

第4章 地盤改良用途への応用

4. 1 廃石膏ボードの地盤改良材としての有効利用に関する実証的研究

亀井健史 宮崎大学

4. 1. 1 研究目的

近年家屋の解体とともに廃棄される石膏ボード（以下、廃石膏ボード）が大量に発生している。これら廃石膏ボードの量は年間 200 万トンに迫る勢いで増加している¹⁾。廃石膏ボードは硫化水素の発生因子となることから²⁾、管理型の最終処分場に処分することが廃棄物の処理と清掃に関する法律により厳しく規制されている。しかしながら、最終処分場が逼迫していることから石膏ボードの受け入れを禁じている地方自治体もあり、循環型社会を形成するためにも廃石膏ボードのリサイクル技術の早期開発が待ち望まれている。このような現状を踏まえ、廃石膏ボードから紙を除去、粉碎して得られる廃石膏粉を加熱処理することによって水硬性を有する半水石膏を製造し、軟弱地盤の改良材としての適応性に関する研究が数多く行われている³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。廃石膏を母材とした半水石膏を土壌の改良材としてリサイクルする場合、石膏に含有しているフッ素が地下水等の影響を受けて溶出し、土壌の環境基準をオーバーする可能性がある。したがって、土壌の改良材として半水石膏を用いる場合、フッ素の溶出を抑制する必要がある。

国内の石膏ボード年間生産量は 500 万トンを超えており、その原料の 1/2 以上は火力発電所等から排出される排煙脱硫石膏（化学石膏とも呼ぶ）が占めている。石炭焚きの火力発電所では、石炭に含有している硫黄（S）分が燃焼し有害物質である亜硫酸ガス（SO₂）や三酸化硫黄（SO₃）等の硫黄酸化物になる。これら有害物質を除去するために消石灰（Ca(OH)₂）を燃焼排ガス中に添加して中和し、石膏（CaSO₄・2H₂O）の形で硫黄成分を回収している。また、石炭は硫黄成分以外にフッ素化合物も微量に含んでいることから、燃焼してフッ化水素（HF）を生成する。フッ化水素はガラスをも溶かす非常に活性力の高い酸性ガスであるが、硫黄酸化物と同様に消石灰と反応してフッ化カルシウム（CaF₂）を生成し、石膏中に混入している。これらの排煙脱硫石膏が化学石膏と称して石膏ボード製造メーカーに引き取られ石膏ボードの原料となっている。このことから、石膏ボードにはフッ化カルシウムが混入していることが容易に想定できるが、家屋の内装材として水に濡れることなく使用される場合、その化学的特性から人体への影響はないものと考えられている。

一方、石炭灰は石炭焚き火力発電所の副産物として生成され、その発生量は国内で年間 1,000 万トンを超えている⁷⁾。過去三度に渡る石油危機を経験しているわが国は、石油主体の一次エネルギー供給体制から、石炭や天然ガスおよび原子力に依存する方向へと政策転換した。これにより、石炭の需要は年々増加の傾向にある。石炭灰のリサイクルに関しては早くから研究が進められ、今現在では発生量の 97% がリサイクルされている⁸⁾。ただ需給バランスは石炭灰が余剰の傾向であることに変わりはなく、今後石炭焚火力発電所の建設が進むことにより、石炭灰の発生量は化学石膏同様にさらに増加するものと予測される。一方、石炭灰には燃料由来のホウ素（B）が含有している場合があり、土木資材としてリサイクルする場合、ホウ素の溶出濃度に注意が必要となる。ホウ素の溶出濃度が土壌の環境基準である 1.0mg/l を超える場合には、物理的および化学的な溶出抑制対策が必要となる。

既往の研究⁹⁾では、半水石膏のフッ素不溶化の化学的手段として、半水石膏に加え高炉セ

メント B 種を 5% 添加することにより、エトリングイト ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}26\text{H}_2\text{O}$) が生成し、これがフッ素不溶化のメカニズムと軟弱地盤の強度発現に大きく寄与していることを報告している。また、エトリングイトを構成するアルミナ (Al_2O_3)、酸化カルシウム (CaO)、石膏 (CaSO_4) は、mol 比で 1 : 3 : 3 であることから既往の配合条件では、エトリングイトの生成量は高炉セメント B 種のアルミナ含有量に支配されることを示唆している⁹⁾。

半水石膏の軟弱地盤改良材としての有効性については、セメント安定処理土に半水石膏を混入することによって、強度が顕著に改善されることが報告されている。例えば、改良地盤が地下水位以深となるような場合も考えられることから、水中養生条件下での強度変形特性についても解明されており、水中養生した場合の一軸圧縮強さは、気中養生した場合と比較しても 2 割程度しか低下しないことがわかっている¹⁰⁾。しかしながら、その強度に及ぼす養生期間の影響を把握することは改良地盤の施工管理においては非常に重要となる。また、実施工においては、雨水等の影響で、気中養生を行っても繰り返し水浸条件下となることも考えられる。したがって、半水石膏を混入したセメント安定処理土を気中養生した場合においても、乾湿の繰り返しとその強度変形特性に及ぼす影響を明らかにすることも必要となろう。

本研究では、経済性や環境保全の観点から高炉セメント B 種の添加率を 5% から 2.5% に減じた場合、エトリングイト生成に不足するアルミナ源を石炭焼き火力発電所の副産物である石炭灰で補うことで、どの程度エトリングイト生成量が増加し、また半水石膏のフッ素溶出濃度が減少に転じていくのかを検討している。さらに得られた分析結果を進展していくため、同試料に対して粉末 X 線回折試験を行うことによりエトリングイトの生成量を推定している。一方、試料として高炉セメント B 種と石炭灰を用いていることから、作製した供試体に対してホウ素と六価クロムの溶出試験を行い、その土壌の環境基準への適応性についても検討している。また、廃石膏ボードから再生された半水石膏を添加したセメント安定処理土を水中養生した場合の強度特性に及ぼす養生期間の影響を定量的に評価する。その結果、水中養生および気中養生の違いが半水石膏を添加したセメント安定処理土の強度変形特性に及ぼす影響を明らかにしている。さらに、半水石膏を添加したセメント安定処理土の強度特性に及ぼす乾湿作用の影響についても検討している。

4.1.2 研究方法

実験に用いた試料

石膏は、二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、半水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)、無水石膏 (CaSO_4) に分類することができる¹¹⁾。無水石膏は常温常圧下で湿度を吸収して半水石膏へと転化して行き、最終的には最も安定な二水石膏となることから、自然界では二水石膏の状態が存在する。本研究で用いる半水石膏は、半水石膏生産システム⁶⁾から製造したもので、その構成割合 (質量%) は二水石膏が 11.90%、半水石膏が 75.30%、無水石膏が 12.80% であり、水硬性を示す半水石膏と無水石膏の割合が全体の 88% 以上を占めている。

本研究で使用した高炉セメント B 種は、エトリングイトの構成成分であるアルミナ (Al_2O_3) を 8.7%、酸化カルシウム (CaO) を 54.1% 含有している¹²⁾。なお、安定処理材としてセメントを過度に添加する場合には六価クロムの溶出が懸念されることから、セメントの添加率を可能な限り少なくすることが望ましい。

石炭灰は石炭焼きの火力発電所で副産物として発生し、石炭に含まれている無機成分が石炭の燃焼により熔融し球状になったもので、フライアッシュと呼ばれている。本研究では、

石炭灰として一般的に市販されているフライアッシュの JIS II 種規格 (JISA6201)¹³⁾ を使用した。石炭灰の化学成分は、アルミナを 27.6%、酸化カルシウムを 2.8% 含んでいる。

粘土試料として、成分調整された工業製品である MC クレー (カオリン) を使用した。MC クレーは、アルミナを 24.8%、酸化カルシウムを 0.02% 含んでいる¹⁴⁾。

実験方法

本研究では、高含水比の軟弱粘性土の安定処理を対象とした土の締固めを行わない供試体の作製方法¹⁵⁾にしたがい、セメント安定処理土の供試体を作製した。配合設計は、含水比 140% の軟弱粘性土を安定処理することを想定し、含水比 (W/S、W は水の質量を S は MC クレーの乾燥質量を表す) を 140% とした。セメント添加率 (C/S、C は高炉セメント B 種の質量を示す) を 2.5% と 5% とした。これらの C/S=2.5% と C/S=5% のそれぞれについて、半水石膏添加率 (B/S、B は半水石膏の質量を示す) 0%、10%、20%、40% の 4 配合を設定した。さらに、それぞれの配合に対して不足するアルミナ量を補うために石炭灰添加率 (A/S、A は石炭灰の質量を示す) として 0%、2.5%、5%、10% を設定し、計 32 種類の供試体を作製した。供試体の養生期間は 28 日を設定し、室温 (20±2℃)、相対湿度 (35~45%) の環境下で、供試体の両端面を成形しポリエチレン製のケースに入れて所定の養生期間まで気中養生した。

所定の養生日数を経過した供試体に対して、環境庁告示 13 号法 (以後 13 号法、昭和 48 年 2 月 17 日付け環境庁告示、産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法) に基づきフッ素溶出試験、ホウ素溶出試験、六価クロム溶出試験の検体を作製した。また、供試体の混練水ならびに 13 号法による溶媒には、水質の違いによるフッ素イオン濃度、ホウ素イオン濃度、六価クロムイオン濃度への影響が最も少ないと考えられる蒸留水を用いた。具体的には、供試体 50g について蒸留水 500g を加えてスターラで 4 時間攪拌し、上澄み液を濾過して検体とした。

フッ素の溶出濃度を求める際は、JIS K0400-35-30 水質—イオンの液体クロマトグラフィーによる溶存フッ化物、塩化物、亜硝酸、オルトリン酸、臭化物、硝酸及び硫酸イオンの定量に基づきイオンクロマトグラフ ((IC) ZC0200 ダイオネックス社製) を用いた。ホウ素溶出濃度を求める際は、JIS K0400-52-30 水質—誘導結合プラズマ発行分光分析による 33 元素の定量に基づき高周波プラズマ発光分光分析装置 (ICP-AES SPS5000 セイコーインスツルメント社製) を用いた。六価クロムの溶出濃度は、JIS K0102 工場排水試験方法に基づき吸光光度計 (UV-mini-1240 島津製作所製) を用いて測定した。

供試体約 10g を乳鉢に取り、十分に試料を磨り潰してから約 2g を用いてエトリンタイトの生成量を粉末 X 線回折装置に掛けた。エトリンタイトの生成量は、JIS K0131 X 線回折分析通則に基づき粉末 X 線回折装置 (RINT2000 リガク製) によりエトリンタイトの量を求めた。

一軸圧縮試験に用いる供試体の作製方法を以下に説明する。配合条件は、超軟弱粘性土を安定処理することを想定し、水土比 (W/S) を 140% とし¹⁶⁾、セメント添加率 (C/S) を 5% および 10% とした。また、半水石膏添加率 (B/S) は、今回対象とした土に半水石膏を混入した際にモールドに打設可能かを検討した上で、0%、10%、20%、40% の 4 配合を設定した。供試体は、含水比と湿潤密度の測定を行った後、鋳鉄製のモールド ($\phi=50\text{mm}$ 、 $H=100\text{mm}$) に打設した。モールドに打設した供試体は、ポリエチレン製の袋で被い、恒温室 (20±2℃) で 24 時間養生した。その後、モールドから供試体を取り出し、両端面を成形した。気中養生する供試体は、再びポリエチレン製の袋で被い、所定の養生期間 28 日まで静置した。一方、水中養生する供試体は、所定の養生期間 28 日まで水中に静置した。乾湿繰り返しを与える場

合は、気中養生する供試体と同様の方法で作製した後、乾湿繰り返しを作用させた。乾湿繰り返しの1サイクルは、24時間の水浸とその後の24時間の気中養生からなるものとし¹⁷⁾、サイクル数は、0回、1回、3回、および5回を設定した。なお、水中から取り出したときは、供試体表面の水を軽く拭き取り、その後ポリエチレン製の袋で覆って静置した。本研究では、半水石膏を混入したセメント安定処理土の強度・変形特性を評価するために、一軸圧縮試験を行った。使用した試験装置は、ひずみ制御式圧縮装置、荷重計、変位計から構成される一軸圧縮試験装置である。軸圧縮速度は、JGS 0511に基づいて1%/minとした。

4.1.3 研究結果

フッ素溶出濃度

エトリンガイトがフッ素の不溶化に有効であることは、水質の浄化技術¹⁸⁾や半水石膏のフッ素不溶化の研究⁹⁾でも明らかにされている。そこで本研究では、高炉セメントB種の添加率を5%から2.5%に減じ、アルミナ源である石炭灰を補足添加した場合のエトリンガイト生成量とフッ素溶出濃度との関係を検討した。まず、本研究で用いた材料のフッ素溶出濃度を分析した結果、全ての材料からフッ素が検出され、半水石膏に限っては土壌の環境基準(0.8mg/l)の7倍を上回るフッ素溶出濃度(5.71mg/l)が検出された。高炉セメントB種および石炭灰からは土壌の環境基準を下回っているが0.58mg/l および0.57mg/l のフッ素溶出濃度を検出した。同様にMCクレーからも微量であるが0.11mg/l のフッ素溶出濃度を検出した。このように、フッ素の不溶化を検討する上で使用する材料に関しても事前にフッ素の溶出濃度を把握しておくことが重要であると考えられる。

図4.1-1は、C/S=5%および2.5%に関する半水石膏添加率と28日養生のフッ素溶出濃度との関係を示している。C/S=5%の場合、既往の研究結果⁹⁾と同様、全ての供試体についてフッ素溶出濃度は土壌の環境基準である0.8mg/lを下回っており、A/S=0%を除いてB/Sの増加に伴いフッ素溶出濃度が直線的に増加している。また、各供試体のB/S=0%のフッ素溶出濃度に着目すると、A/S=0%以外の供試体は0.04~0.05mg/lの極微量の値を示しているのに対して、A/S=0%の供試体は0.67mg/lと突出して高い値を示している。これは、本研究に用いた半水石膏以外の材料からもフッ素が検出されたことに起因する。一方、C/S=2.5%の場合には、B/Sの増大に伴いフッ素溶出濃度が増加に転じ、C/S=5%の場合に比べ、約2倍の傾きで増加していることがわかる。これはB/Sを大きくしてもエトリンガイトの生成量が増加せず、フッ素イオンとの置換反応が飽和状態にあることを示唆している。

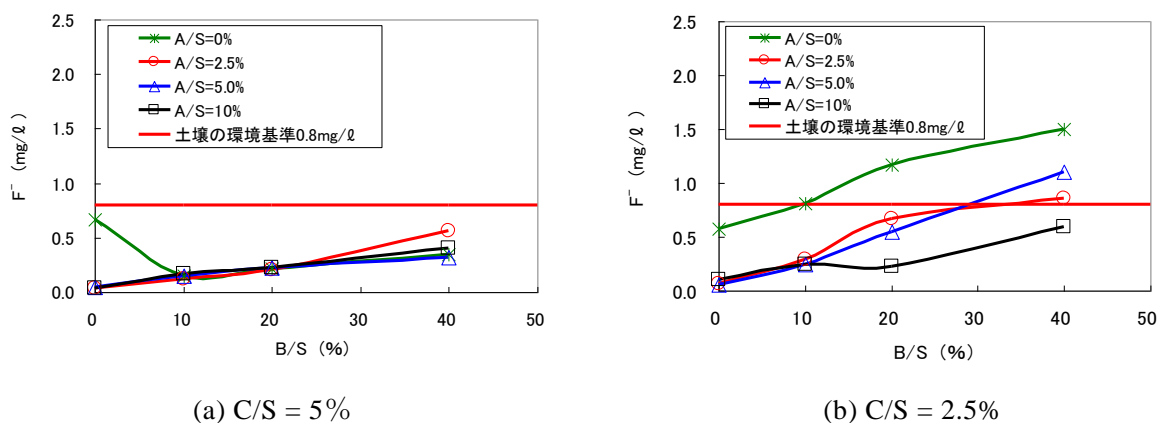


図 4.1-1 半水石膏添加率とフッ素溶出濃度との関係

また、石炭灰添加率 (A/S) に目を転じると、B/S=20%以上でフッ素溶出濃度に差が生じ、B/S=40%では A/S=10%の供試体のみが環境基準の 0.8mg/l を下回っている。これは C/S を 2.5%に減じたことにより、アルミナ源が不足しエトリンタイトの生成量が抑制されるが、アルミナを 27.6%含む石炭灰を補足添加したことにより、エトリンタイトの生成量が増加に転じたことを裏付けている。逆に、A/S=0%では、エトリンタイト生成のアルミナが供給されないので B/S=0%から突出して高いフッ素溶出濃度を示し、B/S の増大に伴いフッ素溶出濃度が増加に転じていることがわかる。

これらの結果より、高含水比の軟弱地盤に半水石膏を添加して土壌の安定処理を行う場合、経済性や環境保全の観点より高炉セメント B 種の添加率を減じても石炭灰を補足添加することでフッ素不溶化に一定の有効性が認められることが明らかとなった。経済性に関しては、廃石膏ボードから製造した半水石膏と石炭焼き火力発電所から副産物として発生する石炭灰をリサイクル利用することや、高炉セメント B 種の添加率を減じることで土壌の安定処理材としての製造コストを大きく引き下げることができる。また、環境保全に関しては、高炉セメント B 種の添加率を減じることで六価クロムの溶出を抑制できることや、安定処理土のアルカリ化を防ぎ植生等に影響を与えないなどのメリットがある。実際の軟弱地盤や土壌への本技術の適応に関しては、エトリンタイト生成反応に影響を与える成分も含まれる場合が考えられる。たとえば、本研究で使用した MC クレーは、前述したようにアルミナが 24.8%も含有していることから、エトリンタイト生成に大きな影響を及ぼしていることも推測される。

エトリンタイトの X 線回折強度

エトリンタイト生成量とフッ素溶出濃度との関係を裏付けるために、粉末 X 線回折によりエトリンタイトの定量化をおこなった。図 4.1-2 は高炉セメント B 種の添加を行わずフッ素の溶出濃度が土壌の環境基準をオーバーしていた供試体 (C/S=0%、B/S=10%) の X 線回折結果⁹⁾を、図 4.1-3 は高炉セメント B 種の添加を行いフッ素の溶出濃度が土壌の環境基準を下回っていた供試体 (C/S=5%、B/S=10%) の X 線回折結果⁹⁾を、図 4.1-4 は半水石膏の添加を行わず高炉セメント B 種の添加を行ったフッ素の溶出量が土壌の環境基準を下回っていた供試体 (C/S=5%、B/S=0%) の X 線回折結果を示している。図中、横軸には X 線照射角度 (2θ) を、縦軸には X 線回折の強度を示している。なお、比較のために横軸下線部に純粋なエトリンタイトの X 線回折ピークを併記している。図 4.1-3 において、X 線照射角が 16°~17°にエトリンタイト特有のピークが明瞭に現れているのに対して、図 4.1-2 と図 4.1-4 の同じ箇所にはピークが認められない。なお、エトリンタイトの照射角度 9°付近に強いピークがあるが、これは MC クレーの構成成分であるカオリナイトのピークと重なっていることから、この回折角度からはエトリンタイトの有無は判断できない。これらの X 線回折結果より、高炉セメント B 種と半水石膏を添加した供試体ではエトリンタイトの生成が確認されるが、高炉セメント B 種のみおよび半水石膏のみを添加した供試体からはエトリンタイトの生成が認められない。これらのことから、エトリンタイトの生成には、酸化カルシウム、硫酸カルシウム、アルミナの存在が必須であることが裏付けられる。

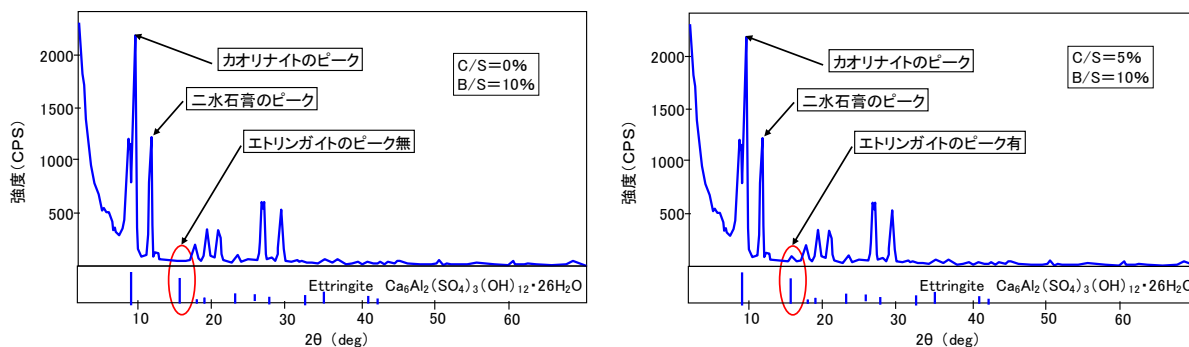


図 4.1-2 C/S=0%、B/S=10%の X 線回折結果⁹⁾ 図 4.1-3 C/S=5%、B/S=10%の X 線回折結果⁹⁾

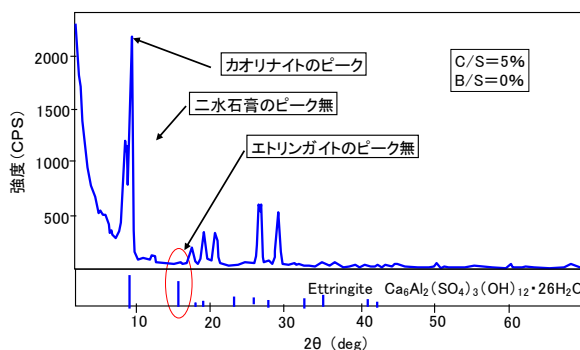


図 4.1-4 C/S=5%、B/S=0%の X 線回折結果

図 4.1-5 は C/S=2.5%、B/S=20% の場合の石炭灰添加率の変化に伴うエトリンガイト回折強度とフッ素の溶出濃度の関係を示している。図より、石炭灰添加率が増加するとエトリンガイトの生成量も増加し、逆にフッ素の溶出濃度が減少に転じていることが明らかである。

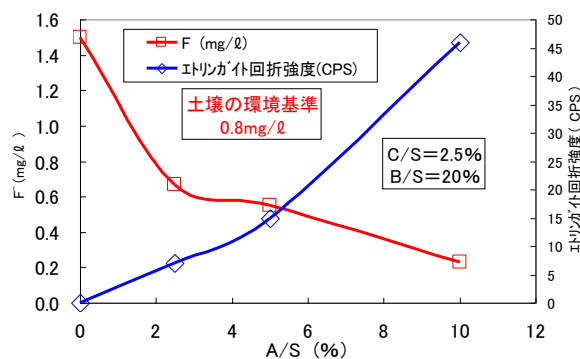


図 4.1-5 石炭灰添加率とエトリンガイト生成量ならびにフッ素溶出濃度との関係

図 4.1-6 はフッ素の溶出濃度が土壌の環境基準である 0.8mg/l をクリアしているが、MC クレー含有のアルミナがエトリンガイト生成に関与したことにより石炭灰の添加率とフッ素溶出濃度との関係が明確でない C/S=5% の場合のエトリンガイト生成量とフッ素溶出量との関係を示している。エトリンガイト生成量が増加すると、フッ素溶出濃度が減少に転じていることは明らかである。なお、図においてエトリンガイト生成量とフッ素溶出濃度との関係をより明確に表すために、各配合における B/S=0% の値をプロットから除外している。このことは、フッ素溶出濃度とエトリンガイト生成量の両者とも B/S に大きく影響を受け、各配

合における $B/S=0\%$ のフッ素溶出濃度とエトリンサイト生成量とは非常に小さい値を示し、図の意図する関係をわかりにくくしてしまうためである。また、本論文が廃石膏ボードのリサイクルを対象としていることから、本図において $B/S=0\%$ のプロットを除外しても論旨に影響はないと考えられる。

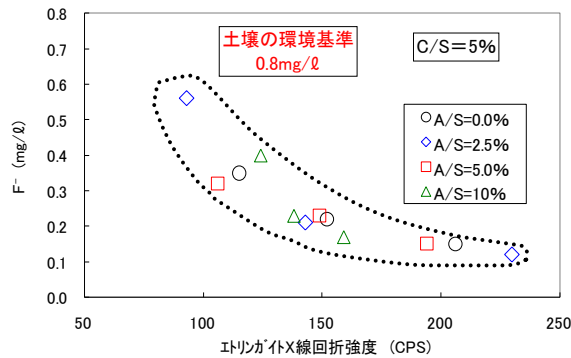


図 4.1-6 エトリンサイト生成量とフッ素溶出濃度との関係

走査型電子顕微鏡 (SEM) によるエトリンサイトの可視化

半水石膏添加率 (B/S) の違いがセメント安定処理土の内部構造に及ぼす影響を明らかにするために、走査型電子顕微鏡 (SEM) を使用して種々の B/S におけるセメント安定処理土供試体の微視的観察を行った¹⁹⁾。写真 4.1-1 は、半水石膏を混入したセメント安定処理土の代表的な内部構造を示している。いずれの B/S においてもセメントの水和物である針状のエトリンサイトが生成しており、互いに絡まっている様子が確認できる。写真 4.1-1 (a) と写真 4.1-1 (b) に示したように $B/S=0\%$ と $B/S=10\%$ の内部構造には、小さくて細いエトリンサイトが生成されているが、 B/S の違いによる明瞭な違いは認められなかった。一方、写真 4.1-1 (c) の $B/S=20\%$ と写真 4.1-1 (d) の $B/S=40\%$ の場合の内部構造には変化が認められ、 $B/S=40\%$ に関しては非常に発達したエトリンサイトが確認できる。MC クレーの豊富なアルミナを考慮すると、 $C/S=10\%$ の配合では、エトリンサイト生成量を支配するのは酸化カルシウムと半水石膏であると考えられる。 $B/S=0\%$ の場合のエトリンサイト生成量は、半水石膏に支配され、 0g/kg である。 $B/S=10\%$ の場合も同様に半水石膏に支配され、 288.28g/kg となる。 $B/S=20\%$ と $B/S=40\%$ の場合のエトリンサイト生成量は、両者とも酸化カルシウムに支配され、 403.82g/kg となる。これらの値は化学当量的にエトリンサイトの生成反応が 100% 進行することを前提にした理想上の考察である。現実には $C/S=10\%$ の場合の酸化カルシウム量は一定で、MC クレーによりアルミナが豊富に供給されている環境下では、半水石膏添加率 $B/S=20\%$ と $B/S=40\%$ とでエトリンサイト生成量に差が生じるのではと推察される。このことは、エトリンサイト生成反応におけるアルミナ、酸化カルシウム、石膏の構成バランスや pH 値、酸化還元電位 (ORP) 環境等が複雑に関与して、エトリンサイト生成反応が 100% 進行しないことを裏付けている。このことは、写真 4.1-1 (c) と写真 4.1-1 (d) においてエトリンサイトの発達に大きな差が生じていることから見て取れる。

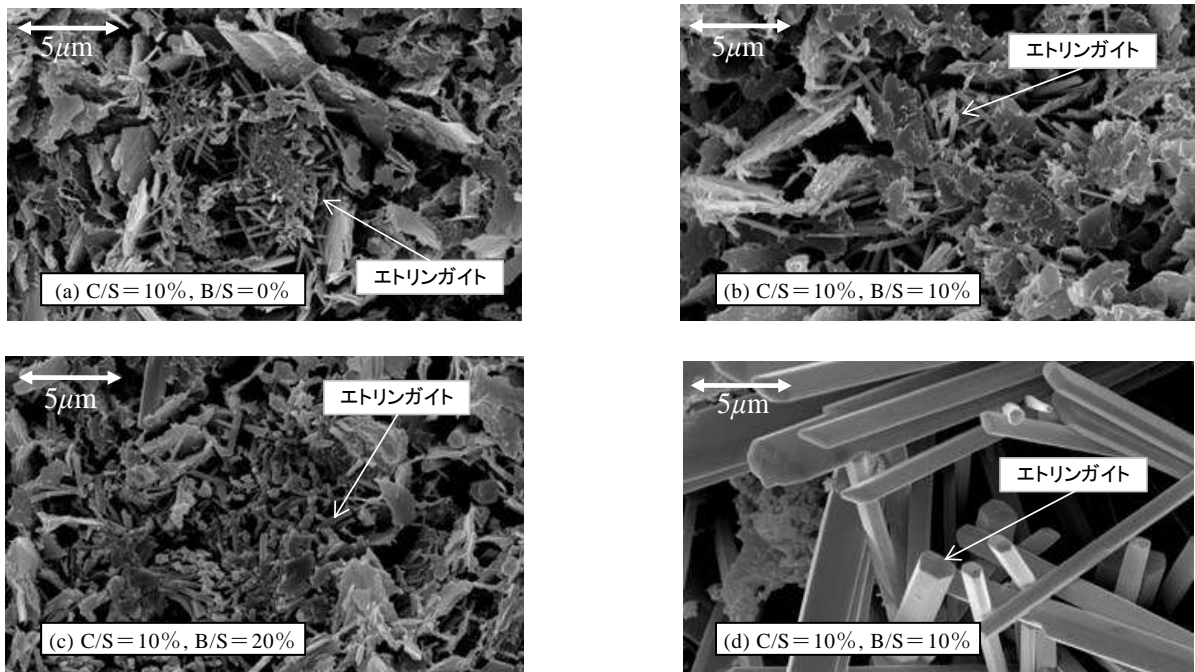


写真 4.1-1 セメント安定処理土の SEM 写真 (5,000 倍)¹⁹⁾

ホウ素溶出濃度

ホウ素 (B) は、ホウ砂などの形態で自然界に存在し、植物の生育にとって必須の微量元素であるが、ラットに関する慢性毒性の懸念から、土壌の環境基準で 1.0mg/l の溶出基準²⁰⁾が設けられている。石炭焚きの火力発電所で副産物として発生する石炭灰にも、燃料の石炭由来のホウ素化合物が含有している可能性が考えられる。エトリンガイト生成量が少ないと考えられる C/S=2.5% の場合の石炭灰添加率とホウ素溶出濃度との関係を図 4.1-7 に示す。図より、ホウ素を最も多く含んでいると考えられる A/S=10% でも、ホウ素の溶出濃度は 0.16mg/l で、土壌の環境基準の 1.0mg/l を大きく下回っている。また、本研究の配合の範囲ではホウ素溶出濃度は 0~0.16 mg/l と小さい値であった。これは、石炭灰のホウ素溶出濃度の抑制にエトリンガイトの有効性が報告²¹⁾²²⁾²³⁾されていることから、本研究でもエトリンガイトがホウ素を固定してホウ素の溶出濃度を抑制したことが示唆される。

