

補助事業名 環境研究総合推進費補助金循環型社会形成推進研究事業（平成 25 年度～平成 27 年度）

所管 環境省

研究課題名 プラスチック等が混入した弾性廃棄物地盤の力学及び環境特性に関する研究

課題番号 3K133011

研究代表者名 山脇 敦（公益財団法人 産業廃棄物処理事業振興財団）

国庫補助金 50,163,000 円（うち平成 27 年度：18,000,000 円）

研究期間 平成 25 年 4 月 1 日～平成 28 年 3 月 31 日

本研究のキーワード 廃棄物地盤、地盤評価法、地盤支持力、沈下特性、衝撃加速度試験（キャスポル）、安息角試験、空隙率試験、平板載荷試験、排水特性、実証実験

研究分担者 大嶺 聖（長崎大学大学院工学研究科）
土居洋一（長野県短期大学）
川崎幹生（埼玉県環境科学国際センター）
坂口伸也（前田建設工業株式会社）
島岡隆行（九州大学大学院工学研究院）
勝見 武（京都大学大学院地球環境学堂）
川井晴至（九州大学東アジア環境研究機構：平成 26 年度まで）

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

プラスチック等が混入した廃棄物地盤は、産業廃棄物安定型最終処分場（全国に約 1200 箇所）や不法投棄支障除去現場、災害廃棄物仮置場等、多数存在するものの、こうした地盤は軟らかく利用は難しいと考えられていたこと等から、重量構造物設置等による利活用はほとんどなされていない。また、一般廃棄物最終処分場では焼却灰を主とした埋立になっていること等を背景として、産業廃棄物安定型最終処分場等のプラスチック等が混入した廃棄物地盤に関する力学面等の研究は十分には行われていない。このような中、平成 22～24 年度に環境研究総合推進費補助金で実施した「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価」によりプラスチック等が混入した廃棄物地盤が非常に高い斜面安定性を有することを把握し、こうした地盤で重量構造物設置等による利活用の可能性があることが推察された。

本研究は、プラスチック等が混入した廃棄物地盤を対象にして、斜面安定性以外の力学面の未検討部分の支持力・沈下特性等に関する研究と、地盤利用の際に留意が必要となる水、ガス等の環境面の研究を併せて行うことにより、廃棄物地盤の有効利用のための地盤評価方法の提案を行うものである。

本研究で、「プラスチック等が混入した廃棄物地盤の利活用のための評価マニュアル(案)」を提示することにより、産業廃棄物安定型処分場等の未利用廃棄物地盤での重量構造物設置等による有効活用が進むとともに、それによって地域貢献や周辺住民の処分場への理解の醸成等の効果も期待できる。また、不法投棄等現場は全国に未だ約 1,600 万ト残存し、行政には斜面崩壊や有害物流出等による生活環境保全上の支障が生じるおそれについての監視や必要に応じた対策が求められている。本研究によりこうした現場での水・ガスの挙動やその影響等を予め把握できれば、合理的な監視、対策に結びつく。

本研究により概ね廃棄物力学全般の基礎研究がなされることから、多方面への波及効果も期待でき、例えば、処分場の貯留構造物の経済設計や有効な埋立方法の確立等に結びつく可能性がある。また、材料分野、建設分野等を含めて関連研究が進むことも期待できる。さらに、このような研究は、海外を含めてもみあたらず、研究成果は廃棄物地盤が多く形成され斜面崩壊が頻繁に発生しているアジア地域等の海外でも活用されることが期待できる。

2. 研究開発目的

本研究は、安定型処分場等のプラスチック等が混入した廃棄物地盤の力学特性や環境特性を明らかにし、その評価方法を提案し、適切かつ経済的な廃棄物地盤の利用・構築（例えば風力発電設備の設置等）の可能性について検討し、研究成果として「プラスチック等が混入した廃棄物地盤の利活用のための地盤評価マニュアル(案)」(以下、「廃棄物地盤評価マニュアル(案)」という。)を提示することを目的とする。

なお、廃棄物地盤の利活用のための評価にあたっては、検討初期段階では地盤利用の可能性(目安)を広範囲かつ安価に把握することが合理的であるため、地盤の概略評価方法についての研究も行う。

項目別の研究目的は次の①～⑤のとおり。

- ① 廃棄物地盤の組成等の条件別の基本的力学特性の把握
- ② 廃棄物地盤の支持力、沈下量、耐震性等の評価方法の提案
- ③ 同上、概略評価方法の提案
- ④ 廃棄物地盤利用にあたっての環境影響評価方法の提案
- ⑤ 廃棄物地盤の利用・構築の可能性についての提案

(「プラスチック等が混入した廃棄物地盤の利活用のための地盤評価マニュアル(案)」の作成)

3. 研究方法

(1) 研究対象

廃棄物組成：プラスチック等の繊維状物等が混入した廃棄物地盤を主たる対象とする。

時間尺度(time scale)：廃棄物地盤の有効利用方法の一つである風力発電設備の設計供用期間は20年³⁾であるため、概ね20～30年程度以下の時間尺度を研究対象とし、30年を超えるような超長期的なプラスチック等の廃棄物の劣化等は本研究の対象外。

(2) 研究項目と研究方法

1) 研究の基本フロー

産業廃棄物安定型処分場等のプラスチック等が混入した廃棄物地盤を形成する個々の廃棄物サイズは土粒子に比べ遙かに大きいことから、室内で現場を忠実に再現するためには実験設備が大規模・高額になり、実施が困難になる。このため、実験は現場試験を中心に行って、地震時特性、水挙動等の把握を目的とした室内実験を補完的に実施する。また、力学特性の把握にあたっては、既往の斜面安定研究で得られたデータも活用する。

現場試験法については、サイズの他、形状や伸縮・圧縮性なども土砂地盤と異なるため、既存の土質調査法をそのまま流用できないことが多いことから、廃棄物地盤に適した力学試験法の検討を含めて研究を行う。

廃棄物地盤の活用にあたっては、不同沈下や環境面での懸念があることから、研究の最終段階で実証実験を行って、不同沈下の発生状況やガス等への影響を確認して、廃棄物地盤評価マニュアル(案)を提示する。

研究の基本フローを図1に示す。

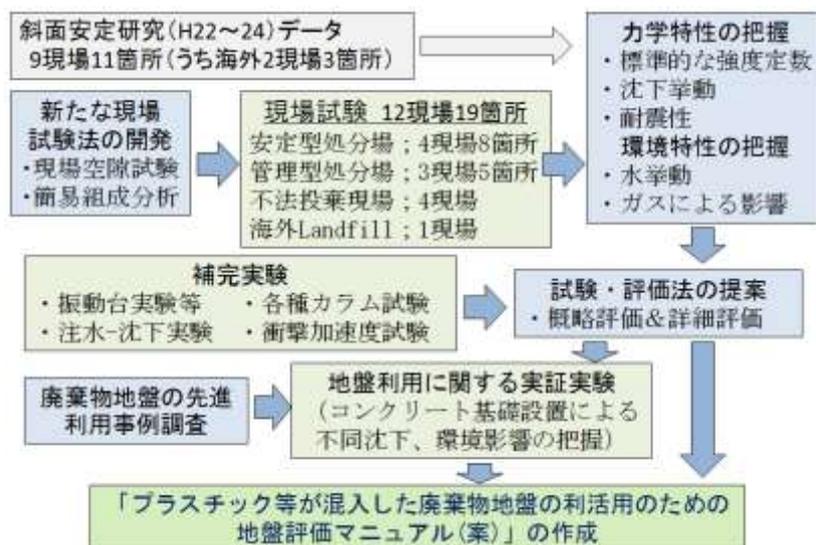


図1 研究の基本フロー

2) 廃棄物地盤の管理者側の力学的なニーズと現場実験場所

廃棄物地盤（処分場等）の管理者は、跡地利用の他、えん堤の安定性等、多くの力学的な課題を抱えている。本研究は、これらの課題へ環境面も含めて対応できるように研究を進めるものであり、平成 25～27 年度の 3 年間で安定型処分場等の計 12 現場、19 箇所で行った。このうち国内での力学試験は 10 現場で、これらの処分場等が抱える主たる課題としては、跡地利用や重量物（除染土壌）保管をあげたところが 6 箇所、えん堤の安定性や適切な埋立形状確保（斜面安定性を含む）をあげたところが 4 箇所であった。

3) 研究項目と項目別の研究課題、研究方法

研究項目別に目的達成のための研究課題とその研究方法を整理したのが表 1 である。研究は現場試験によるデータ蓄積を主とし、現場試験だけでは把握が困難な耐震性や水挙動に関しては室内実験により研究を進める。

廃棄物地盤は組成やサイズが力学特性、環境特性へ与える影響が大きいことが想定されることから、現場試験場所は、多様性を確保できるよう配慮し、安定型処分場 4 現場、管理型処分場 3 現場、不法投棄 4 現場を選定した。また、海外の埋立地（Landfill）では、度々大規模な斜面崩壊が発生するなど、わが国の廃棄物地盤と様相が異なることから、わが国の廃棄物地盤の特徴をより明確にすることを目的に、海外の埋立地での現場試験も行った。なお、各現場の試験項目の選定にあたっては、現場管理者が抱える課題に対応できる試験項目を選定した。

表 1 研究項目と各項目別の課題、研究方法

研究項目	主な研究課題	研究方法
①組成等の条件別の基本的力学特性の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物組成（種類、サイズ等）と力学特性の関係把握 ・廃棄物層中の密度、空隙と力学特性の関係把握 	<ul style="list-style-type: none"> ○廃棄物組成の異なる種々の現場での強度試験 ○各現場での組成分析、密度試験、空隙率測定 ○補完的室内実験（一軸圧縮試験、土槽実験）
②支持力、沈下量、耐震性等の評価方法	<ul style="list-style-type: none"> ・支持力特性、沈下特性、耐震特性の把握 ・廃棄物地盤に適した現場試験法の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ○現場での強度試験（平板載荷試験（図 2）、一面せん断試験等）の実施 ○現場での継続的な沈下量計測 ○現場での注水-沈下実験 ○空隙率測定法の開発と種々の現場での試験の実施 ○振動特性把握のための振動台実験
③現場概略評価方法	<ul style="list-style-type: none"> ・初期検討時に合理的に実施可能な概略評価方法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> ○衝撃加速度試験（キャスポル:図 3）、安息角試験（図 4）の適用性の検討 ○補完的室内実験（衝撃加速度試験の影響範囲確認実験） ○簡易組成分析法（画像処理による）の検討
④廃棄物地盤の環境影響評価方法	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物地盤の活用時（重量物設置等）に必要な環境面(ガス,水)の評価方法の検討 ・汚染拡散や沈下との関係が大きいとみられる地盤中での水の貯留、排水に関する基本的な特性の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ○カラムでの注水排水実験（図 5） ○補完的室内実験（トレーサ試験） ○廃棄物地盤でのガス発生と構造物等への影響確認試験 ○廃棄物地盤上に設置されたコンクリート版による環境面(ガス等)への影響把握
⑤廃棄物地盤の利用・構築の可能性	<ul style="list-style-type: none"> ・プラスチック等が混入した廃棄物地盤に適した有効利用法の把握 ・実利用を想定した力学面の検討事項、必要施設規模の提案 ・実利用時の課題整理 	<ul style="list-style-type: none"> ○海外等の廃棄物地盤の有効利用事例や設計法等の収集 ○廃棄物地盤上の風力発電施設を想定したコンクリート基礎の設計・築造 ○廃棄物地盤上に設置されたコンクリート版の不同沈下、環境影響（ガス等）に関する実証実験



図 2 平板載荷試験



図 3 キャスポル



図 4 安息角試験



図 5 カラムでの注水排水実験

4. 結果及び考察

(1) 基本的力学特性の把握

1) 現場力学試験結果

研究の3カ年に11現場18箇所で行った力学試験結果に、既往の斜面安定性研究（平成22～24年度）で得られている力学試験結果を加えて（計19現場、29箇所）、廃棄物の組成、サイズ、サイト区分で整理したのが表2である。表2から作成した地盤分類別レーダーチャートが図6で、10cm以上のプラスチック等が混入した現場は焼却灰主体の現場と比べて、地盤反力係数、キャスボルIa（衝撃加速度）、粘着力の値は小さいが、内部摩擦角や停止安息角は大きい。海外Landfillはわが国の10cm以上のプラスチック等が混入した現場に近い値を有するが含水比は遙かに大きい。

図7は10cm以上のプラスチック等が混入した中部地方の安定型処分場での強度定数の経年変化で、時間とともに空隙率が減少し、極限支持力や地盤反力係数が増加（特に当初の2年）している。

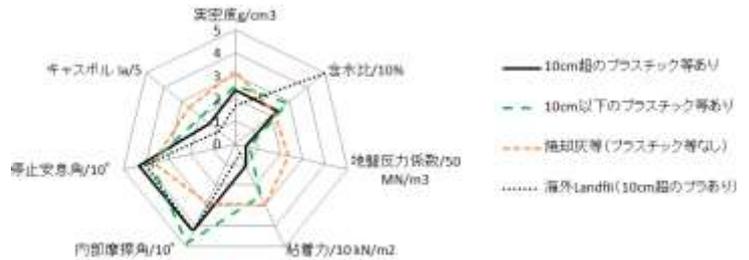


図6 廃棄物地盤の分類別の強度特性 (19現場、29箇所の試験結果による)

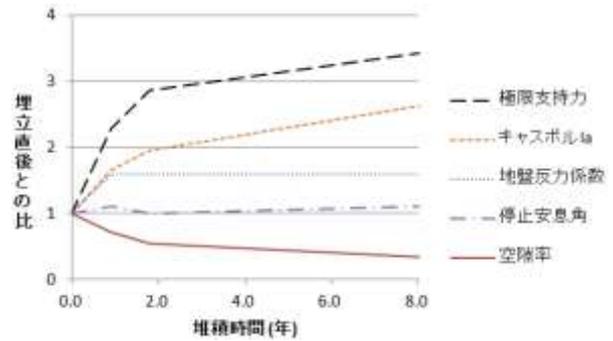


図7 中部地方の安定型処分場での強度定数の経年変化

表2 廃棄物地盤の地盤分類別の力学強度の平均値と範囲 (19現場、29箇所の試験結果)

組成	廃棄物サイズ	区分	箇所数	堆積時間	含水比	湿潤密度	実密度	空隙率	極限支持力	地盤反力係数	粘着力	内部摩擦角	停止安息角	キャスボル
				年	%	g/cm ³	g/cm ³	%	kN/m ²	数 MN/m ³	kN/m ²	°	°	Ia
プラスチック混入	含10cm超	安定型処分場 (埋立後1年未満)	4	0.3 (0~0.9)	20 (10~25)	1.3 (1.1~1.5)	2.4 (2.0~2.7)	37 (29~41)	283 (140~340)	8 (5~12)	12 (2~24)	42 (27~59)	40 (36~44)	6.5 (3.7~8.3)
		安定型処分場 (埋立後1年以上)	5	8.7 (1.8~15.0)	28 (19~42)	1.5 (1.4~1.6)	2.4 (2.2~2.9)	18 (14~22)	955 (480~2000)	39 (8~111)	15 (5~24)	37 (35~41)	42 (40~44)	9.5 (7.2~15.8)
		不法投棄	4	6.5 (1.5~13.0)	21 (13~31)	1.0 (0.7~1.2)	----	----	----	----	3 (3~4)	49 (46~51)	48 (45~52)	5.0 (3.6~6.3)
		計	13	5.5	23	1.3	2.4	26	619	24	11	42	43	7.2
	概ね10cm以下	管理型処分場	3	0.1 (0.1~0.1)	25 (19~31)	1.3 (1.1~1.5)	2.6 (1.5~4.1)	29 (17~49)	950 (300~1600)	30 (9~51)	40 (40)	50 (50)	37 (34~40)	11.3 (7.8~13.3)
		震災廃棄物 (選別残渣)	1	0.2	40	1.1	----	----	----	----	11	47	40	4.5
計		4	0.2	29	1.2	2.6	29	950	30	26	49	38	9.6	
焼却灰等・プラ無	概ね30cm以下	管理型処分場	3	4.5 (0.8~12.0)	27 (22~32)	1.4 (1.2~1.5)	3.2 (2.8~3.6)	39 (38~39)	565 (565)	179 (179)	58 (45~70<)	19 (19)	36 (35~36)	17.9 (14.6~20.0)
		不法投棄	4	7.9 (0.5~12.0)	21 (18~23)	1.7 (1.4~2.0)	----	----	360 (360~)	59 (59)	12 (3~18)	32 (17~45)	38 (35~44)	9.7 (7.8~12.2)
	一般廃棄物処分場	1	40.0	14	1.1	----	----	----	----	----	----	36	6.7	
	計	8	10.6	22	1.5	3.2	39	463	119	30	29	37	12.8	
合計			25	6.3	24	1.3	2.5	29	648	41	17	40	40	9.2
海外(Landfill) 10cm超のプラ有り			4	3.7 (0.2~7.0)	50 (39~72)	1.1 (1.0~1.2)	1.7 (1.7)	28 (28)	----	----	5 (4~6)	43 (33~43)	41 (36~45)	4.5 (3.7~5.8)

2) 現場力学試験結果等に基づく現場分類

廃棄物地盤の利活用を考える際に必要になる力学特性の面から廃棄物地盤を分類し、各分類毎の力学特性を整理したのが表3である。現場試験や室内実験の結果から、地盤の力学特性はプラスチックの有無やプラスチック等の繊維状物等のサイズにより左右され、最終処分場等の廃棄物の受入れ実態をもとに表3のとおり廃棄物地盤を大別した。

表 3 廃棄物地盤の力学特性による分類

分類	主な廃棄物種類 【主な対象現場】	力学特性
①概ね 10cm 超のプラスチック等の繊維状物等を多く含む地盤	廃プラスチック、がれき類、ガラス・陶磁器くず、金属類 【安定型処分場、不法投棄等支障除去現場】	比重の軽い埋立物が多く地盤が軟らかい（極限支持力、変形係数、粘着力が小）が、廃棄物の噛み合わせ効果等により内部摩擦角は大きい。また、繊維状物等による引張抵抗を有し粘り強く弾性的（resilient）な強度特性を有し、地震振動に対しても 1000gal 超の強振動で無い限り土地盤よりも水平土圧は小さい。
②10cm 以下のプラスチック等を含む地盤	ふるい下、プラスチック等の破砕物、プラキャップ等の小型物 【管理型処分場、ふるい下の仮置場】	①と③の中間的な力学特性を有する。噛み合わせ効果等により内部摩擦角や粘着力は大きい、繊維が短く引張抵抗は働かない。
③プラスチック等をほとんど含まない地盤	焼却灰、燃え殻 【管理型処分場、一般廃棄物処分場】	力学特性は土地盤に近く、①に比べ比重が重く、固い地盤（粘着力大）が形成される。

(2) 支持力、沈下量、耐震性等の評価方法

1) 平板載荷試験による支持力計測

直接的に地盤支持力を計測できる平板載荷試験を 8 現場（12 箇所）で行った。平板載荷試験結果の概要は表 2 に示した。これまで、安定型処分場等のプラスチック等が混入した廃棄物地盤は、軟らかく（地盤反力係数が小）、一般に大きな支持力は有しないものと考えられてきたが、表 2 の結果では埋立 1 年経過以上の安定型処分場では平均 955 kN/m² の極限支持力を有する。土砂埋立地盤の標準的な値は 330 ~ 340kN/m² と言われており^{注)}、この値と比べても大きい。また、廃棄物地盤上への設置が想定される風力発電設備や水処理施設（老朽化した水処理施設の廃棄物地盤上への移転等）の載荷重はそれほど大きくはなく、極限支持力で概ね 300kN/m² 程度あれば良く（必要な許容支持力・概ね 100kN/m² の 3 倍）、埋立直後地盤を除けば、各現場ともに支持力的には風力発電設備等の設置が可能と言える。

注)「地盤工学会、地盤調査の方法と解説」より

2) 沈下特性

中部地方の安定型処分場（10cm 以上のプラスチック等が混入）の埋立後の沈下速度を図 8 に示す。堆積後 1 年間に顕著な沈下が進み、その後も双曲線状に長期間の沈下が生じた（図 8 の例では堆積 10 年後で層厚 10m のとき 9mm/年の沈下）。また、堆積層厚に比例して沈下が生じた。沈下は、埋立層毎の沈下計測結果で、上層埋立直後に顕著な沈下が生じたことから廃棄物自重によるプレロード効果による沈下が大きいと言えるが、降雨によっても沈下が生じる（図 9）。水による沈下は、現場で実施した注水-沈下実験でも確認できた。

3) 空隙率

廃棄物地盤中の空隙率を現場で簡易に調べる方法として、水置換による土の密度試験（JGS 1612-2003）の実施後に、現場でドラム缶大の容器に廃棄物を水浸する方法を開発して各現場で測定した。廃棄物地盤中の空隙率は埋立後に時間経過とともに減少していくことや（図 10）、空隙率が大きい程、沈下速度が速いことが確認できた。このため、空隙率は強度変化（図 7）

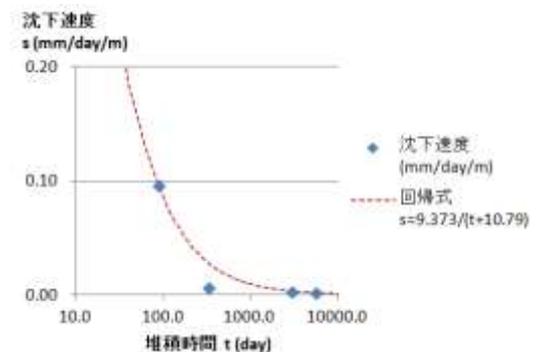


図 8 中部①現場（安定型処分場）の沈下速度

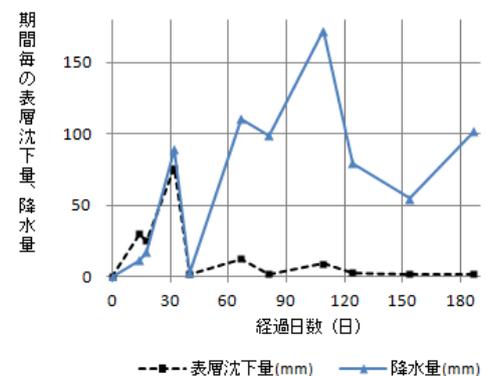


図 9 埋立後の沈下量と降水量の関係（中部①現場）

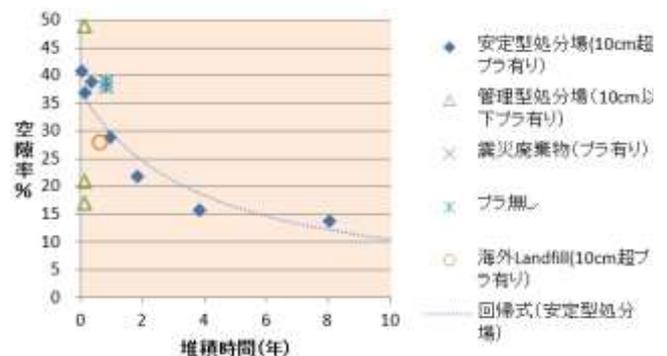


図 10 堆積時間と空隙率の関係

や沈下量を推定するための指標となり得ることが分かった。

4) 耐震性

振動台実験で 10cm 以上のプラスチックが混入した廃棄物地盤では水平震度が 1 を超えるような条件で無い限り、地震時に擁壁等に作用する水平土圧は土地盤より小さいことを確認した(図 11)。このため、このような廃棄物地盤の地震時の斜面安定計算や擁壁等の安定計算においては、土地盤で用いられる震度法による解析を行うことにより安定性を評価できることが分かった。

