Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

安全で長寿命化に資する安定型処分場の試験・設計方法に関する研究 (3-1707) _{平成29年度~令和元年度}

Test and Design Methods for Safe and Sustainable Inert Waste Landfills

<研究代表機関> 京都大学

<研究分担機関> 長崎大学 長野県短期大学 産業廃棄物処理事業振興財団 前田建設工業(株)

令和2年5月

| I. 成果の概要 | ••••• 1 |
|---------------------------|-----------|
| 1. はじめに (研究背景等) | |
| 2. 研究開発目的 | |
| 3. 研究開発の方法 | |
| 4. 結果及び考察 | |
| 5. 本研究により得られた主な成果 | |
| 6. 研究成果の主な発表状況 | |
| 7. 研究者略歴 | |
| Ⅱ. 成果の詳細 | |
| Ⅱ-1 試験・設計マニュアルの作成と研究の総括 | ••••• 13 |
| (京都大学) | |
| 要旨 | |
| 1. はじめに | |
| 2. 研究開発目的 | |
| 3. 研究開発方法 | |
| 4. 結果及び考察 | |
| 5. 本研究により得られた成果 | |
| 6. 国際共同研究等の状況 | |
| 7. 研究成果の発表状況 | |
| 8. 引用文献 | |
| Ⅱ-2 廃棄物-えん堤の力学挙動に関する研究 | •••••• 27 |
| (長崎大学) | |
| 要旨 | |
| 1. はじめに | |
| 2. 研究開発目的 | |
| 3. 研究開発方法 | |
| 4. 結果及び考察 | |
| 5. 本研究により得られた成果 | |
| 6. 国際共同研究等の状況 | |
| 7. 研究成果の発表状況 | |
| 8. 引用文献 | |
| Ⅱ-3 水質悪化がヒト健康に与える影響に関する研究 | ••••• 46 |
| (長野県短期大学) | |
| 要旨 | |
| 1. はじめに | |
| 2. 研究開発目的 | |
| 3. 研究開発方法 | |

- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献

II-4 廃棄物層の力学特性評価と現場試験に関する研究
 ・・・・・・62
 (産業廃棄物処理事業振興財団)
 要旨

- 1. はじめに
- 2. 研究開発目的
- 3. 研究開発方法
- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献

II-4 容量と密度の増加等につながる設計法に関する研究・・・・・・ 79(前田建設工業)

要旨

- 1. はじめに
- 2. 研究開発目的
- 3. 研究開発方法
- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献
- Ⅲ. 英文Abstract

••••• 97

I. 成果の概要

課題名 3-1707 安全で長寿命化に資する安定型処分場の試験・設計方法に関する研究

課題代表者名 勝見 武 (京都大学大学院地球環境学堂教授)

研究実施期間 平成29年~令和元年度

研究経費(累計額) 48,456千円
 (平成29年度:16,152千円、平成30年度:16,152千円、令和元年度:16,152千円)
 ※研究経費は令和元年度までの全期間の委託契約額(間接経費を含む)。

本研究のキーワード 安定型処分場、廃棄物地盤、力学特性、浸出水、試験法

研究体制

- (1) 試験・設計マニュアルの作成と研究の総括(京都大学)
- (2) 廃棄物-えん堤の力学挙動に関する研究(長崎大学)
- (3) 廃棄物層の浸透水の水理・水質特性に関する研究(長野県短期大学)
- (4) 廃棄物層の力学特性評価と現場試験に関する研究(産業廃棄物処理事業振興財団)
- (5) 容量と密度の増加等につながる設計法に関する研究(前田建設工業(株))

1. はじめに(研究背景等)

産業廃棄物最終処分場の設計は、現状では一般廃棄物最終処分場を対象とした「廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領(全国都市清掃会議)」に準じてなされている。焼却灰等を受け入れる管理型最終 処分場では問題はないものの、性状やサイズが異なるプラスチックやがれき類等による安定型最終処分 場では、力学挙動や浸出水、発生ガス、内部温度といった多くの面で焼却灰等による埋立と異なり、別 途の設計基準を定める必要がある。

安定型最終処分場は、水処理施設を持たないことから放流水の安全性についての懸念があることや、 内部温度の上昇や発生ガスについて問題が指摘されるケースも多い。一方で、安定型最終処分場は、既 往研究で斜面安定性、支持力、耐震性が通常の盛土地盤よりも高いことが分かっている。また、プラス チックやがれき類等による地盤では空隙が多く、この空隙を少なくすることが埋立量の増大や斜面安定 性等に寄与する他、発生ガスや内部温度にも好影響を与える可能性がある。

安定型最終処分場については、非焼却物の存在の他、地方での過疎化や経済性から、ニーズは将来的 にも継続すると考えられる。研究成果により、安全かつ長寿命な安定型最終処分場が構築される他、既 存の埋立地であっても埋立方法の変更により安全性の確保と長寿命化が見込める。また、今後も顕在化 することがあり得る不適正な安定型処分場の適正化や、安全面等の問題を抱えるアジア地域等の埋立地 への貢献も可能である。

2. 研究開発目的

本研究の最終目的は、安全で長寿命化に資する産業廃棄物安定型最終処分場の試験・設計方法をマニ ュアル化し提案することであり、具体的には以下の項目を達成する。

①安定型最終処分場の安全で長寿命化に資する埋立方法の提案②プラスチックやがれき等を含む廃棄物層に適する試験法の提案

③安定型最終処分場の設計法の提案(埋立構造、えん堤等の貯留構造物、浸出水集排水施設等) ④上記をまとめたマニュアル案の作成

図2.0.1に研究目的の概念図を示す。

埋立層の強度面については、既往研究で、プラスチックやがれき等の地盤は高い斜面安定性や支持力 を有することが明らかにされているものの、データ数の不足から知見の一般化には至っていない。さら に、時間と労力を要する従来の現場試験法に替わる簡易な試験法の確立が必要であることから、サブテ ーマ2では、ポータブルコーン貫入試験やスパイラル杭引抜試験等の実行性に優れた方法を現場試験と 室内試験を通して考案し、提案する。

有害物質等の環境安全性については、プラスチックやがれき等の埋立廃棄物層では、一部の水はプラ スチック等の表面に長期間貯留されるため、浸出水の水質悪化が懸念される。埋立構造や廃棄物組成と 浸出水の水理・水質特性の関係については未研究であり、サブテーマ3では実物の廃棄物を用いたカラ ム通水試験によりこれらの特性を明らかにする。これらの知見に基づき、浸出水の水理・水質特性の観 点から、合理的な埋立方法と浸出水集排水施設について提案する。

カ学特性の評価については、これまでは既存の土質試験法が援用されてきたが、個々の廃棄物のサイズが土粒子より極めて大きいことから、廃棄物地盤に適した試験法を確立する必要がある。ドイツでは3m×5m規模の大掛かりな室内試験が行われた実績があるが、施工性や経済性の観点から十分に高い汎用性があるとは言い難いことから、サブテーマ4では、国内の複数の安定型処分場で各種現場試験を行い、 作業性も考慮しつつ精度良く現場の特性を評価・予測しうる試験法を確立する。

我が国の現状においては、最終埋立高さと埋立て量の確保、基盤条件、コスト、施工性等の面から盛 土ダム(土えん堤)形式が数多く採用されている。サブテーマ5では、受入容量の増加による処分場の 長寿命化を期待し、現行の1:2勾配より急勾配で設計することの妥当性を、模型実験と安定解析により明 らかにするとともに、廃棄物の埋め立て方法や処分場構造の設計に資する知見を提示する。

上記の各サブテーマを実施することで、安定型最終処分場の強度、力学特性、安全性に関する科学的 知見を取得できる。サブテーマ1では、得られる個別成果を総合的に解釈し、安全かつ長寿命な処分場 の設計と適切な現場試験法に関するマニュアルを整備する。



図2.0.1 研究目的の概要図

3. 研究開発の方法

具体的な試験項目は、現場試験と室内強度試験、カラム試験、安定解析から成り、これらの成果に基づき設計法や埋立方法の具体的内容を盛り込んだマニュアル案を作成した。各サブテーマで実施する項目と位置付けは、図3.0.1に示すとおりである。

(1) 試験・設計マニュアルの作成と研究の総括

本研究を適切に遂行するための全体研究計画を作成した。カラム実験や浸透模型試験の結果等に基づ き、浸透水挙動と力学挙動のモデル化を行った。現場実験結果や室内試験等の結果に基づき、安定解析 等の強度評価法を提案した。試験・検討結果の全体を総括し、安定型処分場の試験・設計方法に関する マニュアル案を作成した。

(2) 廃棄物-えん堤の力学挙動に関する研究

廃棄物とえん堤の力学的相互作用を解明するための検討を行った。廃棄物の力学挙動については、サ ブテーマ(4)の現場実験結果等を踏まえた整理を行うとともに、補強効果の付与など安定型処分場に 適するえん堤材料の検討を行った。さらに、廃棄物組成を任意に調整して室内一面せん断試験を実施し、 強度変形特性との関係を評価した。プラスチック等を含む廃棄物層の地震時強度特性を議論するととも に、設計法提案につながる廃棄物一えん堤の力学挙動を整理した。

(3) 廃棄物層の浸透水の水理・水質特性に関する研究

プラスチック表面等に貯留される水による環境影響や、廃棄物組成や埋立方法と浸透水質の関係を把 握することを目的とし、大型カラム実験を実施した。注水量、試料高、浸透水量の関係を把握するため の予備実験を実施し、実行性を確認した後、複数の現場から採取した廃棄物試料による大型カラム試験 を行い、土砂層の敷設や混合、廃棄物の高密度化が浸出水の水理・水質特性に与える影響を評価した。 さらに、室内中型カラムを用いた不飽和浸透実験も行い、プラスチック量と水質の関係を評価した。こ れらのカラム実験結果を整理して、組成、埋立方法、雨量、浸透量、浸透水水質の関係を把握した。

(4) 廃棄物層の力学特性評価と現場試験に関する研究

既往研究で知見が得られていない現場内の強度のばらつきを把握することを主目的とした現場実験を、 国内の9現場21地点で行った。異なる埋立年数を含む複数の現場を対象とし、安息角試験、キャスポルを 多点で行って現場内の強度のばらつきを調べるとともに、強度把握の指標となる一面せん断試験、組成 分析、現場密度試験を行った。現場実験結果を総括し、現場内の強度のばらつき度合いと影響因子を整 理するとともに、その評価法を提案した。また、安定型処分場の設計に必要となる現場試験法について、 簡易試験法と詳細試験法に分けて考案した。

(5) 容量と密度の増加等につながる設計法に関する研究

現場実験結果等をもとに、容量増と密度増につながる設計の考え方について、廃棄物の力学特性、廃 棄物-えん堤の力学挙動、動的安定性などを模型実験と安定解析により評価した。この結果に基づき、 容量増と密度増につながる貯留構造物や集排水施設等の設計の考え方を提示した。



図3.0.1 研究の流れと各サブテーマの内容

4. 結果及び考察

(1) 試験・設計マニュアルの作成と研究の総括

各サブテーマの成果を取りまとめ、科学的知見に基づく「産業廃棄物安定型最終処分場の試験・設計

方法に関するマニュアル(案)(暫定版)」(以下、マニュアル案)を作成した。作成したマニュアル案の構成は表4.1.1に示すとおりであり、全5章から成る。

1章では、本マニュアル案の適用範囲を明示している。

2章では、既存の規定で明記されていない課題を整理しマニュアルの位置付けを明確にした上で、特に現場試験の方法について整理している。

3章は、安全性確保のための留意点についてまとめており、プラスチック等が混入した廃棄物地盤中 の浸透水の挙動と埋立廃棄物が浸透水質に与える影響について説明している。

4章は、安定型処分場の設計事項のうち、廃プラスチック混入等による安定型処分場特有の強度特性 をふまえた設計が必要になる事項について述べている。

5章では、適度な廃棄物地盤の固さと十分な斜面安定性を得るために有効な廃棄物地盤の埋立方法に ついて説明している。

表4.1.1 マニュアル案の構成

1. 適用範囲

2. 設計のための必要事項と試験法

- (1) 安定型処分場の構造・維持管理についての規定事項
- (2) 本マニュアルの目的と設計のための必要事項
- (3) 安定型処分場の地盤強度特性
- (4) 安定型処分場の地盤分類別の強度特性と力学定数の目安値
- (5) 強度試験法
- (6)荷重の種類と評価方法
- 3. 安全性確保のための留意点
 - (1) 地盤中の浸透水の流れ
 - (2) 埋立廃棄物が浸透水質に与える影響

4. 設計方法

- (1) 貯留構造物
- (2) 土えん堤と埋立勾配、高さ
- (3) 浸透水集排水施設

5. 搬入管理と展開検査上の留意点

- (1) 搬入管理に関する規定事項
- (2) 合理的な埋立方法
- (3) 展開検査等による搬入管理上の留意点

(2) 廃棄物-えん堤の力学挙動に関する研究

原位置一面せん断試験と室内一面せん断試験の結果から、繊維廃材を含む廃棄物地盤の強度定数は、 一般的な地盤と比較して高い値を有しており、せん断に対して大きな抵抗を発揮しうることを示した。 また、繊維廃材含有率の高い地盤では転圧後のリバウンドにより締固め効果を長期にわたり維持するこ とは難しいため、粘着力は小さく内部摩擦角は大きくなることを明らかにした。一方で、供試体内の廃 棄物の組成や繊維状物質の存在する向き、試料の形状やサイズによって得られる強度定数がばらつくこ とをデータで示した。

簡易的に表層地盤の強度定数を推定するためにスパイラル杭を開発し、室内と原位置でスパイラル引 抜試験とコーン貫入試験を行い、粘着力と内部摩擦角を求めた。原位置での廃棄物地盤ではそれぞれの 試験結果にバラつきが生じるが、粘着力に関してはおおよその相関があると考えられる。

さらに、得られた強度定数を用いて斜面の安定計算を行い、無限斜面法のせん断強度を求めたところ、

図4.2.18に示すように、簡易現場強度試験法によって一面せん断試験で得られるせん断強度を精度良く 評価しうることを明らかにした。



図4.2.18 無限長の直線斜面を仮定した場合の各試験の結果から推定されるせん断強度の比較

(3) 廃棄物層の浸透水の水理・水質特性に関する研究

プラスチックが混入した廃棄物地盤では、大きな空隙を有することから雨水の透水性は基本的に極め て良い。しかし、地盤中では雨水はプラスチック等の凹部等に貯留されながら流下し、一定量が流下し た後の廃棄物凹部等に貯留された水は極めてゆっくりと流下する。プラスチック等の表面等に貯留能力 がある廃棄物が多い程、内部貯留可能量が大きくなり、ピーク排水量が小さく、ピーク到達時間が長く なる。このため、最終処分場では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を示した。

また、10cm以上の粗大なプラスチックを篩により除去したケースと、10cm以上のプラスチックを破砕 (裁断)して10cm以下にしたケースとを比較した大型カラム実験(表4.3.3)より、10cm超を除去したケ ース(2)ではEC、TOC、BODが無調整のケース(1)に比べ低下したが、裁断したケース(3)(プラスチックの 混入重量は無調整試料と同じ)では、無調整試料とTOC等の値に差は認められなかった。したがって、TOC 等はプラスチック等の量に依存しており、安定型処分場ではプラスチック等の混入量を減らすことが、 浸透水のTOC等の値を下げることに結びつくと考えられる。

表4.3.3 大型カラム試験での10cm超のプラスチックを除去、及び破砕したケースとの比較

| | | | | 10cm超 | | 24時間 | | | | | | |
|------|--------------|------|--------|-------|-----|------|-------|----------|-----------|--------|-----|--------|
| | ケース | 層厚 | 密度 | プラ | が小 | 累積 | | 1か | 月後の打 | 非水のフ | k質 | |
| | | | | 重量比 | 用炉 | 排水量 | (mS/c | m) (mg/l | _) (mg/L) | (mg/L) | | (mg/L) |
| | | (cm) | (g/cm) | (%) | (分) | (L) | EC | TOC | BOD | T-N | pН | SS |
| 東北① | (1) 標準(無調整) | 57 | 1.2 | 13.7 | 30 | 7.9 | 4.8 | 110 | 36 | 9 | 7.9 | 180 |
| 1年堆積 | (2) 10cm篩下 | 57 | 1.1 | 11.4 | 22 | 10.8 | 4.5 | 97 | 30 | 9 | 7.6 | 53 |
| 試料 | (3)10cm以下に破砕 | 60 | 1.1 | 13.7 | 21 | 9.5 | 4.4 | 110 | 35 | 11 | 7.7 | 140 |

(4) 廃棄物層の力学特性評価と現場試験に関する研究

各種現場試験の結果の一覧を、表4.4.1に示す。

| | 安定刑 | | | | 廃棄物 | 刚組成 | | 100mm | 超混入率 | 率 現場密度·空隙試験 | キャスホル 安息用試験 | | 自試験 | ー面せん断試験 | | | |
|--------------|-----------------|----------|------------|------------|----------------------|------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------|-------------|-------|----------|-----------|-----------|-------|------------|
| 区分 | 见众王 见分場 名 | 調査 年月 | 埋立後 経過年 | プラス チック | ガラス・陶 磁器、が れき類 | 金属、 その他 | 土砂分 /20mm 篩下 | 100mm 超物 混入率 | 100mm超 プラ 混入率 | 湿潤 密度 | 含水比 | 空隙率 | Ia | 限界 安息角 | 停止 安息角 | φ | с |
| | | | (年) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (g/cm^3) | (%) | (%) | | (°) | (°) | (°) | (kN/m^2) |
| | | 2018/ 8 | 0.0 | | | | | 6.2 | 2.6 | 0.9 | 12 | 46 | 5.3 | 43 | 38 | 32 | 4 |
| | 申北① | 2017/ 8 | 1.0 | 5 | 19 | 10 | 66 | | | 1.4 | 38 | 25 | 13.3 | 38 | 32 | 51 | 10 |
| | ℼ℩ℾℿ | 2014/12 | 3.8 | | | | | | | 1.4 | 42 | 16 | 15.8 | 51 | 41 | 41 | 22 |
| | | 2017/ 8 | 10.0 | 17 | 15 | 18 | 50 | | | 1.9 | 19 | | 10.7 | 42 | 40 | 51 | 11 |
| | キャシ | 2019/6 | 4.5 | 22 | 24 | 7 | 47 | 20.7 | 13.2 | 1.3 | 32 | 31 | 6.4 | 47 | 42 | 28 | 17 |
| | ≭୷୰୰ | 2019/6 | 4.5 | | | | | 8.0 | 5.6 | 1.2 | 35 | 30 | 8.8 | 46 | 40 | | |
| | | 2017/ 8 | 0.0 | 5 | 26 | 6 | 63 | | | 1.5 | 24 | | 10.1 | 37 | 36 | 27 | 13 |
| | | 2015/4 | 0.1 | 7 | 44 | 6 | 43 | | | 1.5 | 10 | 37 | 7.7 | 42 | 36 | 41 | 24 |
| 100mm | 関果 ① | 2015/4 | 15.0 | 6 | 18 | 10 | 66 | | | 1.6 | 28 | 21 | 7.6 | 46 | 40 | 35 | 24 |
| 超ノフ 多 | | 2017/ 8 | 19.0 | 6 | 9 | 7 | 78 | | | 1.5 | 30 | 10 | 5.7 | 43 | 40 | 23 | 19 |
| | 関東② | 2019/10 | 10.0 | 25 | 7 | 5 | 63 | 12.5 | 8.1 | 1.4 | 26 | 26 | 6.1 | 47 | 38 | 53 | 11 |
| | | 2013/11 | 0.0 | 14 | 25 | 4 | 57 | | | 1.2 | 21 | 41 | 3.7 | 51 | 40 | | |
| | | 2013/ 8 | 0.9 | 14 | 25 | 4 | 57 | | | 1.2 | 23 | 29 | 6.1 | 49 | 44 | 59 | 2 |
| | 中部① | 2014/ 8 | 1.8 | 14 | 25 | 4 | 57 | | | 1.4 | 29 | 22 | 7.2 | 46 | 40 | 36 | 8 |
| | | 2013/11 | 8.0 | 14 | 25 | 4 | 57 | | | 1.6 | 19 | 14 | 9.7 | 56 | 44 | 36 | 18 |
| | | 2013/11 | 15.0 | 17 | 28 | 12 | 43 | | | 1.5 | 23 | 17 | 7.3 | 51 | 43 | 38 | 5 |
| | 中国① | 2015/8 | 0.3 | 6 | 30 | 5 | 59 | | | 1.1 | 25 | 39 | 8.3 | 46 | 38 | 27 | 11 |
| | 中国② | 2019/11 | 0.4 | 47 | 10 | 29 | 14 | 52.0 | 25.3 | 0.8 | 20 | 47 | 5.1 | 39 | 35 | 31 | 8 |
| | 平均 | | 5.2 | 15 | 22 | 9 | 55 | 19.9 | 11.0 | 1.4 | 25 | 28 | 8.1 | 46 | 39 | 38 | 13 |
| | 範囲 | | | | | | | | | 0.9-1.9 | 10-42 | 10-47 | 3.7-15.8 | 37-56 | 32-44 | 27-59 | 2-24 |
| | | 2018/ 2 | 0.3 | 1 | 22 | 3 | 74 | 5.8 | | 1.8 | 23 | 17 | 23.8 | 36 | 34 | | |
| | 明古① | 2018/ 8 | 0.3 | | | | | 3.2 | 0.2 | 1.7 | 22 | 15 | 14.5 | 41 | 36 | 61 | 17 |
| 100mm 超プラ | 関果③ | 2018/ 8 | 0.3 | | | | | 6.2 | 0.4 | 1.6 | 30 | 14 | 21.1 | 39 | 35 | | |
| 無し~ | | 2018/ 2 | 2.0 | 0 | 21 | 3 | 76 | 4.1 | | 1.5 | 17 | 16 | 18.1 | 37 | 34 | 55 | 38 |
| 少 (がれ | 北陸 | 2018/12 | 0.8 | 0 | 19 | 0 | 81 | 0.0 | 0.0 | | | | 9.8 | 38 | 36 | | |
| き等主 | | 2019/2 | 0.0 | 1 | 54 | 1 | 44 | 16.3 | 0.0 | 1.5 | 20 | 29 | 6.2 | 40 | 34 | | |
| 1447) | 中国③ | 2019/ 2 | 0.1 | 5 | 81 | 2 | 12 | 17.7 | 1.6 | | | | 9.2 | 40 | 36 | | |
| | | 2019/ 2 | 10.0 | 0 | 35 | 1 | 64 | 1.2 | 0.0 | 1.9 | 15 | 19 | 10.4 | 34 | 31 | 53 | 28 |
| | 平 均 | | 1.7 | 1 | 39 | 2 | 59 | 6.8 | 0.4 | 1.7 | 21 | 18 | 14.1 | 38 | 35 | 56 | 28 |
| | 範囲 | | | | | | | | | 1.5-1.9 | 17-30 | 14-29 | 6.2-23.8 | 34-41 | 31-36 | 53-61 | 17-38 |
| 全平 | 均 | | | | | | | | | 1.4 | 24 | 25 | 9.9 | 43 | 38 | 41 | 15 |
| 全範 | 囲 | | | | | | | | | 0.9-1.9 | 10-42 | 10-47 | 3.7-23.8 | 34-56 | 31-44 | 27-61 | 2-38 |