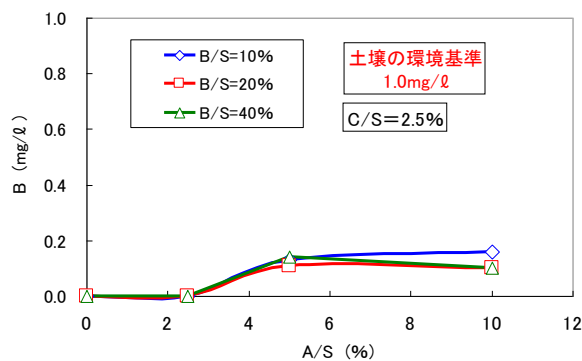


図 4.1-7 石炭灰添加率とホウ素溶出濃度との関係

六価クロム溶出濃度

六価クロム (Cr (VI)) は強い酸化作用を持ち、有機物と反応して安定な三価クロムとなるが、非常に有毒である。このことから、土壤の環境基準で $0.05\text{mg}/\ell$ の厳しい溶出基準²⁰⁾が定められている。セメントにはその製造プロセスから六価クロムが含有していることが考えられる。本研究においても高炉セメント B 種や石炭灰を用いていることから、六価クロム溶出の有無を明らかにしておく必要がある。エトリンサイト生成量が少ないと考えられる C/S = 2.5% の場合の石炭灰添加率 (A/S) と六価クロム溶出濃度との関係を図 4.1-8 に示す。図より明らかなように A/S と六価クロム溶出濃度との相関関係は認められず、本研究の配合の範囲で六価クロムの溶出濃度は土壤環境基準の $0.05\text{mg}/\ell$ を大きく下回っている。エトリンサイトに六価クロムを不溶化する作用があることは、既に数例の報告²⁴⁾²⁵⁾があることから、本研究で六価クロムの溶出濃度が土壤の環境基準を下回っていたことは、当該エトリンサイトが六価クロムの溶出を抑制するのに有効であることが示唆される。

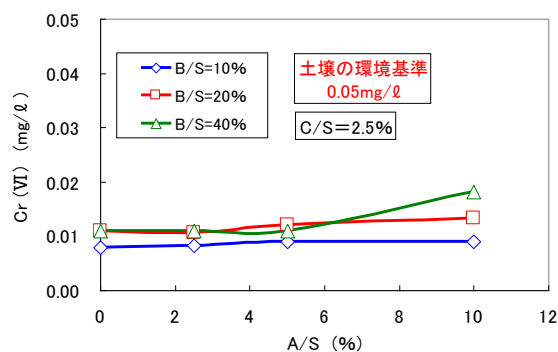


図 4.1-8 石炭灰添加率と六価クロム溶出濃度との関係

水中養生が一軸圧縮特性に及ぼす影響

半水石膏添加率の違いが水中養生した場合の養生初期の応力-ひずみ曲線に及ぼす影響を図 4.1-9 に示す。まず半水石膏を添加していない場合に注目すると、圧縮ひずみ量の増加に伴って圧縮応力値が徐々に増加し、ひずみ量が 1~2% 程度で応力値が最大に達する。さらにひずみ量が増加すると応力値は急激に低下した。一方、半水石膏を添加した場合には、圧縮ひずみ量の増加に伴って圧縮応力値は徐々に増加するものの、応力値が最大となった際に明瞭なピークを持たず、ひずみ量が 3~5% 程度に達するまで応力値は最大値を維持しており、いわゆる粘り強い材料となっている。このことは、応力値がピークに達しても破壊が瞬時に生じないことを意味し、例えば道路盛土であれば押さえ盛土等の安全対策を講じる等の時間的余裕が生まれるという利点がある。また、このような粘り強さは、半水石膏を混入した試料を用いた既往の研究^{3),10),26)}でも報告されていることから、半水石膏の特性の一つと考えられる。

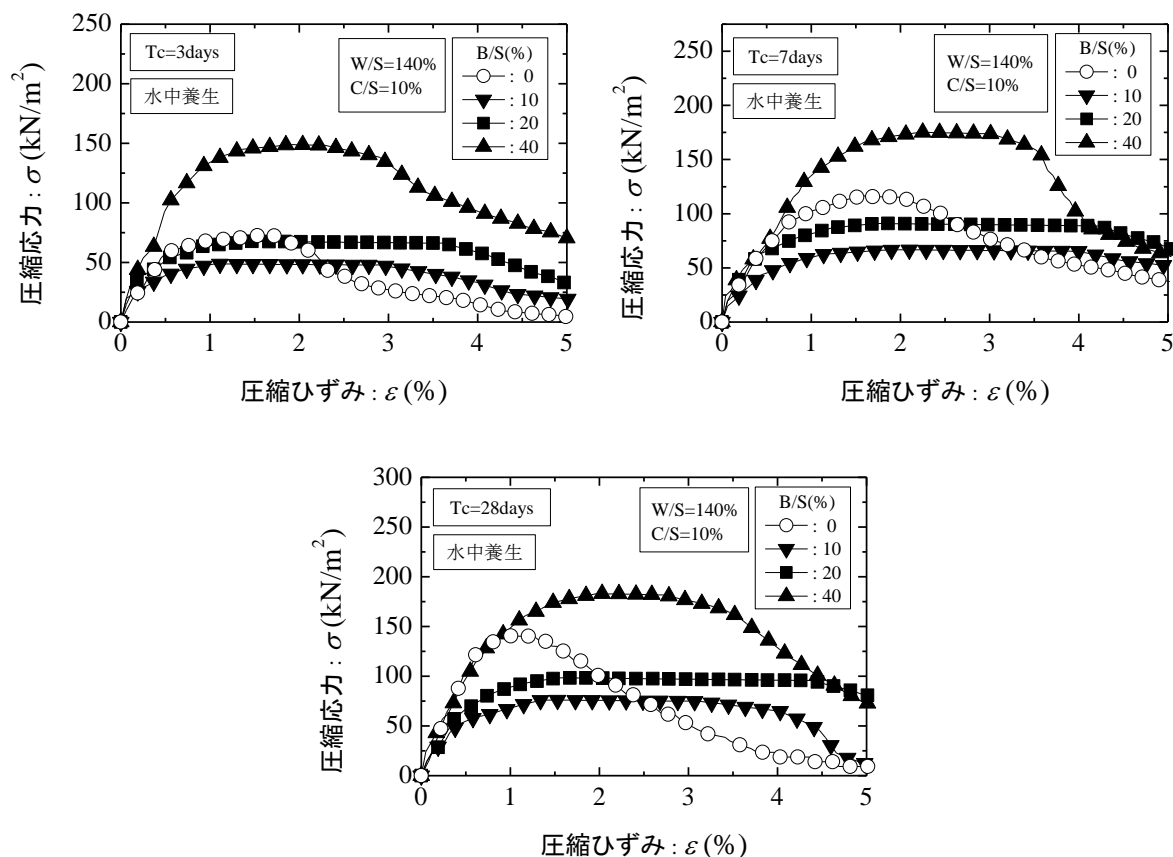


図 4.1-9 半水石膏添加率の違いが養生初期の代表的な応力—ひずみ曲線に及ぼす影響（水中養生）

圧縮応力の最大値に着目すると、3日～28日のいずれの養生日数においても、半水石膏添加率が比較的少ない20%以下の圧縮応力の最大値は、半水石膏を添加しない場合の圧縮応力値の最大値より小さな値となっている。しかしながら、添加率が10%から40%へと増加するに伴って応力値の最大値は増大しており40%と比較的多く半水石膏を添加することによって、添加しない場合より大きな最大応力値が得られている。

このような関係をより詳細に比較するために、水中養生した場合の一軸圧縮強さと養生日数の関係を図4.1-10に示す。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。半水石膏を混入した場合には、このような傾向がさらに顕著となり、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。気中養生の場合には、半水石膏添加率20%程度でもトラフィカビリティーの改善が認められた²⁶⁾が、水中養生では半水石膏添加率が20%以下と比較的少ない場合には、添加しない場合と比較して最大応力値が同程度かそれより小さいのでトラフィカビリティーの改善効果は小さい。一方で、半水石膏添加率が40%と比較的大きい場合には、養生7日程度で、添加しない場合の養生28日の強度に達しており、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、工期の短縮が可能になるものと考えられる。セメント安定処理土の一軸圧縮強さと養生日数の関係は、双曲線近似によって定式化できるとの報告がある²⁷⁾。本研究においても一軸圧縮強さと養生日数の関係は、双曲線近似によって定式化可能であった。その関係式を図中に示す。得られた関係式は

実験結果を非常によく表していることがわかる。

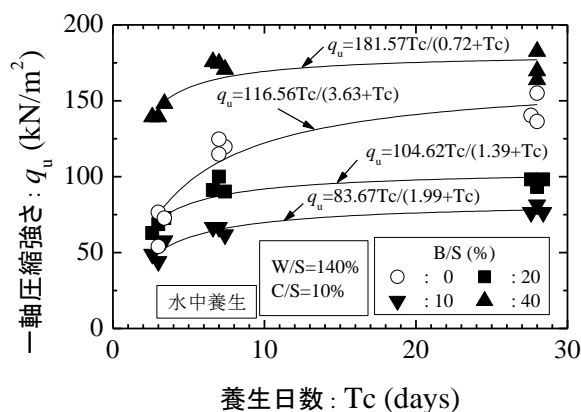


図 4.1-10 一軸圧縮強さと養生日数の関係（水中養生）

つぎに水中養生した場合の一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係を図 4.1-11 に示す。図より、養生日数の違いによらず半水石膏添加率が 20% 以下と比較的小さい場合には、半水石膏を添加しない場合の圧縮応力値の最大値より小さな値となっている。しかしながら、半水石膏添加率が 10~40% の範囲に着目すると、半水石膏添加率の増加に伴い一軸圧縮強さが増加している。このような一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係は半水石膏の二つの特性が関係していると考えられる。一つは、石膏がセメント水和反応時にアルミネート相の硬化を抑制するという特性を有していることがあげられ、この特性を利用して、セメント製造の際に凝結調整剤として石膏が使用されている²⁸⁾。この特性がセメントの水和反応を阻害したために半水石膏添加率が小さい場合に一軸圧縮強さが低下したものと考えられる。もう一つの特性としては、半水石膏単体では、吸水硬化することである。セメント添加率が一定であることから、半水石膏添加率の増加に伴ってこのような特性に伴う強度増加量が、セメントの水和反応の阻害に伴う強度低下量を上回ることによって、図 4.1-11 に認められるような関係が得られたものと考えられる。

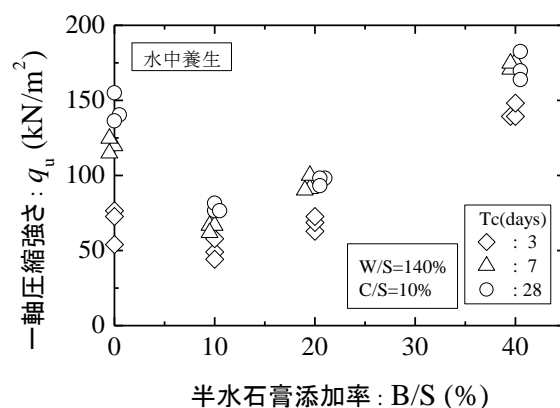


図 4.1-11 一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係（水中養生）

半水石膏混入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、 $\bar{q}_u/\bar{q}_u(B/S=0\%)$ と半水石膏添加率の関係を図 4.1-12 に示す。図より、半水石膏添加率が 20%以下と比較的小さい場合の一軸圧縮強さは、半水石膏を混入しない場合と比較して 0.5~1.0 倍程度と強度の改善があまり認められない。半水石膏添加率が 40%の場合には、添加しない場合と比較して、養生 3 日で 2 倍程度の強度改善が得られている。強度改善効果は養生日数の経過に伴い減少するが、養生 28 日においても 1.2 倍程度となっており、半水石膏を 40% 添加することによって、養生 28 日程度までの間で非常に高い強度の改善効果が得られることがわかる。

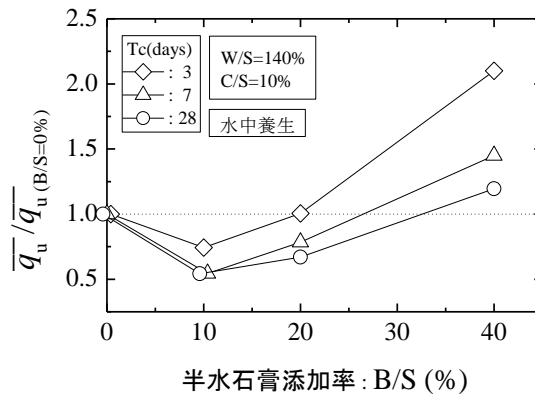


図 4.1-12 $\bar{q}_u/\bar{q}_u(B/S=0\%)$ と半水石膏添加率の関係 (水中養生)

養生初期の一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係に及ぼす養生条件の影響について検討するために、 $\bar{q}_u(\text{水中養生})/\bar{q}_u(\text{気中養生})$ と半水石膏添加率の関係を図 4.1-13 に示す。なお、気中養生の結果は既往の結果²⁶⁾を用いた。図より、半水石膏を添加しない場合に注目すると、水中養生条件下で養生 3~7 日程度の一軸圧縮強さは、気中養生した場合より増加しているが、養生 28 日の一軸圧縮強さは 0.8 倍程度に低下した。半水石膏を添加した場合においても、水中養生に伴う顕著な強度増加は認められず、一軸圧縮強さは気中養生した場合の 1.2~0.8 倍程度となった。したがって、気中養生を想定しながら水中養生となる場合には注意が必要となる。

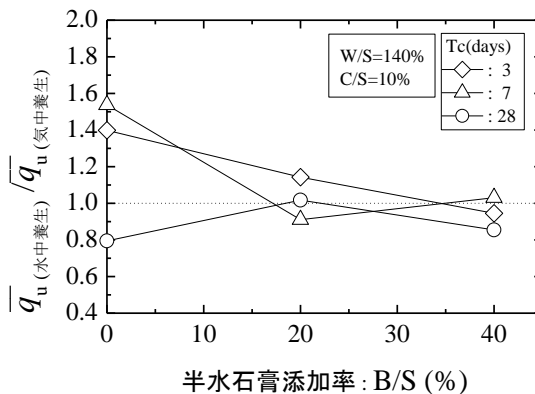


図 4.1-13 $\bar{q}_u(\text{水中養生})/\bar{q}_u(\text{気中養生})$ と半水石膏添加率の関係

乾湿繰り返し作用が一軸圧縮特性に及ぼす影響

半水石膏を混入したセメント安定処理土を気中養生した場合およびその後乾湿繰り返しを1回、3回、5回行った場合の代表的な応力-ひずみ曲線として半水石膏を10%混入した場合の結果を図4.1-14に示す。

セメントを10%、半水石膏を10%混入した供試体 ($B/S = 10\%$ 、 $C/S = 10\%$) の応力-ひずみ関係に及ぼす乾湿繰り返しの影響に着目する。乾湿繰り返しを行わない場合 ($n=0$ 回の場合) の応力-ひずみ曲線は、軸ひずみ量の増加に伴い応力値が増加していき、軸ひずみ量2.0%程度で最大値 (100kN/m^2 程度) をとった。軸ひずみ量がさらに増加しても、応力値はその最大値近傍を維持しており、半水石膏混入時によく認められる粘り強さ^{3), 10)} が確認できた。乾湿繰り返しを行った場合に注目すると、いずれの乾湿繰り返し回数においても、軸ひずみ量が1.0~1.5%程度までは応力値が増加しているが、その最大値は $n=0$ 回の場合と比較して小さな値となった。しかしながら、乾湿繰り返しを行った場合においても、半水石膏を混入することによって、応力-ひずみ曲線に明瞭なピークは存在せず、軸ひずみ量が増加しても、応力値はその最大値程度の値を維持することが明らかになった。また、 $B/S=20\%$ および $B/S=40\%$ でも同様の傾向が認められた。なお、 $C/S=5\%$ の場合においても $C/S=10\%$ の場合と同様の傾向が確認できた。以上のことから、乾湿繰り返しによる強度の低下はあるものの、乾湿繰り返し回数の違いやセメント添加率の違いによらず、半水石膏を添加することによって、粘り強い材料となることがわかる。

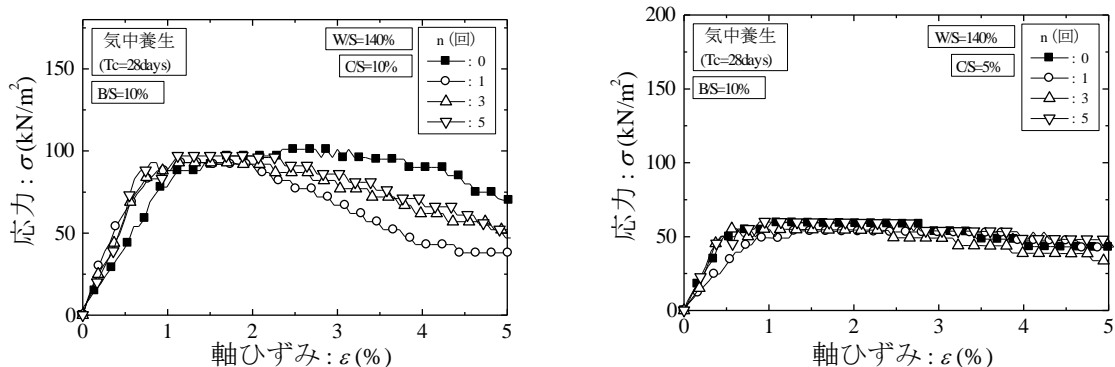


図-4.1-14 代表的な応力-ひずみ関係 ($B/S=10\%$)

乾湿繰り返しが一軸圧縮強さと半水石膏添加率の関係に及ぼす影響を図4.1-15に示す。 $C/S=10\%$ の場合に注目すると、図より、乾湿繰り返しを行わなかった場合、 $B/S=10\%$ の q_u 値は、 $B/S=0\%$ の q_u 値と比較して4割程度低下している。しかしながら、 B/S のさらなる増加に伴って q_u 値は徐々に増加し、 $B/S=20\%$ で $B/S=0\%$ の q_u 値と同等程度となり、 $B/S=40\%$ では $B/S=0\%$ の q_u 値の1.5倍以上を示す結果となった。また、乾湿繰り返しを行った場合も、乾湿繰り返し回数によらず、半水石膏を少量添加した際の q_u 値は $B/S=0\%$ の場合より低下しているが、半水石膏添加率を10~40%まで増加させると、その添加率の増加に伴って、 q_u 値は増加し、 $B/S=40\%$ の場合の q_u 値は $B/S=0\%$ の場合の q_u 値よりも1.5~2.5倍程度に増加している。

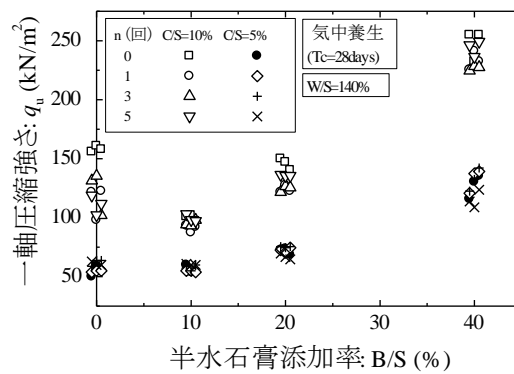


図 4.1-15 乾湿繰返しが一軸圧縮強さと半水石膏添加率に及ぼす影響

少量の半水石膏混入に伴って強度が僅かに低下する主要因としては、石膏の混入によってセメントの水和反応が制御されていることが考えられる。セメントを構成しているクリンカー鉱物の一つにアルミネート相 (C_3A) があるが、このクリンカー鉱物は、水を加えることで多量の熱を放出しながら急激で瞬時に硬化する性質を有している。通常は、このようなアルミネート相の水和熱を抑制するために、セメント製造過程において、石膏が凝結調整剤として添加されている。本研究で混入した半水石膏も、セメント製造過程で用いられている石膏と同様に凝結調整剤として作用し、アルミネート相の硬化を過剰に抑制し、強度低下を引き起こしたものと考えられる。一方、半水石膏添加率の増加に伴って一軸圧縮強さが増加した主要因としては、半水石膏量の増加に伴うエトリンサイト生成量の増加が考えられる。エトリンサイトは針状結晶であり、この針状結晶が絡み合うことにより構造が緻密になる。このことから、セメント安定処理土に半水石膏を添加した際の強度改善効果や粘り強さといった特徴を有することが説明できると考えられる。

以上のことから、乾湿繰返し作用の有無に関わらず、半水石膏添加率を増加させることで、強度を改善できることが示された。さらに、半水石膏を混入してない場合には乾湿繰返しによる強度低下が顕著に認められるが、半水石膏を混入した場合の強度低下は、半水石膏を混入してない場合と比較して小さなものとなった。このことから、半水石膏を添加することは、乾湿繰返しによる強度低下に対して有効であることが確認できた。また、 $C/S=5\%$ の場合においても、養生条件の違いが一軸圧縮強さに及ぼす影響は、 $C/S=10\%$ の場合とほぼ同様の変化傾向となることがわかる。

次に、一軸圧縮強さと乾湿繰返し回数の関係を図 4.1-16 に示す。 $C/S=10\%$ の場合に注目すると、 $B/S=0\%$ の場合、乾湿繰返しによって強度が著しく低下している。しかし、著しい低下が認められるのは乾湿繰返し回数 1 回目で、2 回目以降の乾湿繰返しに対しては顕著な強度低下は認められない。一方、半水石膏を混入した場合の一軸圧縮強さは、乾湿繰返しによって僅かに低下しているが、その低下量は半水石膏を添加していない場合と比較して小さいことがわかる。また、 $C/S=5\%$ の場合においても、乾湿繰返し回数に伴う強度の変化傾向は、 $C/S=10\%$ の場合とそれほど顕著な差はない。

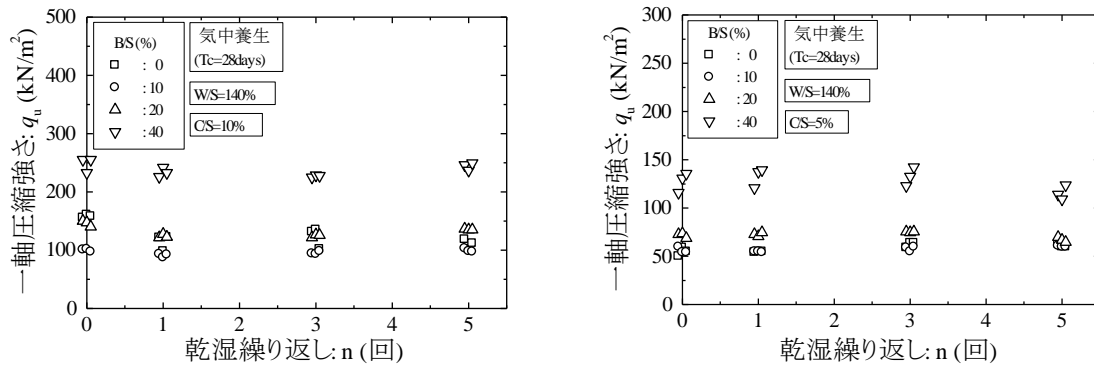


図 4.1-16 一軸圧縮強さと乾湿繰り返し回数の関係

4.1.4 まとめと課題

本研究から得られた主要な結論を以下に列記する。

1. 少量の高炉セメント B 種の添加率 (C/S=2.5%) に加えアルミナ源として新たに石炭灰を補足添加した場合、半水石膏のフッ素不溶化に一定の有効性が認められた。このことより、経済性や環境保全の観点から安定処理材としてのセメント添加率を減じることが可能となる。
2. 供試体のフッ素溶出濃度と粉末 X 線回折によるエトリンガイト生成量との間に相関関係があることを明らかにした。このことより、エトリンガイトの生成量を増加させることが、半水石膏のフッ素不溶化に有効である。また、既往の研究報告や本研究結果からエトリンガイトには、石炭灰や高炉スラグに含まれるホウ素や六価クロムの不溶化に対しても一定の有効性があることを明らかにした。
3. セメント安定処理土の内部構造を明らかにするために走査型電子顕微鏡 (SEM) を使用して供試体の微視的観察を行ったところ、エトリンガイトの存在を確認することができた。
4. 水中養生を行うと、半水石膏を添加したセメント安定処理土の一軸圧縮強さは、気中養生の場合と比較して同程度あるいは僅かに低下する傾向が認められた。
5. 半水石膏を添加し水中養生したセメント安定処理土の一軸圧縮強さは、養生 7 日程度で養生 28 日の一軸圧縮強さに達することが明らかとなった。
6. 半水石膏を混入したセメント安定処理土は、乾湿繰り返し作用によって強度低下が生じるが、著しい強度低下は、乾湿繰り返し 1 回目であり、2 回目以降の乾湿繰り返しに対しては、顕著な強度低下は生じない。
7. 半水石膏を添加していないセメント安定処理土供試体の一軸圧縮強さは、乾湿繰り返しを行うことによって、乾湿繰り返しを行っていない場合の 7~8 割程度まで減少するが、半水石膏を添加した場合の一軸圧縮強さは、9 割程度までしか減少しない。このことから、半水石膏を混入したセメント安定処理土は、乾湿繰り返し作用に対する耐久性に優れていることが明らかとなった。

4.1.5 参考文献

- 1) 廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する検討委員会：廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する検討調査，環境省，pp.11-12，2003.
- 2) 独立行政法人国立環境研究所：安定型最終処分場における高濃度硫化水素発生機構の解明ならびにその環境汚染防止対策に関する研究，pp.6-15，2005.
- 3) 亀井健史，珠玖隆行：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.
- 4) 亀井健史，加藤孝明，珠玖隆行：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，pp.245-252，2007.
- 5) 亀井健史，鶴飼恵三，珠玖隆行：廃石膏ボードから再生した半水石膏の地盤改良材としての有効利用，土と基礎，Vol.55，No.10，pp.26-28，2007.
- 6) 蓬萊 秀人，亀井 健史，小川 靖弘，志比 利秀：半水石膏生産システムの開発とその地盤工学的意義－廃石膏ボードの再生－，地盤工学ジャーナル，Vol.3，No.2，pp.133-142，2008.
- 7) 財団法人 石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書，石炭灰発生量データ（平成7年度～19年度），<http://www.jcoal.or.jp/coalash/ash01.html>，2009.10.
- 8) 財団法人 石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書，平成19年度石炭灰の有効利用分野内訳，<http://www.jcoal.or.jp/coalash/ash02.html>，2009.10.
- 9) 亀井 健史，蓬萊 秀人：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.91-98，2009.
- 10) 亀井健史，小川靖弘，志比利秀：半水石膏を利用したセメント安定処理土の水浸条件下における一軸圧縮特性－廃石膏ボードの有効利用－，土木構造・材料論文集，No.24，pp.122-128，2008.
- 11) 無機マテリアル学会：セメント・セッコウ・石灰ハンドブック，pp.138-143，1996.
- 12) 財団法人 日本規格協会：JIS ハンドブック 10 生コンクリート（第一版），p.202，2002.
- 13) (株) 関電パワーテック，フライアッシュの性状と主な用途，<http://www.kanden-pt.co.jp/pdf/flyash.pdf>，2009.10.
- 14) 山陽クレー工業（株）：MC クレー分析データ表，内部資料.
- 15) 地盤工学会：土質試験の作成方法と解説，安定処理土の締固めをしない供試体作製方法，pp.255-262，1990.
- 16) A. Nakase and T. Kamei: In situ void ratio, strength and overburden pressure anomalies in seabed clays, Proc. IUTAM Symposium on Seabed Mechanics, pp.9-14, 1984.
- 17) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：NEXCO 試験方法 第1編 土質関係試験方法，pp.23-25，2009.
- 18) 徳光俊章，佐藤健司，戸田健司，盛永博子，上松和義，佐藤峰夫：エトリンタイトによる水溶液からのフッ化物イオンの除去，日本セラミックス協会学術論文誌，Vol.114，No.1332，pp.729-732，2002.
- 19) 亀井健史，小川靖弘，志比利秀：半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土の強度変形特性とその内部構造－ハイブリッド型地盤材料の創出－，地盤工学ジャーナル，Vol.5，No.1，pp.35-43，2010.
- 20) 環境庁告示第46号：土壌の汚染に係る環境基準について，平成3年8月23日.