(3) 支持力の概略評価方法

重量構造物の設置の可能性等を把握するための概略評価時には、高額な試験費用を要しない簡易な現場試験を行って先ず概略的な評価を行うことが合理的である。このため、現場で手軽にできる試験法として、衝撃加速度試験(キャスポル)(図 3)及び安息角試験(図 4)を実施し、既往の斜面安定性研究と併せて 17~18 現場でデータを収集した。その結果、キャスポルにより得られる衝撃加速度(Ia)が地盤のせん断強度を評価するための粘着力(c)と相関があることと(図 12)、安息角試験による停止安息角(α)が内部摩擦角(φ)と相関があることが確認できた(図 13)。これらの関係は、式 1、式 2 のとおりである。

$$c = 2.8Ia - 9.5 \quad \dots \dots \dots \text{式 1}$$

c : 粘着力 (kN/m²)、Ia : キャスポルによる衝撃加速度

$$\phi = 1.6\alpha - 28 \quad \dots \dots \dots \text{式 2}$$

φ : 内部摩擦角(°)、α : 安息角試験による停止安息角(°)

次に、式 1、式 2 で推計した c、φ を「建築基礎構造設計指針(日本建築学会)」に示された支持力公式に代入して極限支持力を求め、平板載荷試験による極限支持力と比較したのが図 14 であり、これらの間には一定の相関が見られる。また、キャスポル & 安息角試験は、キャスポルの影響範囲確認実験等の結果から、1m³ 程度の範囲の値を表していると判断できるため、個々の構成物のサイズが大きい廃棄物地盤に適した試験法となっている。

(4) 地盤中の水挙動

注水排水試験(図 5)から、プラスチックが混入した廃棄物地盤では、雨水の透水性は基本的に極めて良いものの、注水量に無関係に一定量が貯留され(図 17)、その水はゆっくりと流下することが分かった。この流れは、図 15 のように雨水はプラスチック等の表面等に貯留されながら流下し、一定量が流下した後の廃棄物表面等に貯留された水はゆっくりと流下すると考えると説明でき、式 3~5 の貯留関数で表すことができる。

$$S = K \cdot q^p \quad \dots \dots \dots \text{式 3}$$

$$dS/dt = q \quad \dots \dots \dots \text{式 4}$$

ただし、S > C のときは、

$$q = q_{in} \quad \dots \dots \dots \text{式 5}$$

ここに、S : 貯留量(貯留高)(mm)

C : 内部貯留可能量(高)(mm)

K、p : 貯留関数の定数

(q が mm/hr のとき)

q : 排水量(排水高)(mm)

q_{in} : 注水量(注水高)(mm)

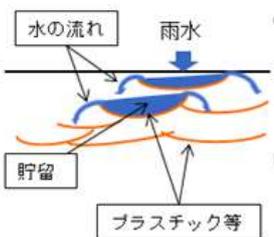


図 15 水の流れのイメージ

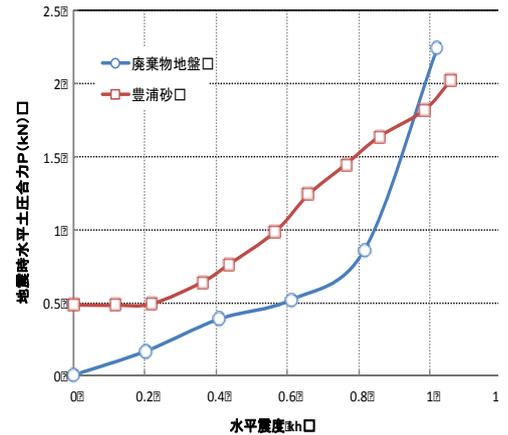


図 11 振動台実験による廃棄物層に作用する水平土圧(豊浦砂との比較)

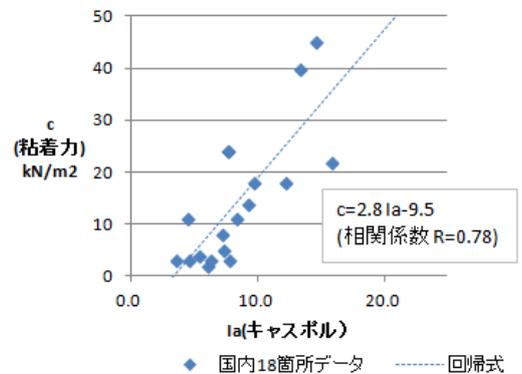


図 12 キャスポル(Ia)と一面せん断試験による粘着力(c)の関係

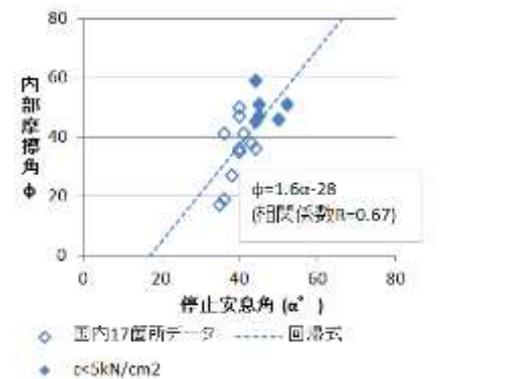


図 13 安息角試験による停止安息角と内部摩擦角の関係

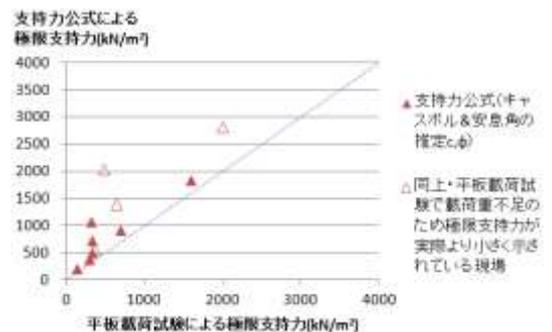


図 14 平板載荷試験と支持力公式による極限支持力の比較

図 16 では 2cm アンダー試料（篩い下）で、同じ注水量のケースと比較し、ピーク排水量が大きく、ピーク到達時間が短くなった。よって、最終処分場では、長尺のプラスチック等の貯留能力の大きい廃棄物が多い程、水処理等のピーク対応量を抑制できることが分かる。

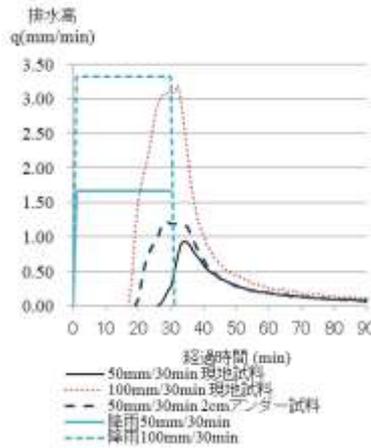


図 16 排水高 (q)-経過時間 (t)

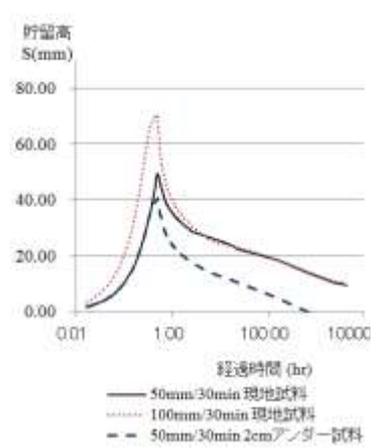


図 17 貯留高 (S)-経過時間 (t)

(関東①現場からの採取試料)

図 18 は、式 3~5 による排水高の計算値と実験値を比較したもので、式 3~5 により排水量をほぼ再現できており、現場レベルでの解析も可能になった。

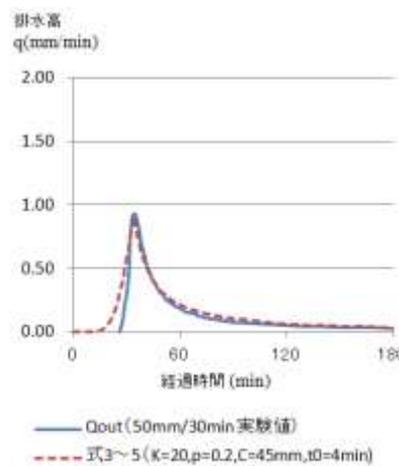


図 18 実験の排水高と式 3~5 計算値

なお、廃棄物表面等には長期間雨水の一部が貯留されることから、ボーリングや試掘によりこの水を捉えて、その水位を内部水位と見誤ることがあるので、斜面安定計算時等には留意が必要になる。

(5) 力学、環境面の実証実験

廃棄物地盤の利活用にあたっては、重量構造物設置時の不同沈下や重量構造物設置に伴うガス発生等の懸念を指摘されることが多い。このため、実際にプラスチック等が混入した廃棄物地盤（埋立終了後 1.5 年の安定型処分場）の表層覆土上にコンクリート版（径 7m、厚さ 1m、直接基礎）を設置して、小型風力発電設備（図 22）が建設されたときにコンクリート版に働く偏心荷重を作用させて、不同沈下の状況やガス発生の状況を調べた（図 19）。その結果、荷重的に最も厳しい暴風時荷重（風速 32m/s）の 15% 増の偏心荷重を作用させても、不同沈下は生じず（図 20；最大沈下量 4mm、載荷側と反載荷側の沈下量差 1mm）、ガス発生にも変化は生じなかった。

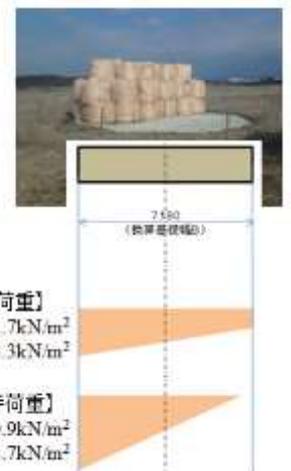


図 19 偏心載荷実験と載荷重

不同沈下が発生しにくい要因として、繊維状物等の繋がりにより土砂地盤よりも遙かに広い範囲で荷重を受けていることが考えられる（図 21）。このことは、図 20 でコンクリート版から 6.5m 離れた地点でもコンクリート版とほぼ同様に沈下していることに加え、キャスポル影響範囲確認実験や室内力学実験からも推察された。

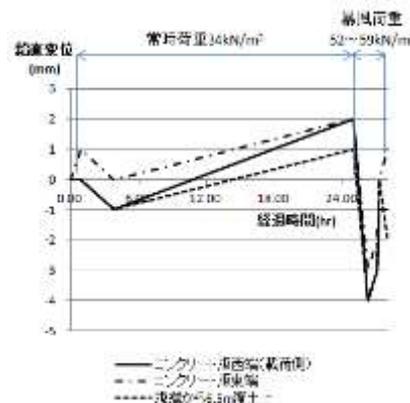


図 20 偏心載荷実験結果

(6) まとめ

研究結果をもとに廃棄物地盤評価マニュアル(案)を作成した。概略評価法と詳細評価法を示し、概略評価では簡易な試験による支持力推定方法等を示した。プラスチック等が混入した廃棄物地盤は、柔らかいものの力学特性や水挙動の面で有利な点が多く重量構造物の設置にも十二分に対応できる地盤であることや、ガスによる構造物への影響等の留意事項を示した。



図 21 プラスチック等が混入した廃棄物地盤の荷重分担のイメージ



図 22 想定した小型風力発電設備 h=30m (Excel10 by TenArrows)

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

1) プラスチック等が混入した廃棄物地盤の力学特性の把握

未解明であったプラスチック等が混入した廃棄物地盤の支持力等の力学特性を明らかにした。長尺（概ね10cm以上）のプラスチック等が混入した廃棄物地盤は、土砂地盤に比べ柔らかく、沈下も長期間生じるものの、大きな支持力を有し、不同沈下も発生しにくいという非常に粘り強い特性(resilient)を有する。

2) 貯留、排水特性の把握

未解明であったプラスチック等が混入した廃棄物地盤の貯留、排水特性について、提案した貯留関数により説明できた。雨水は大きな空隙を伝わって、プラスチック等の表面等に貯留されながら流下し、一定量が流下した後の廃棄物表面等に貯留された水はゆっくりと流下する。貯留能力が大きい廃棄物（長尺プラスチック等）が多い程、ピーク排出量が小さく、ピーク到達時間が長くなり、水処理等のピーク対応量を抑制できる。

3) 廃棄物地盤の支持力等に関する新たな現場試験法の提案

廃棄物地盤の力学試験法は確立されていないなかで、廃棄物地盤の支持力等の強度評価に適した試験法として、キャスポル（衝撃加速度試験）、安息角試験、空隙試験等を新たに提案できた。これらの試験法はいずれも経済性に優れる。

(2) 環境政策への貢献

1) 未利用廃棄物地盤の利活用の促進

研究成果として廃棄物地盤の試験・評価法を示した廃棄物地盤評価マニュアル(案)を提示した。廃棄物地盤評価マニュアル(案)では、廃棄物地盤の利活用の可能性を探るための概略評価方法と、具体的に構造物の設置等に向けた検討時等に行う詳細評価方法に分けて、その手順を示した。これにより、検討の初期段階に廃棄物地盤の利活用の可能性を安価な試験で知ることができる（概略評価）とともに、具体的な構造物設置等に向けた検討時には廃棄物地盤に適した合理的な試験により基礎形状の設計等のための地盤調査が可能になる。

2) マニュアル(案)を活用した地盤調査等の経済的な実施

廃棄物地盤評価マニュアル(案)に提示した衝撃加速度試験（キャスポル）、安息角試験、空隙率試験、平板載荷試験等の試験や解析評価が適切に行われるようになることで、経済的な現場調査・解析が可能になる。

3) 産業廃棄物最終処分場や不法投棄等現場の合理的な監視等

本研究で、地盤中の排水特性や、沈下特性、発生ガスによる影響等の評価法を提示したことにより、産業廃棄物安定型処分場や不法投棄現場等の合理的な監視や、迅速な対策実施に結びつく。

4) 最終処分場の合理的な設計・管理への貢献

廃棄物地盤評価マニュアル(案)によって適切な地盤評価を行うことで、合理的な埋立断面（埋立高、斜面勾配）や擁壁等の設計に結びつく可能性があり、わが国の処分場容量確保のための一助になることが期待できる。

5) 震災廃棄物、災害廃棄物のリサイクル促進

本研究で得られた強度特性等の知見の活用により、震災廃棄物や今後も発生が想定される災害廃棄物の適材適所の利用等、一層のリサイクル促進に寄与することが期待できる。

6) アジア地域等への技術移転

わが国の廃棄物地盤の力学評価方法等を提示したことで、アジア地域への技術移転が期待できる。

<行政が既に活用した成果>

1) 静岡県内の不法投棄現場での低コスト支障除去対策の実施

中部地方の斜面崩落のおそれのあった不法投棄等現場にて、本研究で検討を進めている安息角試験法を実施して、当該地での安定勾配を行政に提示することにより、行政による低コスト支障除去対策が実施できた。本事案では、行政は数百万円の地盤調査費を計上して現場調査を実施したうえで、対策を検討するつもりであったが、安息角試験法で地盤評価を行うことによって、行政の負担は試験用の重機調達費用のみの10万円程度で済んだ。（参考資料：第36回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集 p343-345）

<行政が活用することが見込まれる成果>

現在、特になし。（今後、「廃棄物地盤評価マニュアル(案)」を周知することにより、行政での活用を推進する。）

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付論文>

- 1) 川井晴至, 島岡隆行, 坂口伸也, 山脇敦: 廃棄物埋立地盤中の軟プラスチックが有する補強効果に関する基礎的研究, ジオシンセティックス論文集, 第 29 巻, pp.169-176, 2014.
- 2) 川井晴至, 島岡隆行, 坂口伸也, 山脇敦: 廃棄物埋立地盤中の軟プラスチックが有する補強効果に関する基礎的研究 2, ジオシンセティックス論文集, 第 30 巻, pp.125-132, 2015.
- 3) Seiji Kawai, Takayuki Shimaoka and Shinya Sakaguchi, Behavior of soft plastic in illegally dumped solid waste according to effective stress changes, The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (15ARC), 2015.11(掲載予定、査読済み)
- 4) K. Omine and S. Sigimoto, Simple estimation method of in-situ strength of sedimentary solid waste ground, The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, (2015.11)
- 5) S. Miyamoto and K. Omine, Strength evaluation of solid waste material included various fibrous materials, The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, (2015.11)
- 6) Atsushi Yamawaki, Kiyoshi Omine, Yoichi Doi and Mikio Kawasaki, Slope Stability of Solid Waste Layers in Japan and Asia, Modern Environmental Science and Engineering, Volume2, Number1, January 2016, pp.23-30

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) Kiyoshi Omine, Atsushi Yamawaki, Mikio Kawasaki, Youichi Doi, Satoshi Sugimoto, and Banri Nagaura, Development of in-situ direct shear and earth pressure tests for estimation of strength of solid waste materials, Proc. of the 13 Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering, p.151-155, Sapporo, (2014, 5)
- 2) 川井晴至, 島岡隆行, 坂口伸也, 山脇敦: 廃棄物埋立地盤に含まれる軟プラスチックの挙動に関する研究, 平成 24 年度研究討論会,(2014.5) (ポスター)
- 3) 長浦 万理, 大嶺 聖, 杉本 知史, 亀井 耀平, 山脇 敦: 堆積廃棄物地盤の現場強度の簡易推定法, 第 49 回 地盤工学研究発表会, 北九州, (2014, 7)
- 4) S. Miyamoto, N. Yasufuku, R. Ishikura, K.Omine, S. Kawai, A. Yamawaki: In-situ Shearing Response and Shear Strength of Various Solid Waste Ground Focused on Fibrous Materials Composition, The International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro, Cambridge, (2014. 9)
- 5) 川井晴至, 島岡隆行, 坂口伸也, 山脇敦, プラスチックを多く含む廃棄物埋立地盤の土粒子の密度試験, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 広島,(2014, 9)
- 6) 川井晴至, 島岡隆行, 坂口伸也, 山脇敦: 廃棄物埋立地盤中の有効応力変化に伴う軟プラスチックの挙動に関する研究, 第 25 回廃棄物資源循環学会, 広島, (2014, 9), p.455-456
- 7) 山脇敦, 島岡隆行, 大嶺聖, 土居洋一, 川井晴至: プラスチック等を含む廃棄物地盤の空隙測定と沈下特性等に関する一考察, 第 25 回廃棄物資源循環学会, 広島, (2014, 9), p.457-458
- 8) 土居洋一, 山脇敦, 川崎幹生, 小林優子: 篩分け堆積廃棄物の安息角試験結果を用いた斜面安定性評価の検討, 第 25 回廃棄物資源循環学会, 広島, (2014, 9), pp459-460
- 9) Kiyoshi Omine, Atsushi Yamawaki, Mikio Kawasaki, Youichi Doi, Satoshi Sugimoto, and Banri Nagaura: Estimation of Strength of Solid Waste Materials by In-Situ Direct Shear and Earth Pressure Tests 7th International Congress on Environmental Geotechnics, Australia, (2014,11)
- 10) 山脇敦, 土居洋一: 廃棄物堆積現場の斜面安定性評価法と低コスト対策事例, 第 36 回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, (2015, 1), p.343-345
- 11) 川井晴至, 島岡隆行, 坂口伸也: 廃棄物埋立地盤の物理組成が圧縮強度の発現に及ぼす影響, 第 11 回 環境地盤工学シンポジウム発表論文集, (2015,7), p.153-160
- 12) 山脇敦, 土居洋一, 川崎幹生, 小林優子: プラスチック等を含む廃棄物地盤の沈下と水挙動に関する現場及びカラム実験, 第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 福岡, (2015, 9), 講演原稿集 pp491-492

- 13) Atsushi Yamawaki, Kiyoshi Omine, Yoichi Doi and Mikio Kawasaki : Slope Stability of Solid Waste Layers inside and outside of Japan, ISWA15 World Congress Antwerp, ベルギー, (2015,9)
- 14) Kiyoshi Omine, Atsushi Yamawaki, Yoichi Doi and Mikio Kawasaki : Simple testing method for evaluating in-situ strength of solid waste materials by horizontal resistance of short piles (ポスター) , ISWA15 World Congress Antwerp, ベルギー, (2015,9)
- 15) Kiyoshi Omine, Satoshi Sugimoto and Atsushi Yamawaki, In-situ tests for slope stability of solid waste deposit, Proc. of 2nd Japan-India Workshop in Geotechnical Engineering - Geotechnics for Resilient Infrastructure – Fukuoka, (2015.11)

7. 研究者略歴

研究代表者：山脇 敦

武蔵工業大学工学部卒業、現在、公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団 適正処理・不法投棄対策部長
研究分担者

1) 大嶺 聖

九州大学大学院博士課程卒業、現在、長崎大学大学院工学研究科 教授

2) 土居 洋一

宇都宮大学大学院博士課程卒業、現在、長野県短期大学 教授

3) 川崎 幹生

北海道大学大学院博士課程卒業、現在、埼玉県環境科学国際センター 専門研究員

3K133011 プラスチック等が混入した弾性廃棄物地盤の力学及び環境特性に関する研究

【要旨】

本研究は、産業廃棄物安定型最終処分場等のプラスチック等が混入した廃棄物地盤を主な対象として、その力学特性や環境特性を調べ、支持力等の評価方法や地盤利用方法を提案することを目的として実施した。12 現場 19 箇所での力学試験等や室内での振動台実験、各種カラム実験等により、強度等の力学特性と水挙動、ガス発生等の環境特性を整理した。廃棄物地盤の力学特性や水挙動は、地盤中のプラスチック等の繊維状物等の混入状況で大きく異なり、焼却灰・燃え殻等による地盤は固く土砂地盤に類似した特性を有するが、プラスチック等の繊維状物等（概ね 10cm 以上）を含んだ地盤は変形しやすい反面、せん断抵抗が大きく粘り強い(resilient)特性を有する。水挙動もプラスチック等のサイズや量に左右され、プラスチック等が混入した地盤では、雨水は廃棄物表面に貯留しながら流下し、一定量は廃棄物表面等に長時間貯留する。

プラスチック等が混入した廃棄物地盤については、軟らかく利用は困難との意見や不同沈下への懸念が専門家から寄せられている。このため、埋立終了後 1 年半経過した安定型処分場で、小型風力発電設備基礎に相当するコンクリート版（径 7m、厚さ 1m）を設置して実証実験を行った。同設備の暴風時に働く荷重を作用させる偏心載荷実験を行ったが、不同沈下の発生は無かった。この要因として、繊維状物等の繋がりにより土砂地盤よりも遙かに広い範囲で荷重を受けていることが複数の実験結果から確認できた。また、載荷実験時のガス発生に変化はなかった。

現場試験法について、沈下量推定のための現場空隙率試験（新規開発）、支持力評価のための安息角試験、衝撃加速度試験（キャスポル）、平板載荷試験の有効性を確認した。雨水排水特性については提案した貯留関数式により排水量を再現できた。これら試験評価法等を整理し「廃棄物地盤の利活用のための地盤評価マニュアル(案)」を提示した。これにより、風力発電設備の設置や老朽化した水処理施設の廃棄物地盤上への移設等による廃棄物地盤の利活用が進むことを期待する。

1. はじめに

プラスチック等が混入した廃棄物地盤は、産業廃棄物安定型最終処分場（全国に約 1200 箇所）や不法投棄支障除去現場、災害廃棄物仮置場等、多数存在するものの、こうした地盤は軟らかく利用は難しいと考えられていたこと等から、重量構造物設置等による利活用はほとんどなされていない状況にある。また、一般廃棄物最終処分場では焼却灰を主とした埋立になっていること等を背景として、産業廃棄物安定型最終処分場等のプラスチック等が混入した廃棄物地盤に関する力学面等の研究は十分にはなされていない。このような中、平成 22～24 年度に環境研究総合推進費補助金で実施した「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価」¹⁾²⁾によりプラスチック等が混入した廃棄物地盤が非常に高い斜面安定性を有することを把握し、こうした地盤で重量構造物設置等による利活用の可能性があることが推察された。