表4.4.1 現場試験の結果一覧

注1) 「----」は、試験未実施。

注2) 強度試験は、全て、表層覆土を除去して、廃棄物露呈面の表層で行ったものである。このため、地盤内部では、上表の値よりも密度が大き く、空隙率が小さくなり、粘着力が増加しているものと想定される。 10 cm以上のプラスチックが混入する地盤に対象を絞って、インパクト値*I*aと粘着力*c*をプロットしたのが図4.4.1である。以下の式5ように、インパクト値*I*aと粘着力*c*の間には相関があり、10 cm以上のプラスチックが混入する地盤において、キャスポルを粘着力の概略値を推定するために使用することが可能である。

$$c = 1.7I_a - 0.98 \tag{5}$$

ここで、c;粘着力(kN/m²)、 I_a ;キャスポルによるインパクト値である。



図4.4.1 インパクト値(I_a)と粘着力(c)の関係

(10cm以上のプラスチックが混入した安定型処分場16地点と不法投棄現場4地点での試験結果)

10 cm以上のプラスチックが混入する地盤(表4.4.1に示す安定型処分場16地点、及び不法投棄現場4地 点での値⁶⁾ での安息角試験による停止安息角と一面せん断試験による内部摩擦角をプロットしたのが図 4.4.5である。粘着力*c*が*c* < 10 kN/m²の地点(長尺のプラスチックの混入が多い柔らかい地盤)では、 以下の式6の関係が経験的に見出せることが分かった。このような場合には、安息角試験を内部摩擦角の 概略値を推定するために使用することが可能である。

$$\phi = 1.3\alpha_r - 13 \tag{6}$$

ただし、算定結果が $\phi > \alpha_r$ のときは $\phi = \alpha$ とすると安全側の評価となる。



図4.4.5 停止安息角と内部摩擦角(φ)

(100mm超のプラスチックが混入した安定型処分場16地点と不法投棄現場4地点での試験結果)

(5) 容量と密度の増加等につながる設計法に関する研究

図4.5.1に円弧滑り法による安定解析結果を示す。廃棄物層の内部摩擦角と地震時安全率の関係を斜 面勾配毎に求め、許容安全率(1.0)を確保しうる所要内部摩擦角を図のように求めた。図4.5.2に、こ の所要内部摩擦角と斜面勾配の関係を図示した。本結果から、現状の1:2勾配は十分過ぎるほどの安全率 を有することが明白である。一方、安定勾配の設定に際しては、廃棄物層の物性(廃プラスチック等の 繊維状物や土砂分の含有率など)や転圧効果(粘着力)のばらつきを考慮し、表4.4.1中の原位置一面せ ん断の最小内部摩擦角の値(関東①2017/8における ϕ = 23°)を安全側に採用した。図4.5.2より、これ に対応する斜面勾配は1:1.8となる。



図4.5.1 廃棄物層の内部摩擦角と地震時安全率の関係



図4.5.2 斜面勾配と所要内部摩擦角の関係

図4.5.9は、非線形動的FEM解析で実施した感度分析結果のうち、図4.5.5の実験条件に最も近い条件での解析結果を、加振終了後の残留水平土圧コンターにより比較したものである。図中に赤・オレンジで示したエリアは、残留水平土圧<0、すなわち土えん堤と背面廃棄物層が剥離し、背面地盤内に主働崩壊が生じる領域を示している。図4.5.9(a)の繊維状物無しのケースでは斜面全層に渡って背面で主働崩壊が発生し、これらが連続したすべり線を形成している。図4.5.9(b)では1段目土えん堤の背面に局所的な主働崩壊が生ずる(遠心載荷実験でも観察された)以外、斜面下層には顕著な変状の発生は認められない。さらに、地震動終了後の土えん堤と背面地盤の剥離状況から、繊維状物を混入しない場合、土えん堤のすべてが解放面側に大きく変位して背面地盤と剥離し、非一体的な挙動を取ることを明らかにした。



図4.5.9 残留側方土圧コンター

研究目標達成度:研究計画時より多くの地点で現場試験を実施するとともに、各種室内検討も大幅に 進展し、多くの科学的知見を蓄積できている。さらに、目標であったマニュアル案も提示できているこ とから、全体として当初計画以上に達成できた。

5. 本研究により得られた主な成果

(1)科学的意義

これまで十分に解明されていなかった安定型処分場の特性を、国内9現場、21地点での現場試験、カラム試験や各種室内試験、安定解析によって明らかにした。

サブテーマ2では、簡易的に表層地盤の強度定数を推定するためにスパイラル杭を開発し、室内試験 と現場試験で適用性を評価した結果、一面せん断試験で得られるせん断強度を精度良く評価しうること を明らかにした。このことにより、これまでデータの取得に多くの時間を要していた強度定数を簡便に 評価しうることを示した。

サブテーマ3では、カラム試験の結果から、混入しているプラスチックの大きさが廃棄物層の浸透特 性と浸透水の水質に影響し、10cm以上のプラスチックの存在が有意な差をもたらすこと、小サイズのプ ラスチックのみが混入した地盤では、プラスチックは水みちとして働き、廃棄物層の透水性を高めうる こと、浸出水の化学的指標は、浸出水のトラベルタイムの影響を受けやすく、滞留時間が長いほど各値 が大きくなること等を明らかにした。さらに、廃棄物下部にまさ土層を敷設することで、浸出水中の化 学物質を吸着する効果が期待でき、進出水の水質改善につながることを示し、これまで十分な知見が得 られていなかった埋立方法と水質との関係を初めて定量的に示した。

サブテーマ4では、空隙率の増加に伴い乾燥密度は減少すること、埋立後5年未満の地盤に比べ、埋立 後5年以上経過の地盤では構造が密実になり乾燥密度が大きくなる傾向にあること等を明らかにした。 また、廃棄物組成の観点からは、プラスチック等の平面状物(2次元物)や繊維等の線状物(1次元物) の混入割合が増えると、インパクト値(地盤の硬度)は減少し、停止安息角は増加すること、ガラス陶 磁器やがれき等の塊状物(3次元物)の混入割合が増えると、インパクト値は増加し、停止安息角は減少 することを明らかにし、廃棄物組成と力学特性の関係を初めて明らかにした。また、インパクト値と停 止安息角は、それぞれ地盤の粘着力、内部摩擦角と良い相関を持つことを示しており、廃棄物地盤の強 度特性を簡便に評価しうる可能性を示している。

サブテーマ5では、安定解析により、現状の1:2勾配での設計は十分過ぎるほどの安全率を有してお り、現場試験で得られた最も小さい強度定数を用いて計算した場合であっても、1:1.8の斜面勾配で十分 に高い安定性を発揮できることを明らかにした。また、動的応答解析によって、地盤中に繊維廃材が存 在する場合には、引張抵抗と上載荷重の寄与により廃棄物一土えん堤全体の安定性が大幅に改善するこ と、廃棄物斜面の地震時安定性に影響を及ぼす第一の要因は廃棄物組成であること等を明らかにした。

これらの成果に基づき、安定型処分場での地盤強度を評価する際の試験方法と、安定型処分場を増設 あるいは新設する際の基本的な設計方法を取りまとめた「産業廃棄物安定型最終処分場の試験・設計方 法に関するマニュアル(案)」を作成した。

(2)環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- 安定型処分場での地盤強度を評価する際の試験方法と、安定型処分場を増設あるいは新設する際の 基本的な設計方法を取りまとめたマニュアル案を整備した。斜面安定性や内部保有水の水質等の特 性を踏まえつつ、安全かつ長寿命な安定型最終処分場の運用に向けた制度の確立に貢献しうると期 待できる。
- 2) スパイラル杭やポータブルコーンを用いた方法の有用性が確認されたことから、これらの技術を基準化できれば、効率的で合理的な処分場設計の一助となると考えられる。また、インパクト値と停止安息角の計測も、比較的簡便に廃棄物地盤の強度定数を求める手段として有効である。
- 3) 処分基準に示された廃プラスチックを15cm以下にすることを遵守することで、廃棄物層内での浸透 水の滞留を防ぐことができ、延いては浸出水の水質悪化を防止するためにも有効である。埋立廃棄

物のサイズを小さくすることは、埋立を高密度化し埋立量を増加させ、適度な地盤の固さと十分な 斜面安定性を得るためにも極めて重要であることから、処分基準に示された廃プラスチックを15 cm 以下にすることの遵守等が求められる。そのため、受け入れ時の展開検査を強化し、安定5品目以 外の異物除去はもちろんのこと、長尺のプラスチック等が混入しないよう徹底することが重要であ る。

4) 現行の1:2勾配での処分場設計は過度に安全側である可能性が高く、1:1.8の斜面勾配で処分場断面 を設計することが合理的であると言える。勾配を高めることで、土えん堤のスリム化と廃棄物受入 容量の増大が実現できる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 山脇 敦・土居洋一・大嶺 聖:土木学会論文集C(地圏工学), 73, 2, 212-223 (2017)
 プラスチック等が混入した廃棄物地盤の強度特性と現場試験法
- 2) A. Yamawaki, Y. Doi and K. Omine: Waste Management & Research, 35, 7, 730-738 (2017) Slope stability and bearing capacity of landfills and simple on-site test methods
- 3) 山脇 敦・土居洋一・川嵜幹生・大嶺 聖:廃棄物資源循環学会論文誌, 29, 139-151 (2018) プラスチック等が混入した廃棄物層の水の流出応答と沈下
- 4) 高井敦史・義経浩平・乾 徹・勝見 武:第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集,41-46 (2017)

配向角の異なる軟プラスティック混合土のせん断特性と内部構造観察

- 5) 諸冨鉄之助・Purbashree Sarmah・勝見 武・高井敦史・乾 徹・山脇 敦・大嶺 聖・土居洋 一・坂口伸也:第13回地盤改良シンポジウム論文集, 325-330. (2018) 安定型廃棄物処分場埋立層の強度と溶出特性に及ぼす諸要因の影響
- 6) S. Ideguchi, K. Omine, S. Sugimoto: Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics, 248-254 (2018) Estimation of Strength Constants of Various Geomaterials by Core Penetration and Spiral Pile Pull Out Tests
- 7) S. Ideguchi, K. Omine and S. Sugimoto: Proceedings of the Technical Forum on Mitigation of Geo-disasters in Asia, 1-4 (2019) Development of simple testing method for estimation in-situ strength and application to solid waste ground,
- 8) 出口資門・大嶺聖:第13回環境地盤工学シンポジウム発表論文集,281-284,(2019) 簡易現場強度試験法の開発と廃棄物地盤への適用
- 9) P. Sarmah, Y. Nakase, T. Katsumi, A. Yamawaki, A. Takai, K. Omine, S. Ideguchi, Y. Doi and T. Ishiguro: Proceedings of the 8th Japan-China Geotechnical Symposium (accepted) (2020)

Mechanical and leaching characteristics of inert waste landfills,

(2)主な口頭発表(学会等)

- 1) 出口資門・大嶺 聖・蒋 宇静・杉本知史:平成29年度土木学会西部支部研究発表会(2018) 廃棄物地盤における簡易的引抜・貫入試験の適用性
- 2) 出口資門・大嶺 聖・杉本知史:第73回土木学会年次学術講演会(2018) コーン貫入とスパイラル杭引抜試験による廃棄物地盤の簡易強度推定法

- 諸冨鉄之助・勝見 武・高井敦史・乾 徹・Purbashree Sarmah・山脇 敦・大嶺 聖・土居洋一・ 坂口伸也:第53回地盤工学研究発表会(2018) 安定型廃棄物処分場の安全性に及ぼす諸要因の影響に関する検討
- A. Yamawaki, Y. Doi, K. Omine and T. Katsumi: Proceedings of ISWA2018 World Congress, Kuala Lumpur, Malaysia (2018)
 Waste Landfills Including Plastics Store Rainwater, Releasing It Slowly
- 5) P. Sarmah, T. Katsumi, A. Yamawaki, A. Takai, K. Omine, Y. Doi and S. Sakaguchi IPB&KU International Symposium on Education and Research in Global Environmental Studies (2018) Test and design methods for safe and sustainable inert waste landfills in Japan
- 6) 佐藤竜樹・大嶺 聖・蒋 宇静・杉本知史・出口資門:平成30年度土木学会西部支部研究発表会
 (2019)
 様々な地盤材料に対する簡易強度推定法の適用
- 7) 出口資門・大嶺 聖・杉本知史・佐藤竜樹:第54回地盤工学研究発表会(2019) 廃棄物地盤の簡易強度推定のためのコーン貫入・スパイラル杭引抜試験の適用
- 8) P. Sarmah, Y. Nakase, T. Ishiguro, T. Katsumi, A. Takai and A. Yamawaki 第55回地盤工学研 究発表会 (2020)

Mechanical characterization of inert waste with different fibrous contents,

9) 出口資門・大嶺 聖・蒋 宇静・杉本知史:令和元度土木学会西部支部研究発表会(2020) 廃棄物地盤におけるひもとキャピラリーバリアによる排水機能向上について

7. 研究者略歴

研究代表者

勝見 武

京都大学工学部卒業、現在、京都大学大学院地球環境学堂教授

研究分担者:

1) 大嶺 聖

琉球大学工学部卒業、九州大学工学部准教授、現在、長崎大学工学部教授

2) 土居 洋一

千葉工業大学工学部土木工学科卒業、長野県短期大学教授、現在、和洋女子大学非常勤講師

3) 山脇 敦

武蔵工業大学工学部卒業、現在、産業廃棄物処理事業振興財団 資源循環推進部長

4) 坂口 伸也

九州大学工学部卒業、前田建設工業技術研究所研究員、現在、前田建設工業総合企画部長

II. 成果の詳細

Ⅱ-1 試験・設計マニュアルの作成と研究の総括

| 京都大学大学院地球環境学堂 | 勝見 | 武・高井 | 敦史 |
|---------------|----|-------|-----|
| 産業廃棄物処理事業振興財団 | 山脇 | 敦 | |
| 前田建設工業(株) | 坂口 | 伸也・石黒 | 【 健 |

平成29年~令和元年度研究経費(累計額):3,992千円(研究経費は間接経費を含む) (平成29年度:1,051千円、平成30年度:1,391千円、令和元年度:1,550千円)

[要旨]

安定型最終処分場は、水処理施設を持たないことから放流水の安全性についての懸念があることや、 内部温度の上昇や発生ガスについて問題が指摘されるケースも多い。一方で、安定型最終処分場は、既 往研究で斜面安定性、支持力、耐震性が通常の盛土地盤よりも高いことが分かっており¹⁾²⁾³⁾、斜面安定 性や内部保有水の水質等の特性を踏まえつつ、安全かつ長寿命な安定型最終処分場の運用のための試験・ 設計法のマニュアル整備が急務である。本サブテーマでは、他の4つのサブテーマで得られた成果を踏 まえ、既存の技術要領等では示されていない、安定型処分場での地盤強度を評価する際の試験方法と、 安定型処分場を増設あるいは新設する際の基本的な設計方法を取りまとめたマニュアル案を提示した。

[キーワード]

強度特性、浸透特性、安定型最終処分場、試験法、マニュアル

1. はじめに

安定型最終処分場は、水処理施設を持たないことから放流水の安全性についての懸念があることや、 内部温度の上昇や発生ガスについて問題が指摘されるケースも多い。一方で、安定型最終処分場は、既 往研究で斜面安定性、支持力、耐震性が通常の盛土地盤よりも高いことが分かっており¹⁾²⁾³⁾、斜面安定 性や内部保有水の水質等の特性を踏まえつつ、安全かつ長寿命な安定型最終処分場の運用のための試験・ 設計法のマニュアル整備が急務である。

2. 研究開発目的

本サブテーマの目的は、他の4つのサブテーマを実施する上での全体方針を示すとともに、各サブテ ーマで得られる成果に基づき、試験・設計方法を具体化したマニュアルを作成することで、産業廃棄物 安定型最終処分場の安全性向上と長寿命化に貢献することである。具体的には、以下の事項を目的とし て各サブテーマを実施した。

①安定型最終処分場の安全で長寿命化に資する埋立方法の提案

②プラスチックやがれき等を含む廃棄物層に適する試験法の提案

③安定型最終処分場の設計法の提案(埋立構造、えん堤等の貯留構造物、浸出水集排水施設等)

④上記をまとめたマニュアル案の作成

プラスチックやがれき等の埋立では、大きな空隙を有するため透水性は極めて良いものの、一部の水 はプラスチック等の表面に長期間貯留される⁴⁾。このため、排水特性が焼却灰等による地盤とは大きく 異なり、長期間貯留した水による各種環境影響(温度上昇、ガス発生、浸出水への影響等)が生じる。 これらのメカニズムについては未研究であり、本研究で排水特性を明らかにすることで合理的な水処理 施設規模の設定に結びつき、長期間貯留する水による各種環境影響メカニズムを明らかにすることで安 全で長寿命な埋立方法の確立に結び付けることを目的としている。 埋立層の強度面についても、既往研究で、プラスチックやがれき等の地盤は、高い斜面安定性や支持 力を有することを把握しており¹⁾、これらの特性を踏まえた設計法を研究することで、安全かつ長寿命 な安定型最終処分場の整備に結びつく。

溶出特性や強度特性の評価については、これまでは既存の土質試験法が援用されてきたが、個々の廃 棄物のサイズが土粒子より極めて大きいことから、廃棄物地盤に適した試験法を確立する必要がある。 ドイツでは3 m×5 m規模の大掛かりな室内試験が行われた実績があるが、施工性や経済性の観点から十 分に高い汎用性があるとは言い難く、作業性も考慮しつつ精度良く現場の特性を評価・予測しうる試験 法を確立する必要がある。

このように、本研究は安定型最終処分場における廃棄物地盤とえん堤の溶出特性と強度特性を考慮し、 安全かつ長寿命な処分場設計に資するものであり、本サブテーマでは、得られる個別成果を総合的に解 釈し、取りまとめてマニュアル化につなげることを目的とする。