- 21) 甚野智子, 久保博: 石炭灰のほう素不溶化処理に関する研究, 大林組技術研究所報, No.66, pp.89-94, 2003.
- 22) 甚野智子, 久保博, 田島孝敏: 石炭灰の酸洗浄によるほう素除去技術の開発ー洗浄液循環利用と処理システムの検討ー, 大林組技術研究所報, No.67, pp.1-6, 2003.
- 23) 工藤聡, 坂田昌広: 硫酸アルミニウムと消石灰による排水中のホウ酸の凝集神殿処理-セッコウ添加によるホウ酸除去率の向上-, 日本化学会誌, Vol.2002, No.2, pp.265-268, 2002.
- 24) 飯田侑也, 茂木淳, 大場陽子, 坂井悦郎, 大門正機: ドロマイトー高炉スラグ微粉系材料の水和と六価クロム固定, 日本セラミック協会, 年会・秋季シンポジウム講演予稿集, Vol.2009S, No.SPACe, pp293ー.
- 25) 寺井徹, 三国彰, 小松隆一, 池田攻: 種々の pH 条件で調整したポータラナイト懸濁液によるクロム(VI) エトリンタイトの合成, 日本セラミック協会学術論文誌, Vol.114, No.1328, pp299ー302.
- 26) 亀井健史, 小川靖弘, 志比利秀: 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ー廃石膏ボードの有効利用ー, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.99-105, 2009.
- 27) 亀井健史, 大本和樹, 志比利秀, 松尾和俊: セメント安定処理土の強度変形特性, 島根大学総合理工学部紀要 シリーズ A, Vol.36, pp.17-24, 2002.
- 28) 岡田 清, 明石外世樹, 小柳 洽: 新編 土木材料学, p.92, 1987.

4.1.6 関連する発表論文

- 亀井健史, 榛葉 悠, 志比利秀: 半水石膏を利用したセメント安定処理土の水浸条件下での一軸圧縮特性に及ぼす養生期間の影響, 土木構造材料論文集, No.25, pp.146-151, 2009.
- 亀井健史, 蓬萊秀人, 鶴飼恵三: 半水石膏・石炭灰・高炉セメント B 種を用いた安定処理土中のフッ素・六価クロム・ホウ素の不溶化ー廃石膏ボードのリサイクル化ー, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.3, pp.449-461, 2010.
- 亀井健史, 志比利秀, 松田稔史: 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乾湿繰り返し作用の影響, 島根大学総合理工学部紀要 A, Vol.44, pp.9-16, 2010.

4.1.7 知的所有権の取得状況

なし

4.2 谷埋盛土箇所の地盤改良、農業用ため池堤体改修および道路路床の地盤改良を対象とした廃石膏ボードの改良資材としての力学的効果と環境安全性

鵜飼恵三 群馬大学工学研究科

4.2.1 研究目的

廃石膏から得られる二水石膏を加熱処理して得られる再生半水石膏を、谷埋盛土箇所、農業用ため池の底泥および強度の低い道路路床のような軟弱粘性土から構成される地盤の改良材として利用することを目的として、改良土の強度と環境安全性を確認する。

このような研究が必要とされる社会的背景は、以下のものである。建築現場から大量に排出される廃石膏ボードは、管理型処分が義務づけられており、処分場問題、処理費増大の問題を解決するために、廃石膏ボードのリサイクル・再利用技術の開発が社会的に急務となっている。廃石膏ボードから再分離された石膏を熱処理して再生半水石膏を生成し、地盤改良材として適用し、循環型社会実現に向けて廃石膏ボードの再資源化技術開発を推進することが求められている。

4.2.2 谷埋盛土箇所の地盤改良への適用

研究の目的と方法

群馬県太田市の工業団地造成現場における谷埋め盛土予定箇所の浅層に軟弱な粘性土が存在した。そのまま盛土を行うと、地震時に軟弱層に沿って滑りが生じると予想されたため、軟弱粘性土を再生半水石膏と高炉セメントで改良することを試みた。造成地および谷埋盛土箇所の航空写真と、盛土部Aの縦断面図を以下に示す。



図 4.2-1 造成現場の航空写真（左○が盛土部 A、右○が盛土部 B）

谷埋盛土部A（縦断面図）

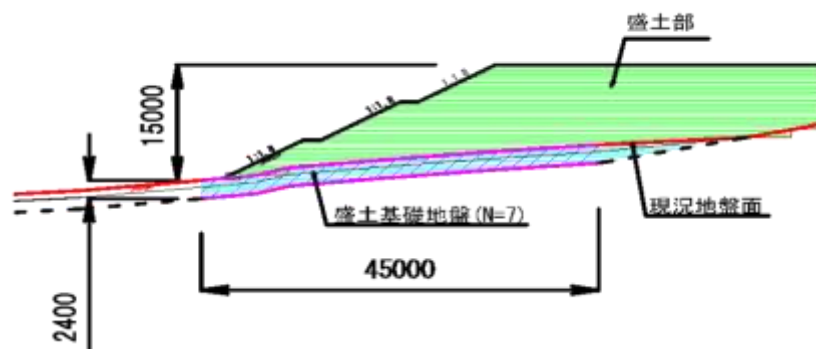


図 4.2-2 盛土部 A の断面図

A 盛土箇所の現地盤の堆積土は礫混じり粘性土で、厚さは 2.4m、平均 N 値は 7 であった。施工後の状態を想定して盛土の安定解析を行った。設計水平震度を 0.2 とし、許容安全率は常時に 1.5、地震時に 1.0 とした。この結果、盛土基礎地盤で 130kN/m² の一軸圧縮強度が必要であるという結果が得られた。現地盤はこの強度を満足しないため、地盤改良を行うこととした。現場施工の精度を考慮して、室内試験で得られる一軸圧縮強さの基準を 260kN/m² (=130*2) と設定した。B 盛土箇所についても同様な検討を行った結果、室内試験で得られる一軸圧縮強さが 260kN/m² であれば満足されることがわかった。

土試料の採取から一軸圧縮試験を実施するまでのプロセスを図 4.2-3 に示す。土試料採取時に深さに応じて土層と土質が変化していたため、最も軟弱と思われた深さ 2.5m と 4.5m の地点から 2 種類の粘性土を採取し、それらを混合して実験に使用した。平均含水比は、上部で 42%、下部で 45% であった。塑性指数 I_p は、上部が 38、下部が 33 である。

土試料の採取

実験室へ搬入し、混合



一軸圧縮試験

図 4.2-3 土試料の採取から一軸圧縮試験を実施するまでのプロセス

再生半水石膏における半水石膏の混合割合は 80%であった。再生半水石膏の粒度試験結果を以下に示す。粒度は、砂とほぼ同じである。

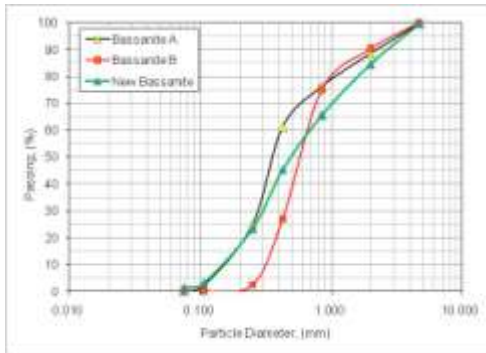


図 4.2-4 実験に使用した再生半水石膏の粒度分布曲線

半水石膏による改良土の強度増加促進と有害物質の溶出を低減させる目的で、半水石膏に加えてセメントを改良材として用いた。セメントは普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種を用いて実験を行ったが、実際の施工では、六価クロムの溶出を抑えるため高炉セメントB種を使用した。

次に、一軸圧縮試験で使用した供試体を用いて改良土が以下の環境基準値を満たすかどうか、確認を行った。

フッ素：溶出試験で 0.8mg/L 以下、ホウ素：溶出試験で 1.0mg/L 以下、六価クロム：溶出試験で 0.05mg/L 以下、硫化水素：敷地境界で 0.2-0.02ppm 以下

フッ素、ホウ素、六価クロムは、土壤汚染対策法施行規則に定められる溶出量測定方法により行った。硫化水素の検出については、検知管による測定方法を独自に考案して行った。その方法を以下に示す。



(左上) ① テドラーバッグに一軸試験使用後の試料を入れて、脱気する。

(右上) ② テドラーバッグに 200ml の空気を入れる



(左上) ③ ②の状態を一日放置する

(右上) ④ 検知管を使って内部の硫化水素ガスの濃度を測定する

図 4.2-5 一軸圧縮供試体からの硫化水素の発生を検出する方法

研究結果の概要

一軸圧縮試験の結果と事前に行った予備試験結果(半水石膏を 0-10%まで、セメントを 0-3%まで、それぞれ 4 段階に変化させた)より、現場での配合比を、土の重量に対して、高炉セメント B 種を 2.5%、80%以上の純度を持つ半水石膏を 4%と決定した。この配合比で現場において試験施工、続いて実施工を行い、強度的に満足に行く結果を得た。

環境試験の結果から、ホウ素、六価クロムについては、基準値以内に十分収まることがわかった。硫化水素については、試験結果と現場の状況から見て、基準値以上の量が発生する環境には無いと判断された。フッ素については、ほぼ基準値に近い値が得られた。なお普通ポルトランドセメントを用いた実験も行ったが、六価クロムの溶出量が基準値を超える場合が見られたため、実施工では高炉セメントを使用した。

軟弱層の粘土の含水比が 45%程度であり、比較的含水比が小さかったため、必要な圧縮強さを得るための強度試験は問題なく行われた。

環境試験については、フッ素の溶出量が基準値に近い値を示したことが問題となった。現在の溶出試験の方法は、固化した改良土を砕いて試験をすることになっており、現実的でないと考えた。このため、一軸圧縮試験後の供試体を蒸留水に浸漬させて溶出量を測定する方法も実施した。その結果、溶出量は基準値以内に十分収まることがわかった。

なお、再生半水石膏を現場施工に用いる場合のコストについても考察を行い、問題点を把握することができた。実用化のためには、強度と環境安全性に加えて経済性も重要な要素となる。

研究結果

(1) 強度試験結果

施工現場での再生半水石膏の添加割合を推定するために、本試験を行う前に以下のような予備試験を実施した。

- ① 再生半水石膏の割合（湿潤土に対する重量比）を 0.0、5.0、7.5、10.0%の 4 種類。
- ② セメントの割合（湿潤土に対する重量比）を 0.0、1.5、2.25、3.0%の 4 種類。
- ③ セメントは、高炉セメント、普通ポルトランドセメントの 2 種類。
- ④ 養生日数は 0、1、3、7、14、28 の 6 種類。
- ⑤ 同じケースで供試体を 3 本作成。

以上の条件下で予備試験を行った。予備試験の結果は以下のようなものである。

- ① 予備試験段階のため、試料の作成方法が不慣れであったことと、再生半水石膏に含まれる純粋な半水石膏の割合が 70%と低かったことから、一軸圧縮強さが小さ目に出た。
- ② 再生半水石膏の割合が多いと粉のまま残留する可能性があること、および経済的観点から、本試験での再生半水石膏の割合を 5%と決定。
- ③ 普通ポルトランドセメントを用いたケースでは、六価クロムの溶出量が基準値を超える場合が見られた。

以上の結果を踏まえて、純粋な半水石膏の割合が 80%の再生半水石膏 5%と高炉セメント 2.25%で改良した粘土の一軸圧縮強さが約 250 k N/m² となることを確認したうえで、本試験を実施した。

本試験の目的は、施工現場で粘土に混合する再生半水石膏とセメントの配合割合を決定することである。また、決定した配合割合で改良した粘土が環境基準を満たすことを確認することである（環境試験については後述する）。

本試験の条件は以下のようなものである。

- ① 再生半水石膏の割合（湿潤土に対する重量比）を 5%とする。
- ② セメントの割合（湿潤土に対する重量比）を 0、1.5、2.25、3.0%の 4 種類。
- ③ セメントは高炉セメントと普通ポルトランドセメントの 2 種類。ただし、強度特性を比較するために普通ポルトランドセメントをあえて使用した。
- ④ 養生日数は 0、1、3、7、14、28 の 6 種類。
- ⑤ 同じケースで供試体を 3 本作成。

本試験における一軸圧縮試験の結果を以下に示す。

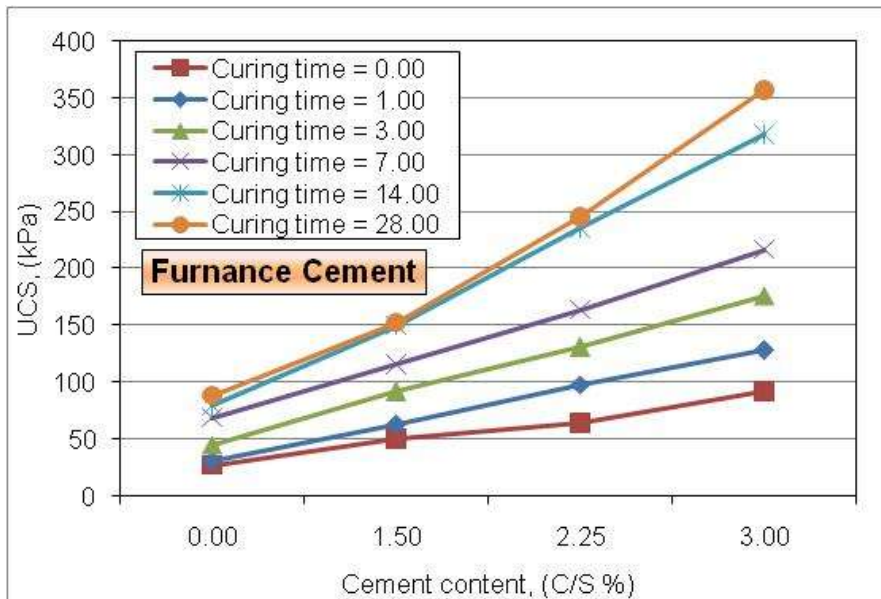


図 4.2-6 高炉セメントを用いた場合の一軸圧縮強さとセメント重量比の関係

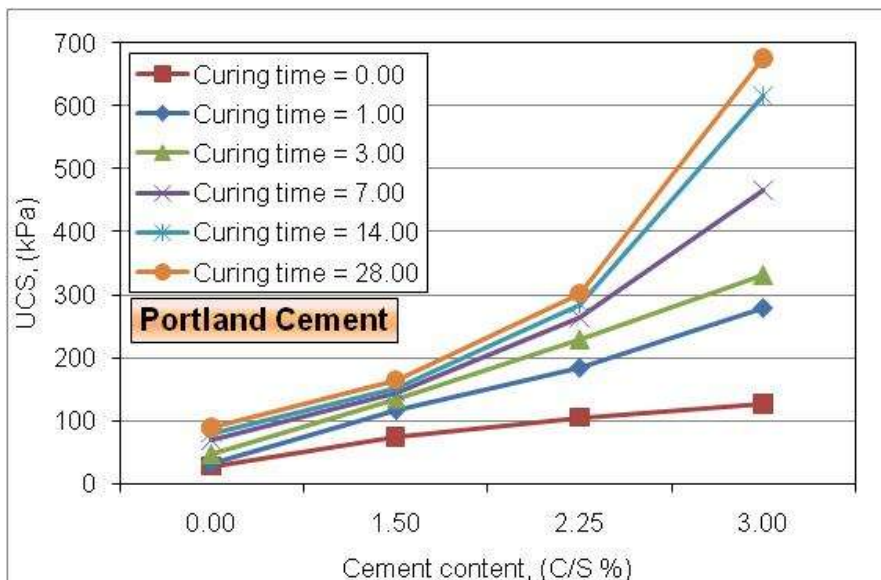


図 4.2-7 普通ポルトランドセメントを用いた場合の一軸圧縮強さとセメント重量比の関係

本試験の結果は以下のようなものである。

- ① 本研究で対象とした粘土については、普通ポルトランドセメントを用いた場合のほうが、高炉セメントを用いた場合より、強度がより大きくなった。ただし、粘土の種類が異なると、逆の結果が得られる可能性がある。
- ② 養生期間が 3 日くらいまでは、セメント重量比と強度の間には直線的な関係があるが、その後の養生期間では、セメントの混合割合が大きくなると強度は急激に大きくなる。
- ③ セメント重量比が 0% のときの結果から、再生半水石膏の強度への寄与率はセメントに比べて小さいことがわかった。

本試験の結果を踏まえて、施工現場での配合割合を、高炉セメント 2.5%、再生半水石膏 4% に決定した。この配合に基づいて粘土の改良土を作成して、一軸試験と環境試験を行い、必

要な条件を満足することを確認した。

(2) 環境試験結果

一軸圧縮試験で使用した供試体を用いて改良土が以下の環境基準値を満たすかどうか、確認を行った。

フッ素：溶出試験で 0.8mg/L 以下、ホウ素：溶出試験で 1.0mg/L 以下、六価クロム：0.05mg/L 以下、硫化水素：敷地境界で 0.2-0.02ppm 以下

フッ素、ホウ素、六価クロムは、土壤汚染対策法施行規則に定められる溶出量測定方法により行った。硫化水素の検出については、検知管による測定方法を独自に考案して行った（図 4.2-5 を参照）。

予備試験と本試験を対象にして環境試験を行った。本試験における環境試験の結果は以下のようである。

- ① すでに述べたように普通ポルトランドセメントを用いたケースでは、六価クロムの溶出量が基準値を超える場合が見られた。六価クロムに関しては社会の関心が大変高いため、安全性を考慮して高炉セメントを採用することとした。
- ② ホウ素の溶出量は基準値の 1/10 以下となることが確認された。
- ③ 硫化水素発生の有無については、すでに説明したように室内での検出方法を独自に考案した。一軸試験で使用された供試体（体積約 200ml）をテドラーバッグに入れ、200ml の空気を注入し、24 時間後検知管で吸入して 0.1ppm 以下であることを確認した。
- ④ フッ素の溶出量については、大部分が基準値 0.8mg/L を満たすが、一部に基準値を満たさないケースが見られた。結果については、この後に説明する。なお、自然の粘土に 0.5mg/L のフッ素が含まれており、基準値を満たさないケースでは自然由来のフッ素の影響が大きいのではないかと考えられた。

フッ素の溶出量に関する環境試験結果を表 4.2-1 に示す。考察結果は以下のようである。

- ① 養生日数が増加すると溶出量は減少する。養生日数が 28 日を超えると基準値を満たす。これは、改良土の内部で化学反応が日数とともに進むためと思われる。
- ② 普通ポルトランドセメントのほうが高炉セメントより溶出量が少ない。
- ③ 自然由来のフッ素の量が多いため、この影響が大きいと考えられる。

表 4.2-1 フッ素の溶出量（単位 mg/L）

養生日数	再生半水石膏のみ	高炉セメント重量比			普通ポルトランドセメント重量比		
		1.5%	2.25%	3.0%	1.5%	2.25%	3.0%
1 日	0.4	0.9	0.9	1.2	1.2	0.7	0.7
14 日	0.5	0.8	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9
28 日	0.5	0.7	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7

このように、フッ素の溶出については、長期的な問題は無いものの、養生日数が少ない期間には基準値を超えるケースもあることがわかった。この問題をさらに詳細に検討した。その結果を以下に示す。

フッ素の溶出試験は、土壤汚染に係る環境基準に基づいて行われている。この試験法では、

土塊を粗砕して 2mm 以下の土壌を用意し、これに中性の純水を加え、6 時間ほど振動させた後に溶出試験を行うように規定されている。しかしながら、このような粗砕された状態は固化した改良土では起こりえないので、この試験結果を鵜のみにするのは問題があると考えられる。現在、改良土に適した試験法は存在しないので、現場の改良土にふさわしい実用的な試験法を今後考案する必要がある。

このような理由から、次のように考えて新たな試験を実施した。

地盤改良の施工後に改良土（粘性土では内部への浸透は起こりにくい）の上を雨水や、少量の地下水が一部流れる可能性がある。現実にはこれに対する安全性を確かめればよいと考えられる。このような状態に対応しうる試験法としてタンクリーチング試験がある。これは、試料の重量の 10 倍の水に試料を静置して溶出量を測定する試験法である。これを実施した。適切な大きさの容器がなかったため、下図のような小さな容器を用いて行った。その結果、現場配合土（高炉セメント 2.5%、再生半水石膏 4%）に対して、一週間後の溶出量は 0.15mg/L になり、基準値よりかなり小さな値となった。



図 4.2-8 施工現場の実態を想定して実施したフッ素の溶出試験

なお、参考として、改良土の pH 試験を行った。その結果を以下に示す。石膏のみ（セメントがゼロ）のとき、改良土の pH は 6-7（中性）であり、セメントが 1.5%以上になると pH は 12 程度（強アルカリ）になることがわかった。

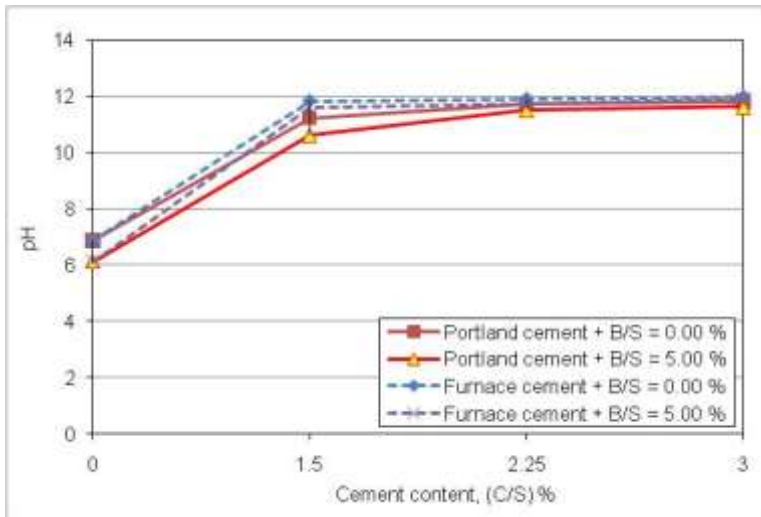


図 4.2-9 改良土の pH 試験の結果

現場試験施工の結果

実際の施工に先だって、試験施工を行った。その様子を以下に示す。配合設計から決定した配合比である再生半水石膏 4%、高炉セメント 2.5%の割合で実際の施工と同じ重機を使用して土と混合し、ブルドーザで転圧した。転圧後に現場コーン貫入試験により強度を測定した。



図 4.2-10 試験施工の様子とコーン貫入試験による強度測定

図 4.2-11 にコーン貫入試験の結果から換算された一軸圧縮強さと転圧後の経過時間との関係を示す。これより 2 時間後には設計基準強度をクリアーしていることがわかる。このように基準強度をはるかに超える強度が現場で得られる理由は、室内試験では、実際の地盤中の特に軟弱な箇所から試料を採取して実験に使用したためである。すなわち実際の軟弱層には、より含水比が低い箇所や礫を含む部分が相当含まれており、実際の施工ではそれらの箇

所まで含めて改良されるからである。

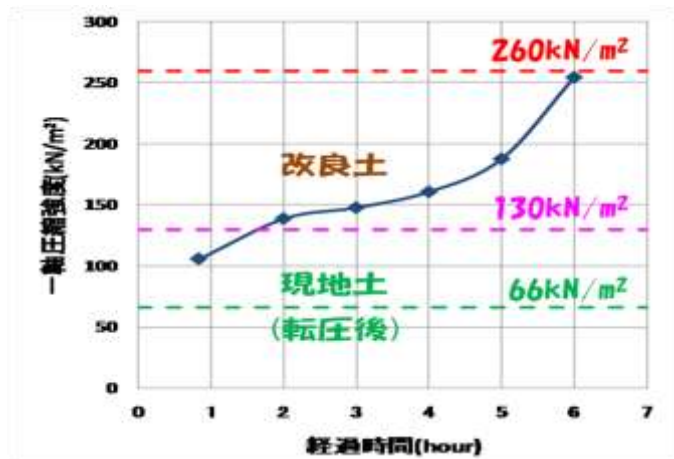


図 4.2-11 コーン貫入試験から換算された一軸圧縮強さと経過時間の関係

実施工の結果

試験施工の成功を受けて実施工を行った。盛土部Aの箇所での施工前の状況を以下に示す。軟弱層は掘削されて、この場所より高い箇所に移され、そこで改良材が混合攪拌された。それを図 4.2-12 の場所に戻して転圧がなされた。



図 4.2-12 盛土部Aの施工箇所（施工前）

実施工での攪拌の様子を図 4.2-13 に示す。混合攪拌と並行して、攪拌が完了した改良土を順次埋戻し場所へ移動し、転圧を行った。それらの様子を図 4.2-14 に示す。転圧の厚さは 30cm であり転圧回数は片道計 6 回である。転圧終了の 1 時間後にコーン貫入試験が行われた。結果を図 4.2-15 に示す。強度は一軸圧縮強さに換算されている。各層において設計基準強度を満足しており、十分な改良効果が得られていることがわかる。



図 4.2-13 実施工での混合攪拌の様子



図 4.2-14 実施工での転圧の様子

各層ごとの強度試験結果

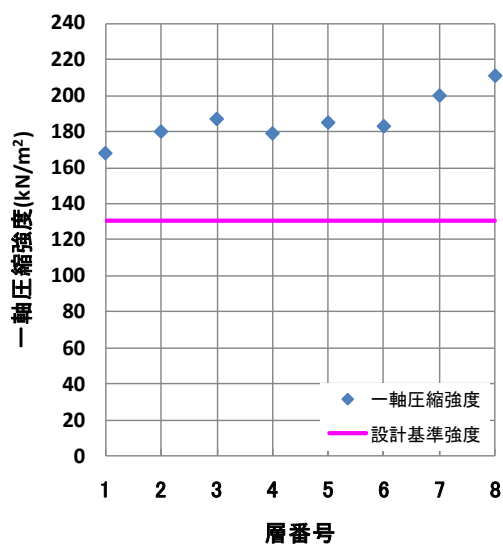


図 4.2-15 転圧 1 時間後に行われたコーン貫入試験結果から換算された一軸圧縮強さ

なお、施工完了後に、盛土下から浸み出している地下水を平成 22 年 5 月 12 日に採取して、環境試験を実施した。フッ素の溶出試験の結果は、0.2mg/L 未満となり、環境基準を十分に満足した。

その他

再生半水石膏を普及させるには、強度性能と環境安全性に加えて、経済性の観点を考慮する必要がある。残念なことであるが、社会的に有意義であってもコストが合わないと、役所も建設会社も受け入れてくれないという現実が時々見られる。再生半水石膏を安くするには、解体現場からの廃石膏ボードの収集⇒石膏と紙の分離⇒再生石膏の半水化、の過程を一つの業者で請け負うシステムにするなどして価格を下げる努力が必要である。それぞれの過程で利益を出そうとする仕組みは割高になる。また、輸送コストを減らすために廃石膏ボードを地域内で処理する地産地消のシステムを作る必要がある。

まとめと課題

- ① 実際の施工現場を対象にして、再生半水石膏を軟弱粘土地盤の改良に用い、良好な結果を得た。再生半水石膏を利用した軟弱粘土地盤の改良に関して、設計から施工に至るまでの環境安全性を考慮した建設システムを構築することができた。
- ② 再生半水石膏で改良された地盤に適した合理的な溶出試験方法と環境基準値を検討し、提案する必要がある。
- ③ 再生半水石膏の使用を普及させるには強度性能や環境安全性のみならず経済性も重要な要素となるので、廃石膏ボードの排出から地盤改良における利用に至るまでの一貫した流通システムを構築し、再生半水石膏をより安く供給する体制を作る必要がある。

4.2.3 農業用ため池堤体改修への適用

研究の目的と方法

廃石膏ボードを粉砕し加熱処理して得られる半水石膏を、農業用ため池の底に厚く堆積した高含水比の泥の固化材（改良材）として使用し、堤体改修資材として活用した事例を報告する。改良材は、再生半水石膏に高炉セメントを重量比 1 : 1 で混合したものをを用いた。底泥の含水比は 150-180%を示した。改良した底泥を堤体腹付盛土として活用するために、施工時の力学的安全性、施工後の盛土の安定性および環境安全性を確認した。

池底に堆積した泥の様子を以下に示す。



図 4.2-16 池の水を排水した後に現れた池底の堆積泥

堤体盛土の設計断面図を以下に示す。盛土の高さは 7.3m、勾配は 1 : 2 (26.6°)、最大深さは 1.5m である。

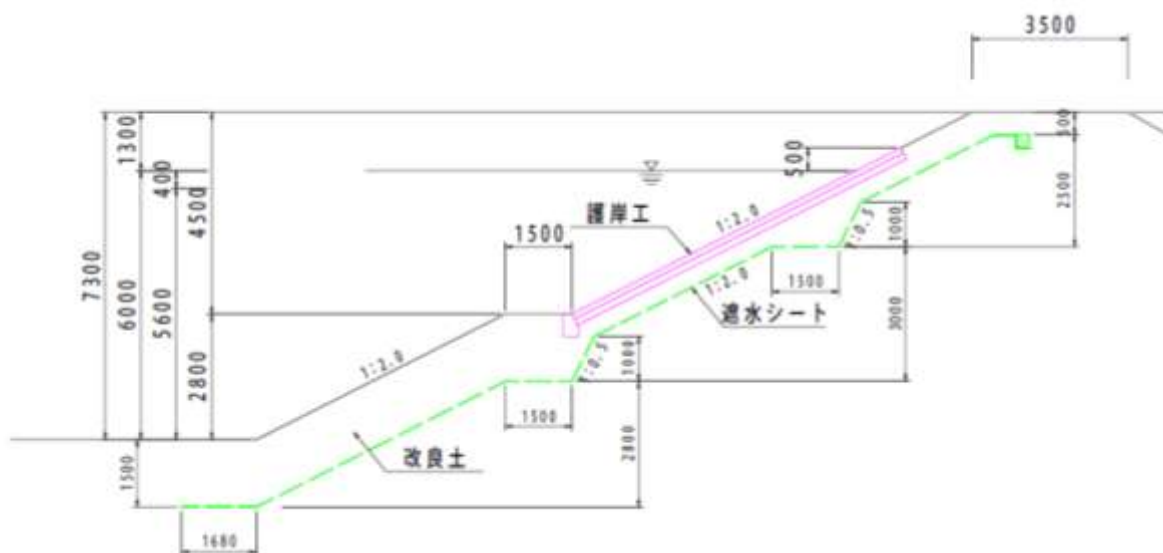


図 4.2-17 堤体盛土の設計断面図

結果および考察

(1) 底泥の性質

底泥の粒度分布を以下に示す。最大粒径は 9.5mm であり、その構成は、礫分 1.6%、砂分 24.1%、細粒分 74.3%（シルト分 55.4%、粘土分 18.9%）である。