本研究は、プラスチック等が混入した廃棄物地盤を対象にして、斜面安定性以外の力学面の未検討部分の支持力・沈下特性等に関する研究と、地盤利用の際に留意が必要となる水、ガス等の環境面の研究を併せて行うことにより、廃棄物地盤の有効利用のための地盤評価方法の提案を行うものである。

本研究で、廃棄物地盤の評価マニュアル(案)を提示することにより、産業廃棄物安定型処分場等の未利用廃棄物地盤での重量構造物設置等による有効活用が進むとともに、それによって地域貢献や周辺住民の処分場への理解の醸成等の効果も期待できる。また、不法投棄等現場は全国に未だ約 1,600 万トンの残存し、行政には斜面崩壊や有害物流出等による生活環境保全上の支障が生じるおそれについての監視や必要に応じた対策が求められている。本研究によりこうした現場での水・ガスの挙動やその影響等を予め把握できれば、合理的な監視、対策に結びつく。

本研究により概ね廃棄物力学全般の基礎研究がなされることから、多方面への波及効果も期待でき、例えば、処分場の貯留構造物の経済設計や有効な埋立方法の確立等に結びつく可能性がある。また、材料分野、建設分野等を含めて関連研究が進むことも期待できる。さらに、このような研究は、海外を含めてもみあたらず、研究成果は廃棄物地盤が多く形成され斜面崩壊が頻繁に発生しているアジア地域等の海外でも活用されることが期待できる。

2. 研究目的

本研究は、安定型処分場等のプラスチック等が混入した廃棄物地盤の力学特性や環境特性を明らかにし、その評価方法を提案し、適切かつ経済的な廃棄物地盤の利用・構築（例えば風力発電設備の設置等）の可能性について検討し、研究成果として「プラスチック等が混入した廃棄物地盤の利活用のための地盤評価マニュアル(案)」を提示することを目的とする。

なお、廃棄物地盤の利活用のための評価にあたっては、検討初期段階では地盤利用の可能性（目安）を広範囲かつ安価に把握することが合理的であるため、地盤の概略評価方法についての研究も行う。

項目別の研究目的は次の①～⑥のとおり。

- ① 廃棄物地盤の組成等の条件別の基本的力学特性の把握
- ② 廃棄物地盤の支持力、沈下量、耐震性等の評価方法の提案
- ③ 同上、概略評価方法の提案
- ④ 廃棄物地盤利用にあたっての環境影響評価方法の提案

- ⑤ 廃棄物地盤の利用・構築の可能性についての提案
- ⑥ 「プラスチック等が混入した廃棄物地盤の利活用のための地盤評価マニュアル(案)」作成

3. 研究方法

(1) 研究体制

研究は、表1のとおり研究項目別に必要実施事項を整理したうえで、必要実施事項別に専門の研究者が担当することにより実施した。

表1 研究実施体制

研究項目	担 当	主な実施事項
基本的力学特性の把握	山脇 敦(産廃財団 ^{注1})	現場空隙率試験(新規提案)、とりまとめ
	大嶺 聖(長崎大学)	現場一面せん断試験、現場土圧試験
	川井晴至、島岡隆行(九州大学)	組成と強度に関する室内実験
支持力、沈下量、耐震性等の評価方法提案	山脇 敦(産廃財団 ^{注1}) 土居洋一(長野県短大)	平板載荷試験、沈下計測、注水-沈下実験、とりまとめ
	大嶺 聖(長崎大学)	振動台実験
	勝見 武(京都大学)	各種試験・解析支援
現場概略試験法の提案	土居 洋一(長野県短大) 山脇 敦(産廃財団 ^{注1})	安息角試験、衝撃加速度試験(キャスポル)、同影響範囲把握試験、同衝撃伝搬画像確認実験
	山脇 敦(産廃財団 ^{注1})	現場空隙率試験、とりまとめ
	土居 洋一(長野県短大)	簡易組成分析(新規提案)
環境影響の評価方法提案	川寄幹生(埼玉県環境センター ^{注2})	ガス・温度・水質測定
	山脇 敦(産廃財団 ^{注1}) 土居 洋一(長野県短大)	カラム注水-排水実験、とりまとめ
	川井晴至、島岡隆行(九州大学)	間隙流速に関する室内実験
廃棄物地盤利用の可能性の提案	山脇 敦(産廃財団 ^{注1}) 坂口伸也(前田建設工業(株)) 川寄幹生(埼玉県環境センター ^{注2})	利用事例調査、コンクリート版設置による実証実験(力学面：坂口、環境面：川寄、統括：山脇)
廃棄物地盤評価マニュアル案	山脇 敦(産廃財団 ^{注1})	とりまとめ

注1；公益財団法人 産業廃棄物処理事業振興財団

注2；埼玉県環境科学国際センター

(2) 研究対象

廃棄物組成：プラスチック等の繊維状物等が混入した廃棄物地盤を主たる対象とする。
時間尺度(time scale)：廃棄物地盤の有効利用方法の一つである風力発電設備の設計供用期間は20年³⁾であるため、概ね20~30年程度以下の時間尺度を研究対象とし、30年を超えるような超長期的なプラスチック等の廃棄物の劣化等は本研究の対象外。

(3) 研究項目と研究方法

1) 研究の基本フロー

産業廃棄物安定型処分場等のプラスチック等が混入した廃棄物地盤を形成する個々の廃棄物サイズは土粒子に比べ遙かに大きいことから、室内で現場を忠実に再現するためには実験設備が大規模・高額になり、実施が困難になる。このため、実験は現場試験を中心に行って、地震時特性、水挙動等の把握を目的とした室内実験を補完的に実施する。また、力学特性の把握にあたっては、既往の斜面安定研究¹⁾で得られたデータも活用する。

現場試験法については、サイズその他、形状や伸縮・圧縮性なども土砂地盤と異なるため、既存の土質調査法をそのまま流用できないことが多く、廃棄物地盤に適した力学試験法の検討を含めて研究を行う。

廃棄物地盤の活用にあたっては、不同沈下や環境面での懸念があることから、研究の最終段階で実証実験を行って、不同沈下の発生状況やガス等への影響を確認して、「プラスチック等が混入した廃棄物地盤の利活用のための地盤評価マニュアル(案)」を提示する。(研究の基本フローを図1に示す)

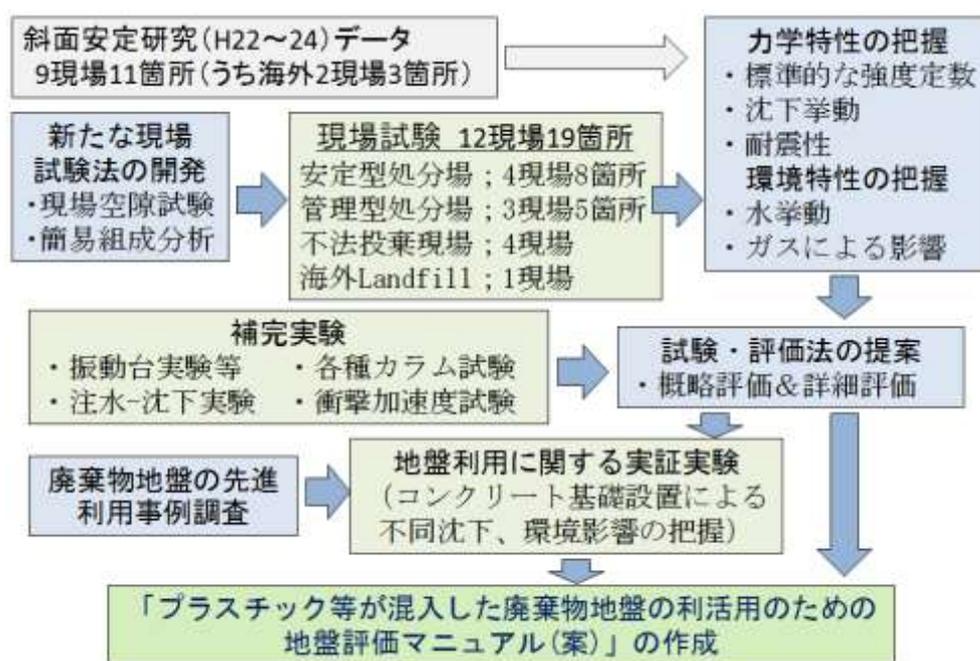


図1 研究の基本フロー

2) 廃棄物地盤の管理者側の力学的なニーズと現場実験場所

廃棄物地盤（処分場等）の管理者は、跡地利用の他、えん堤の安定性等、多くの力学的な課題を抱えている(表3)。本研究は、これらの課題へ環境面も含めて対応できるよう研究を進めるものであり、平成25～27年度の3カ年で安定型処分場等の計12現場、19箇所で行った。このうち国内での力学試験は10現場で、これらの処分場等が抱える主たる課題としては、跡地利用や重量物（除染土壌）保管をあげたところが6箇所、えん堤の安定性や適切な埋立形状確保（斜面安定性を含む）をあげたところが4箇所であった。

3) 研究項目と項目別の研究課題、研究方法

研究項目別に目的達成のための研究課題とその研究方法を整理したのが表2である。研究は現場試験によるデータ蓄積を主とし、現場試験だけでは把握が困難な耐震性や水挙動に関しては室内実験により研究を進める。現場試験場所と各現場での実施事項等を表3に、実施した室内実験の実施事項を表4に示す。

廃棄物地盤は組成やサイズが力学特性、環境特性へ与える影響が大きいことが想定されるため、現場試験場所は、多様性を確保できるよう配慮し、安定型処分場4現場、管理型処分場3現場、不法投棄4現場を選定した。また、海外の埋立地(Landfill)では、度々大規模な斜面崩壊が発生するなど、わが国の廃棄物地盤と様相が異なることから、わが国の廃棄物地盤の特徴をより明確にすることを目的に、海外の埋立地での現場試験も行った。なお、各現場の試験項目の選定にあたっては、管理者が抱える課題に対応できる試験項目を選定した。

表2 研究項目と各項目別の課題、研究方法

研究項目	主な研究課題	研究方法
① 組成等の条件別の基本的力学特性の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物組成(種類、サイズ等)と力学特性の関係把握 ・廃棄物層中の密度、空隙と力学特性の関係把握 	<ul style="list-style-type: none"> ○廃棄物組成の異なる種々の現場での強度試験 ○各現場での組成分析、密度試験、空隙率測定 ○補完的室内実験(一軸圧縮試験、土槽実験)
② 支持力、沈下量、耐震性等の評価方法	<ul style="list-style-type: none"> ・支持力特性、沈下特性、耐震特性の把握 ・廃棄物地盤に適した現場試験法の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ○種々の現場での強度試験(平板載荷試験(図2)、一面せん断試験等)の実施 ○現場での継続的な沈下量計測 ○現場での注水-沈下実験(図3) ○空隙率測定法の開発と種々の現場での試験の実施 ○振動特性把握の振動台実験
③ 現場概略評価方法	<ul style="list-style-type: none"> ・初期検討時に合理的に実施可能な概略評価方法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> ○安息角試験、衝撃加速度試験(キャスポル)の適用性の検討 ○補完的室内実験(衝撃加速度試験の影響範囲確認実験及びアクリル槽による画像分析) ○簡易組成分析法(画像処理による)の検討
④ 廃棄物地盤の環境影響評価方法	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物地盤の活用時(重量物設置等)に必要な環境面(ガス、水)の評価方法の検討 ・汚染拡散や沈下との関係が大きいとみられる地盤中での水の貯留、排水に関する基本的な特性の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ○カラムでの注水排水実験(図4) ○補完的室内実験(トレーサ試験) ○廃棄物地盤でのガス発生と構造物等への影響確認試験 ○廃棄物地盤上に設置されたコンクリート版による環境面(ガス等)への影響把握
⑤ 廃棄物地盤の利用・構築の可能性	<ul style="list-style-type: none"> ・プラスチック等が混入した廃棄物地盤に適した有効利用法の把握 ・実利用を想定した力学面の検討事項、必要施設規模の提案 ・実利用時の課題整理 	<ul style="list-style-type: none"> ○海外等の廃棄物地盤の有効利用事例や設計法等の収集 ○廃棄物地盤上の風力発電設備のために必要となるコンクリート基礎の設計・築造 ○廃棄物地盤上に設置されたコンクリート版の不同沈下、環境影響(ガス等)に関する実証実験(図5)



図2 平板載荷試験



図3 注水-沈下実験



図4 カラムでの注水排水実験



図5 実証実験(載荷実験)

表 3 現場実験場所と試験項目、各現場の力学上の課題

No	現場名	現場種類	廃棄物種類	試験実施年月	担当者	試験項目	現場が抱える力学上の課題		
1	東北① (図 6)	産業廃棄物安定型処分場	プラスチック、がれき類等	H26.12月	山脇、大嶺、川寄	1、2、3、4、5、6	埋立可能高さ適切な埋立形状の確保		
2	東北② (図 7)	産業廃棄物管理型処分場	燃え殻、破砕無機残渣等	H27.10月	山脇、大嶺、土居、川寄	1、2、3、4、5、6	埋立終了後の跡地利用		
3	東北③ (図 8)	旧河川堤防(不法投棄)	がれき類等(土砂主体)	H25.7月	山脇、大嶺、土居、川寄	1、2、3、4、5	廃棄物地盤上での除染土壌の一時保管		
4	関東① (図 9)	産業廃棄物安定型処分場	プラスチック、ゴム、金属等	H27.4月	山脇、大嶺、土居、川寄	1、2、3、4、5、6	埋立終了後の跡地利用 強度データ取得		
5	関東② (図 10)	産業廃棄物管理型処分場	燃え殻、汚泥、プラスチック等	H27.2月	山脇、大嶺、土居、川寄	1、2、3、4、5、6	えん堤の安定性適切な埋立形状の確保		
6	中部① (図 11)	産業廃棄物安定型処分場(汚泥受け入れのため水処理施設有り)	プラスチック、がれき類、土砂等	H25.8月 H25.11月 H26.4月 H26.8月	山脇、大嶺、土居、川寄	1、2、3、4、5、6、7、8(H26.8月)	埋立終了後の跡地利用(風力発電設備設置、水処理施設移設)		
				H27.3月				山脇、坂口、川寄、土居、大嶺	風車基礎設置 ガス等計測
				H27.12月 ~H28.1月					載荷実験 ガス等計測
7	中部② (図 12)	産業廃棄物管理型処分場	燃え殻等(プラスチック等混入)	H27.3月	山脇、土居、川寄	1、2、3、4、5、6	重量構造物設置(廃棄物処理設備設置済み)		
8	中部③ (図 13)	不法投棄	がれき類主体、プラスチック	H26.6月	山脇、土居	4	くずれと安定勾配		
9	中国 (図 14)	産業廃棄物安定型処分場	プラスチック等	H27.8月	山脇、大嶺、土居、川寄	1、2、3、4、5、6、7	埋立終了後の跡地利用		
10	九州 (図 15)	不法投棄(旧安定型処分場)	建設解体廃棄物(プラスチック少なく、土砂主体)	H26.12月	大嶺、山脇	2、3、5	斜面崩壊		
11	トルコ (図 16)	Sanitary Landfill	生ごみ、プラスチック、がれき類等	H26.8月	山脇、大嶺、土居、川寄	3、4、5、6	斜面崩壊と安定勾配 将来的な跡地利用		
12	関東③ (図 17)	不法投棄(対策済)	破砕物、がれき類、プラスチック等	H26.12月 -H27.4月	川寄	ガス影響調査(力学試験なし)	合理的な監視(行政ニーズ)		

凡例) 主な試験項目

- 1: 平板載荷試験 2: 一面せん断試験 3: 現場土圧試験 4: 安息角試験
5: 衝撃加速度試験 6: 空隙率試験 7: 簡易組成分析(画像解析) 8: 注水-沈下実験



図 6 東北①現場
(安定型処分場)



図 7 東北②現場
(管理型処分場)



図 8 東北③現場
(旧河川堤防・不法投棄)



図 9 関東①現場
(安定型処分場)



図 10 関東②現場
(管理型処分場)



図 11 中部①現場
(安定型処分場)



図 12 中部②現場
(管理型処分場)



図 13 中部③現場
(不法投棄)



図 14 中国現場
(安定型処分場)



図 15 九州現場
(不法投棄)



図 16 トルコ現場
(Sanitary Landfill)



図 17 関東③現場
(不法投棄)

表 4 実施した室内実験と目的

No	実験名	実験の目的	試験実施年月	実験場所	担当者
1	一軸圧縮試験	・プラスチック混入と圧縮強度の関係把握	H25	九州大学	川井、島岡
2	傾斜地を再現した土槽実験	・プラスチックの補強効果の把握	H25	九州大学	川井、島岡
3	振動台実験	・廃棄物地盤の地震時挙動の把握 ・地震時に擁壁等へ作用する土圧の把握	H27.10月	九州工業大学	大嶺
4	キャスポル影響範囲確認実験	・キャスポル（衝撃加速度試験）の広さ方向、深さ方向の影響範囲の把握及びアクリル槽による画像分析 ・土砂地盤との影響範囲の差異の確認	H28.2月～3月	長野県短期大学	土居、山脇
5	注水排水実験	・廃棄物地盤中の水挙動（貯留・排水特性）の把握	H26.11月～H28.3月	長野県短期大学	山脇、土居、川寄
6	トレーサー試験	・地盤中の平均間隙流速の把握	H26	九州大学	川井、島岡

4. 結果及び考察

(1) 基本的力学特性の把握

1) 現場力学試験結果

a. 現場力学試験結果の一覧

研究の3か年に11現場18箇所で行った力学試験で得られた結果を表6~7に示す。さらに、既往の斜面安定性研究(平成22~24年度)で得られている値を加えた力学データ一覧(19現場29箇所の値)を表8に示す。表8をもとに、プラスチックの有無や廃棄物のサイズ(概ね10cmのプラスチック等の繊維状物等の混入の有無)で分類したのが表5である。また、表5から作成した地盤分類別のレーダーチャートを図18に示す。表5、図18から、10cm超のプラスチック等が混入した現場と焼却灰主体の現場とは力学特性が大きく異なることが分かる。

表5 廃棄物地盤の地盤分類別の力学強度の平均値と範囲(19現場29箇所の試験結果)

組成	廃棄物サイズ	区分	箇所数	堆積時間 年	含水比 %	湿潤密度 g/cm ³	実密度 g/cm ³	空隙率 %	極限支持力 kN/m ²	地盤反力係 数 MN/m ³	粘着力 kN/m ²	内部摩擦角 °	停止安息角 °	キャスボル Ia
プラスチック混入	含10cm超	安定型処分場(埋立後1年未満)	4	0.3 (0~0.9)	20 (10~25)	1.3 (1.1~1.5)	2.4 (2.0~2.7)	37 (29~41)	283 (140~340)	8 (5~12)	12 (2~24)	42 (27~59)	40 (36~44)	6.5 (3.7~8.3)
		安定型処分場(埋立後1年以上)	5	8.7 (1.8~15.0)	28 (19~42)	1.5 (1.4~1.6)	2.4 (2.2~2.9)	18 (14~22)	955 (480~2000)	39 (8~111)	15 (5~24)	37 (35~41)	42 (40~44)	9.5 (7.2~15.8)
		不法投棄	4	6.5 (1.5~13.0)	21 (13~31)	1.0 (0.7~1.2)	----	----	----	----	3 (3~4)	49 (46~51)	48 (45~52)	5.0 (3.6~6.3)
		計	13	5.5	23	1.3	2.4	26	619	24	11	42	43	7.2
プラスチック混入	概ね10cm以下	管理型処分場	3	0.1 (0.1~0.1)	25 (19~31)	1.3 (1.1~1.5)	2.6 (1.5~4.1)	29 (17~49)	950 (300~1600)	30 (9~51)	40 (40)	50 (50)	37 (34~40)	11.3 (7.8~13.3)
		震災廃棄物(選別残渣)	1	0.2	40	1.1	----	----	----	11	47	40	4.5	
		計	4	0.2	29	1.2	2.6	29	950	30	26	49	38	9.6
焼却灰等・プラスチック無	概ね30cm以下	管理型処分場	3	4.5 (0.8~12.0)	27 (22~32)	1.4 (1.2~1.5)	3.2 (2.8~3.6)	39 (38~39)	565 (565)	179 (179)	58 (45~70)	19 (19)	36 (35~36)	17.9 (14.6~20.0)
		不法投棄	4	7.9 (0.5~12.0)	21 (18~23)	1.7 (1.4~2.0)	----	----	360 (360~)	59 (59)	12 (3~18)	32 (17~45)	38 (35~44)	9.7 (7.8~12.2)
		一般廃棄物処分場	1	40.0	14	1.1	----	----	----	----	----	----	36	6.7
		計	8	10.6	22	1.5	3.2	39	463	119	30	29	37	12.8
合計			25	6.3	24	1.3	2.5	29	648	41	17	40	40	9.2
海外(Landfill) 10cm超のプラ有り			4	3.7 (0.2~7.0)	50 (39~72)	1.1 (1.0~1.2)	1.7 (1.7)	28 (28)	----	----	5 (4~6)	43 (33~43)	41 (36~45)	4.5 (3.7~5.8)

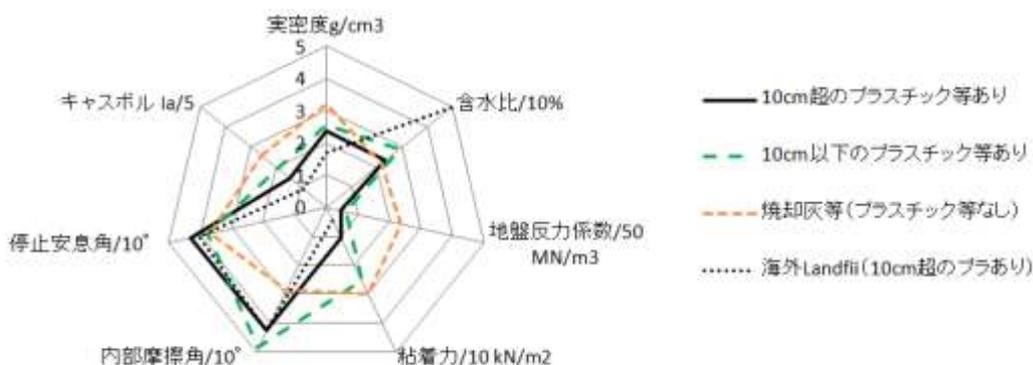


図18 廃棄物地盤の分類別の強度特性(19現場29箇所の試験結果による)

