものの取扱について(通知).
2) 社団法人石膏ボード工業会, 廃石膏ボードの対応策について(2010年5月).
3) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部, 平成20年度廃石膏ボードの再資源化促進方策検討業務調査報告書(平成21年3月).
4) 武下 他, リサイクル石膏を用いた土木資材の硫化水素発生試験方法の検討と安全性評価, 第31回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, 104-106, (2010.1).

6. 佐藤研一，押方利郎，武下俊宏

再生半水石膏により改良された土質材料の力学・溶出特性

第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 201-202，2010 年 11 月

B3-4

再生半水石膏により改良された土質材料の力学・溶出特性

○（正）佐藤研一[1)]、押方利郎[2)]、武下俊宏[1)]
1)福岡大学工学部、2)福岡大学研究推進部

1. はじめに　本研究は、廃石膏ボードのリサイクルを推進するため、廃石膏ボードから分離した石膏(二水石膏)を焼成して得られる再生半水石膏を建築用資材(中性固化材)等として有効に利用する技術システムの確立を目指し、研究開発を行っている。本報告では、再生半水石膏により改良された脱水ケーキの①強度・変形特性の検討、②再泥化特性の検討、③環境・安全性に関する実験的な検討結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 力学特性の検討　土質材料は、建設発生土を洗浄し再利用する過程で発生する脱水ケーキを使用した。**表-1** に試料の物理特性値を示す。脱水ケーキは細粒分含有率が高く、有機物を含んでいる材料である。再生半水石膏には、間接焼成方式で焼成された再生半水石膏を使用した。また、補助固化材として高炉セメントB種を用いている。凡例の記号はそれぞれP：再生半水石膏 C：高炉セメントB種を示している。**表-2** に材料の配合条件を示す。まず、各混合材料の締固め試験(A-a 法)を行い最大乾燥密度及び最適含水比を求めた。一軸圧縮試験の供試体については、含水比を最適含水比に調整し、締固め試験結果から締固め密度 D (ρ_d/ρ_{dmax})=95%とし、直径 ϕ=5cm、高さ h=10cm のモールドに5層で突き固めて作製した。養生は恒温室(室温 20±2℃)で所定期間(0,7,28,56 日)行った。再泥化試験は、一軸圧縮試験と同様の方法で作製した供試体を7日間養生後、蒸留水(1500g)に供試体を水浸させ、1 ,2 ,5 ,10 ,15 , 30 , 60 ,120 ,240 分,1 日,7 日後に観察、記録した。結果の整理は**表-3** に示す再泥化区分に従い行った。

表-1 試料の物理特性値

物理定数	脱水ケーキ
土粒子密度 ρ_s(g/cm^3)	2.62
初期含水比(%)	15.0
細粒分含有率F_c(%)	100.0
塑性指数I_p	21.0
強熱減量(%)	18.4

表-2　配合条件

土質材料	再生半水石膏	補助固化材	
種類	添加率(%)	種類	添加率(%)
脱水ケーキ	10,15	高炉B種	0,3,5

表-3　再泥化区分

区分	1	2	3	4	5	6
形状						
状態	変化なし	角が崩れる程度	周囲のひび割れが顕著	再泥化開始	半分が再泥化	完全に再泥化

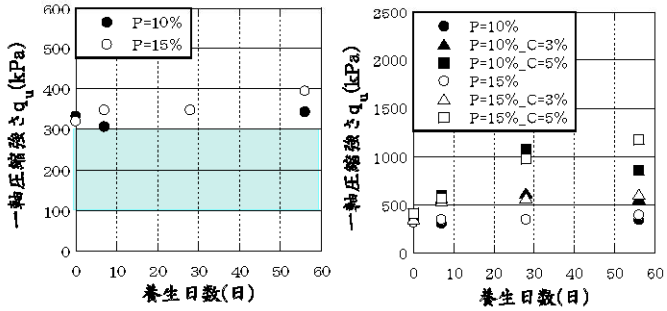
2-2 環境安全性の検討　フッ素の溶出特性は、①まさ土、②建設発生土のリサイクル工場から排出される脱水ケーキ、③しらす、④博多粘土、⑤黒ボク、⑥風化土の九州各地で発生し使用が予想される6種類の土質材料を使用した。再生半水石膏には間接焼成方式で焼成された再生半水石膏(以下、石膏 A)と IH 焼成方式で焼成された再生半水石膏(以下、石膏 B)の 2 種類の再生半水石膏を使用した。**表-4** に配合条件を示す。ここで、石膏の添加率は乾燥状態の土質材料に対する重量比(%)、混水量は、JIS R 9112 により規定された石膏の固化に最適な水の量のことで、石膏に対する重量比(%)である[1)]。試料作成方法は、土質材料と石膏と水をミキサーで1分間混合攪拌したのち、チャック付の袋に入れ、恒温室(室温 20±2℃) にて所定期間養生(1、7、28 日)を行った。その後、各養生後に環境庁告示 46 号法試験に従い、イオンクロマトによりフッ素(F)の測定を行った。

表-4 配合条件(検討①)

土質材料	半水石膏		混水量(%)
	種類	添加率(%)	
まさ土 脱水ケーキ しらす 博多粘土 黒ボク 風化土	石膏A	10	143
		15	
		20	
	石膏B	10	116
		15	
		20	

3. 実験結果及び考察

3-1 力学特性　**図-1 (a)** に再生半水石膏のみ添加した材料の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。図中の色枠は、一般盛土材の目標強度(q_u=100～300kPa)を示す。土質材料の種類によらず、養生日数の経過に伴う一軸圧縮強さはほぼ一定値を示し、一般盛土材の目標強度も満足していることがわかる。このように半水石膏の添加よる改良効果は、混合直後に土質材料の強度増加が見込まれることがわかる。**図-1 (b)** に補助固化材を添加した材料の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。補助固化材の効果は、養生7日後において一軸圧縮強さが増加し、養生経過とともに増加している。このことは、改良対象地盤の目標強度の設定をコントロールできることを示している。

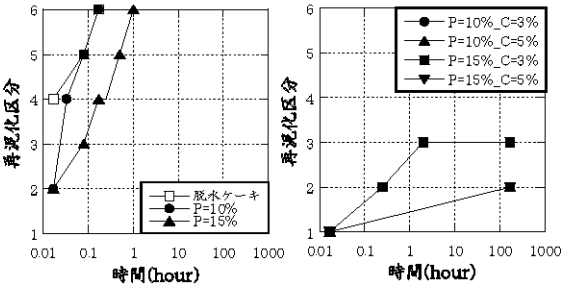


(a)石膏のみ　(b)補助固化材あり

図-1　養生日数と一軸圧縮強さの関係

【連絡先】〒814-0180　福岡市城南区七隈 8-19-1　福岡大学工学部社会デザイン工学科
佐藤研一　Tel：092-871-6631　FAX：092-865-6031　e-mail：sato@fukuoka-u.ac.jp
【キーワード】半水石膏、溶出試験、一軸圧縮試験

3-2　再泥化特性　**図-2** に再泥化試験結果を示す。図より、脱水ケーキ単体では、水浸直後に再泥化が開始し、水浸 10 分後には完全に再泥化していることがわかる。再生半水石膏のみ添加した材料では、石膏添加率の増加に伴い、再泥化するまでの時間が増加していることがわかる。また、水浸直後に角が崩れ、水浸 1 日後までには全て再泥化していることがわかる。一方、補助固化材を添加した材料では、周囲にひび割れが見られるものもあったが、水浸 7 日後でも完全な再泥化は見られなかった。したがって、補助固化材として高炉セメントB種を添加することで再泥化抑制が可能であることが示された。



(a)石膏のみ　(b)補助固化材添加

図-2　再泥化試験結果

表-5　試料の溶出試験結果

試料	pH	F(mg/l)
まさ土	6.81	N.D
脱水ケーキ	8.57	0.54
しらす	4.03	N.D
博多粘土	7.71	1.23
黒ボク	6.00	0.56
風化土	5.03	N.D
石膏A	6.97	4.84
石膏B	7.46	5.94
土壌環境基準値	-	0.80

3-3　半水石膏を混合した材料の環境安全性の検討　**表-5** に試料の溶出試験結果を示す。表より、石膏には土壌環境基準値の 5～6 倍、博多粘土からは土壌環境基準値を超えるフッ素の溶出が確認された。**図-3** に1日養生後の石膏添加率とフッ素溶出量の関係を示す。図より、石膏添加率の増加に伴いフッ素溶出量が増加している。これは、**表-5** に示すようにもともと石膏自体が土壌環境基準値の 5～6 倍に相当するフッ素の溶出が認められることに起因しているものと考えられる。また、土質材料の種類によってフッ素溶出量に違いが見られる。**図-4** に石膏 A 添加率 20%の各土質材料における養生日数とフッ素溶出量の関係を示す。図より、脱水ケーキとまさ土では養生日数の経過に伴いフッ素の溶出量が低下していることがわかる。これに対し、それ以外の土質材料では、養生日数に関係なくフッ素溶出量はほぼ一定値を示している。**図-5** に 1 日養生後における細粒分含有率 F_cとフッ素溶出量の関係を示す。図より、細粒分含有率の増加に伴ってフッ素の溶出量が低下していることがわかる。これは、細粒分がフッ素を吸着したことに起因するものと考えられる。ここで、黒ボクに着目すると、細粒分含有率が 100%の脱水ケーキと同等もしくはそれ以上の溶出量の低下が見られる。これは、黒ボクがホウ素やフッ素といった重金属を吸着しやすい性質を持っていることに起因するものと考えられる[2)]。一方、フッ素を多く含有している博多粘土は、細粒分含有率が高いにもかかわらず、フッ素溶出量が高いことがわかる。

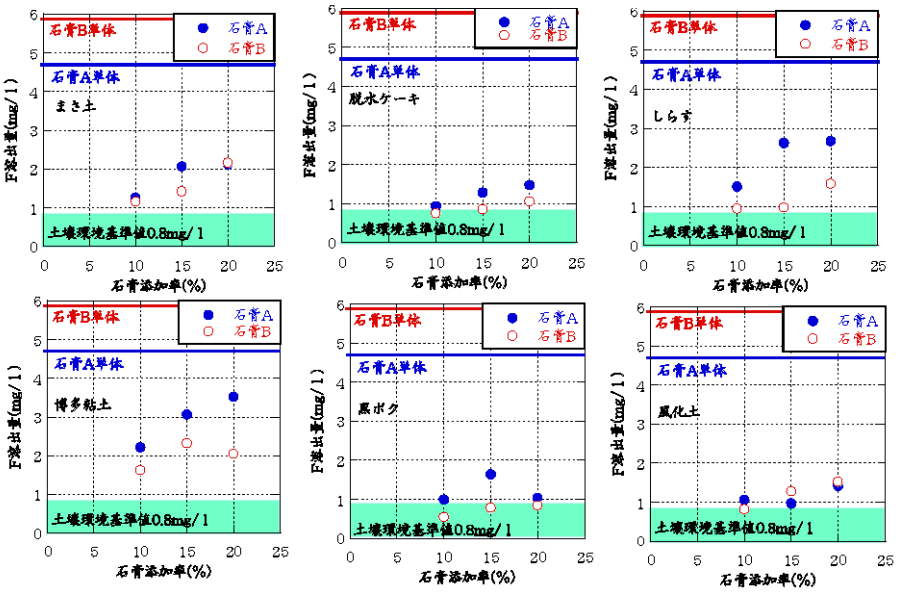


図-3　石膏添加率とフッ素溶出量の関係

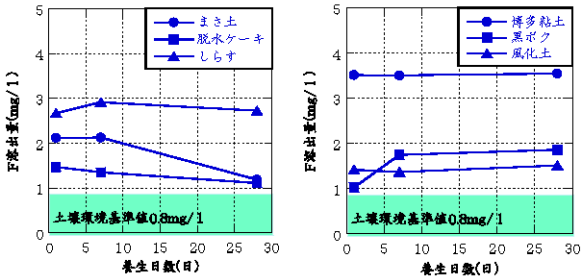


図-4　養生日数とフッ素溶出量の関係(石膏 A:添加率 20%)

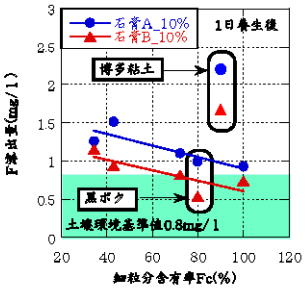


図-5　Fc とフッ素溶出量の関係

4. 結論　①脱水ケーキに再生半水石膏を混合し、締固めることによって、混合材料の強度を増加させることができる。また、改良効果は、材料混合直後に発揮され、養生に伴って変化しない。②再生半水石膏を添加することにより、再泥化しにくくなるが、約 10 時間程度で完全に再泥化してしまう。また補助固化材の添加は、再泥化を抑制することができる。③土質材料の違いによってフッ素溶出特性は異なり、細粒分含有率とフッ素の吸着量は高い相関性が見られた。

謝辞　本研究は、環境省平成 21 年度循環型社会形成推進科学研究費(No. K2144)および文部科学省科学研究費(No. 21560527)の一部として実施された研究である。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献 1) JIS R 9112 陶磁器型材用せっこうの物理試験方法,　2) (独)産業技術総合研究所地圏成資源環境研究部門研究成果報告誌 GreenReport ,2005.

7.吉田英史，松崎裕太，佐藤研一，押方利朗，武下俊宏，大山勝寿，森田博史

再生半水石膏を用いた軟弱地盤改良におけるフッ素溶出特性

平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会，pp．351-352，2011 年 3 月

再生半水石膏を用いた軟弱地盤改良におけるフッ素溶出特性

福岡大学　学生会員　○吉田英史　松崎裕太
福岡大学　正会員　佐藤研一　押方利郎　武下俊宏
ふくおか石膏ボードリサイクル研究会　非会員　大山勝寿　森田博史

1. はじめに　平成 18 年の環境省からの通達により、安定型最終処分場への廃石膏ボードの埋立が禁止され、紙と石膏に分離して管理型最終処分場に処分することが義務付けられた[1]。この動きに伴う処理費用増加、民間処分場の多くが受入を拒否し、埋立場所を十分に確保できない等の問題から、紙と分離した二水石膏を焼成して得られる再生半水石膏の再利用技術の研究[2),3)]が進められている。しかしながら、有効利用の促進では、再生半水石膏に含有するフッ素の溶出量が土壌環境基準値を上回る場合があることから、フッ素の溶出を抑制させる研究が必要不可欠である。本研究では、昨年度までに半水石膏を用いた地盤改良材としての適用性の検討を行ってきた[4)]。その結果、補助固化材として、高炉セメントＢ種を添加することで力学・溶出特性を満足し、締固め材料や地盤改良材として十分に適用出来る知見を得た。そこで本年度は含水比と再生半水石膏添加量に着目し、**図-1** に示すフローチャートに従って、浅層混合処理工法を想定した軟弱地盤の地盤改良材の環境安全性の検討を行った結果について報告する。

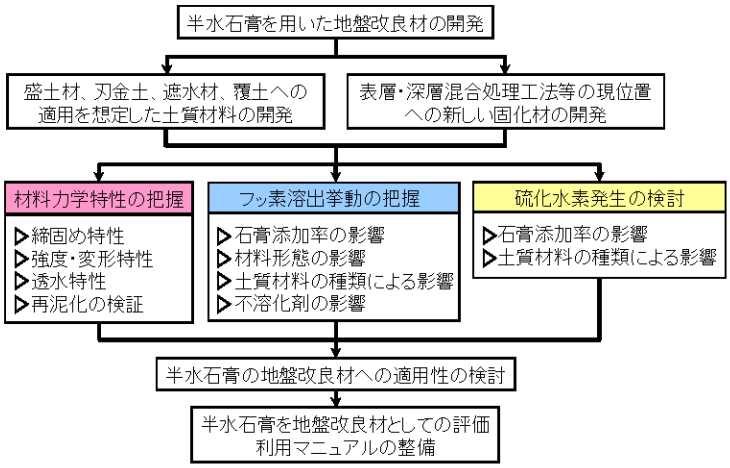


図-1 本研究のフローチャート

2. 実験概要

2-1　実験に用いた試料　実験には、土質材料として福岡市内で採取した博多粘土を 2mm ふるいで通過したものを使用した。また、固化材として IH 式半水化装置（焼成温度 125～160℃）で焼成された再生半水石膏、補助固化材として高炉セメントＢ種を、助材として石炭灰を使用した。**表-1** に用いた試料単体の溶出試験結果を示す。**表-1** より博多粘土、再生半水石膏、石炭灰自体には、土壌環境基準値を大きく上回るフッ素が含有されていることが分かる。また pH に着目すると、半水石膏は中性固化材としての特徴を示していることが分かる。

表-1　試料の溶出特性

試料	博多粘土	再生半水石膏	石炭灰	土壌環境基準値
pH	8.08	7.46	9.93	-
F(mg/l)	1.21	5.94	3.41	0.80

表-2　配合条件（高炉セメントＢ種添加）

土質材料	含水比(%)	再生半水石膏 (kg/m^3)	高炉セメントB種 (kg/m^3)	養生日数 (day)
博多粘土	80 100 120	75 150	35 45 55 65 75	7 28

表-3　配合条件（高炉セメントＢ種＋石炭灰添加）

土質材料	含水比(%)	再生半水石膏 (kg/m^3)	高炉セメントB種 (kg/m^3)	石炭灰 (kg/m^3)	養生日数 (day)
博多粘土	80	75	40	10	7
	100	75	45		
		150	40	20	
	120	75	50		
		150	45	30	

2-2　実験方法　溶出試験用の試料は、**表-2** に示す高炉セメントＢ種を添加した際の配合条件、**表-3** に示す石炭灰を添加した際の配合条件で混合した後の試料を養生し、一軸圧縮強度を測定した後の破壊断片を回収したものを使用した。破壊断片をプラスチックハンマーで破砕し、2mm 篩を通過させ、**表-4** に示す溶出条件に従い、環告 46 号法試験に準拠した方法で溶出試験を行った。そして、得られた検液はイオンクロマトグラフにより測定した。

表-4　溶出条件

試料	L/S	振とう時間	設定pH
混合試料	10	6	5.8～6.3

3. 実験結果及び考察

3-1　高炉セメントＢ種添加によるフッ素溶出挙動　**図-2(a)～(e)** にそれぞれの改良材添加量のフッ素溶出濃度及びpHの関係を示す（色枠はフッ素の土壌環境基準値を示している）。フッ素溶出濃度は、全ての条件においてセメント添加量

が増加するにつれて漸次低下していることがわかる。亀井ら[3]は、高炉セメントB種の水和反応により生成するエトリンガイトにフッ素イオンを固定させることで、半水石膏からのフッ素の溶出を抑制できる事を報告している。このことから、同様なフッ素溶出抑制効果が発生したと推察できる。また、再生半水石膏添加量に着目すると、再生半水石膏添加量の増加に伴い溶出濃度が増加していることがわかる。これは、先述したように再生半水石膏自体に含まれるフッ素が土壌環境基準値を大きく上回っていることに起因していると考えられる。次に含水比の変化に着目すると、設定含水比が高含水比の条件へと推移するにつれて溶出濃度が減少していることがわかる。**図-2(a), (b)**の条件については、顕著に溶出濃度が低下している値が確認できる。また、養生日数に着目すると、養生7日と養生28日は同程度の値を示していることから、改良直後においてフッ素の溶出は抑制され、その後も抑制されることが示唆される。また、pHの値は養生とともに低下している。今後厳しい環境条件下での溶出濃度の変化も検討していく予定である。