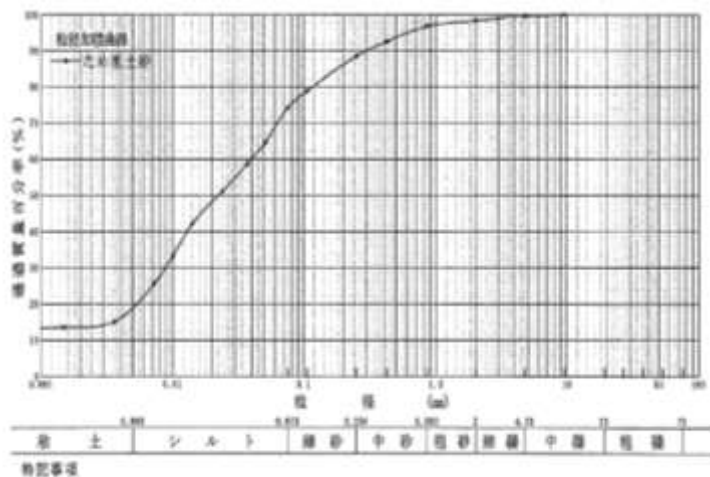


図 4.2-18 底泥の粒度分布

自然含水比は、採取場所で変化するが、160%前後であった。土粒子の密度は 2.46g/cm³ である。液性限界は 100%、塑性限界は 61.5%、塑性指数は 38.5%であった。地盤材料としての分類は、高有機質土の黒泥（Mk）に分類される。土の強熱減量試験方法によれば、乾燥した土の中に含まれる有機物の重量比は 18.5%であった。

(2) 改良材の添加率の決定

改良した底泥を堤体腹付盛土として活用する場合、施工時の安定性を確認する必要がある。底泥と改良材を混合して 24 時間経過後に、普通ブルドーザーがそれを転圧できるためには、500kN/m² 以上のコーン指数が必要とされている。これを調べるために、改良材の添加率（重量比）を 15、17.5、20、22.5% の 4 種類に変えて、それぞれ混合した土を直径 10cm のモールドに入れ 3 層各 25 回突き固めた後に、コーン試験を実施した。この試験結果（下図）より、添加率（配合比）を 20.2% に決定した。

下図には、生石灰のみを混合したときの結果も参考のため掲載した。

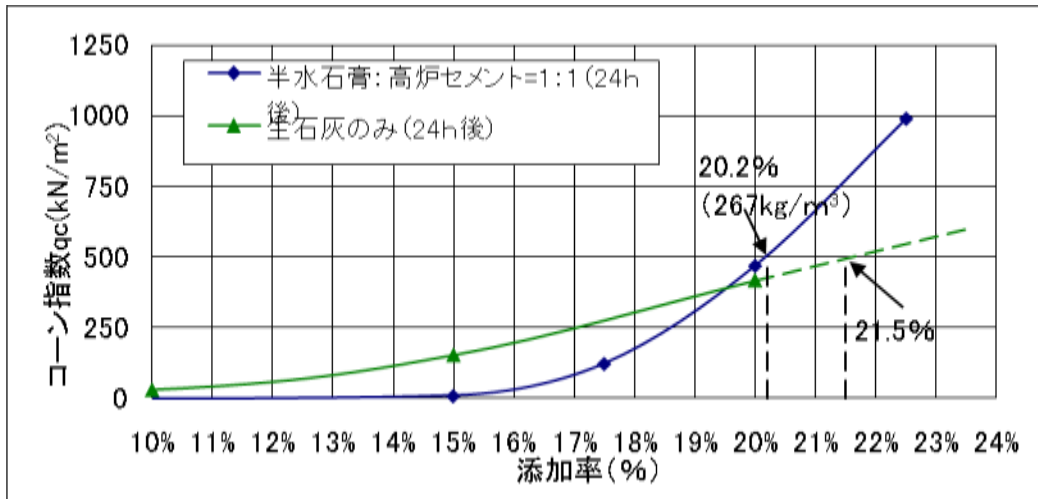


図 4.2-19 改良土のコーン試験結果

半水石膏とセメントの割合を 2 : 1 および 3 : 1 にしたケースについても同様な実験を行ったが、いずれも 1 : 1 の場合より強度が小さくなったため、上記のケースを採用した。

(3) 再生半水石膏の性質

なお、改良材として使用した再生半水石膏の成分は、半水石膏 92.6%、二水石膏 5.3%、無水石膏 2.1% であり、水と反応性のある半水と無水が全体の 95% を占めており、再生半水石膏は良質なものであった。再生半水石膏の粒度分布曲線を以下に示す。過去に使用したものとはほぼ同じ粒度分布である。

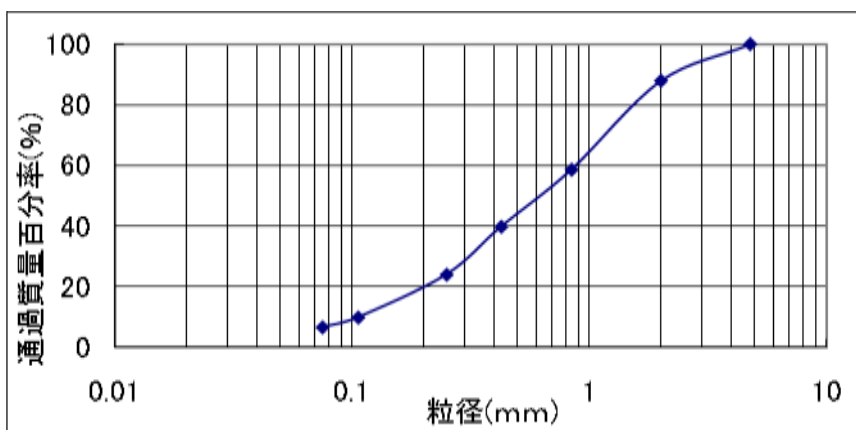


図 4.2-20 再生半水石膏の粒度分布曲線

(4) 施工後の腹付け盛土の安定性

次に、施工後の盛土の安定性を調べた。底泥と改良材を混合して 7 日経過後の一軸圧縮強さを求めて、腹付盛土の簡易な安定計算を行った。下図に一軸圧縮強さ、養生日数及び添加率の関係を示す。図より、添加率 15.0%、7 日経過後の一軸圧縮強さ 400kN/m² のケースを安全側とみなして、試算を行った。この一軸圧縮強さに対応する非排水せん断強さ $c_u = 200$ kN/m² となる。

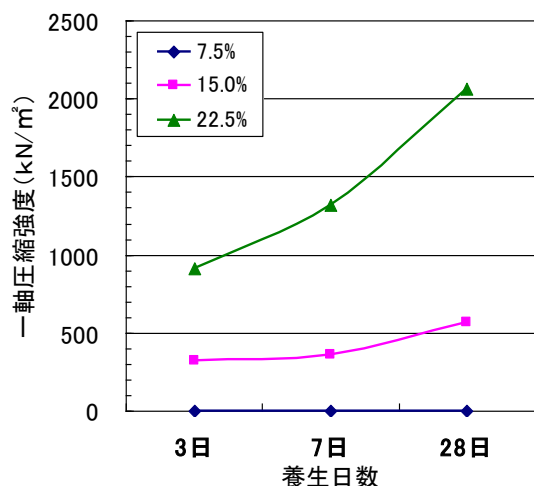


図 4.2-21 一軸圧縮強さと養生日数の関係

腹付盛土の安定計算は、無限長斜面を仮定して行った。水平震度係数を K_h と表示すると、安全率の計算式は、以下のように導かれる。

$$F = c_u / \{ \gamma H \cos \beta (\sin \beta + K_h \cos \beta) \}$$

盛土の勾配は 1 : 2 (26.6°)、最大深さは 1.5m である。添加率 15.0% で締め固めた土の単位重量 $\gamma = 13.2 \text{ kN/m}^3$ となった。 $K_h = 0.2$ または 0.5 として、以上の数値を代入すると、地震時安全率は各々 18 または 12.6 になり、十分な堤体安定性が得られることがわかった。

腹付盛土は、完成（湛水）後にその大部分が浸水する。改良土の浸水後の強度を調べるために、空中養生を 3、7、28 日行った供試体をさらに水中で 4、7、15、30 日養生を行い、一軸圧縮試験を行った。その結果、浸水後も改良土の強度は漸増する傾向を示し、安全性が確認された。下図は、半水石膏：高炉セメントが 1 : 1、添加率 15% のケースで、空气中で 28 日養生した後に、水中養生を行った場合の結果である。2 日目に強度が下がっているのは、水を吸収したことにより強度が少し弱くなったためと思われる。

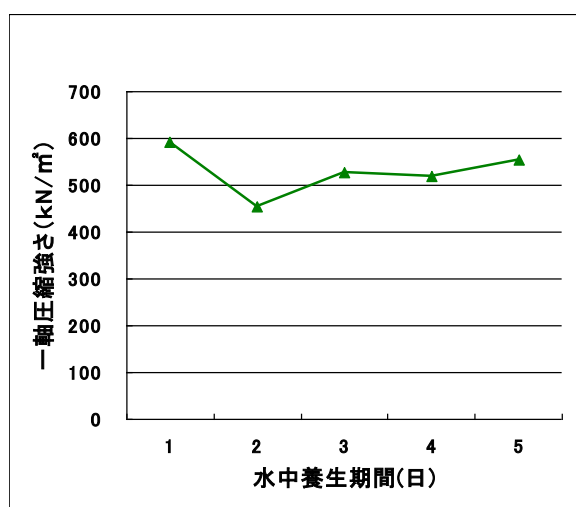


図 4.2-22 一軸強さと水中養生日数との関係

(5) 環境安全性

改良土の環境安全性を調べるために、フッ素、ホウ素、六価クロムに関する溶出試験を行った。結果を下表に示す。いずれの場合も、環境規準を満たすことがわかった。下表で、Bは再生半水石膏、Cは高炉セメントの略称である。なお、もとの底泥に含まれるフッ素の含有量は39mg/kg、溶出量は0.1と0.4mg/L（2検体）であった。

試験試料	フッ素(F) mg/L	ホウ素(B) mg/L	六価クロム (Cr6+) mg/L
添加率 (28日養生のみ)			
15% (B:C=1:1)	0.11	0.17	<0.01
17.5% (B:C=1:1)	0.17	0.15	<0.01
20% (B:C=1:1)	0.12	0.16	<0.01
22.5% (B:C=1:1)	0.18	0.25	<0.01
環境基準	0.8mg/L 以下	1.1mg/L 以下	0.05mg/L 以下

まとめ

廃石膏ボードから再生される半水石膏の農業用ため池堤体改修資材への適用性を明らかにするために実験研究を行った。施工時、完成後および湛水後の堤体の力学的安定性を確認した。またフッ素、ホウ素および六価クロムに関する溶出試験を行い、環境安全性を確認した。

ため池に堆積した泥を堤外に持ち出すと産業廃棄物になるため、投棄コストや投棄場所で大きな負担が生じる。再生半水石膏と混合して堤内で有効利用することで、2つの廃棄物の有効活用を図れることが、本研究により示された。なお、現在、道路路床の軟弱地盤改良に再生半水石膏を利用した試験研究を進めており、その適用範囲がさらに拡大しつつある。

4.2.4 道路路床改良への適用

目的と方法

アスファルト道路の深さ方向の構成は、表面から、約10cm厚さのアスファルト舗装、約30cm厚さの砕石から成る路盤、約100cm厚さの地盤から成る路床、の3層構造である。それぞれの厚さは、道路の重要性、交通量、路床の強度などから決定される。このうち路床は、道路下の地盤が軟弱な場合には、良質な砂による置き換えや軟弱粘土の改良により、補強されることが多い。砂で置き換える場合には、軟弱粘土の捨て場所が問題になるため、現地盤をそのまま改良するのが望ましい。

平成23年1月より、群馬県県土整備部と共同で、県道路の一部で試験的に路床改良工事に再生半水石膏を使用することになった。その途中経過を報告する。改良路体の大きさは、幅7m、長さ70m、厚さ0.9mである。工事は、計画停電等の影響で平成24年度にずれ込んだ。

研究結果

(1) 土の性質

路床に対応する改良前の土の粒度分布を以下に示す。最大粒径は37.5mmであり、その構成は、礫分16.0%、砂分31.3%、細粒分52.7%（シルト分29.1%、粘土分23.6%）である。

自然含水比は、採取場所で変化するが、35.0%前後であった。土粒子の密度は 2.74g/cm³ である。液性限界は 52.4%、塑性限界は 26.0%、塑性指数は 26.4%であった。地盤材料としての分類は、砂礫質粘土 (CHSG) に分類される。土の湿潤密度は 1.885g/cm³ である。

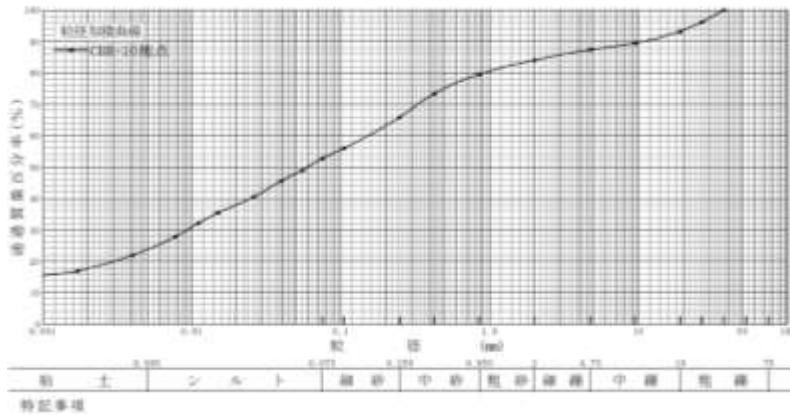


図 4.2-23 土の粒度分布曲線

(2) 改良材の添加率の決定

改良材として再生半水石膏と高炉セメントを 1 : 1 で混合して使用した。目標 CBR 値を 16.9%として添加量を変えて、CBR 試験を行った。供試体は、安定処理土の突固めによる作成方法に準拠して作成し、4.5kg ランマーで 3 層 67 回突固めた後、3 日間空气中養生、4 日間水中養生を行い、CBR 試験に供した。試験結果を次図に示す。

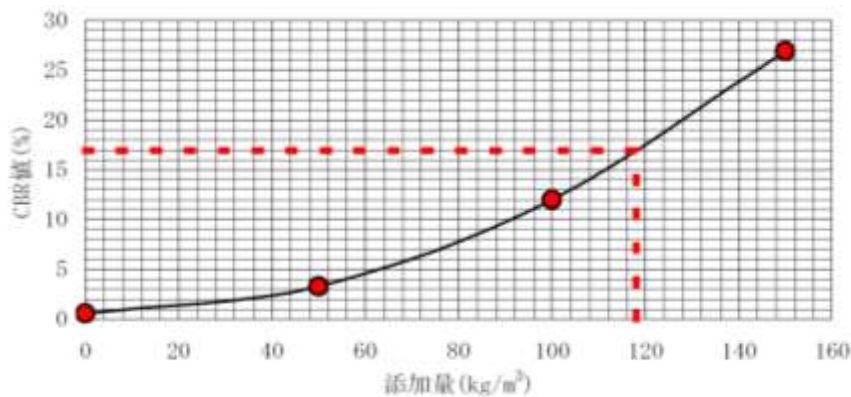


図 4.2-24 CBR 値と改良材添加量との関係

この結果より改良目標 CBR=16.9%に対する必要添加量を 118kg/m³ と決定した。現場での添加量は、これに割増率 30%を加えて 153 kg/m³ とした。

添加量 153 kg/m³ で改良した場合の土に対して、溶出試験を行った。フッ素が 0.58mg/L、六価クロムが 0.02mg/L、と得られ、環境規準を満たすことがわかった。

次に、CBR 試験用供試体を上記と同じ添加量で再度作成して、すぐに脱型し 3 等分した。その 1 つを 3 日間空气中に養生、続いて 4 日間水中養生して一軸圧縮試験用に整形し、強度を求めた。結果を下図に示す。なお供試体が硬かったため整形時の攪乱で強度が落ちた可能性がある。

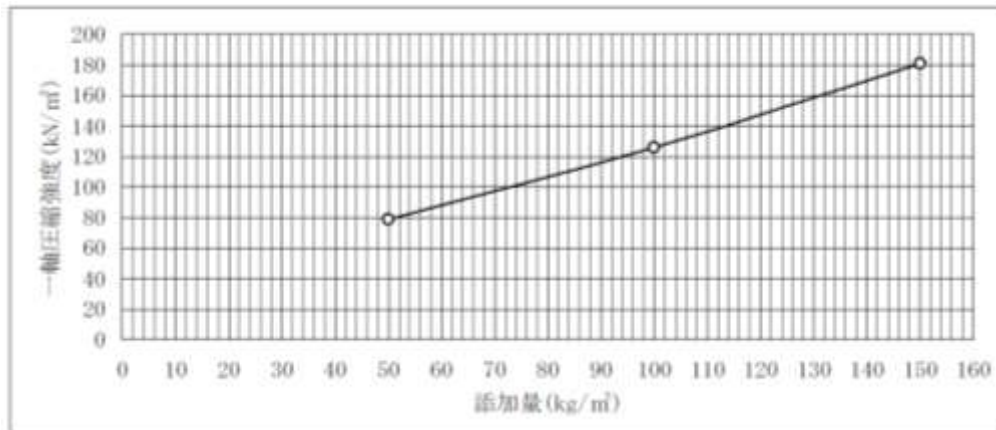


図 4.2-25 一軸圧縮強さと改良材添加量との関係

CBR 試験結果では、曲線が凹型であるのに対し、一軸圧縮強さは直線的に増加している。この理由は、CBR 試験では、載荷ピストンの沈下量が 2.5mm と一定であるため、見かけのヤング率が小さい（つまり強度が小さい）供試体ほど、CBR 値が小さくなってしまいうためであろう。



図 4.2-26 施工写真：土と改良材を混合している様子（桐生）

(3) まとめ

軟弱粘土から成る路床の改良に、再生半水石膏と高炉セメントの混合材が有効であることが示された。軟弱な路床を砂で置き換えるより環境的に優れているし、経済的にも太刀打ちできる可能性が高い。再生半水石膏の価格がセメントよりかなり安くなれば、需要は相当あると考えられる。

今後は、路盤の改良材としての使い道が無いか、探りたい。道路下の改良工事は、毎年全国で数多く行われているので、有望な市場であると考えられる。

4.2.5 研究発表

審査付き論文

1. Ahmed A. and K. Ugai (2011) "Environmental Effects on Durability of Soil Stabilized with Recycled Gypsum" International Journal of Cold Regions Science and Technology, Vol.65, No.3, Elsevier Publications. (In press) (IF:1.416)
2. Ahmed A., Ugai K. and Kamei T., (2011) "Environmental Evaluation for Clayey Soil Stabilized with Gypsum Waste Plasterboard in Japan" Geotechnical Special Publications, ASCE, (Paper accepted).
3. Ahmed A., K. Ugai and T. Kamei, (2011) "Investigations of Recycled Gypsum in Conjunction with Waste Plastic Trays for Ground Improvement". Journal of Construction & Building Materials, Elsevier Publications, Vol.25, No.1, pp. 208-217. (IF:1.456)
4. Ahmed A., Ugai K. and Kamei T., (2010), "Application of Gypsum Waste Plasterboard and Waste Plastic Trays to Enhance the Performance of Sandy Soil" Geotechnical Special Publications, Ground Improvement and Geosynthetics, ASCE, Vol. 2010, No. 207, pp. 165-173.
5. 亀井健史, 蓬萊秀人, 鵜飼恵三 (2010): 半水石膏・石炭灰・高炉セメント B 種を用いた安定処理土中のフッ素・六価クロム・ホウ素の不溶化, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.3, pp.449-461, 2010.

国際会議

1. Ahmed A., Ugai K. and Kamei T., (2010), "Durability of Fine Grained Soil Stabilized with Gypsum Waste Plasterboard" In the Proceedings of Sixth International Congress on Environmental Geotechnics, 6ICEG, November 8-12, 2010, vol.2, pp. 1469-1477, New Delhi.

国内発表

1. Ahmed A., Ugai K. Aizawa T. and Kamei T., (2010), "Evaluation of using recycled gypsum for clayey soil improvement based on mechanical and environmental functions", 第 47 回地盤工学研究発表会, 松山.

4.2.6 知的所有権の取得状況

なし

4. 3 廃石膏ボードの建設発生土等の改良材としての適用性と環境安全性の評価

森 啓年・塚本将康・山木正彦 独立行政法人土木研究所
肴倉宏史 独立行政法人国立環境研究所

4.3.1 研究目的

本研究は、廃石膏ボードの建設発生土等の改良材としての適用性を実験的に検討するものである。具体的には、改良材として有すべき強度の発現性と、懸念されている周辺環境への影響を把握するとともに、両者の関係を整理する。また、硫化水素の発生量とふっ素の溶出量を抑制する効果を期待してセメント系固化材（高炉 B 種）を添加し、硫化水素の発生量やふっ素の溶出量と強度の関係を整理することである。さらに、セメント改良土が将来的に中性化され、抑制されていた硫化水素等が再び発生しないか確認するために、廃石膏ボードを添加したセメント改良土が中性化した際の環境安全性の評価を実施した。以下に強度と環境影響の面から、建設発生土の現状および一般的なセメント改良材の取扱いを述べる。

(1) 強度

建設発生土の場外搬出量は年間およそ2億 m^3 発生し、うち約6千万 m^3 が工事間および再資源化施設経由で利用されている（図4.3-1参照）。その際含水比低下、粒度調整、安定処理等により建設発生土を改良し利用する場合もある。建設発生土の利用に際しては、発生側・利用側が共通の指標で判定し、利用可能な用途を選定するために、国土交通省は基準（「発生土利用基準について」(平成18年8月)以下基準）を策定し土質区分を設定している。この区分は原則として、コーン指数と土質材料の工学的分類体系を指標としている（表4.3-1）。なお、土質改良を行った場合には、改良後の性状で判定することになっている。建設発生土の利用用途はこの土質区分に基づき、基準の中で表4.3-2に示す適用用途標準を目安としている。これらの表より、建設発生土を利用するにはコーン指数が最低200 kN/m^2 以上必要であること、用途目的によって必要となるコーン指数が異なること、また基本的にはある強度が確保されればより多くの用途で利用可能であることがわかる。なお、一般にコーン指数と一軸圧縮強度は相関があることが既往の研究により示されている¹⁾。

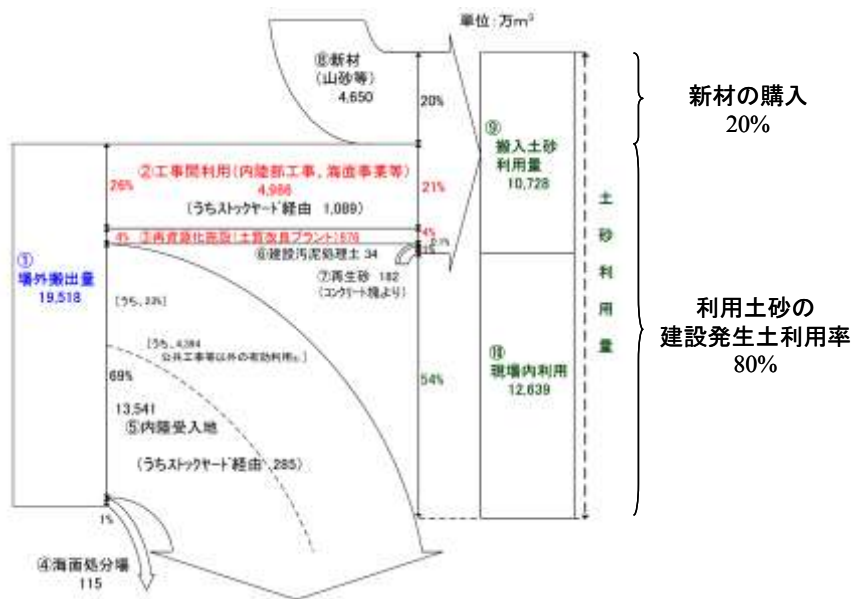


図 4.3-1 全国における建設発生土の搬出・利用状況
(国土交通省 (H17 年度))

表 4.3-1 建設発生土の土質区分

区分	土質区分	コーン指数 kN/m ²	土質材料の工学的分類体系	
			大分類	
第1種建設発生土	第1種	—	礫質土	
	第1種改良土		砂質土	
第2種建設発生土	第2a種	800以上	人工材料	
	第2b種		礫質土	
	第2種改良土		砂質土	
第3種建設発生土	第3a種	400以上	人工材料	
	第3b種		砂質土	
	第3種改良土		粘性土、火山灰質粘性土	
第4種建設発生土	第4a種	200以上	人工材料	
	第4b種		砂質土	
	第4種改良土		粘性土、火山灰質粘性土、有機質土	
泥土	泥土a	200未満	人工材料	
	泥土b		砂質土	
	泥土c		粘性土、火山灰質粘性土、有機質土 高有機質土	

表 4.3-2 建設発生土の適用用途標準

区分	土質区分	工作物の埋戻し・土木構造物の裏込め	建築物の埋め戻し	道路用盛土		河川築堤		土地造成		鉄道盛土	空港盛土	水面埋立
				路床	路体	高規格堤防	一般堤防	宅地造成	公園・緑地造成			
第1種建設発生土	第1種	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎
	第1種改良土											
第2種建設発生土	第2a種	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	第2b種											
	第2種改良土											
第3種建設発生土	第3a種	○	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎
	第3b種											
	第3種改良土											
第4種建設発生土	第4a種	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎
	第4b種	△		△						△		
	第4種改良土	△		△						△		
泥土	泥土a	△	○	△	○	○	○	○	○	△	○	○
	泥土b	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	○
	泥土c	×	×	×	△	×	×	×	△	×	×	△

◎:そのまま使用が可能なもの。
 ○:適切な土質改良(含水比低下、粒度調整、機能付加・補強、安定処理等)を行えば使用可能なもの。
 △:評価が○のものと比較して、土質改良にコスト及び時間がより必要なもの。
 ×:良質土との混合などを行わない限り土質改良を行っても使用が不適なもの。

(2) 環境影響

セメント系固化材を地盤材料に配合するセメント改良土に関しては、その土質や固化材の種類によっては、環境基準を超過する六価クロムが溶出する。そのため、配合試験時には一軸圧縮強度だけでなく六価クロム溶出試験を実施するよう国土交通省により通達(「セメント及びセメント系固化材の地盤改良への使用及び改良土の再利用に関する当面の措置について」(平成12年3月))が出されている。図4.3-2は現在の一般的なセメント改良土の配合試験のフローを示したものである。設計時に目的を達成し得る強度を設定し、配合試験によって必要な強度が得られる配合を決定する。必要な強度が得られる配合で、六価クロム溶出試験を実施し土壌環境基準を満足するか否かを判定し、満足しない場合再び配合試験を実施するということを繰り返す。このようにして強度・環境影響の両方を満足する改良土が現場において使用される。

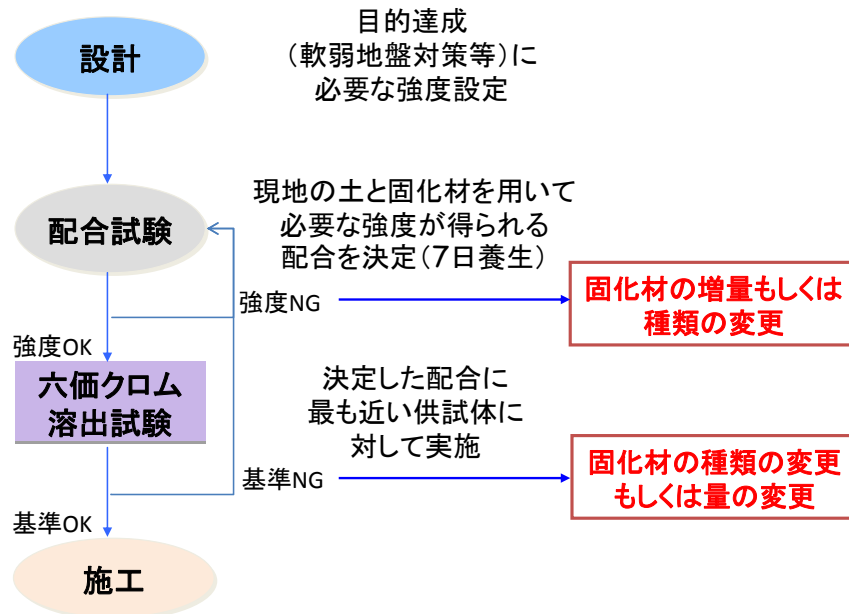


図 4.3-2 一般的なセメント改良土の適用フロー

(3) 廃石膏ボード利用の留意点

廃石膏ボードを改良材として適用する際にも、懸念されているふっ素の溶出および硫化水素の発生といった環境影響に関して、少なくともセメント改良土と同程度の管理が必要と思われる。つまり目的に応じて必要となるコーン指数（強度）を発現させる配合量でなおかつふっ素の溶出、硫化水素の発生を所定の基準内で抑えることが必須となる。この際、例えば掘削により再利用され、周辺環境が変化した場合の留意も必要となる。