表 6 力学試験結果一覧（その 1 ; 安定型処分場）

現場名	東北①	中部①					関東①		中国	
区分	安定型処分場	安定型処分場					安定型処分場		安定型処分場	
処分場等の管理者が抱える力学上の課題	埋立可能高等、適切な埋立形状	跡地利用（風力発電設備等）					跡地利用、適切な埋立のための基礎データ取得		跡地利用	
堆積時間	3.5～4年	埋立直後	1年	2年	8年	15年	1ヶ月	15年	3ヶ月	
組成	プラ 54%, ガラス陶磁器 24%, がれき類 21% 注7)	プラ 14%, 土砂 57%, がれき類 25%, ゴム・皮革 1%, 金属類 1%, その他 2% (堆積後 8 年経過した不適正処理物を掘り返して埋め直したもので組成はすべて同様)					プラ 17%, 土砂 43%, がれき類 28%, 金属 5%, 他 7%	プラ 7%, 土等 2cm 以下 43%, 石・陶磁器 44%, 他 6%	プラ 6%, 土等 2cm 以下 66%, 石・陶磁器類 18%, 他 10%	プラ 6%, 土等 2cm 以下 59%, 石・陶磁器ガラス 30%, 他 5%
廃棄物のサイズ	15cm 以下	30cm 超のプラ、がれきを含む					15cm 以下	長尺有り	長尺有り	
湿潤密度 (g/cm ³)	1.4	1.2	1.4	1.4	1.6	1.5	1.5	1.6	1.1	
含水比	42%	21%	23%	29%	19%	23%	10%	28%	25%	
空隙率	16%	41%	29%	22%	14%	17%	37%	21%	39%	
極限支持力 (kN/m ²)	>2000 注4)	140	320	-----	>480 注4)	>640 注4)	330	700	340	
地盤反力係数 (MN/m ³)	111	5	8	-----	8	12	12	24	8	
粘着力 c (kN/m ²)	7～36 注6)	-----	2	8	18	5	24 注6)	24	11	
内部摩擦角 φ(°)	41 注6)	-----	59	36	36	38	41 注6)	35	27	
停止安息角(°)	41	40	44	40	44	43	36	40	38	
キャスポル Ia	15.8	3.7	6.1	7.2	9.7	7.3	7.7	7.6	8.3	

表 7 力学試験結果一覧（その 2 ; 管理型処分場、不法投棄、海外）

現場名	東北②	関東②	中部②		東北③	中部③	九州	トルコ
区分	管理型処分場	管理型処分場	管理型処分場		旧堤防・不法投棄	不法投棄	安定型・不法投棄	Sanitary Landfill
処分場等の管理者が抱える力学上の課題	跡地利用	えん堤の安定性、適切な埋立形状	利用等のための力学特性の把握		地盤上での除染土壌の一時保管	くずれと安定勾配	斜面崩壊	安定勾配、将来の跡地利用
堆積時間	10ヶ月	1ヶ月	1ヶ月		10年以上	数ヶ月	9年以上	6～8ヶ月
組成	表層 0.5m; 燃え殻 (その下 2m:煤塵)	プラ 8%, 土砂等 73%, がれき類 10%, その他 9%	プラ 13%, 土等 2cm 以下 78%, 石・陶磁器類 5%, 他 4%	プラ 1%, 土等 2cm 以下 65%, 石・陶磁器類 30%, 他 4%	がれき類等 (土砂主体)	建設解体廃棄物(がれき類主体、プラ混入)	がれき類・土砂等 100%	生ごみ 49%, 容器包装 24%, 可燃 18%, 灰 7% 注7)
廃棄物のサイズ	5cm 以下 (煤塵は粉体状)	最大 10cm 程度	最大 10cm 程度 (0～3cm が主)		10～30cm 超のがれきを含む	30cm 超のがれき、プラを含む	10～30cm 超のがれき含む	包装材は 30cm 程度
湿潤密度 (g/cm ³)	1.5 (1.2)	1.2	1.1	1.5	2.0	-----	1.7	1.0
含水比	22% (32%)	31%	26%	19%	18%	-----	-----	45%
空隙率	39% (38%)	49%	21%	17%	-----	-----	-----	28%
極限支持力 (kN/m ²)	(565)	1600	300	-----	>360 注4)	-----	-----	-----
地盤反力係数 (MN/m ³)	(179)	51	9	-----	59	-----	-----	-----
粘着力 c (kN/m ²)	45	40	-----	-----	15～12	-----	18	3.7 注6)
内部摩擦角 φ(°)	19	50	-----	-----	4～30	-----	33	52 注6)
停止安息角(°)	36(36)	40	34	36	35	36	-----	36
キャスポル Ia	14.6(19.1)	13.3	7.8	12.8	9.2	-----	12.2	4.2

注 1) 湿潤密度、含水比は「JGS1612 水置換による土の密度試験」による。

注 2) 空隙率は本研究で提案した現場空隙率試験法による。

注 3) 極限支持力、地盤反力係数は「JGS1521 地盤の平板載荷試験⁵⁾」による。

注 4) 載荷重不足のため極限支持力が得られる前に試験終了。

注 5) 粘着力、内部摩擦角、停止安息角、キャスポル I_a は「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案) (平成 24 年度環境研究総合推進費補助金研究事業総合報告書¹⁾・巻末資料)」に示した方法による。

注 6) 現場土圧試験による値。その他は一面せん断試験による値。

注 7) 埋立比率による組成。

表 8 現場力学データ一覧 (19 現場 29 箇所、既往研究分を含む)

試験年度	現場名	現場種類	試験場所	堆積時間	プラ混入率	廃棄物サイズ	湿潤密度	含水比	空隙率	廃棄物実密度	極限支持力	地盤反力係数	粘着力	内部摩擦角	停止安息角	限界安息角	キャスポル
				年	%	cm	g/cm ³	%	%	g/cm ³	kN/m ²	MN/m ³	kN/m ²	°	°	°	I_a
H22	上海	S. Landfill	GL.-1m	7.0	22	30cm以下	1.1	39	---	---	---	---	6	33	45*	---	4.3
			GL.-3m	7.0	9	30cm以下	1.2	45	---	---	---	---	4	43	45*	---	3.7
H23	(既)関東①	不法投棄		10.0	16	長尺物有り	1.2	31	---	---	---	---	3	46	50	60	6.3
H23	九州	不法投棄	中腹	9.0	0	30cm以下	1.4	23	---	---	---	---	3	45	44	50	7.8
H26			頂上	12.0	0	30cm以下	1.7	---	---	---	---	---	18	33	---	---	12.2
H23	(既)関東②	管理型処分場		12.0	2	30cm以下	1.4	---	---	---	---	> 70	0	35*	---	20.0	
H24	(既)中部①	不法投棄	プラ少	1.5	6	長尺物有り	1.2	21	---	---	---	---	4	51	45	53	5.4
			プラ多	1.5	---	長尺物有り	0.9	13	---	---	---	---	3*	51*	52	58	3.6
H24	(既)中部②	不法投棄		13.0	50*	長尺物有り	0.7	17	---	---	---	---	3*	47*	45	55	4.6
H24	(既)関西	一般廃棄物処分場		40.0	0	10cm以下	1.1	14	---	---	---	---	---	---	36	40	6.7
H24	(既)東北	震災廃棄物仮置場		0.5	0.4	7cm以下	1.1	40	---	---	---	---	11	47	40	45	4.5
H24	ジャカルタ	S. Landfill		0.2	多	30cm以下	---	72*	---	---	---	---	---	---	36	55	5.8
H26	東北①	安定型処分場		3.8	54*	15cm以下	1.4	42	16	2.3	> 2000	111	22*	41*	41	51	15.8
H25 ~ H26	中部①	安定型処分場	埋立直後	0.0	14	長尺物有り	1.2	21	41	2.5	140	5	---	---	40	51	3.7
			1年	0.9	14	長尺物有り	1.4	23	29	2.0	320	8	2	59	44	49	6.1
			2年	1.8	14	長尺物有り	1.4	29	22	2.4	---	---	8	36	40	46	7.2
			8年	8.0	14	長尺物有り	1.6	19	14	2.2	> 480	8	18	36	44	56	9.7
			15年	15.0	17	長尺物有り	1.5	23	17	2.2	> 640	12	5	38	43	51	7.3
H27	関東①	安定型処分場	1ヶ月	0.1	7	15cm以下	1.5	10	37	2.7	330	12	24*	41*	36	42	7.7
			15年	15.0	6	長尺物有り	1.6	28	21	2.9	700	24	24	35	40	46	7.6
H27	中国	安定型処分場		0.3	6	長尺物有り	1.1	25	39	2.2	340	8	11	27	38	46	8.3
H26	関東②	管理型処分場		0.1	8	15cm以下	1.2	31	49	4.1	1600	51	40	50	40	42	13.3
H26	中部②	管理型処分場	プラ多	0.1	13	10cm以下	1.1	26	21	1.5	300	9	---	---	34	38	7.8
			プラ少	0.1	1	10cm以下	1.5	19	17	2.1	---	---	---	---	36	38	12.8
H27	東北②	管理型処分場	燃え殻	0.8	0	10cm以下	1.5	22	39	3.6	---	---	45	19	36	40	14.6
			ばいじん	0.8	0	数mm粒状	1.2	32	38	2.8	565	179	---	---	36	38	19.1
H25	東北③	不法投棄		10.0	少量	30cm以下	2.0	18	---	---	> 360	59	14	17	35	37	9.2
H26	中部③	不法投棄		0.5	少量	長尺物有り	---	---	---	---	---	---	---	---	36	42	---
H26	トルコ	S. Landfill		0.6	24*	30cm以下	1.0	45	28	1.7	---	---	4*	52*	36	47	4.2

注 1) 「プラ混入率」の * は、埋立比率による値 (他は組成分析)

注 2) 「含水比」の * は、ポータブル測定器による値 (他は乾燥重量計測による値)

注 3) 「粘着力」「内部摩擦角」の * は、現場土圧試験による値 (他は一面せん断試験による値)

注 4) 「停止安息角」の * は、現場掘削土の盛り立て勾配 (他は本報告書で規定した測定法による値)

b. 現場力学試験結果についての考察

19 現場、29 箇所での現場力学試験結果（表 5～8、図 18 等）から、廃棄物地盤の力学特性について以下のとおりに考察した。なお、各力学試験結果の詳細と、それぞれの力学試験から得られる各強度定数に関する考察は、「(2) 支持力、沈下量、耐震性等の評価方法」、「(3) 現場概略試験方法」に示す。また、実際の廃棄物地盤の強度特性等に基づいた利活用の可能性については、「(5) 廃棄物地盤の利用・構築の可能性についての提案」に示す。

(廃棄物の組成、サイズと強度特性の関係)

○廃棄物地盤の力学特性は、廃棄物の組成やサイズにより左右され、とくにプラスチック等の繊維状物等が混入すると力学特性は大きく変化する（図 18、表 5）。

○地盤中にプラスチック等の繊維状物等が混入すると、地盤反力係数（単位沈下量あたりの必要載荷圧 \div ばね定数）や、キャスポル値（錘落下時の衝撃加速度； Ia ）が小さくなり（表 5）、地面を踏査したときに柔らかく感じられる地盤が形成される。

(10cm 程度以上のプラスチック等が混入した廃棄物地盤の強度特性)

○地盤中に 10cm 程度以上の長尺のプラスチック等の繊維状物等が混入すると、斜面の安定勾配を表す安息角が顕著に大きくなり（図 19）、急勾配斜面でも安定する地盤が形成される。

○長尺のプラスチック等が混入した地盤で斜面安定性が高くなることは既往研究¹⁾²⁾で、特有の引張抵抗に起因することを把握した。また、同研究で、現場での廃棄物引抜試験により廃棄物の長さが概ね 10cm 以上になると引抜抵抗が働くことを確認している。

○地盤中に働く引張抵抗は、地盤の支持力にも好影響を与えていることが推察され、10cm 超のプラスチック等が混入した地盤は柔らかい地盤であるにも関わらず、埋立後 1 年以上経過した地盤の極限支持力は焼却灰や燃えがら主体の地盤を上回っている（表 5）。

(焼却灰や燃えがらが主体の廃棄物地盤の強度特性)

○焼却灰や燃えがらが主体の地盤は、地盤反力係数、キャスポル値(Ia)や粘着力が大きく、硬い地盤が形成される。反面、安息角や内部摩擦角は小さく斜面安定性は 10cm 超のプラスチック等が混入した地盤に比べて低い（図 18、図 19、表 5）。

(10cm 以下の短いプラスチック等が混入した廃棄物地盤の強度特性)

○10cm 以下のプラスチック等が混入した地盤の地盤反力係数、キャスポル値(Ia)は、10cm 超のプラスチック等が混入した地盤と焼却灰主体の地盤の間の中間的な値を示す（図 18、表 5）。摩擦抵抗を表す内部摩擦角は、雑多な廃棄物の噛み合わせ効果等により焼却灰主体の地盤に比べて大きい。ただし、安息角は、10cm 以上のプラスチック等が混入した地盤よりもかなり小さく、焼却灰主体の地盤とほぼ同じ値を示す（図 19）。

(海外の Landfill とわが国の廃棄物地盤の強度特性の差異)

○海外の Landfill は、わが国の 10cm 以上のプラスチック等が混入した現場に近い強度定数を有するものの、生ごみ主体の埋立のため含水比は遙かに大きい（図 18、表 5）。過度な水分を含み飽和状態に近くなると斜面安定性は著しく低下する。わが国の廃棄物処分場や不法投棄等現場で大規模斜面崩壊の発生はほぼ皆無なのに対し、海外の Landfill で大規模斜面崩壊が頻発しているのは、主としてこの地盤中の水分量の差に起因する。

(10cm 超のプラスチック等が混入した廃棄物地盤の強度特性の経年変化)

○10cm 超のプラスチック等が混入した中部①現場（安定型処分場）では、堆積時間の経過とともに地盤中の空隙が少なくなり、地盤の極限支持力、地盤反力係数、キャスポル値(I_a)が顕著に増加し、値の増減幅が小さい停止安息角も若干の増加傾向を示した。地盤の極限支持力は、埋立終了後 1~2 年間の強度増加が著しく、その後は緩やかに強度が増加している（**図 20**）。今後データ蓄積がなされれば、空隙率の推移から支持力を推定できる可能性がある。

（空隙率や埋立方法等と支持力との関係）

○ただし、試験を実施した種々の廃棄物地盤全体でみると、空隙率と極限支持力の間には明確な関係は表れておらず（**図 21**）、空隙率のみから廃棄物地盤全般の強度や力学特性を判断することは現状では難しい。**図 21** で極限支持力が 2000kN/m^2 と突出している東北①現場は、プラスチック等と土砂を混合して徹底的な締め固めを行っている安定型処分場であり、支持力の発現には堆積時間や組成の他、埋立方法も大きく影響していると言える。

（まとめ）

○廃棄物地盤では概ね 10cm 超のプラスチック等の繊維状物等の混入によって硬度や斜面安定性等が左右される。概ね 10cm 超のプラスチック等が混入した地盤は、特有の引張抵抗により粘り強く弾性的(resilient)で、時間経過とともに空隙率が減少し支持力等が増加する。また、埋立終了後 1~2 年経過すれば重量構造物設置等の地盤利用が支持力的には十分可能となるが、地盤反力係数が小さく構造物設置時の沈下に対する検討が重要になる。

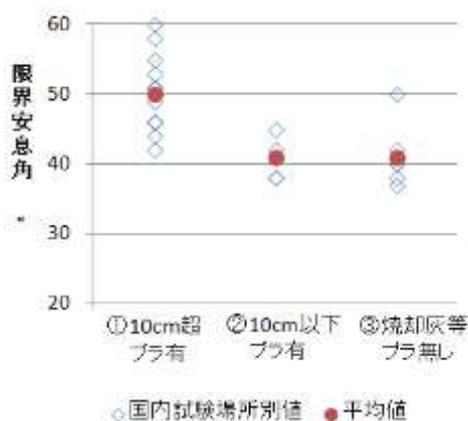


図 19 廃棄物地盤分類別の限界安息角

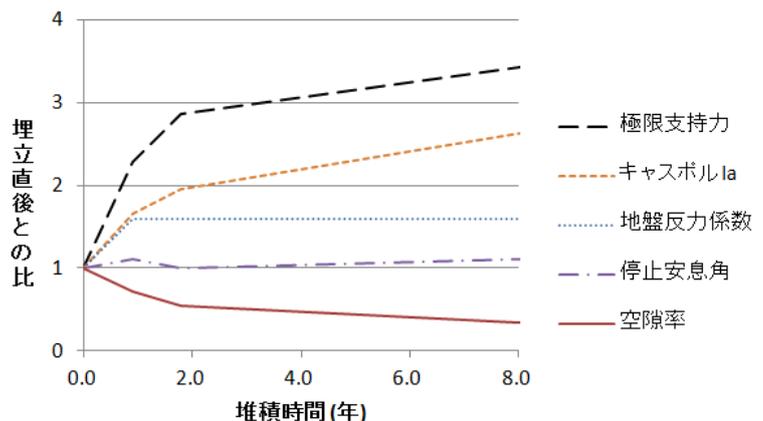


図 20 中部①現場での強度定数の経年変化

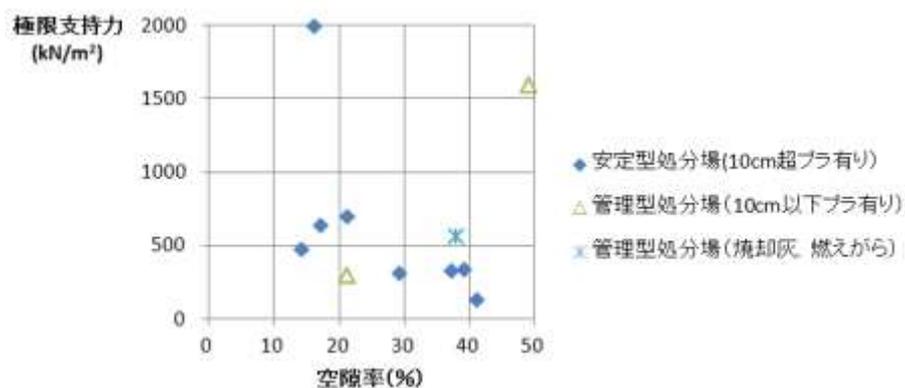


図 21 空隙率と極限支持力の関係（国内全試験場所）

2) 補完的室内力学実験

a. プラスチックの混入等と圧縮強度の関係についての室内実験

i 実験の目的

これまでの研究成果^{1) 2)}により、廃棄物埋立地盤に含まれるプラスチック等の繊維状物が引張抵抗を発揮するため、その力学特性は盛土等の通常の地盤とは大きく異なることが明らかとなっている。しかし、廃棄物埋立地盤には様々な材質のものが複雑に混在しており、どのような成分が廃棄物埋立地盤の力学特性に大きく寄与しているかは明らかではない。このため、軟プラスチック、硬プラスチック、廃棄物土粒子の3種の供試体を作成し、一軸圧縮試験によって各成分が圧縮強度の発現に及ぼす影響を考察した。

ii 試験に用いた埋立廃棄物の組成分析結果と廃棄物土粒子の土質定数

試験に用いた試料は関東地方と中部地方の不法投棄現場から採取した試料を用いた。組成分析を行った結果、関東試料は陶磁器・石類 49.1%、硬プラスチック 5.9%、軟プラスチック 1.5%、その他 35.4%であり、この4種で全重量比の91.9%を占めた。中部試料は陶磁器・石類 23.0%、硬プラスチック 8.5%、軟プラスチック 2.0%、その他 62.2%であり、この4種で全重量比の95.7%を占めた。

また、両試料の陶磁器・石類、土砂分から成る廃棄物土粒子の土質定数の差を明らかにするため、関東試料、中部試料の篩い下 19 mm からプラスチックを手選別によって除去した関東プラ除去試料、中部プラ除去試料をそれぞれ作製し（廃棄物土粒子のみの供試体）、定圧一面せん断試験を行った。その結果、関東プラ除去試料でせん断抵抗角： $\phi=48.5^\circ$ 、粘着力： $C=12.9 \text{ kN/m}^2$ 、中部プラ除去試料で $\phi=45.5^\circ$ 、粘着力： $C=11.5 \text{ kN/m}^2$ となり、ほぼ同等の土質定数であった。

iii 廃棄物埋立地盤試料を用いた一軸圧縮試験

①プラスチックの含有による圧縮強度の比較

関東試料と中部試料を用いて一軸圧縮試験（ $\phi 100\text{mm}$ 、 $h 200\text{mm}$ ）を実施した。供試体の作製方法はランマー質量 2.5 kg、自由落下高さ 30 cm、締固め層数 3、1層当たりの締固め回数 25 とした。圧縮速度は 1 mm/min とし、データは 5 秒毎に取得し 1 分間の相加平均とした。供試体の種類は、篩いなし試料、篩い下 19mm 試料、篩い下 19mm 試料からプラスチックを除去したプラ除去試料（一面せん断試験と同試料）の3種類の試料から非繰返し法によって作製され、それぞれ 3 回実施された（表 9）。

表 9 軟プラスチックと硬プラスチックのみをそれぞれ含む供試体の一軸圧縮試験結果
(3回の平均値)

項目	単位	関東試料			中部試料		
		篩なし	篩い下 19mm	プラ除去	篩なし	篩い下 19mm	プラ除去
試料名		A	B	C	A'	B'	C'
湿潤密度： ρ_t	g/cm^3	1.41	1.55	1.54	1.50	1.56	1.66
乾燥密度： ρ_d	g/cm^3	1.10	1.16	1.20	1.19	1.28	1.37
含水比： w	%	28.1	33.4	28.5	25.7	21.8	21.3
土粒子の密度： G_s	g/cm^3	2.428	2.440	2.525	2.259	2.303	2.416
間隙比： e		1.207	1.103	1.104	0.898	0.799	0.764
最大圧縮応力： σ_c	kN/m^2	206.0	89.2	58.3	176.6	73.7	56.7
破壊ひずみ： ε_x	%	16.2	8.6	3.8	24.1	6.3	3.3
弾性係数： E_{s0}	kN/m^2	1687	1475	2086	1070	1467	2293

各供試体の圧縮応力-ひずみ曲線を図 23 に示す。両試料の結果とも、圧縮応力はプラ除去試料、篩い下 19mm 試料（中部試料 73.7 kN/m²、関東試料 89.2 kN/m²）、篩なし試料（中部試料 150.0～213.8 kN/m²、関東試料 133.1～270.2 kN/m²）の順に大きかった。また、供試体の変形は、プラ除去試料の圧縮強度が小さく供試体中央がはらみだすように破壊したのに対し、篩なし試料では供試体全体が圧縮変形した（図 22 左側）。篩なし試料の圧縮強度は篩い下 19 mm の 2 倍以上であり、比較的長い軟プラスチックが供試体の変形を抑制する結果、大きな圧縮応力が発現すると考えられる。

関東試料と中部試料を比較すると、全体的に見れば両試料の応力ひずみ曲線は類似した傾向を示した。特に、プラ除去試料における両試料の結果はよく一致している。一面せん断試験によって得られた土質定数がほぼ同等であるため、妥当な結果と考えられる。篩い下 19 mm 試料に関しては、関東試料の最大圧縮応力の平均値は中部試料の 1.21 倍、弾性係数はほぼ同等で、図 23 中の応力ひずみ曲線においても圧縮ひずみ 8% 程度まではよく一致した。篩なし試料の結果はばらつきが大きい、関東試料の最大圧縮応力の平均値は 206.0 kN/m² であり、中部試料の 176.6 kN/m² の 1.17 倍であった。また、供試体の圧縮状況も異なっており、関東篩なし試料は供試体全体が圧縮する変形であるのに対し、中部篩なし試料では供試体の上半分がはらみだすような変形であった（図 22）。中部篩なし試料は、はらみだすような変形状態においても圧縮応力は増加または微増し続け、減少には転じなかった。



図 22 圧縮ひずみ-圧縮応力の結果
（左：関東篩なし試料、右：中部篩なし試料）

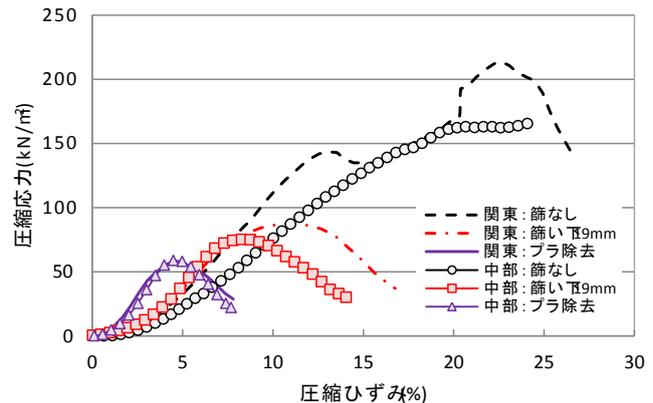


図 23 篩なし試料の圧縮状況

②軟プラスチックおよび硬プラスチックが圧縮強度に与える影響

次に、関東試料の篩い下 19 mm の試料から、軟プラスチック、硬プラスチックのみをそれぞれ手選別によって取り除いた試料を作製し、繰返し法にて供試体を作製した。充填条件および計測条件は①と同様とし、圧縮試験は各試料に対しそれぞれ 3 回実施された。