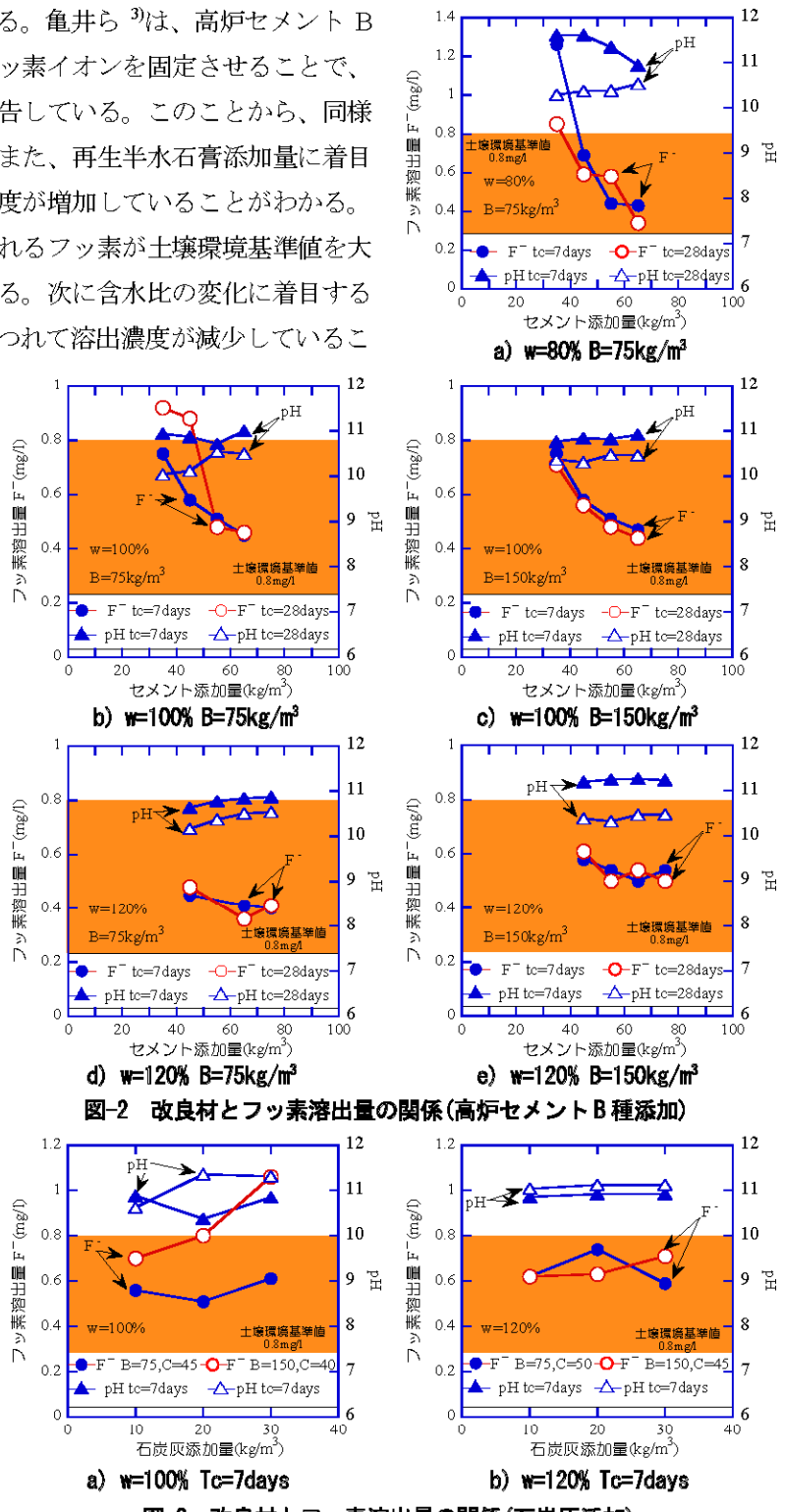


図-2　改良材とフッ素溶出量の関係(高炉セメントB種添加)

3-2　石炭灰添加によるフッ素溶出挙動　**図-3(a), (b)**にそれぞれの石膏添加量と含水比の影響によるフッ素溶出濃度とpHの関係を示す。pHに着目すると、石炭灰を添加しても大きなpHの変動は見られず、全ての条件において弱アルカリ性を呈していることがわかる。一方、フッ素溶出濃度については、石炭灰を添加することでフッ素溶出濃度も増加していることがわかる。これは先述したように石炭灰自体に含有しているフッ素による影響であることが考えられる。しかし、フッ素の土壌環境基準値を満足する結果も確認できるため、フッ素が溶出しない石炭灰添加量を定めることで長期的に強度発現効果の望める石炭灰を実地盤にも適用できる可能性があると示唆される。

図-3　改良材とフッ素溶出量の関係(石炭灰添加)

4. まとめ　再生半水石膏を用いた地盤改良材の環境安全性の検討を行った結果、軟弱地盤を想定した際のフッ素溶出濃度は、再生半水石膏添加量と含水比が大きく影響することが判明した。また、水密性と長期強度発現効果を有する石炭灰の利用可能性も示した。今後、再生半水石膏を用いた地盤改良材からの硫化水素ガス発生特性についても検討していく予定である。

謝辞　本研究は、環境省平成21年度循環型社会形成推進科学研究費(No.K2144)および文部科学省化学研究費(No.21560527)の一部として実施された研究である。関係各位に心より感謝申し上げます。

【参考文献】1) 社団法人石膏ボード工業会、http://www.gypsumboard-a.or.jp/index.shtml 2) 亀井ら:半水石膏の地盤改良材としての有効利用，地盤工学ジャーナル，vol.2, No.3, pp.245-252, 2007. 3) 亀井ら;高炉セメントB種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発，地盤工学ジャーナル, vol.4, No.1, pp.91-98 2007. 4) 佐藤ら：再生半水石膏を用いた地盤改良効果と環境安全性の検討，第9回地盤改良シンポジウム論文集，pp.81-86, 2010年

8. 松崎裕太，吉田英史，佐藤研一，藤川 拓朗，押方利朗，廣田武次，山崎伸幸

再生半水石膏による軟弱地盤改良技術の検討

平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会，pp. 353-354，2011 年 3 月

再生半水石膏による軟弱地盤改良技術の検討

福岡大学工学部　学生会員　松﨑裕太　吉田英史
福岡大学工学部　正会員　佐藤研一　藤川拓朗　押方利郎
㈱E-マテリアル　非会員　廣田武次
㈲エコ・プランナーズ　非会員　山崎伸幸

1. はじめに　建築物や住宅の解体によって発生する廃石膏ボードの排出量は年々増加しており、2013年には約200万トンになると予測されている[1)]。一方、廃石膏ボードは安定型処分場で処分されていたが、平成18年度以降、管理型最終処分場で紙と石膏に分離して処分するように義務付けられた。このような現状から、処分費用の高騰や容量不足に関する問題が指摘され、廃石膏ボードのリサイクル技術の開発が急務とされている。そこで本研究では、再生半水石膏を用いて、特に軟弱地盤の浅層混合処理の固化材料の開発を行うことを目的とし、実験的な検討を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2-1　実験に用いた試料　実験には、土質材料として福岡市内で採取した博多粘土を2mmふるいで通過させたものを使用した。固化材にはIH式石膏半水化装置(焼成温度約 125～160℃)で焼成された再生半水石膏、補助固化材として高炉セメントB種、助材として石炭灰を使用した。**図-1**に各試料の粒径加積曲線を、**表-1**に各試料の物理特性値を示す。**図-1、表-1**より、博多粘土は強熱減量が9.79(%)と有機質土であることが分かる。また、博多粘土と石炭灰は、シルト分、再生半水石膏は、砂分で構成されており、石炭灰は他の試料に比べ、粒子密度が低いことが分かる。

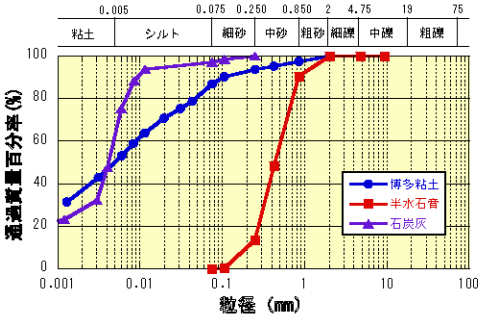


図-1　各試料の粒径加積曲線

表-1　各試料の物理特性値

	博多粘土	半水石膏	助材
初期含水比 w (%)	52.5	−	−
粒子密度 ρs(g/cm³)	2.737	2.951	2.263
細粒分含有率 Fc(%)	86.90	0.030	97.2
液性限界 w_L(%)	79.65	−	−
塑性限界 w_P(%)	30.94	−	−
塑性指数 Ip(%)	48.71	−	−
強熱減量 (%)	9.79	−	−

2-2　実験方法　**表-2～4**に示す配合条件により安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法[2)]に準じて供試体を作製し、一軸圧縮試験を行った。各固化材及び助材の添加量は、土質材料に対する重量比から算出した。各条件にそれぞれ3本ずつ供試体を作製し、所定期間、恒温室(20℃±2℃)で気中養生した。

表-2　配合条件（半水石膏添加）

設定含水比 w (%)	半水石膏添加量 B (kg/m³)	養生日数 Tc (day)
65 70 75 80 85 90 95 100	50 75 100 150	3

2-3　検討方法　1)博多粘土に半水石膏を混合し、粘土の設定含水比と半水石膏添加量による影響から力学特性を把握する(**表-2**)。2)軟弱地盤の浅層混合処理材料の開発を行うため、改良された地盤の目標一軸圧縮強度[3)]である300(kN/m²)を満たす補助固化材の最低添加量の検討を行う(**表-3**)。3) 2)で得られた最低添加量を基に水密性と長期強度の向上を目的とし、石炭灰を添加する(**表-4**)。

表-3　配合条件（半水石膏＋補助固化材）

設定含水比 w (%)	半水石膏添加量 B (kg/m³)	補助固化材添加量 c (kg/m³)	養生日数 Tc (day)
80 100 120	75 150	35 45 55 65 75	7

3. 実験結果及び考察

3-1　再生半水石膏による改良効果の検討　**図-2**に含水比と一軸圧縮強さの関係を示す。設定含水比の増加及び半水石膏添加量の低下に伴い一軸圧縮強さが低下していることが分かる。また、今回の全ての条件において、一般的に汚泥と判断される50(kN/m²)以下の強度[4)]発現しか示さないことが明らかとなった。特にw=100 (%)の条件においては、硬化作用が発揮したのは、半水石膏添加量150(kg/m³)の場合であり、石膏による硬化作用には対象土の設定含水比に大きく依存しており、半水石膏添加量に対する限界含水比が存在することが分かる。

表-4　配合条件（半水石膏＋補助固化材＋助材）

設定含水比 w (%)	半水石膏添加量 B (kg/m³)	補助固化材添加量 c (kg/m³)	助材添加量 F (kg/m³)	養生日数 Tc (days)
100	75	45	10 20 30	7
	150	40		
120	75	50		
	150	45		

3-2　補助固化材（高炉セメントＢ種）による改良効果の検討　**図-3** に補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係を示す。補助固化材を添加することにより、半水石膏のみの強度発現と比べ、補助固化材の添加量の増加に伴い、大きな強度発現を示すことが分かる。さらに、全ての条件において相関係数 R=0.9 を上回っていることから高い相関性が認められる。そして、軟弱地盤の浅層混合処理の固化材料により改良された地盤の目標一軸圧縮強度である 300(kN/m^2)を満たす補助固化材の最低添加量を推測することができる。**表－4** に補助固化材の最低添加量の検討結果を示す。設定含水比の変化について着目すると、含水比の増加に伴い、一軸圧縮強度が低下し、補助固化材の最低添加量が増加していることが分かる。これは、含水比の増加に伴い、水セメント比が高くなるためであると考えられる。また、半水石膏添加量の変化に着目すると、半水石膏添加量が増加するに伴い、半水石膏の凝結硬化作用が働き、補助固化材の最低添加量も減少することが明らかとなった。

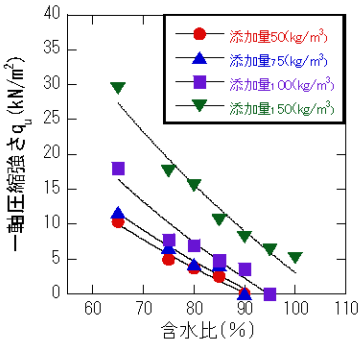
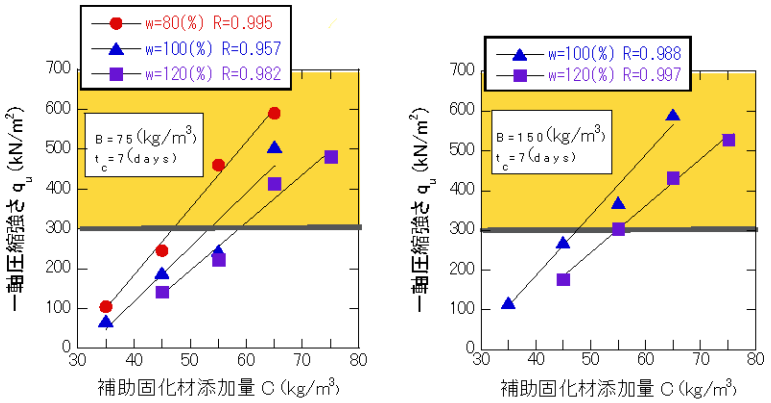


図-2　含水比と一軸圧縮強さの関係



(a) B=75(kg/m^3)　　**(b) B=150(kg/m^3)**

図-3　補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係

3-3　助材（石炭灰）による改良効果の検討

図-4 に一軸圧縮試験結果、**図-5** に助材添加量と一軸圧縮強さの関係を示す。図に示すように、助材の添加量が増加するに伴い初期剛性と一軸圧縮強さが低下していることが分かる。また、その傾向は半水石膏添加量が多く、補助固化材添加量が少ない方が顕著である。助材の添加量の増加に伴い一軸圧縮強度が低下したのは、石炭灰がシルト分で構成されていることに起因していると考えられる。しかしながら、石炭灰の主成分はシリカとアルミナであり、水酸化カルシウムとボゾラン反応を起こすことにより、長期的に密実な構造となるので、長期強度の上昇が推察できる。

表－4　補助固化材の最低添加量検討結果

設定含水比 (%)	半水石膏添加量 B (kg/m^3)	補助固化材最低添加量 C (kg/m^3)
80	75	47
100	75	54
	150	48
120	75	59
	150	55

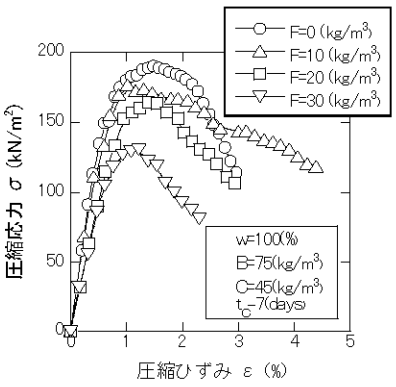


図-4　一軸圧縮試験結果

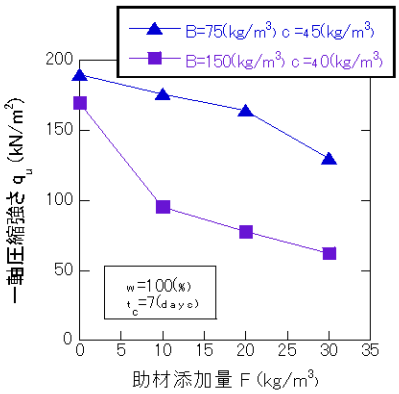


図-5　助材添加量と一軸圧縮強さの関係

4. 結論　実験結果より、以下の結論を得ることができた。1)半水石膏のみの改良においては、対象土の初期含水比に大きく依存する。2)補助固化材を添加することにより、半水石膏のみの強度発現と比べ、補助固化材の添加量の増加に伴い、大きな強度発現を示す。3)半水石膏添加量の増加に伴い、半水石膏の凝結固化作用が働くため、目標一軸圧縮強度である 300(kN/m^2)を満たす補助固化材の最低添加量は減少する。また、含水比の増加に伴い、水セメント比が高くなるため、補助固化材の最低添加量は増加する。4)助材である石炭灰を添加すると、助材の添加量の増加に伴い、養生初期において初期剛性及び強度低下を生じる。

【参考文献】1)社団法人　石膏ボード工業会：http://www.gypsumboard-a.or.jp/　2)社団法人日本建築学会，建築基礎のための地盤改良設計指針案，PP37-42　3)地盤工学会，土質試験の方法と解説－第一回改正版－，「安定処理土の締固めをしない供試体作製」，PP.308-316，　4)福岡市環境局，建設汚泥の定義：http://kankyo.city.fukuoka.lg.jp/gomi/pdf/1.1.pdf#search

平成 23 年度発表論文リスト

査読付論文

1. 吉田英史，佐藤研一，藤川 拓朗，押方利郎，大山勝寿：再生半水石膏を用いた軟弱地盤改良効果の力学特性と環境安全性の検討，地盤工学会，第 9 回環境地盤シンポジウム論文集，pp. 147-150，2011 年 10 月．

学会発表論文

2. 吉田英史，佐藤研一，押方利郎：再生半水石膏を用いた軟弱地盤の改良効果の検討，第 46 回地盤工学研究発表会，pp. 481-482，2011 年 7 月

3. 吉田英史，佐藤研一，藤川 拓朗，押方利郎：再生半水石膏を用いた軟弱地盤改良材の力学・溶出特性，土木学会平成 23 年度全国大会第 66 回年次学術講演会，pp. 531-532，2011 年 9 月

4. 緒方泰三，松木重夫，佐藤研一，松永岳：アスファルト混合物としての再生石膏有効利用に関する一検討，第 29 回日本道路会議，2011 年 11 月

5. 押方 利郎，大山勝寿，平 典明，田篭 英治，佐藤研一：分別解体工事現場から排出された廃石膏ボードの組成，第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 193-194，2011 年 11 月

6. 吉田英史，佐藤研一，藤川 拓朗，押方利郎：再生半水石膏による地盤改良材の力学特性と環境安全性について，第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 207-208，2011 年 11 月

7. 武下俊宏，姜誠，樋口壮太郎：硫化水素発生試験において生成する硫化物量と硫化水素ガス濃度の関係，平第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 209-210，2011 年 11 月

8. 金子りさ，吉田英史，佐藤研一，押方利朗，大山勝寿，森田博史：生石灰混合による再生半水石膏を用いた地盤改良土の力学・溶出特性，平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会，pp. 431-432，2012 年 3 月

9. 吉田英史，佐藤研一，藤川 拓朗，押方利郎：再生半水石膏地盤改良土のふっ素溶出挙動の把握，平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会，pp. 433-434，2012 年 3 月

1. 吉田英史，佐藤研一，藤川拓朗，押方利郎，大山勝久

再生半水石膏を用いた軟弱地盤改良効果の力学特性と環境安全性の検討

地盤工学会，第 9 回環境地盤シンポジウム論文集，pp. 147-150，2011，10 月.