4.3.2 研究方法

5種類の試料土に対して廃石膏ボードを原料とする半水石膏を混合し、あわせてふっ素の不溶化、硫化水素の発生を抑制する効果を期待してセメント系固化材を添加し、物理特性と環境安全性の関係を定量的に検討した。また、セメント改良土の中性化によるふっ素の再溶出、硫化水素の発生について検討するために、廃石膏ボードを添加したセメント改良土を屋外に一定期間暴露して中性化させ、その環境安全性の評価を実施した。具体的には、強度を一軸圧縮強度により評価し、環境影響は硫化水素の発生量およびふっ素の溶出量で評価することとした。また、セメント系固化材を添加することによって懸念される六価クロムの溶出量についても評価した。以下に使用した土試料と試験に用いた供試体の作製方法、試験方法に関して説明する。

(1) 使用した土試料

茨城県美浦町で採取された山砂（以下、美浦砂と称する）、茨城県霞ヶ浦の浚渫土（以下、霞ヶ浦浚渫土と称する）、荒川河口部で浚渫された粘性土（以下、荒川浚渫土と称する）、神奈川県内で採取された関東ローム（以下、相模ロームと称する）、有明海沿岸地域で採取された粘性土（以下、有明粘土と称する）の計5種類である。各土試料の物性値を表4.3-3に示す。

なお上記土試料に添加する廃石膏ボードは、焼成し半水石膏としたものを使用し、セメン

ト系固化材は、高炉セメント B 種を使用した。

表 4.3-3 各土試料の物性値

試料名	土粒子の 密度 ρ_s (g/cm^3)	初期 含水比 W_i (%)	液性限 界 W_L (%)	塑性限 界 W_P (%)	塑性 指数 I_P	50%粒径 D_{50} (mm)	細粒分 含有率 F_c (%)
荒川浚渫土	2.609	62.3	73.1	33.7	33.4	0.0125	79.8
相模ローム	2.741	147.4	198.9	115.8	83.1	0.0079	85.8
美浦砂	2.689	29.0	NP	NP	NP	0.173	9.5
霞ヶ浦浚渫土	2.664	41.0	44.2	26.3	17.9	0.063	54.1
有明粘土	2.591	104.7	96.5	42.1	55.1	0.0125	89.0

(2) 半水石膏・高炉セメント B 種配合試料の作製

美浦砂と霞ヶ浦浚渫土については、事前に含水調整を実施した上で使用し、その他の試料土については、自然含水比のままで使用した。これらの土試料に対し、乾燥重量比で 10%、20%、30%の半水石膏および 0%、5%、10%の高炉セメント B 種を添加し攪拌機を用いて配合試料を作製した。半水石膏と高炉セメント B 種は、事前に攪拌混合した上で土試料に混合した。その様子を写真 4.3-1 から写真 4.3-4 に示す。この配合試料を用いて、一軸圧縮試験用供試体を作製し、また硫化水素検知試験用の試料とした。なおふっ素、六価クロムの溶出試験は一軸圧縮試験に使用した供試体を使用し実施した。



写真 4.3-1 土試料の攪拌



写真 4.3-2 含水調整 (注水)



写真 4.3-3 半水石膏及び高炉セメント B 種の投入



写真 4.3-4 混合後の試料土

(3) 供試体作製方法

1) 一軸圧縮試験用供試体作製方法

先に作製した半水石膏・高炉セメント B 種配合試料を用いて、テーパー付きモールドにより一軸圧縮試験用供試体を作製した（写真 4.3-5 から写真 4.3-9）。供試体は直径 5cm、高さ 10cm である。なお一軸圧縮試験用供試体の乾燥密度は、土試料ごとに一定となるようにするために、美浦砂、霞ヶ浦浚渫土は、事前に作製した半水石膏配合率 20%の配合試料による締固め試験（A-a 法）で得られた最大乾燥密度の 90%を目安とし、その他の試料は、自然含水比の無配合試料による締固め試験（A-a 法）で得られた最大乾燥密度の 100%を目安として作製した。

作製された供試体は、ラップにくるみ湿潤箱に入れ一軸試験まで 22 度の恒温で湿潤養生し、養生期間は 7 日、28 日とした。

表 4.3-4 は一軸圧縮試験に用いた各供試体の含水比と乾燥密度を整理したものである。乾燥した半水石膏、高炉セメント B 種を添加するため、添加率が高い方が含水比は低くなる。なお乾燥密度は先述の通り設定したため、同じ土試料では同じ程度の値となるように作製されていることが確認できる。



写真 4.3-5 供試体の作製手順①



写真 4.3-6 供試体の作製手順②



写真 4.3-7 供試体の作製手順③



写真 4.3-8 供試体の作製手順④



写真 4.3-9 美浦砂供試体の養生

表 4.3-4 一軸圧縮試験用供試体の含水比と乾燥密度

高炉セメント B種添加量 (%)	半水石膏添加量 (%)	養生 日数	荒川浚渫土		相模ローム		美浦砂		霞ヶ浦浚渫土		有明粘土	
			含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)
0	10	7	56.5	0.971	129.3	0.522	26.1	1.415	39.0	1.299	92.5	0.702
		28	55.5	0.985	125.5	0.525	25.1	1.418	39.6	1.299	90.0	0.712
	20	7	51.4	1.010	111.2	0.540	23.8	1.407	32.3	1.333	84.9	0.692
		28	49.8	1.011	112.8	0.527	22.9	1.415	34.2	1.306	83.1	0.715
	30	7	48.0	1.014	109.0	0.514	22.2	1.390	29.8	1.325	77.8	0.689
		28	46.1	1.018	106.8	0.518	21.3	1.396	33.3	1.287	74.2	0.717
5	0	7	57.2	0.987	129.9	0.523	26.4	1.429	36.7	1.246	94.2	0.698
		28	57.3	0.977	131.7	0.536	26.2	1.414	36.8	1.282	94.2	0.705
	10	7	51.4	1.052	122.9	0.514	25.9	1.389	33.3	1.332	88.8	0.689
		28	50.8	1.021	120.6	0.524	25.3	1.397	33.4	1.332	88.8	0.693
	20	7	47.5	1.002	113.5	0.519	23.1	1.388	29.5	1.327	81.1	0.687
		28	47.4	1.003	111.1	0.512	23.0	1.388	31.7	1.305	81.4	0.689
30	7	45.1	0.995	101.7	0.515	20.7	1.390	29.2	1.309	75.2	0.692	
	28	45.3	0.986	104.5	0.511	20.2	1.394	29.6	1.302	75.3	0.692	
10	0	7	54.3	0.981	124.8	0.526	24.1	1.427	34.2	1.308	93.6	0.694
		28	53.6	0.987	126.5	0.530	24.3	1.451	34.1	1.314	93.2	0.689
	10	7	49.3	0.994	114.6	0.520	22.4	1.417	28.9	1.360	82.7	0.694
		28	48.4	1.004	113.4	0.528	21.3	1.421	32.2	1.328	81.7	0.701
	20	7	45.6	0.996	106.2	0.521	20.1	1.402	25.7	1.360	76.6	0.700
		28	44.7	0.995	103.4	0.521	20.1	1.405	29.2	1.317	77.4	0.695
30	7	42.0	0.983	100.7	0.512	17.6	1.406	23.9	1.354	71.1	0.795	
	28	40.7	0.985	96.5	0.517	18.5	1.400	27.9	1.307	70.1	0.704	

2) 硫化水素検知試験用供試体作製方法

容量 400ml のガラス瓶の蓋を加工し、2 本のチューブを取り付けた。この瓶に配合試料 150g 投入し、蒸留水をガラス瓶の容量の半分（200ml）まで入れた後、気層を窒素で置換して、硫化水素検知試験用の供試体を作製した（図 4.3-3 参照）。養生は硫化水素検知試験を実施するまで 40 度の温水に入れ養生し、養生期間は 7 日、14 日、28 日とし、各ケースの養生期間ごとに 3 供試体ずつ作製した。

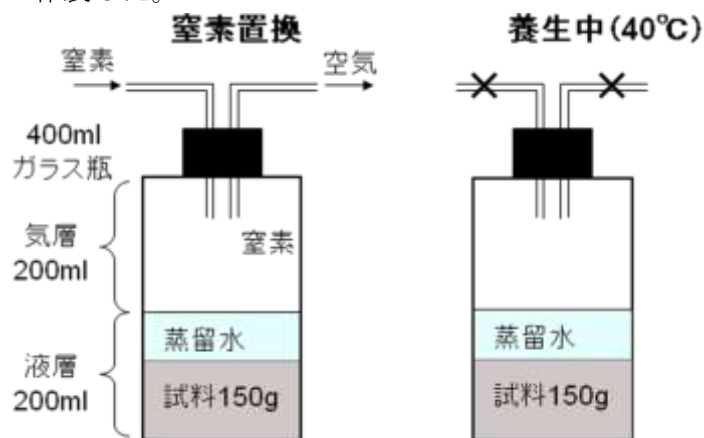


図 4.3-3 硫化水素検知試験用供試体の作製

3) ふっ素、六価クロム溶出試験用供試体

ふっ素と六価クロムの溶出試験には一軸圧縮試験に用いた供試体を使用する。なお養生期間は一軸供試体と同じ期間を設定し 7 日、28 日とした。

4) 中性化用供試体

写真 4.3-10 に示すように、幅 40cm×長さ 60cm×深さ 7cm の木枠ふるいの上に不織布を敷き、仕切り板をはめ込んだ上で、各格子に配合試料を約 1kg ずつ敷き詰めた。これを屋外に設置し、外気および風雨に暴露した。暴露期間は 10 月～翌年 3 月までのうち、荒川浚渫土、相模ローム、美浦砂は 130 日間、霞ヶ浦浚渫土、有明粘土は 150 日間とした。



写真 4.3-10 中性化用供試体

(4) 試験方法

1) 一軸圧縮試験

先述した方法で作製した供試体（直径 5cm、高さ 10cm）を一軸圧縮試験機に設置し、毎分 1mm の速度（軸ひずみ速度 1%/min）で載荷した。同条件で作製された 3 本の供試体の最大圧縮応力の平均値を一軸圧縮強度としている。

2) 硫化水素検知試験

ガラス瓶から出ている2本のチューブのうち1本のチューブにガス検知管を取り付け、吸引器（写真 4.3-11）を使用し、ガラス瓶内の気層部分の硫化水素濃度を測定した（使用したガス検知管の測定範囲 0.1～4.0ppm、1～40ppm）（図 4.3-4）。この際ガス検知管を取り付けない方のチューブは測定と同時に開放した。測定は1供試体につき1回のみとして規定し、あらかじめ各配合試料の養生期間ごとに必要な供試体数を準備した上で実施している。



写真 4.3-11 吸引器とガス検知管

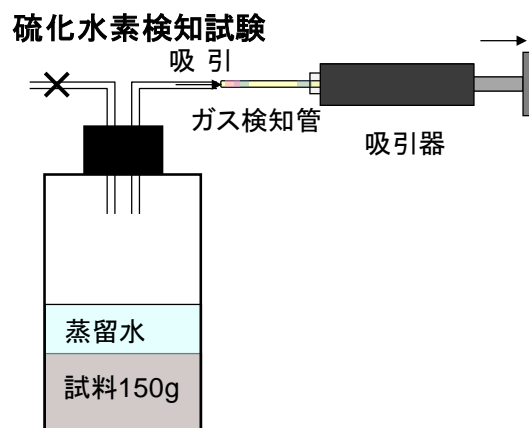


図 4.3-4 硫化水素検知試験

3) ふっ素、六価クロム溶出試験

一軸圧縮試験に用いた供試体を使用し、環境省告示 46 号試験に準じて実施する。

4) 中性化供試体の環境安全性の評価

暴露期間終了時に中性化の進行程度を確認するためにフェノールフタレイン溶液を噴霧したところ、相模ロームのみ赤く変色しアルカリ性を示したものの、それ以外は赤く変色せず中性化が進行したことを確認した。これら供試体を使用し、先に示した手法により硫化水素検知試験（40℃、7日間養生のみ）、ふっ素溶出試験、六価クロム溶出試験を実施した。

4.3.3 研究結果

4.3.3.1 半水石膏、高炉セメント B 種を添加した土試料の一軸圧縮強度

(1) 養生期間と一軸圧縮強度の関係

図 4.3-5 と図 4.3-6 は一軸圧縮強度と養生期間の関係を高炉セメント添加率ごとに整理したものである。紙面の都合上、荒川浚渫土と美浦砂のケースのみを示す。各試料土の半水石膏のみを添加したケース（高炉セメント B 種添加率 0%）についてみると、養生期間の違いによる強度の変化は見られない。また、高炉セメント B 種を添加したケースでは、養生期間に応じて強度が増大する傾向が確認でき、高炉セメント B 種の添加率が大きいほど養生期間に応じて強度の増加が顕著となっている。

一軸強度	
◆	石膏0%
●	石膏10%
■	石膏20%
▲	石膏30%

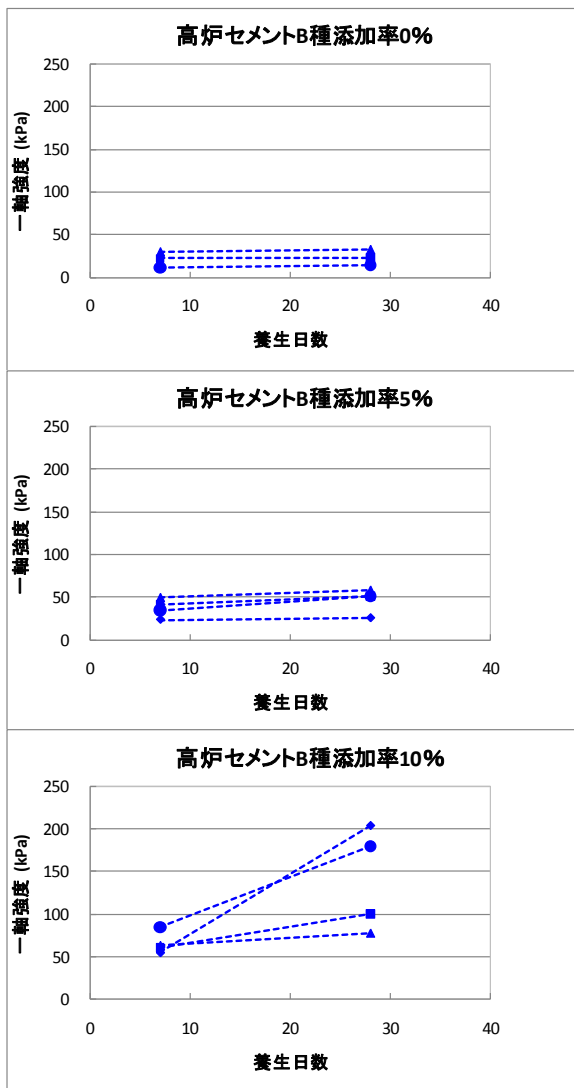


図 4.3-5 荒川浚渫土の一軸強度と養生日数の関係

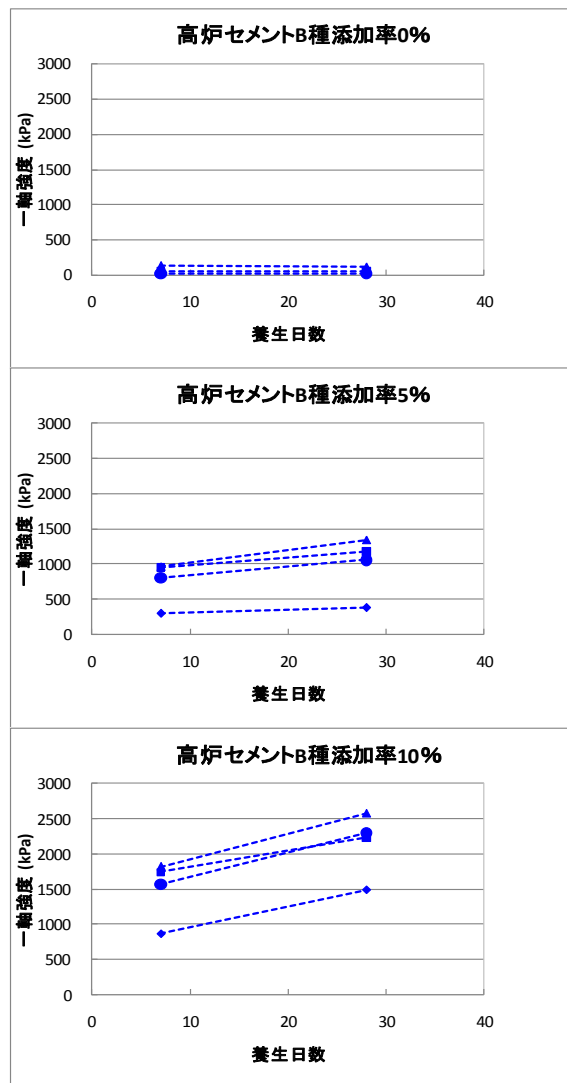


図 4.3-6 美浦砂の一軸強度と養生日数の関係

(2) 半水石膏添加率と一軸圧縮強度の関係

図 4.3-7 と図 4.3-8 は一軸圧縮強度と半水石膏の添加率の関係を高炉セメント B 種ごとに整理したものである。紙面の都合上、荒川浚渫土と美浦砂のケースのみを示す。各試料土の半水石膏のみを添加したケースについてみると、半水石膏添加率の増加に応じて強度が若干増加傾向を示している。これは表 4.3-4 で示したとおり、同一試料土の乾燥密度は同程度であるため、この強度変化は半水石膏の添加率によるものと考えられ、先に示したように養生期間によって一軸圧縮強度に変化はほとんどないことから、半水石膏の強度発現効果が主に脱水によって生じていることが推察される。ただし、その強度発現効果は一般に地盤改良で使用されるセメント系固化材と比べるとかなり低く、単体で建設発生土等の改良材としての適用が可能であるケースは限定されることが示唆される。

高炉セメント B 種を添加したケースを見ると、美浦砂では全てのケースで、半水石膏添加率の増加に応じて強度が増加する傾向があるものの、荒川浚渫土では、半水石膏添加率により、強度が増加する場合や低下する場合など、傾向はさまざまである。

一軸強度	
●	7日養生
▲	28日養生

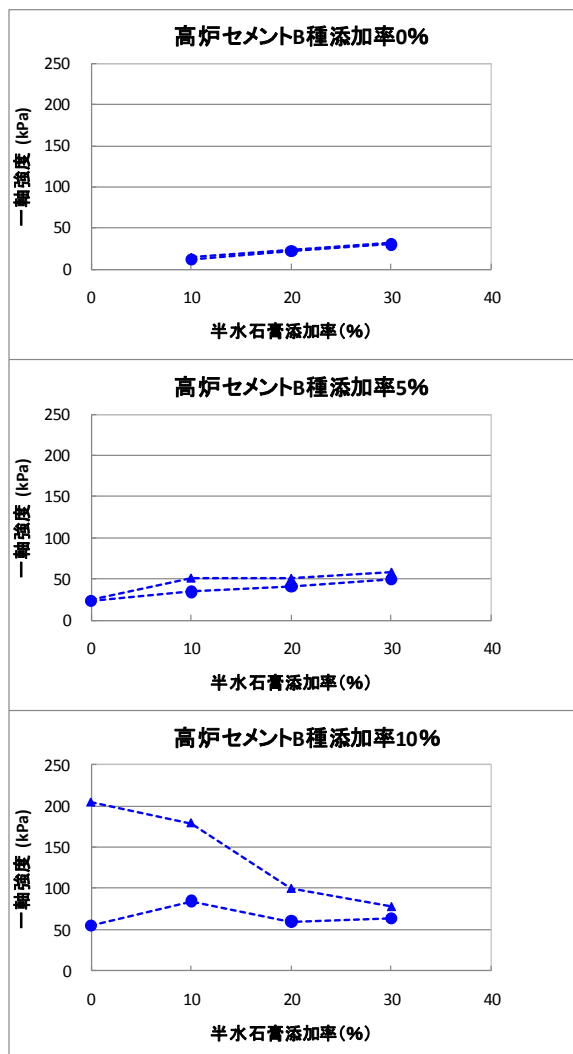


図 4.3-7 荒川浚渫土の一軸強度と半水石膏添加率の関係

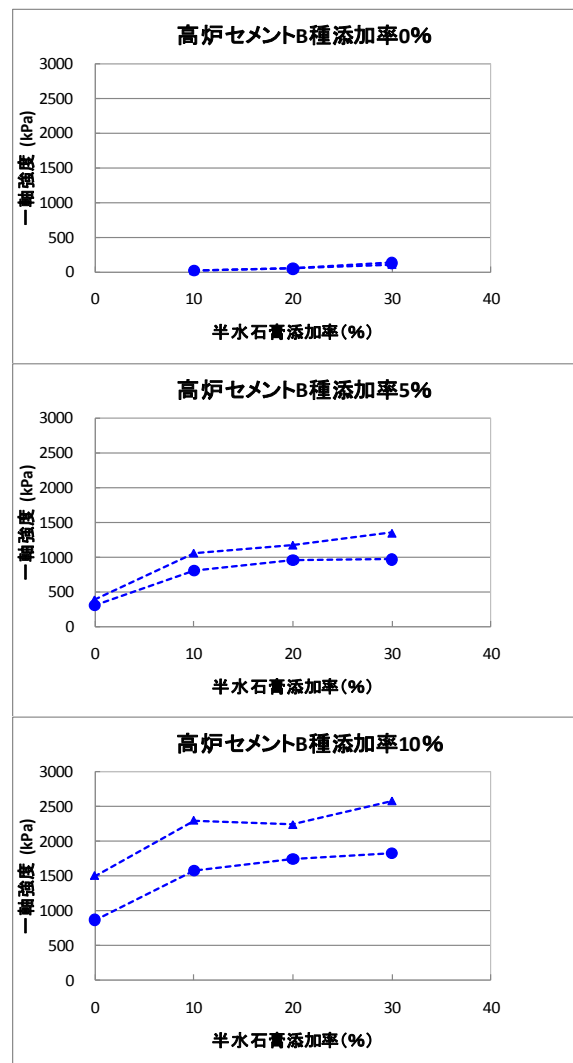


図 4.3-8 美浦砂の一軸強度と半水石膏添加率の関係

4.3.3.2 半水石膏、高炉セメント B 種を添加した土試料の環境安全性の評価

(1) 硫化水素検知試験

図 4.3-9 と図 4.3-10 には、硫化水素の検知濃度と半水石膏添加率の関係を高炉セメント B 種ごとに整理したものである。紙面の都合上、荒川浚渫土と美浦砂のケースのみを示す。荒川浚渫土、美浦砂ともに特に半水石膏のみを添加したケースにおいて半水石膏添加率の増加に伴い硫化水素の検知濃度が増加傾向にあるのが分かる。その検知量は、荒川浚渫土で最大 2.2ppm 程度検出され、美浦砂で最大 16ppm 程度検出されている。また、半水石膏のみを添加したケースに比べて高炉セメント B 種も添加したケースでは、どの試料土においても硫化水素の濃度が低く抑制されているのが確認できる。

以上の結果から、硫化水素についてはセメント系固化材（高炉 B 種）を添加することにより、硫酸還元菌の活動が阻害されるアルカリ性になることから、ある程度の抑制効果が期待されることが示唆された。

(2) ふっ素溶出試験

同じく図 4.3-9 と図 4.3-10 には、ふっ素溶出量と半水石膏添加率の関係を高炉セメント B 種添加率ごとに整理したものである。紙面の都合上、荒川浚渫土と美浦砂のケースのみを示す。一部傾向が不明確なものがあるものの、全体的に半水石膏添加率の増加に応じてふっ素溶出量が増加傾向を示し、高炉セメント B 種添加率によるふっ素溶出量の違いはほとんど見られない。また、その溶出量は、一部を除くほとんどのケースで環境基準（0.8mg/L）を超える値が測定されている。

以上のことから、セメント系固化材（高炉 B 種）を添加することによるふっ素の溶出量の抑制は難しいと考えられる。

硫化水素濃度		ふっ素溶出量	
○	7日養生	●	7日養生
□	14日養生	-	-
△	28日養生	▲	28日養生

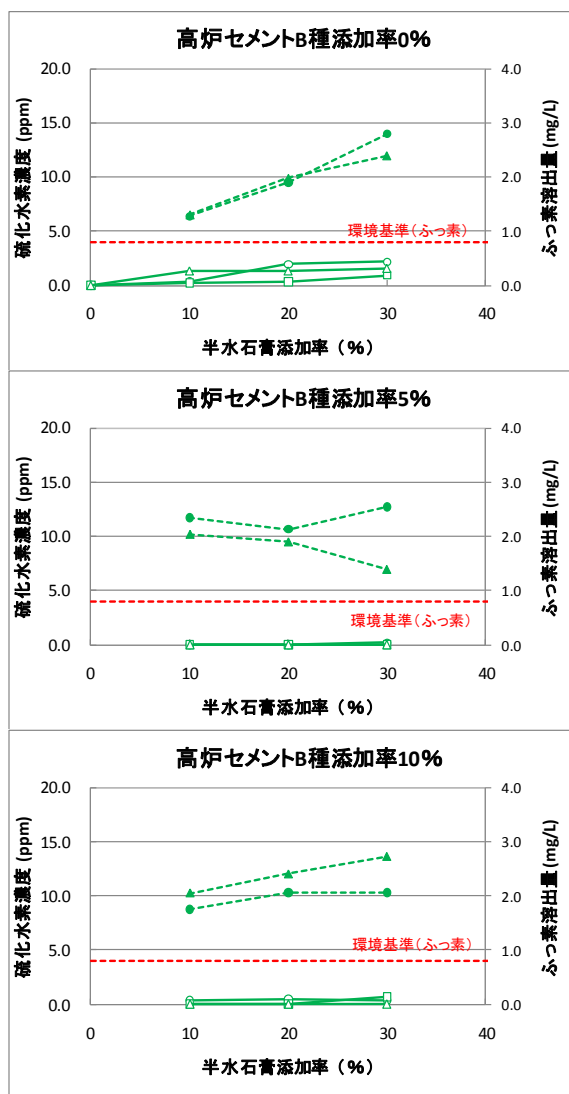


図 4.3-9 荒川浚渫土の硫化水素濃度、ふっ素溶出量と半水石膏添加率の関係

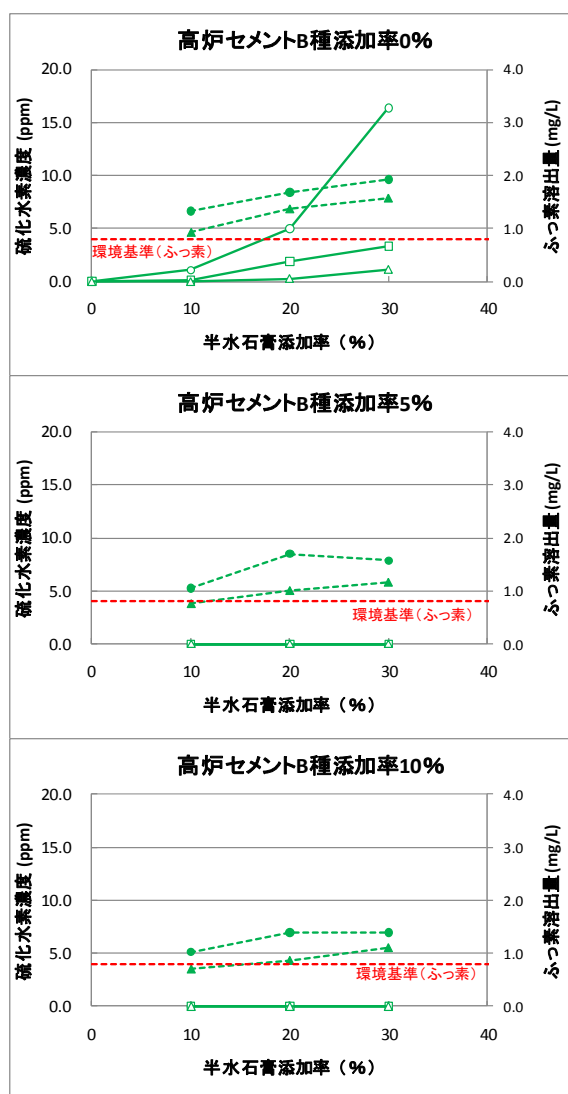


図 4.3-10 美浦砂の硫化水素濃度、ふっ素溶出量と半水石膏添加率の関係

(3) 六価クロム溶出試験

図 4.3-11 と図 4.3-12 には、六価クロム溶出量と高炉セメント B 種添加率の関係を半水石膏添加率ごとに示したものである。紙面の都合上、荒川浚渫土と美浦砂のケースのみを示す。全体的に、半水石膏添加率による六価クロムの溶出量に大きな変化は見られない。荒川浚渫土について見ると、半水石膏添加率 30% の高炉セメント B 種添加率 0% において一部、環境基準 (0.05mg/L) を上回る値が測定されているが、ほとんどのケースでは定量下限値以下となっている。美浦砂では、高炉セメント B 種の添加率に応じて、六価クロム溶出量が増加傾向を示したが、本実験条件では環境基準を上回る値は測定されていない。