試験結果を図 24 に示す。軟・硬プラスチック両方を含む試料と軟プラスチックのみを含む試料の応力ひずみ曲線はよく一致した。

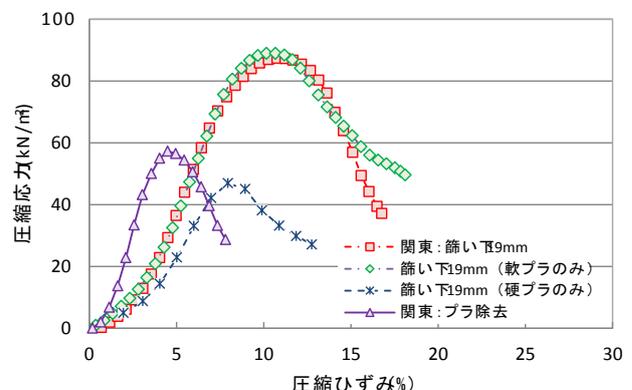


図 24 圧縮ひずみ-圧縮応力の結果

一方、硬プラスチックのみを含む試料の最大圧縮応力は 48.9 kN/m^2 であり、プラスチック除去試料の 58.3 kN/m^2 よりも 16 % 小さく、弾性係数も小さな値となった。圧縮応力の発現に寄与するのは軟プラスチックであり、硬プラスチックは圧縮応力の発現には寄与せず、むしろ圧縮応力を低下させる傾向が示唆された。

iv まとめ

- ① 篩なし試料、篩い下 19 mm 試料、プラ除去試料の 3 種類の試料を用いて一軸圧縮試験を行った。両試料とも同様の結果を示し、プラスチックを含む供試体の最大圧縮応力は大きな値を示した。軟プラスチックが有する引張抵抗（拘束圧）により、供試体のはらみだすような変形は抑制され、より大きな圧縮応力を示すと考えられる。
- ② 関東試料の篩い下 19 mm の試料から、軟プラスチック、硬プラスチックのみをそれぞれ含む試料を用いて一軸圧縮試験を行った結果、軟プラスチックが圧縮強度の発現に大きく影響していることが明らかとなった。

b. プラスチックの補強効果に関する室内実験

i 実験の目的

本実験は廃棄物埋立地盤中に含まれる軟プラスチックの連続または不連続な処分状況が、斜面安定性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。傾斜した地山上に堆積した廃棄物埋立地盤を大型土槽内に再現し、軟プラスチックが充填試料の全体に混在し、連続的に存在する廃棄物連続ケースと、充填試料中央に軟プラスチックの不連続面を設けた廃棄物不連続ケースの比較実験を行った。

ii 試験概要

試験装置を図25に示す。大型土槽の大きさは高さ950 mm、幅950 mm、奥行800 mmで、図25中の左側の壁は可動式である。可動壁の上端から125 mm、350 mm、580 mm、815 mmの深さにφ100 mmの土圧計が取り付けられており、可動壁の中心深さである475 mmに荷重計および変位計が取り付けられている。この大型土槽中に鋼製架台を設置し、傾斜角30°の地山の傾斜を再現した。傾斜部における充填試料との摩擦面は、鋼製架台に取り付けられた厚さ2 mmの木製の板である。実際の廃棄物埋立地盤と地山の境界面は、地山表層に茂った草木の存在などにより、複雑な摩擦係数を有すると考えられるが、本試験における摩擦面は木製の板とした。上載荷重はペロフラムシリンダーによって載荷され、充填試料には幅450 mm、奥行き600 mmの載荷板を通じて伝達される。ペロフラムシリンダーと載荷板には機械接合はなく、載荷板は充填試料の変形に伴い自由に回転できる構造となっている。また、充填試料と土槽壁面には摩擦低減のためにシリコングリスを塗布した厚さ0.25 mmのクレープシートが設置されている。

試験にはまさ土と関東試料を用い、充填方法は土槽上端高さからの自由落下とした。埋立廃棄物は5層に分けて充填し、1層あたりの充填高さは約20 cmで締固めは行わなかった。廃棄物不連続ケースにおける軟プラスチックの不連続面の設置には、厚さ2 cmの木製の板を用いた。土槽中央に厚さ2 cmの木製の板を設置した状態で、埋立廃棄物試料を25 cm 程度充填し、木製の板を引上げた。板の引上げに伴い生じる空隙にはまさ土を充填し、この手順を3層分繰り返した。充填後の埋立廃棄物の湿潤密度は、廃棄物連続ケースで 0.98 g/cm^3 、廃棄物不連続ケースで 1.04 g/cm^3 であり、現地の湿潤密度 $1.07 \sim 1.29 \text{ g/cm}^3$ と比較し小さい値であった。その後、可動壁側の上載荷重

を10分毎に4.5 kN/m²増加させ、41.2 kN/m²まで段階的に载荷し、上載荷重を41.2 kN/m²に保持した状態で可動壁を主働土圧が発生する方向に1 mm/minで移動させた。

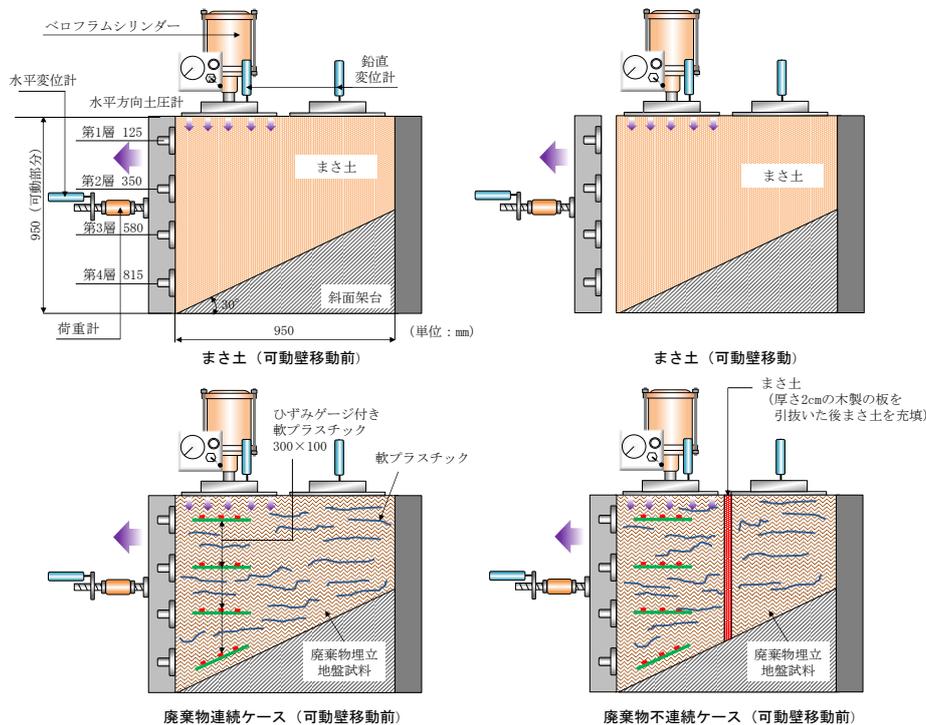


図 25 試験装置の概要図

iii 試験結果

① 可動壁移動前の試験結果

上載荷重41.2 kN/m²時の可動壁の土圧計によって計測された深さ方向の土圧分布を図26に示す。深さ方向の土圧分布は、まさ土が深さ580 mmの第3層の土圧が最大値を示すD字型の土圧分布を示したのに対し、廃棄物連続ケースでは深さ350 mmの第2層から深さ815 mmの第4層までほぼ一様となる台形状の土圧分布を示した。廃棄物不連続ケースはまさ土と廃棄物連続ケースの中間程度であったが、第3層の土圧が最大値を示すD字型の土圧分布であり、まさ土に近い結果であった。廃棄物連続ケースおよび廃棄物不連続ケースの側圧は、まさ土よりも小さかったことから、上載荷重の増加に伴い発生する軟プラスチックの張力によって、可動壁に作用する側圧が小さくなったと考えられる。廃棄物連続ケースと廃棄物不連続ケースを比較すると、廃棄物不連続ケースの第3層における土圧は、廃棄物連続ケースの約2倍であった。軟プラスチックが連続的に存在することにより、充填試料全体としてより大きな補強効果が発揮されることが考えられる。

② 可動壁移動後の試験結果

各充填試料の可動壁の水平変位と可動壁に取り付けられた各深度の土圧計の結果を図27～図29にそれぞれ示す。まさ土の結果は、深さ125 mmの第1層の土圧が可動壁の移動直後に大きな減少を示すが、可動壁の移動前に最も土圧が大きかった深さ580 mmの第3層は、可動壁移動後土圧の減少は小さかった。深さ350 mmの第2層と深さ815 mmの第4層は、可動壁の移動に伴い徐々に土圧は減少したが、第3層も含め可動壁の移動を止めた後に土圧は上昇に転じた。廃棄物連続ケースの結果は、可動壁の移動後すぐにすべての層で土圧が急減し、水平変位10 mm以降は収

束した。廃棄物不連続ケースの結果は、まさ土と廃棄物連続ケースの中間的な値を示し、第3層および第4層の土圧は徐々に減少した。可動壁の水平変位が20 mm付近からすべての深度で土圧に変化はなく一定値を示したが、可動壁の移動を止めた後は第4層の土圧が上昇に転じ、その後に第3層の土圧も上昇した。以上の結果より、まさ土は第2層～第4層の深さにおいて、廃棄物不連続ケースでは第3層および第4層において、充填試料の側方への変形が継続した。土槽側面には摩擦低減用のクリープシートが設置されているため、内部の状況は確認できないが、充填試料と斜面架台の境界面を含めた土槽下部において、滑り面が発生したと推測される。

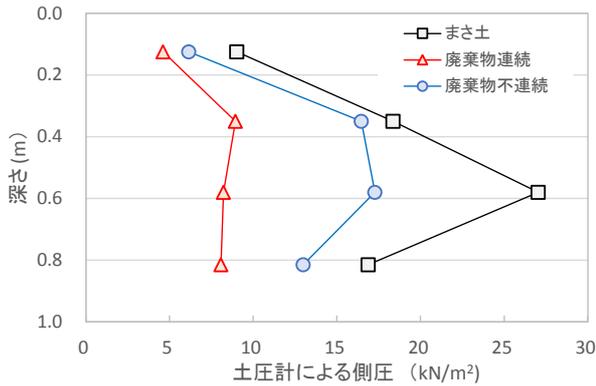


図 26 深さ方向の土圧分布 (可動壁移動前)

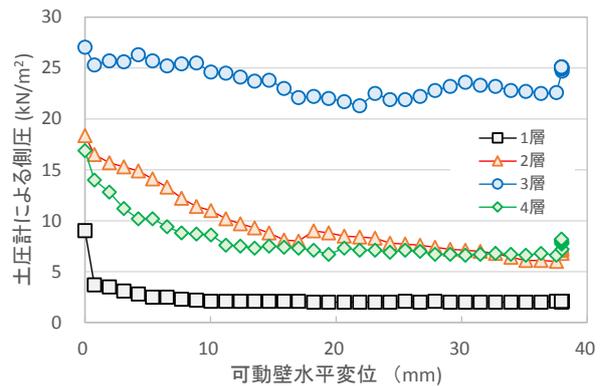


図 27 水平変位-土圧計の結果 (まさ土)

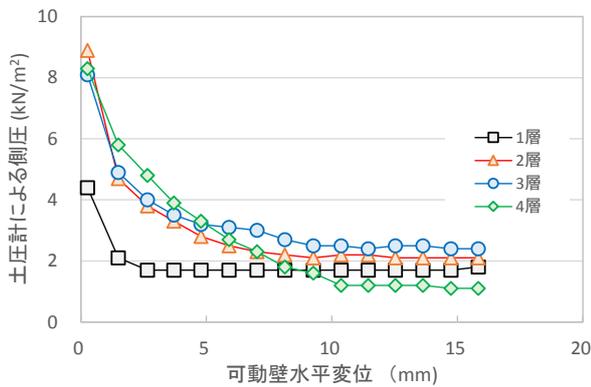


図 28 水平変位-土圧計の結果(廃棄物連続)

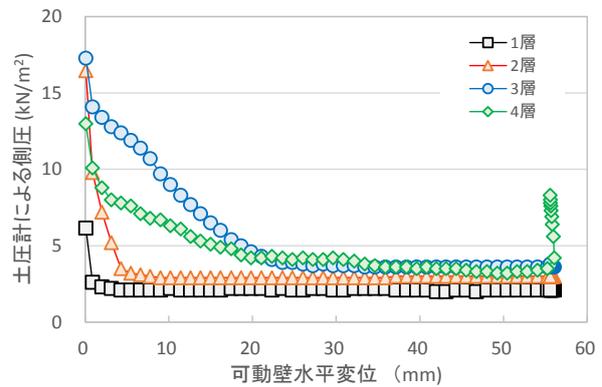


図 29 水平変位-土圧計の結果(廃棄物不連続)

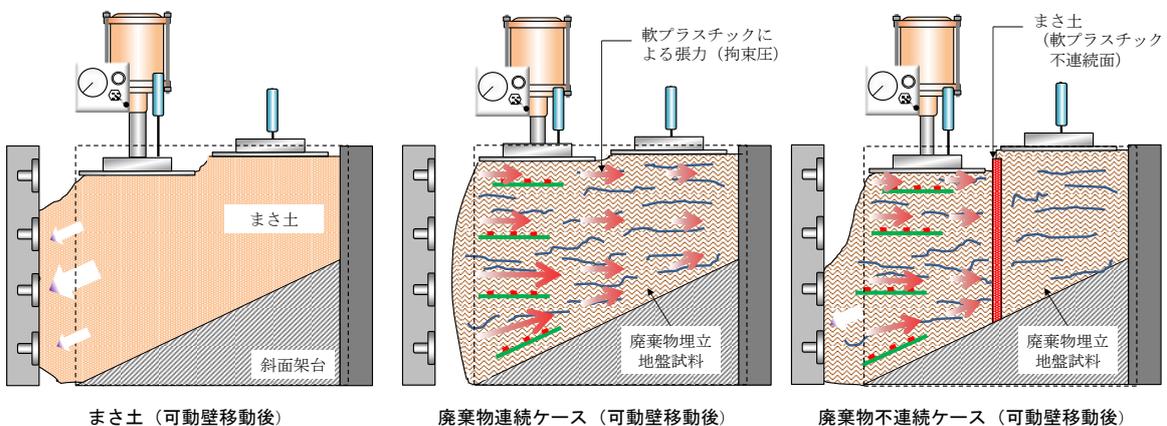


図 30 各試料の変形状況の模式図

iii 考察

可動壁移動時の各種計測結果から推測される、各試料の変形状況の模式図を図30に示す。まさ土は上載荷重を作用させた左半分のみ沈下し、上載荷重を作用させなかった右半分の沈下量は小さかった。まさ土は土粒子のみで構成され、引張補強材として作用する軟プラスチックが含まれないことから、充填試料には左右の連続性がなく、左半分のみが深さ580 mmの第3層を中心に第2層～第4層の範囲で側方に変形したと考えられる。一方、廃棄物連続ケースは可動壁移動後に充填試料は自立した。まさ土と比べ充填試料の側方への変形量は小さいにもかかわらず、上載荷重を作用させなかった右半分の沈下量は増加した。可動壁の移動に伴う側方への変形が、充填試料の右側にも影響が及んでおり、充填試料全体に混在し、連続的に存在する軟プラスチックにより、より大きな補強効果が作用したと考えられる。廃棄物不連続ケースはまさ土に近い挙動を示した。土槽中央部に設置したまさ土によって軟プラスチックの連続性が遮断されているため、充填試料の左半分のみが変形したと考えられる。また、可動壁移動時において、第3層および第4層において充填試料の側方への変形が継続したことから、充填試料と斜面架台の境界面を含めた土槽下部において、滑り面が発生したと推測される。

このように、廃棄物連続ケースと廃棄物不連続ケースにおける充填試料の挙動は大きく異なり、軟プラスチックの連続的な存在が廃棄物埋立地盤の斜面安定性に大きく影響する。鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋が、重ね継ぎ手部において引張応力を伝達するのと同様に、軟プラスチックが連続的に存在することにより、その補強効果は廃棄物埋立地盤全体に伝達され、より大きな補強効果を発揮すると推測される。

iv まとめ

まさ土、廃棄物連続ケース、廃棄物不連続ケースの3ケースの比較試験の結果から以下の点が明らかとなった。

- ①可動壁移動前の側圧は、まさ土が最も大きく、廃棄物連続ケースで最も小さかった。深さ方向の土圧分布は、まさ土は深さ580 mmの第3層の土圧 (27 kN/m^2) が最大となるD字型の土圧分布を示したのに対し、廃棄物連続ケースでは第2層～第4層がほぼ一様 (8 kN/m^2) の台形分布を示した。
- ②可動壁の移動時は、廃棄物連続ケースの充填試料は自立し安定した状態を保持したのに対し、まさ土と廃棄物不連続ケースでは変形が収束しなかった。充填試料と斜面架台の境界面を含めた土槽下部において、滑り面が発生したと推測される。
- ③軟プラスチックによる補強効果は、単体の軟プラスチックによって発揮されるだけでなく、連続的に存在することで引張応力が伝達され、充填試料全体としてより大きな補強効果を発揮すると考えられる。

3) 現場力学試験結果等に基づく現場分類

現場力学試験の結果に加え、補完的室内実験結果においても、プラスチックの混入とその繋がりによって、引張抵抗が生まれ地盤が補強されることや、土圧分布等の力学特性に差異が生じることが確認できた。

このため、廃棄物地盤の利活用を考えるにあたっては、力学特性に大きな違いがある表 10 の分類別に検討を進めることが効率的となる。また、本研究は、試験・解析法が整備されている土砂地盤と力学挙動が大きく異なり、知見が十分に蓄積されていない概ね 10cm 超のプラスチック等の繊維状物等を含む地盤を主な対象とするものである。

なお、最終処分場では、既往の廃棄物搬入記録等から概ね 10cm 超の廃棄物の受入れの有無は容易に判断できると考えられ、表 10 は処分場管理者等にとっても判断しやすい分類である。

注)表 10 中の「主な力学特性」に記載した地震振動挙動は、「(2)、7) 耐震性に関する試験」参照。

表 10 廃棄物地盤の力学特性による分類

分類	主な廃棄物種類 【主な対象現場】	主な力学特性
①概ね 10cm 超のプラスチック等の繊維状物等を多く含む地盤	廃プラスチック、がれき類、ガラス・陶磁器くず、金属類 【安定型処分場、不法投棄等支障除去現場】	プラスチック等の繊維状物等の混入により地盤が柔らかい（地盤反力係数、粘着力が小）が、廃棄物の噛み合わせ効果等により内部摩擦角は大きい。また、繊維状物等による引張抵抗を有し粘り強く弾性的（resilient）な強度特性を有し、斜面安定性が高く、地震振動に対しても 1000gal 超の強振動で無い限り土地盤よりも壁面等に働く水平土圧は小さい。
②10cm 以下のプラスチック等を含む地盤	ふるい下、プラスチック等の破砕物、プラキャップ等の小型物 【管理型処分場、ふるい下の仮置場】	①と③の中間的な力学特性を有する。噛み合わせ効果等により内部摩擦角は大きい、繊維が短く引張抵抗は働かない。
③プラスチック等をほとんど含まない地盤	焼却灰、燃え殻 【管理型処分場、一般廃棄物処分場】	力学特性は土地盤に近く、①に比べ比重が重く、固い地盤（粘着力大）が形成される。

注) 上表①と②の強度特性に与える違いは主に引張抵抗の有無である。引張抵抗は、現場引抜試験結果から長さ 10cm 程度の繊維状物でも抵抗があることを確認しており¹⁾²⁾、10cm 以上の長さの繊維状物等の有無が概ねの区分の目安になる。搬入廃棄物の厳密な長さ制限が無い限りプラスチックを受け入れている安定型処分場は①に区分される。管理型処分場であっても長尺のプラスチック等を満遍なく受け入れている場合は①になる。また、安定型処分場であっても搬入物の長さ制限（10cm 以下等）を受けている場合や、10cm 以上のプラスチック等の受け入れが少ない場合（目視で確認できない程度；重量比 1.2% 以下等）は②に区分される。

(2) 支持力、沈下量、耐震性等の評価方法

1) 平板載荷試験

a. 試験の目的と方法

既往文献¹⁸⁾²¹⁾では海外で廃棄物地盤上に風力発電設備等の重量物を建設する場合は平板載荷試験⁵⁾(JGS1521-2003、**図 31**、**図 32**)で支持力が評価されている。平板載荷試験は地盤に荷重をかけて極限支持力を直接的に求めるものであり、廃棄物地盤においても試験地点の支持力を測定できる。また、廃棄物力学の先導的研究者であるケルシュ(Koelsch)へのヒアリング結果等から、現状では引張抵抗のような廃棄物地盤特有の条件を加味した解析により支持力を評価する方法は諸外国でも確立されていないことが分かった。このため、平板載荷試験により廃棄物地盤の支持力データを得ることとし、平成 25～27 年度に 8 現場 (12 箇所) で平板載荷試験を行った。

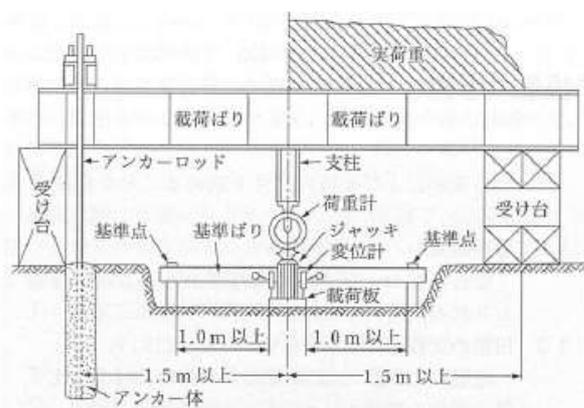


図 31 平板載荷試験の用具設置例

(地盤工学会「地盤調査の方法と解説」⁵⁾より)



図 32 平板載荷試験の実施例

(中部①現場 8 年経過地盤、載荷板径 1000mm)

b. 試験方法についての考察

平板載荷試験では、地盤の破壊現象(載荷重のある点で急激に沈下量が増す現象)が生じなかった場合には、載荷板径の 10% (径 300mm では 30mm) のときの載荷重が極限支持力とされる⁵⁾。プラスチック等が混入した廃棄物地盤は変形しやすいことから通常の土砂地盤に用いられる載荷板径 300mm ではすぐに沈下量が 30mm に達してしまい、極限支持力が過小に評価される可能性がある。したがって、出来るだけ大きな載荷板を用いることが望ましいが、反力に使用できる重機等の重量には限界があるため、径が大きすぎると逆に載荷圧不足で適切な極限支持力が得られなくなる。このため、研究後半では、種々の径の載荷板を用意し、初めに 300mm 径で急速載荷による概略的な試験を行って載荷圧と沈下量の概ねの関係を把握した上で、風力発電設備設置時に必要となる極限支持力 300kN/m^2 (許容支持力概ね 100kN/m^2 の 3 倍) 程度の載荷圧で、載荷板径の 10% の沈下量に達しないとみられる載荷板を用いて試験を行った。現場で調達可能な重機は一般に 0.7m^3 級バックホウ(重量約 16t)であり、このとき、プラスチック等を含む廃棄物地盤では、500mm 程度の載荷板が適した。

c. 試験結果と考察

平板載荷試験結果の一覧を表 11 に、代表的な載荷重-沈下量の関係図(試験結果)を図 33～36 に示す。表 11 の極限支持力をみると、中部①現場の埋立直後に実施したケースを除いて 300kN/m^2 以上ある他、プラスチックと残コンクリート等の混合理立がなされ徹底的な締固めが行