再生半水石膏を用いた軟弱地盤改良効果の力学特性と環境安全性の検討

○吉田英史[1]・佐藤研一[2]・藤川拓朗[2]・押方利郎[3]・大山勝久[4]
[1]福岡大学大学院・[2]福岡大学工学部・[3]福岡大学大牟田産学連携推進室・[4]福岡石膏ボードリサイクル研究会

1. はじめに

廃石膏ボードは、紙と石膏に分離・中間処理し、管理型最終処分場へと処分することが義務付けられている。しかし、処分場の容量不足や民間処分場の受入拒否などの問題から、廃石膏の有効利用が急務[1)]とされている。廃石膏ボードから得られる二水石膏を焼成して得られる半水石膏(以下再生半水石膏)は、水を加えると固化する性質があることから、現在この特徴を利用した地盤改良材としての有効利用技術の研究[2)]が進められている。一方、火力発電所から排出される石炭灰発生量は、年々増加傾向にあるが、セメント分野を中心として石炭灰排出量の90(%)以上が有効利用されている。しかしながら、建設工事の減少から新しい有効利用の分野の開発が望まれている。**図-1** に本研究のフローチャートを示す。本報告では、福岡市内で採取した博多粘土に固化材として再生半水石膏を、補助固化材として高炉セメント B 種を、さらに長期強度・耐久性の向上のための助材として石炭灰を添加し、軟弱地盤の浅層混合処理の固化材料の開発を目的としている。特に、1)再生半水石膏の凝結硬化作用が発揮しない対象土含水比の検討、2)浅層混合処理の目標一軸強度[3)]を満足する補助固化材料の最低添加量と溶出特性の検討、3)長期的な強度発現を目的とした石炭灰を添加した場合の力学・溶出特性の把握に関する実験的検討を行い、実地盤への適用性の評価を行った結果について報告する。

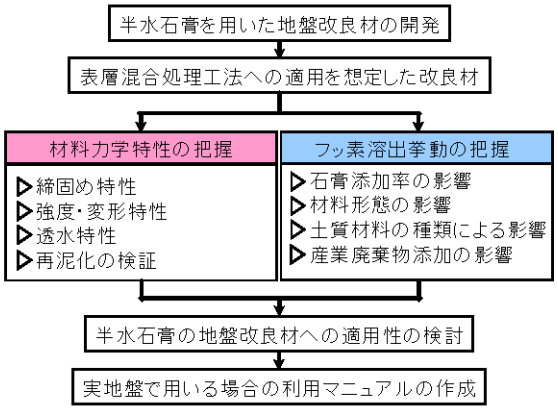


図-1 本研究のフローチャート

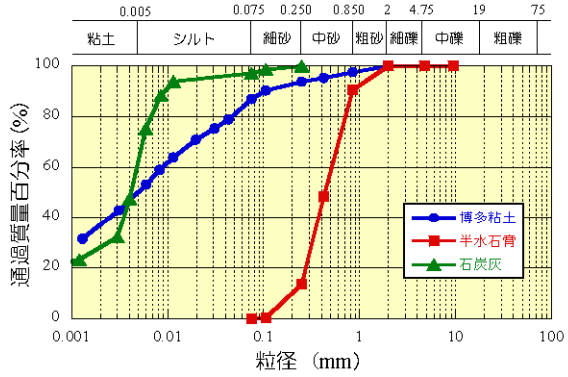


図-2 粒径加積曲線

2. 実験概要

2.1 実験試料

土質材料として福岡市内の現場で採取した博多粘土を用い、2mm ふるいにて粒度調整したものを使用した。また、固化材として IH 式半水化装置(130℃～160℃で一定加熱)で焼成されたβ型再生半水石膏、補助固化材として高炉セメント B 種を、さらに助材として長期強度の向上を目的とし石炭灰(JIS A6201-Ⅱ種)を使用した。**図-2** に各試料の粒径加積曲線を、**表-1** に物理特性を示す。**図-2** 及び**表-1** より、博多粘土と石炭灰は粘土・シルト分、再生半水石膏は砂分で構成されていることが分かる。また、博多粘土は高有機質土であり、石炭灰は他の試料に比べ粒子密度が小さい事も分かる。一方、ふっ素溶出量に着目すると、博多粘土、再生半水石膏、石炭灰自体には、土壌環境基準値を大きく上回るふっ素が含有されていることが分かる。pH に着目すると、再生半水石膏は中性域にあり、中性固化材としての特徴を示していることが分かる。

表-1 物理特性

	博多粘土	再生半水石膏	石炭灰
粒子密度ρ_s(g/cm^3)	2.737	2.951	2.263
細粒分含有率Fc(%)	86.90	0.030	97.2
液性限界w_L(%)	79.65	-	-
塑性限界w_P(%)	30.94	-	-
塑性指数I_p	48.71	-	-
強熱減量(%)	9.79	-	-
pH	8.08	7.46	9.93
F(mg/l)	1.21	5.94	3.41

表-2 配合条件(再生半水石膏)

土質試料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)
博多粘土	65 70 75 80 85 90 95 100	50 75 100 150	3

2.2 実験方法

1) **力学特性の検討** **表-2** に再生半水石膏のみに着目した配合表、**表-3** に補助固化材として高炉セメント B 種を混入させた配合表、**表-4** に助材として石炭灰を混入させた配合表をそれぞれ示す。供試体については、安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法[4)](JGS 0821-2000)に準じて、直径φ5×高さ h10(cm)の塩ビ製モールドに打設した。翌日整形、翌々日に脱型し、ラップに包み 20℃一定の恒温室で所定日数養生させ、一軸圧縮試験(JIS A 1216)を行った。ここで各々の安定材の添加量については、乾燥土 1m^3 に対する配合質量を示している。

Mechanical characteristic and environmental safety of soft ground improved by Recycled bassanite from Waste plaster board
Hidefumi Yoshida[1], Kenichi Sato[2], Takuro Fujikawa[2], Toshiro Oshikata[3], Oyama Katsuhisa[4]
([1]Graduate school of Fukuoka University, [2]Fukuoka University, [3]Omuta Office of Fukuoka University Academic, Industrial and Governemtal Liaiosn Center, [4]Fukuoka Plasterboard Recycling Workshop)
KEY WORDS: ground improvement materials, regenerated hemihydrate plaste, unconfined compression test

2）**溶出特性の検討**　溶出試験用の試料は、補助固化材と助材を用いた条件のもと、一軸圧縮強さを測定した後の破壊断片を回収したものを使用した。破壊断片をプラスチックハンマーで破砕し、2mm ふるいを通過させ、**表-5** に示す溶出条件に従い環告 46 号法試験に準拠した方法で溶出試験を行った。その後、得られた検液はイオンクロマトグラフによりふっ素溶出量の測定を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 凝結硬化作用が発揮しない限界含水比の検討

図-3 に含水比と一軸圧縮強さの関係を示す。図に示すように、博多粘土の含水比の増加及び再生半水石膏添加量の減少に伴い、一軸圧縮強さが低下していることがわかる。また、全ての条件において再生半水石膏の凝結硬化作用のみでは、汚泥と判断される q_u=50kN/m^2 以下の強度の発現しか得られないことがわかる。特に w=100%の条件において、再生半水石膏の凝結硬化作用が発揮したものは、添加量 150kg/m^3 の場合のみであり、再生半水石膏による凝結硬化は、対象土の含水比に大きく依存しており、高含水比粘性土を改良する限界含水比が存在することがわかる。また、石膏硬化体の強度に最も影響する因子は含有水分であることが報告[5]されているため、再生半水石膏を地盤改良材として使用する際には、現地土壌の含水比を考慮した上で、再生半水石膏の配合量の検討を行う必要があることが挙げられる。

3.2 再生半水石膏と補助固化材を用いた混合試料の力学・溶出特性

図-4 に養生 7 日での補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係を示す。図中の色枠は浅層混合処理工法の要求強度である 300kN/m^2 以上を示している。いずれの条件ともに、補助固化材添加量が増加するにつれて大きな強度発現を呈していることが分かる。これは、再生半水石膏のみの強度発現と比較しても明らかである。また、全ての条件において補助固化材添加量と一軸圧縮強さの相関性が良く、目標強度である 300kN/m^2 を満足する補助固化材の最低添加量を近似式を用いて推測することができる。図中に要求強度を満足する補助固化材の最低添加量の検討結果を示す。含水比に着目すると、含水比の増加に伴い要求強度に必要な最低添加量が増加していることがわかる。これは、水セメント比(W/C)の関係によるものと考えられ、近似式を利用して要求値を満足する W/C を導出するとほぼ 13～15 以下であった。次に、再生半水石膏添加量に着目し、(a), (b)を比較すると、再生半水石膏添加量が増加するに伴って図中に示す要求強度を満足する補助固化材最低添加量が減少していることがわかる。これは、再生半水石膏の凝結硬化作用が改良効果に働いたためであると考えられる。実施工を想定した場合、再生半水石膏を添加することで要求強度に必要なセメント量を減少することが可能になると考えられる。

図-5 に養生 7 日における補助固化材添加量、

表-3 配合条件（再生半水石膏+高炉セメント B 種）

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 C (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)
博多粘土	80 100 120	75 150	35 45 55 65 75	7 28

表-4 配合条件（再生半水石膏+高炉セメント B 種+石炭灰）

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 C (kg/m^3)	石炭灰 F_A (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)
博多粘土	100	75	54	10	7 28 56 91
		150	48		
	120	75	59	30	
		150	55		

表-5 溶出条件

試料	L/S	振とう時間	設定pH
混合試料	10	6	5.8～6.3

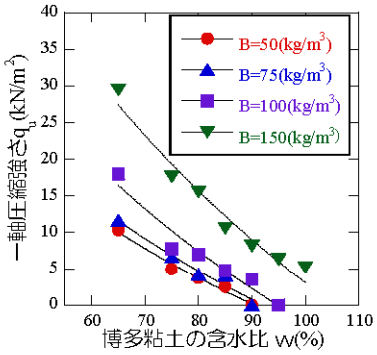
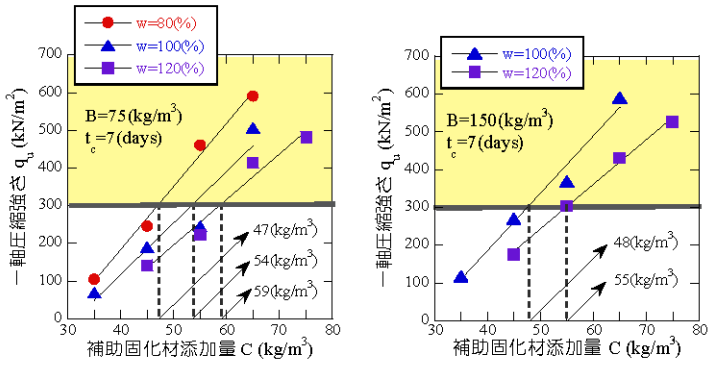
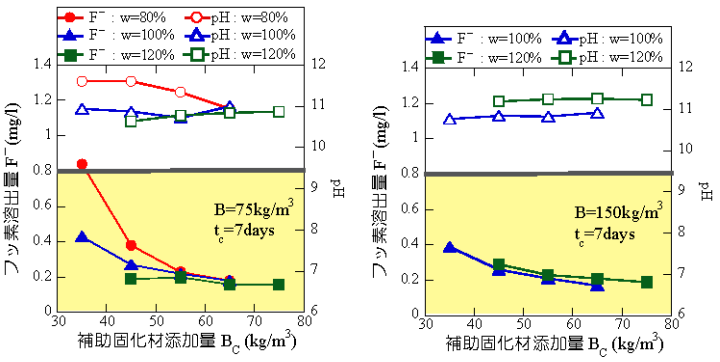


図-3 含水比と一軸圧縮強さの関係



(a) B=75kg/m^3　(b) B=150kg/m^3

図-4　補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係（養生 7 日）



(a) B=75kg/m^3　(b) B=150kg/m^3

図-5　補助固化材添加量とふっ素溶出濃度と pH の関係（養生 7 日）

ふっ素溶出量及び pH の関係を示す。色枠はふっ素の土壌環境基準値を示している。pH に着目するといずれの条件においても 10～12 のアルカリ性を示していることがわかる。再生半水石膏を地盤改良材として利用する場合、課題となるのが硫化水素ガスの発生であるが、その抑制対策として、pH 値を弱アルカリ性に設定することが挙げられている。実地盤に適用する際、改良土の透水性が低いため、改良土内部のアルカリ分が溶出しにくいと考えられるが、改良土表面は空気中の炭酸ガスにより炭酸化が進み、pH が低下することが予想される[6]。ふっ素溶出量に着目すると、全ての条件においてセメント添加量が増加するにつれ、漸次低下していることがわかる。これはセメント水和物の生成によりふっ素イオンが固定され、再生半水石膏からのふっ素の溶出が抑制されたためであると考えられる。また、補助固化材なし条件での溶出量は 1.6～2.2mg/l の値が確認されたため、ふっ素の不溶化にはセメント水和物の影響が大きいと推察される。

3.3 再生半水石膏に補助固化材と助材(石炭灰)を用いた混合試料の力学・溶出特性

図-6 に 3-2 で得られた要求強度を満足する最低添加量に助材として石炭灰を混合した際の、養生日数、一軸圧縮強さ及び含水比の関係を示す(結果は 3 本の供試体の代表値を示している)。全ての条件において養生日数に関係なく、石炭灰添加量が増加するに伴い一軸圧縮強さが増加していることが分かる。これは助材を添加していない条件と比較しても明らかであり、石炭灰を混合することにより、実地盤に適用した際にも、早期にトラフィカビリティーが改善され、工期の短縮が可能になるものと考えられる。一方、含水比の変化に着目すると、再生半水石膏、石炭灰添加量が増加するにつれて、含水比は僅かに低下していることがわかる。これは、再生半水石膏の凝結硬化による吸水効果と石炭灰の特徴である吸水効果によるものであり、これらが一軸圧縮強さの増加に関係していると推察できる。図-7 に長期養生による強度増進を確認するために、養生 91 日までの一軸圧縮強さの結果を示す。図に示すように、多少のばらつきはあるものの、石炭灰添加量が少ない条件と比べ養生日数が増加するにつれて一軸圧縮強さが増加していることがわかる。さらに、石炭灰の特徴として、石炭灰の主成分であるシリカとアルミナが、セメントの水和反応により生成される水酸化カルシウムとポゾラン反応を起こすことによる長期強度の増進効果が挙げられる。本研究においてもポゾラン反応による強度増進効果が発生したと推察される。これらのことから、実地盤においても、地盤改良材として石炭灰を混入したセメント系固化材を使用することで、長期的な強度増加が見込まれる改良地盤となることが予想される。今後さらに長期養生を行い、石炭灰を添加しない条件との比較を行い、ポゾラン反応による増進効果を確認していく予定である。また、配合条

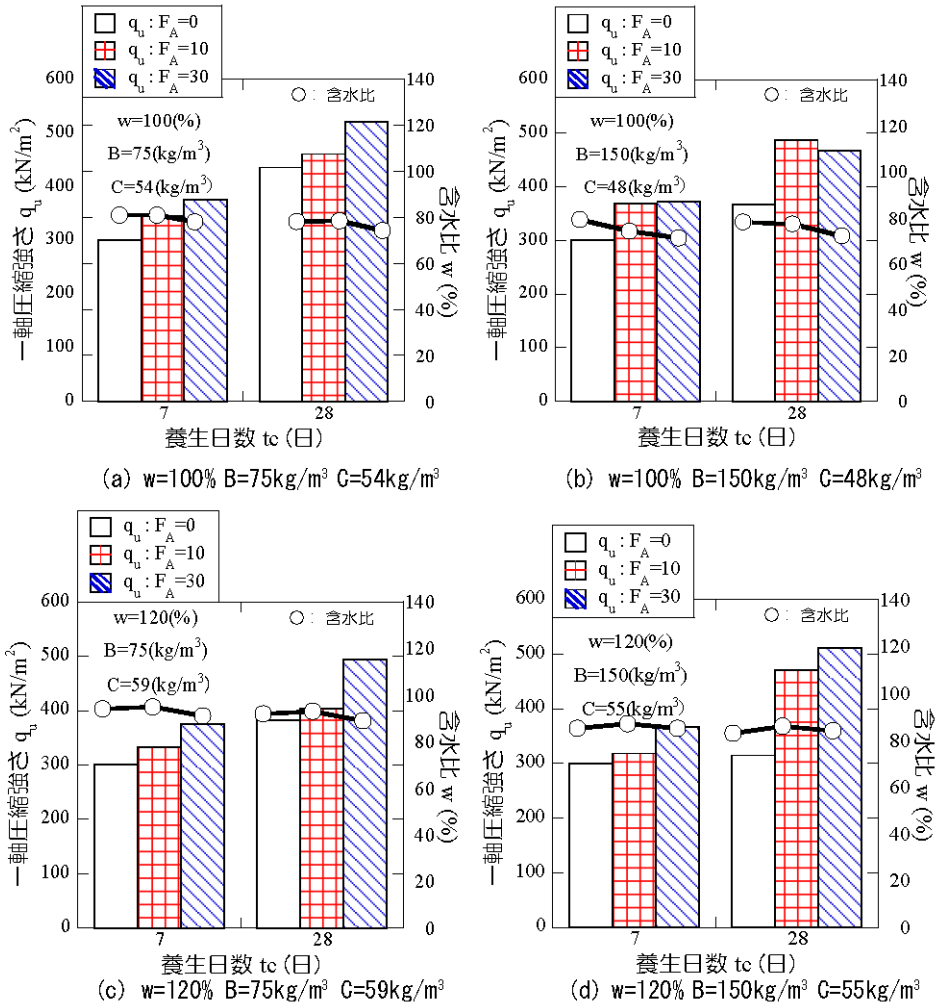


図-6 養生日数と一軸圧縮強さと含水比の関係

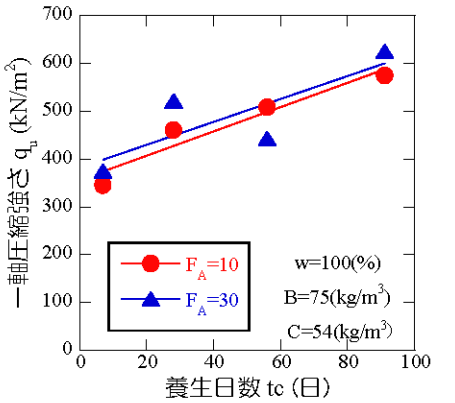


図-7 養生日数と一軸圧縮強さの関係
(w=100% B=75kg/m³ C=54kg/m³)

件によっては、28 日養生において強度増加が見られない条件もあることから、石膏、セメント、石炭灰の配合条件により強度発現が異なると考えられ、最適な配合についても検討することが必要である。

図-8 に石炭灰を添加した際の養生日数とふっ素溶出量と pH の関係を示す。いずれの条件においても pH については、10～11 の弱アルカリ性を示していることがわかる。ふっ素溶出量について着目すると、ばらつきはあるものの、全ての条件において土壌環境基準値 0.8mg/l を満足しており、セメント水和物によりふっ素イオンが固定されたと考えられる。さらに、B, Cd, Pb, Cr^{+6} についても測定を行ったが、全ての条件で定量下限値以下であった。地盤改良材として再生半水石膏を適用する際、再生半水石膏の特徴として挙げられる中性固化材としての役割を求めるのか、硫化水素抑制効果のためアルカリ側に設定するのか、今後の検討が必要である。

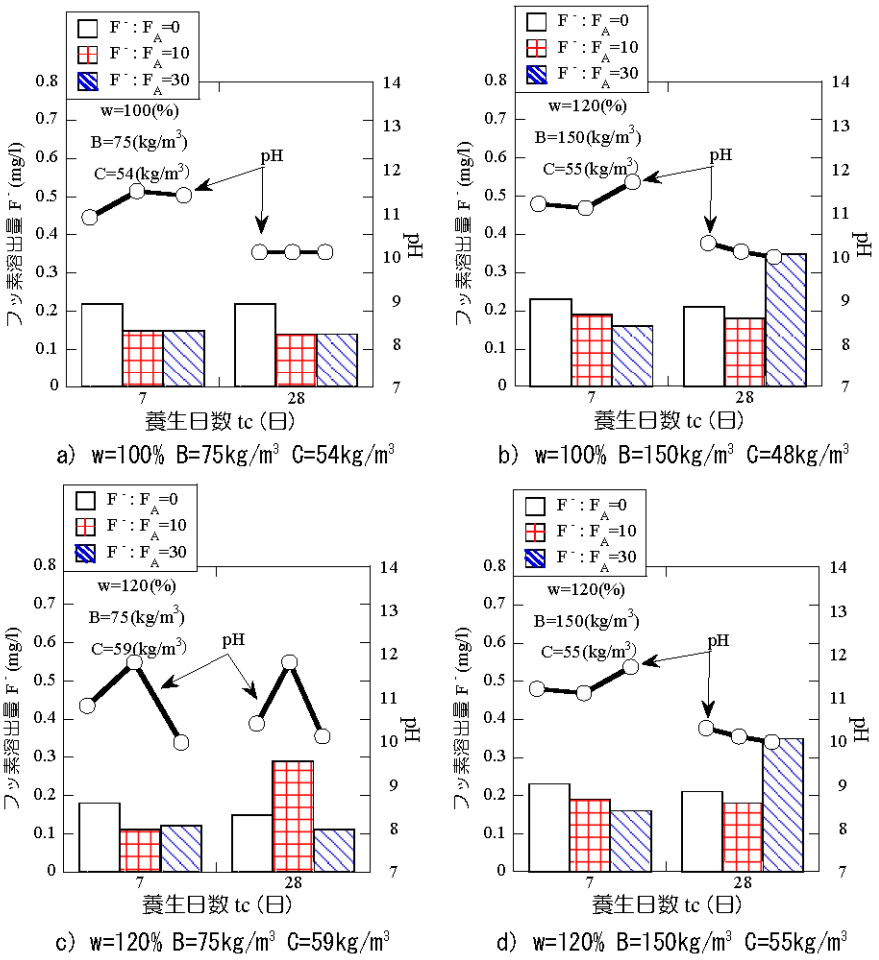


図-8　養生日数とふっ素溶出濃度と pH の関係

4. まとめ

1) 再生半水石膏による凝結作用は、対象土の含水比に大きく依存しており、高含水比の軟弱地盤の改良材として使用する際には、現地土壌の含水比を考慮した配合設計が必要である。