以上のことから、六価クロムの溶出量は、主に高炉セメント B 種添加量に応じて増加する傾向があることがわかる。

六価クロム溶出量	
○	7日養生
△	28日養生

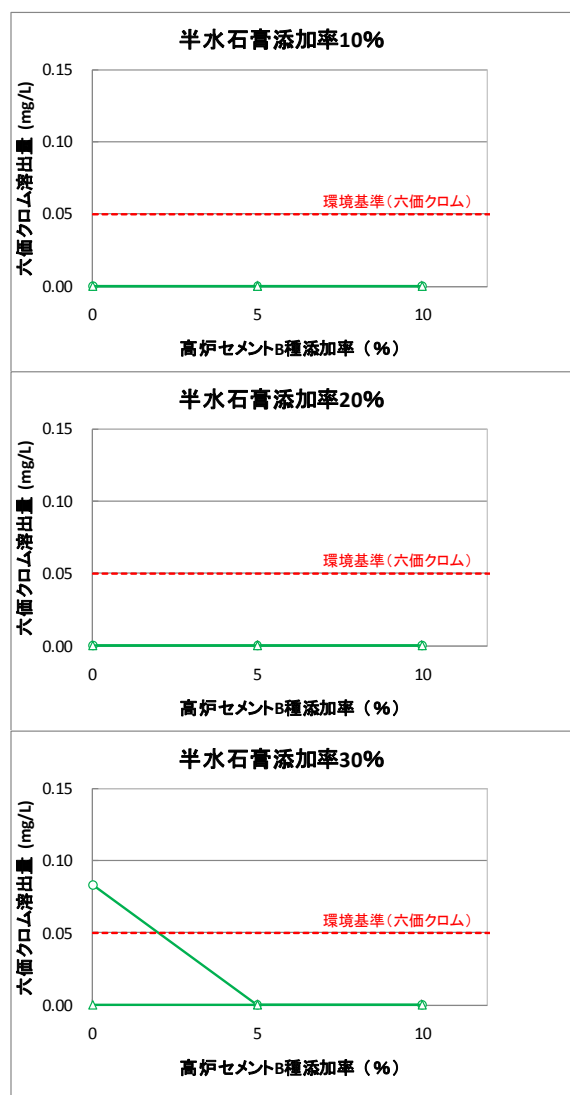


図 4.3-11 荒川浚渫土の六価クロムと高炉セメント B 種添加率の関係

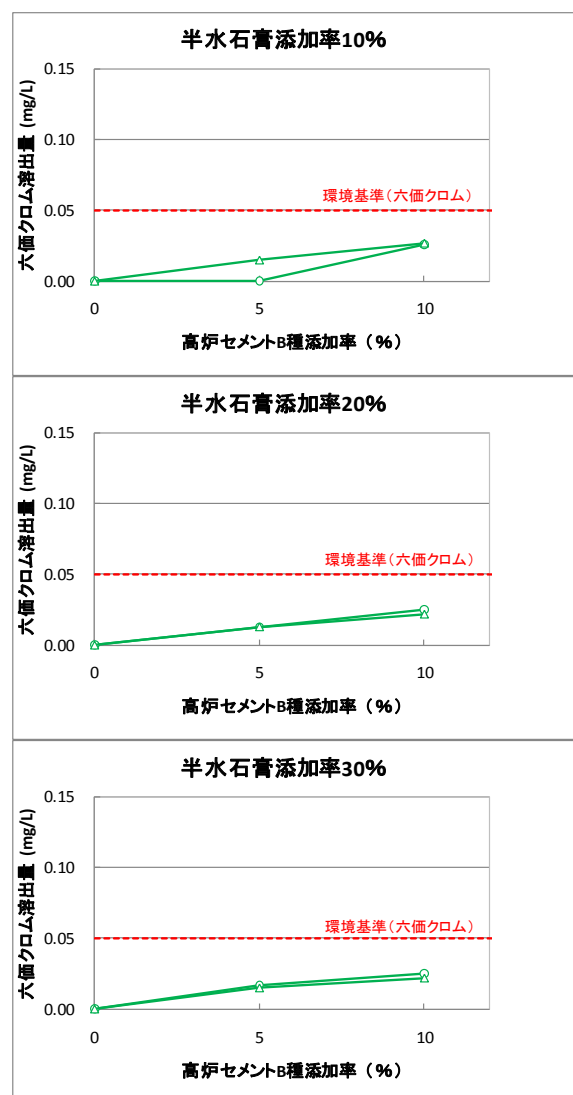


図 4.3-12 美浦砂の六価クロムと高炉セメント B 種添加率の関係

4.3.3.3 半水石膏、高炉セメント B 種を添加した土試料の中性化による環境安全性の評価

(1) 硫化水素検知試験

図 4.3-13 と図 4.3-14 には、硫化水素濃度と暴露（養生）日数の関係を高炉セメント B 種添加率ごとに示したものである。紙面の都合上、荒川浚渫土と美浦砂のケースのみを示す。図中には比較のために、先に示した屋外に暴露させていない（中性化させていない）土試料の結果も示している。130 日間屋外に暴露したことによって中性化が進行し、特に高炉セメント B 種を添加したものについてはその固化作用はほとんど失われている状態である。また、中性化により硫化水素の発生原因でもある硫酸還元菌の活動が比較的活発になり易い状態でもある。しかし結果は、荒川浚渫土、美浦砂ともにほとんどのケースで定量下限値未満であった。今後さらなる検討が必要である。

(2) ふっ素溶出試験

同じく図 4.3-13 と図 4.3-14 には、ふっ素溶出量と暴露（養生）日数の関係を高炉セメント B 種添加率ごとに示したものである。紙面の都合上、荒川浚渫土と美浦砂のケースのみを示す。図中には比較のために、先に示した屋外に暴露させていない（中性化させていない）土試料の結果も示している。荒川浚渫土、美浦砂ともに、ふっ素溶出量はいずれも環境基準を超える値が測定され、暴露していない試料と比較して溶出量が増加傾向を示すものや低下傾向を示すものがあり、傾向はバラバラとなっている。

以上のことからふっ素溶出量については、本実験条件における暴露期間ではその溶出量の大幅な変化はほとんどないことが推察される。

硫化水素濃度		ふっ素溶出量	
◇	石膏0%	●	石膏10%
○	石膏10%	●	石膏20%
□	石膏20%	■	石膏20%
△	石膏30%	▲	石膏30%

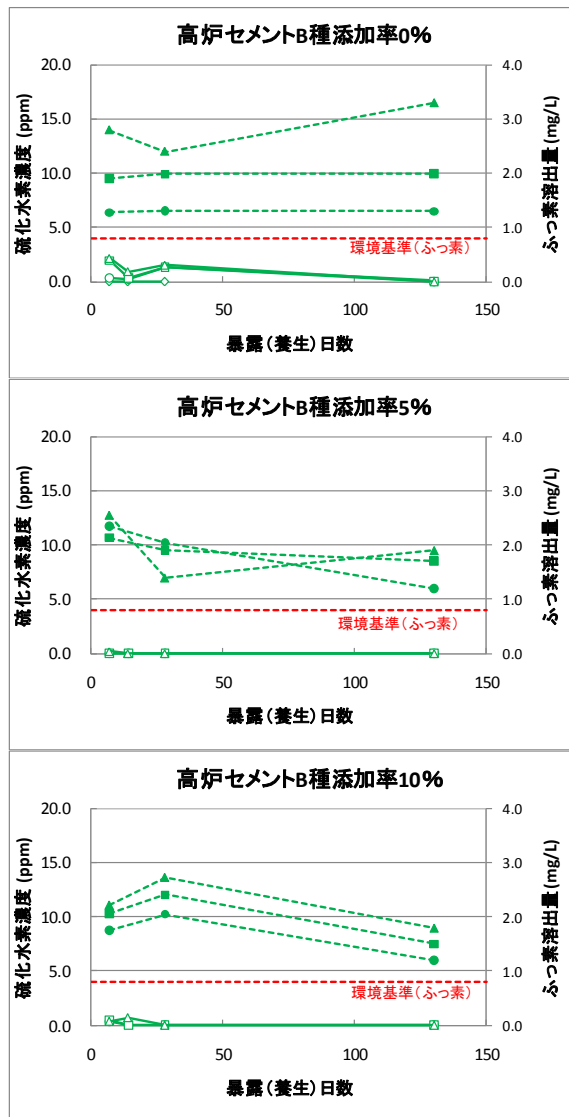


図 4.3-13 荒川浚渫土の硫化水素濃度、ふっ素溶出量と半水石膏添加率の関係

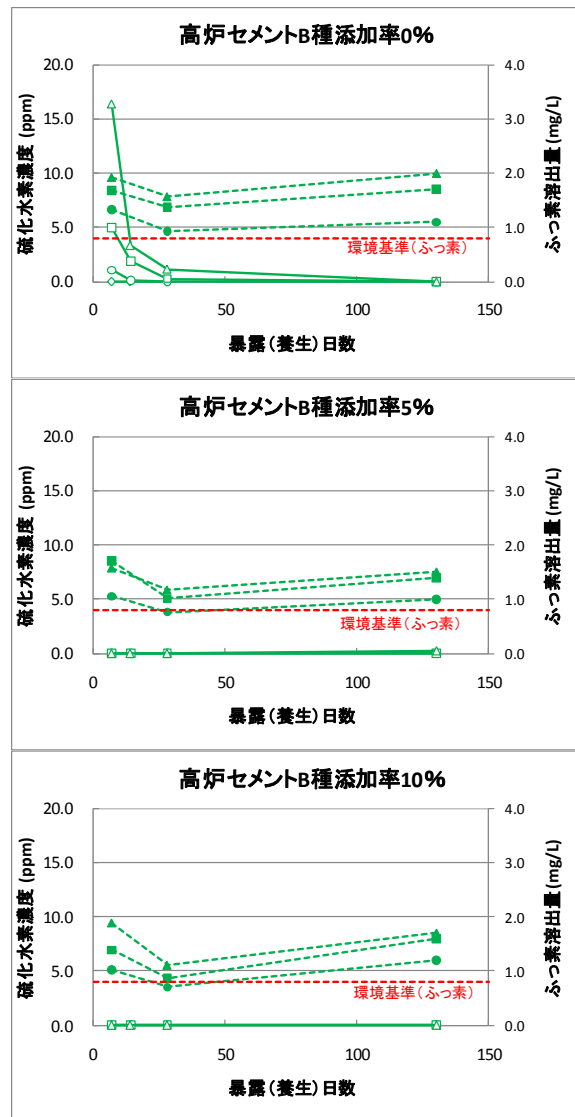


図 4.3-14 美浦砂の硫化水素濃度、ふっ素溶出量と半水石膏添加率の関係

(3) 六価クロム溶出試験

図 4.3-15 から図 4.3-16 には、六価クロム溶出量と暴露（養生）日数の関係を高炉セメント B 種添加率ごとに示したものである。紙面の都合上、荒川浚渫土と美浦砂のケースのみを示す。図中には比較のために、先に示した屋外に暴露させていない（中性化させていない）土試料の結果も示している。荒川浚渫土、美浦砂ともにいずれのケースにおいても定量下限値以下であった。

六価クロム溶出量	
○	石膏10%
□	石膏20%
△	石膏30%

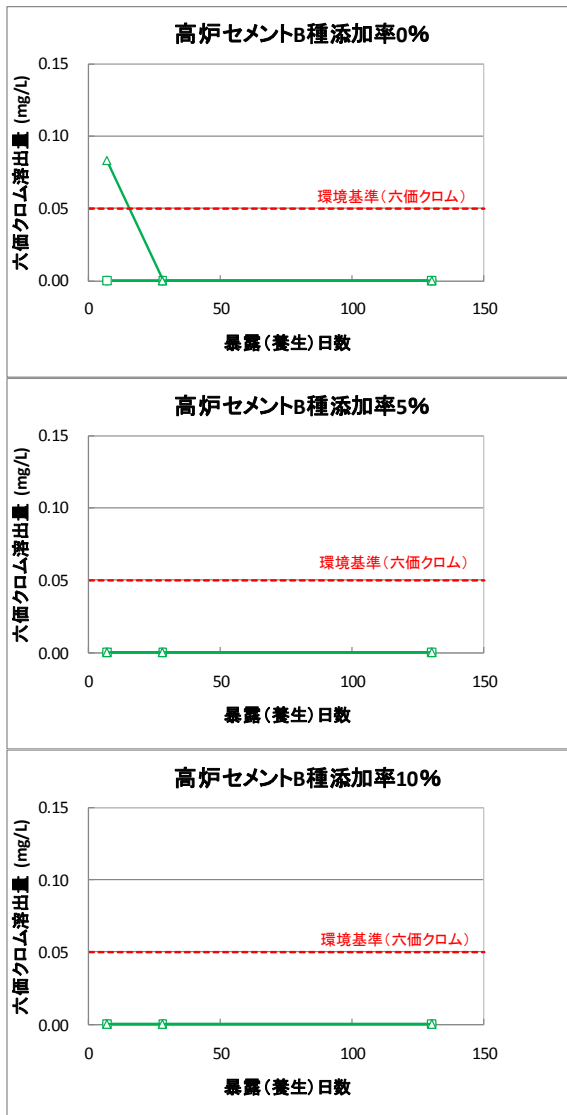


図 4.3-15 荒川浚渫土の六価クロム溶出量と暴露（養生）日数の関係

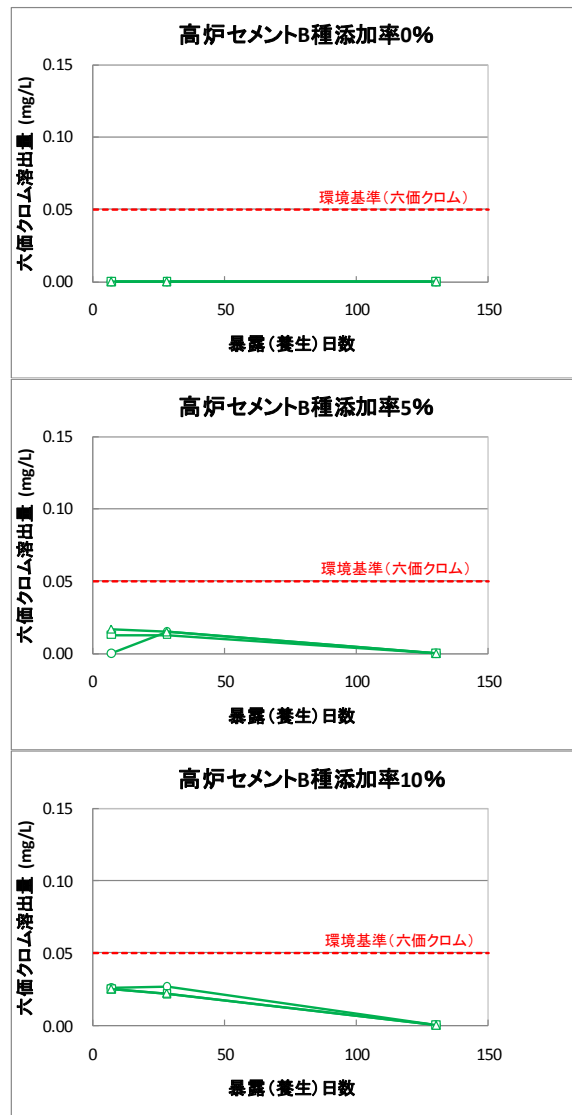


図 4.3-16 美浦砂の六価クロム溶出量と暴露（養生）日数の関係

4.3.4 まとめと課題

本研究では廃石膏ボードの建設発生土等の改良材としての適用性を実験により検討した。その結果、以下のような知見を得た。なお、廃石膏ボードの建設発生土等の改良材としての適用にあたっては、特に環境影響について不明な点が多く、引き続き研究を進め知見を蓄積する必要がある。

(1) 強度

土の一軸圧縮試験を、5種類の土試料に廃石膏ボード（半水石膏）の添加率と養生期間を変化させ作製した試料について実施した。その結果、半水石膏のみを混合した土試料はその添加率に応じてその一軸圧縮強度は増加した。一方で、養生期間によって一軸圧縮強度に変化はほとんどなく、半水石膏の強度発現効果が主に短期間脱水によって生じていることが推察された。なお、半水石膏単体で用いた場合の強度発現効果は一般に地盤改良で使用されるセメント系固化材と比べるとかなり低く、単体で建設発生土等の改良材としての適用が可能であるケースは限定されることが示唆された。

セメント系固化材（高炉 B 種）を添加したケースでは、半水石膏添加率に応じて、各試料土によって傾向が異なり、強度が増加するものと低下するものがある。また、同一の半水石膏添加率においては、相模ロームを除いてセメント系固化材（高炉 B 種）添加率に応じて一軸強度が増加傾向にある。

(2) 環境影響

硫化水素検知試験、ふっ素溶出試験、六価クロム溶出試験を、5種類の試料土に廃石膏ボードの添加率とセメント系固化材（高炉 B 種）の添加率および養生期間を変化させ作製した試料について実施し、さらに屋外に暴露し、中性化させた試料に対して試験を実施した。その結果、ガス検知管による硫化水素濃度の測定結果については、セメント系固化材（高炉 B 種）を併用することにより、廃石膏ボード（半水石膏）に起因する硫化水素の発生は抑えられる可能性があることが示唆された。また、屋外に暴露したものについても、硫化水素の発生量が少なくなる傾向が示唆された。ふっ素の溶出量試験結果については、試料土により傾向が異なるものの、半水石膏添加率によりふっ素溶出量が増加傾向にあり、セメント系固化材（高炉 B 種）と併用しても、溶出を抑制する効果は期待できない結果となった。また、屋外に暴露したものについても、ふっ素の溶出量はほとんど変化しないことが示唆された。六価クロムの溶出試験結果については、主にセメント系固化材（高炉 B 種）添加率に応じて溶出量が増加する傾向があり、半水石膏添加率には依存しないことが示唆され、屋外に暴露したものについては六価クロムは定量下限値以下であった。

以上の結果から、廃石膏ボードを原料とする半水石膏を建設発生土の改良材として適用する場合、含水比の低下によるトラフィカビリティの改善は期待できるが、一方で環境安全性の担保、すなわち硫化水素の発生の抑制およびふっ素の溶出抑制が課題として挙げられる。

4.3.5 参考文献

1)地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、2009.

4.3.6 関連する発表論文

なし

4.3.7 知的所有権の取得状況

なし

4. 4 廃石膏を用いた Fe 石灰石膏ならびに Fe 石膏の 地盤工学的有効利用技術の開発

井真宏 (株)エフイ石灰技術研究所

4. 4. 1 研究目的

廃石膏ボードの処理処分としては、従来、安定型処分場での埋め立てられていたが、嫌気性条件下では硫化水素ガスが発生する恐れがあるため、平成 18 年の環境省通知¹⁾によって、石膏ボードが含まれる全ての材料は管理型処分場への埋め立てが義務づけられている。廃石膏ボードの排出量は、今後解体系を中心に数十年にわたって増加していくと予測されていることから、管理型処分場の残余容量の減少や廃棄処分費の高騰によって、適正な処理処分が困難となることで不法投棄の問題などが懸念される。そのため、廃石膏ボードのリサイクル率を向上させることが急務な課題であり、様々な分野において再資源化の検討が進められているが、硫化水素ガス発生などの問題によって、現状では排出予想の数%程度しかリサイクルが行われていないことから、何らかの廃石膏ボード有効利用技術の開発が求められている²⁾。硫化水素ガスの発生要因の一つである硫酸還元菌は、アルカリ条件下では活動が低下するとされ、また、酸化鉄についても硫化水素ガスの発生抑制効果が報告されている³⁾⁴⁾。そこで、本研究は、廃石膏ボードの再資源化の妨げとなっている硫化水素ガスの発生抑制を目的として、全国的にも唯一、酸化鉄を原材料の一部として使用している Fe 石灰系改良材（酸化鉄と石灰の混合物）に着目し、これと廃石膏を組み合わせた地盤改良材の「地盤工学的有効利用技術の開発」を行うものであり、様々な改良対象土に対する廃石膏混合改良材の配合試験を行い、環境条件によっては発生が懸念される硫化水素ガスの抑制効果についての確認や反応性や現場条件を考慮した強度損失などの力学的特性について評価するものである。

4. 4. 2 研究方法

本研究は、大別して 2 つの目的に応じて試験で構成される。1 つは廃石膏ボードを混合した地盤改良材の適用性をについて、改良土の力学特性を確認するための試験。2 つめは廃石膏ボードを混合することで懸念される硫化水素ガスの抑制効果を確認するための試験である。力学特性の確認試験は、一般的に改良土の評価に用いられている一軸圧縮試験とコーン指数試験について行う。硫化水素ガスの発生抑制効果の確認については、これら力学特性の確認試験で用いる供試体を用い併せて測定を行う。また、実際に改良工事で適用された場合を想定し、改良土が気象条件（降雨や日照）の影響を受けた条件下における、改良土の強度損失特性を把握するために乾湿繰返し試験を行った。研究フローを図 4.4-1 に示す。

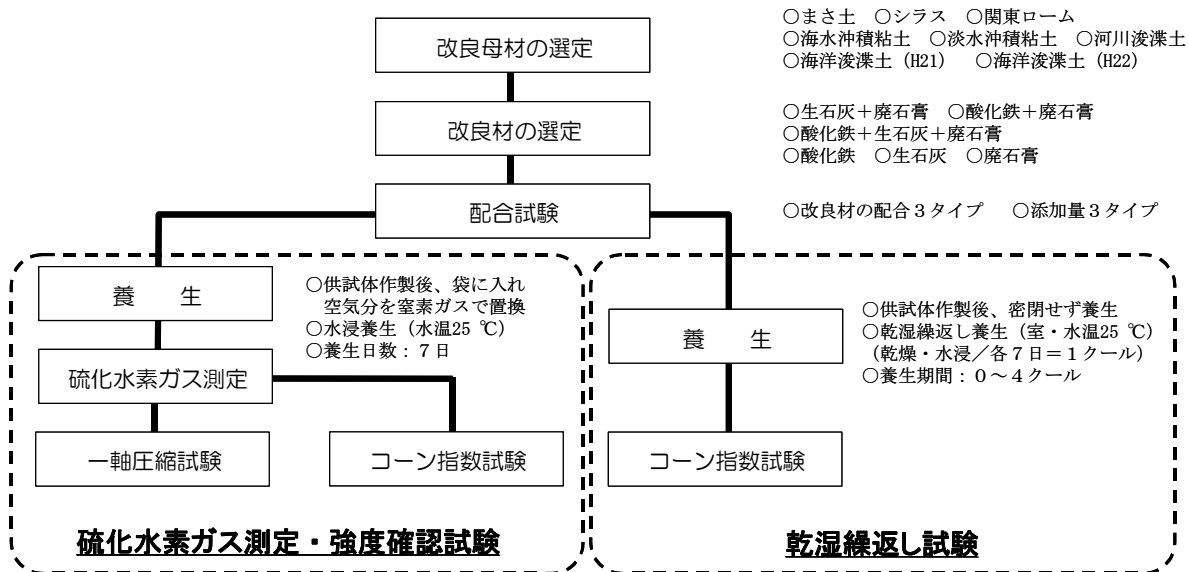


図 4.4-1 研究フロー

1) 改良材の選定

研究に用いる改良材は廃石膏ボードを配合した改良材を基本とし、地盤改良材として適用実績のある Fe 石灰（酸化鉄＋生石灰）に廃石膏ボードを混合した「Fe 石灰石膏」を用い、混合比や添加量を変化させて試験を行う。また、酸化鉄単体での硫化水素ガスの抑制効果を検証するために、酸化鉄と廃石膏ボードを混合した「Fe 石膏」を用いる。その他に、これらの改良材の反応性を比較・確認するため、酸化鉄、生石灰、廃石膏ボード単体等をそのまま配合した場合の試験も行う。ただし、平成 21 年度の研究結果から、明らかに強度特性の改善が見られないもの、硫化水素ガスの抑制効果を期待できないもの、また実用化にあたって不必要なものについては、平成 22 年度では除外して試験を行った。使用した改良材の一覧を表 4.4-1 に示す。

表 4.4-1 使用した改良材

名称	改良材の種類
タイプ 1 (H21)	酸化鉄＋廃石膏ボード
タイプ 2 (H21,H22)	生石灰＋廃石膏ボード
タイプ 3 (H21,H22)	酸化鉄＋生石灰＋廃石膏ボード
タイプ 4 (H21)	〃
タイプ 5 (H21,H22)	〃
タイプ 6 (H21)	酸化鉄
タイプ 7 (H21)	生石灰
タイプ 8 (H21,H22)	廃石膏ボード



写真 4.4-1 使用した改良材

2) 改良対象土の選定

実際に地盤改良を行う場合、対象となる土は一般的には高含水比の軟弱なものが主であるが、混合する対象土の土質性状は地域によって様々であり、求められる目標強度も使用用途によって大きく異なる。本研究に用いた改良対象土は、砂質土から粘性土まで様々な性状を示す土質を計 8 種類用い、広範囲の目的に対応した適用性を確認する。改良対象土の状態は自然含水状態とし、試験に用いる供試体作製の制約上、最大粒径を 9.5mm 以下に調整して使用した。改良対象土の種類と物理特性を表 4.4-2 に示す。

表-4.4.2 改良対象土の種類

試料名	採取地
まさ土 (H21)	花崗岩が風化し土砂状を呈する土。 採取地：佐賀県佐賀市
シラス (H21)	鹿児島県本土と宮崎県南半部において、それぞれ約 50%, および 16% の総面積に渡って分布する火砕流(非溶結部)、降下軽石およびこれらの二次堆積物。 採取地：熊本県水俣市
関東ローム (H22)	関東地方の丘陵や台地上に広く分布している、火山噴出物が堆積風化した赤褐色の粘性土。 採取地：神奈川県相模原市
海水沖積粘土 (H21)	有明海沿岸の沖積平野に広く分布する高含水の軟弱土。 採取地：佐賀県佐賀市
淡水沖積粘土 (H22)	有明海沿岸の沖積平野に広く分布する高含水の軟弱土。 採取地：福岡県三潴郡大木町
河川浚渫土 (H22)	荒川の浚渫工事により発生した土砂。 採取地：東京都江東区
海洋浚渫土 (H21)	博多湾中央航路の浚渫工事により発生した土砂。 採取地：福岡県福岡市
海洋浚渫土 (H22)	



写真 4.4-2 使用した改良対象土

3) 供試体の作製

力学特性の確認は一軸圧縮試験とコーン指数試験で評価する。一般的に、安定処理土の一軸圧縮試験およびコーン指数試験を行う場合、供試体の作製は 10cm モールドを用いる方法（表 4.4-3）が適用されるが、今回の試験では作製した供試体をそのまま硫化水素ガス測定試験に供するため、試験可能個数が制限される恐れがある。そこで、今回の試験では一軸圧縮試験については 5cm モールドを用いて試験を行うものとした。ただし、一軸圧縮試験とコーン指数試験から得られる試験値の誤差を最小とするため、あらかじめ改良対象土（未改良）について 10cm モールドを用いる方法で供試体を作製・湿潤密度を測定し、その湿潤密度に合致するように締固めエネルギーを調整して 5cm モールドで供試体を作製した。改良材は生石灰を基本としているため、混合後は生石灰分の消化吸水反応がある程度完了するように 3 時間放置した後締固め試験を行い、モールド内に投入し締固めを行う。

表 4.4-3 10cm モールドを用いる場合の供試体作製方法

モールド内径 (cm)	ランマー 質量 (kg)	突固め 層数	1層当たりの 突固め回数	許容最大 粒径 (mm)
10	2.5	3	25	9.5

4) 改良材の配合量

本研究は、廃石膏ボードを混合した改良材の適用性について検討するものである。現場適用では、改良対象土の土性によって改良材の単位配合量や廃石膏ボードの混合量など異なることが想定されるため、養生条件や目標強度等の設定値に合わせて、改良対象土毎に改良材の最適配合量を求める試験を行うが、本研究では硫化水素ガスの発生抑制効果についての検討も併せて行うため、廃石膏ボードを含む各改良材がいずれの改良対象土に対しても一定配合量となるように設定し試験を行うこととする。乾湿繰返し試験については、改良対象土と改良材を合わせた全体量に対する割合で配合量を決定する。改良材の組み合わせは廃石膏を

基本として、生石灰および生石灰と酸化鉄を配合した場合の強度損失特性を確認する。組み合わせ種類と添加量の配合試験一覧を表 4.4-4 および表 4.4-5 に示す。

表 4.4-4 配合試験一覧【一軸圧縮試験・コーン指数試験】

改良材の種類	改良材の配合率(%)			添加量	実施試験項目	
	酸化鉄	生石灰	廃石膏		一軸	コーン
無添加	—	—	—	無添加	○	○※2
タイプ 1	25	—	75	10%,20%,40%	○※1	—
	50	—	50	10%,20%,40%		
	75	—	25	10%,20%,40%		
タイプ 2	—	25	75	10%,20%,40%	○	○※2
	—	50	50	10%,20%,40%		
	—	75	25	10%,20%,40%		
タイプ 3 (石膏 75%)	5	20	75	10%,20%,40%	○	○※2
	12.5	12.5	75	10%,20%,40%		
	20	5	75	10%,20%,40%		
タイプ 4 (石膏 50%)	10	40	50	10%,20%,40%	○※1	—
	25	25	50	10%,20%,40%		
	40	10	50	10%,20%,40%		
タイプ 5 (石膏 25%)	15	60	25	10%,20%,40%	○	○※2
	37.5	37.5	25	10%,20%,40%		
	60	15	25	10%,20%,40%		
タイプ 6	100	—	—	10%,20%,40%	○※1	—
タイプ 7	—	100	—	10%,20%,40%	○※1	—
タイプ 8	—	—	100	10%,20%,40%	○	○※2