3. 研究開発方法

本研究を適切に遂行するための全体研究計画を作成するとともに、本研究の中軸をなす現場試験を、 表3.1.1のとおり計画し実施した。具体的には、国内の安定型最終処分場9現場にて、埋立年数の異なる 同一処分場内の複数の地点にて現場試験を行った。各現場では複数地点で試験を行っており、9現場21地 点を対象としている。また、カラム実験や浸透模型試験の結果等に基づき、浸透水挙動と力学挙動の一 般化を行った。現場実験結果や室内試験等の結果に基づき、安定解析等の強度評価法を提案し、試験・ 検討結果を総合的に判断し、安定型処分場の試験・設計方法に関するマニュアル案を作成した。

| 処分場名 | 東北① | 東北② | 関東① | 関東2 | 関東③ | 関東④ | 中部 | 中国① | 中国② |
|-------------|----------------|------|-------|----------------|-------|---------|-----------------------------------|-------|-------|
| 試験実施 年月 | H29.8 H30.8 | R1.6 | H29.8 | H30.2 H30.8 | R1.10 | H27.4 | H25.8 H25.11 H26.4 H26.8 | H31.2 | R1.11 |
| 埋立年数 (年) | 0, 1, 10 | 4.5 | 0, 19 | 0.3, 2 | 10 | 0.1, 15 | 0, 1, 1.8 8, 15 | 0, 10 | 0.4 |
| 地点数 | 3地点 | 1地点 | 2地点 | 4地点 | 1地点 | 2地点 | 5地点 | 2地点 | 1地点 |

表3.1.1 試験実施場所および埋立後経過年数

4. 結果及び考察

全体研究計画を他の研究分担者とともに立案するとともに、現場試験と各種室内試験を指揮し、総括 した(現場試験と各種室内試験の結果は各サブテーマにて詳述する)。

得られた成果をもとに試験法と設計法に関して議論し、「産業廃棄物安定型最終処分場の試験・設計 方法に関するマニュアル(案)(暫定版)」(以下、マニュアル案)を作成した。作成したマニュアル案 の構成は表4.1.1に示すとおりであり、全5章から成る。

1章では、本マニュアル案の適用範囲を明示している。

2章では、既存の規定で明記されていない課題を整理しマニュアルの位置付けを明確にした上で、特 に現場試験の方法について整理している。

3章は、安全性確保のための留意点についてまとめており、プラスチック等が混入した廃棄物地盤中 の浸透水の挙動と埋立廃棄物が浸透水質に与える影響について説明している。

4章は、安定型処分場の設計事項のうち、廃プラスチック混入等による安定型処分場特有の強度特性 をふまえた設計が必要になる事項について述べている。

5章では、適度な廃棄物地盤の固さと十分な斜面安定性を得るために有効な廃棄物地盤の埋立方法に

ついて説明している。

表4.1.1 マニュアル案の構成

<u>1. 適用範囲</u> a <u></u>れまのための

- 2. 設計のための必要事項と試験法
 - (1) 安定型処分場の構造・維持管理についての規定事項
 - (2) 本マニュアルの目的と設計のための必要事項
 - (3) 安定型処分場の地盤強度特性
 - (4) 安定型処分場の地盤分類別の強度特性と力学定数の目安値
 - (5) 強度試験法
 - (6) 荷重の種類と評価方法

3. 安全性確保のための留意点

- (1) 地盤中の浸透水の流れ
- (2) 埋立廃棄物が浸透水質に与える影響

4. 設計方法

(1) 貯留構造物

- (2) 土えん堤と埋立勾配、高さ
- (3) 浸透水集排水施設

5. 搬入管理と展開検査上の留意点

- (1) 搬入管理に関する規定事項
- (2) 合理的な埋立方法
- (3) 展開検査等による搬入管理上の留意点

以下に、各章の抜粋を示す。なお、文章を改編することなく転記するため、ここではマニュアル案の とおりに図表番号を記載していることに留意されたい。また、他のサブテーマの個別内容と重複する箇 所はここでは割愛している。

<u>1.適用範囲</u>

本マニュアル(案)は、産業廃棄物安定型最終処分場(以下、「安定型処分場」という。)を対象 に、安定型処分場での地盤強度を評価する際の試験方法と、安定型処分場を増設あるいは新設する 際の基本的な設計方法を提示するものである。

安定型処分場は、産業廃棄物の安定5品目の埋立を行うものであるが、近年、中国の廃プラスチック ック輸入規制等を受け、多くの処分場で廃プラスチックの埋立量が増加している。廃プラスチック が混入した廃棄物地盤では力学特性や降雨の排水特性が、焼却灰や燃え殻等を主体に埋め立てる一 般廃棄物最終処分場とは異なる面が多い。一方で、主にがれき類や陶磁器類を受け入れて廃ブラス チックの受け入れをしていない安定型処分場もあるが、このような場合は従来の土質力学に基づい た評価が基本的に可能である。

このため、本マニュアル(案)は、プラスチック等が混入する安定型処分場を主な対象とし、一般 廃棄物の最終処分場を対象とした既存の技術要領(「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要 領、全国都市清掃会議」¹⁾等)に示されていないような安定型処分場の特性をふまえた強度試験方 法、土えん堤や埋立勾配の設定方法と関連する留意事項を主に記載している。 なお、本マニュアル(案)は現時点での知見をもとに本研究グループによる提案として提示するも のであり、今後、新たな知見が得られた際には随時改訂していくことを予定している。

2. 設計のための必要事項と試験法

(1) 安定型処分場の構造・維持管理についての規定事項

(略)

(2) 本マニュアルの目的と設計のための必要事項

本マニュアルは、(1)に示した安定型処分場についての規定で明記されていない事項について、これま での研究成果をふまえて、記述(提案)するものである。とくに、処分場の土えん堤や埋立勾配の設定 方法や、浸透水の安全性確保に関する留意事項について記載している(図2)。



図2 安定型処分場の土えん堤・廃棄物層と本マニュアルの目的

埋立勾配の設定等のための廃棄物層の強度評価にあたっては、埋立対象の廃棄物種類を定めたうえで、 廃棄物地盤の特性をふまえた強度試験を実施して、次のような強度定数を設定する必要がある。

・廃棄物層のせん断強度を定めるための粘着力(c)、内部摩擦角(ϕ)

(プラスチック等の引張抵抗を詳細に評価する場合には、引張抵抗(ζ)が必要)

- ・廃棄物層の安定勾配を概略的にみる場合の停止安息角(及び自立可能な最大勾配を示す限界安息角)
- ・廃棄物層の硬度を概略的にみる場合のキャスポル試験による Ia値(衝撃加速度)
- ・廃棄物層の締まり具合や将来の沈下発生を推測するための空隙率

(3) 安定型処分場の地盤強度特性

これまでに安定型処分場で行った現場強度試験(10処分場の埋立年数等の異なる26か所)の結果を図 3、表1にまとめた。図3は、表1に示した各処分場での強度試験結果について、概ね長さ10cm超のプ ラスチックの混入が多い処分場とそうではない処分場(陶磁器、がれき類等が主体)に区分して各強度 項目の平均値をレーダーチャートに示したものである。

(中略)

(4) 安定型処分場の地盤分類別の強度特性と力学定数の目安値

これまでの安定型処分場での強度試験結果(表1)をもとに、安定型処分場の地盤分類とその地盤強度 定数の目安を整理したものを表2に示す。プラスチック等の繊維状物等を含む処分場の地盤強度定数を 調べる際の参考にするとよい。

| 地般八粘 | 受け入れ廃棄 | 力学性性 | 力学評価方法 | | | | |
|---|---|---|---|--|--|--|--|
| 地盈刀短 | 物種類 | 刀子村住 | 評価方法 | 力学定数の目安値 | | | |
| 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 クを受け入れ ている処分 場。 | 空隙が多く地盤が柔 らかい(キャスポル <i>Ia</i> 値、粘着力が 小)。半面、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 度特性を有する。 | 廃棄物のサイズが大き く、既往の土質試験法 の適用は難しい。 大型の一面せん断試験 や概略評価手法である 安息角試験、キャスポ ル等での評価が必要。 引張抵抗の詳細把握に は引張試験が必要。 | 内部摩擦角(φ) 27°~59°(平均 38°) 粘着力(c) 2~24 kN/m ² (平均13 kN/m ²) 停止安息角 32°~44°(平均 39°) | | | |
| ③概ね10cm超 のプラスチッ ク等をほとん ど含まない地 盤 | がれったれる あってい かわってい かわってい かり うち | 力学特性は土地盤に 近く、①地盤に比べ 比重が重く、固い地 盤(粘着力大)が形 成される。 | 基本的に既往の土質工 評価可能 | 質工学手法で | | | |

表2 安定型処分場の地盤分類と力学強度値の目安



①10cm超のプラスチックを多く含む地盤

②10cm超のプラスチックをほとんど含まない地盤

(5) 強度試験法

a. 強度試験の基本事項

概ね10cm超のプラスチック等が混入する処分場の設計等(埋立勾配等の設定等)のために地盤の 強度評価を行うにあたっては、個々の廃棄物サイズが大きいことや、廃棄物を乱さない状態での採 取が難しいことから、既存の室内土質試験での評価は難しい。このため、表3に提案する現場試験 を行うと良い。

新規処分場の設計を行う際は、実現場での試験はできないため、既存の埋立廃棄物が類似する処 分場(同じ会社の埋立中の処分場等)での試験値を活用する必要がある。

なお、処分場の計画時の現場調査方法等については、「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管 理要領、全国都市清掃会議」¹⁾に詳細が示されているため、本マニュアルでは割愛している。

| 分類 | 想定される 調査・試験 | 留意事項 |
|-----------------------|--|--|
| 共通事項 (現場調査・試 験) | ・ボーリング調査 ・地下水調査 (・非破壊調査) | ・ボーリング調査や地下水調査は、斜面の安定性に大きな影響を与える処分場内部の残留水位の有無を知るために重要である。 ・1)以下の現場試験は廃棄物層表層での試験になるため、ボーリング調査により、表層より下層が密度が高いことを知ることは、表層での試験が安全側の評価になることを確認できる。 ・非破壊調査(高密度表面波探査等)により層内部の密度や大型異物の有無を知ることは現状では困難。原地盤面の位置把握や、ボーリング調査等の位置決めには活用できる |
| 1) せん断抵抗の 評価 | ・現場一面せん断 試験 | ・処分場の埋立断面の設計のためには廃棄物層のせん 断抵抗(粘着力、内部摩擦角による)を知る必要があり、廃棄物層を乱さずに試験できる現場での一面せん 断試験の実施が望ましい。 |
| 2)斜面安定性の 詳細評価 | ・引張試験 | ・引張試験は引張抵抗の有無が斜面安定性評価への影響が大きいときに実施することでより実態的な評価が可能になる。 |
| 3) 簡易試験法 | ・衝撃加速度試験 ・安息角試験 ・現場空隙率試験 | ・衝撃加速度試験(キャスポル)は地盤の硬度を簡易的に調べるもので、粘着力との相関がある。一面せん断試験を補完するかたちで実施することで合理的な調査が可能になる。 ・安息角試験は安定勾配を調べるものであり、10cm超のプラスチックを含む地盤では内部摩擦角との相関がある。一面せん断試験を補完するかたちで実施することで合理的な調査が可能になる。 ・空隙率試験は地盤中に占める空隙の割合を調べるもので、地盤の締固め状況や将来の沈下発生を推測するために活用できる。 |

表3 安定型処分場の設計等のために必要になる主な調査・試験と留意事項等

b. 一面せん断試験

廃棄物地盤の原位置強度は、一面せん断試験²⁾により把握することができる。 廃棄物地盤は、含まれる廃棄物の種類や組成が対象地によって大きく異なる。そのため、安定計算 に用いる強度定数は、原位置試験を行うことによって求めることが望ましい。原位置試験が難しい場 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が、で きるだけ現場の密度に合わせて供試体を作成する必要がある。また、廃棄物の大きさに応じて供試体 のサイズを大きくする必要がある。大きな廃棄物を取り除いて小さいサイズの供試体で試験を行う と、堆積廃棄物の強度を表わしていないので注意が必要である。

(中略)

c. 引張試験

ー面せん断試験ではすべり面が水平方向となり、廃棄物の堆積面と一致する。そのため、せん断時 にプラスチックなどの長い材料による引張効果が十分に発揮されていない。とくに、すべり面が水平 方向から傾く場合には、その効果を考慮する必要がある。

10cm超のプラスチック等の長尺物が多く混入する場合等に、廃棄物層の引張強さを評価するために は引張試験²⁾の実施が必要になる。引張箱を2つ連結させて、上載圧を変えて引張強さを求めることに より、拘束圧の依存性を考慮した引張強さが算定される。 (中略)

d. 簡易な現場試験法

i 地盤の概略評価時に用いる簡易な現場試験

処分場の埋立断面の概略設計時等には、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。有効性を確認している簡易な現場試験法は次のとおり。

衝撃加速度試験(キャスポル4),5))

キャスポルにより得られるインパクト値(*Ia*)は、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。

② 安息角試験6)

安息角試験による停止安息角(*a*)は、廃棄物地盤の安定勾配の目安となるとともに、地盤のせん断強度を評価するための内部摩擦角(*q*)と相関がある。

3 現場空隙率試験⁶⁾

廃棄物地盤中の空隙率は、地盤の締固め状況の目安になるものであるが、将来の地盤沈下状況 を推測するためにも役立つ。

ii 衝撃加速度試験(キャスポル)の方法と試験結果の利用方法

衝撃加速度試験(キャスポル^{4),5})により、現場の部分的な強度の高低や不安定な場所を特定する ことが可能である。また、衝撃加速度試験(キャスポル)によるインパクト値(*Ia*)は、地盤のせん断 強度や極限支持力を評価するための粘着力(*c*)と相関があることが確認されており、衝撃加速度試験 は粘着力(*c*)を概略的に知るために活用できる。

衝撃加速度試験から得られるインパクト値(*Ia*)の影響範囲は、土地盤(珪砂)では広さ方向が直径で13~24cm、深さ方向が9~22cmである⁴⁾のに対し、10cm以上のプラスチックを含む廃棄物地盤では、広さ方向が直径で110cm、深さ方向が40cm程度あり、特に広さ方向の影響範囲が格段に広く、衝撃加速度試験は廃棄物地盤の概略評価に適している。

(中略)

iii 安息角試験⁶⁾の方法と試験結果の利用方法

廃棄物地盤の斜面の安定性を確認・評価する方法として、安息角試験が有効である。また、安息角 試験で測定される停止安息角は、地盤のせん断強度や極限支持力を評価するための内部摩擦角(φ)と 相関があることが確認されており、安息角試験は内部摩擦角(φ)を概略的に知るために活用できる。 安息角試験は、バックホウ等の重機を用いて廃棄物を山状に積み上げ、その過程での斜面の角度を 計測した値を「安息角」とするものである。

(中略)

iv 現場空隙率試験⁶⁾の方法と試験結果の利用方法

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、それに伴って粘着力等が増加する(図 17)ことや、空隙率が大きい程、沈下速度が速いことが確認されており、空隙率は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る。

廃棄物地盤中の空隙率は、水置換による土の密度試験(JGS 1612-2003)⁸⁰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ことで容易に調べることができる。

(中略)

(6) 荷重の種類と評価方法

土えん堤を含めた埋立断面の設計にあたっては、土圧(廃棄物層によるもの)、残留水圧、地震荷 重を考慮する必要がある。

このうち、土圧については、大型土槽による実験や振動台実験の結果¹¹⁾から、プラスチック等が混入した廃棄物では、通常の土砂地盤ほどには土圧が壁面に作用しないことを確認しており、貯留構造物としての擁壁等の設計に際しては、日本道路協会:道路土工 擁壁工指針¹²⁾等に示された既往の算定方法で土圧を計算すれば、安全側の評価となる。

残留水圧は、処分場の廃棄物層内に内部水位が形成された場合に静水圧として働くものであり、類 似の処分場での内部水位の形成状況等を勘案して、考慮する必要がある。ただし、プラスチック等が 多く混入した廃棄物層では、基本的な透水性が極めて高いため、大きな静水圧が働くことは考えにく い^{注)}。

地震荷重の算定は、日本道路協会:道路土工 擁壁工指針¹²⁾等に示されている震度法によることが 基本となる。

(中略)

3. 安全性確保のための留意点

(1) 地盤中の浸透水の流れ

プラスチック等が混入した廃棄物地盤中の水挙動

プラスチックが混入した廃棄物地盤では、大きな空隙を有することから雨水の透水性は基本的に極めて良い。しかし、地盤中では図10のように雨水はプラスチック等の凹部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凹部等に貯留された水は極めてゆっくりと流下する。この流下量は地盤 中の貯留量をパラメータとした貯留関数で表すことができる(式1~3、図20)。

プラスチック等の表面等に貯留能力がある廃棄物が多い程、内部貯留可能量が大きくなり、ピーク 排水量が小さく、ピーク到達時間が長くなる(図20;大型カラム実験(図21)で10cm以上のものを除 いたケース(2)と、10cm以上のものをカッティングしたケース(3)は、無調整の標準ケース(1)に比べ て排水開始が早く、排水ピーク量も高くなっている。実験値は表4に示す)。このため、最終処分場 では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。

(中略)

(2) 埋立廃棄物が浸透水質に与える影響

大型カラム試験の結果から、土層(覆土層)を設けることや、廃棄物と土との混合埋立を行う ことはTOC等の値を低減する効果があることが確認できた(図21右、ケース2、ケース3)。高密度 でカラムに廃棄物を充填した場合には密度相当分のTOC等の水質悪化がみられた(図21右、ケース 5)。

また、10cm超のプラスチックを篩により除去したケースと、10cm超のプラスチックを破砕(裁断)して10cm以下にしたケースと比較した大型カラム実験(**表4**)では、10cm超を除去したケース(2)ではEC、TOC、BODが無調整のケース(1)に比べ低下したが、裁断したケース(3)(プラスチックの混入重量は無調整試料と同じ)では、無調整試料とTOC等の値に差は認められなかった。

したがって、TOC等はプラスチック等の量に依存しており、安定型処分場ではプラスチック等の 混入量を減らすことが、浸透水のTOC等の値を下げることに結びつくと考えられる。

(中略)

<u>4. 設計方法</u>

安定型処分場の設計事項のうち、廃プラスチック混入等による安定型処分場特有の強度特性をふまえた設計が必要になる事項について以下に示す。

(1) 貯留構造物

貯留構造物には、盛土ダムによるものの他、コンクリート擁壁等がある。

コンクリート擁壁の設計に際して考慮する土圧については、大型土槽による実験や11)振動台実験11) の結果から、プラスチック等が混入した廃棄物では、通常の土砂地盤ほどには土圧が壁面に作用しな いことを確認している。このため擁壁等の設計に際しては、日本道路協会:道路土工 擁壁工指針12)等 に示された既往の算定方法で土圧を計算すれば、安全側の評価となる。

(中略)

(2) 土えん堤と埋立勾配、高さ

土えん堤を含めた埋立断面の勾配、高さの設計を行うためには、斜面安定解析を行う必要があるが、 これまでの現場試験や安定解析の結果からは、土えん堤を含めた埋立勾配は 1:1.8 で安全性が確保 できることを確認している。

我が国においては、擁壁では不可能な埋立て高さ(埋立容量)を確保できること、基礎岩盤にコンク リートダムのような硬固な岩盤を必須としないこと、施工や維持管理の容易性、コスト面等の優位性か ら、土えん堤とその背面の廃棄物層からなる盛土ダム形式が採用されることが多い。本項では、この構 造形式における埋立て勾配と高さについて記載する。

盛土ダム形式の貯留構造物の設計は、想定した高さと勾配を有する斜面に対して既往設計手法¹⁾¹⁴⁾を 用いた安定性照査に基づき行われる。以下では、特に廃プラスチック等を混入する廃棄物層斜面におけ る埋立勾配について、既往の原位置試験により得られた物性値を用いた安定解析の事例を示す。本マニ ュアルでは、土えん堤を含めた埋立勾配を1:1.8とすることで地震時を含めた安定性を十分に確保でき ることを確認している。以下では本埋立て勾配における土えん堤一廃棄物層一体斜面の安定性を以下の 2手法によりダブルチェックする。

① プラスチックの引張抵抗を考慮しない一般的な円弧滑り法による安定解析(安定勾配の逆算)

② 引張抵抗角を考慮した円弧すべり法による安定解析(①で得られた安定勾配での再確認) さらに、これらの手法が主に通常地震動(L1)を想定していること、及び、円弧滑り法自体があくまで 静的な力の釣り合いに基づく解析手法であり、地震時の土えん堤と廃棄物層の動的相互作用等を考慮し ていないことから、引き続き

③ 土えん堤-廃棄物層斜面の強震時(L2)及び動的相互作用を考慮した動的応答解析(強震時挙動の 確認)

による照査を試みた事例を報告する。

(中略)