2) 補助固化材添加量と一軸圧縮強さには、良い相関性が認められるため、目標一軸強度を満足する補助固化材の添加量を推定することが可能である。

3) 要求強度を満足する補助固化材の添加量は、再生半水石膏添加量が増加するにつれ、凝結硬化作用が働き減少する。

4) ふっ素の溶出量は、再生半水石膏による改良を行う場合、補助固化材として高炉セメント B 種を添加することにより抑制することが可能である。

5) 長期強度の向上のために助材として石炭灰を添加した地盤改良材は、吸水効果による長期的な強度増加が期待出来る。

6) 再生半水石膏に補助固化材と助材を添加した混合試料は、重金属類の溶出が抑制でき、さらに養生とともに pH が低下する。

謝辞：本研究は、環境省平成 22 年度循環型社会形成推進科学研究費(No.K22101)および文部科学省化学研究費(No.21560527)の一部として実施された研究である。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

1) 社団法人石膏ボード工業会
2) 亀井ら:半水石膏の地盤改良材としての有効利用,地盤工学ジャーナル, vol.2, No.3, pp.245-252, 2007.
3) 社団法人日本建築学会,建築基礎のための地盤改良設計指針案, PP37-42.
4) 地盤工学会, 土質試験の方法と解説－第一回改正版－,「安定処理土の締固めをしない供試体作製」, PP.308-316, 2000.
5) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：平成 21 年度廃石膏ボードの再資源促進方策検討業務調査報告書
6) 社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第 3 版, PP56-57

2. 吉田英史，佐藤研一，押方利郎

再生半水石膏を用いた軟弱地盤の改良効果の検討

第 46 回地盤工学研究発表会 pp. 481-482，2011，7 月

再生半水石膏を用いた軟弱地盤の改良効果の検討

地盤改良材　再生半水石膏　一軸圧縮試験

福岡大学大学院　学生会員　○吉田　英史
福岡大学工学部　国際会員　佐藤　研一
福岡大学工学部　非会員　押方　利郎

1. はじめに　石膏ボードは高度経済成長期以降、建築物の内装材として広く利用されており、建築物の解体に伴い、廃石膏ボードの発生が急増している。また、廃石膏ボードは紙と石膏に分離し管理型最終処分場へと処分することが義務付けられている [1]。しかし、処分場の容量不足や民間業者の受入拒否などの問題から、石膏の有効利用が急務とされている。廃石膏ボードから得られる二水石膏を焼成して得られる半水石膏（以下再生半水石膏）は、水を加えると固化する性質があることから、現在その特徴を利用した再利用技術の研究が進められている。このような中、著者らはこれまでに、再生半水石膏を用いて、大量に使用可能と考えられる地盤改良材への適用性の検討を行っている [2),3)]。昨年度までの研究成果により、セメント等の補助固化材を添加・混合することで締固め土において要求される力学・溶出特性を満足し、締固め材料や地盤改良材として十分に適用出来る知見を得た [4]。そこで本報告では、再生半水石膏を用いて、特に軟弱地盤の浅層混合処理の固化材料の開発を目的とし、力学特性の実験的検討を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 実験試料　土質材料として福岡市内の現場で採取した博多粘土を用い 2mm ふるいにて粒度調整したものを使用した。また、固化材として IH 式半水化装置（120℃以上で一定加熱）で焼成された再生半水石膏、補助固化材として高炉セメント B 種を、さらに助材として長期強度の向上を目的とし石炭灰を使用した。**図-1** に各試料の粒径加積曲線を、**表-1** に物理特性を示す。**図-1** 及び**表-1** より、博多粘土と石炭灰はシルト分、再生半水石膏は砂分で構成されていることが分かる。さらに、博多粘土は高有機質土、石炭灰は他の試料に比べ粒子密度が小さい事が分かる。

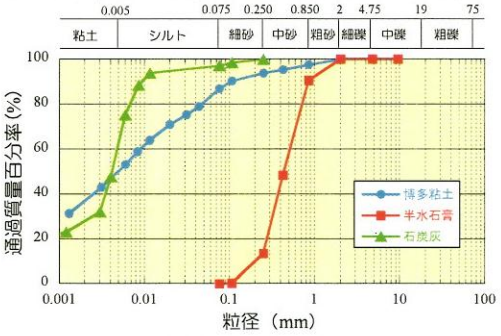


図-1　粒径加積曲線

表-1　物理特性

	博多粘土	再生半水石膏	石炭灰
粒子密度ρ_s(g/cm^3)	2.737	2.951	2.263
細粒分含有率Fc(%)	86.90	0.030	97.2
液性限界W_L(%)	79.65	-	-
塑性限界W_P(%)	30.94	-	-
塑性指数I_P(%)	48.71	-	-
強熱減量(%)	9.79	-	-

2-2 実験方法　**表-2～表-4** に示す配合条件に従って安定処理土の締固めを行わない供試体作成方法 [5)]に準じて、直径φ5×高さ h10（cm）の塩ビ製モールドに打設した。翌日整形、翌々日に脱型し、ラップに包み 20℃一定の恒温室で所定日数養生させ、一軸圧縮試験（JIS A 1216）を行った。安定材の添加量については、土質材料に対する重量比から算出している。

2-3 検討内容　1）再生半水石膏の凝結硬化作用が働かなくなる博多粘土の含水比を把握する（**表-2**）。2）軟弱地盤の浅層混合処理材料の開発を行うため、改良された地盤の目標一軸強度 [6)]である養生 7 日においての 300（kN/m^2）を満足する補助固化材料の最低添加量を把握する（**表-3**）。3）長期強度の向上を目的として、2）の検討項目より得られた最低添加量を基に石炭灰を添加した際の力学特性を把握する（**表-4**）。

表-2　配合条件（再生半水石膏）

土質試料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)
博多粘土	65 70 75 80 85 90 95 100	50 75 100 150	3

表-3　配合条件（再生半水石膏+高炉セメント B 種）

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 C (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)
博多粘土	80 100 120	75 150	35 45 55 65 75	7 28

表-4　配合条件（再生半水石膏+高炉セメント B 種+石炭灰）

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 C (kg/m^3)	石炭灰 F_A (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)
博多粘土	100	75	54	10	7
		150	48		
	120	75	59	30	28
		150	55		

3. 実験結果及び考察

3-1 再生半水石膏添加による力学特性　**図-2** に含水比と一軸圧縮強さの関係を示す。図に示すように、設定含水比の増加及び再生半水石膏添加量の減少に伴い一軸圧縮強さが低下していることがわかる。また、全ての条件において再生半水石膏の凝結硬化作用のみでは、汚泥と判断される 50kN/m^2 以下の強度発現を示した。特に w=100%の条件において、再生半水石膏の凝結硬化作用が発揮したものは、添加量 150kg/m^3 の場合のみであり、再生半水石膏による硬化作用には対象土の含水比に大きく依存しており、硬化作用を発揮する限界含水比が存在することが明らかとなった。

Effect of improvement for dredge clay using recycled bassanite from waste plaster board

YOSHIDA, Hidefumi, Graduate school, Fukuoka University
SATO, Kenichi, FUJIKAWA, Takurou, OSHIKATA,Toshirou
Fukuoka University

3-2 高炉セメントB種添加による力学特性　図-3に養生7日での補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係を示す。また、図中の色枠は浅層混合処理工法の要求強度である300kN/m^{2}以上を示している。図より、補助固化材添加量が増加するにつれて大きな強度発現を呈していることが分かる。これは、再生半水石膏のみの強度発現と比較しても明らかである。また、全ての条件において補助固化材添加量と一軸圧縮強さの相関性が非常に高い値を示している事から、目標強度である 300kN/m^2 を満足する補助固化材の最低添加量を推測することができる。図中に要求強度を満足する補助固化材の最低添加量の検討結果を示す。含水比に着目すると、要求強度に必要な最低添加量が増加していることがわかる。これは水セメント比の関係によるものと考えられる。一方、再生半水石膏添加量に着目すると、再生半水石膏添加が増加するにつれて補助固化最低添加量が減少していることがわかる。これは、再生半水石膏の凝結硬化作用が働いたためであると考えられ、実施工を想定した場合でも、再生半水石膏を添加することで要求強度に必要なセメント量を減少させられると予測できる。

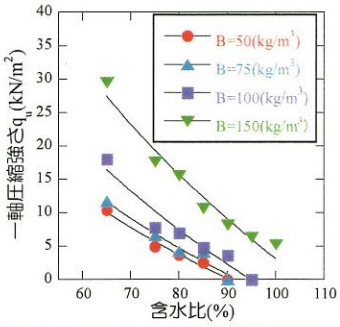
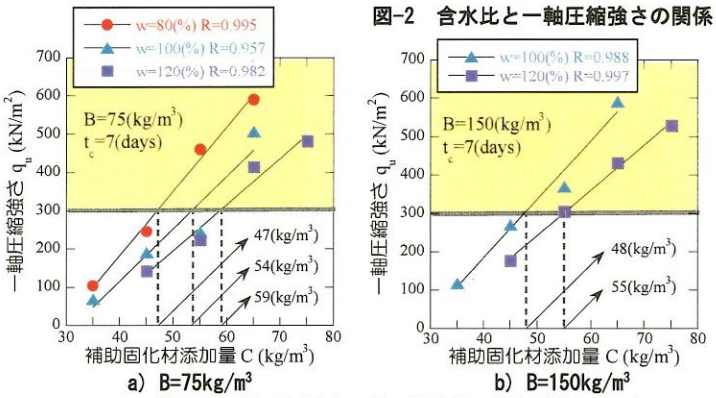


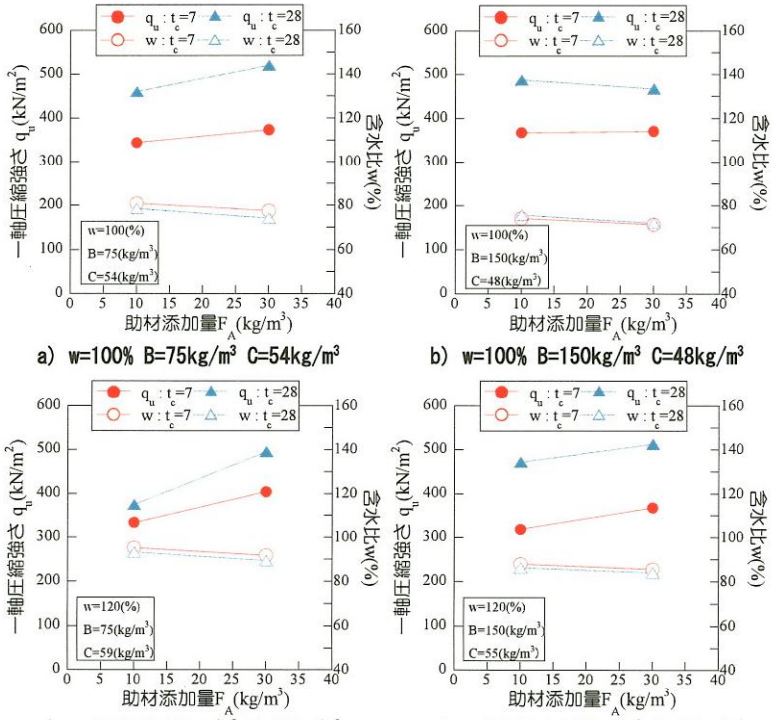
図-2　含水比と一軸圧縮強さの関係



a) B=75kg/m³　　b) B=150kg/m³

図-3　補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係(養生7日)

3-3 石炭灰添加による力学特性　図-4 に助材添加量と一軸圧縮強さと含水比の関係を示す。b)の条件以外は養生日数に関係なく、石炭灰添加量が増加するに伴い一軸圧縮強さが増加し、含水比が低下していることがわかる。これは、石炭灰の特徴である吸水効果によるものであり、一軸圧縮強さの増加に関係していると推察できる。さらに、実地盤に適用した際にも、早期にトラフィカビリティーが改善され、工期の短縮が可能になるものと考えられる。一方、石炭灰の特徴として、石炭灰の主成分であるシリカとアルミナが、セメントの水和反応により生成される水酸化カルシウムとポゾラン反応を起こすことによる長期強度の増進効果が挙げられる。今後長期的な養生から、増進効果を確認していく予定である。また、配合条件によっては、28 日養生において強度増加が見られない条件もあることから、石膏、セメント、石炭灰の最適な配合条件についても検討することが必要である。



a) w=100% B=75kg/m³ C=54kg/m³　　b) w=100% B=150kg/m³ C=48kg/m³

c) w=120% B=75kg/m³ C=59kg/m³　　d) w=120% B=150kg/m³ C=55kg/m³

図-4　助材添加量と一軸圧縮強さと含水比の関係

4. まとめ　再生半水石膏を用いて軟弱地盤改良材の力学特性の検討を行った結果、以下の知見を得られた。1)博多粘土に再生半水石膏を添加したのみでは、汚泥と判断される50kN/m^{2}以下の強度を示す。また、再生半水石膏の凝結硬化作用は対象土の含水比に大きく依存することも明らかとなった。2)浅層混合処理工法の要求強度 300kN/m^2 以上を満足する補助固化材添加量は、再生半水石膏の凝結硬化作用により減少させることができる。さらに、実施工を想定した際にもコスト削減に繋がることが示された。3)石炭灰の吸水効果により、石炭灰の添加量が増加するにつれて、一軸圧縮強さが増加することが明らかとなった。このことから、実施工においても早期にトラフィカビリティーが改善され工期に短縮が可能になることが示された。

参考文献　1) 環境省ホームページ,廃石膏ボードから付着している紙を除去したものの取扱いについて 2) 亀井ら:半水石膏の地盤改良材としての有効利用,地盤工学ジャーナル,vol.2, No.3, pp.245-252, 2007. 3) 亀井ら:高炉セメントB種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発,地盤工学ジャーナル,vol.4, No.1, pp.91-98, 2007. 4) 佐藤ら:再生半水石膏を用いた地盤改良効果と環境安全性の検討,第9回地盤改良シンポジウム論文集, pp.81-86,2010. 5) 地盤工学会, 土質試験の方法と解説－第一回改正版－, 「安定処理土の締固めをしない供試体作製」, PP.308-316. 6) 社団法人日本建築学会,建築基礎のための地盤改良設計指針案,PP37-42.

3. 吉田英史，佐藤研一，藤川拓朗，押方利郎

再生半水石膏を用いた軟弱地盤改良材の力学・溶出特性

平成 23 年度全国大会第 66 回年次学術講演会，pp. 531-532，2010 年，9 月

再生半水石膏を用いた軟弱地盤改良材の力学・溶出特性

福岡大学大学院　学生会員　○吉田　英史
福岡大学工学部　正会員　佐藤　研一　藤川　拓朗
福岡大学大牟田産学連携推進室　非会員　押方　利朗

1. はじめに　廃石膏ボードから得られる二水石膏を焼成して得られる半水石膏（以下再生半水石膏）は、水を加えると固化する性質があり、中性固化材のため地盤改良材としての有効利用が望まれている。国内においても施工実績が挙げられているが、重金属溶出や硫化水素発生等が課題として挙げられていることが現状である[1)]。そこで本報告では、再生半水石膏を用いて、特に軟弱地盤の浅層混合処理の固化材の開発を目的とし、力学・溶出特性の実験的検討を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 実験試料　土質材料として福岡市内の現場で採取した博多粘土を用い 2mm ふるいにて粒度調整したものを使用した。また、固化材として IH 式半水化装置(130℃～160℃で一定加熱)で焼成された再生半水石膏、補助固化材として高炉セメントＢ種を、さらに助材として長期強度の向上を目的とし石炭灰を使用した。図-1 に各試料の粒径加積曲線を、表-1 に物理特性を示す。図-1 及び表-1 より、博多粘土と石炭灰はシルト分、再生半水石膏は砂分で構成されていることが分かる。さらに、博多粘土は高有機質土、石炭灰は他の試料に比べ粒子密度が小さい事が分かる。フッ素溶出濃度に着目すると、博多粘土、再生半水石膏、石炭灰自体には、土壌環境基準値を大きく上回るフッ素が含有されていることが分かる。また pH に着目すると、半水石膏は中性固化材としての特徴を示していることが分かる。

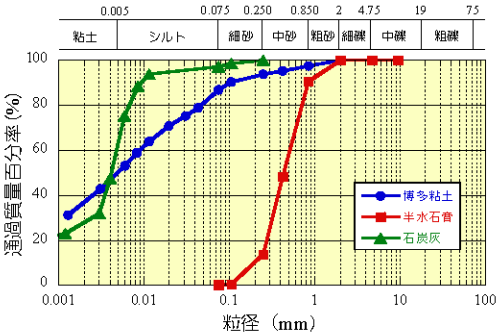


図-1　粒径加積曲線

表-1　物理特性

	博多粘土	再生半水石膏	石炭灰
粒子密度ρ_s(g/cm^3)	2.737	2.951	2.263
細粒分含有率Fc(%)	86.90	0.030	97.2
液性限界W_L(%)	79.65	-	-
塑性限界W_P(%)	30.94	-	-
塑性指数I_P(%)	48.71	-	-
強熱減量(%)	9.79	-	-
pH	8.08	7.46	9.93
F(mg/l)	1.21	5.94	3.41

2-2 実験方法　1）力学特性の検討　表-2、表-3 に示す配合条件に従って安定処理土の締固めを行わない供試体作成方法[2)]に準じて、直径φ5×高さ h10(cm)の塩ビ製モールドに打設した。翌日整形、翌々日に脱型し、ラップに包み 20℃一定の恒温室で所定日数養生させ、一軸圧縮試験(JIS A 1216)を行った。安定材の添加量については、土質材料に対する重量比から算出している。

2）溶出特性の検討　溶出試験用の試料は、一軸圧縮強度を測定した後の破壊断片を回収したものを使用した。表-4 に示す溶出条件に従い環告 46 号法試験に準拠した方法で溶出試験を行った。そして、得られた検液はイオンクロマトグラフによりフッ素溶出量の測定を行った。

2-3 検討内容　1）軟弱地盤の浅層混合処理材料の開発を行うため、改良された地盤の目標一軸強度[3)]である養生 7 日においての 300(kN/m^2)を満足する補助固化材料の最低添加量の力学・溶出特性を把握する(表-2)。2）長期強度の向上を目的として、1)の検討項目より得られた最低添加量を基に石炭灰を添加した際の力学特性を把握する(表-3)。

表-2　(再生半水石膏+高炉セメントＢ種)

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 C (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)
博多粘土	80	75	35	7
	100		45	
	120	150	55	28
			65	
			75	