※1 まさ土、シラス、海水沖積粘土、海洋浚渫土（H21）のみ実施

※2 関東ローム、河川浚渫土、淡水沖積粘土、海洋浚渫土（H22）のみ実施

表 4.4-5 配合試験一覧【乾湿繰返し試験】

改良対象土	改良材の種類	改良材の配合率(%)				繰返し回数
		酸化鉄	生石灰	廃石膏	用土	
関東ローム ・ 河川浚渫土 ・ 淡水沖積粘土 ・ 海洋浚渫土(H22)	無添加	—	—	—	100	1,2,3,4 クール
	タイプ A	—	10	10	80	1,2,3,4 クール
	タイプ B	5	10	10	75	1,2,3,4 クール
	タイプ C	10	10	10	70	1,2,3,4 クール
	タイプ D	—	—	20	80	1,2,3,4 クール

5) 養生方法

①力学特性の確認試験および硫化水素ガス抑制効果確認試験における養生方法

・窒素ガスによる強制置換

硫化水素ガスの発生する要因は、①硫酸塩還元菌の存在、②硫酸塩源の存在、③硫酸塩還元菌が増殖するに足る有機物源の存在、④硫酸塩還元菌が増殖するのに適当な温度・水分・嫌気性状態が保持されている、⑤発生した硫化水素と化合する物質が少ない、の5条件であり、これら全てを満足したときに硫化水素が発生するものと考えられている⁵⁾。本研究では、

廃石膏ボードを用いた改良材の力学特性を確認するものであるが、同時に改良材に含有する酸化鉄等の硫化水素抑制効果の評価も目的とするため、養生に際しては硫化水素が発生しやすい条件を人為的に与える。条件の①～③までは改良対象土の性状および改良材の成分の影響が多いが、④・⑤の嫌気性環境の存在は養生方法に関係していると考えられる。そこで試験では、作製した供試体を個別に養生袋に投入し袋内の空気分を窒素ガスで強制置換させた嫌気性の状態で養生を行う。窒素ガスによる強制置換方法を図 4.4-2 に示す。

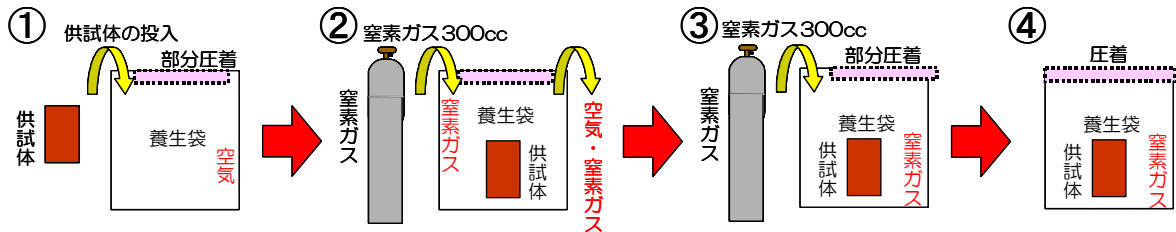


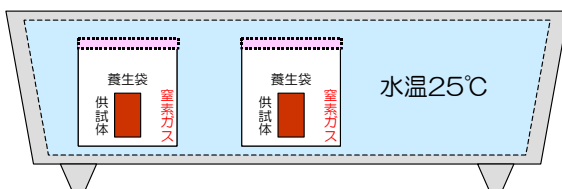
図 4.4-2 窒素ガスによる強制置換方法

窒素ガスで置き換える方法としては、①作製した供試体を養生袋に投入し開口部を部分圧着する②窒素ガスを養生袋に流入させると同時に排出口から窒素ガスおよび空気分の排出させる③窒素ガスと空気分の置換を確認後、更に窒素ガスを流入させて養生袋内に充填する④窒素ガスの充填が終わったら養生袋の残りの開口部を圧着し完全密封する、以上の手順で窒素ガス置換を行う。

・水浸養生

硫化水素の発生は、前項で示した条件④の適当な温度が影響すると考えられており、硫化水素が発生する最適な温度範囲 としては 30℃～38℃と言われている。硫化水素発生の可能性を高めるためには、養生温度を 30℃～38℃の範囲内に設定することが望ましいが、改良土の発現強度の傾向は養生温度の影響が非常に高く、一般的な安定処理土の養生温度は 20℃～25℃と設定されているため、養生温度を 30℃～38℃とすると力学特性の評価を適正に行えない等の問題が生じる。よって本研究での養生温度は、力学特性を適正に評価するために 25℃と設定するものとし、水温を 25℃に設定した恒温水槽内に供試体を封入した養生袋を水浸させて養生を行う (図 4.4-3)。なお、養生期間は 7 日間とする。

○養生方法



○養生状況



図 4.4-3 水浸養生方法

②乾湿繰返し試験における養生方法

改良した土は、改良材を混合してから施工するまでの期間が長くなるほど強度損失が大き

いと考えられている。特に気象条件（降雨や日照）の影響を大きく受けた場合には、極端に強度が損失することが懸念される。よって、ここでは任意に最悪な現場条件に晒された状況を与えることで、改良土の性状・強度特性が日数経過にともなってどのように変化していくのかを把握するために乾湿繰返し試験（気中養生 7 日，水浸養生 7 日を 1 クールとし 1～4 クールまで）を行った（図 4.4-4 参照）。

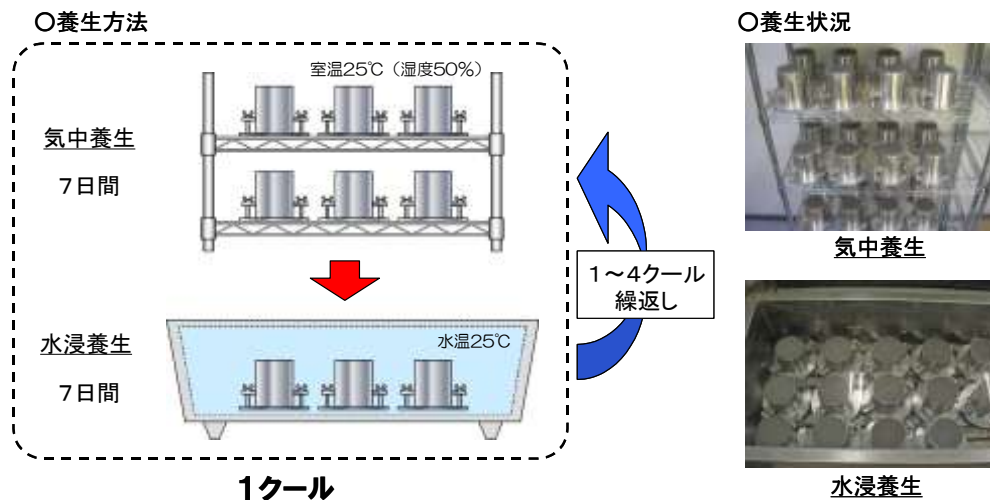


図 4.4-4 乾湿繰返し試験における養生方法

水浸養生は、他の力学特性確認試験との整合性を考慮し、一般的な安定処理土の養生温度である水温 25℃に設定した恒温水槽内で行う。ただし、ここでの養生は、施工現場を想定した改良土の養生であるため、一般的に安定処理材の養生で行われているように、供試体には封や蓋をせずに水浸して養生を行う。気中養生においても、水浸養生と同様に供試体には封や蓋をしない状態で養生するが、気温や湿度の影響を受けて養生条件が変わらないように、室温および湿度を JIS Z 8703 に規定される常温 25℃、常湿 50%と設定した恒温室において養生する。所定の養生期間が終了した供試体は、養生環境による供試体の変化を確認するため、養生前と水浸・気中養生後に供試体高さの差異を測定し、膨張収縮量を確認する。

7) 硫化水素ガス発生量確認試験

硫化水素ガスの測定は、養生期間を終了した強度確認試験の供試体を恒温水槽から取り上げ、養生袋内の気相を「JIS K0804 検知管式ガス測定器」を使用して行う。

表 4.4-6 検知式ガス採取器と検知管の種類

ガス採取器	検知管の種類	測定範囲
AP-20 (光明理化学)	120U	0.2~6.0ppm
	120SE	0.5~40ppm
	120SF	25~2,000ppm



写真 4.4-3 検知式ガス測定器

測定は表 4.4-6 および写真 4.4-3 に示す器具を用い、以下の手順で行う。

- ①検知管の両端をガス検知器のチップカッターで折り取る
- ②検知管をガス検知器の取付口に差し込みハンドルの押し込み確認をする
- ③ガス採取器ハンドル部の赤線合わせを確認し、検知管先端部を養生袋に差し込む
- ④ガス採取器のハンドルを引いて2分（検知管によって異なる）放置する
- ⑤ガス採取器フローインジケータが出きったら測定終了
- ⑥検知管をガス採取器から取り外し、着色境界を読み取る

以上の手順で硫化水素濃度の測定を行うが、検知管は測定する硫化水素濃度によって異なるため、測定は濃度が測定範囲の低い方の検知管から順に行い、最高目盛を超える場合には検知管を高濃度用と交換する。最低目盛に達しない場合は、変色層が最低目盛に達するまで数回操作を繰り返して硫化水素が発生しているか確認する。それでも反応がなければ測定は終了となる。

8) 一軸圧縮試験・コーン指数試験

一軸圧縮試験およびコーン指数試験はそれぞれ、日本工業規格「土の一軸圧縮試験方法 (JIS A 1216)」、「締固めた土のコーン指数試験 (JIS A 1288)」に準じて、硫化水素ガスの測定または乾湿繰り返し期間が終了した供試体を、重量・形状の測定後に各試験に供した。

・一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は、硫化水素濃度測定が終了した供試体を養生袋から取り出し、重量・形状を測定後サミットモールドから試料を脱型し、「土の一軸圧縮試験方法 (JIS A 1216)」に準じて行う。一軸圧縮試験機 (図 4.4-5) は、ひずみ制御式圧縮装置、ロードセルおよび変位計から構成され、供試体の高さの 15% までの圧縮ひずみを連続的に与え得るように毎分 1% の圧縮ひずみが生じる割合で供試体を圧縮し、圧縮中の圧縮量と圧縮力を測定する。なお、固化材を用いた改良土の場合、圧縮強さが大きい値を示すことも考えられ、ロードセルの容量、試験機の剛性、端面の成形精度が問題になる。特に端面の成形精度は圧縮強さと変形係数に影響するため、供試体は端面をキャッピングし一軸圧縮試験に供する。

・コーン指数試験

コーン指数試験は、強度確認試験においては硫化水素濃度測定が終了した供試体を養生袋から取り出し、重量を測定後「締固めた土のコーン指数試験 (JIS A 1288)」に基づき行う。乾湿繰り返し試験においては所定の繰り返し養生期間を終了した供試体の重量を測定し、膨張収縮量の測定後、同様に行う。コーン指数試験方法は供試体の上面より先端角 30° 、底面積 3.24cm^2 の先端コーンを 1cm/s の貫入速度で 5cm 、 7.5cm 、 10cm 連続的に押し込んだときの貫

入抵抗力を測定するものである。コーン貫入試験機は一般的に手押しハンドル式のコーンペネトロメーターを用いるが、人為的な誤差が測定値に大きく影響することから、本研究では測定に自動コーン貫入試験機（図 4.4-6）を用いた。自動コーン貫入試験機は载荷速度制御式载荷装置、ロードセルおよび変位計から構成され、载荷荷重や貫入抵抗に影響されることなく規定された速度にて貫入を行い、貫入抵抗力を測定する装置である。

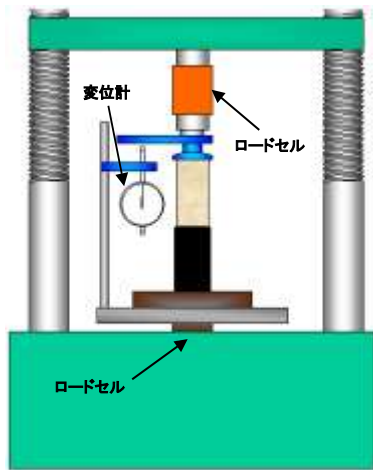


図 4.4-5 ひずみ制御式一軸圧縮試験機

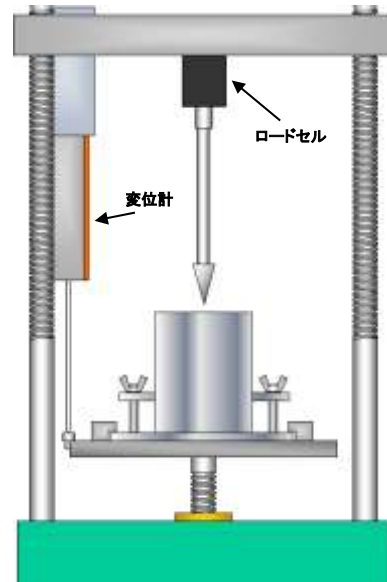


図 4.4-6 载荷速度制御式コーン貫入試験機

4.4.3 研究結果

1) 改良対象土の物理特性

今回、実験対象とした改良対象土の物理特性を表 4.4-7 に示す。

表 4.4-7 改良対象土の物理特性

試験年度	平成 21 年度				平成 22 年度				
試験項目	まさ土	シラス	沖積粘土	海洋浚渫土 (H21)	関東ローム	河川浚渫土	淡水沖積粘土	海洋浚渫土 (H22)	
土粒子の密度(g/cm ³)	2.706	2.421	2.667	2.699	2.792	2.692	2.524	2.788	
自然含水比(%)	14.3	20.7	135.2	65.1	138.0	60.9	106.6	76.2	
粒度	礫分(%)	7.7	1.3	0.0	1.1	0.0	0.4	0.4	
	砂分(%)	70.0	57.1	0.9	32.7	13.2	31.8	31.8	
	シルト分(%)	15.8	32.1	25.5	29.2	36.8	58.3	19.3	
	粘土分(%)	6.5	9.5	73.6	37.0	50.0	40.0	48.5	
	最大粒径 mm	9.5	9.5	4.75	9.5	2	2	9.5	
特性	液性限界 w _L (%)	NP	NP	124.8	64.6	69.2	110.9	72.3	
	塑性限界 w _P (%)	NP	NP	44.6	25.1	35.3	46.1	30.7	
	塑性指数 I _p	NP	NP	79.8	39.5	33.9	64.8	41.6	
分類	分類名	礫まじり粘性土質砂	火山燻質砂	粘土 (高液性限界)	砂質粘土 (高液性限界)	砂まじりシルト (高液性限界)	シルト (高液性限界)	砂質粘土 (高液性限界)	砂質粘土 (高液性限界)
	分類記号	(SCs-G)	(SV)	(CH)	(CHS)	(MH-S)	(MH)	(CHS)	(CHS)

2) 硫化水素濃ガスの測定結果

養生期間を経過した供試体の硫化水素ガス測定結果を表 4.4-8 に示す。

表 4.4-8 硫化水素測定結果

改良母材	改良材の種類	添加量(%)	硫化水素濃度(ppm)
まさ土	タイプ 1~8	10,20,40	いずれも検知せず
シラス	タイプ 1~8	10,20,40	いずれも検知せず
沖積粘土	タイプ 1~8	10,20,40	いずれも検知せず
浚渫土砂	タイプ 1~8	10,20,40	いずれも検知せず
関東ローム	タイプ 2,3,5,8	10,20,40	いずれも検知せず
河川浚渫土	タイプ 2,3,5,8	10,20,40	いずれも検知せず
沖積粘土(淡水)	タイプ 2,3,5,8	10,20,40	いずれも検知せず
海洋浚渫土	タイプ 2,3,5,8	10,20,40	いずれも検知せず

以上のように、試験を行った供試体からは全ての改良材および配合条件において硫化水素ガスは検知されなかった。これは、硫化水素発生要因である 5 条件の中の何れかが欠如していたためであると推察される。硫化水素が発生しなかった原因としては、

①養生期間

養生は養生袋内の気相を窒素ガスで置換し嫌気性の状態で行ったが、養生日数 7 日では硫酸塩還元菌の増殖に至らない。

②温度の設定

硫化水素が発生する最適な温度範囲としては 30℃~38℃とされているが、今回の養生温度は一軸圧縮試験およびコーン指数試験も考慮して 25℃と設定しているため硫酸塩還元菌が増殖できなかった。

などの理由が考えられる。そのため、一般的な強度確認試験における養生条件下では硫化水素ガスが発生する可能性は少ないと考えられる。

3) 強度確認試験の結果

表 4.4-5、表 4.4-6 に示す配合条件にしたがい、各改良対象土と改良材を配合したタイプ別の強度確認試験結果を図 4.4-7~図 4.4-11 に示す。

①まさ土 (H21)

各改良材のタイプとも配合したことによる改良効果が確認できたが、生石灰を配合した改良材の中でも生石灰単体より生石灰と廃石膏を組み合わせたタイプの方が強度のピークが高いことから、生石灰の反応性とは別に生石灰と廃石膏の何らかの化学反応が発生していると推察される。強度発現のピークは添加率 10%で、添加率 20%以上では供試体密度の低下にともない強度が低下する。これは、改良材の単位配合量が過剰となると最適な含水比が変動し、その結果密度が低下し強度も低下したものと思われる。生石灰と廃石膏ボードの混合比〔生石灰/(生石灰+廃石膏ボード)〕と一軸圧縮強さの関係を見ると、混合比が 0~0.45 付近までは混合率が大きくなるほど強度は増加し、混合比が 0.45~0.50 付近以上になると混合比の増加に対して強度は減少する。よって、まさ土を改良対象土とする

場合の改良材中の生石灰と廃石膏ボードの混合比は 1:1 (生石灰 50% + 廃石膏ボード 50%) 程度が最適混合比と考えられる。

②シラス (H21)

強度の発現特性はまさ土の場合と同様の傾向を示し、反応性を高めるためには生石灰の存在が不可欠である。強度発現のピークも添加量 10% が上限となっていて、添加率 20% 以上は過剰な配合量であると推察される。また、生石灰と廃石膏の混合比と一軸圧縮強さの関係もまさ土と同程度であり、強度のピークとなる最適配合比は生石灰と廃石膏の混合比 1:1 程度になる。

③海水沖積粘土 (H21)

各改良材のタイプとも改良効果は確認できたが、生石灰が存在しない Fe 石膏 (酸化鉄 + 廃石膏) および酸化鉄、廃石膏の材料単体の場合、改良効果はまさ土およびシラスに比べ小さい。また、強度発現のピークは添加率を増加させるほど高くなる傾向となり、ほとんどの改良材のタイプにおいて添加率 40% が強度のピークとなっている。生石灰と廃石膏の混合比を見ると、0~0.70 付近まで何れの添加率とも生石灰の含有率が多くなるほど強度は増加傾向であることから、生石灰混合率の増加が改良材の強度発現に強く影響していると推定できる。また、生石灰単体である混合比 1.0 より廃石膏を混合した改良材 0.60 付近の方が強度特性も大きくなっていることから、強度特性には生石灰と廃石膏ボードの相互作用が大きく寄与することが認められる。

④海洋浚渫土 (H21)

他の改良対象土と同じく、改良材を混合することによる改良効果は見られるが、生石灰が存在しないタイプの改良材の改良効果は小さい。強度発現のピークは改良材添加率を増加させるほど高くなる傾向であるが、添加率が 40% になると強度が低下するものも見られた。また、強度特性は生石灰の含有率が多くなるほど強度増加傾向にある。海洋浚渫土は液性限界付近の高含水比の土性を呈しており、生石灰の消化・吸水反応による物理的改善効果が強度の発現特性に繋がっているためであると考えられる。

⑤関東ローム (H22)

コーン指数試験と一軸圧縮試験の結果とも、全体的に同じような反応特性を示している。他の改良対象土と同じく生石灰が存在しない廃石膏単体の材料の場合では反応性が低く、強度発現には生石灰の存在が必要である。改良材の添加率を増加するほど強度は高くなるとともに、改良材中の生石灰分が多いものほど強度のピークが高い傾向を示している。ただし、平成 21 年度の試験結果から生石灰単体より生石灰と廃石膏ボードを混合した改良材の方が強度特性も大きくなることが確認されていることから、改良効果のピークは、生石灰に対して廃石膏を 20~30% 程度添加したものになると想定される。

⑥河川浚渫土 (H22)

河川浚渫土においても、強度発現には生石灰の存在が必要であり、生石灰添加量が多いものほど改良効果も高い傾向が確認された。添加率の増加による強度特性もほぼ同じ傾向である。生石灰と廃石膏ボードの混合比と強度の関係を見ると、何れの添加率とも生石灰の含有率が多くなるほど強度も増加傾向を呈しており、添加率 40% では 0.5 を超えるあたりから改良効果が増加する傾向が見られる。しかし、添加率 20% 以下ではコーン指数 q_c は 500kN/m^2 未満となり、生石灰の含有量が多くても建設発生土の土質区分の分類から第 3 種建設発生土程度の品質しか得られない結果となる。よって、河川浚渫土を対象とする場

合は、改良材の添加量を 20%以上に設定しないと十分な改良効果が得られず、廃石膏の配合割合については生石灰に対し 50%以下に設定する必要があると考えられる。

⑦淡水沖積粘土 (H22)

コーン指数試験と一軸圧縮試験とも河川浚渫土と似た反応特性を示す結果となっている。改良材別の比較でも、強度発現には生石灰の存在が不可欠であり、添加率が高いものほど改良効果も高く、ほとんどの改良材のタイプにおいて添加率 40%が強度のピークとなっている。淡水沖積粘土を対象とする場合も、改良材の添加量を 20%以上に設定し、廃石膏の配合割合については生石灰に対し 50%以下に抑える必要があると考えられる。

⑧海洋浚渫土 (H22)

海洋浚渫土についても、河川浚渫土および沖積粘土と同様の反応特性を示す結果となっている。改良材別の比較でも、強度発現には生石灰の存在が必要で、添加率が高いものほど改良効果も高く、添加率 40%が強度のピークとなっている。生石灰と廃石膏ボードの混合比と強度の関係も類似した傾向を示すが、添加率 10%の反応性が他の処理対象土と比較して低い。これは、海洋浚渫土の自然含水比が液性限界を超える高含水比の土性を示しているため、生石灰の吸水率による物理的改善効果が添加率 10%では発揮できていないためであると考えられる。改良材の必要量については添加率 20%以上とすることが必要で、改良材中の生石灰に対する廃石膏の割合は 50%以下が望ましいと考えられる。

以上のように、各改良対象土とも改良材を配合することで強度の改善効果が確認できた。各改良対象土で強度発現特性は異なるが、まさ土・シラスを改良対象土とした場合、強度のピークが添加量 10%程度であり、それ以外の改良対象土においては強度のピークが最も添加量の多い添加量 40%になることがわかった。ただし、その強度特性は改良材中に生石灰が存在することが条件であり、特に生石灰と廃石膏ボードの混合比が影響していると考えられる。

また、各改良対象土ともコーン指数試験と一軸圧縮試験における反応特性については、ほぼ同様の傾向が得られた。そこで、試験結果に基づいた一軸圧縮強さ q_u とコーン指数 q_c の関係を求めてみた (図 4.4-11)。

その結果、一軸圧縮強さ q_u とコーン指数 q_c の関係はほぼ線形で表すことができ、回帰式の相関係数は $r=0.99$ であることから、高い相関性が確認できた。回帰式としては、「 $q_c=10.155q_u$ 」となり、一般的に用いられている「 $q_c=5q_u$ 」に比較して約 2 倍の関係となっている。

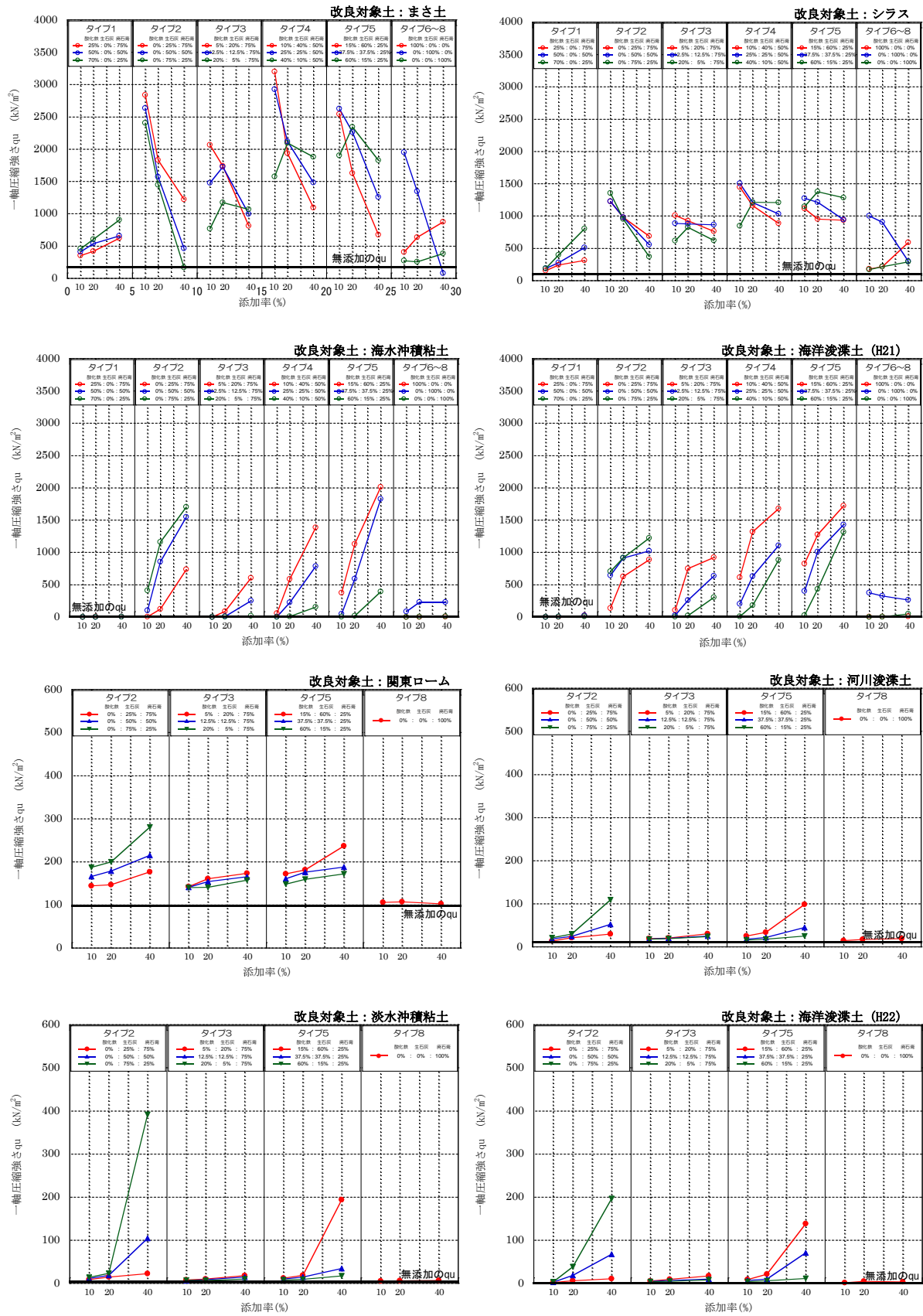


図 4.4-7 一軸圧縮試験結果

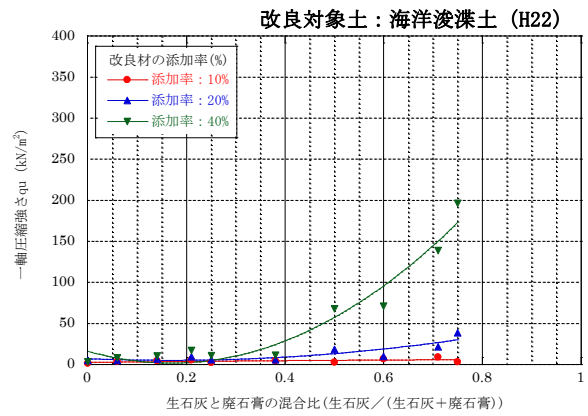
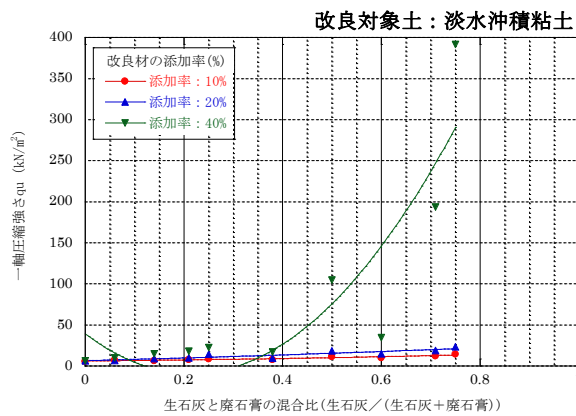
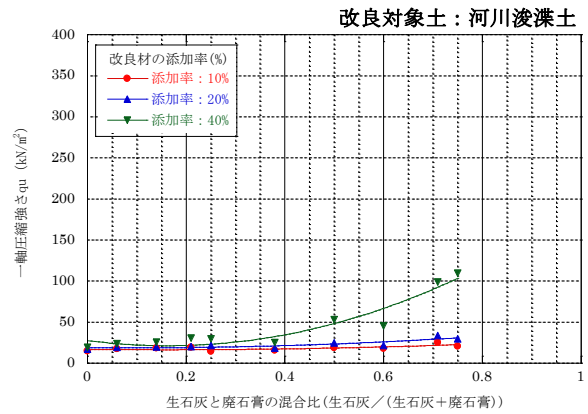
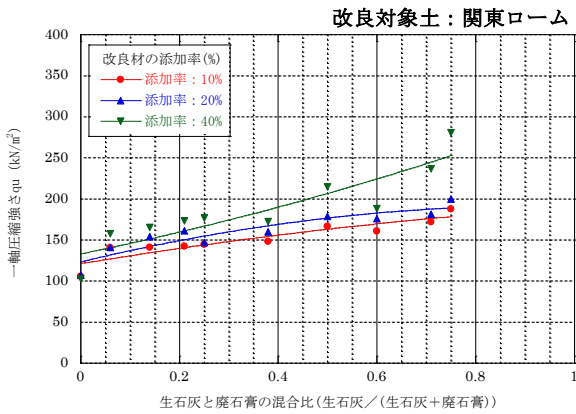
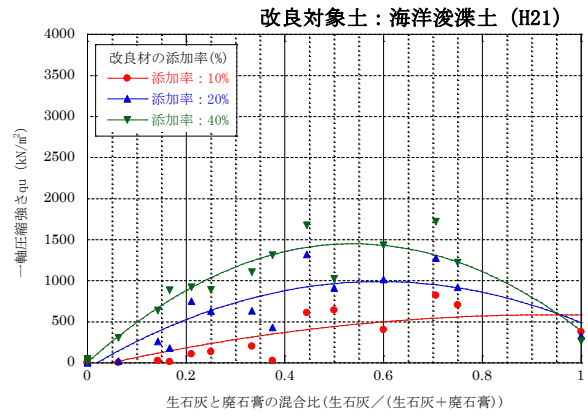
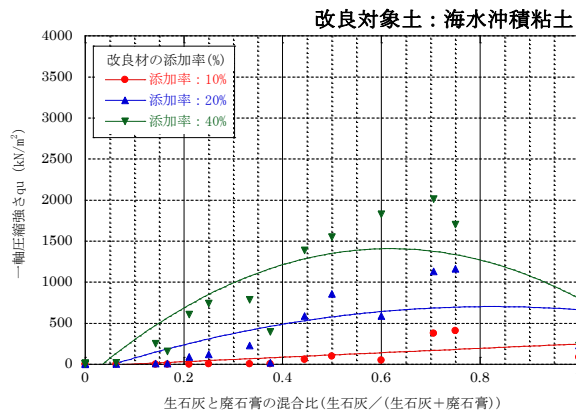
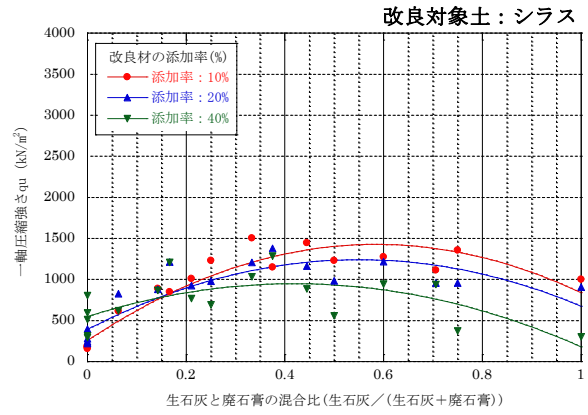
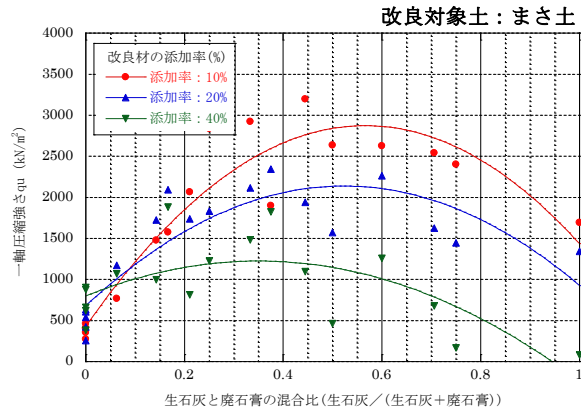