(3) 浸透水集排水施設

浸透水集排水施設は、埋立層内に浸入した雨水を速やかに排出させるための施設であり、一般廃棄 物処分場では、底部集排水管、法面集排水管、堅形集排水管、集水ピット等に分類されている。

プラスチック等が混入する安定型処分場では、大きな空隙が形成されるため基本的に排水性は良い が、プラスチック等の凹部等に水が長時間貯留されることや、長尺のプラスチックが鉛直方向の水の 流れを阻害することから、BOD等の水質対策のためには、やはり迅速な排水を促すための集排水施設 は重要である。

また、発生ガス対策の観点からも、鉛直方向の排水性・通気性確保を目的とした集水設備(鉛直方 向に敷設する有孔管等)を一定間隔に設けることが有効である。

前出の土えん堤一廃棄物層一体斜面の安定性検討に際しては、廃棄物層内の水位形成や土えん堤に作 用する水圧荷重を想定していない。このため、特に斜面部近傍においては、廃棄物層の地下水位を定期 的にモニタリングし、水位形成の無いことを確認したり、要領¹⁾に示される各種の浸透水集排水施設を 検討すると良い。廃プラスチック等の繊維状物を多く混入する廃棄物層では、一般に空隙が大きく透水 性は良好と考えられるが、プラスチックの凹凸部への水の貯留により、水平方向に対して鉛直方向の透 水係数が見かけ上小さくなる場合があり、これへの対処として、図34(a)に示すような水平排水層¹⁷⁾を設 け、これを図34(b)に示すような堅形集排水管へ導くことで迅速な盛土内排水が可能となる。水平排水層 については、材料を購入して新たにこれを設けるのではなく、廃棄物埋め立て時の覆土として、極力粒 径の大きな礫系の廃棄物をある層厚で埋立てることにより、その機能を期待できる。堅形集排水管に関 しては、通気性確保の目的を併用することも可能であるが、不織布や砕石など粒径の大きい中間層を設 ける場合はジオテキスタイル等で目詰まり対策をすることが長期的な排水性確保の面から有効である¹⁷⁾。

5. 搬入管理と展開検査上の留意点

(1) 搬入管理に関する規定事項

最終処分場の維持管理については「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術 上の基準を定める省令、平成29年6月改正」に定められている。安定型処分場については、飛散・流出の 防止、悪臭発散の防止、火災発生防止のための必要な措置、ねずみ・害虫の発生防止のための必要な措 置、囲い・立札、その他設備の機能維持、擁壁等の定期的な点検、地下水又は集排水設備から採取した 水の定期的な水質検査、水質悪化が認められた場合の必要な措置、埋立廃棄物の種類・数量等の管理、 埋立前の展開検査の実施、浸透水の定期的な水質検査の実施と水質検査結果が基準に適合しない場合

(BODは20mg/L超、CODは40mg/L超)の搬入及び埋立処分場中止措置について規定されている。以上のように、とくに水質管理について厳しい規定が設けられている。

また、廃プラスチックについては、廃棄物処理法施行令第6条第1項第3号(処分基準)で、「中空 でないように、かつ、最大径おおむね 15cm 以下に破砕、切断、若しくは溶融設備を用いて溶融加工す ること」が規定されている。

(2) 合理的な埋立方法

以下i示す10cm超物の混入率と空隙率の関係と、iiに示す廃棄物組成とキャスポルIa・安息角の関係から、埋立を高密度化(埋立量を増やす)し適度な地盤の固さと十分な斜面安定性を得るには、廃 プラスチック等のサイズを小さくし(処分基準に示された廃プラスチックを15cm以下にすることの遵 守等)、プラスチック等やがれき類、ガラス・陶磁器等の形状、サイズの異なる廃棄物を適度に混合 (粒度分布の均等化)して埋め立てることが有効になると言える。

i 10cm超物の混入率と空隙率の関係

安定型処分場11か所での試験結果から、埋立物の10cm超物の混入が多くなると、空隙率が高くなる 結果が得られている(図35)。したがって、埋立量を増やす(埋立層の空隙を減らし密度を高める) ためには、廃プラスチック等の埋立廃棄物のサイズを小さくする必要がある。

ii 組成とキャスポル Ia値、安息角の関係

廃棄物組成と地盤の硬度を表すキャスポル*Ia*値と斜面の安定勾配を表す停止安息角には、次のよう な関係がある。

- ・プラスチック等の平面状物(2次元物)や繊維等の線状物(1次元物)の混入割合が増えると、キャスポル Ia値は減少し、停止安息角は増加する。(図16、図17)
- ・ガラス陶磁器やがれき等の塊状物(3次元物)の混入割合が増えると、キャスポル Ia値は増加し、 停止安息角は減少する。(図16、図17)

したがって、埋立廃棄物中にプラスチック等の平面状物や線状物の割合が高くなると埋立地盤は柔 軟で斜面安定性の高い地盤が形成され、がれき等の塊状物の割合が高くなると埋立地盤は固い地盤が 形成される。

これら廃棄物組成と各種物性との関係、及び前述した動的FEM解析を用いた感度分析結果を勘案し、特 に廃棄物処分場の斜面部近傍(土えん堤を含む)における埋め立て方法や施工上の留意点を図38及び表 6にとりまとめた。表6中に記したように、廃棄物斜面の地震時安定性を確保するためには、

- ① 土えん堤背面のある一定領域内での混合埋立(土砂系と繊維状物)
- ② 土えん堤の材料選定と施工法(土えん堤の剛性確保と接合部の入念な施工)
- ③ 廃棄物層の排水構造(4.(3)浸透水集排水施設に詳述))



図38 処分場斜面(土堰堤近傍)における埋立、施工上の留意点

| 項目 | 設計・施工上の留意点 | 留意事項および摘要 | | | | | | |
|--|-----------------------------------|---|--|--|--|--|--|--|
| 土堰堤背面部での廃棄 物層の埋立て方法 | 土砂・がれき系廃棄物とプラスチック 等繊維状廃棄物の混合埋立 | 土堰堤背面側の廃棄物主働崩壊範囲を含む領域で混合埋立を行う事が望ましい。繊維状廃棄物の混合に よる単位体積重量・静止土圧・動土圧の低減とせん断強度・地震時の靭性の向上により土堰堤ー廃棄物 層斜面の地震時安定性の向上を期待できる。混合撒き出しの上、トラッシュコンパクタ等の重機にて廃 棄物の破砕や切断を行い、土砂・がれき成分と繊維状成分との噛み合いを十分に高める事が望ましい。 | | | | | | |
| | 土堰堤の剛性確保 | セメント改良等により高い剛性を確保することで、土堰堤が抗土圧構造物として振る舞い、斜面の安定 性を高めることが期待される。剛性の低い粘性土堰堤等の場合、地震時の斜面変状が土堰堤を含む大規 模・広範囲な円弧すべりモードとなる可能性が有り、注意を要する | | | | | | |
| 2 土堰堤の材料選定と 造成方法 | 土堰堤の地震時変形量の抑制 | 土堰堤 - 廃棄物斜面の全体崩壊が、主に土堰堤の解放面側への移動変形と背面廃棄物層の主働崩壊に伴 い生ずることから、その移動変形量を極力低減する工夫を行う事が望ましい。特に最下段土堰堤と基礎 地盤の間には地震時に十分なせん断抵抗を発揮できるよう、境界部など入念な施工を心掛けるべきであ る。土堰堤と背面廃棄物の間を人工材料(ジオテキスタイル等)により連結し、両者の一体化を図るこ とも得策と考えられる。 | | | | | | |
| 廃棄物層の排水構造 | 斜面部廃棄物層内の地下水位モニタリ ングと集排水構造 | 土堰堤-廃棄物斜面の安定計算では土堰堤への水圧の作用を考慮していない。混合埋立を行う場合、廃 棄物層の排水性は良好と想定されるが、プラスチック等繊維状物質の堆積により水平方向に比べて鉛直 方法の透水性が低くなり、盛土内水位が形成される可能性が皆無ではない。特に斜面部近傍においては 廃棄物層の地下水位を定期的にモニタリングすると共に、透水性の良好な碟径廃棄物を選定して覆土と してある層厚(数十cm程度)で埋め立てておけば、水平排水層の機能を期待できる。さらに発生ガス 対策の観点から通気性確保の機能を兼ねた竪形集排水構造等を採用することで、斜面の地震時安定性を 確実なものとすることができる。 | | | | | | |
| *①、②を併用した場合、廃棄物層下層から表層に向けての地震動の増幅が大となり、表層付近に変状が集中しやすいとの実験的・解析的結果がある。表層廃棄物層の入 | | | | | | | | |

表6 埋立ておよび処分場斜面部の設計・施工上の留意点

(3) 展開検査等による搬入管理上の留意点

安定型処分場11か所での試験結果から、埋立物に10cm超物の混入割合が多くなると、空隙率が高く なる結果が得られている。したがって、埋立量を増やす(埋立層の空隙を減らし密度を高める)ため には、埋立廃棄物のサイズを小さくする必要がある。

当然、浸透水の水質保全の面からも展開検査は重要であり、安定5品目以外の異物除去はもちろんのこと、長尺のプラスチック等がBOD等の水質に悪影響を与え得ることが、カラム実験で示されていることから、廃プラスチックの処分基準を満たさない15cm超のものを受け入れないことを徹底することは重要である。

廃プラスチックについては、廃棄物処理法施行令第6条第1項第3号(処分基準)で、「中空でない ように、かつ、最大径おおむね 15cm 以下に破砕、切断、若しくは溶融設備を用いて溶融加工すること」 が規定されている。この規定を遵守することは、水質保全の観点からも処分場の延命化の観点からも重 要である。

また、令第6条第1項第3号ロの「安定型最終処分場で埋立処分を行う場合には、安定型産業廃棄物 以外の廃棄物が混入し、又は付着するおそれのないように必要な措置を講ずること。」についても当然 のことながら遵守しなければならない。

(後略)

研究目標達成度: 得られた成果に基づきマニュアル案を提示できていることから、当初目標を十分に 達成できた。

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

本サブテーマは、他の4つのサブテーマの総括と、各成果に基づくマニュアルの作成を目的としている。これまで十分に解明されていなかった安定型処分場の特性を、国内9現場、21地点での現場試験によ

り網羅的にデータを収集した。廃棄物地盤とえん堤の諸特性を明らかにし、概ね長さ10cm以上の粗大な プラスチックの混入が現場特性に大きく影響を与えることや、開発した簡易現場強度試験法の有用性を 示した。カラム注水試験では、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を明らかにした。安定解析では、斜面勾配を一般的な1:2から1:1.8に変更する ことの妥当性を示した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

安定型処分場での地盤強度を評価する際の試験方法と、安定型処分場を増設あるいは新設する際の基本的な設計方法を取りまとめたマニュアル案を整備した。斜面安定性や内部保有水の水質等の特性を踏まえつつ、安全かつ長寿命な安定型最終処分場の運用に向けた制度の確立に貢献しうると期待できる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

特に記載すべき事項はない。

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 山脇 敦・島岡隆行・勝見 武・大嶺 聖・川嵜幹生・土居洋一・柴 暁利・川井晴至・坂口伸 也(2013):平成24年度環境研究総合推進費補助金研究事業総合研究報告書 不法投棄等現場の 堆積廃棄物の斜面安定性評価
- 2) 高井敦史・義経浩平・乾 徹・勝見 武(2017):配向角の異なる軟プラスチック混合土のせん断 特性と内部構造観察,第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集,pp.41-46
- 3) 宮本慎太郎・安福規之・大嶺 聖・石蔵良平・川井晴至・山脇 敦(2015):組成割合の異なる埋 立廃棄物の変形・強度特性,土木学会論文集C(地圏工学), Vol.71, No.4, pp.278-291
- 4) T.G. Townsend, J. Powell, P. Jain, Q. Xu, T. Tolaymat, D. Reinhart (2015): Sustainable Practices for Landfill Design and Operation, Springer, 472p.

Ⅱ-2 廃棄物-えん堤の力学挙動に関する研究

長崎大学工学部

大嶺 聖・出口 資門

平成29年~令和元年度研究経費(累計額):7,526千円(研究経費は間接経費を含む) (平成29年度:1,773千円、平成30年度:2,561千円、令和元年度:3,192千円)

[要旨]

原位置一面せん断試験結果から、一般的な土質地盤と比べて処分場の強度定数は大きく、かつばらつ きが大きいことを明らかにした。室内せん断試験により、繊維廃材含有率の増加により粘着力が増加し 内部摩擦角が減少すること、繊維廃材の補強効果はせん断応力の延性的な増加挙動や粘着力の増加に現 れ、これが繊維廃材を含む廃棄物地盤の強度の大きさに影響していることを示した。現場一面せん断試 験の実施には多くの労力と時間を要することから、簡易的に表層地盤の強度定数を推定するためのスパ イラル杭を開発し、室内と原位置でスパイラル引抜試験とコーン貫入試験を行い、一面せん断試験の結 果と比較することで、各試験の適用性を検討した。その結果、簡易現場強度試験法によって一面せん断 試験で得られるせん断強度を精度良く評価しうることが明らかとなった。

[キーワード]

強度変形特性、スパイラル杭、コーン指数、一面せん断試験

1. はじめに

科学的根拠に基づいて適切に処分場の埋立断面を設計できれば、受け入れ容量の増加による処分場の 長寿命化が期待できる。このためには、土質力学の観点から廃棄物層の強度パラメータ(粘着力、内部 摩擦角)を把握する必要がある。地盤の強度を推定するには、一面せん断試験を数段階の上載荷重で行 い粘着力と内部摩擦角を求めることが一般的であり、正確に強度特性を評価しうるものの、この従来の 方法では原位置にて短時間で行えないことや、試験自体が複雑なこと、粘着力と内部摩擦角を同時に推 定することはできていないことなどの課題があり、簡易的な評価方法の導入が求められている¹⁾。また、 廃棄物組成や廃棄物寸法との関係をパラメトリックに変化させたコントロール条件下で評価し、廃棄物 地盤の強度特性を一般化する必要がある。

2. 研究開発目的

埋立て廃棄物地盤の強度変形特性を明らかにすることを目的に、原位置一面せん断試験を行った。ま た、繊維廃材が強度特性に及ぼす影響を把握することを目的に、繊維廃材含有率を任意に変化させた廃 棄物試料の強度特性を室内一面せん断試験により評価した。安定型廃棄物最終処分場の強度変形特性を 簡易的に評価しうる試験法の確立が必要であることから、改良したコーン貫入試験及びスパイラル杭の 引抜試験を開発し、室内と現場で様々な地盤材料を対象に試験を行い、既存の一面せん断試験の結果と 比較することで簡易試験法としての妥当性を検討した。

3. 研究開発方法

(1) 原位置一面せん断試験

一面せん断試験とは、上下に分かれたせん断箱に試料を納め、載荷圧を作用させた状態でせん断力に より上の箱を水平に移動させてせん断する試験である。一面せん断試験によって得られる強度定数(粘 着力c、摩擦抵抗角φ)は土の代表的な強度パラメータであり、土質力学に基づく斜面の安定計算等に必 要である。原位置では三軸圧縮試験の実施が不可能であり、強度定数のみを求める場合には一面せん断 試験が適している。堆積廃棄物を対象とした現場試験用に、図3.2.1に示す現場一面せん断試験機が大嶺 らによって開発されている。せん断箱の寸法は幅30 cm、奥行30 cm、高さ15 cm である。載荷棒を用い たてこの原理により実荷重10倍の載荷圧をかけることができ、その際、杭によって下箱を地面に固定で きる仕組みとなっている。反力杭は長さ22 cm、直径2.5 cm のスクリュー型であり、様々なものが混在 している廃棄物地盤でも容易に固定できる。載荷圧については、20 kgの重りで約20 kN/m²程度まで載荷 可能な構造となっている。この試験機は現場で用いる上で便利なように、各部品をばらして持ち運ぶこ とができる。なお、各部が取り外せる仕組みとなっており、室内試験用の部品を取り付けることで、室 内試験を行うことも可能である。供試体の材料径が最大5 cm程度までは高精度で試験可能であることが わかっている²。

まず、堆積廃棄物の表面を平坦に成型し、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した(写真3.2.1参照)。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 ダー等を用いて廃棄物を切断することによって、側面や上面を成形した。作製した供試体ブロックがせ ん断箱に収まるよう試験機を組み立て、せん断応力を求めるために上箱の先端にロードセルを、せん断 変位を測るためにせん断箱に変位計を取り付けた。所定の載荷圧を載荷し、せん断を開始した。本研究 では、せん断はモーターを用いて自動で行い、せん断スピードは1 mm/minとした。結果として得る載荷 圧とせん断強度の関係から、粘着力*c*と摩擦抵抗角*φ*を算定した。せん断応力がピークを示さない場合は、 せん断変位35 mmのせん断応力をせん断強度とした²⁰。なお、試験機の性能は、豊浦砂を用いた試験によ り確認しており、図3.2.2に示すように、従来の室内一面せん断試験機(直径60 mm)と非常に良い一致を 示す。ここでは、豊浦砂の粘着力を0 kN/m²とし、内部摩擦角のみを算定した結果を示している。



図3.2.1 原位置一面せん断試験機の概要



写真3.2.1 供試体の作製



図3.2.2 豊浦砂を用いた室内試験結果との比較

(2) 室内一面せん断試験

室内一面せん断試験には、Site AとSite Bから採取した廃棄物試料(関東試料)と、Site CとSite D から採取した廃棄物試料(東北試料)の計4試料を用い、所定の組成になるよう調整し試験を行った。組 成は繊維廃材、粒状廃材、20mm篩い下の3種類から成り、20mm以上のプラスチック及びその他繊維状物 質が繊維廃材、れき及びガラス・陶器が粒状廃材にあたる。各実験ケースにおける組成等の条件を表3.2.1 に示す。組成条件は、試料採取地点で実施した組成分析の結果に基づき概ね平均値となるよう設定し、 含水比や乾燥密度は、関東試料はSite A,東北試料はSite Cにおける現場値と同程度になるよう設定し た。試験には、写真3.2.2に示す装置を用いた。この装置は現場試験用に開発された試験機(図3.2.1) と同じであるが、室内試験用に改良されている。せん断箱の寸法は幅30 cm、奥行30 cm、高さ15 cmであ る。供試体は、試料をせん断箱に3層に分けて、各層1.6 kgのランマーを高さ30 cmから25回落下させて 締め固めながら行った。その後所定の上載圧を与え、沈下量が落ち着くか、もしくは沈下量が収束しな い場合は10分を目安として圧密を打ち切った。圧密後、せん断速度0.88 mm/minでせん断を行った。せん 断応力にピークが現れない場合は、せん断変位35 mmのせん断応力をせん断強度とした。上載圧は3.7、 14.1、24.6 kN/m²とした。供試体の作製は繰返し法を用い、各ケースで繰返し回数は1で実施した。

| | 単位 | | 関東 | 試料 | | 東北試料 | | | | | |
|------------------------|----------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | 繊維廃材 | % | 3 | 6 | 11 | 16 | 3 | 6 | 11 | 16 | |
| 組成 | 20 mm篩い下 | % | 80 | 77 | 72 | 67 | 80 | 77 | 72 | 67 | |
| | 粒状廃材 | % | 18 | | | | | | | | |
| 含水比 | | | 24.0 | 21.4 | 24.0 | 24.0 | 42.7 | 39.8 | 38.5 | 38.5 | |
| 乾燥密度 g/cm ³ | | | | 1.11 | 1.05 | 1.05 | 0.83 | 0.83 | 0.83 | 0.81 | |

表3.2.1 せん断試験の実験条件



写真3.2.2 室内一面せん断試験装置

(3) スパイラル杭の開発

引抜試験に用いるスパイラル杭の外観を写真3.2.3に示す。通常の金属杭だと引き抜きの際に杭と土 との間に摩擦抵抗が生じてしまうことが考えられるが、スパイラル杭では金属部分と接する面積が小さ いことから土のみの摩擦を推定することが可能である。試験方法はまず、深さを3ケース(5,10,15 cm) 設定したスパイラル杭を、モールドに3層に分けて、ランマーを1層25回で打って作った供試体にハンマ ーでスパイラル杭を貫入し電子荷重計を用いて手動で引き抜き、得られた最大値を円柱の表面積で除し て引抜力を算定する。3ケースの杭の深さと各引抜力の関係から、引き抜きの長さがゼロに相当する部分 が土のみの粘着力cとした。

コーン貫入試験に用いるポータブルコーンの外観を写真3.2.4に示す。これはスパイラル杭と同様に 簡易動的コーンを改良したもので電子荷重計と接続することができる。荷重計に接続したものを手動で 5 cm貫入しピーク値から貫入力を算定した。5回以上試験して平均値qcを求めた。