表-3　(再生半水石膏+高炉セメントＢ種+石炭灰)

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 C (kg/m^3)	石炭灰 F_A (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)
博多粘土	100	75	54	10	7
		150	48		
	120	75	59	30	28
		150	55		

3. 実験結果及び考察

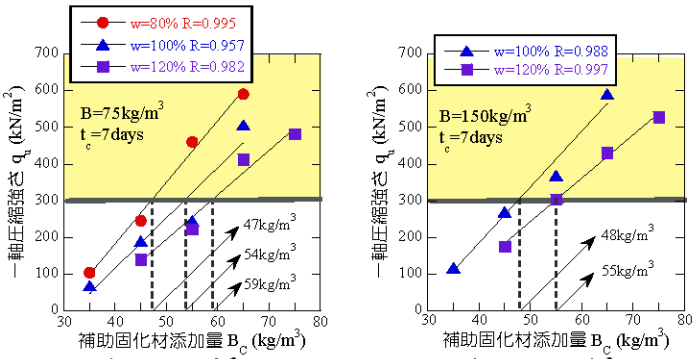
3-1 要求強度を満足する補助固化材最低添加量の検討　図-3 に養生 7 日での補助固化材(高炉セメントＢ種)添加量と一軸圧縮強さの関係を示す。また、図中の色枠は浅層混合処理工法の要求強度である 300 kN/m^2 以上を示している。補助固化材添加量が増加するにつれて大きな強度発現を呈していることが分かる。また、全ての条件において補助固化材添加量と一軸圧縮強さの相関性が非常に高い値を

表-4　溶出条件

試料	L/S	振とう時間	設定pH
混合試料	10	6	5.8～6.3

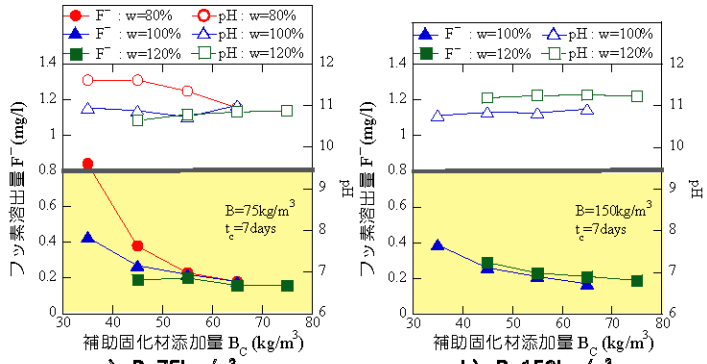
キーワード　廃石膏ボード，半水石膏，地盤改良材，一軸圧縮試験
連絡先　〒814-0180　福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1　福岡大学工学部　道路・土質研究室　TEL092-871-6631

示している事から、目標強度である 300kN/m^2 を満足する補助固化材の最低添加量を推測することができる。図中に要求強度を満足する補助固化材の最低添加量の検討結果を示す。含水比に着目すると、要求強度に必要な最低添加量が増加していることがわかる。これは水セメント比の関係によるものと考えられる。一方、再生半水石膏添加量に着目すると、再生半水石膏添加量が増加するにつれて補助固化最低添加量が減少していることがわかる。これは、再生半水石膏の凝結硬化作用が働いたためであると考えられ、実施工を想定した場合でも、再生半水石膏を添加することで要求強度に必要なセメント量を減少させられると予測できる。図-4 に養生 7 日での補助固化材添加量とフッ素溶出量と pH の関係を示す。色枠はフッ素の土壌環境基準値を示している。pH に着目するといずれの条件においても 10～11 の弱アルカリ性を示していることがわかる。再生半水石膏を固化材として利用する場合、課題となるのが硫化水素ガスの発生である。また、硫化水素発生抑制対策として、pH 値を弱アルカリ性に設定することが挙げられている。実地盤に適用する際、改良土の透水性が低いため、改良土内部のアルカリ分が溶出しにくいと考えられるが、改良土表面は空気中の炭酸ガスにより炭酸化が進み、pH が低下することが予想される。今後長期的な養生日数に伴う pH の変化を確認し硫化水素ガスの発生の評価を行う事が課題として挙げられる。フッ素溶出濃度に着目すると、全ての条件においてセメント添加量が増加するにつれ、漸次低下していることがわかる。これはエトリンガイトによりフッ素イオンが固定され、再生半水石膏からのフッ素の溶出が抑制されたと考えられる。



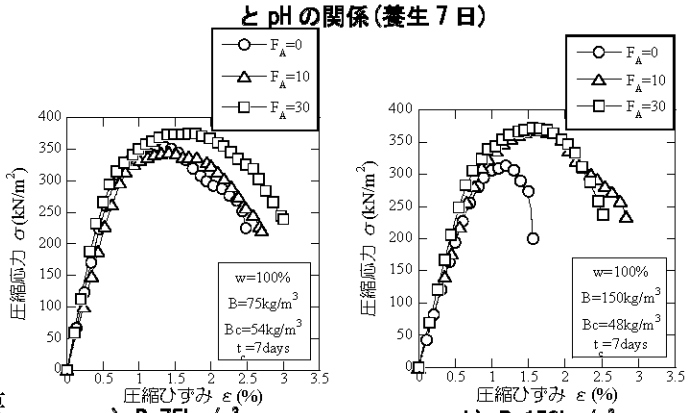
a) B=75kg/m³　　b) B=150kg/m³

図-3　補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係(養生 7 日)



a) B=75kg/m³　　b) B=150kg/m³

図-4　補助固化材添加量とフッ素溶出濃度と pH の関係(養生 7 日)



a) B=75kg/m³　　b) B=150kg/m³

図-5　一軸圧縮試験結果(w=100% 養生 7 日)

3-2 産業廃棄物混合による力学特性への影響　図-5 に要求強度を満足する補助固化材添加量に助材として石炭灰を添加した際の一軸圧縮試験結果を示す。図より、石炭灰添加量が増加するにつれて最大圧縮応力が増加していることがわかる。図-6 に一軸圧縮強さと助材(石炭灰)添加量と含水比の関係を示す。助材添加量が増加するにつれて石炭灰添加に伴う吸水効果が現れ含水比が低下し一軸圧縮強さが増加していることがわかる。さらに、実地盤に適用した際にも、早期にトラフィカビリティーが改善され、工期の短縮が可能になるものと考えられる。一方、石炭灰の特徴として、石炭灰の主成分であるシリカとアルミナが、セメントの水和反応により生成される水酸化カルシウムとポゾラン反応を起こすことによる長期強度の増進効果が挙げられる。今後長期的な養生から、増進効果を確認していく予定である。

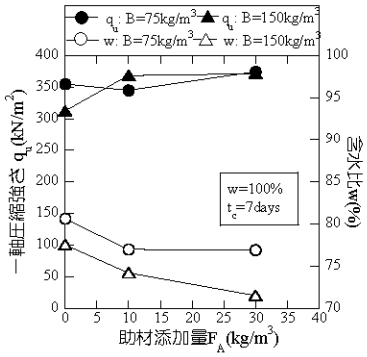


図-6　一軸圧縮強さと助材添加量と含水比の関係(w=100% 養生 7 日)

4. まとめ　1) 補助固化材添加量と一軸圧縮強さには、非常に高い相関性が認められ、目標一軸強度を満足する添加量を推定することが可能である。さらに、再生半水石膏添加量が増加するにつれ、再生半水石膏の凝結硬化作用が働き、補助固化材の最低添加量は減少することが明らかとなった。2) セメント系固化材を添加することでフッ素の溶出量を抑制することができる。3) 石炭灰の添加は、吸水効果による強度増加が期待出来る。

参考文献　1) 平成 20 年度廃石膏ボードの再資源化促進方策検討業務調査報告書 2) 地盤工学会,土質試験の方法と解説－第一回改正版－,「安定処理土の締固めをしない供試体作製」,PP.308-316．3) (社)日本建築学会,建築基礎のための地盤改良設計指針案,PP37-42.

4. 緒方泰三，松木重夫，佐藤研一，松永　岳

アスファルト混合物としての再生石膏有効利用に関する一検討

第 29 回日本道路会議，2011 年，11 月

アスファルト混合物としての再生石膏有効利用に関する一検討

㈱NIPPO　○緒方　泰三
㈱NIPPO　正会員　松木　重夫
福岡大学　正会員　佐藤　研一
福岡大学　学生会員　松永　岳

1. はじめに

廃石膏ボードの排出量は年々増加しており、今後更なる増加が懸念されていることから、廃石膏ボードのリサイクル技術の促進は必要不可欠な課題である。そこで本研究では、廃石膏ボードから破砕分離された二水石膏、それをさらに焼成処理して得られる再生半水石膏（以下、半水石膏と呼称）をアスファルト混合物（以下、混合物と呼称）のフィラー材の代替材として有効利用することを目的としている。これまでに石粉と半水石膏の割合を変化させ、各々の配合で最適アスファルト量（以下、OAC）を求めて混合物性状の比較検討を実施した[1]。しかし、混合物の性状変化に対する原因の特定に至らなかったことから、今回は配合にかかわらずAs量を固定し、二水石膏と半水石膏をフィラー材の代替材として配合する条件下で検討を行うとともに、混合物の環境安全性を確認する。本報告では、室内配合によるマーシャル安定度試験（標準・水浸）、ホイールトラッキング試験結果及び溶出試験結果について報告する。

2. 実験概要

2.1　実験に用いた試料

混合物の供試体に用いた試料は、砕石6号、7号、粗砂、細砂、フィラー材（石粉及び石膏）及びストレートアスファルト60/80を使用した。各試料の粒径加積曲線を図-1に示す。As量を一定で行った条件を実験Aとし、As量を変化させて行った条件を実験Bとした。各試料の物理性状を表-1に示す。なお、石膏は内部に結晶水が存在することから水分量の基準値を満たしていないが、外観および粒度は石粉と同様である。

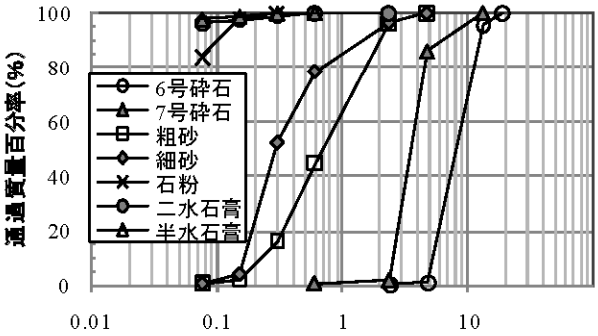


図-1　試料の粒径加積曲線

2.2　実験方法

実験では、半水石膏及び二水石膏に着目し、通常使用される石粉（石灰石粉、$CaCO_3$）とともに、フィラー材料として用い、表-2に示す構成比が異なる配合で混合物を室内試験にて作製する。この混合物の供試体について、マーシャル安定度試験（標準・水浸）、ホイールトラッキング試験及び溶出試験（環告46号法・タンクリーチング試験）を行い、混合物の材料特性と環境安全性の検討を行う。実験は、舗装調査・試験法便覧[2]に従って行う。また、既往の研究[3]から、フィラー中に占める石膏の割合が50%を超える場合、マーシャル試験値が基準を満足できないことから、今回石膏の配合割合を10･20･30･40･50%に設定する。実験Aでは、As量を石粉配合率100%におけるOACである5.1%に固定し検討を行う。実験Bでは、As量を配合毎に変化させて実験を行う。また、溶出試験用検体は実験Aの半水石膏配合率を0･50･100%で行う。

表-1　試料の性状試験結果

項目 ＼ 材料名		A		B		粗砂	細砂	石粉	石膏		基準値
		6号砕石	7号砕石	6号砕石	7号砕石				半水	二水	
密度 (g/cm³)	表乾	2.757	2.746	2.672	2.669	2.571	2.578	-	-	-	2.45以上
	かさ	2.733	2.724	2.665	2.644	2.541	2.544	-	-	-	-
	見掛	2.800	2.787	2.701	2.711	2.621	2.635	2.710	2.589	2.558	-
吸水率 (%)		0.88	0.85	0.65	0.93	1.22	1.35	-	-	-	3.0以下
水分 (%)		-	-	—	—	-	-	0.3	4.9	18.0	1.0以下

表-2　実験条件

実験	As量	石膏の種類	石膏配合率 (%)	実施試験	比較項目
A-① A-②	一定	二水石膏 半水石膏	10,20,30,40,50	標準マーシャル安定度試験 水浸マーシャル安定度試験 ホイールトラッキング試験	空隙率 安定度 残留安定度 動的安定度
B	最適	半水石膏	0,25,50,75,100		

3. 実験結果及び考察

3.1 標準マーシャル安定度試験結果

図-2 に石膏配合率と OAC の関係を示す。石膏の割合が高くなるにつれて OAC は増加する。図-3 に石膏配合率と空隙率の関係を示す。全ての配合条件において基準値を満たす結果であった。また石膏の割合が高くなるにつれて実験 A-②(半水石膏)はなだらかに上昇しているが実験 A-①(二水石膏)は急激に上昇している。これは二水石膏内の水分が混合温度を低下させ石膏が他の材料とうまく混合できなかったことが原因と考えられる。実験 B(半水石膏)はほぼ変化せず横ばいの結果であった。これは各配合において OAC で供試体を作製したことによりアスファルトが間隙を十分に充填したためであると考えられる。図-4 に石膏配合率と安定度の関係を示す。全ての配合条件において基準値を満たす結果であった。安定度においては As 量及び石膏を変化させることに問題はないと考えられる。

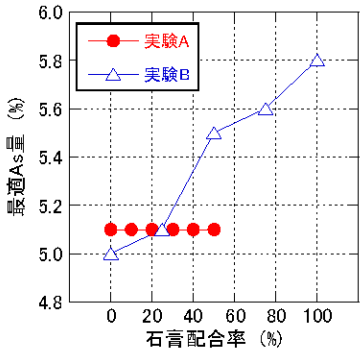


図-2 石膏配合率と OAC の関係

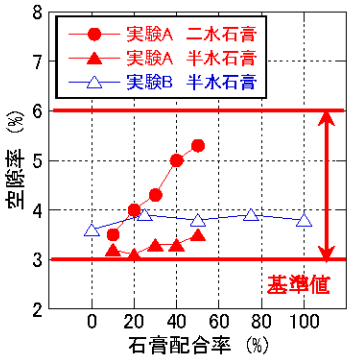


図-3 石膏配合率と空隙率の関係

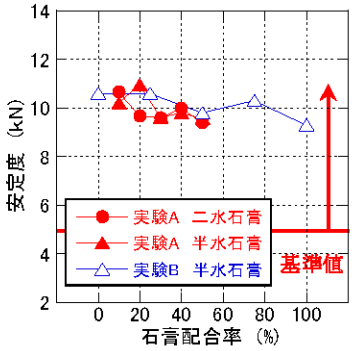


図-4 石膏配合率と安定度の関係

3.2 水侵マーシャル安定度試験結果

図-5 に石膏配合率と残留安定度の関係を示す。全ての配合条件において基準値を満たす結果であった。残留安定度は石膏の割合が高くなるにつれて実験 A-①(二水石膏)と実験 B(半水石膏)は低下傾向、実験 A-②(半水石膏)は変化が小さい傾向を示す。これは、半水石膏が二水石膏に比べ耐水性に優れることを示す。

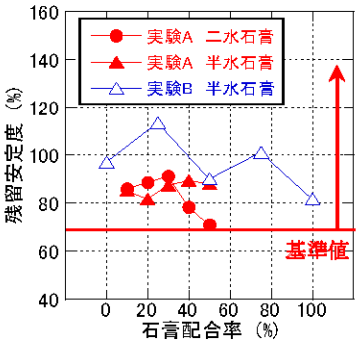


図-5 石膏配合率と残留安定度の関係

3.3 ホイールトラッキング試験結果

図-6 に石膏配合率と動的安定度の関係を示す。全ての配合条件において基準値を満たす結果であった。実験 A、B ともに石膏配合率が高くなるにつれて動的安定度は上昇傾向になることを示す。これは、実験 A の As 量は一定であるため、混合物内の As 量が不足する傾向にあり、結果的に耐流動性が向上したと考えられる。

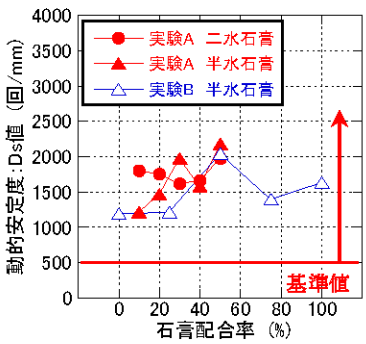


図-6 石膏配合率と動的安定度の関係

3.4 アスファルト混合物の溶出試験結果

混合物の溶出試験結果（環告 46 号法・タンクリーチング試験）を表-3 に示す。環告 46 号法・タンクリーチングともに、石膏配合率 50・100%においてフッ素が溶出しているが、土壌環境基準以下（平成 19 年環境省令第 11 号、溶出基準 0.8mg/L 以下）という結果であった。

表-3 混合物の溶出試験結果

石膏配合率	環告46号法				
(%)	B(ホウ素)	Cr(クロム)	Cd(カドミウム)	Pb(鉛)	F(フッ素)
0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
50	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.3
100	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.56
石膏配合率	**タンクリーチング試験**				
(%)	B(ホウ素)	Cr(クロム)	Cd(カドミウム)	Pb(鉛)	F(フッ素)
0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
50	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.03
100	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.06

※N.D.は定量下限値以下を意味する。

4. まとめ

1）全ての配合において、マーシャル安定度試験（標準・水浸）、ホイールトラッキング試験及び溶出試験の基準値を満足する結果となった。2）As 量を一定としても基準値を満足する結果が得られコスト増加につながることなく有効利用することは可能であると考えるが、半水石膏に比べ二水石膏は変動が大きく、現段階の選定では半水石膏の方が有効ではないかと考える。3）混合物としての溶出試験において、土壌環境基準以下であることが確認され、環境安全性の一検討ではあるが確保できたのではないかと考える。

参考文献 1)松木ら:再生半水石膏粉を用いたアスファルト混合材の評価, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V_132, pp. 263-264, 2010. 2）舗装調査・試験法便覧（社団法人日本道路協会, 平成 19 年度） 3）今岡ら：廃石膏ボード粉砕処理物のフィラー材としての再資源化に関する研究, 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, B4-2, pp221-222, 2010.