われている東北①現場（安定型処分場）で 2000 kN/m² 以上を示すなど、地盤工学会「地盤調査の方法と解説」⁵⁾による標準的な埋立地盤の例（表 12）に比べて概して大きい値が得られた。中部①現場においても埋立 1 年後に極限支持力が倍以上に増加しており、支持力は埋立後の比較的短い期間に急増することが窺える。

廃棄物地盤上への設置が想定される風力発電設備や水処理施設（老朽化した水処理施設の廃棄物地盤上への移転等）の載荷重はそれほど大きくはなく、極限支持力で概ね 300kN/m² 程度あれば良く、埋立直後地盤を除けば、各現場とも支持力的には風力発電設備等の設置が可能と言える。また、表 11 に示したすべての試験地点で、地盤の破壊現象は生じていないことから、実際の極限支持力はさらに大きい可能性がある。このうち、反力不足により試験を終え、実際の極限支持力がより大きいことが明らかな現場は、東北①、中部①8 年、15 年地盤、東北③現場である。なお、ばいじんが主の東北②現場では近傍での 2 回の試験で極限支持力に大きな差が生じており、地盤に強度差があることが分かる。

一方、単位沈下量あたりの必要載荷圧を表す地盤反力係数(k_v)をみると、東北②現場（管理型処分場）と東北①現場を除き、標準的な埋立地盤の例（表 12）に比べ小さく、鉛直荷重に対して沈下しやすいことが分かる。以上から、プラスチック等が混入した廃棄物地盤の跡地利用に際しては、支持力的には十分であるものの、沈下に対する検討が重要になる。

表 11 平板載荷試験結果一覧（8 現場 12 箇所）

現場名	区分	廃棄物種類	堆積時間	極限支持力 (kN/m ²)	地盤反力係数 (MN/m ³)	載荷板径 (mm)	支持力判断
東北①	安定型処分場	プラ(10cm 以上有)、陶磁器、がれき類、土等	3.5~4 年	2000 以上	111	300	載荷圧不足
中部①	安定型処分場	プラスチック(10cm 以上有)、がれき類等	埋立直後	140	5	300	30mm 沈下
			1 年	320	8	300	30mm 沈下
			8 年	480 以上 (270 以上)	8 (9)	1000 (300)	載荷圧不足 (30mm 沈下)
			15 年	640 以上	12	1000	載荷圧不足
関東①	安定型処分場	プラ(10cm 以上有)、石、陶磁器類、土砂等	1 ヶ月	330	12	300	30mm 沈下
			15 年	700	24	300	30mm 沈下
中国	安定型処分場	石、ガラス陶磁器、プラ(10cm 以上有)、土等	3 ヶ月	340	8	500	50mm 沈下
関東②	管理型処分場	プラ(10cm 以下)、土砂等、がれき類等	1 ヶ月	1600 [1200 以上]	51 [34]	300 [500]	30mm 沈下 [載荷圧不足]
中部②	管理型処分場	プラ(10cm 以下)、石・陶磁器類等	1 ヶ月	300 (200)	9 (7)	500 (300)	50mm 沈下
東北②	管理型処分場	ばいじん	10 ヶ月	565 (1600)	179 (177)	500 (300)	50mm 沈下 (30mm 沈下)
東北③	不法投棄	がれき類、土砂等	10 年超	360 以上	59	300	載荷圧不足

注) 極限支持力、地盤反力係数の () 内は急速載荷による事前試験結果、[] 内は載荷圧不足の参考結果。

表 12 平板載荷試験結果例

地盤	極限支持力 (kN/m ²)	地盤反力係数 (MN/m ³)
関東ローム層(立川、武蔵野)	662~666	-----
盛土地盤(碎石)	630	243
埋立地盤	330~340	88~103

注) 地盤工学会「地盤調査の方法と解説」⁵⁾から抜粋

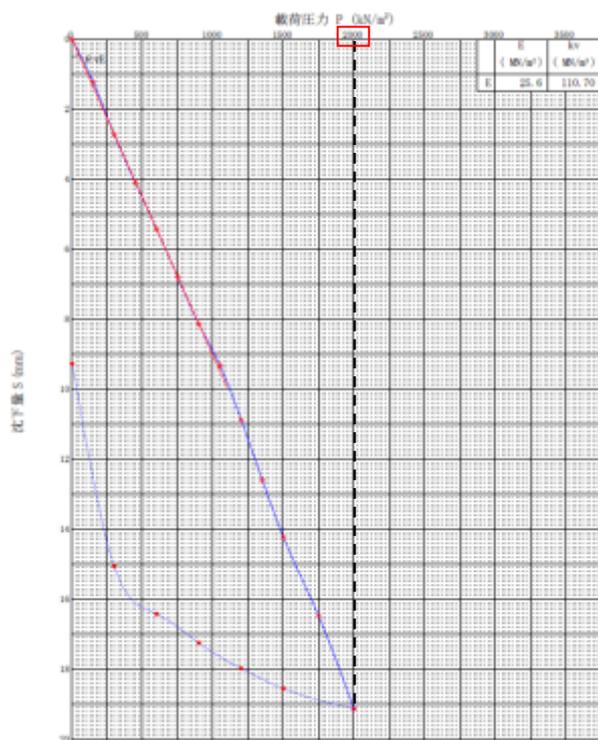


图 33 平板载荷試驗結果（東北①）
（安定型処分場）
[載荷板徑 300mm 極限支持力 >2000kN/m²]

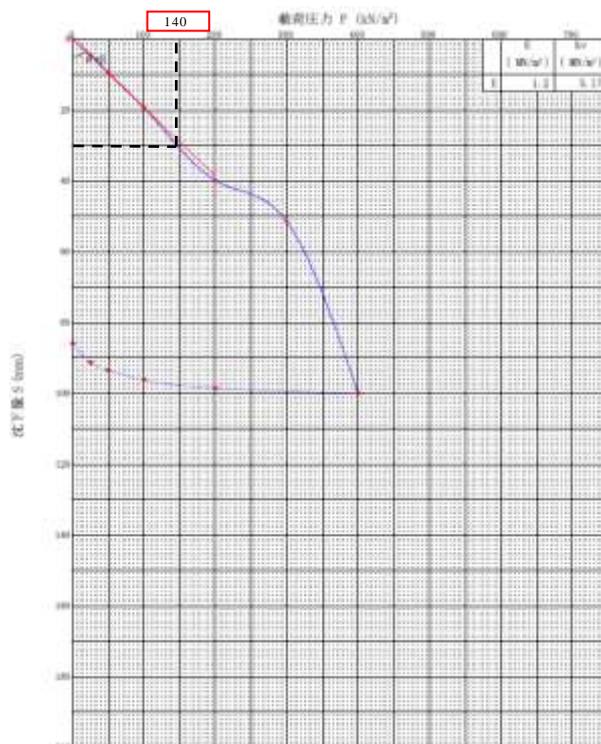


图 34 平板载荷試驗結果（中部①埋立直後）
（安定型処分場）
[載荷板徑 300mm 極限支持力 140kN/m²]

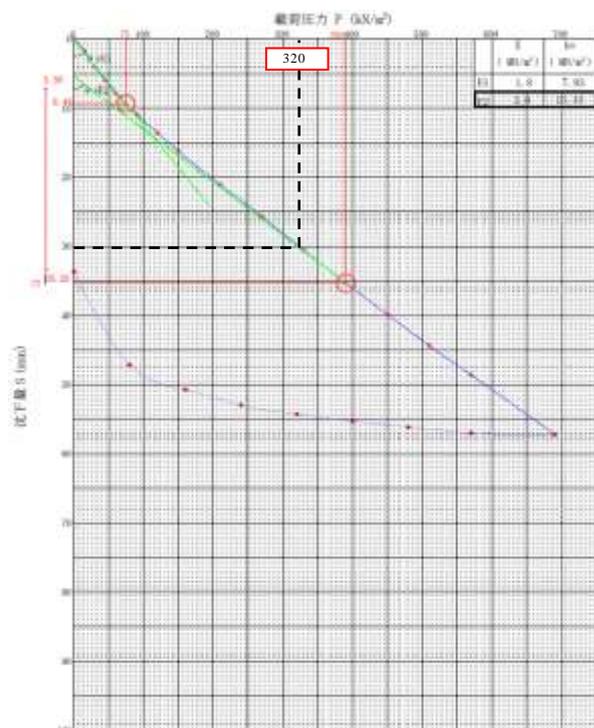


图 35 平板载荷試驗結果（中部①1年經過地盤）
（安定型処分場）
[載荷板徑 300mm 極限支持力 320kN/m²]

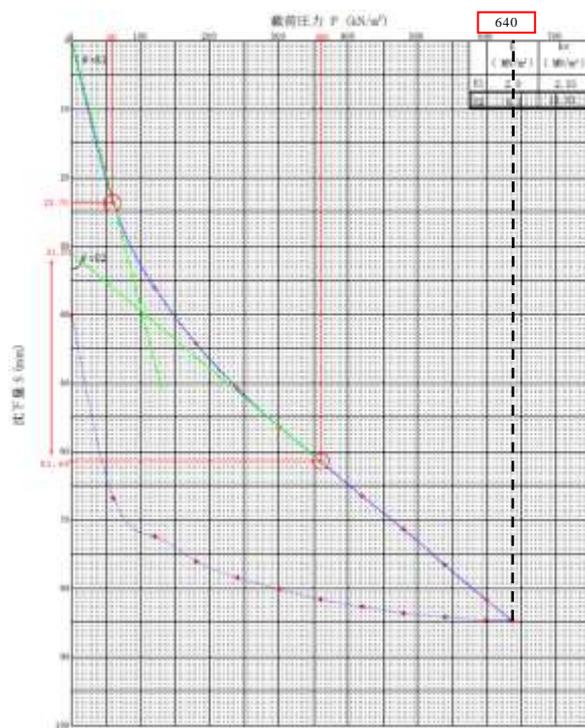


图 36 平板载荷試驗結果（中部①15年經過地盤）
（安定型処分場）
[載荷板徑 1000mm 極限支持力 >640kN/m²]

2) 廃棄物地盤の沈下計測結果

a. 継続的沈下計測結果

中部地方の産業廃棄物安定型最終処分場（中部①現場）で継続的な沈下計測を行った。15年間堆積した層厚約20mの廃棄物層上に、2014年4月～8月に高さ約10m（中間覆土3層計2mを含む）の埋立を行った現場であり（図37～38）、廃棄物組成は、プラスチック14%、土砂57%、がれき類25%、その他4%である。また、場内の地下水位は集水井戸等で埋立底面の1～3m上にあることが確認されている。

沈下計測は、地盤工学会基準（JGS1712-2003）「沈下板を用いた地表面沈下量測定方法」⁵⁾に則って行った。沈下板は図39～41のとおり、各埋立廃棄物層の表面に新たな埋立を行う前に設置した。



図37 継続的沈下計測を行った中部①現場

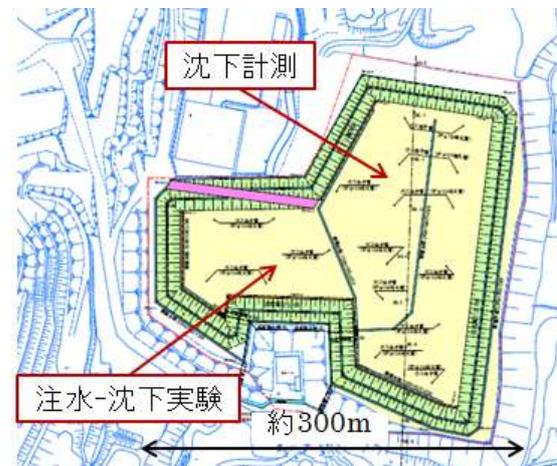


図38 中部①現場 平面図



図39 沈下計測場所(沈下板設置前)



図40 沈下板の設置

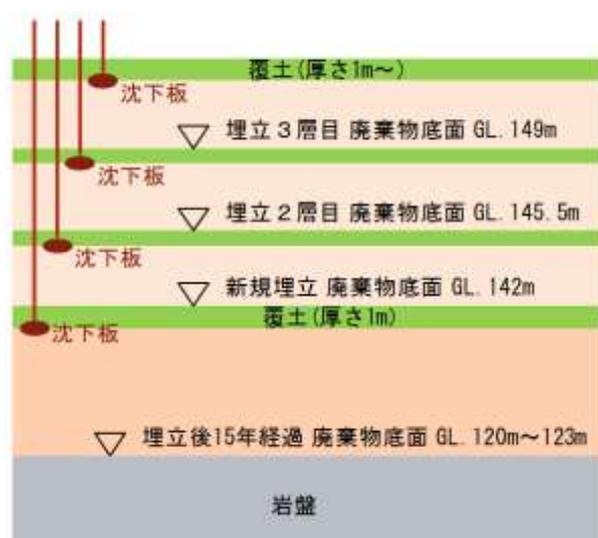


図41 埋立断面と沈下板の設置位置

約 2 年間（平成 26 年 4 月 22 日～平成 28 年 2 月 24 日）の沈下量計測結果を標高で示したものを図 42 に、各層毎の沈下量を図 43 に示す。沈下は埋立初期や各層の上に埋立や覆土がなされた際に大きく進むことが分かる。また、時間経過とともに沈下量は少なくなり、埋立後 15 年経過した最下層では初期の上層埋立時を除き沈下量はごく僅かとなっている。

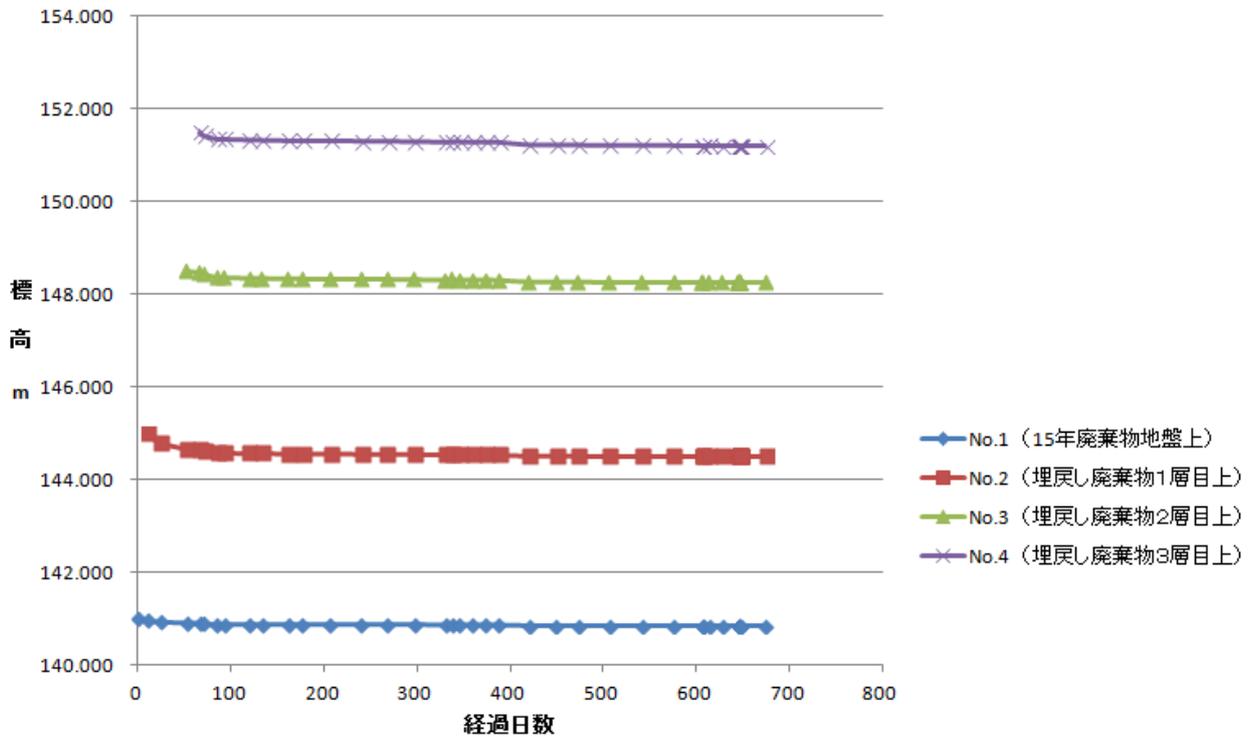


図 42 沈下板設置後約 2 年間の沈下量計測結果（中部①現場 標高表示）

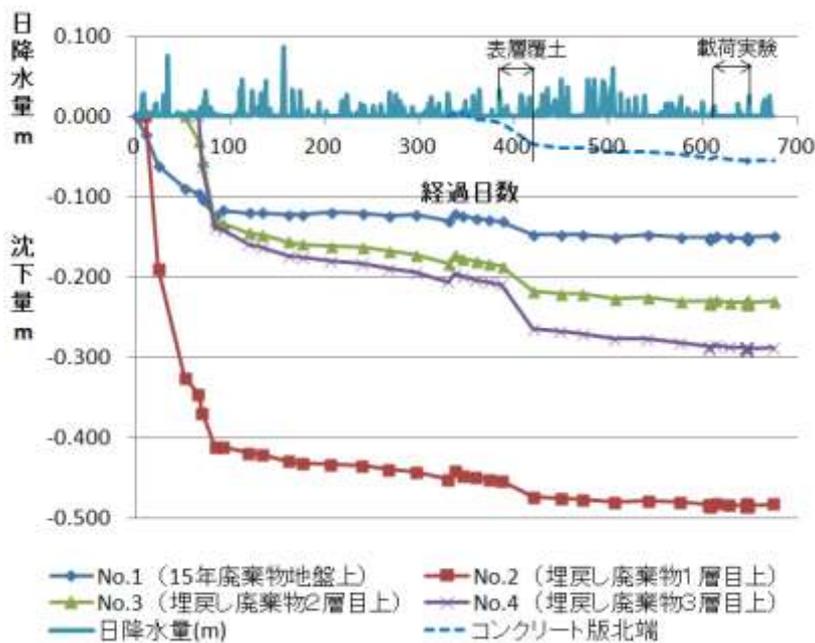


図 43 層別沈下量と降水量（中部①現場）

b. 層別沈下量

沈下計測結果から、埋立終了後の層別の沈下量を表 13 に示す。層厚 m 当たりの沈下量は 0.015 ~ 0.018m/m と概ね等しく、沈下は層厚に比例して生じていることが分かる。

表 13 埋立終了後の層厚と沈下量(中部①現場)

経過日数 (埋立終了後) (日)	1~3層層厚 (h=10.6m) (m)	2~3層層厚 (h=6.8m) (m)	3層目層厚 (h=3m) (m)	1~3層沈下 量(h=10.6m) (m)	2~3層沈下 量(h=6.8m) (m)	3層目沈下量 (h=3m) (m)
0	10.596	6.846	3.030	0.000	0.000	0.000
4	10.540	6.806	2.992	0.056	0.040	0.038
18	10.485	6.772	2.992	0.055	0.034	0.000
26	10.476	6.770	2.992	0.009	0.002	0.000
53	10.461	6.760	2.986	0.015	0.010	0.006
67	10.457	6.758	2.984	0.004	0.002	0.002
95	10.449	6.755	2.982	0.008	0.003	0.002
110	10.446	6.755	2.983	0.003	0.000	-0.001
140	10.439	6.753	2.981	0.007	0.002	0.002
173	10.438	6.752	2.980	0.001	0.001	0.001
201	10.434	6.749	2.977	0.004	0.003	0.003
230	10.428	6.748	2.978	0.006	0.001	-0.001
264	10.424	6.746	2.977	0.004	0.002	0.001
271	10.425	6.744	2.977	-0.001	0.002	0.000
279	10.425	6.748	2.978	0.000	-0.004	-0.001
293	10.423	6.744	2.976	0.002	0.004	0.002
307	10.423	6.745	2.977	0.000	-0.001	-0.001
321	10.422	6.744	2.977	0.001	0.001	0.000
沈下量計 (m)				0.174	0.102	0.053
層厚m当たり沈下量 (m/m)				0.016	0.015	0.018

c. 経過時間と沈下速度の関係

堆積時間と沈下速度の関係を図 44 に示す。沈下は埋立初期の 1~2 年の間に顕著に進み、その後も長期間ゆっくりと双曲線状に進行する。なお、図中の 8 年(2920 日)経過時の堆積速度は、別途近傍の埋立後 8 年経過地盤上に沈下板を設置して計測した値をプロットしている。

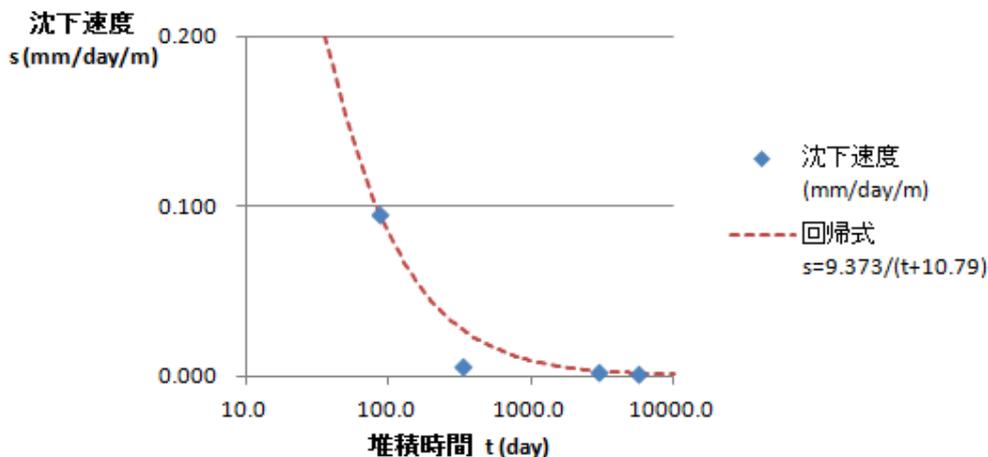


図 44 堆積時間と沈下速度の関係(中部①現場)

d. 沈下と降雨の関係

埋立終了後の表層沈下量と沈下計測期間内の降水量の関係を図 45 に示す。埋立初期は降水量に比例するように沈下が生じている。埋立 60 日後以降も、沈下量が時間経過とともに激減するため関係が見えにくい、降水量の多いときに前後に比べて沈下量が多くなっている。

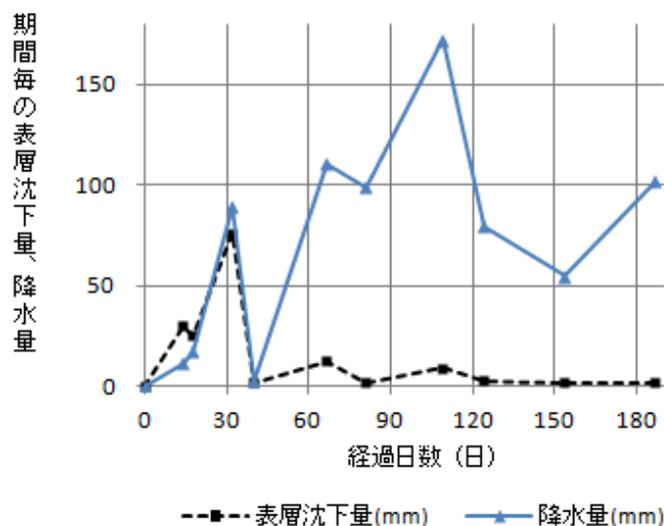


図 45 計測期間毎の表層沈下量と降水量の関係 (中部①現場)