上記の二つの試験を簡易現場強度試験法とし、スパイラル杭引抜試験から算定した粘着力cとコーン 貫入試験から得られたq。を用いて内部摩擦角øを算定した。その際に、下記のテルツァーギによる浅い基礎の支持力公式(式1)を利用し、cとq。の値を代入し支持力係数は支持力係数の逆算から求めることができる。

$$q = \alpha c N_c + \beta \gamma_r B N_r + \gamma_r D_f N_a \tag{1}$$

ここで、q: 全般せん断の極限支持力度、B: 基礎底面の最小幅、Df: 基礎根入れ深さ、c: 粘着力、 γt : 土の単位体積重量、Nc、Nr、Nq: 全般せん断破壊の支持力係数、 α 、 β : 形状係数 (α =1.3、 β =0.3) である。

簡易現場強度試験法から得られた値と比較するために一面せん断試験を行った。各試料をせん断箱(幅 300 mm、奥行300 mm、高さ150 mm)の内部に敷き詰め、ランマーを用いて3 層に分け締固めを行い、原位 置の密度に調整して供試体を作製した。現場ではせん断箱と同じ大きさの供試体を成形した。せん断は モーターを用いて自動で行い、せん断速さは約0.88 mm/minとする。せん断応力がピークを示さない場合 は、JIS A1216:2009 に準拠し、せん断変位35 mmのせん断強度とした。室内試験で使用した地盤材料は まさ土、豊浦砂、砂質土、粘性土、改良土、廃棄物とした。改良土に関しては砂質土の乾燥質量に対し て0.75 %のポルトランドセメントをミキサーで粉体混合させ塩化ビニルの容器に詰めて約1 週間、養生 させたもの、廃棄物に関しては千葉と仙台の廃棄物最終処分場で取ってきたものを使用した。廃棄物以 外は室内一面せん断試験機で行った。廃棄物の組成分析を表3.2.2に示す。



写真3.2.3 スパイラル杭の外観



写真3.2.4 ポータブルコーンの外観

| | プラス チック | その他 繊維 | ガラス・ 陶器 | れき | 木くず | 金属 | 20mm 篩い下 | 合計 |
|----|------------|-----------|------------|-----|-----|----|-------------|-----|
| 千葉 | 2.66 | 2.94 | 10.8 | 7 | 0 | 0 | 76.6 | 100 |
| 仙台 | 3.12 | 2.88 | 10.7 | 7.3 | 0 | 0 | 76 | 100 |

表3.2.2 廃棄物の組成分析結果(質量%)

4. 結果及び考察

(1) 原位置一面せん断試験の結果

原位置一面せん断試験の結果の一例として、図4.2.1にL9およびL11地点におけるせん断応力とせん断 変位の関係を示す。L9地点における繊維廃材含有率は0.2%、乾燥密度は1.39 g/cm³で、L11地点における 繊維廃材含有率は25.1%、乾燥密度は1.10 g/cm³であり、異なる特性を持つ廃棄物層である。繊維廃材を ほとんど含まないL9では、せん断変位20~25 mmまではせん断変位の増加に伴いせん断応力が増加する が、その後は応力の増加は見られず、せん断変位の増加に対応する応力の変化は見られないことがわか る。一方で、繊維廃材を多く含むL11では、せん断変位の増加に伴い応力が増加し、L9におけるせん断挙 動とは異なる挙動が確認された。L9におけるせん断挙動は一般的な緩い砂質土のそれと似た挙動を示し ており、緩く堆積した、土砂分を多く含むL9廃棄物層のせん断特性を表していると考えられる。一方、 L11におけるせん断挙動は一般的な砂質土の挙動とは異なる。これは繊維廃材による靭性の付与により、 応力が増加し続けたことが考えられる。また、L9ではL11に比べて初期の剛性が高いことが確認される。 これは廃棄物層の乾燥密度の違いが影響していることが考えられる。繊維廃材の少ないL9では、L11に比 べて締固め効果が顕著であり、乾燥密度が高く、硬いため、せん断初期からせん断に対する抵抗性が発 揮される。そのため、L11に比べて初期剛性が大きいことが考えられる。

また、図4.2.2にL9およびL11地点における垂直変位とせん断変位の関係を示す。土砂分を多く含むL9 においては、せん断中に圧縮挙動を示す。一方、繊維廃材を多く含むL11においては、同じようなせん断 応力の推移の傾向を持つケース(上載圧3.7 kPaと9.6 kPa)であっても、上載圧3.7 kPaのケースでは圧 縮挙動、上載圧9.6 kPaのケースでは膨張挙動と異なる挙動を示す。L9では土砂分を多く含むため、粒状 体特有のダイレイタンシーが現れるが、繊維廃材を多く含むL11では、構造主体が粒状体ではなく、長尺 のプラスチック等の繊維廃材であるため、不規則な垂直変位が生じたと考えられる。

表4.2.1より、粘着力*c*=2²28 kN/m²、内部摩擦角*q*=23^{61°}であり、強度パラメータにおいても地点ご とに値のバラつきが大きいことがわかる。また、図4.2.3に粘着力と内部摩擦角の関係を繊維廃材含有率 ごとに整理した結果を示す。この図からも同様に粘着力と内部摩擦角の間に明瞭な相関関係を認めるこ とは困難であり、バラつきが確認される。しかしながら、繊維廃材含有率10%以上の点においては粘着力 の増加に伴い内部摩擦角は減少する傾向にある。



図4.2.1 せん断応力とせん断変位の関係

42

-

44

26

36

25

61

-

23

37



図4.2.2 垂直変位とせん断変位の関係

| | 地点名 | 粘着力(kN/m ²) | 内部摩擦角 (°) | せん断強度(kN/m²) | | | | | | | | |
|-----|------|--|-----------|--------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | L1 | 10 | 51 | 41 | | | | | | | | |
| 東北① | L2 | 11 | 51 | 42 | | | | | | | | |
| | L3 | 粘着力(kN/m²) 内部摩擦角(°) せん 10 51 11 51 4 32 17 28 19 23 13 27 - - 17 61 - - 11 53 - - - </td <td>20</td> | 20 | | | | | | | | | |
| 東北② | L4 | 17 | 28 | 30 | | | | | | | | |
| 明古① | L5 | 19 | 23 | 30 | | | | | | | | |
| | L6 | 13 | 27 | 26 | | | | | | | | |
| | L7 | - | - | - | | | | | | | | |
| 間声の | L8 | - | - | - | | | | | | | | |
| | L9 | 17 | 61 | 62 | | | | | | | | |
| | L10 | - | - | - | | | | | | | | |
| 関東③ | L11 | 11 | 53 | 44 | | | | | | | | |
| 間古の | L12 | _ | - | - | | | | | | | | |
| | T 12 | 24 | 25 | 12 | | | | | | | | |

35

-

59

36

36

38

53

-

31

41

24

-

2

8

18

5

28

-

8

13

中部

中国①

中国2

L13

L14

L15

L16

L17

L18

L19

L20

L21

平均

| 表4.2.1 | 強度パラメー | タおよびせん | 断強度 |
|--------|--------|--------|-----|
|--------|--------|--------|-----|



図4.2.3 粘着力と内部摩擦角の関係

原位置一面せん断試験によって得られたL11およびL13地点のせん断応力τと垂直応力σの関係を図 4.2.4に示す。L11における粘着力は11 kN/m²、内部摩擦角は53°、廃棄物層の繊維廃材含有率は25.1%、 乾燥密度は1.10 g/cm³であり、繊維廃材を多く含む地盤である。また、L13における粘着力は24 kN/m²、 内部摩擦角は35°、廃棄物層の繊維廃材含有率は6.0%、乾燥密度は1.25g/cm³であり、繊維廃材含有率は 小さく、L11に比べて廃棄物層密度の大きい地盤である。繊維廃材含有率の高いL11ではL13と比較して粘 着力が高く、内部摩擦角が小さい。このような廃棄物層における強度パラメータの発現機構は廃棄物層 の圧縮特性と密に関係していると考えられる。

図4.2.5に伊勢田ら³によって提唱された締固めた粘性土の圧縮特性の概念図を示す。締固め土の圧縮 時における挙動を次のように考える。

① 先行圧縮応力に至るまで顕著な変形を示さず、過圧縮的経路をとる(図4.2.5中HCまたはLC)⁴⁾。

② 先行圧縮応力を超える荷重を加えると、締固めによる先行効果が消失して変形が急増し、圧縮時の 経路は正規圧縮曲線(静的締固めによる圧縮曲線)上へと遷移する(先行圧縮応力を境としてSの経 路へ移る)⁴⁾。

また、締固め土の圧縮挙動に対応する $\tau - \sigma$ 曲線の概念図を図4.2.6に示す。処分場において、コンパク ターによって締固められた廃棄物層はAからB(B')へと移る。コンパクターによる上載荷重を除去して も転圧履歴が残るため、 $\sigma = 0$ おいてもにせん断強度(粘着力)を持つ。この時、締固め密度が高いほど 発現される粘着力は大きくなると考えられる。締固めによって粘着力が増大すると、正規圧縮土の $\tau - \sigma$ 曲線(直線AC)に比べて過圧縮領域である直線BCの傾きは小さくなる。内部摩擦角 φ は上載荷重の増加時 におけるせん断強度の増加率を指す。つまり、繊維廃材含有率の高い地盤では転圧後のリバウンドによ り締固め効果を長期にわたり維持することは難しいため、粘着力は小さく内部摩擦角は大きくなると考 えられる。

原位置一面せん断試験にて採用している上載荷重は25 kN/m²程度であり、この荷重が図4.2.6における σ_c (σ'_c)以下であれば、原位置一面せん断試験中にせん断強度は増加しないため、その増加率である内 部摩擦角 ϕ は小さくなると考えられる。

33


図4.2.4 せん断応力と垂直応力の関係



(2) 室内一面せん断試験の結果

表4.2.2に、実施した室内一面せん断試験の結果一覧を示す。全てのケースで、せん断変位の増加に伴いせん断応力が増加したが、せん断変位40 mm以内ではピーク強度は確認されなかった。これは、繊維廃材を含むために補強効果が発揮されて延性的な挙動が卓越したためと考えられる。せん断に伴う体積変化については、いずれのケースもせん断初期に圧縮傾向を示したのち膨張に転じたが、一意的な傾向は見られず、上載圧や繊維廃材含有率等との明確な相関は確認されなかった。廃棄物地盤は形状やサイズの異なる多様な組成であることから、一般的な砂質土と比べて試験の再現性を得られにくい。廃棄物地 盤の強度特性については室内試験により評価可能であるが、変形特性については試料の攪乱による影響が無視できないため、原位置でのせん断特性を把握する必要がある。さらに、本研究で用いたせん断試験機では、供試体の材料径が5 cm程度までは高精度であることがわかっているが¹⁾、本研究で用いた材料のように最大寸法が大きい場合には、供試体の変形特性を現行装置で評価することは難しいことが示唆される。

図4.2.7は上載圧とせん断強度の関係を示したものであるが、全てのケースで上載圧の増加に伴いせん断強度が増加し、φ材としての挙動が確認できる。図4.2.8に、せん断応力を上載圧で除した値である応力比で結果を整理した。ここでは関東試料と東北試料のうち、繊維廃材含有率3%及び16%のケースについての結果を示している。いずれの試料においても上載圧の増加に伴い応力比が低下する傾向を示した。特に上載圧14.1 kN/m²から24.6 kN/m²と比べ、3.7 kN/m²から14.1 kN/m²への減少量は大きいことがわか

り、上載圧依存性が確認できる。このような特性は粒子破砕が卓越する土質材料において、非常に高い 上載圧下で見られる傾向であり、大きい上載圧による圧縮によって粒子が破砕して急激な密度増加が起 こり、せん断時に応力比が低下することが知られている。安定廃棄物の一次元圧縮特性を評価した既往 の研究では、数+kN/m²程度のある上載圧を超えると急激な密度増加を示すことが確認されており、本研 究で実施したせん断試験でも上載圧の増加に伴いプラスチック等の剛性の低い材料が変形し、密度増加 が起こったと考えられる。ここで応力比とせん断変位の関係を、繊維廃材含有率3%と16%のケースで比較 すると、関東試料、東北試料それぞれ16%のケースのほうが応力比の低下が大きいことがわかる。

| 廃棄物処 | 組成(%) | | | 含水比 | 乾燥 | 上載圧 | せん断 | 粘着力 | 内部 | | |
|------|-------|------|--------------|------|----------------------------|--|----------------------------|-----------------------|---------------------|------|------|
| 分場 | 繊維廃材 | 粒状廃材 | 20 mm 篩い下 | (%) | 密度 (g/cm ³) | (kN/m^2) | 强度 (kN/m ²) | (kN/m^2) | 摩擦角 (°) | | |
| | 3.0 | | 79 | 24.0 | 1.14 | $3.7 \\ 14.1 \\ 24.6$ | 12.1 26.7 31.0 | 10.5 | 42.1 | | |
| 千卋 | 6.0 | | 76 | 21.4 | 1.11 | 3.7 14.1 24.6 | 9.8 21.0 30.4 | 6.5 | 44.7 | | |
| 十朱 | 11.0 | | 71 | 24.0 | 1.05 | $3.7 \\ 14.1 \\ 24.6$ | 8.5 19.2 30.6 | 4.6 | 46.4 | | |
| | 16.0 | 18 | 66 | 24.0 | 1.05 | 3.7 14.1 24.6 | 10.5 20.1 25.3 | 8.7 | 35.3 | | |
| | 3.0 | | 16 | 10 | 79 | 42.7 | 0.83 | $3.7 \\ 14.1 \\ 24.6$ | 9.1 23.2 30.5 | 6.5 | 45.6 |
| 仙台 | 6.0 | | | 76 | 39.8 | 0.83 | $3.7 \\ 14.1 \\ 24.6$ | 9.7 24.1 34.3 | 6.1 | 49.7 | |
| | 11.0 | | 71 | 38.5 | 0.83 | $3.7 \\ 14.1 \\ 24.6$ | 9.4 19.3 25.9 | 7.1 | 38.3 | | |
| | 16.0 | | 66 | 38.5 | 0.81 | $ \begin{array}{r} 3.7 \\ 14.1 \\ 24.6 \end{array} $ | 9.3 21.3 26.5 | 7.4 | 39.4 | | |

表4.2.2 室内一面せん断試験の条件及び結果



図4.2.7 上載圧とせん断強度の関係



図4.2.8 室内一面せん断試験結果の例:せん断変位と応力比の関係

室内試験及び現場試験から得られるデータの違いの原因を把握するために、繊維廃材、粒状廃材、20 mm篩い下の組成が類似している試験ケース、つまり千葉0.1年地盤と千葉19年地盤での現場試験を千葉 試料の繊維廃材含有率11%の室内試験ケースと、仙台0.1年地盤での現場試験を仙台試料の繊維廃材含有 率11%及び16%の室内試験ケースの結果を比較する。上載圧3.7,24.6 kN/m²のせん断特性を用いて比較し たグラフを図4.2.9及び図4.2.10に示す。図4.2.9は千葉試料を用いた室内試験と千葉現場試験、図4.2.10 は仙台試料を用いた室内試験と仙台現場試験についてのグラフである。せん断変位5 mmまでにおけるせ ん断応力-せん断変位曲線の勾配には、現場・室内による違いは見られない。さらにせん断が進行する と、室内試験における曲線勾配は現場試験以上に減少し、せん断変位が15~25 mmの範囲に到達すると現 場試験における曲線勾配も減少する。上載圧とせん断強度の関係を室内試験・現場試験で比較した図 4.2.11を見ると、上述したせん断応力の増加率の違いが原因となり、室内試験により得られるせん断強 度は現場試験と比べて小さい値をとる傾向にある。ここから、本研究で比較した現場試験と室内試験に より得られるそれぞれのせん断特性等には違いを確認できる。しかし大嶺らは、本研究で用いたせん断 試験機と同じものを用いて室内試験の現場再現性及び試料の攪乱による影響を確認している²⁷⁾。そこで は、まず現場試験を実施し、せん断後のせん断箱内の廃棄物試料を対象に室内試験を実施し、それぞれ のせん断特性や強度特性を比較している。結論としては、試料の攪乱による影響は変形特性に顕著に見 られ、強度特性を把握する場合は室内試験の代用が十分可能であると記載されている。このことから、 本研究で比較した室内試験と現場試験の間で確認された違いは、廃棄物のせん断箱内での配置や試料の 攪乱によるものではなく、試料の形状やサイズに起因する可能性が大きいといえる。







図4.2.10 仙台試料を用いた室内試験(繊維廃材含有率11%と16%)と現場試験の比較



図4.2.11 室内試験と現場試験におけるせん断強度と上載圧の関係の比較

(3) スパイラル杭の適用性

スパイラル杭引抜試験の結果の一例を図4.2.12 に示す。バラツキは少し見られたものの杭の深さと 引抜力には線形的な関係にあることがわかる。この関係から近似線をつくることができ、深さが0 cmの 位置、つまり近似式の切片を粘着力と推定した。他の材料に関しても同じような結果が見られた。コー ン貫入試験については地盤材料によって 様々な値が得られた。試験から得られた粘着力と貫入力を用 いてテルツァーギの浅い基礎の支持力公式に代入して逆算から内部摩擦角を求めた。次に、一面せん断 試験について廃棄物(千葉)の一例を図4.2.13、図4.2.14に示す。せん断応力はピーク値を示さず増加傾 向になっている。また垂直変位が初めに増加し後に減少することがわかる。このことから、廃棄物は初 期に膨張しその後体積変化が減少するゆるい砂の負のダイレイタンシーのような変化が見られた。簡易 現場強度試験法の結果と一面せん断試験の結果を表4.2.3に示す。この結果から、粘着力と内部摩擦角の どちらもが完全に一致した材料はなかったが、二つの強度定数のうちどちらかには相関が見られるもの があった。精度としては完全なものではないが一面せん断試験の結果に比べて、値が小さいものが多い ため斜面安全評価をする際に過大評価をすることがないと考えられる。このことから、簡易現場強度試 験法は斜面安定性に必要な地盤強度定数を推定できると考えられる。



図4.2.12 引抜試験結果(砂質土)



(廃棄物千葉)

図4.2.14 せん断変位―垂直応力 (廃棄物・千葉)

| 表4 2 3 | 室内一面せん | い新試験と自 | 簡易現場強 | 度試験法の結果 | の比較 |
|------------|--------|--------|-------|---------------------|---------------------------------------|
| 13 1. 4. 0 | | | | ノマ ピンのべ 1ム マノ 小口 ノト | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · |

| | | 一面せん | し断試験 | 貫入・引抜試験 | | | |
|---------|-----------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|--|
| 材料名 | 湿潤密度 (g/cm3) | 粘着力 (kN/m2) | 内部摩擦角 ([°]) | 粘着力 (kN/m2) | 内部摩擦角 ([°]) | 貫入力 (kN/m2) | |
| まさ土 | 1.90 | 9.71 | 39.5 | 5.52 | 42.8 | 663.5 | |
| 豊浦砂 | 1.25 | 2.06 | 33.9 | 1.24 | 21.8 | 28.3 | |
| 砂質土 | 1.62 | 5.81 | 37.0 | 9.47 | 33.5 | 511.7 | |
| 粘性土 | 1.56 | 5.39 | 30.8 | 8.62 | 27.8 | 288.0 | |
| 改良土 | 1.68 | 32.43 | 34.8 | 23.46 | 38.3 | 1990. 5 | |
| 廃棄物(千葉) | 1.46 | 4. 55 | 46.52 | 3. 37 | 43.30 | 403.04 | |
| 廃棄物(仙台) | 1.19 | 7.07 | 38.25 | 3. 54 | 44.30 | 476.43 | |

室内試験の結果を受けて、原位置でも本試験が適用可能と考えたため、実際に原位置で試験した。原 位置でも室内試験と同様にスパイラル杭引抜試験とコーン貫入試験、原位置一面せん断試験を行った。 従来の試験と比べ簡易に行えるかどうかも同時に検討した。今回対象となった現場は主に産業廃棄物最 終処分場の廃棄物地盤とした。国内では、千葉の3箇所、仙台の3箇所の安定型の最終処分場で国外で はスリランカで試験を行った。それぞれの地盤の組成分析を表4.2.4に示す。国内の現場は産業廃棄物の ため比較的プラスチック類が多く含まれていたところや大きな廃棄物は少なく20 mm以下ふるい下がほ とんどという場所もあった。

| | プラス チック | その他 繊維 | ガラス 陶器 | れき | 木くず | 金属 | 20mm 篩い下 | 合計 (%) |
|-------|------------|-----------|-----------|-------|------|------|-------------|-----------|
| 千葉① | 10.37 | 6.90 | 6.29 | 6.50 | 2.86 | 0.29 | 66.79 | 100 |
| 千葉② | 2.68 | 3.04 | 15.01 | 14.79 | 0.06 | 0.19 | 64.24 | 100 |
| 千葉③ | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 3.2 | 0.4 | 0.1 | 95.30 | 100 |
| 仙台① | 13.68 | 17.64 | 9.14 | 6.85 | 0.05 | 0.63 | 52.01 | 100 |
| 仙台② | 13.47 | 13.68 | 7.38 | 7.54 | 0.16 | 0.10 | 57.67 | 100 |
| 仙台③ | 2.4 | 1.4 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.8 | 95.40 | 100 |
| スリランカ | 20.0 | 18.0 | 3.0 | 3.0 | 0.0 | 3.0 | 48.0 | 100 |