5. 押方利郎，大山勝寿，平　典明，田篭英治，佐藤研一

分別解体工事現場から排出された廃石膏ボードの組成

第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，pp. 193-194，2011 年，11 月

B3-1

分別解体工事現場から排出された廃石膏ボードの組成

○（正）押方 利郎[1)]、大山 勝寿[2)]、平 典明[3)]、田篭 英治[4)]、（正）佐藤 研一[5)]
1）福岡大学研究推進部、2）㈱三和興業、3）㈱平組、
4）㈱都市資源開発、5）福岡大学工学部

１．はじめに

石膏ボードは、建築物の種類を問わず壁や天井材等の内装材料として大量に使用されており、新築および解体工事の建築現場からは大量の廃石膏ボードが発生する。廃石膏ボードの年間排出量は、石膏ボード工業会の推計によると 2010 年度に新築系 29.5 万ｔ、解体系 79.6 万ｔ、合計 109.1 万ｔと試算されている。さらに、今後は建築物の建て替えやリニューアル等に伴う解体系廃石膏ボードの大幅な増加が予想されている[1)]。

これら廃石膏ボードの処理・処分状況は、一部の新築系廃材はメーカーが回収してボード原料としてリユースされているものの、解体系廃材の大部分は再資源化されずに埋立処分されている。また、廃石膏ボードが処分された埋立地からは硫化水素ガスの発生が知られており、環境安全性の課題も指摘されている。したがって、廃石膏ボードのリサイクルは喫緊の課題である。

筆者らは廃石膏ボードの再資源化方法として、廃材を破砕した後に紙と石膏（二水石膏）に分離し、回収した石膏を加熱・脱水して半水石膏（以下リサイクル石膏という）を製造し、これを地盤改良等の中性固化材に利用する技術の研究開発を行っている。

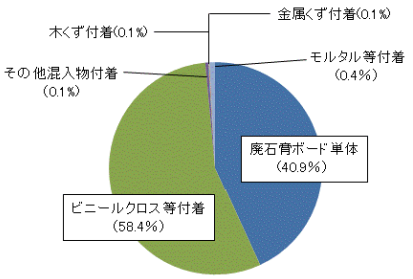


図１　解体系廃石膏ボードの組成調査結果[2)]

ところが、リサイクル石膏を製造する中間処理施設には木くず、金属くず、ビニールクロスやモルタル等の不純物が付着・混入したまま搬入されている（図１参照）。これらの不純物は、破砕・選別工程の機械装置の損傷や摩耗およびリサイクル石膏の品質確保に支障をきたすおそれがあるので、中間処理施設では 2～3 名の作業員を配置して手作業で不純物を分離・選別している。

そこで、解体工事現場において不純物を分別して解体撤去する方法を検討し、7 か所の解体工事現場を対象に実証試験を実施したので報告する。

２．実証試験対象の解体工事物件

実証試験の対象とした解体工事物件の概要を表 1 に示す。建築物の用途は事務所 2 か所、教育施設 2 か所、住宅 3 か所であった。建築物の構造は、事務所（2 か所）が RC 造、教育施設（2 か所）が S 造、住宅はいずれも木造であった。また、延床面積では、RC 造の事務所ビルが 2,066 ㎡と 319 ㎡、S 造の教育施設が 132 ㎡と 250 ㎡、住宅は 159 ㎡、94 ㎡、170 ㎡であり、今回の調査対象物件は比較的規模が小さなものが多かった。さらに、工事の種類は解体工事 5 件、改築工事 2 件であった。

表１　実証試験の対象とした解体物件の概要

物件No.	建物仕様			面積(㎡)		工事の種類
	用途	構造	築後年数	延床面積	建築面積	
1	事務所	RC造	不明	2,066	1,024	解体工事
2	事務所	RC造	40年	319	187	解体工事
3	教育施設	S造	不明	132	—	改築工事
4	教育施設	S造	12年	250	250	改築工事
5	住宅	木造	20年	159	101	解体工事
6	住宅	木造	不明	—	94	解体工事
7	住宅	木造	不明	—	170	解体工事

３．分別解体撤去と分別作業の方法・手順の検討

解体工事に先立ち対象解体物件毎に事前調査を行った。現状調査の項目は、①石膏ボードが施工された部位（壁、柱、梁、天井）、②表面仕上材の種類、③下地材の種類（木製、金属製など）、④取り付け方法（くぎ止め、ビス止めなど）、⑤施工面積である。

次に、解体撤去および解体現場での分別作業（廃棄物の種類の設定）を検討した。解体撤去作業は、先ず表面仕上材を取り除き、次に石膏ボード単体を撤去し、取り付け金具および下地材の順に手作業で行った。また、現場での分別作業は、①廃石膏ボード単体（付着物なし）、②ビニールクロス付着物、③その他表面仕上材付着物、④木製下地材付着物、⑤金属製下地材付着物、⑥取り付け器材（クリップ）付着物、⑦その他取り付け器材付着物、⑧石膏ボード以外の建設廃材（混入物）の 8 種類に分類し、個別に保管することとした。

４．調査結果と考察

調査結果を表 2～表 4 に示す。表 2 は実証試験対象物件での作業内容をまとめて示した。解体現場での分別は、廃石膏ボード単体、表面仕上材、下地材、取り付け器材、その他建設廃材の 5 分別であった。分別した廃棄物は種類ごとにフレコンバッグで集積・保管した。解体撤去作業および分別作業に要した延べ作業時間の比率は、約 60:40

【連絡先】〒836-0011　福岡県大牟田市健老町 461　福岡大学研究推進部　大牟田産学連携推進室
押方　利郎　Tel：0944-57-0015　FAX：0944－57－0015　e-mail：oshikata@adm.fukuoka-u.ac.jp
【キーワード】廃石膏ボード、リサイクル、解体工事、解体撤去、分別作業

であった。この40%に相当する人件費が分別解体工事費を上昇させる要因になると示唆された。

表3は実証試験対象物件で石膏ボードが施工されていた部位の現況調査結果である。対象現場で石膏ボードが使用されていた部位は、壁と天井であった。また、物件No.1は部屋の利用目的により表面仕上材、下地材が異なっていた。下地材は建築物の構造による違いは認められず、木製および金属製下地材が使用されていた。取り付け工法は、木製下地材の場合はくぎ止め工法が、金属製下地材の場合はビス止め工法が採用されている。

表4は実証試験対象物件から搬出された廃石膏ボードの組成調査結果である。実証試験7現場を個別にみると廃石膏ボード単体(付着物なし)は81.6%～100%の範囲にある。また、こられ7現場の平均では廃石膏ボード単体が98.5%、その他表面仕上材付着物が1.4%、石膏ボード以外の建設廃材(混入物)が0.1%であった(図2参照)。これは中間処理施設の破砕・選別工程の前処理として付着・混入している不純物を取り除いた後の組成[2]と同程度である。

図1に示したように、中間処理施設に搬入された解体系廃石膏ボードの組成調査では、廃石膏ボード単体は40.9%であったので、今回の実証試験対象の解体現場では石膏ボードの解体撤去および分別作業が概ね適正になされていたことが示唆された。

表2　実証試験対象物件での作業内容のまとめ

物件No.	分別方法				散じん防止		作業に要した工数			保管方法		処理・処分方法		廃石膏ボード搬出量(m³)
	表面仕上材	下地材	取り付け材	石膏ボードとその他の建設廃材を分別	散水あり	散水なし	撤去作業のみ	分別作業のみ	撤去分別併用	屋内保管	屋外保管	自社処分場	他社処分場	
1	吸音テックス	木製金属製	－	－		○	延べ48時間(6人×8時間/人)	延べ32時間(4人×8時間/人)		野積み			○	25
2	－	金属製	－	－		○	延べ16時間(2人×8時間/人)	延べ16時間(2人×8時間/人)		フレコンバッグ			○	4
3	－	木製金属製	－	○		○			延べ40時間(5人×8時間/人)	フレコンバッグ		○		2
4	－	木製金属製	－	○	○				延べ64時間(8人×8時間/人)		フレコンバッグ	○		21
5	－	木製	－	○		○			延べ8時間(1人×8時間/人)	フレコンバッグ		○		3
6	紙クロス	木製	ビス	○		○	延べ10時間(2人×5時間/人)	延べ3時間(1人×3時間/人)		フレコンバッグ		○		25
7	紙クロス	木製	くぎ	○	○		延べ8時間(1人×8時間/人)	延べ4時間(1人×4時間/人)		フレコンバッグ		○		4

表3　石膏ボードが施工されていた部位の現況調査結果

物件No.	部位			表面仕上材	下地材	取り付け工法	施工面積(m²)
	壁	柱・梁型	天井				
1	○			紙クロス	木製	くぎ止め	65
	○			なし	木製	くぎ止め	430
	○			なし	金属製	くぎ止め	25
			○	吸音テックス ロックウール吸音板	金属製 石膏ボード	ビス止め	155
			○	なし	金属製	ビス止め	620
2			○	紙クロス	金属製	ビス止め	158
3			○	不明	木製 金属製	くぎ止め ビス止め	132
4			○	不明	木製	くぎ止め ビス止め	230
5			○	紙クロス	木製	くぎ止め ビス止め	31
6	○			紙クロス	木製	ビス止め	15
7	○			紙クロス	木製	くぎ止め	57

表4　分別解体現場から搬出された廃石膏ボードの組成

搬入時の荷姿	運搬車両	搬入れ時の廃石膏ボード重量(kg)	搬入れ時の廃石膏ボード組成(kg)							
			廃石膏ボード単体(付着物なし)	ビニールクロス付	その他表面仕上材付	木製下地材付	金属製下地材付	クリップ付	その他取り付け器具付	石膏ボード以外の建設廃材(混入物)
バラ(シート掛け)	4t車(フックロール車)	8,580	8,573.4	0	0	0	0	0	0	6.6
フレコンバッグ	4t車(トラック)	1,350	1,350	0	0	0	0	0	0	0
フレコンバッグ コンテナ (シート掛け)	4t車(フックロール車)	920.3	920	0	0	0	0	0	0	0.3
フレコンバッグ その他(幌含シート掛け)	4t車(トラック)	2240.4	2,234.8	0	0	0	0	0	0	5.6
フレコンバッグ	2t車(フックロール車)	170	167.8	0	0	0	0	0	0	2.2
フレコンバッグ	4t車(トラック)	441	359.9	0	紙クロス80	0	0	0	0	1.1
フレコンバッグ	4t車(トラック)	950	827	0	紙クロス120	0	0	0	0	3

5．まとめ

筆者らは、廃石膏ボードを破砕した後に紙と石膏(二水石膏)に分離し、回収した石膏を加熱・脱水して高品質なリサイクル石膏を製造する技術の研究開発に取り組んでいる。高品質なリサイクル石膏を製造する中間処理施設の課題は、搬入された廃石膏ボードー特に解体系廃石膏ボードーに多くの不純物が付着・混入していることである。そのために、中間処理施設では2～3名の作業員を配置して手作業で不純物を分離・選別している。

そこで、解体工事現場で廃石膏ボードと木くず、金属くず、ビニールクロスやモルタル等の不純物の種類別に解体撤去および分別作業の実証試験行った。

その結果、7現場の平均では廃石膏ボード単体が98.5%となり、中間処理施設での前処理により付着・混入していた不純物を取り除いた結果[2]と同程度の組成割合であった。このことから、今回の実証試験対象現場では石膏ボードの解体撤去および分別作業が概ね適正になされていたと考えられる。

しかしながら、実証試験7現場を個別にみると廃石膏ボード単体(付着物なし)は81.6%～100%の範囲となっており、①作業ルールの徹底、②解体撤去および分別する品目の再確認と周知方法、③保管方法の再確認と徹底、④調査票への記入上の留意点の再確認と徹底が今後の課題である。

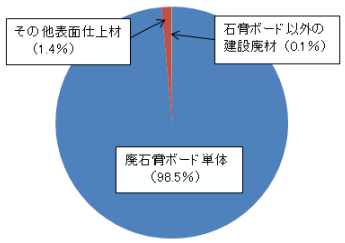


図2　解体現場から搬出された廃石膏ボードの組成調査結果

今後も引き続き解体工事現場で不純物を分別して解体撤去および現場での分別作業にかかるデータ収集に努め、経済性も加味しながら汎用的な分別解体工法の手順書(案)を作成する予定である。

[謝辞]本研究は平成22年度循環型社会形成推進科学研究費補助金「石膏ボードリサイクル技術の総合化に関する研究(K22101)」にて実施したものである。ここに記して感謝の意を表します。

＜参考文献＞
1)　(社)石膏ボード工業会：廃石膏ボードの対応策について、2010年5月
2)　押方利郎他：中間処理施設に搬入された廃石膏ボードの組成調査、第21回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集、pp. 99-100、2010

6. 吉田英史，佐藤研一，藤川拓朗，押方利郎

再生半水石膏による地盤改良材の力学特性と環境安全性について

第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，pp. 207-208，2011 年，11 月

ポスター１　B3-8

再生半水石膏による地盤改良材の力学特性と環境安全性について

○（学）吉田英史[1)]、（正）佐藤研一[2)]、（正）藤川拓朗[2)]、（正）押方利朗[3)]
1）福岡大学大学院、2）福岡大学、3）福岡大学大牟田産学連携推進室

1. はじめに　現在、石膏ボードは建築資材として優れた特徴を持ち、経済的にも低廉なことから建築物の内装材として広く利用されている。それに伴い、解体現場からの廃石膏ボード排出量は増加の一途を辿っており、平成 23 年時点では現状の 140 万ｔから 500 万ｔに急増することが予想されている。そのような中、平成 18 年 6 月環境省の通達により、最終処分する場合は、管理型最終処分場への埋立が義務付けられた。しかし、処分場の容量不足や民間業者の受入拒否などの問題等を受け、廃石膏の有効利用が急務とされている。廃石膏ボードから得られる二水石膏を焼成して得られる半水石膏（以下再生半水石膏）は、水を加えると固化する性質があり、多くの利用が考えられる地盤改良材としての有効利用が望まれている。しかしながら、重金属溶出や硫化水素発生等が課題として挙げられていることが現状である[1)]。そこで本報告では、再生半水石膏を用いて、特に軟弱地盤の浅層混合処理の固化材を開発することを目的とし、再生半水石膏により改良された材料の力学・溶出特性について実験的検討を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 実験試料　土質材料は、福岡市内の現場で採取した博多粘土を用い 2㎜ ふるいにて粒度調整したものを使用した。また、固化材として IH 式半水化装置(130℃～160℃で一定加熱)で焼成されたβ型再生半水石膏、補助固化材として高炉セメント B 種を、さらに助材として長期強度の向上を目的として石炭灰を使用した。ここで、補助固化材とは、石膏による固化効果を補助する材料とし、助材とはさらにその効果を補完する材料とする。**図-1** に各試料の粒径加積曲線を、**表-1** に物理特性を示す。**図-1** 及び**表-1** より、博多粘土と石炭灰はシルト分、再生半水石膏は砂分で構成されていることが分かる。さらに、博多粘土は高有機質土、石炭灰は他の試料に比べ粒子密度が小さい事が分かる。フッ素溶出濃度に着目すると、博多粘土、再生半水石膏、石炭灰自体には、土壌環境基準値を大きく上回るフッ素が含有されていることが分かる。また pH に着目すると、半水石膏は中性固化材としての特徴を示していることが分かる。

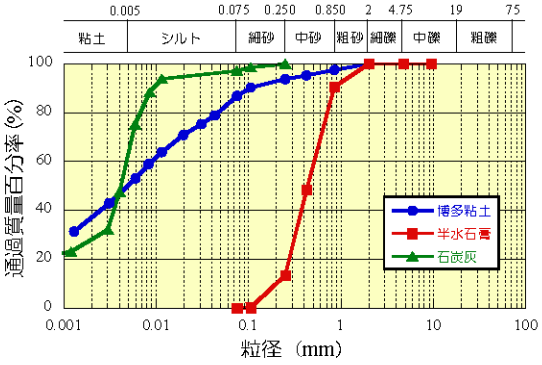


図-1　粒径加積曲線

表-1　物理特性値

	博多粘土	再生半水石膏	石炭灰
粒子密度ρ_s(g/cm^3)	2.737	2.951	2.263
細粒分含有率Fc(%)	86.90	0.030	97.2
液性限界w_L(%)	79.65	-	-
塑性限界w_P(%)	30.94	-	-
塑性指数I_P	48.71	-	-
強熱減量(%)	9.79	-	-
pH	8.08	7.46	9.93
F(mg/l)	1.21	5.94	3.41

2-2 実験方法　1）**力学特性の検討**　**表-2**、**表-3** に示す配合条件に従って安定処理土の締固めを行わない供試体作成方法[2)]に準じて、直径φ5×高さ h10(cm)の塩ビ製モールドに打設した。翌日整形、翌々日に脱型し、ラップに包み 20℃一定の恒温室で所定日数養生させ、一軸圧縮試験(JIS A 1216)を行った。安定材の添加量については、土質材料に対する重量比から算出している。

2）**溶出特性の検討**　溶出試験用の試料は、一軸圧縮強度を測定した後の破壊断片を回収したものを使用した。**表-4** に示す溶出条件に従い環告 46 号法試験に準拠した方法で溶出試験を行った。そして、得られた検液はイオンクロマトグラフによりフッ素溶出量の測定を行った。

表-2　配合条件(再生半水石膏+高炉セメント B 種)

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 C (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)
博多粘土	80	75	35 45	7
	100		55	
	120	150	65 75	

2-3 検討内容　1）軟弱地盤の浅層混合処理材料の開発を行うため、改良された地盤の目標一軸強度[3)]である養生 7 日においての 300(kN/m^2)を満足する補助固化材料の最低添加量の力学・溶出特性を把握する(**表-2**)。2）長期強度の向上を目的として、1)の検討項目より得られた最低添加量を基に石炭灰を添加した際の力学特性を把握する(**表-3**)。

表-3　配合条件(再生半水石膏+高炉セメント B 種+石炭灰)

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 C (kg/m^3)	石炭灰 F_A (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)
博多粘土	100	75	54	10	7
		150	48		
	120	75	59	30	28
		150	55		

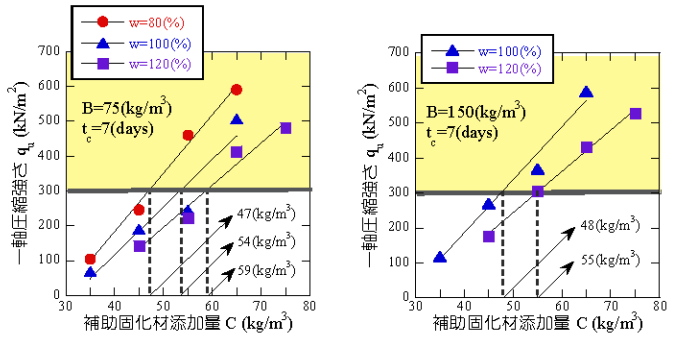
表-4　溶出条件

試料	L/S	振とう時間	設定pH
混合試料	10	6	5.8～6.3

3. 実験結果及び考察　**図-3** に養生 7 日での補助固化材(高炉セメント B 種)添

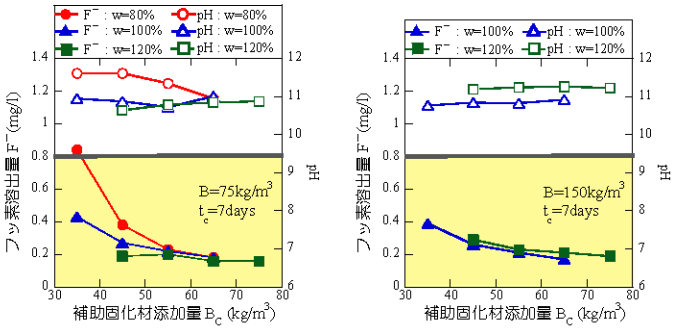
【連絡先】〒814-0180　福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1　福岡大学工学部　道路・土質研究室
佐藤研一　Tel：092-871-6631　FAX：092-871-6631　e-mail：sato@fukuoka-u.ac.jp
【キーワード】廃石膏ボード　地盤改良材　一軸圧縮強さ

加量と一軸圧縮強さの関係を示す。また、図中の色枠は浅層混合処理工法の要求強度である 300 kN/m²以上を示している。補助固化材添加量が増加するにつれて大きな強度発現を呈していることが分かる。また、全ての条件において補助固化材添加量と一軸圧縮強さの相関性が非常に高い値を示している事から、目標強度である 300kN/m² を満足する補助固化材の最低添加量を推測することができる。図中に要求強度を満足する補助固化材の最低添加量の検討結果を示す。含水比に着目すると、含水比の増加に伴い要求強度に必要な最低添加量が増加していることがわかる。これは、水セメント比(W/C)の関係によるものと考えられ、近似式を利用して要求値を満足する W/C を導出するとほぼ 13～15 以下であった。一方、再生半水石膏添加量に着目すると、再生半水石膏添加量が増加するにつれて補助固化材最低添加量が減少していることがわかる。これは、再生半水石膏の凝結硬化作用が働いたためであると考えられ、実施工を想定した場合でも、再生半水石膏を添加することで要求強度に必要なセメント量を減少させられると予測できる。**図-4** に養生 7 日での補助固化材添加量とフッ素溶出量と pH の関係を示す。色枠はフッ素の土壌環境基準値を示している。pH に着目するといずれの条件においても 10～11 の弱アルカリ性を示していることがわかる。フッ素溶出濃度に着目すると、全ての条件においてセメント添加量が増加するにつれ、漸次低下していることがわかる。これはエトリンガイトによりフッ素イオンが固定され、再生半水石膏からのフッ素の溶出が抑制されたと考えられる。