3) 注水-沈下実験

雨水により沈下が生じることが沈下計測結果から推察されたことから、検証実験として、現場での注水-沈下実験 (図 46) を行った。中部①現場内の堆積後 1 年 10 ヶ月経過した地盤上で、板 (コンパネ) で囲んだ 1.8m×1.8m 内に雨量換算 300mm/3hr になるようにホースで均等に注水した。沈下量計測は水準測量により水投入後 6 時間まで 1 時間間隔で行い、その後は 24 時間後に行った。また、注水箇所の片面の廃棄物地盤を 3m 掘削して、注水した水の移動状況や採取試料の含水比の変化を調べた。

注水-沈下実験の結果は図 48 であり、注水開始 2 時間後 (雨量 200mm 相当を注水) から沈下が生じ、300mm 相当の水を投入した後、注水範囲内の平均 (コンパネ内の中央と 4 角の高さの平



図 46 注水-沈下実験 (中部①現場)



図 47 注水後の断面
(断面からほぼ一様に水が浸み出している)

均値)で最大 14mm の沈下が生じた。また、図 48 で注水後に採取した廃棄物試料の含水比(表層～1.5m 深平均)をみると、注水後 1 時間程度で急激に低下するものの、24 時間経過しても含水比は高い状態にあり、水は地盤中に長時間貯留されていることが分かる。注水場所下の掘削断面を注水後に目視で調べた結果(図 47)では、水は断面全体からほぼ一様に浸み出しており(断面に数多存在する空隙が天然の水抜きのような働きをしている)、土層のように限られた水みちを伝わる流下とは明らかに異なる。

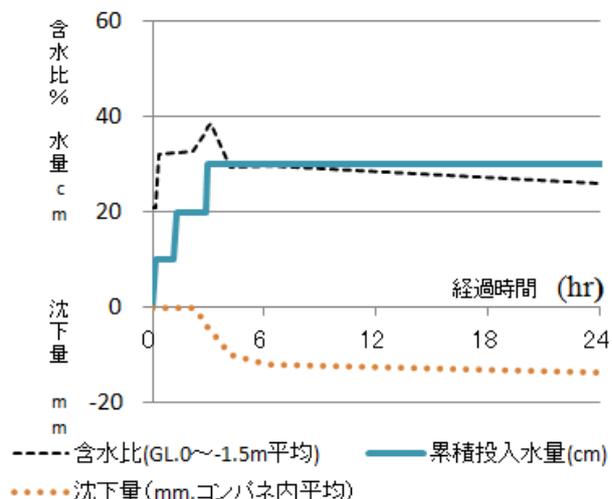


図 48 注水-沈下実験結果

4) 沈下要因と効果的な沈下(締固め)促進方法について

沈下計測結果から、沈下は上載荷重と初期降雨により急激に進むことが分かった。このため、沈下は重さ(鉛直荷重)により、大きな空隙を形成しているプラスチック等が形状的に鉛直方向に圧縮されることが要因になっていると考えられる。また、初期降雨による顕著な沈下も「(4)、2)水の貯留・排水性に関する試験」図 103 に示すように雨水は廃棄物表面に貯留しながら流下していくことを考えると、水が最初に廃棄物表面に貯留されその水の重量により沈下が進むことが推察される。この水による沈下については、今後、アクリル板付き土槽を用いた検証実験を行う予定である。

また、このことから沈下を促進させてより多くの廃棄物の埋立が可能になる方法を考えると、埋立当初の数ヶ月間はできるだけ雨水を浸透させ、その後、プレロードとして廃棄物や覆土用土砂を上載すれば沈下(締固め)が効率的に進むものとみられる。

5) 空隙率と沈下量等との関係

a. 現場空隙率試験の開発

プラスチック等を含む廃棄物地盤の力学特性について、既往研究¹⁾²⁾で、単位体積重量とせん断強度の関係がみられたことから、空隙の量が力学特性に影響を与えていることが窺える。また、土地盤では間隙比と沈下量の間に関係があることが知られている。

しかしながら、沈下量等の力学特性との関係が深いとみられる廃棄物地盤の空隙率については、現状では測定法が確立していない。

そのため、図 49 に示す水置換による土の密度試験方法(JGS1612-2003)³⁾を活用した空隙率試験法を考案して計測した。この方法では、試験の過程で、試料の実密度(空隙を除いた密度・比重)、試料のほぐし後のふけ率、注水による廃棄物の容積減少も併せて調べることができる。

空隙率試験の手順は次のとおり。

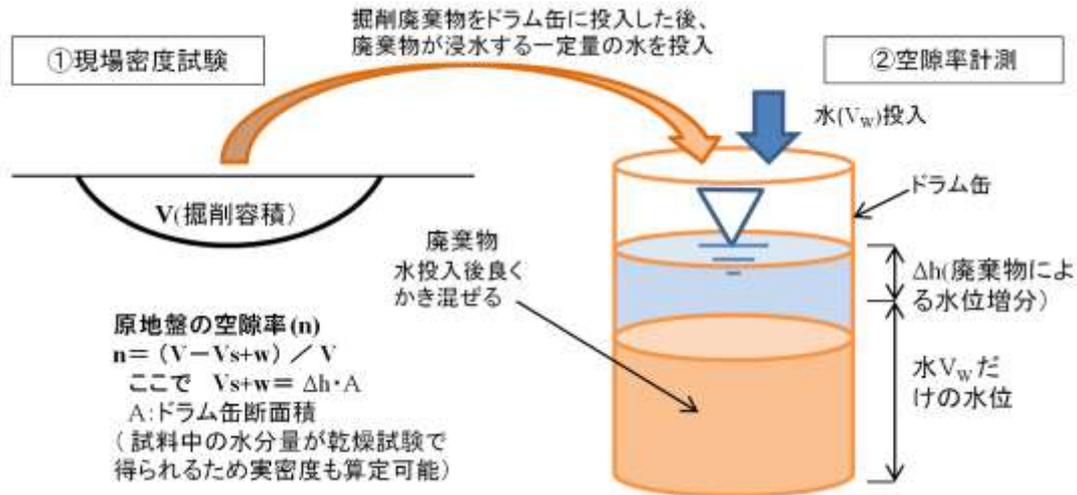


図 49 空隙率試験（新規開発）の方法

- ① 現場密度試験により、掘削容積(V)と試料湿潤重量(W)、現場湿潤密度(W/V)が求まる（30～50リットル程度の試料を採取する）。
また、上記近傍で採取した試料の乾燥により含水比(w)と乾燥密度(W_s/V)が求まる。
- ② ドラム缶に試料を投入し、試料上面の高さ(h_a)を計測することにより、ほぐし後のふけ率(α)を算定する。ふけ率 $\alpha = h_a \cdot A / V$ (A; ドラム缶断面積)
- ③ 試料の上面までゆっくりと注水し、そのときの高さ(h_d)を計測することにより、注水による体積減少率(α_d)を算定する。 $\alpha_d = 1 - h_d / h_a$
- ④ 予め試料が十分に水没する量の水(V_w)をドラム缶に入れたときのドラム缶内水位を計測しておく。
- ⑤ 試料が入ったドラム缶に上記の水(V_w)を投入し、④の高さからの廃棄物による増分(Δh)を計測する（このとき、棒等で十分に攪拌し試料中の空気を抜く）。試料の実容積(V_{s+w})は、Δhにドラム缶断面積(A)を乗じて求まる。
- ⑥ 以上から、空隙率(空気間隙率; n_a)は、 $n_a = (V - V_{s+w}) / V$ で求まる。
間隙率(試料容積中の空気と水分量の占める割合; n)は、 $n = (V - V_{s+w} + W \cdot w / (1+w)) / V$ で求まる。
実密度(W_s/V_s)は、 $W_s / V_s = W_s / (V_{s+w} - (W - W_s) / \rho_w)$ 、 $\rho_w \doteq 1.0$ で求まる。

注 1) 試料のふけ率や注水による廃棄物の容積減少を調べる必要が無い場合は、予め水の入った容器に試料を投入する方法が簡単である。

注 2) 水温による試料や水分の体積変化（例：ポリエチレン線膨張率⁷⁾ = 100～200/10⁻⁶K⁻¹）等は求める精度に比べ小さく無視した。

b. 空隙率と各種力学定数との関係

表 14 に、組成がほぼ同様である中部①現場（安定型処分場、10cm以上のプラスチック等を含む）の埋立直後地盤、1年経過地盤、8年経過地盤の空隙率試験結果とその他力学試験結果を示す。堆積時間の経過に伴って密度(単位体積重量)、ほぐし後のふけ率、注水による容積減少率、極限支持力、地盤反力係数、キャスポルによる衝撃加速度(I_a; インパクト値)が大きくなり、逆に、空

隙率、沈下速度は小さくなっている。また、廃棄物の実密度や含水比には各地盤にほとんど差は無い。従って、3つの地盤に組成や水分量の差が無いなかで、堆積時間の経過とともに、空隙が減少し、それに伴って地盤強度が高まり、沈下量が小さくなっている。

表 14 中部①現場での空隙率と各種試験結果の一覧

		堆積直後 地盤	堆積後 1 年 地盤	堆積後 8 年 地盤
廃棄物組成(重量比)※ ¹		プラ 14%, 土砂 57%, がれき類 25%, ゴム皮革 1%, 金属 1%, 他 2% (各地盤ほぼ同様, 1 年地盤の値)		
湿潤密度※ ² [乾燥密度]		1.17g/cm ³ [0.97 g/cm ³]	1.40 g/cm ³ [1.13 g/cm ³]	1.58 g/cm ³ [1.33 g/cm ³]
含水比※ ²		21.3%	22.7%	19.4%
土粒子の密度試験※ ³ (室内)		未実施	2.14 g/cm ³	未実施
空隙率 試験 ※ ⁴	廃棄物の実密度	2.48 g/cm ³	2.02 g/cm ³	2.20 g/cm ³
	ふけ率 (倍率)	1.41	1.98	2.26
	注水での容積減少	13.6%	未計測	16.0%
	間隙率 (間隙比)	61.2% (1.58)	51.3% (1.05)	39.6% (0.66)
空隙率 (比)		40.6% (0.68)	29.0% (0.41)	14.3% (0.17)
沈下速度 (層厚 m 当たり)		0.0963 mm/day/m	0.0068 mm/day/m	0.0028 mm/day/m
平板載荷 試験※ ⁶	極限支持力 地盤反力係数	140kN/m ² 5 MN/m ³	320kN/m ² 8 MN/m ³	480kN/m ² 8 MN/m ³
キャスボル試験 ⁵ <i>Ia</i>		3.7	6.1	9.7

※1: 環境省告示環整第 95 号の方法 ※2: JGS1612 水置換による土の密度試験⁵

※3: JIS A 1202:2009 土粒子密度試験⁶ ※4: 本測定法

※5: JGS1712-2003; 沈下板を用いた地表面沈下量測定方法⁵ (測定間隔;約 2 週間)

※6: JGS1521: 地盤の平板載荷試験⁵

c. 空隙率と沈下量、降雨と沈下の関係 (地盤工学公式からの検討)

沈下量の計算は、土砂地盤では一般に間隙差による式 1 が用いられる⁸⁾が、当該地盤では堆積時間と含水比に関係がみられず、水が排水されながら沈下する粘性土地盤の圧密現象とは異なるメカニズムで沈下が生じていると考えられるため、空気だけの間隙 (空隙) を基にした式 2 についても調べた。

$$S = \frac{e_0 - e_f}{1 + e_0} H \quad \dots \text{式 1}$$

$$S = \frac{e_{a0} - e_{af}}{1 + e_{a0}} H \quad \dots \text{式 2}$$

ここに、*S*: 沈下量、*e*₀ (*e*_{a0}): 初期状態の間隙比(空気間隙比)、

*e*_f (*e*_{af}): 最終状態の間隙比(空気間隙比)、*H*: 層厚

式 1、式 2 による堆積 1、8 年後の沈下量推定結果を表 15 に示す。いずれの式による沈下量も実態よりも相当大きな値になっている。この原因として、空隙率の測定は表層で行っているなかで、地中部の空隙率は自重によるプレロード効果により締め固められ、表層よりも小さいことが考えられる。した

表 15 空隙率からの地盤公式による沈下量試算結果

	0~1 年の 沈下量	0~8 年の 沈下量
間隙比に基づく 式 1 による推定	0.205m/m	0.357m/m
間隙比に基づく 式 2 による推定	0.161m/m	0.304m/m
実沈下量*	0.018m/m	-----

注) 0~1 年の実沈下量は 321 日間の沈下量 0.016m から 365 日換算した。

がって、廃棄物地盤では、表層の空隙率から式 2 により沈下量を予測することは現状では難しい。

次に、堆積直後地盤の注水での容積減少(13.6%;表 14)から、大雨後の沈下量 s_r を概算すると、 $s_r=13.6\% \div 1.41$ (ふけ率) $=0.096\text{m/m}$ となる。実際の埋立現場でも図 45 に示したとおり、初期の降雨時に 5~11cm の沈下が生じており、プラスチック等を含む廃棄物層は雨水による空隙減少等により大きな沈下が生じることが推察される。

d. 空隙率試験の精度について

表 14 に示した空隙率試験の堆積後 1 年地盤の廃棄物実密度(2.02g/cm^3)は、室内試験(土粒子の密度試験⁶⁾)での廃棄物実密度計測結果(2.14g/cm^3)の 94.4%の値をとっている。空隙率試験は現場での簡易試験法であり、十分に気泡が除去されていない懸念が残るが、この程度の精度は確保されている。また、空隙率試験で 1 回の試験で用いる試料重量は、土粒子の密度試験⁶⁾の 200 倍程度あり、雑多な材料を含む廃棄物地盤用として、巨視的かつ経済的な試験法であると言える。

e. 13 現場の試験結果による空隙率と堆積時間の関係

図 50 に 13 現場での本試験法による空隙率と堆積経過時間との関係を示す。堆積年数別のデータが得られている安定型処分場では、空隙率は時間経過とともに減少している。

図 51 は、沈下計測を行った中部①現場(安定型処分場)での空隙率と沈下速度の関係を示したもので、空隙率が大きいほど沈下速度は速い。したがって、空隙率は廃棄物地盤の締固まり状態や沈下量を推定するための指標となり得るもので、廃棄物地盤で継続的な沈下計測と空隙率測定を行って図 50、図 51 を作れば、将来の沈下量の予測が可能になる。

また、「(1) 基本的力学特性の把握」図 20 や表 14 に示したとおり、同一現場では空隙率の減少に伴って極限支持力や地盤反力係数が増加することが分かっており、各現場でデータ蓄積がなされれば、空隙率から極限支持力等の推定が可能になると考えられる。

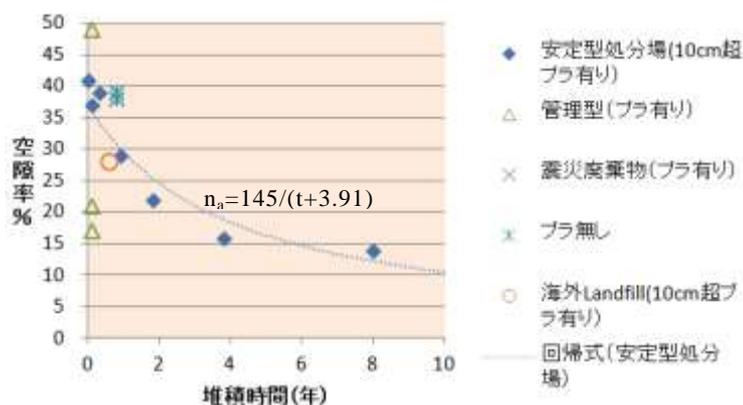


図 50 空隙率と堆積時間の関係
(安定型処分場等の 13 箇所での試験結果)

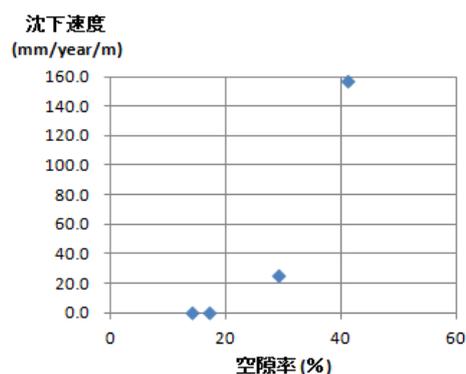


図 51 空隙率と沈下速度の関係
(中部①現場：安定型処分場)

6) せん断強度に関する試験結果

せん断強度は、斜面安定性評価のために必要になる他、構造物基礎等の設計時の滑動評価、建築基礎構造指針¹⁰⁾等に示されている支持力公式から支持力を算定するときなどに必要になる。このため、現場で直接的にせん断強度を測定できる一面せん断試験と、簡易に試験ができる現場土圧試験を実施して、各現場のせん断強度を把握したとともに、廃棄物地盤への適用性や課題について検討した。

a. 一面せん断試験

堆積廃棄物を対象とした現場試験用に改良した一面せん断試験機を図 52 に示す。せん断箱の寸法は幅 30 cm、奥行 30 cm、高さ 15 cm である。堆積廃棄物の表面を平坦に整形し、せん断箱の大きさに合わせて 4 つの側面を切り取り、ブロックの供試体を作製する。このとき、プラスチックや木片などが含まれている場合は、グラインダーを用いて廃棄物を切断することにより供試体を成形することができる。

現場一面せん断試験から得られたせん断応力とせん断変位の関係の例を図 53 に示す。この関係から得られた垂直応力-せん断強度関係を図 54 に示す。

安定型処分場や不法投棄事案で、埋立物が雑多でも、雑多な状態で一定している場合には、 c 、 φ を求める際の「垂直応力-せん断強度」の関係は直線状になり、現行の一面せん断試験法により適切な c 、 φ が求められていると考えられる (図 54)。一方、管理型処分場など、埋立物が処分場内の近距離の範囲内で極端に異なる場合には、「垂直応力-せん断強度」の関係が乱れるため、こうした場合には現行の試験法では、数多くの試験を行うか、より大型の試験機を用いるなどして適切な「垂直応力-せん断強度」の関係を求める必要がある (図 55)。

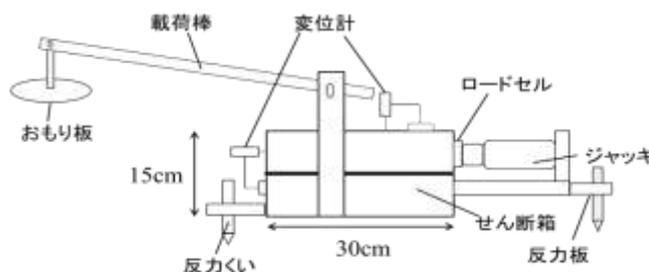


図 52 現場一面せん断試験機

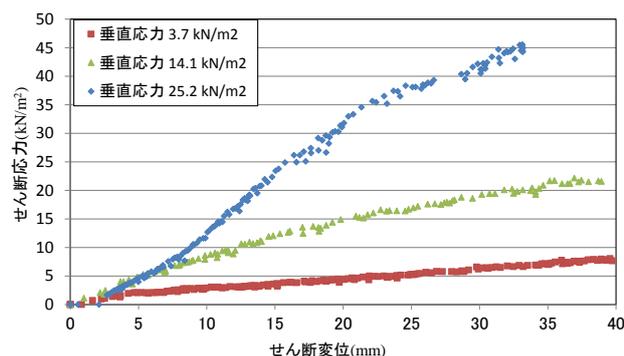


図 53 せん断応力とせん断変位の関係

(中部①・安定型処分場 1年経過地盤)

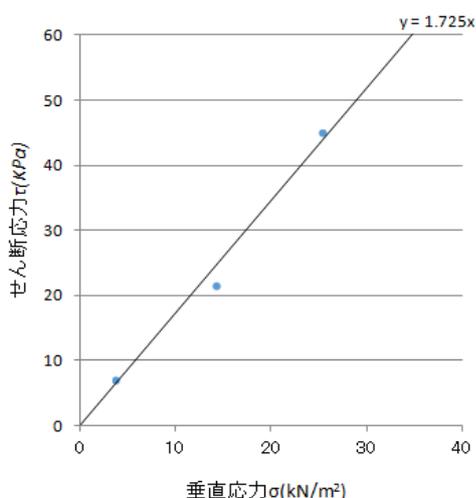


図 54 垂直応力－せん断強度
(中部①・安定型処分場 1年経過地盤)

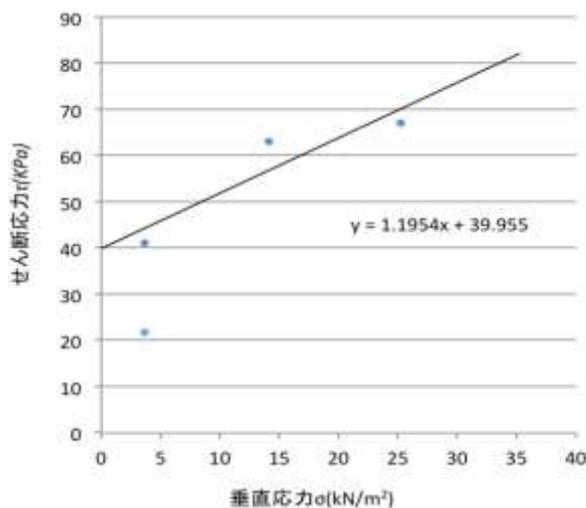


図 55 垂直応力－せん断強度
(関東②・管理型処分場 埋立直後地盤)

なお、(3) 現場概略試験方法に示す停止安息角や衝撃加速度と一面せん断試験から得られた強度定数の相関図 (図 69、図 78) で、他と乖離した値をとっているデータは上記の「垂直応力－せん断強度」の関係が乱れた場合に多い。

図 56 は、現場試験でばらつきが生じたため対象地の廃棄物層をサンプリングし、室内試験によって強度定数を求めた結果を比較したデータである。室内試験結果は、現場試験のばらつきの範囲内にあり、垂直応力－せん断強度の関係も直線状になり、室内試験により適切な c 、 ϕ が求められていると考えられる。そのため、原位置試験で強度定数を求めるのが難しい場合は、対象地の廃棄物層をサンプリングし、室内試験によって強度定数を求めることもできる。ただし、大きな廃棄物を取り除いた供試体で試験を行うと、堆積廃棄物の強度を十分に表わしていないことも想定されるので注意が必要である。

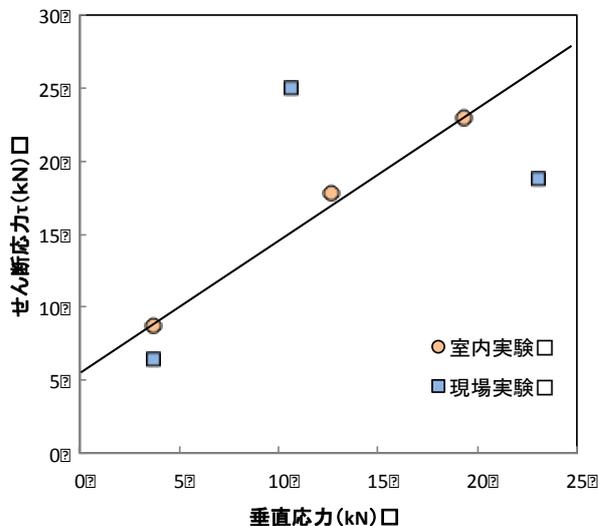


図 56 垂直応力－せん断強度
(中国地方・安定型処分場)

b. 現場土圧試験

堆積廃棄物の強度を求める試験として原位置一面せん断試験がある。しかしながら、供試体の整形作業に時間がかかり、効率的に強度定数を求めるための新たな試験法が求められている。ここでは、簡易的に堆積廃棄物の強度推定するために開発された現場土圧試験機（図 57）を用いて種々の地盤で実験を行い、原位置一面せん断試験の結果と比較し、その適用性を示す。