表4.2.4 スパイラル杭の適用性評価の対象とした現場の廃棄物組成(質量%)

原位置での引抜試験の様子を写真4.2.1に、貫入試験の様子を写真4.2.2に、それぞれ示す。引抜試験 では、試験実施箇所によって内容物が変わっているため、スパイラル杭が刺さらないことがあった。貫 入試験は5cmだけ貫入を要するため、場所や内容物によらず試験を実施できた。両方の試験を原位置です るのにかかった時間は約30分であり、短時間で実施可能と言える。一方、一面せん断試験は引抜・貫入 試験に比べて必要な供試体を1個作製するのに約1時間かかり、試験が完了し強度定数を推定するまでに 約1日要した。また、原位置の締め固められた廃棄物地盤を撹乱せずに切り出して供試体を作製するた め、作製時までどのような内容物が試料中に存在しているか不明で場所によっては切り出しに時間が要 することや、選定し直す必要がある場合もあった。また、供試体の廃棄物組成についても不明なまま試 験を行う必要があり、必ずしも直線的なデータが取得できるとは言えず、再試験の必要に迫られる場合 もある。これらのことから、試験の容易性に関しては引抜・貫入試験の方が優れていると判断できる。

次に、それぞれの試験結果について考察した。千葉①での引抜試験の結果を図4.2.15に示す。室内試 験で引抜力のバラツキがあったため、それを抑えるために同じ深さを複数回行うことで、杭の深さと引 抜力の関係を明確にした。線形的な関係から近似線を引くことができた。杭の深さが0のところ、つまり 近似式の切片を粘着力と推定した。



写真4.2.1 引抜試験の様子(千葉③)



写真4.2.2 貫入試験の様子(仙台③)



図4.2.15 引抜試験結果(千葉①)

コーン貫入試験の結果を表4.2.5に示す。それぞれの場所で複数回計測した。一番大きな値になったの は千葉③となった。これは、20mm以下ふるい下が多い中で廃棄物が礫状の大きな塊として残っていたた めと考えられる。仙台③も20 mm以下ふるい下がほとんどだったが、プラスチックやその他繊維などが多 かったため一番小さい値が出たと考えられる。多少のばらつきは見られたものの複数回試験し、平均を とっているため、貫入力を推定できていると考えられる。原位置一面せん断試験は室内試験同様に廃棄 物地盤ではせん断応力はピーク値を示さず増加傾向になって、また垂直変位が初めに増加し後に減少し た。原位置の廃棄物でも初期に膨張しその後体積変化が減少するゆるい砂の負のダイレイタンシーのよ

うな変化が見られた。

簡易現場強度試験法と一面せん断試験から算定した粘着力と内部摩擦角を表4.2.6に示す。また、室内 試験と原位置試験からそれぞれ得られた強度定数を比較したものを図4.2.16、4.2.17に示す。原位置で の廃棄物地盤では毎回の試験を内容物が全く同じの場所ではできないため、それぞれの試験結果にバラ つきが生じてしまう。しかし、粘着力に関しては千葉③と改良土、内部摩擦角に関しては仙台②と仙台 ③の結果を除けばおおよその相関があると考えられる。従来の原位置試験と比べると短時間かつ簡易的 にできる強度推定試験法であると考える。

| 現場 | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| 千葉① | 659.2 | 923.6 | 828.0 | 732.5 | 1019.1 | | |
| 千葉② | 1051.0 | 509.6 | 582.8 | 1200.6 | 415.3 | | |
| 千葉③ | 1273.9 | 907.6 | 1398.1 | 1108.3 | 1082.8 | 1238.9 | 9841 |
| 仙台① | 1089.2 | 971.3 | 598.7 | 961.8 | 939.5 | | |
| 仙台② | 484.1 | 1006.4 | 1340.8 | 1070.1 | 707.0 | 786.6 | |
| 仙台③ | 672.0 | 828.0 | 200.6 | 391.7 | 869.4 | 302.5 | |
| スリランカ | 633.8 | 668.8 | 589.2 | 939.5 | 512.7 | 605.1 | |

表4.2.5 コーン貫入試験結果(単位:KN/m²)

| 表4.2.6 | 原位置- | -面せん | 断試験と | 簡易現場強 | 度試験法の |)結果の比較 |
|--------|------|------|------|-------|-------|--------|
|--------|------|------|------|-------|-------|--------|

| | | 一面せん | し断試験 | 貫入・引抜試験 | | | |
|-------|------------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|-----------------------------|--|
| 材料名 | 湿潤密度 (g/cm ³) | 粘着力 (kN/m²) | 内部摩擦角 ([°]) | 粘着力 (kN/m²) | 内部摩擦角 ([°]) | 貫入力 (kN/m ²) | |
| 千葉① | 1.46 | 20.91 | 21.7 | 19.38 | 30.9 | 832.5 | |
| 千葉② | 1.35 | 16.48 | 24.2 | 10.18 | 36.7 | 731.8 | |
| 千葉③ | 1.46 | 17.43 | 61.08 | 5.11 | 56.5 | 1138.9 | |
| 仙台① | 1.08 | 15.52 | 46.9 | 8.87 | 39.2 | 912.1 | |
| 仙台② | 1.19 | 11.85 | 54.1 | 8.29 | 39.8 | 809.8 | |
| 仙台③ | 0.75 | 3.66 | 31.52 | 3. 60 | 47.1 | 544.1 | |
| スリランカ | 10.8 | 9.7 | 35.7 | 7.1 | 40.0 | 658.0 | |



図4.2.16 両試験の粘着力の比較



図4.2.17 両試験の内部摩擦角の比較

各試験から得られた強度定数の比較より強度定数に相関が見られた地盤材料もあれば、粘着力または 内部摩擦角のどちらかに差が見られた材料もあった。そこで、強度定数を個別に比較した際には相関が みられないとしても実際の斜面の安定計算の際には相関を見ることができると考え、本研究の各試験か ら得られた強度定数を用いて斜面の安定計算を行った。

本研究では各地盤材料の無限斜面を仮定し、斜面傾斜角を30°、斜面高さを4つのケース(3, 5, 10, 15 m)をプロットし比較した。これは、斜面崩壊が円弧すべりの一部分であることを仮定しており実際の 安定計算では多くの斜面高さを考えて計算するため複数の斜面高さでせん断強度の推定を行った。今回、 せん断強度を推定するために使用した無限斜面法のせん断強度(式2)を以下に示す。

$$\tau = c + \gamma_t H \cos^2 \alpha \tan \phi \tag{2}$$

ここで、 τ : せん断強度、c: 粘着力、 γ_t : 土の単位体積重量、H: 斜面高さ、 α : 斜面傾斜角、 ϕ : 内部摩擦角である。

図4.2.18に各試験結果からせん断強度を推定し、比較したものを示す。直接強度定数を比較したもの に比べ、相関関係が見られていると考えられる。また、廃棄物に関しては大小の廃棄物が混在しており 測定地点毎の強度に影響を受けたため、差が生じたと考える。



図4.2.18 無限長の直線斜面を仮定した場合の各試験の結果から推定されるせん断強度の比較

スリランカの現場では廃棄物を盛り立てただけのような、最大高さ48 mの斜面があり、すべての地点 で原位置一面せん断試験を行うことが出来なかった。そこで本研究の簡易現場強度試験法を用いて、斜 面の上部から下部にかけて標高差10 m 間隔で4 箇所(GL-20, 30, 40, 50 m)の強度定数を算定した。調 査した場所を写真4.2.3に示す。GL.20のスパイラル杭引抜試験の結果を一例として図4.2.19に示す。ま た、それぞれの地点での簡易現場強度試験法によるc、 ϕ の推定結果を表4.2.7に示す。現場試験でGL.20 m 地盤での一面せん断試験によるc、 ϕ と、簡易現場強度試験法による同推定値が近いことから、GL.30 m ~50 m のc、 ϕ の値はこれらの試験による推定値で概ね判断できると考えられる。



写真4.2.3 調査場所



図4.2.19 スリランカで実施した引抜試験の結果

| 試験場所 | コーン貫入・スパイラル杭引抜試験 |
|---------|---|
| GL.20 m | $c = 7.1 \text{ kN/m}^2 \phi = 40^\circ$ |
| GL.30 m | $c = 10.2 \text{ kN/m}^2 \phi = 37^\circ$ |
| GL.40 m | $c = 8.3 \text{ kN/m}^2 \phi = 38^\circ$ |
| GL.50 m | $c = 2.2 \text{ kN/m}^2 \phi = 45^\circ$ |

表4.2.7 簡易現場強度試験法の結果

研究目標達成度: 時間と労力を要する従来の現場試験法に替わる簡易な試験法の提案につなげられていることから、当初目標を達成できた。

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

原位置一面せん断試験と室内一面せん断試験の結果から、繊維廃材を含む廃棄物地盤の強度定数は、 一般的な地盤と比較して高い値を有しており、せん断に対して大きな抵抗を発揮しうることを示した。 また、繊維廃材含有率の高い地盤では転圧後のリバウンドにより締固め効果を長期にわたり維持するこ とは難しいため、粘着力は小さく内部摩擦角は大きくなることを明らかにした。一方で、供試体内の廃 棄物の組成や繊維状物質の存在する向き、試料の形状やサイズによって得られる強度定数がばらつくこ

とをデータで示した。

簡易的に表層地盤の強度定数を推定するためにスパイラル杭を開発し、室内と原位置でスパイラル引 抜試験とコーン貫入試験を行い、粘着力と内部摩擦角を求めた。原位置での廃棄物地盤ではそれぞれの 試験結果にバラつきが生じるが、粘着力に関してはおおよその相関があることを示した。さらに、簡易 現場強度試験法によって一面せん断試験で得られるせん断強度を精度良く評価しうることを明らかに し、これまでデータの取得に多くの時間を要していた強度定数を簡便に評価しうることを示した。

(2)環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

不確実性や不均質性を考慮する必要があるものの、廃棄物地盤の粘着力は2~28 kN/m²、内部摩擦角は 23~61%の範囲にあり、対象地盤の廃棄物組成を考慮しつつ材料パラメータを選定することで、合理的な 安定解析を実現しうると言える。

スパイラル杭やポータブルコーンを用いた方法によって間接的に求められる粘着力や内部摩擦角の個別の数値には、ある程度のばらつきが見られるものの、せん断強度については一面せん断試験で算出される値と良い一致を示した。このことから、これらの試験法は現場強度の簡便な評価法として有用であり、原位置一面せん断試験であればデータ取得に24時間程度必要であった作業時間を約30分に大幅に短縮しつつ、精度良く現場強度を推定することが可能となる。

6. 国際共同研究等の状況

スリランカ国 Meethotamulla 処分場廃棄物斜面安全性評価のための現地調査(独立行政法人国際協力機構)

派遣国:スリランカ国 カウンターパート:スリランカ国家建築研究所(National Building Research Organization) 参加者:大嶺 聖、土居洋一、山脇 敦 実施内容:廃棄物層の強度試験実施等による技術支援(2017年8月13日~19日)

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- S. Ideguchi, K. Omine, S. Sugimoto: Proc. of 8th International Congress on Environmental Geotechnics, 248-254 (2018) Estimation of Strength Constants of Various Geomaterials by Core Penetration and Spiral Pile Pull Out Tests
- S. Ideguchi, K. Omine and S. Sugimoto: Proc. of the Technical Forum on Mitigation of Geo-disasters in Asia, 1-4 (2019)
 Development of simple testing method for estimation in-situ strength and application to solid waste ground,
- 3) 出口資門・大嶺聖:第13回環境地盤工学シンポジウム発表論文集,281-284,(2019) 簡易現場強度試験法の開発と廃棄物地盤への適用

(2) 口頭発表(学会等)

1) 出口資門・大嶺 聖・蒋 宇静・杉本知史:平成29年度土木学会西部支部研究発表会(2018) 廃棄物地盤における簡易的引抜・貫入試験の適用性

- 2) 出口資門・大嶺 聖・杉本知史:第73回土木学会年次学術講演会(2018) コーン貫入とスパイラル杭引抜試験による廃棄物地盤の簡易強度推定法
- 3) 佐藤竜樹・大嶺 聖・蒋 宇静・杉本知史・出口資門:平成30年度土木学会西部支部研究発表会 (2019)

様々な地盤材料に対する簡易強度推定法の適用

- 4) 出口資門・大嶺 聖・杉本知史・佐藤竜樹:第54回地盤工学研究発表会(2019) 廃棄物地盤の簡易強度推定のためのコーン貫入・スパイラル杭引抜試験の適用
- 5) 出口資門・大嶺 聖・蒋 宇静・杉本知史:令和元度土木学会西部支部研究発表会(2020) 廃棄物地盤におけるひもとキャピラリーバリアによる排水機能向上について

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 大嶺 聖・山脇 敦・土居洋一・川嵜幹生(2013):廃棄物地盤の強度推定のための現場土圧試 験の開発,第24回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集,pp.545-546.
- 2) 宮本慎太郎・安福規之・大嶺 聖・石蔵良平・山脇 敦・川井晴至(2013):引張試験機による 埋立廃棄物地盤の引張強度特性の解明と強度評価法の提案,ジオシンセティックス論文集第28 巻,pp.229-236.
- 伊勢田哲也,水野正憲(1971):締固めた土の圧縮特性に関する研究,土木学会論文報告集,第 188号,pp.45-52.
- 4) 太田秀樹・伊藤雅夫・石黒 健・米谷 敏(1991):締固められた粘性土の先行圧縮応力と強度の推定,土木学会論文集, No. 436/Ⅲ-16, pp. 27-36.

Ⅱ-3 廃棄物層の浸透水の水理・水質特性に関する研究

長野県短期大学生活科学科

土居 洋一・小林 優子

平成29年~令和元年度研究経費(累計額):17,775千円(研究経費は間接経費を含む) (平成29年度:7,893千円、平成30年度:6,569千円、令和元年度:3,313千円)

[要旨]

プラスチックが混入した廃棄物地盤では、大きな空隙を有することや、プラスチックに沿う選択流の 発生により、雨水の透水性は基本的に極めて良いと考えられる。一方で、地盤中で雨水がプラスチック 等の凹部等に貯留されながら、極めてゆっくりと流下する可能性も考えられ¹⁾、この場合には廃棄物と の接触時間の増大により浸出水の水質が悪化することが懸念される。現場試験サイトで採取した廃棄物 試料を用いて、直径57cmのドラム缶と内径30cmのアクリル製カラムを用いた通水試験を行った。廃棄物 組成と浸透特性、浸透水水質の関係を明らかにするとともに、清浄なまさ土を廃棄物下部に敷設したケ ース、廃棄物と事前混合したケース、廃棄物層を高密度化したケース等との比較から、埋立方法の違い が環境安全性に及ぼす影響を明らかにした。その結果、プラスチックの混入量だけでなくプラスチック のサイズが浸透特性に影響を及ぼすことや、浸出水の各種濃度は滞留時間が長いほど高くなること等を 示した。

[キーワード]

浸出水、内部保有水、廃棄物組成、埋立方法、カラム試験

1. はじめに

プラスチックが混入した廃棄物地盤では、大きな空隙を有することや、プラスチックに沿う選択流の 発生により、雨水の透水性は基本的に極めて良いと考えられる。一方で、図1.3.1に示すように、地盤中 に浸透した雨水がプラスチック等の凹部等に貯留されながら、極めてゆっくりと流下する可能性も考え られ¹⁾、この場合には廃棄物との接触時間の増大により浸出水の水質が悪化することが懸念される。



図1.3.1 廃棄物地盤中の水の流れのイメージ

2. 研究開発目的

廃棄物地盤における浸透特性と浸透水の水質については、詳細にその影響要因との関係から論じられ た例は少ない。そのため、本サブテーマでは廃棄物地盤の浸透特性と浸透水水質が廃棄物組成や埋立方 法によってどのように変化するか明らかにすることを目的とし、各種カラム試験を実施した。直径57cm のドラム缶を用いたカラム通水試験では、現場採取試料を用いて異なる埋立方法でカラムを作成し、各 カラムで得られる浸出水質の違いから、環境安全性を満足しうる埋立方法の提案を目的とした。内径30cm のアクリル製カラムを用いたカラム試験では、小サイズのプラスチック等の繊維廃材の含有率を変化さ せて実験を行い、浸透水水質と繊維廃材の関係を明らかにすることを目的とした。

3. 研究開発方法

試験は、表3.1.1で述べた各現場で実施した。

(1) 大型カラム通水試験

試料は千葉、仙台処分場それぞれ2現場の計4箇所から採取した廃棄物及び覆土を用いた。カラムは直径57 cm、高さ84 cmのドラム缶で、底部から15 cm、表層から15 cmの位置に温度計を設置した。カラムの全体像を図3.3.1に示す。

高さ方向に密度が均等になるように20 cm毎に締め固めを行いながら各試料をカラムに充填し、表 3.3.1、図3.3.2に示す5条件のカラムを現場ごとに作製した。ケース1は現場表層と同密度に廃棄物を充 填したカラムである。ケース2は下層に覆土層を設けたカラムで、覆土層の浸透抑制効果、重金属や有機 汚濁物質等の捕捉効果を評価することを目的とする。ケース3は廃棄物と覆土を混合状態で充填してお り、混合埋立による水質の変化を評価するためのカラムである。ケース4は覆土のみを充填したカラム で、ケース1とケース2,3の差を明瞭にするために覆土自体の浸透性や水質を評価する。ケース5はケー ス1に比べ高密度に充填したカラムで、高密度埋立が水質に与える影響を評価する。ケース1~4について は試料採取現場と同程度の密度、ケース5については現場値の1.2倍程度の密度となるよう試料を充填し た。なお、現場では廃棄物と覆土は混合状態ではないため、ケース3の密度の現場値とは、廃棄物及び覆 土がそれぞれ現場と同等の密度で、廃棄物:覆土=6:1の割合で混合されている場合の値である。

注水は、写真3.3.1に示すように流量を調節したじょうろを用いて、表層から万遍なく30分間で12.6L の水を投入した。採水は底部のバルブから行った。採水間隔は原則、排水開始後約1時間までは1分間隔、 それ以降注水から3時間までは10分間隔、その後は注水から6時間後まで30分間隔とした。注水から排水 まで数時間を要するケースは例外的に、排水開始後約1時間までは1分間隔、それ以降排水開始から3時間 までは10分間隔、その後は排水開始から6時間後まで30分間隔とした。ここまでの採水はバルブを開け続 け、継続的に行った。その後、カラム内の水分が逸散しないように、カラム上部に蓋をし、底部のバル ブを閉めた。以降の採水間隔は全ケース共通で注水から24時間後、3日後、1週間後、1か月後、3か月後、 6か月後、1年後であり、毎回30分間バルブを開き採水した。なお、使用したカラムは浸出水の貯留空間 を有しておらず、バルブ閉塞時には浸出水がカラム下部の廃棄物に接触する構造となっている。

表3.3.2に本研究のカラム試験で測定した項目と測定間隔を示す。排水量及び水質の測定は上述した 方法で採水した排水を用いた。温度はカラム内部に設置している温度センサーから測定した。温度、ガ ス、試料高の測定の様子を写真3.3.2に示す。



図3.3.1 カラムの全体像

| | | 2 | | 2 | |
|------|------|----------|------------|------|-------|
| カラム | ケース1 | ケース2 | ケース3 | ケース4 | ケース5 |
| 試料 | 廃棄物 | 廃棄物+土 | 廃棄物・土 | 土 | 廃棄物 |
| | | | 混合 | | (高密度) |
| 試料高さ | 60cm | 廃棄物60cm+ | 70cm (廃棄物 | 60cm | 60cm |
| | | 土10cm | $6:\pm 1)$ | | |
| 充填密度 | | 現場値×1.2 | | | |