(a) B=75kg/m³　(b) B=150kg/m³

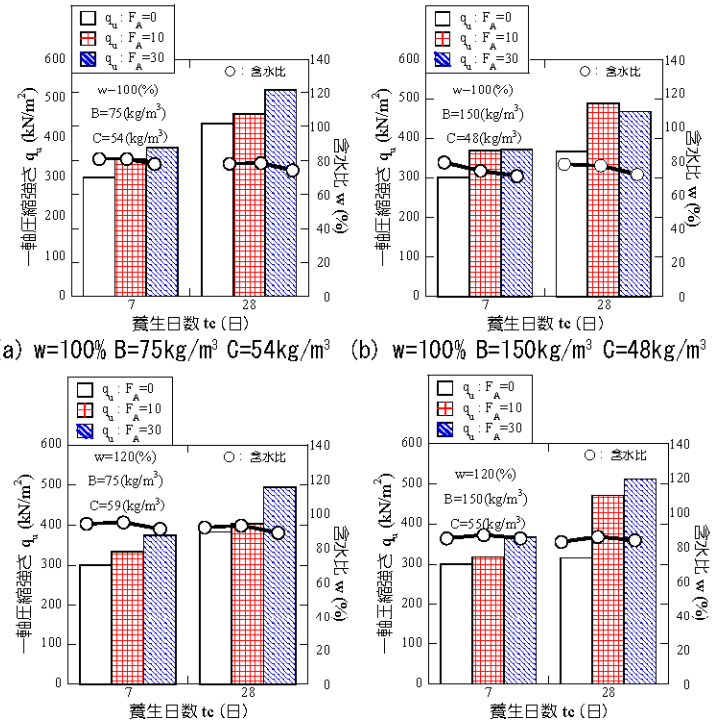
図-3　補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係(養生 7 日)



(a) B=75kg/m³　(b) B=150kg/m³

図-4　補助固化材添加量とフッ素溶出濃度と pH の関係(養生 7 日)

図-5 に要求強度を満足する最低添加量に助材として石炭灰を混合した際の、養生日数、一軸圧縮強さ及び含水比の関係を示す。全ての条件において養生日数に関係なく、石炭灰添加量が増加するに伴い一軸圧縮強さが増加していることが分かる。これは助材を添加していない条件と比較しても明らかであり、石炭灰を混合することにより、実地盤に適用した際にも、早期にトラフィカビリティーが改善され、工期の短縮が可能になるものと考えられる。一方、含水比の変化に着目すると、再生半水石膏、石炭灰添加量が増加するにつれて、含水比は僅かに低下していることがわかる。これは、再生半水石膏の凝結硬化による吸水効果と石炭灰の特徴である吸水効果によるものであり、これらが一軸圧縮強さの増加に関係していると推察できる。また、配合条件によっては、28 日養生において強度増加が見られない条件もあることから、石膏、セメント、石炭灰の配合条件により強度発現が異なると考えられ、最適な配合についても今後検討することが必要である。



(a) w=100% B=75kg/m³ C=54kg/m³　(b) w=100% B=150kg/m³ C=48kg/m³

(c) w=120% B=75kg/m³ C=59kg/m³　(d) w=120% B=150kg/m³ C=55kg/m³

図-5　養生日数と一軸圧縮強さと含水比の関係

4. まとめ　要求強度を満足する補助固化材の添加量は、再生半水石膏添加量が増加するにつれ、凝結硬化作用が働き減少する。フッ素の溶出は、補助固化材として高炉セメント B 種を添加することにより抑制することが可能である。

謝辞：本研究は、環境省平成 22 年度循環型社会形成推進科学研究費(No.K22101)および文部科学省化学研究費(No.21560527)の一部として実施された研究である。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献　1）平成 20 年度廃石膏ボードの再資源化促進方策検討業務調査報告書 2）地盤工学会,土質試験の方法と解説－第一回改正版－,「安定処理土の締固めをしない供試体作製」,PP.308-316．3）(社)日本建築学会,建築基礎のための地盤改良設計指針案,PP37-42.

7. 武下俊宏，姜誠，樋口壯太郎

硫化水素発生試験において生成する硫化物量と硫化水素ガス濃度の関係

第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，pp. 209-210，2011 年，11 月

ポスター２　B3-9

硫化水素発生試験において生成する硫化物量と硫化水素ガス濃度の関係

○(正)武下俊宏，(学)姜誠，(正)樋口壯太郎
福岡大学大学院工学研究科

1. 緒言

前回，再生半水石膏を用いて改良した土壌試料について，硫化水素発生試験を行った結果について報告した[1]．これまでの硫化水素発生試験は，再生石膏や混合される土壌等に含まれる成分だけで硫化水素ガスが発生するかを評価することに重点を置いてきた．そのため，試料に純水を添加して水没させ，さらに窒素ガス置換して早期に嫌気条件を形成させ，硫化水素ガスの発生を促すことでヘッドスペースに生じる硫化水素ガス濃度を確認してきた．この方法は，水以外の硫化水素発生条件が混合試料にどの程度整っているか，また，硫化水素の固定能力がどの程度試料に備わっているのか等により硫化水素ガスの発生量が左右されるため，本方法を施工現場で採取した試料から硫化水素ガスがどの程度発生するのかを評価する方法として検討してきた．しかし，本方法によるヘッドスペースの硫化水素ガス濃度分析だけでは混合試料から実際に硫化物がどの程度生成し，また生成した硫化物のうち，硫化水素ガスとして発生する割合がどの程度なのか不明であった．そこで，今回はこれまで行ってきた硫化水素発生試験において，硫化物生成量と硫化水素ガス濃度の関係を，廃石膏剥離紙を硫化水素発生源，試薬の酸化鉄と純鉄を硫化水素吸収材とする実験系で確認し，硫化物生成量のうち硫化水素ガスとなる硫化物の割合がどの程度か把握することとした．

2. 目的

1)硫化水素発生試験において，純鉄粉添加により供試試料から生じる硫化物の生成量を求める．
2)硫化水素発生試験において，酸化鉄粉添加および無添加により供試試料から生じる硫化物の生成量を求め，1)と比較する．また，ここで得られる硫化物生成量のうち，硫化水素ガスとなる硫化物の割合を求める．

1)の生成量を求めるため，試料仕込み時に純鉄粉を加え，溶存酸素を化学反応によって除去して嫌気状態を形成させる．これまでの硫化水素発生試験では，好気性微生物の呼吸によって溶存酸素を除去していたが，この際有機物も利用され減少していた．しかし，溶存酸素の除去を化学的に行えば多くの有機物を残したまま嫌気状態を形成でき，硫化物の生成量が増大すると考えられる(図 1 参照)．また，生成した硫化水素は直ちに過剰の純鉄粉と反応して硫化物を形成して固定される．生成した硫化水素の全量が硫化物として固定されていることを確認するため，硫化水素ガス濃度の測定を行い，検出されないことを確認する．

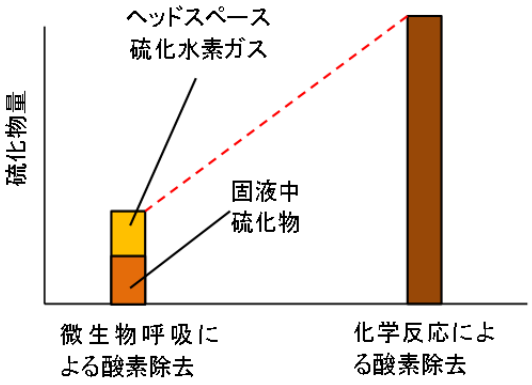


図1　硫化物生成量および硫化物生成量に対する硫化水素ガスとなる硫化物の割合のイメージ．

2)の硫化物量を測定するため，試料仕込み時に試薬の酸化鉄2種(Fe_3O_4 と Fe_2O_3)を硫化水素吸収材として加える．溶存酸素の除去は従来からの好気性微生物の呼吸により嫌気状態を形成させる硫化水素発生試験を行う．ここで生成する硫化物量は，1)で得られる硫化物量より減少すると考えられるのでこの減少割合を求める．次に，硫化水素ガス生成濃度と硫化物量を測定することで，供試試料の硫化物生成量に対する硫化水素ガスとなる硫化物の割合を求める(図1参照)．比較のため酸化鉄を添加しない試料も準備し，同様に硫化水素ガス生成濃度と硫化物量を測定する．

3. 実験方法

硫化水素発生試験

全容 500m L のデュラン瓶に，約 1cm 四方に裁断した廃石膏剥離紙 10g を量り取り，さらに酸化鉄粉や純鉄粉添加の場合は 1.0g を添加した．酸化鉄粉や純鉄粉は市販の化学試薬を用いた．そこへ純水 200mL とシード 1.0mL を添加し，高純度窒素ガスを 2L/min で 1 分間液中に吹き込み，溶存酸素の低減とヘッドスペースガスの置換を行った．ガス置換後はシリコン栓で密栓し35℃の恒温装置に静置し，硫化水素の発生を待った．ヘッドスペースに発生した硫化水素ガスはGC-FPD で濃度分析した．なお，硫化物生成量の測定は，ヘッドスペースの硫化水素濃度測定後の容器に酢酸亜鉛溶液(240g/L)5m L を注入してかくはんし，気相の硫化水素ガスを液中に固定した後開栓し，硫化水素発生・回収装置の分解瓶の位置に配置，配管して硫化物を吸収液に回収した．回収した吸収液の硫化物量は JIS K0102[2]によるヨウ素滴定法により定量した．

【連絡先】武下俊宏，〒808-0002　福岡県北九州市若松区向洋町 10 番地，
福岡大学　資源循環・環境制御システム研究所，電話 093-751-9975，FAX093-751-9976，takesita@fukuoka-u.ac.jp．
【キーワード】硫化水素，硫化物，酸化鉄，純鉄，ヨウ素滴定法．

4. 実験結果

4. 1. 硫化物生成量

硫化物生成量の分析結果を図2に示す. 硫化水素発生源として廃石膏ボードから剥離した石膏紙を使用した. 本実験では純鉄粉 1.0g を添加した場合, 石膏紙 10g 当たり 120mg の硫化物が生成した. これに対し, 添加なしの場合には30mg の硫化物が生成した. 添加なしの試料では純鉄粉を添加した試料の 25%の硫化物生成量に減少した. また酸化鉄粉 1.0g を添加した場合, Fe_3O_4 で 54mg, Fe_2O_3 で 55mg の硫化物が生成した. 酸化鉄粉を添加した試料では純鉄粉を添加した試料の 45%(Fe_3O_4)と 46%(Fe_2O_3)の硫化物生成量に減少した. この原因として, 純鉄粉を添加した試料では純鉄粉の酸化により脱酸素反応が進行するため有機物の消費が起こらないのに対し, 酸化鉄粉添加および添加していない試料では, 好気性微生物の呼吸により脱酸素反応が進行するのに合わせて有機物も消費されるため, 嫌気条件下で硫化水素生成に利用される有機物量が減少することが考えられる.

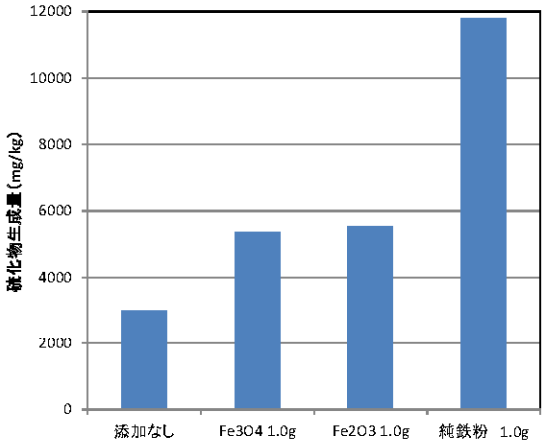


図2 硫化物生成量の分析結果.

4. 2. 硫化水素ガス発生濃度

ヘッドスペースガスの硫化水素ガス濃度を図3に示す. 純鉄粉を添加した試料では硫化水素ガスの発生は確認されなかった. 一方, 酸化鉄粉を添加あるいは添加なしの試料では硫化水素ガスが発生し, 発生濃度は添加なしの試料で 18,000ppm, 酸化鉄粉添加試料では Fe_3O_4 の場合 8,000ppm, Fe_2O_3 の場合 31,000ppm であった. これより, ヘッドスペース(空間容積 350mL)に生成した硫化物量を計算(1気圧, 35℃, 硫化物換算)すると, 添加なしの場合 8.0mg, 酸化鉄粉添加試料の場合 Fe_3O_4 で 3.5mg, Fe_2O_3 で 14mg となった. 純鉄粉を添加した試料からは硫化水素ガスの発生は確認されなかったので, 硫化物換算値は 0mg となった.

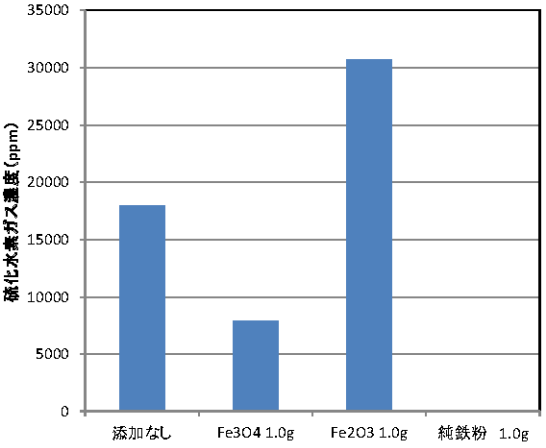


図3 硫化水素ガス濃度の分析結果.

4. 3. 硫化物生成量と硫化水素ガスとなる硫化物の割合

各試料の硫化物生成量と硫化水素ガス発生濃度から換算した硫化物量を図4に示す. 図中のバーは, 固体や液体中の硫化物の存在量を赤で, またヘッドスペースガス中に硫化水素ガスとして存在する硫化物量を青で示し, これらの和を硫化物生成量(赤と青)として示したものである. 各試料について, 生成した硫化物量に対するヘッドスペースに生じた硫化水素ガスの硫化物量の割合を求めると, 添加なしの場合 27%, 酸化鉄粉添加の場合 Fe_3O_4 で 6.5%, Fe_2O_3 で 25%であった. 純鉄粉添加の場合, 硫化水素ガスの発生は全く確認されなかったため, ヘッドスペースに発生した硫化水素ガスの硫化物量の割合は 0%であった.

固液中に存在する硫化物量は気中に硫化水素ガスとして存在する硫化物量より存在割合が高いことが明らかになった. もし固液相の pH が酸性となった場合, 硫化水素ガスとなる硫化物の割合が増加し, また酸性化したときの硫化水素ガスの最大発生量は, 存在する硫化物の全量が硫化水素ガスとなったときと考えられる.

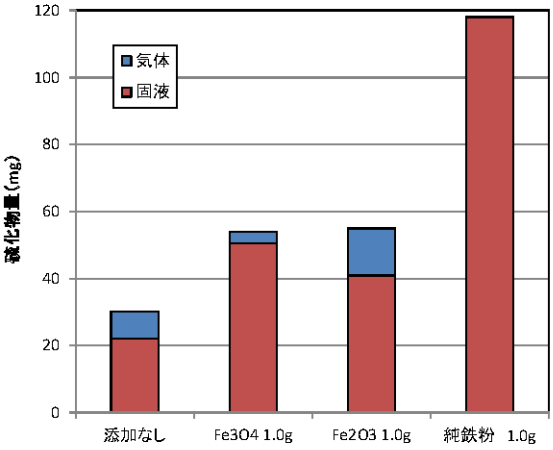


図4 固体および液体中に存在する硫化物量(赤)と硫化水素ガスの占める硫化物量(青)の割合.

5. 今後の課題

今後, 硫酸還元菌用培地組成を基にした無機栄養成分添加により硫化水素生成に関わる微生物の生育条件の改善を試みる. これにより, 今回と同様の試験を行い硫化物生成量に対する硫化水素ガスの発生濃度等の関係を求める等, 従来の硫化水素発生試験を改良する. また, 従来からの硫化水素ガス発生濃度に硫化物生成量を含めた供試試料の安全性の評価を検討する.

参考文献

1) 第21回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, p197-198.
2) JIS ハンドブック環境測定水質編 K0102.

8. 金子りさ，吉田英史，佐藤研一，押方利朗，大山勝寿，森田博史

生石灰混合による再生半水石膏を用いた地盤改良土の力学・溶出特性

平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会，pp431-432，2012 年，3 月

生石灰混合による再生半水石膏を用いた地盤改良土の力学・溶出特性

福岡大学　学生会員　○金子りさ　吉田英史
福岡大学　正会員　佐藤研一　押方利郎
ふくおか石膏ボードリサイクル研究会　非会員　大山勝寿　森田博史

1. はじめに　近年、廃石膏ボードは、中間処理が義務付けられ、管理型処分場の容量不足等の問題からリサイクル化[1)]が求められている。その為、廃石膏ボードから生成される再生半水石膏を地盤改良材に用いる研究が、積極的に行われている[2,3)]。しかし、再生半水石膏を添加した改良土の長期的な力学・溶出特性については未だ明らかにされていない。また、昨年度の研究成果[4)]より、再生半水石膏のみの改良では、土木工事の利用において強度発現が不十分である事が指摘されている。そこで本研究では**図-1** に示すフローに従って、再生半水石膏の固化を補助する役割を持つ固化材として生石灰と高炉セメント B 種を用い、軟弱地盤改良土の力学・溶出特性について実験及び検討を行った。特に、補助固化材の種類の違いと養生期間に着目して比較・検討を行った結果について報告する。

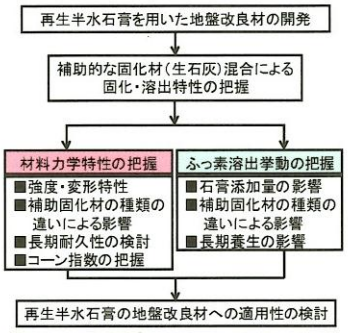


図-1　本研究のフローチャート

2. 実験概要

2-1 実験に用いた試料　本実験では、土質試料として 2mm ふるいを通過させた博多粘土、固化材として IH 式石膏半水化装置(焼成温度約 125~160℃)で焼成された再生半水石膏、補助固化材として生石灰と高炉セメント B 種を使用した。特に生石灰[5)]は、短期的に消化吸収水反応・イオン交換反応、長期的にポゾラン反応・炭酸化反応が起こるという特徴がある。各試料の粒径加積曲線を**図-2** に、物理特性値を**表-1** に示す。**図-2, 表-1** より、博多粘土と再生半水石膏はシルト分構成で、博多粘土は強熱減量 9.79%と高有機質土である事が分かる。

表-1　物理特性値

	博多粘土	IH式 再生半水石膏
粒子密度ρ_s(g/cm^3)	2.737	2.951
細粒分含有率Fc(%)	86.90	80.0
液性限界W_L(%)	79.65	-
塑性限界W_P(%)	30.94	-
塑性指数I_P	48.71	-
強熱減量(%)	9.79	-
pH	8.08	7.46
F(mg/l)	1.21	5.94

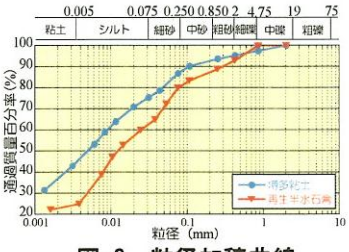


図-2　粒径加積曲線

2-2 実験方法　改良土の力学特性は、一軸圧縮試験とコーン指数試験により評価した。**表-2** に配合条件(固化材添加量は乾燥土 1m^3 に対する質量比)を示す。一軸圧縮試験用の供試体は、安定処理土の締固めを行わない供試体作成方法[6)]に準じ、モールド(直径 ϕ=50mm,高さ h=100mm)に入れ 3 層に分けて打設した。コーン指数試験の供試体は、モールド(直径 ϕ=100mm,高さ h=126mm)に入れ、各層突固め 40 回、3 層に分けて打設した。また、モールド内に突固める際には、一軸圧縮試験結果と同様の締固め度 D=95%になるように、タンピング法にて供試体を作製した。溶出特性は、環告 46 号法に準拠した方法で検体を作製し、イオンクロマトグラフによりふっ素溶出濃度を測定し、評価した。