図 57 現場土圧試験実施状況

現場土圧試験では、根入れ深さを変えて杭を打ち込み、深さが異なる 3 個以上の受働土圧を測定し、モーメントとの釣り合い方程式を立てることで強度定数 c 、 ϕ を推定することを目指したものである。図 57 に現場土圧試験実施状況を示す。杭と地表面が傾斜する一般的な場合、図 58 に示すクーロン土圧の考え方を適用できるものと仮定した。この時の受働土圧の合力 P と杭を倒す時の力 T のモーメントの釣り合い式は以下のように表すことができる。

$$Y = \frac{T \times (L \cdot \sin \theta - s) + W \left(\frac{R}{2} - H - \frac{s}{\sin \theta} \right) \times \sin(\theta - 90^\circ)}{\left(\frac{2}{3} \cdot \sin \theta + \frac{s}{H} \right) \times B \cdot (H \cdot \sin \theta)^2} = \frac{\frac{1}{2} + \frac{s}{H \cdot \sin \theta}}{\frac{2}{3} + \frac{s}{H \cdot \sin \theta}} \times 2c \sqrt{K_p} + \frac{1}{2} \gamma H K_p$$

$$\approx 0.81 \times 2c \sqrt{K_p} + \frac{1}{2} \gamma H K_p \quad \dots \dots \text{式 3}$$

$$K_p = \frac{\sin^2(\theta + \phi)}{\sin^2 \theta \cdot \sin(\theta - \delta) \cdot \left\{ 1 - \frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi + i)}{\sin(\theta - \delta) \cdot \sin(\theta - i)} \right\}^2}$$

ここで、 θ ：地表面に対する杭の傾斜角、 δ ：地盤と杭表面との摩擦角、 R ：杭の全長、 H ：根入れ深さ、 B ：土圧の有効幅、 K_p ：クーロン土圧による受働土圧係数である。 Y ：杭を倒すときの力 T および杭の長さなどの試験条件から求めることができる応力。釣合応力 Y を縦軸、根入れ深さ H を横軸に実験結果をプロットする。根入れ深さを変えて実験を行うことにより、回帰の直線を得ることができる。式 3 より、直線の切片は、 $0.81 \times 2c \sqrt{K_p}$ 、傾きは $1/2 \gamma K_p$ となる。従って、土の単位体積重量がわかると K_p を求めることができる。さらに、この値を直線の切片の式に代入すると、粘着力 c を求めることができる。

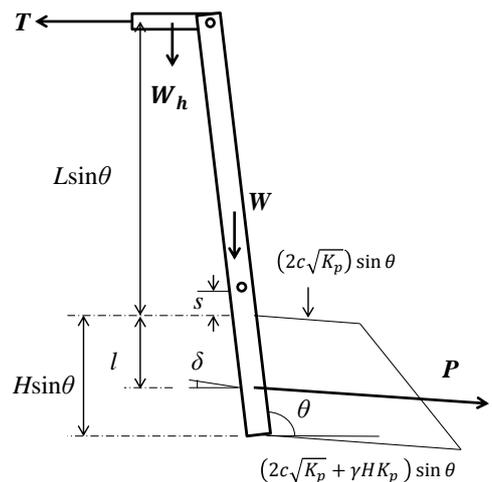


図 58 土圧試験におけるモーメントの釣り合いの考え方

試験は廃棄物を含んでいない地盤で 3 点行い、廃棄物を含んだ地盤 7 点で一面せん断試験と土圧試験を実施した。旧河川堤防・不法投棄（東北③現場）で 2 箇所、廃棄物地盤（中部①現場）で 4 箇所、不法投棄（九

州) で1箇所実験を行った。旧河川堤防(東北)①・②、廃棄物地盤(中部)③・④は、手選別によって組成を調べた。廃棄物の中でプラスチックは一面せん断試験において強度定数に大きな影響を与え

ると考えられており、試料に対する重量比で示すと旧河川堤防(東北)①・②は約1%、廃棄物地盤(中部)③・④は約14%という状態で廃棄物地盤(中部)が多い状態であった。不法投棄(九州)において目視では、ほぼプラスチックは含まれていない状態であった。その他に含まれる廃棄物については瓦・タイル類の量が大きく異なる状態であった。旧河川堤防(東北)①・②

は約0.3%、廃棄物地盤(中部)③・④は約9.1%であった。大きさは最大で4cm程度あり内部摩擦角に影響を与えらる。自然含水比は、宅地(九州)は30%、まさ土地盤(九州)は9%、廃棄物地盤(中部)③・④は18%であった。

廃棄物地盤(中部)④の一面せん断におけるせん断応力と変位の関係を図59に示し、現場土圧試験の張力と杭の傾斜角の関係を図60に示す。一面せん断試験は廃棄物の影響によってピークが現れないと考えられる。図60の土圧試験はピークが現れることが分かった。その他の廃棄物地盤でも同様にピークを示した。対象地盤はピーク時に破壊したと考え、強度定数を求めることとする。

対象地盤の湿潤密度とそれぞれの試験で求めた強度定数を表16に示す。現場土圧試験において粘着力が0kN/m²と示しているのは、根入れ深さHと釣合応力Yとの関係で求めた切片が負の値を示し、粘着力を算出すると負の値を示したためである。図61に実施したすべての地盤でのそれぞれの強度定数において一面せん断試験と土圧試験を比較した図を示す。

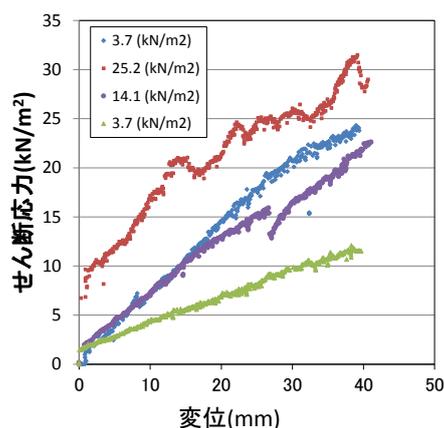


図 59 せん断応力と変位の関係(一面せん断試験)

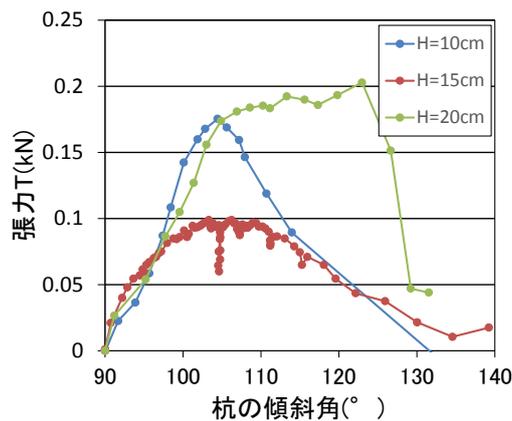


図 60 張力と杭の傾斜角の関係(土圧試験)

表 16 試験結果

現場名	湿潤密度 (g/cm ³)	原位置一面せん断試験		現場土圧試験	
		粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)
宅地(九州)	1.68	10.1	33.4	0.0	50
まさ土地盤(九州)	1.65	4	47.3	1.5	43
珪砂7号(九州)	1.41	1.6	34.5	1.4	32
旧河川堤防・不法投棄(東北)①	1.96	15.2	3.6	7.2	19
旧河川堤防・不法投棄(東北)②	1.96	11.9	29.6	2.5	45
廃棄物地盤(中部)①	1.40	0.0	59.9	0.0	51
廃棄物地盤(中部)②	1.58	17.6	36.2	0.9	49
廃棄物地盤(中部)③	1.04	5.2	37.3	10.3	51
廃棄物地盤(中部)④	1.27	8.3	35.9	0.0	50
不法投棄(九州)	1.69	17.6	33.1	0.7	54

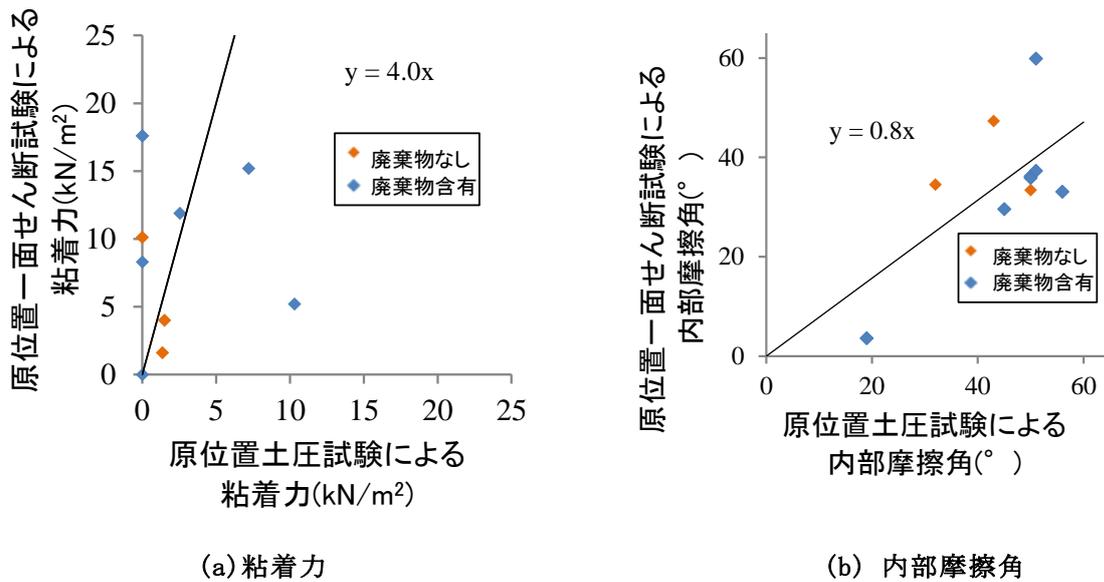


図 61 原位置一面せん断試験と現場土圧試験の強度定数の関係

表 16 と図 61 より廃棄物を含んでいない地盤における 3 つの原位置試験結果のうち、まさ土地盤（九州）と珪砂 7 号（九州）の粘着力は、一面せん断試験の結果に近い値が求めた。内部摩擦角については、珪砂 7 号以外の結果はそれぞれ 15°程度異なる結果を得た。宅地（九州）が一面せん断試験に対する強度定数が大きく異なったことは、地盤が礫を含んでおり、大きな値が得られたと考えられる。

廃棄物地盤における一面せん断試験の結果についてプラスチックが少ない旧河川堤防（東北）・不法投棄（九州）より廃棄物地盤（中部）が粘着力において概ね低い結果を得た。内部摩擦角は廃棄物地盤（中部）が高いことがわかった。

実施したすべての試験の関係において、粘着力は土圧試験が一面せん断試験より低く、内部摩擦角は大きい値になる傾向が分かった。粘着力については $c=0\text{kN/m}^2$ の結果が多いことが分かった。原因として、根入れ深さ H が低いときに鈎合応力 Y の値が極端に低いことが考えられる。杭の根入れ深さが浅いときの試験において、杭を打ち込む際に、根入れが浅く安定しないことや力をほとんど加えずに杭の自重だけでせん断が行われるため低い値を得たと考えられる。また、杭付近の地表面部分の土は杭を打ち込む際に乱れ、杭に作用する抵抗力を過少に評価していると考えられる。

原位置一面せん断試験に対して現場土圧試験の結果は、ばらつきがあるものの、ある程度の相関性があるため、一面せん断試験が実施できない場合の簡易推定法となり得ることが示された。

7) 耐震性に関する試験

擁壁などの抗土圧構造物に対して、現行の設計指針では、地震時土圧算定のために物部岡部式が用いられることが多い。廃棄物層の耐震性を検討するために、10cm以上のプラスチックが混入した廃棄物地盤の振動台模型実験を行った。図62に試験装置の概要、図63に実験の状況を示す。物部岡部式の適用性を検証するために、固定壁を設置して、この擁壁に作用する土圧を算定するために荷重計と合計8つの加速度計を設置した。

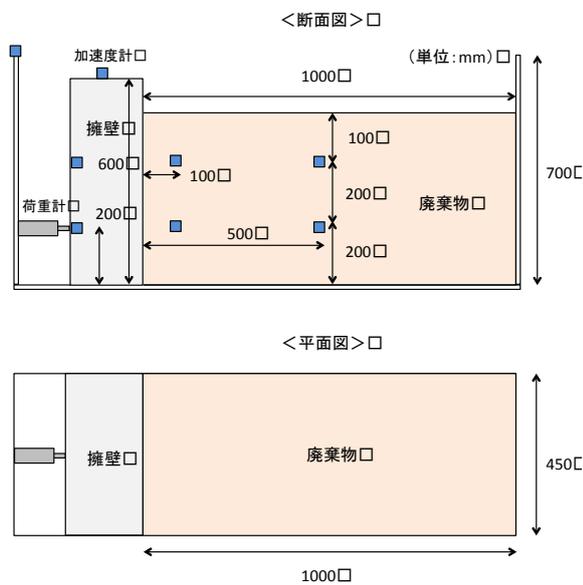


図 62 振動台実験装置

廃棄物層は1層約10cmの試料を敷いて5.3kgのランマーを15回落下させて作製した(湿潤密度1.14g/cm³)。振動台実験では、正弦波を入力周波数約5Hzで約5秒間与え、200galずつ増加させて1000gal程度まで加振した。



図 63 振動台実験の状況

400galで加振した時の加速度計の測定結果の一例を図64に示す。入力加速度と荷重計を設置している擁壁の固定点(加速度1)はほぼ同じ振動レベルを維持している。これに対して擁壁は完全に固定されていないため、擁壁上部に設置した加速度2と地盤中の加速度は入力加速度よりも大きな値を示す。また、廃棄物層は全体が同じように振動していることがわかる。

図65に中部①現場試料による振動台実験結果を示す。廃棄物地盤は見かけ上の粘着力を有し、静止時には自立して水平土圧が作用しない状態であった。10cm以上のプラスチック等が混入した廃棄物地盤では、水平震度が1を超えるような条件(通常の土木設計では0.12~0.24⁹⁾で無い限り、地震時に擁壁等に作用する水平土圧は、土砂地盤より小さい。

物部岡部式による地震時土圧算定式⁹⁾を以下に示す(震度法)。

$$P_{Ea} = \gamma h \cdot K_a$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos \theta \cdot \cos(\delta + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \theta)}{\cos(\delta + \theta)}} \right]^2} \quad \dots \dots \text{式 4}$$

- P_{Ea} : 深さ h の地震時主動土圧
- K_a : 地震時主動土圧係数
- ϕ : 裏込め土の内部摩擦角
- γ : 裏込め土の単位体積重量
- δ : 壁面と土の摩擦角
- θ : 地震時回転角

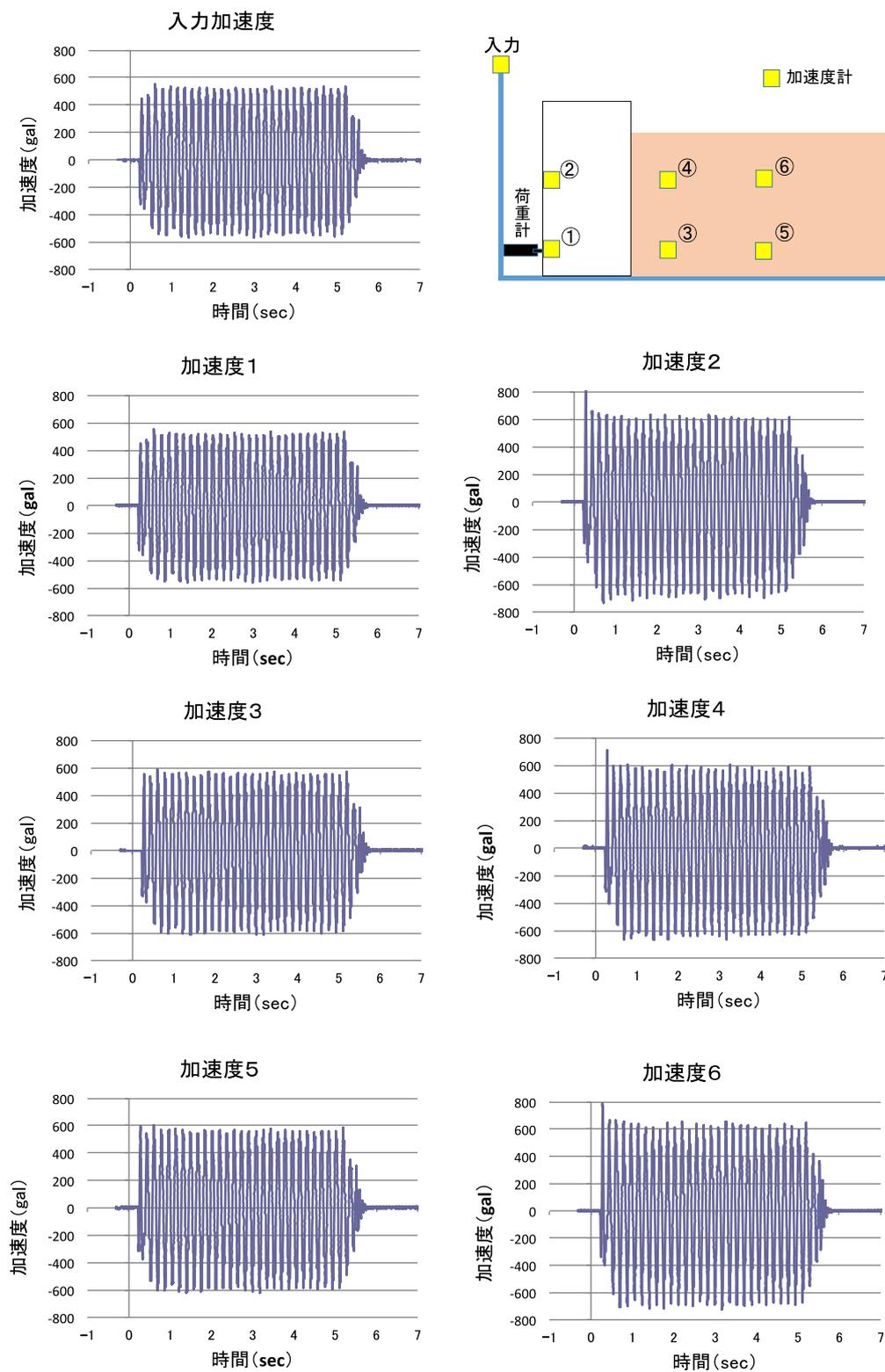


図 64 測定結果の一例 (加速度計)

震度法では粘着力が無視され、土質定数としては内部摩擦角と土の単位体積重量によって地震時土圧が算定される。

ここでは、粘着力のない乾燥豊浦砂（相対密度 90%）で同様の条件で行われた振動台実験の結果を参考として比較を行う（渡辺健治ほか「模型実験による地震時土圧に関する一考察」第 26 回地震工学研究発表会講演論文集、pp.745-728、2001 年）¹¹⁾。

乾燥豊浦砂での実験と物部岡部式（式 4）による地震時土圧算定の結果の比較を図

66 に示す。計算では、相対密度 90%の豊浦砂のピーク強度（内部摩擦角 51°）を用いた。水平震度が 0.2 のときに算定結果と実験

値がほぼ一致するが、水平震度が大きくなると算定結果が次第に大きくなる。したがって、通常の土木設計で用いられる 0.12~0.24 程度の震度なら、粘着力のない砂質土に対して、物部岡部式による地震時土圧算定式が適用できる。一方、廃棄物試料の振動台実験と地震時土圧算定の結果を図 67 に示す。計算では、廃棄物試料の室内地面せん断試験から得られた内部摩擦角 42.5°を用いた。地震時土圧の算定値はいずれの水平震度においても実験結果より大きな値を示す。これは、プラスチックを含む廃棄物層が粘着力を有し、砂質土に比べて粘り強い構造をしているためであると考えられる。

このように、廃棄物地盤の地震時の斜面安定計算や擁壁等の安定計算においては、土砂地盤で用いられる震度法による解析を行うことにより土圧を安全側に評価することができる。

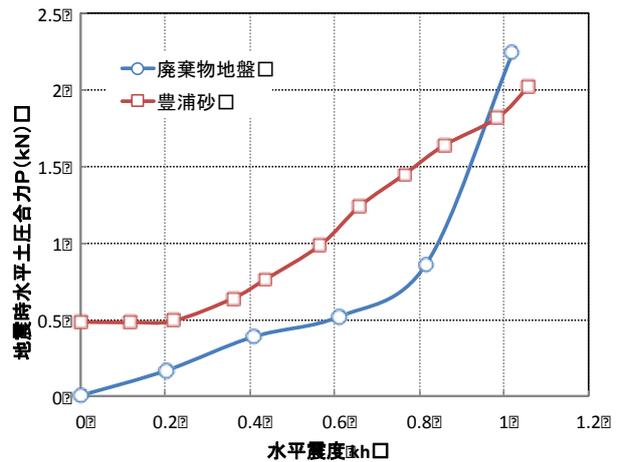


図 65 中部①現場試料による振動台実験結果 (10cm 以上のプラスチックが混入)

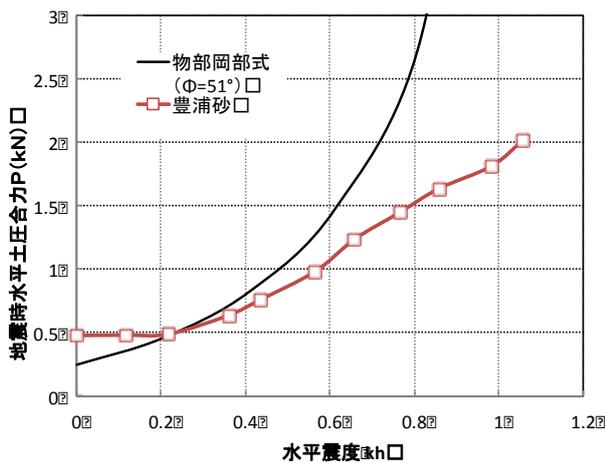


図 66 豊浦砂の振動台実験結果と地震時水平土圧の算定結果の比較

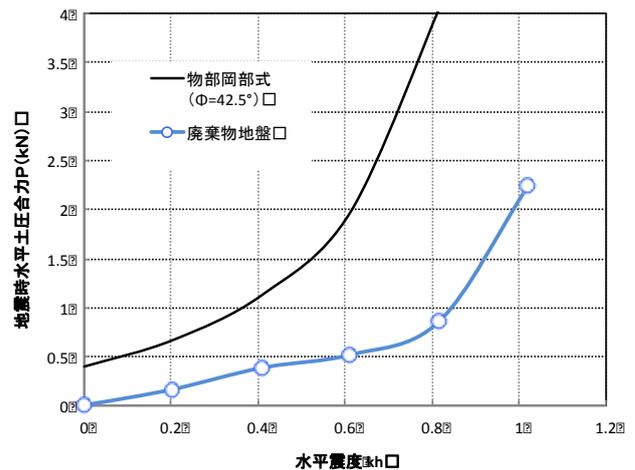


図 67 廃棄物試料の振動台実験結果と地震時水平土圧の算定結果の比較