表3.3.1 カラム試験の条件一覧



図3.3.2 カラム試験での各ケースのイメージ図

| 測定項目 | | 測定間隔 | | | | |
|------|-------|--|--|--|--|--|
| | 排水量 | 採水ごと | | | | |
| 泪库 | Ŀ | | | | | |
| 価皮 | 下 | ************************************* | | | | |
| ボフ | 硫化水素 | 武映開始口に数凹 これ以及け注水から94時間後 9日後 | | | | |
| 77 | メタン | て40以降は住小から24时间後,3日後, 1週間後 1か日後 9か日後 | | | | |
| 試料高 | | 1 1週间饭,1/ハ ³ 月饭,3 ⁷⁰ 月饭, 6か日後 1年後 | | | | |
| | 電気伝導度 | 077万夜,1千夜 | | | | |
| | pН | | | | | |
| | TOC | | | | | |
| 水匠 | 全窒素 | | | | | |
| 小貝 | 鉛 | 試験開始日,1か月後,3か月後, | | | | |
| | 砒素 | 6か月後,1年後 | | | | |
| | 硫酸イオン | | | | | |
| | 固形分 | | | | | |

表3.3.2 カラム試験に関する測定項目及び測定間隔



試料の混合

試料の充填

注水



採水

計量及び分析

ガスの測定

写真3.3.1 カラム試験の流れ



写真3.3.2 測定の様子(左上:温度,右上:試料高,下:ガス)

(2) 中型カラム試験

中型カラム通水試験は、繊維廃材含有率が2%と10%となるよう試料を作製し実施した。アクリル製カラ ムの内径は30 cmで、高さは100 cmである。試料は、サブテーマ4で実施した現場試験の処分場D(関東) で採取した。カラム内径が30 cmであることを考慮し、5 cm×5 cmの目開きのふるいで粗大な廃棄物を除 去し、十分に混合して使用した。手選別でプラスチックを選択し、2%と10%の繊維廃材含有率となるよう 調整した。調整後の試料は、原位置での密度を参考に4層に分けてカラム内に充填し、廃棄物上端から深 さが25 cm、55 cmとなる位置に水分計と温度計を設置した。また、廃棄物処分場における覆土層を模擬 した最大粒径2 mmのまさ土層を10 cm厚で底部に設け、浸出水質の改善効果への寄与を評価した。表3.3.3 に実験条件を、図3.3.3に中型カラム試験の実施状況を示す。

降雨を再現するため、降雨強度が日本における平均年間降雨量1530 mm/yearとなるようカラム上部から散水した。浸出水は、カラム底部と、40 cm厚の廃棄物下部、80 cm厚の廃棄物下部で回収し、pH、電気伝導率、酸化還元電位、TOC、および各種元素濃度等を分析した。分析には、TOC計(TOC-5050A)や原子吸光分光光度計(AA-6800)等を用いた。

| ±000 | 山町山ニノ社殿の中殿友供 | 更合 |
|----------|--------------|----|
| 衣ひ. ひ. ひ | 中空ルノム武駅の美駅采件 | 見 |

| 項目 | ケース1 | ケース2 |
|---------|-----------------------|-------------------------|
| 繊維廃材含有率 | 2% | 10% |
| 底部まさ土層 | 10 cm | 10 cm |
| 廃棄物密度 | 1.38 g/cm^3 | 0.92 g/cm^{3} |
| まさ土層密度 | 1.88 g/cm^3 | 1.88 g/cm^3 |
| 降雨強度 | 1530 mm/year | 1530 mm/year |



図3.3.3 中型カラム試験の概念図

4. 結果及び考察

(1) 大型カラム通水試験の結果

カラム試験の条件及び結果の概要を表4.3.1に示す。ケース1は表層廃棄物の現場密度と等しくなるよう廃棄物を充填したカラム、ケース2は下層に覆土層を設けたカラムケース3は廃棄物と覆土を混合状態で充填しており、混合埋立による水質の変化を評価するためのカラム、ケース4は覆土のみを充填したカ ラム、ケース5はケース1に比べ高密度に充填したカラムである。ケース1~4については試料採取現場と 同程度の密度、ケース5については現場値の1.2倍程度の密度となるよう試料を充填した。また、表4.3.2 に排水中の鉛、ヒ素濃度を示す。

| カラ | ラム | 層厚 | 密度 (g/cm ³) | | 排水開 始まで | 累積排水量(L) | | | | | | | | | |
|-------|-----|------|----------------------------|---------|--------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| 試料 | ケース | (cm) | カラム | 現場 比 | の時間 (min) | 1時 間 | 3時間 | 1日 | 3日 | 1週間 | 1か月 | 3か月 | 6か月 | 1年 | |
| | 1 | 56.3 | 1.16 | 0.9 | 50 | 2.0 | 7.0 | 8.7 | 9.3 | 9.8 | 10.3 | 10.4 | 11 | 11.2 | |
| 工卉 | 2 | 69.6 | 1.18 | - | 36 | 0.9 | 3.9 | 6.2 | 6.4 | 6.7 | 6.9 | 7.1 | 8.2 | 8.9 | |
| □ ⊤ 朱 | 3 | 68.1 | 1.21 | - | 33 | 2.5 | 6.8 | 8.7 | 9.5 | 10.3 | 11.0 | 11.2 | 12.3 | 12.7 | |
| 0.1+ | 4 | 56.7 | 1.76 | - | 75 | 0.0 | 3.4 | 5.6 | 5.8 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.7 | 7 | |
| | 5 | 59.3 | 1.33 | 1.0 | 226 | 0.0 | 0.0 | 2.9 | 4.4 | 5.7 | 6.9 | 7.9 | 9.3 | 10.3 | |
| | 1 | 56.3 | 1.40 | 1.0 | 35 | 1.7 | 4.1 | 5.3 | 5.7 | 6.0 | 6.5 | 6.6 | 6.8 | 7.0 | |
| 工業 | 2 | 68.7 | 1.39 | - | 82 | 0.0 | 1.2 | 3.0 | 3.3 | 3.6 | 4.0 | 4.1 | 4.6 | 5.0 | |
| 十果 | 3 | 68.7 | 1.39 | - | 115 | 0.0 | 0.8 | 2.8 | 3.2 | 3.7 | 4.1 | 4.2 | 4.7 | 5.2 | |
| 154 | 4 | 60.2 | 1.65 | - | 2880 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.12 | 0.19 | |
| | 5 | 60.0 | 1.58 | 1.1 | 47 | 0.5 | 3.5 | 5.3 | 5.5 | 5.7 | 5.9 | 5.9 | 6.1 | 6.2 | |
| | 1 | 63.2 | 1.07 | 1.0 | 22 | 5.9 | 8.1 | 9.9 | 10.8 | 11.7 | 12.6 | 13.0 | 14.3 | 14.8 | |
| hu 4 | 2 | 67.9 | 1.21 | | 20 | 5.6 | 7.8 | 9.7 | 11.2 | 11.9 | 12.2 | 12.2 | 13.1 | 13.7 | |
| 111日 | 3 | 66.8 | 1.23 | | 26 | 5.1 | 7.4 | 9.4 | 10.2 | 10.9 | 11.6 | 11.9 | 12.9 | 13.2 | |
| 0.1+ | 4 | 58.7 | 1.53 | | 22 | 6.2 | 7.7 | 9.2 | 9.4 | 9.4 | 9.4 | 9.4 | 9.4 | 9.4 | |
| | 5 | 59.6 | 1.27 | 1.2 | 19 | 6.6 | 8.5 | 11.0 | 11.8 | 12.4 | 13.0 | 13.4 | 14.2 | 14.7 | |
| | 1 | 59.1 | 1.01 | 0.9 | 22 | 5.6 | 7.2 | 8.5 | 9.0 | 9.4 | 9.9 | _ | 11.6 | 11.9 | |
| ht 4 | 2 | 68.5 | 1.11 | | 21 | 6.2 | 8.0 | 9.4 | 10.0 | 10.5 | 11.1 | - | 13.3 | 13.7 | |
| 10年 | 3 | 69.7 | 1.09 | | 28 | 3.7 | 5.6 | 7.0 | 7.4 | 7.8 | 8.3 | | 10.3 | 10.8 | |
| 10-7- | 4 | 58.2 | 1.71 | | 14 | 9.2 | 10.6 | 11.1 | 11.3 | 11.5 | 11.6 | _ | 13.6 | 14 | |
| | 5 | 61.5 | 1.11 | 1.0 | 18 | 7.2 | 8.2 | 9.5 | 10.0 | 10.4 | 11.0 | - | 12.4 | 12.4 | |

表4.3.1 カラム試験の条件及び結果の概要

| カラム | | | 鉛(P | 'b)濃度(m | ng/L) | ヒ素(As)濃度(mg/L) | | | | | |
|-----------------------------------|-----|----------|---------|---------|---------|----------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| 試料 | ケース | 注水 当日 | 1か月後 | 3か月後 | 6か月後 | 1年 | 注水 当日 | 1か月後 | 3か月後 | 6か月後 | 1年後 |
| | 1 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 0.003 | 0.003 | < 0.001 | 0.001 |
| | 2 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.003 | < 0.001 | 0.005 |
| 十葉0 1年 | 3 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 0.001 | 0.004 | 0.001 | < 0.001 | 0.002 |
| 0.1 | 4 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 0.002 |
| | 5 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.003 |
| | 1 | < 0.001 | 0.027 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 0.01 | < 0.001 | 0.005 | 0.003 | 0.003 |
| | 2 | < 0.001 | 0.014 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 0.001 | 0.007 | 0.004 |
| 千葉 10年 | 3 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 0.005 | 0.005 | 0.002 | 0.006 | 0.015 |
| 10 | 4 | 排水なし | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 排水なし | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 0.001 |
| | 5 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 0.01 | 0.005 | 0.001 | 0.003 | 0.002 |
| | 1 | < 0.001 | 0.005 | _ | < 0.001 | < 0.001 | 0.013 | 0.026 | _ | 0.010 | 0.033 |
| | 2 | < 0.001 | < 0.001 | _ | < 0.001 | < 0.001 | 0.005 | 0.004 | - | 0.003 | 0.008 |
| 仙台 0 1年 | 3 | < 0.001 | 0.002 | _ | < 0.001 | < 0.001 | 0.013 | 0.018 | - | 0.006 | 0.024 |
| 0.1 | 4 | < 0.001 | | _ | _ | < 0.001 | 0.002 | _ | ļ | _ | 0.027 |
| | 5 | < 0.001 | 0.007 | _ | < 0.001 | - | 0.027 | 0.024 | _ | 0.013 | - |
| | 1 | < 0.001 | < 0.001 | _ | < 0.001 | < 0.001 | 0.011 | 0.006 | _ | 0.003 | < 0.001 |
| | 2 | < 0.001 | < 0.001 | _ | < 0.001 | < 0.001 | 0.003 | < 0.001 | - | < 0.001 | < 0.001 |
| 仙台 10年 | 3 | < 0.001 | < 0.001 | _ | < 0.001 | < 0.001 | 0.008 | 0.014 | - | 0.002 | < 0.001 |
| 101- | 4 | < 0.001 | < 0.001 | - | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 0.001 | _ | < 0.001 | < 0.001 |
| | 5 | < 0.001 | < 0.001 | _ | < 0.001 | _ | 0.023 | 0.002 | _ | 0.015 | _ |

表4.3.2 排水中の鉛及びヒ素濃度

表4.3.1の排水開始までの時間から廃棄物の初期排水性を検討する。ケース1については千葉0.1年試 料に比べて密度の大きい千葉19年試料のほうが、排水開始までの時間が短いことがわかる。またケース 1より下層に充填した覆土の分、層厚が10 cm大きいケース2は、千葉19年試料を除いて、排水開始までの 時間がケース1より短いことがわかる。さらにケース1とケース5について仙台試料それぞれを比較する と、高密度に充填したケース5のほうが排水開始までの時間が短い。これらから廃棄物の排水性は、埋立 方法以上に廃棄物同士の噛み合い方、またそれに影響を受ける局所流に依る部分が大きいと推察できる。 そのため本研究の結果のように、埋立方法による排水性の明確な違いは確認できず、カラムごとに異な った排水性を有したと考えられる。

図4.3.1に時間当たりの排水量の経時変化を示す。千葉の2試料それぞれのケース2及び3は、ケース1と 比べて排水ピーク量が半分以下になっていることがわかる。仙台試料については全ケースにおいて排水 ピーク量の大きな違いは確認できないが、これには上述した覆土の透水性が影響していると考えられる。 また千葉の2試料それぞれにおいては、ケース5にも排水ピーク量の減少が見られる。これらから覆土と 廃棄物の混合埋立や廃棄物の高密度埋立によりピーク排水量を減少できる可能性が示唆された。ここか ら処分場の浸透水排水設備を設計するにあたっては、覆土の透水性や埋立方法を考慮することが重要で あるといえる。

プラスチック等の表面等に貯留能力がある廃棄物が多い程、内部貯留可能量が大きくなり、ピーク排 水量が小さく、ピーク到達時間が長くなる。このため、最終処分場では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と結論付けられる。



図4.3.1 排水量の経時変化 (左上:市原0.1年試料,右上:市原10年試料,左下:仙台0.1年試料,右下:仙台10年試料)

表4.3.1と図4.3.2の累積排水量の経時変化から廃棄物の貯留特性について検討する。各試料のそれぞ れのケースを比較すると、市原19年試料が最も小さい。特にケース4の排水量が著しく少ないことから、 覆土の透水性が廃棄物地盤の貯留特性に大きく影響を与える可能性が示唆される。市原19年試料は、粒 状廃材主体の市原0.1年試料と繊維廃材主体の仙台0.1年、10年試料の中間的な組成であり、組成による 貯留特性への影響は明確に見られなかった。

仙台10年地盤を除き、各試料でケース2の累積排出量がケース1よりも大きいことから、覆土の有無が 排水量に影響を与える可能性が考えられる。仙台10年地盤は、ケース5の累積排水量が最も大きいことか ら、覆土の透水性が廃棄物層よりも低い。したがって、透水性の低い覆土層の設置が廃棄物地盤の貯留 特性に影響を与えると考えられる。ケース3については、市原0.1年試料を除きケース1よりも累積排水量 が小さい。この結果は、ケース2と同様に廃棄物層に比べて透水性の低い覆土が、廃棄物層に混合される ことで排水量を抑制している可能性が考えられる。ケース5とケース1を比較すると、試料ごとに結果が 異なり高密度で埋め立てた影響が明確に見られない。以上より埋立方法によって排水量に違いが見られ る。しかし、廃棄物のサイズや形状、組成が異なることによる浸透水の挙動、覆土の透水性が廃棄物地 盤の貯留特性に大きく影響を与えることから、埋立方法の影響を適切に評価していくためには、廃棄物 の材料特性や浸透水の水みちを考慮する必要性があると考えられる。



図4.3.2 累積排水量の経時変化 (左上:市原0.1年試料,右上:市原10年試料,左下:仙台0.1年試料,右下:仙台10年試料)

図4.3.3~4.3.6に、それぞれTOC、T-N、硫酸イオン、砒素の累積溶出量と液固比の関係を示す。液固 比とは、累積排水量をカラムに充填されている廃棄物試料の質量で除したものである。

ケース2について、試料によって例外はあるものの、ケース1と比べて下層に覆土を設置したケース2の ほうが、TOC、硫酸イオン等の排水中の汚濁物質と考えられる成分の濃度や累積溶出量が概ね小さい傾向 にある。この傾向から、廃棄物層に覆土を設置することで、覆土に汚濁物質が吸着し溶出量が抑制され ている可能性が考えられる。ケース3についても、仙台1年試料を除いては、概ねケース2と同様の汚濁物 質抑制効果がみられる。ケース5について、ケース1と比較すると汚濁物質の種類、試料のケースによっ て溶出量の大小は異なるが、密度相当分のTOC等の水質悪化がみられた。覆土の吸着効果をさらに詳細に 評価するため、浸透水の貯留等が覆土の吸着特性に及ぼす影響や、カラム構造の最適化について今後検 討を進める必要がある。

廃棄物試料により排水中の汚濁物質等濃度や累積溶出量の分布範囲は大きく異なる。仙台0.1年試料 では他の試料に比べて汚濁物質の累積排出量が大きい。仙台0.1年試料および仙台10年の組成は繊維廃 材主体の似た組成であるが累積排出量は異なる。したがって、汚濁物質の累積排出量には、組成だけで なく、廃棄物のサイズや形状、配置を考慮する必要があると考えられる。多様な因子が浸透水質に及ぼ す影響を把握するためには水質に直接影響を及ぼす廃棄物、及び貯留特性に影響し、間接的に水質にも 影響を及ぼす廃棄物それぞれの特性化が重要であり、データの更なる蓄積が求められる。



図4.3.3 液固比とTOCの累積溶出量の関係

(左上:市原0.1年試料,右上:市原10年試料,左下:仙台0.1年試料,右下:仙台10年試料)



図4.3.4 液固比とT-Nの累積溶出量の関係 (左上:市原0.1年試料,右上:市原10年試料,左下:仙台0.1年試料,右下:仙台10年試料)



図4.3.5 液固比と硫酸イオンの累積溶出量の関係 (左上:市原0.1年試料,右上:市原10年試料,左下:仙台0.1年試料,右下:仙台10年試料)



図4.3.6 液固比と砒素の累積溶出量の関係 (左上:市原0.1年試料,右上:市原10年試料,左下:仙台0.1年試料,右下:仙台10年試料)

また、10cm超のプラスチックを篩により除去したケースと、10cm超のプラスチックを破砕(裁断)して10cm以下にしたケースと比較した大型カラム実験(表4.3.3および図4.3.7)では、10cm超を除去したケース(2)ではEC、TOC、BODが無調整のケース(1)に比べ低下したが、裁断したケース(3)(プラスチックの混入重量は無調整試料と同じ)では、無調整試料とTOC等の値に差は認められなかった。したがって、TOC等はプラスチック等の量に依存しており、安定型処分場ではプラスチック等の混入量を減らすことが、浸透水のTOC等の値を下げることに結びつくと考えられる。

表4.3.3 大型カラム試験での10cm超のプラスチックを除去、及び破砕したケースとの比較

| | | | | 10cm超 | tit-yk | 24時間 | | | | | | |
|------|--------------|------|--------|-------|--------|------|-------|----------|-----------|--------|-----|--------|
| | ケース | 層厚 | 密度 | プラ | 时心 | 累積 | | 1か | 月後の打 | 非水のオ | <質 | |
| | | | | 重量比 | [커] 外口 | 排水量 | (mS/c | m) (mg/L | .) (mg/L) | (mg/L) | | (mg/L) |
| | | (cm) | (g/cm) | (%) | (分) | (L) | EC | TOC | BOD | T-N | рΗ | SS |
| 東北① | (1) 標準(無調整) | 57 | 1.2 | 13.7 | 30 | 7.9 | 4.8 | 110 | 36 | 9 | 7.9 | 180 |
| 1年堆積 | (2) 10cm篩下 | 57 | 1.1 | 11.4 | 22 | 10.8 | 4.5 | 97 | 30 | 9 | 7.6 | 53 |
| 試料 | (3)10cm以下に破砕 | 60 | 1.1 | 13.7 | 21 | 9.5 | 4.4 | 110 | 35 | 11 | 7.7 | 140 |



図4.3.7 10cm以上の粗大なプラスチックによる影響

(2) 中型カラム通水試験の結果

図4.3.8に、両ケースでの排水量の経時変化を示す。この結果から、繊維廃材含有率(F.C.)が高くな るほど排水量が多いことが分かる。前述の大型カラム試験においても、10 cm以上の粗大なプラスチック を除去することで排水性が高くなり、廃棄物層内に滞留する水分が減少することが示されている。中型 カラム試験では、5 cm×5 cm以下の比較的小さいプラスチックのみを混合したことから、保有水の貯留 に寄与するような効果は発現せずプラスチックが水みちのように排水を促進する効果が働いたと考えら れる。また、F.C.の高い地盤では、締固めが十分に行えず相対的に充填密度が小さくなったため、透水 性が高くなり、排水量が増加したことも影響として考えられる。 図4.3.9は、水分センサーと排水量に 基づいて求めた廃棄物層の含水率の変化であるが、図4.3.8と同様に、F.C.=10%のケースでは、廃棄物層 の含水率が試験機関を通して相対的に低く、直接測定した体積含水率は約10%ほどであった。水分センサ ーではセンサー周辺の局所的な含水状態のみを評価しうるが、排水量から間接的に求めた廃棄物層の体 積含水率も概ね20%であり、同様に低い。一方で、F.C.=2%のケースでは、時間の経過とともに体積含水 率は上昇しており、約190日経過した時点でも定常状態には至っておらず、散水した水分が廃棄物層内に 貯留されていることが分かる。