図 4.4-8 生石灰と廃石膏の混合比の関係（一軸圧縮試験）

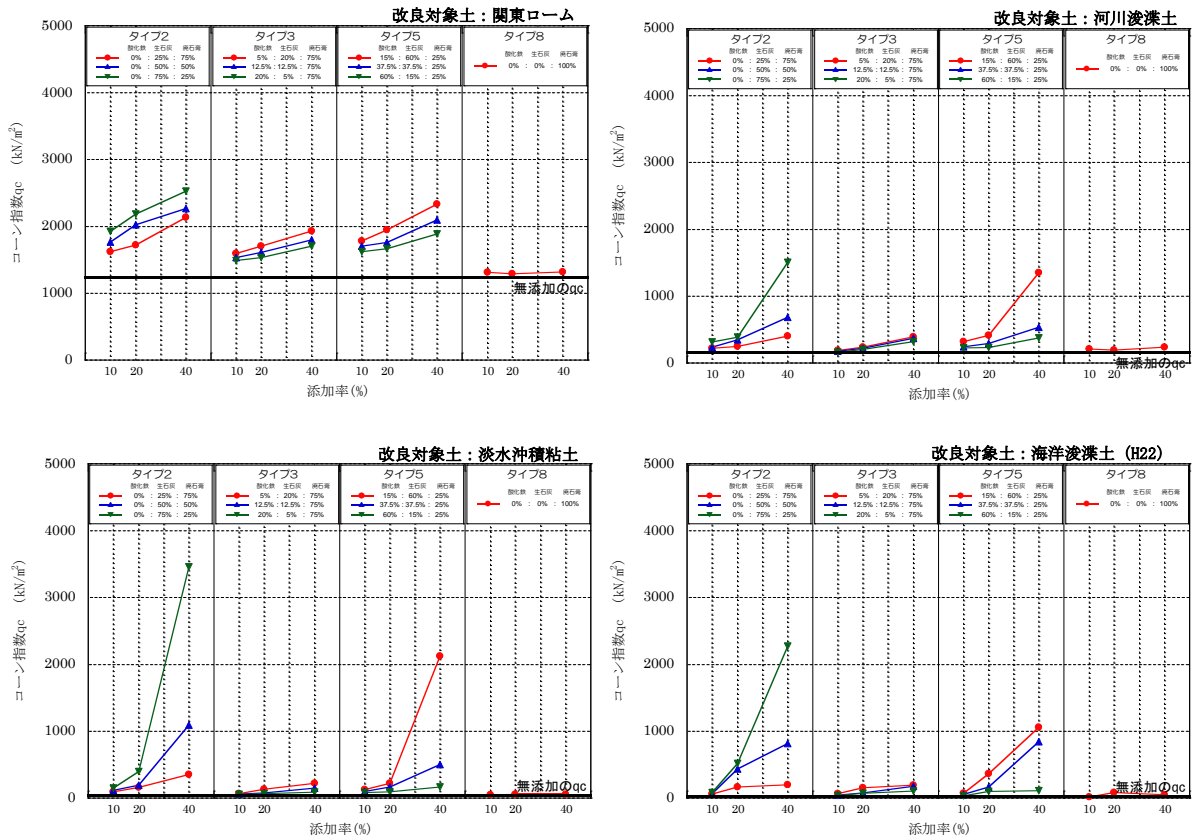


図 4.4-9 コーン指数試験結果

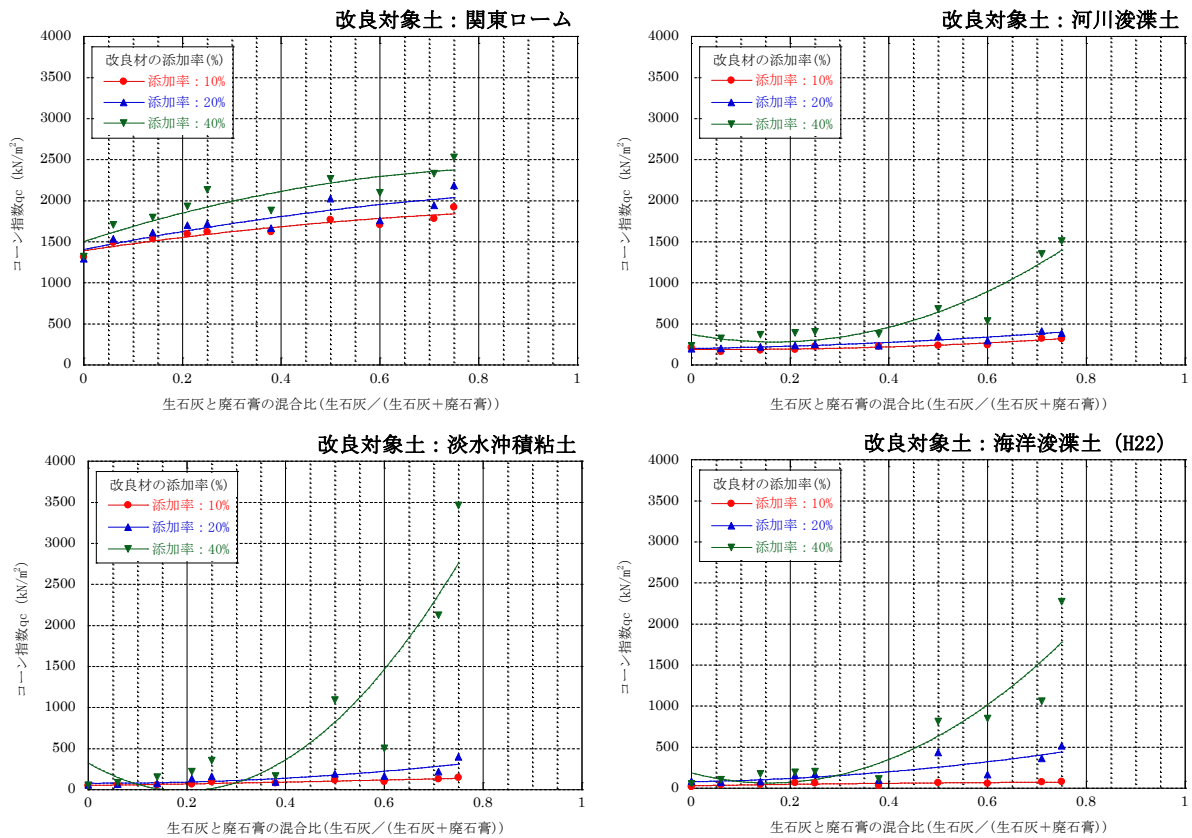


図 4.4-10 生石灰と廃石膏の混合比の関係 (コーン指数試験)

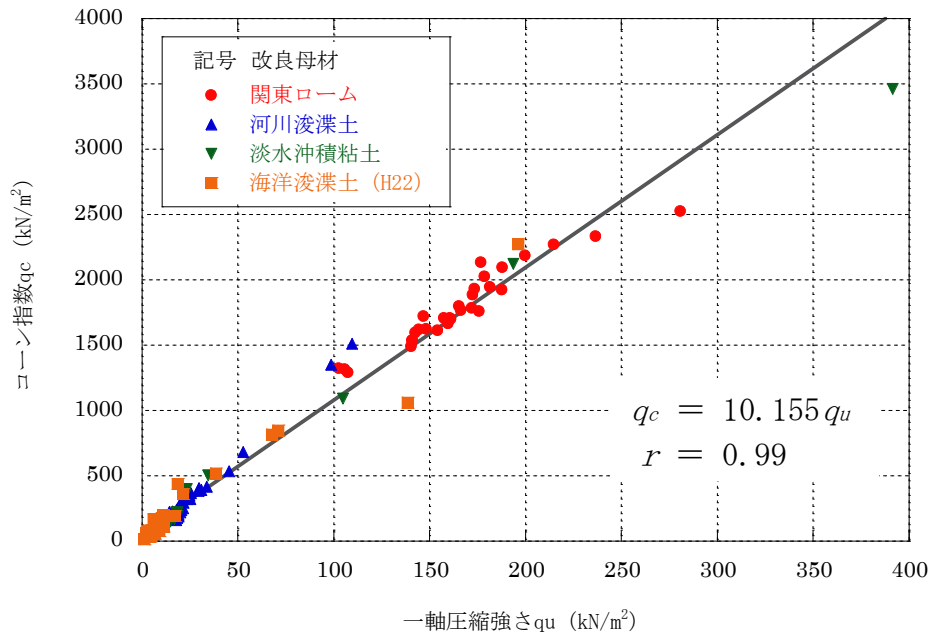


図 4.4-11 一軸圧縮強さとコーン指数の関係

4) 乾湿繰返し試験の結果

実際に改良工事において適用された場合を想定し、改良した土が気象条件（降雨や日照）の影響を受けた条件下において、改良土の性状・強度が日数経過にともなってどのように変化していくのか強度損失特性の把握するために乾湿繰返し試験を行った。膨張比の測定結果を図 4.4-12、コーン指数試験による乾湿繰返し試験における強度損失特性を図 4.4-13 に示す。

① 関東ローム

膨張比の測定結果を見ると、乾湿繰返しの影響を受けることで、全体的に膨張・収縮を繰り返す傾向が確認された。特に改良材を配合しない無添加の振れ幅が大きく、4 クールを経過するまで膨張比は大きく変動していた。次に膨張比の変動が大きかったのは、改良材に生石灰を含まない廃石膏単体を配合したタイプDであった。2 クールまでは、無添加と同様の傾向で膨張比の変動も大きかったが、3 クール以降は変動が小さくなり膨張側で推移していた。タイプA～タイプCは生石灰と廃石膏もしくは酸化鉄・生石灰・廃石膏を組み合わせた Fe 石灰石膏を改良材としたものであるが、膨張比の傾向を見るとほぼ同様に推移しており、無添加および廃石膏単体と比較して非常に小さい変動幅であった。特に、酸化鉄を配合している Fe 石灰石膏のタイプは3クール～4クールにおける膨張比の変動がほとんどなかった。コーン指数の結果を見ると、廃石膏単体は無添加の場合と同じ強度特性を示しており、反応性はほとんどないと思われる。生石灰および酸化鉄を配合したタイプA～タイプCについては、無添加と比較して2倍以上の強度を示しており、改良効果に優れていると判断される。また、養生初期の強度では生石灰を配合したものが最も高いが、養生が経過するにつれて Fe 石灰石膏より強度が低下している。これは、膨張比の変動が強度に影響していると考えられ、生石灰は Fe 石灰石膏よりも膨張・収縮が大きいことから、強度も低下している推察される。ただし、関東ロームを改良対象土としたものは、何れの改良材タイプにおいても最初の水浸養生後に強度が低下し、乾湿を繰り返すことによって

更に強度が低下していく傾向があることから、実際の施工での改良土の取扱いは、気象変動の影響をできるだけ受けないように注意する必要があると考えられる。

②河川浚渫土

河川浚渫土の膨張比は関東ロームと同様に、無添加と廃石膏単体のものが大きく変動しており、全クールにわたって膨張比は大きく変動していた。それに対して、生石灰および Fe 石灰石膏を配合したタイプ A～タイプ C の改良材では、膨張比の変動が全体的に小さく 1 クール終了から 4 クールまではほとんど膨張・収縮しないことが確認された。コーン指数の結果を見ても、改良効果が非常に高く現れており、無添加と比較して 15 倍以上の強度となっている。関東ロームの場合と同様に、生石灰＋石膏より Fe 石灰石膏が高い強度で推移していることから、改良材に酸化鉄を含む Fe 石灰は生石灰単体と比較して乾湿繰り返しの影響を受けても、強度損失に対する耐性に優れている材料であると考えられる。河川浚渫土は全体的な傾向から、改良効果が現れていれば乾湿繰り返しによって強度損失がない土であると言える。

③沖積粘土（淡水域）

沖積粘土の膨張比の傾向についても、無添加と廃石膏単体のものが全クールにおいて変動が大きく、生石灰および Fe 石灰を配合したタイプ A～タイプ C の改良材では、最終クール終了まで膨張比の変動が全体的に継続して小さかった。コーン指数の結果からも、タイプ A～タイプ C の改良材の改良効果が非常に高いことが確認され、乾湿繰り返し期間の全クールにおいて安定した状態を保持している。河川浚渫土の場合と同様に、生石灰＋石膏より Fe 石灰石膏が高い強度で推移し、強度損失が全く見られないことから、酸化鉄を含んだ Fe 石灰石膏は乾湿繰り返し条件下においても強度損失が少ない材料であると考えられる。全体的には高い強度を維持しているが、改良材によっては強度の伸びが小さく、場合によっては強度が低下するものもあるので、実際に改良土を管理する上では、降雨等の影響をなるべく受けないようにすることが望ましい。

④海洋浚渫土

海水浚渫土も膨張比は沖積粘土に類似した傾向を示している。無添加および廃石膏単体の改良材では膨張比の変動が大きい。生石灰および Fe 石灰を配合したタイプ A～タイプ C の改良材では、膨張比の変動が全体的に小さく 4 クール終了までほとんど膨張・収縮が見られない。コーン指数の結果を見ても、改良効果が非常に高く現れており、特に Fe 石灰石膏の優位性が確認された。また、他の改良対象土では酸化鉄の配合量が多いタイプ C が最も高い強度であったのに対し、海洋浚渫土では酸化鉄の配合量が少ないタイプ B が最も高く、強度差も大きい。全体的には乾湿繰り返しの影響を受けても強度は増加している傾向があることから、改良効果が見られるのであれば強度の損失も少ない土であると思われる。

改良土が降雨や日照等の気象条件の影響を受けた場合を想定した乾湿繰り返し試験の結果、高い改良効果が得られる改良材を用いれば、供試体の膨張・収縮の変動幅が小さくなり、安定した強度を維持できることが確認され、その中でも酸化鉄と生石灰を組み合わせた Fe 石灰石膏は、他の改良材と比較して乾湿繰り返しの影響を受けても、強度損失に対する耐性に優れている材料であるという結果が得られた。

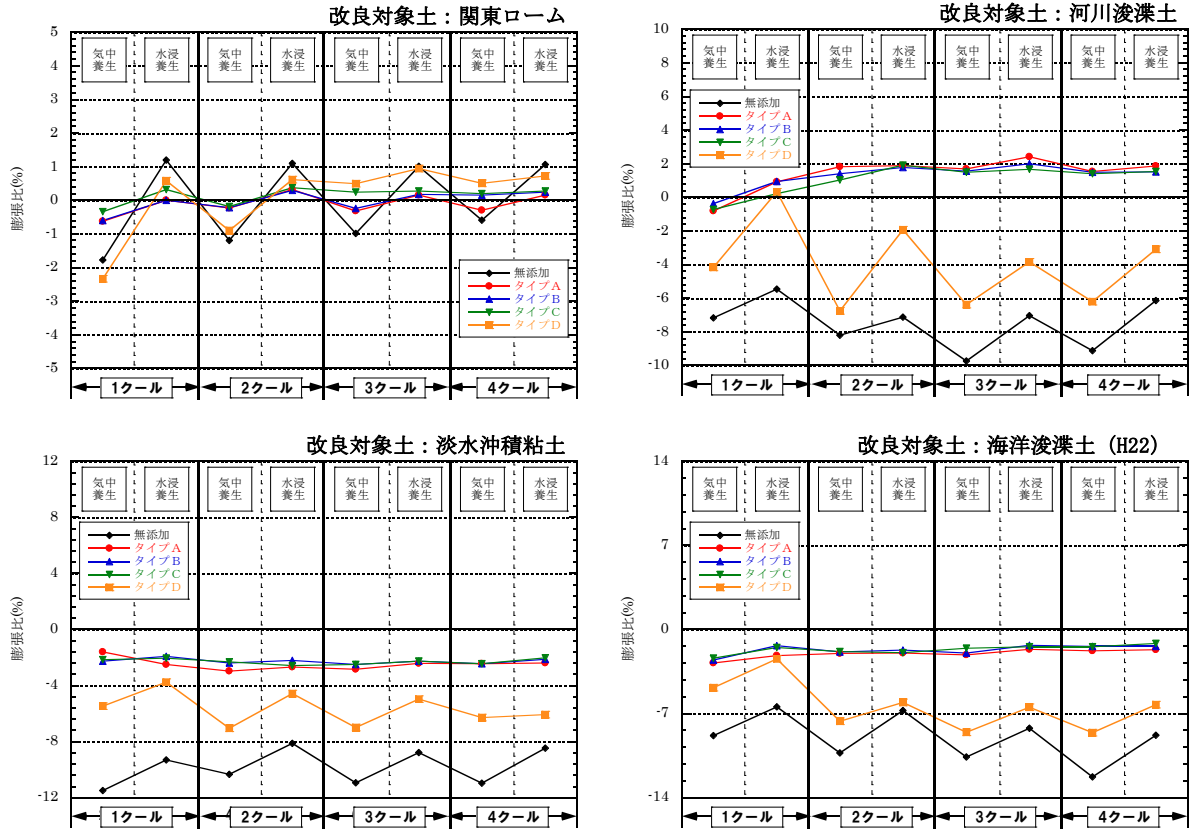


図 4.4-12 乾湿繰返し試験における膨張比

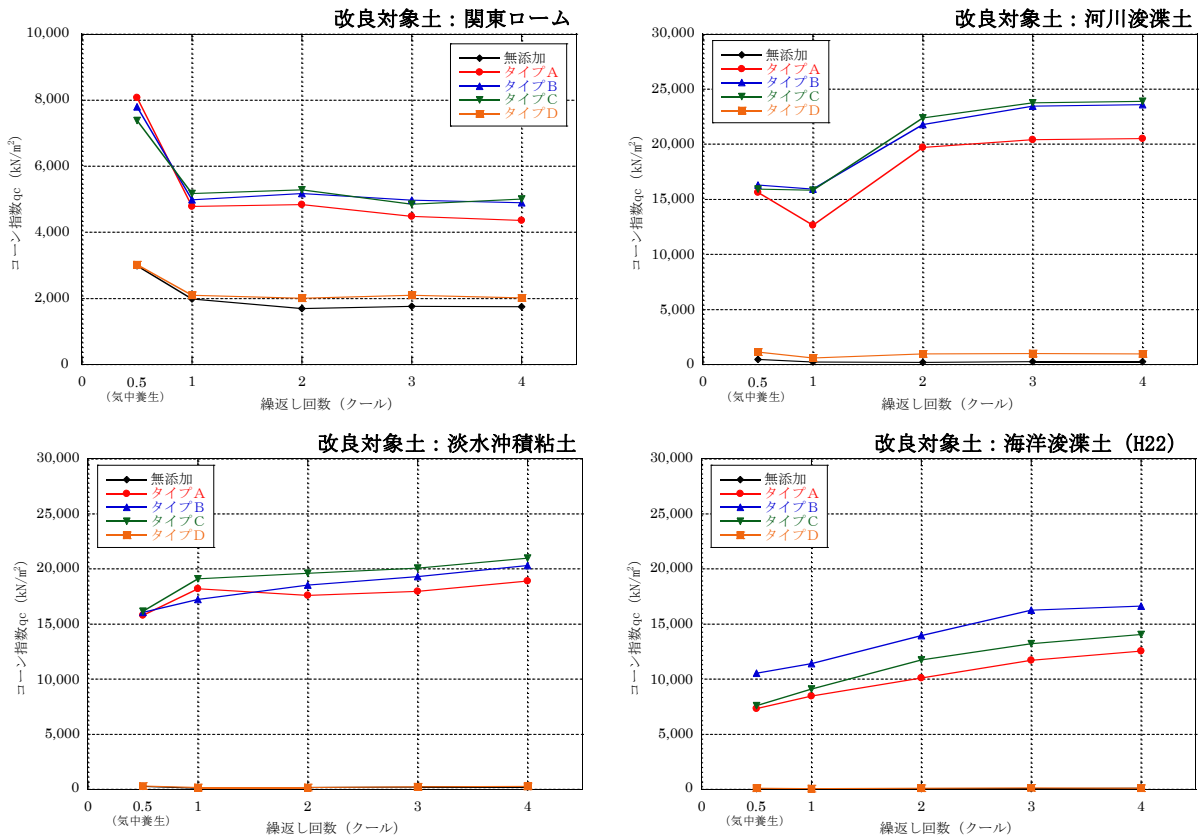


図 4.4-13 乾湿繰返し試験における強度損失特性

4.4.4 まとめと課題

本研究は、「廃石膏を用いた Fe 石膏および Fe 石灰石膏の地盤工学的有効利用技術の開発」を目的として、平成 21 年度より継続して実施してきたもので、酸化鉄を含有する Fe 石灰に廃石膏ボードを組み合わせた地盤改良材の、力学特性の確認試験および硫化水素ガスの抑制効果についての検討を行った。その結果を、試験項目ごとにまとめるとともに、今後の課題を示す。

1) 硫化水素ガスの抑制効果

今回の研究で行った硫化水素ガス測定では、硫化水素ガスの発生は確認されなかった。要因としては、本研究における養生温度や養生日数の条件では、硫酸塩還元菌の増殖に必要な状態まで至らなかったためであると考えられ、一般的な強度確認試験の養生条件下では硫化水素ガスが発生する可能性は少ないと思われる。

2) 改良土の力学特性

①強度確認試験

- ・まさ土およびシラスの砂質分主体の土を改良対象とした場合、強度発現のピークは添加率 10%が上限で、改良材の添加率が過剰になると密度低下とともに強度が低下する。
- ・沖積粘土（海水・淡水）および海洋浚渫土砂、関東ロームの高含水土を改良対象とした場合、強度発現のピークは添加率を増加させるほど高くなる傾向があり、添加率 40%が強度のピークとなる。しかし、改良材の添加率が過剰になる場合は、砂質系の土と同様に強度が低下する。
- ・廃石膏ボードと生石灰と組み合わせた改良材は、石灰単体よりも高い改良効果を示し、廃石膏ボードの混合率は生石灰に対して 20%~30%が強度のピークとなる。なお、反応性が確認できる最小値としては、廃石膏ボードと生石灰の混合比は 1:1 付近となることから、廃石膏ボードに対して 50%以上の生石灰を配合すれば、廃石膏ボードを用いた改良材の改良効果を発揮させることができると推察される。
- ・コーン指数試験と一軸圧縮試験における反応特性については、ほぼ同様の同等の反応性であり、試験結果に基づいた一軸圧縮強さ qu とコーン指数 qc の関係から、「 $qc=10.155qu$ 」の関係式が求められた。

②乾湿繰返し試験

乾湿繰返し試験の結果、高い改良効果が得られる改良材を用いれば、供試体の膨張・収縮の変動幅を小さくすることができ、安定した強度を維持できることが確認された。中でも酸化鉄と生石灰を組み合わせた Fe 石灰石膏は、他の改良材と比較して乾湿繰返しの影響を受けても、強度損失に対する耐性に優れている材料であった。ただし、関東ロームの改良土については、強度が十分に発現しているにもかかわらず、乾湿を繰返すことによって更に強度が低下していく傾向があることから、改良土の養生においてはできるだけ気象変動の影響を受けないように注意する必要がある。

以上のことから、廃石膏ボードを Fe 石灰に混合した改良材は、強度の改善効果や耐久性の面からも優位性が確認されたことから、廃石膏ボードの有効利用技術として地盤改良材に使用することは可能であると考えられる。今後、実用化にあたって検討すべき課題を以下に挙げる。

- ①地盤改良材を構成する各原料の配合割合について、様々な物性を呈する土においても一様に対応できる最適混合比を求める試験を行う。
- ②砂質系や粘土質系など基本物性が異なる改良対象土に併せて、使用する石灰分を生石灰および消石灰などから選択し、最適な改良材の組み合わせを確認する。
- ③酸性雨などを想定し、酸性条件の影響を定期的に受けた場合における改良土の強度推移や硫化水素の発生状況を長期間にわたって確認する。
- ④現場での実証実験を行うことで、室内試験値との整合性の確認や実用化に向けての問題点を改めて検証する。
- ⑤酸化鉄や廃石膏ボードを用いた改良材の反応性を、X線回折分析や電子顕微鏡などを用いて詳細に解明する。
- ⑥環境影響評価として、硫化水素だけでなくフッ素の溶出や膨張などについても検討を行う。また、改良土の施工による水質汚濁に係わる影響評価も行う。

4.4.5 参考文献

- 1) 環境省都道府県通知：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）、環産産発第060601001号、平成18年6月1日
- 2) 廃石膏ボードの対応策について、社団法人石膏ボード工業会、2010.5
- 3) 渡辺ら：黒い水の生成過程と処理、埼玉県公害センター研究報告〔16〕、pp.121～129、1989
- 4) 成岡ら：最終処分場における硫化水素対策（その2）、第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.1058～1060
- 5) 井上雄三：安定型最終処分場における高濃度硫化水素発生機構の解明ならびにその環境汚染防止対策に関する研究、国立環境研究所研究報告第188号

4.4.6 関連する発表論文

- 1) 井ら：7.廃石膏パウダーの道路最良としての再資源化、第6回地盤改良シンポジウム
- 2) 杉原元一：廃石膏パウダーを用いた石灰系安定処理土の工学的性質（その1）、第40回地盤工学研究発表会
- 3) 井真宏：廃石膏パウダーを用いた石灰系安定処理土の工学的性質（その2）、第40回地盤工学研究発表会
- 4) 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

4.4.7 知的所有権の取得状況