表-2　本研究の実験の配合条件

土質試料	含水比 w(%)	固化材 再生半水石膏 添加量 B(kg/m^3)	補助固化材 生石灰/高炉セメントB種 添加量 Ca/Bc(kg/m^3)	養生日数 tc(day)
博多粘土	100	0、100、200	100	3、7、14、28、56、72、91

3. 実験結果及び考察

3-1 力学特性　**図-3**(a),(b)にそれぞれ生石灰、高炉セメント B 種添加量 100kg/m^3 における養生日数と一軸圧縮強さの関係(凡例は、B:再生半水石膏、Ca:生石灰、Bc:高炉セメント B 種)を示す。養生日数に伴い一軸圧縮強さは増加しており、3ヶ月に及ぶ長期養生後も安定した強度発現が認められる為、再生半水石膏を混合した改良土は長期的にも安定した強度が得られる事が判明した。また、補助固化材の種類の違いに着目すると、生石灰混合による改良土は、長期に伴って一軸強度が一定値に落着かず増進している。これは、生石灰の特徴であるポゾラン反応が原因とみられる。一方、高炉セメント B 種は、養生 3 日後から急な強度増加を示すが、56 日を越えると強度

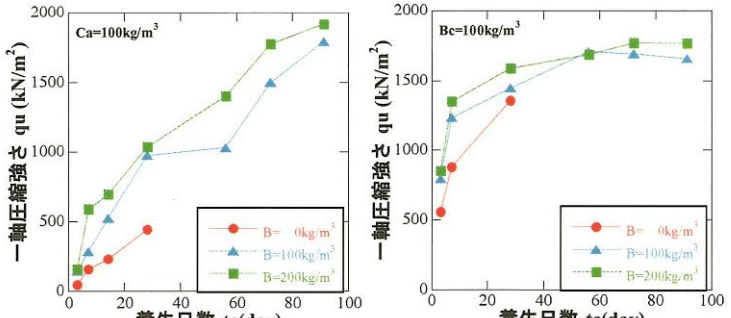


図-3　養生日数と一軸圧縮強さの関係

増加が一定値に落着く傾向を示している。したがって、早期に軟弱地盤のトラフィカビリティーの改善を図る場合に、高炉セメントB種は有効であると言える。**図-4** に再生半水石膏添加量とコーン指数の関係を示す。一軸圧縮強さの結果同様に、再生半水石膏添加量及び補助固化材添加量の増加に伴い、コーン指数が増加している事が分かる。**図-5** にコーン指数と一軸圧縮強さの関係を示す。全条件共にコーン指数が800kN/m² 以上を示している為、高含水比の軟弱地盤を養生7日で第2種処理土に改良できると言える。また、補助固化材の種類の違いに着目すると、相関性はどちらともR=0.9以上を示し、相関性は高いと言える。回帰式は、生石灰を添加した場合 $q_c=4.8q_u$、高炉セメントを添加した場合 $q_c=9q_u$ という関係を示した。したがって、コーン指数による強度算定時に、補助固化材の種類の違いによる考慮が必要である。

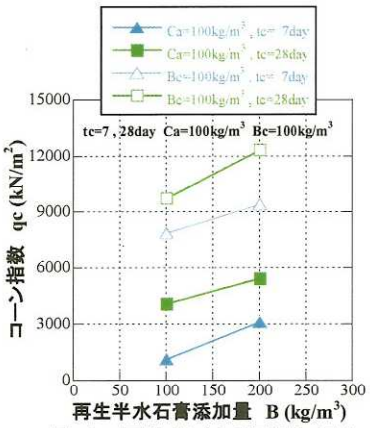


図-4　再生半水石膏添加量とコーン指数の関係

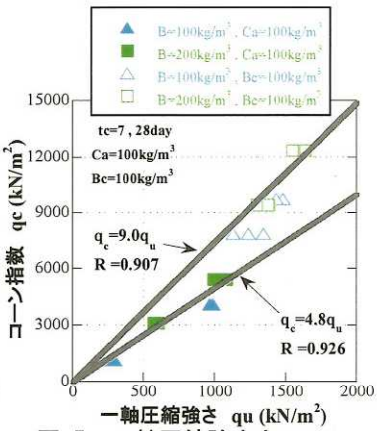


図-5　一軸圧縮強さとコーン指数の関係

3-2 溶出特性　**図-6**(a),(b)に補助固化材である生石灰と高炉セメントB種を用いた改良土における、養生日数とふっ素溶出濃度の関係を示す。pH に着目すると、改良土は両補助固化材を用いる事により、強アルカリ性を示している事が分かる。したがって、再生半水石膏と補助固化材を地盤改良材として実地盤へ用いた場合、アルカリ環境下の為、硫化水素は発生し難くなると考えられる[7]。また、生石灰を添加した方が、高炉セメントB種と比較して高いpHを示している。これは、酸化カルシウムが水溶液となった時、水酸化カルシウムとなり強塩基性を呈する為だと考えられ[3]、高炉セメントB種より生石灰の方が酸化カルシウムの含有量が多い為、高いpHを示していると考えられる。ふっ素溶出濃度に着目すると、補助固化材の種類の違いに関係なく養生日数が経過するにつれて溶出濃度が低下しており、いずれも土壌環境基準値である0.8mg/l以下を示している事が分かる。これは、生石灰の場合、水と反応して消石灰となった後、土中の粘土鉱物と結びつき、エトリンガイトが生成される事によってふっ素が固定され、溶出を抑制した為であると考えられる[3]。高炉セメントB種の場合も、含有している生石灰によって同じ効果が働いたと考えられる。

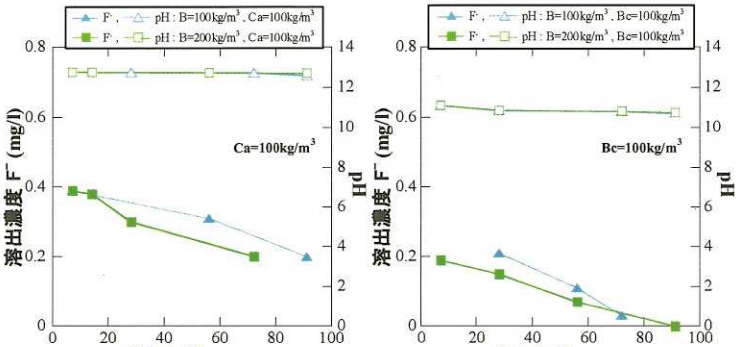


図-6　養生日数とふっ素溶出濃度，pHの関係

4. 結論　1) 補助固化材として生石灰を用いると、ポゾラン反応の影響により、長期養生に伴ってせん断強度が増進する。一方、高炉セメントB種の場合は、早期に軟弱地盤のトラフィカビリティーの改善を図る事ができる。2) 補助固化材を用いた再生半水石膏改良土の強度をコーン指数から算定する場合、補助固化材の種類の違いによる影響を考慮する必要がある。3) 生石灰と高炉セメントB種を添加した改良土は強アルカリ性を示す為、実地盤へ用いた場合、硫化水素は発生し難くなる。また、補助固化材の利用により、水和反応によりエトリンガイトが生成され、ふっ素の溶出を抑制する事ができる。

謝辞：本研究は、環境省平成 23 年度循環型社会形成推進科学研究費(No.K2359)および文部科学省化学研究費(No.21560527)の一部として実施された研究である。関係各位に心より感謝申し上げます。

【参考文献】 1) 社団法人 石膏ボード協会　2) 例えば亀井ら:半水石膏を利用したセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす養生期間の影響,地盤工学ジャーナル,vol.4,No.1,pp.99-105　3) 亀井健史:高炉セメント B 種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発,地盤工学ジャーナル,vol.4,No.1,pp.91-98　4) 松崎ら:再生半水石膏による軟弱地盤改良技術の検討,土木学会西部支部研究発表会,2011.3　5) 拓南産業株式会社,石灰の改良原理と特徴　6) 地盤工学会,土質試験の方法と解説－第一回改正版－,「安定処理土の締固めをしない供試体」, PP.308-316.　7) Xu, Qiyong, Townsend, T., and Reinhart, D.(2010): Attenuaction of hydrogen sulfide at construction and demolition debris landfills using alternative cover materials, Waste Management, Vol.30, No.4, pp.660-666.

9. 吉田英史，佐藤研一，藤川 拓朗，押方利朗

再生半水石膏地盤改良土のふっ素溶出挙動の把握

平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会，pp433-434，2012 年，3 月

再生半水石膏地盤改良土のふっ素溶出挙動の把握

福岡大学大学院　学生会員　吉田英史
福岡大学工学部　正会員　佐藤研一　藤川拓朗
福岡大学大牟田産学連携推進室　正会員　押方利朗

1. はじめに　現在、新築・解体現場から排出される廃石膏ボードは、紙と石膏に分離・中間処理し、リサイクルが出来ないものについては管理型最終処分場へと処分することが義務付けられている[1]。しかし、処分場の容量不足や民間処分場の受入拒否などの問題から、廃石膏の有効利用が急務とされている。廃石膏ボードから得られる二水石膏を焼成処理して得られる半水石膏(以下再生半水石膏)は、水を加えると固化する性質を有している。そこで現在この特徴を利用した地盤改良材としての有効利用技術の研究[2]が進められている。そこで本研究では、特に高含水比の軟弱地盤の改良を想定し、固化材として再生半水石膏を用いた地盤改良材の開発を目的として、実地盤への適用性の検討を行っている。本報告では、再生半水石膏を地盤改良材として利用し、降雨を想定した際のふっ素溶出挙動の把握を目的とし、カラム試験による実験的検討を行った結果について報告する。

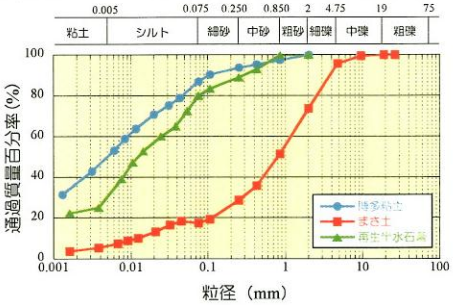


図-1　実験に用いた試料の粒径加積曲線

2. 実験概要

(1)　実験試料　土質材料として福岡市内の現場で採取した海成粘土を用い、2mm ふるいにて粒度調整したものを使用した。また、固化材として IH 式半水化装置(130℃～160℃で一定加熱)で焼成されたβ型再生半水石膏、補助固化材として高炉セメント B 種を使用した。また、実地盤を想定した吸着効果を確認するため、まさ土を覆土として用いた。**図-1** に各試料の粒径加積曲線を、**表-1** に物理特性値を示す。**図-1** 及び**表-1** より、博多粘土は粘土・シルト分が多く高有機質土であることがわかる。また再生半水石膏はシルト分で構成されていることが分かる。一方、博多粘土、再生半水石膏自体のふっ素溶出濃度は、土壌環境基準値(0.8mg/l)を大きく上回るふっ素が溶出している。pH については、再生半水石膏は中性域にあり、中性固化材としての特徴を有している。

表-1　物理特性値

	海成粘土	まさ土	IH式再生半水石膏
粒子密度ρ_s(g/cm^3)	2.737	2.721	2.951
細粒分含有率Fc(%)	86.90	17.40	80.0
液性限界W_L(%)	79.65	44.9	-
塑性限界W_P(%)	30.94	33.79	-
塑性指数I_P	48.71	11.11	-
強熱減量(%)	9.79	4.14	-
pH	8.08	-	7.46
F(mg/l)	1.21	-	5.94

(2)　実験方法　再生半水石膏を混合した改良土が実地盤に与える影響を把握するため、**図-2** に示す内径 5cm の狭径カラム装置を用いて溶出試験を行った。**表-2** にカラム試験の実験条件を示す。供試体については、安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法[3](JGS 0821-2000)に準じて、直径φ5×高さ h10(cm) の塩ビ製モールドに打設した。一定期間養生させたこの供試体を、一軸圧縮試験終了後に破壊断片をプラスチックハンマーで破砕し、2mm ふるいを通過したものを試料として使用した。ここで、2mm ふるいに通過した試料を使用した理由は、セメント改良土では透水係数が低いため通水が困難であることを考慮して、供試体を破砕することにより、成型体に比べ溶出しやすい条件を想定したためである。供試体の作製には、廃棄物資源循環学会標準試験[4] (草案)の規格に従い、125g のランマーを落下高さ約 20cm、落下回数 3 回として充填高さが 30±5cm になるように 5 層に分けて突き固めて作製した。溶媒には、pH5.8～6.3 に設定した蒸留水を用い、試料を通過する流出液の速度はポンプを用い上向流で 12mL/h になるように調整した。また、採水の条件は**表-3** の採水条件に従い、全分画を 7 分画とし累積 L/S=10 となるまで採水した。**表-4** に配合条件を

表-2　カラム試験の実験条件

条件	ランマー質量 (g)	ランマー落下高 (cm)	モールド内径 (cm)	各層の突固め回数	最大粒径 (mm)
まさ土	125	20	5	3	9.5
粘土					2.0

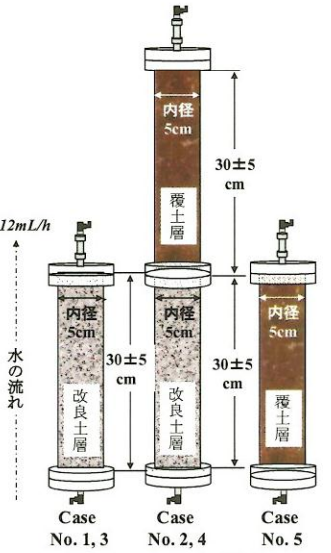


図-2　カラム模型

示す。配合条件については、浅層混合処理の要求強度[5]である養生 7 日において q_u=300kN/m^2 を満足するものとした。得られた検体は全て、イオンクロマトグラフ（ダイオネクス社製 ICS-1000）によりふっ素溶出濃度を測定した。

表-3　各分画と累積 L/S

分画	分画体積(L) (=L/S比×試料乾燥重量)	累積L/S比 (L/kg乾燥試料)
1	(0.1±0.02)×m_0	0.1±0.02
2	(0.1±0.02)×m_0	0.2±0.04
3	(0.3±0.05)×m_0	0.5±0.08
4	(0.5±0.1)×m_0	1.0±0.15
5	(1.0±0.2)×m_0	2.0±0.3
6	(3.0±0.2)×m_0	5.0±0.4
7	(5.0±0.2)×m_0	10.0±0.1

3. 実験結果及び考察　**図-3** に示す pH の変化に着目すると、Case No.1, 3 の覆土なしの条件では、高炉セメント B 種を添加した影響からアルカリ性を示していることがわかる。これに対し、Case No.2, 4 の覆土ありの条件は Case No.5 のまさ土のみの条件と同様に溶媒の pH の中性を保っていることがわかる。**図-4, 5** に各分画ごとのふっ素溶出濃度の経時変化及び累積ふっ素溶出濃度を示す。図に示すように、覆土を施していない Case No.1, 3 の条件で高いふっ素溶出濃度が確認できる。その傾向は、再生半水石膏添加量が多い Case No.3 の条件において顕著である。しかし、Case No.2, 4 の覆土ありの条件でのふっ素溶出濃度は、Case No.1, 3 の覆土なしの条件と比べて著しく低下していることがわかる。また、いずれも 2mm ふるいを通過した試料を用いたにも関わらず、土壌環境基準値を満足する値が得られた。このような結果は、改良土から溶出したアルカリ成分やふっ素は、覆土として用いたまさ土粒子により吸着された事が原因であると考えられる。実地盤への適用を想定した場合、セメントを補助固化材として用いた際の改良土表面からは、ふっ素の溶出やアルカリ分の溶出が予想される。しかし、セメント添加量 50kg/m^3 の粘性土では k=1×10^{-6}~10^{-7}(cm/s)と透水性が非常に低いため[6]、移流による改良土内部のアルカリ分や重金属等は溶出しにくいことが考えられる。そのため、今回溶出しやすい条件を想定した検討結果において環境的に安全な結果が得られたことから、実地盤に適用する際にも周辺地盤によりその移動を抑制でき、環境面においても安全であると予想される。今後、タンクリーチング試験を行い、成型体からの溶出を確認するとともに、拡散による溶出について評価していく事も重要である。

表-4　配合条件

Case No	土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m^3)	高炉セメントB種 B_c (kg/m^3)	養生日数 t_c (day)	覆土
1	博多粘土	100	100	50	7	なし
2						まさ土
3			200			なし
4						まさ土
5	まさ土	初期含水比	0	0	0	

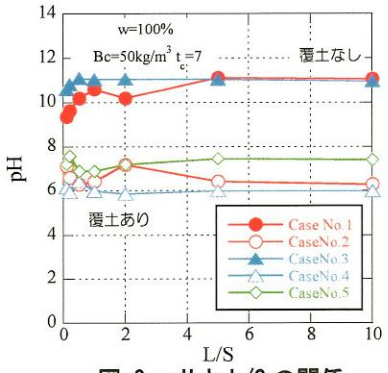


図-3　pH と L/S の関係

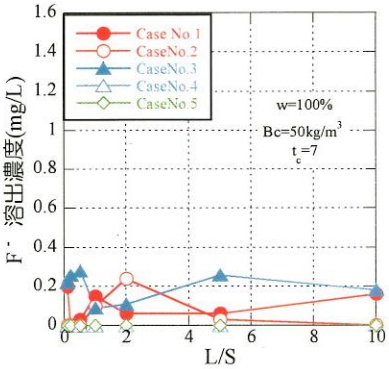


図-4　F$^-$溶出濃度と L/S の関係

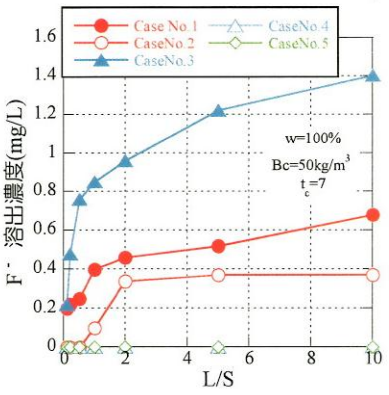


図-5　累積 F$^-$溶出濃度と L/S の関係

4. まとめ　1）再生半水石膏を用いた軟弱粘土地盤改良土から溶出されるふっ素は周辺地盤の土質材料により、その移動を抑制できる。2）セメントを補助固化材として用いると改良土の透水係数が低いため、内部はアルカリ性を保ったままふっ素の溶出も抑制できると予想される。さらに、移流による改良土内部のアルカリ分や重金属等は溶出しにくいことが考えられる。今後、拡散による溶出について評価していく事も重要である。

謝辞：本研究は、環境省平成 23 年度循環型社会形成推進科学研究費(No.K2359)および文部科学省化学研究費(No.21560527)の一部として実施された研究である。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献　1）社団法人石膏ボード工業会ホームページ 2）例えば亀井ら:半水石膏の地盤改良材としての有効利用, 地盤工学ジャーナル, vol.2, No.3, pp.245-252, 2007. 3）地盤工学会, 土質試験の方法と解説－第一回改正版－, 「安定処理土の締固めをしない供試体作製」, PP.308-316, 2000. 4）廃棄物資源循環学会標準試験(草案)　JWS-020X (2006-11-30 DRAFT). 5) (社)日本建築学会, 建築基礎のための地盤改良設計指針案, PP37-42. 6) セメント系固化材による地盤改良マニュアル［第二版］, 社団法人セメント協会, PP.42, 1994.