次に、浸出水の水質を、廃棄物下部に敷設したまさ土層の直下(a)と直上(b)で評価した結果を示す。 図4.3.10は浸出水のpHを液固比に対して示したものである。液固比(L/S ratio)は浸出水量を廃棄物 (固相)の質量で一般化した値で、廃棄物量に対してどれだけの量の水が流入し接触したかを表してい る。この結果から、まさ土層への流入前後でのpHの変化は小さいものの、まさ土層流入前の浸出水のpH は、通水初期においてまさ土層通過後よりも相対的に高く、まさ土による緩衝効果が確認できる。また、 繊維廃材含有率(F.C.)の違いによるpHの明確な差異は確認されない。排水量と廃棄物の体積含水率が 大きく異なっていたことを考慮すると、廃棄物層内の滞留時間が浸出水のpHに及ぼす影響は小さいこと が分かる。



図4.3.10 浸出水のpHの変化 (左)まさ土層流入前、(右)まさ土層通過後

図4.3.11に、電気伝導率(EC)の変化を示す。繊維廃材含有率(F.C.)が異なる2ケースでECの値は大 きく異なり、F.C.=2%のケースの方がF.C.=10%の場合よりECが高い値を示すことが分かる。これは、 F.C.=2%のケースの方が透水性が低く浸透水が廃棄物層内に滞留する時間(トラベルタイム)が長いため、 廃棄物由来の溶解性成分が溶出したためであると考えられる。一方で、まさ土通過後のECはF.C.の値に よらず同程度であり、まさ土層が溶解性イオンを捕捉したことが分かる。



図4.3.11 浸出水のECの変化 (左)まさ土層流入前、(右)まさ土層通過後

図4.3.12に、全有機炭素(TOC)の累積量を、液固比に対する変化として示す。TOCは廃棄物内に含ま れる有機物量の指標であるが、得られた値は極めて小さく、TOCの観点からは水質汚濁の懸念は小さいと 言える。また、他の指標と同様に、F.C.=2%のケースの方が相対的に値が高いことが分かるが、廃棄物層 内でのトラベルタイムの差異に加え、土等の有機物を多く保有する廃棄物が相対的に多くなったためで あると言える。また、同じ液固比で判断すれば、まさ土層によるTOCの低減効果が確認できる。



図4.3.12 浸出水のTOCの変化 (左)まさ土層流入前、(右)まさ土層通過後

図4.3.13に、ヒ素溶出濃度を液固比との関係で示す。繊維廃材含有率(F.C.)が2%のケースでは、10% のケースよりヒ素溶出濃度が高く、特にF.C.=2%のケースでは環境基準を大きく超過する値を示すこと が分かる。このことは、他の指標と同様に浸透水のトラベルタイムの増大に伴って水溶性成分が多く溶 出したためであると考えられる。岩石や土壌に対して行ったカラム試験と同様に、ヒ素は通水初期に比 較的高濃度で溶出し、その後は溶出濃度が低下することが分かる。また、まさ土層はヒ素濃度の低下に も寄与しうることがこの結果からも分かる。



図4.3.13 浸出水のAs溶出濃度の変化 (左)まさ土層流入前、(右)まさ土層通過後

以上のカラム試験の結果から、以下のことが明らかになった。

- 1) 混入しているプラスチックの大きさが廃棄物層の浸透特性と浸透水の水質の大きく影響を及ぼす。
- 小サイズのプラスチックのみが混入した地盤では、プラスチックは水みちとして働き、廃棄物層の 透水性を高めうる。
- 3) 浸出水の化学的指標は、浸出水のトラベルタイムの影響を受けやすく、滞留時間が長いほど各値が 大きくなる。
- 4) 廃棄物下部に敷設したまさ土層は、浸出水中の化学物質を吸着する効果が期待でき、進出水の水質 改善につながる。

研究目標達成度: カラム通水試験は当初計画以上に進捗し、環境安全性を考慮した合理的な埋立方法 と浸出水集排水設備の設計法を提案できていることから、当初目標以上に達成できた。

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

カラム試験の結果から、混入しているプラスチックの大きさが廃棄物層の浸透特性と浸透水の水質に 影響し、10cm以上のプラスチックの存在が有意な差をもたらすこと、小サイズのプラスチックのみが混 入した地盤では、プラスチックは水みちとして働き、廃棄物層の透水性を高めうること、浸出水の化学 的指標は、浸出水のトラベルタイムの影響を受けやすく、滞留時間が長いほど各値が大きくなること等 を明らかにした。さらに、廃棄物下部にまさ土層を敷設することで、浸出水中の化学物質を吸着する効 果が期待でき、進出水の水質改善につながることを示し、これまで十分な知見が得られていなかった埋 立方法と水質との関係を初めて定量的に示した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

処分基準に示された廃プラスチックを15cm以下にすることを遵守することで、廃棄物層内での浸透水の滞留を防ぐことができ、延いては浸出水の水質悪化を防止するためにもに有効である。

一定高さごとに覆土層を設けることは浸透水の水質保全のためにも有効であると言える。さらに水質 改善効果を期待するためには、吸着能が高く、かつ締固め等の施工性にも優れた地盤材料を選定するこ とが望ましい。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

 山脇 敦・土居洋一・川嵜幹生・大嶺 聖:廃棄物資源循環学会論文誌, Vol. 29, pp. 139-151 (2018)

プラスチック等が混入した廃棄物層の水の流出応答と沈下

<その他誌上発表(査読なし)>

山脇 敦:産廃振興財団NEWS, Vol. 26, No. 92, pp. 14-17 (2018)
 プラスチック等が混入した廃棄物地盤中の水の挙動に関する研究(研究結果報告)

(2) 口頭発表(学会等)

特に記載すべき事項はない。

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

1) T.G. Townsend, J. Powell, P. Jain, Q. Xu, T. Tolaymat, D. Reinhart (2015): Sustainable Practices for Landfill Design and Operation, Springer, 472p.

Ⅱ-4 廃棄物層の力学特性評価と現場試験に関する研究

| 産業廃棄物処理事業振興財団 | 山脇 | 敦 | |
|---------------|----|------|----|
| 京都大学大学院地球環境学堂 | 勝見 | 武・高井 | 敦史 |
| 長崎大学工学部 | 大嶺 | 聖 | |
| 長野県短期大学 | 土居 | 洋一 | |
| 前田建設工業(株) | 坂口 | 伸也 | |

平成29年~令和元年度研究経費(累計額):16,820千円(研究経費は間接経費を含む) (平成29年度:5,072千円、平成30年度:5,287千円、令和元年度:6,461千円)

[要旨]

安全かつ長寿命な安定型最終処分場の整備のためには、安定型処分場における廃棄物地盤の強度特性 を適切に把握する必要がある。一方で、原位置一面せん断試験のような力学試験は正確に強度定数を算 出しうるものの、施工性や経済性の観点から十分に高い汎用性があるとは言い難く、作業性も考慮しつ つ精度良く現場の特性を評価・予測しうる試験法を確立する必要がある。そこで本サブテーマでは、現 場における廃棄物組成や空隙率等の各種試験を行い、強度特性に及ぼす影響要因を評価するとともに、 簡易強度評価手法としての適用性を検討した。その結果、埋立を高密度化し埋立量を増加させ、適度な 地盤の固さと十分な斜面安定性を得るには、廃プラスチック等のサイズを小さくし(処分基準に示され た廃プラスチックを15 cm以下にすることの遵守等)、プラスチック等やがれき類、ガラス・陶磁器等の 形状、サイズの異なる廃棄物を適度に混合することで粒度幅を大きくして埋め立てることが有効になる ことを示した。

[キーワード]

現場試験、安息角、空隙率、衝撃加速度、組成分析

1. はじめに

安定型廃棄物処分場における廃棄物地盤の強度特性や力学特性については十分な知見が得られておら ず、現在は廃棄物の強度特性を土と同程度とみなして処分場が設計されている。そのため、現行の廃棄 物埋立高や土えん堤(廃棄物の流出を防ぐための盛土)設計等については、道路土工等に根拠を置いた 一般廃棄物及び管理型産業廃棄物最終処分場の設計に準拠している処分場が大半である¹¹が、プラスチ ック等を含む廃棄物地盤の斜面安定性は大きいことが先行研究により知られており²¹³¹⁴、現在の設計は 強度の観点では保守的であると言える。そのため、安定型廃棄物処分場における廃棄物地盤の諸特性に ついて現場データの蓄積が急務であると言えるが、サブテーマ2で実施したような原位置一面せん断試 験は、時間と労力を要することに加え、限られた寸法の供試体では種々の廃棄物が混在する不均質な廃 棄物地盤の特性を必ずしも精度良く評価しているとは言い難いという課題があり、対象試料の代表性を 担保しつつ簡便で迅速に実施可能な強度評価手法の確立が必要である。簡便な強度評価手法が確立でき れば、オンサイトで迅速に廃棄物地盤の現場特性を評価できるため、多地点で試験実施が可能になり、 現場データの蓄積と、それに伴う合理的な設計の加速化が期待できる。

2. 研究開発目的

上記の背景を受け、本サブテーマでは国内の安定型廃棄物処分場を対象とし、廃棄物地盤の特性化を 行うことを目的としている。処分場の埋立断面の概略設計時等には、高額な試験費用を要しない簡易な 現場試験を行ってまず概略的な評価を行うことが合理的である。既往の研究結果から、以下の現場試験 法は有効性が確認されている。

1) 衝撃加速度試験(キャスポル⁵⁾⁶⁾)

キャスポルにより得られるインパクト値(I_a)は、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。

2) 安息角試験

安息角試験による停止安息角(a)は、廃棄物地盤の安定勾配の目安となるとともに、地盤のせん断 強度を評価するための内部摩擦角(φ)と相関がある。

3) 現場空隙率試験

廃棄物地盤中の空隙率は、地盤の締固め状況の目安になるものであるが、将来の地盤沈下状況を 推測するためにも役立つ。

本サブテーマでは、これらの現場試験法を実際の廃棄物地盤に適用し、各種試験法の利用可能性を検討するとともに、パラメータ変動の要因分析を行った。

3. 研究開発方法

試験は、表3.1.1に示した国内の安定型最終処分場9現場にて、埋立年数の異なる同一処分場内の複数の地点にて現場試験を行い、計21地点を対象として実施した。いくつかの対象現場の外観を写真3.4.1に示す。



写真3.4.1 対象現場の例 (左上:関東①0年経過,右上:関東①19年経過,左下:東北①1年経過,右下:東北①10年経過)

(1) キャスポルを用いた衝撃加速度試験

簡易に廃棄物地盤の強度定数を推定するために、運搬が容易で試験が簡単な衝撃加速度試験法を適用 することが可能である。衝撃加速度試験法とは、加速度計を内蔵したランマー(重錘)を一定の高さか ら地盤上に自由落下させ、そのランマーが地盤に衝突する際に得られる衝撃加速度の最大値を地盤反力 係数などと相関させる方法である。キャスポル測定器は、簡易支持力測定器で、軽量で持ち運びに便利 で取り扱いやすく、反力を必要とせず、現場で即時に結果が判明する機械を求めるニーズに答え、「衝 撃加速度法」に着目して開発されたものである。キャスポル測定器は簡易な測定器であり、衝撃加速度 と地盤定数との相関関係を利用して、CBR、粘着力(c)、内部摩擦角(ϕ)、コーン指数(q_c)、道路の平板載 荷試験から得られる地盤反力係数(K_{30})等の測定を目的とするものである。

キャスポル(簡易支持力測定器)は、本体部(落下試験の装置部分)と表示部(結果を表示する機械 部分)から構成されている。直径50 mm、質量4.5 kgのランマー(重錘)を高さ45 cmから自由落下させ、 ランマーに内臓の加速度計で衝撃加速度を測定し、その最大値を検出して結果をインパクト値(*I*a)に換 算して表示する。また、そのインパクト値から関係式を用いて求めたCBR値等も測定器に表示することが できる。図3.4.1にキャスポル測定器を示す。試験器が軽量で持ち運びに便利で取り扱いやすく、測定時 に固定する必要がなく、現場で即時に結果が判明する機械を求めるニーズに応え、衝撃加速度法に着目 して開発された。現状では廃棄物地盤において簡易に強度定数を評価する手法が無いという背景のもと ¹⁷⁾、キャスポルにより得られるインパクト値と一面せん断試験により得られる粘着力との相関を利用し てキャスポルを用いて衝撃加速度と地盤定数との相関関係を利用した簡易強度評価を検討している。廃 棄物地盤における相関を評価するために、国内の廃棄物地盤18箇所で一面せん断試験による粘着力とそ の近傍でキャスポルを用いて測定したインパクト値(*I*a)を測定し、両者の関係から得られた式が式(3) である⁷。

$$c = 2.8I_a - 9.5$$
 (3)

ここで、c: 粘着力(kN/m^2)、 $I_a:$ キャスポルによるインパクト値である。 1地点あたり20 cm程度の間隔で5回測定した。



図3.4.1 キャスポルを用いた衝撃加速度試験

(2) 安息角試験

粉末を対象にした安息角試験の例は多く報告されているが、土質分野や廃棄物を対象にした安息角試 験の基準は存在しない。安息角を土質工学では、「砂や礫などの粘着力のない土の斜面がまきこぼし状 態で安定を保ち得る最も急な傾斜角」としており、「上方から落下させたときにできる円錐の山の斜面 角度」を表すものである。従来の研究⁸⁾で、安息角には限界安息角(critical angle of repose: *a*_c)と 停止安息角(repose angle after avalanching: *a*_r)の二つがあり、図3.4.2のように、限界安息角は、 砂や礫などの粒状体から成る斜面が静止しうる最大の角度を、また、限界安息角を越える斜面では崩れ が発生するが、その崩れが停止した時の斜面角を停止安息角と呼んでいる⁷⁾。そのため、簡易強度評価手 法として安息角試験を検討するため、各現場で安息角試験を実施した。

写真3.4.2に示すように、まず、試験直前にバックホウにて覆土を掘削し、廃棄物の含水比が変化しないうちにバックホウのバケットにより廃棄物を撒きこぼし、山を形成した。撒きこぼす際には、落下高さを同一(1.0~2.0m程度)とし、廃棄物を常に山の頂上から同程度距離を持った高さから垂直に、かつ塊で落下しないようできるだけゆっくり落下させた。バケット手前側の4杯目以降の勾配で最大の斜面角を限界安息角、最小の斜面角を停止安息角として決定した。



図3.4.2 安息角試験のモデル図(上:限界安息角,下:停止安息角)⁷⁾



写真 3.4.2 安息角試験の様子

(3) 空隙率試験

現場空隙率試験は、地盤中の空気間隙率(空隙率)を現場で調べるものである⁹⁾。空隙率は埋立後に時 間経過とともに一定の関係で減少し、それに伴い各強度定数も増加することが知られており、強度に影 響する重要な因子と考えられる。

図3.4.3に、空隙率試験の概略図を示す。廃棄物地盤上で廃棄物を掘削し、掘削容積(V)を測定した。 写真掘削容積は水置換法(JGS 1612-2003)で求めた。すなわち、写真3.4.3のように掘削部分にビニー ルシートを設置し、地表面と同じ高さになるよう注水した水量から体積を逆算して求めた。掘削した廃 棄物の全量を、容積を計量できる水を入れた容器に投入し、棒等で攪拌し試料中の空気を抜く。廃棄物 投入前後の水位の増分を計測し、容積の増分(ΔV)を計算した。この容量の増分が廃棄物の実容積に相当 する。現場空隙率(n)を以下の式4により求めた。

$$n = \frac{V - \Delta V}{V} \tag{4}$$



図3.4.3 現場空隙率試験のイメージ図



写真3.4.3 水置換と空隙率測定の実施状況

(4) 組成分析

廃棄物の組成は、堆積廃棄物層の強度特性を左右する重要な因子であると考えられる。本研究では、 安息角試験後の山状に積まれた廃棄物から採取した試料を用いた。含水比の変化を抑えるため、安息角 試験及び組成分析は掘削後速やかに行い、強度特性把握に資する有益なデータを得るため、以下の8品目 に選別した。

(1) プラスチック類(2) その他繊維(3) ガラス・陶器(4) 礫

(5) ゴム(6) 金属(7) その他(8) 20 mm篩い下。

写真3.4.4に組成分析の一例を示す。なお、20mm篩い下の大部分は土砂分である。選別後、それぞれの 質量を測定した後に質量百分率を算出した。東北①、関東②では、100 mm篩で篩い分けを行なっている が、廃棄物層の粘着力等の強度パラメータには20mm篩い下の土分が影響を及ぼすと考えられるため、20mm 篩を用いた組成分析に変更している。上記の8品目の小分類から、形状や材質を考慮し4つに区分した組 成を大分類とする。具体的には、(1)(2)を一括して繊維廃材、(3)(4)を一括して粒状廃材、(5) (6)(7)を一括してその他廃材とグルーピングした。上記の3つの廃材と20mm篩い下の4つが大分類で ある。



写真3.4.4 組成分析の一例

4. 結果及び考察

各種現場試験の結果の一覧を、表4.4.1に示す。

| | 安宁刑 | | | | 廃棄物 | 組成 | | 100mm | 超混入率 | 現場會 | 現場密度·空隙試験 | | キャスポル | 安息角 | 有試験 | 一面せ | ん断試験 |
|----------------|-----------------|----------|------------|------------|----------------------|------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------|-------|----------|-----------|-------------|-------|------------|
| 区分 | 安定空 処分場 名 | 調査 年月 | 埋立後 経過年 | プラス チック | ガラス・陶 磁器、が れき類 | 金属、 その他 | 土砂分 /20mm 篩下 | 100mm 超物 混入率 | 100mm超 プラ 混入率 | 湿潤 密度 | 含水比 | 空隙率 | Ia | 限界 安息角 | 停止 安息角 | φ | с |
| | | | (年) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (g/cm ³) | (%) | (%) | | (°) | (°) | (°) | (kN/m^2) |
| | まれつ | 2018/ 8 | 0.0 | | | | | 6.2 | 2.6 | 0.9 | 12 | 46 | 5.3 | 43 | 38 | 32 | 4 |
| | | 2017/ 8 | 1.0 | 5 | 19 | 10 | 66 | | | 1.4 | 38 | 25 | 13.3 | 38 | 32 | 51 | 10 |
| | ӝҵ⊕ | 2014/12 | 3.8 | | | | | | | 1.4 | 42 | 16 | 15.8 | 51 | 41 | 41 | 22 |
| | | 2017/ 8 | 10.0 | 17 | 15 | 18 | 50 | | | 1.9 | 19 | | · 10.7 | 42 | 40 | 51 | 11 |
| | 申そう | 2019/6 | 4.5 | 22 | 24 | 7 | 47 | 20.7 | 13.2 | 1.3 | 32 | 31 | 6.4 | 47 | 42 | 28 | 17 |
| | 朱北区 | 2019/6 | 4.5 | | | | | 8.0 | 5.6 | 1.2 | 35 | 30 | 8.8 | 46 | 40 | | |
| | | 2017/ 8 | 0.0 | 5 | 26 | 6 | 63 | | | 1.5 | 24 | | · 10.1 | 37 | 36 | 27 | 13 |
| | 朋本① | 2015/4 | 0.1 | 7 | 44 | 6 | 43 | | | 1.5 | 10 | 37 | 7.7 | 42 | 36 | 41 | 24 |
| 100mm ≠∞−≁= | 闲 米① | 2015/4 | 15.0 | 6 | 18 | 10 | 66 | | | 1.6 | 28 | 21 | 7.6 | 46 | 40 | 35 | 24 |
| 超ノノ 多 | | 2017/ 8 | 19.0 | 6 | 9 | 7 | 78 | | | 1.5 | 30 | 10 | 5.7 | 43 | 40 | 23 | 19 |
| | 関東② | 2019/10 | 10.0 | 25 | 7 | 5 | 63 | 12.5 | 8.1 | 1.4 | 26 | 26 | 6.1 | 47 | 38 | 53 | 11 |
| | 中部① | 2013/11 | 0.0 | 14 | 25 | 4 | 57 | | | 1.2 | 21 | 41 | 3.7 | 51 | 40 | | |
| | | 2013/ 8 | 0.9 | 14 | 25 | 4 | 57 | | | 1.2 | 23 | 29 | 6.1 | 49 | 44 | 59 | 2 |
| | | 2014/ 8 | 1.8 | 14 | 25 | 4 | 57 | | | 1.4 | 29 | 22 | 7.2 | 46 | 40 | 36 | 8 |
| | | 2013/11 | 8.0 | 14 | 25 | 4 | 57 | | | 1.6 | 19 | 14 | 9.7 | 56 | 44 | 36 | 18 |
| | | 2013/11 | 15.0 | 17 | 28 | 12 | 43 | | | 1.5 | 23 | 17 | 7.3 | 51 | 43 | 38 | 5 |
| | 中国① | 2015/8 | 0.3 | 6 | 30 | 5 | 59 | | | 1.1 | 25 | 39 | 8.3 | 46 | 38 | 27 | 11 |
| | 中国② | 2019/11 | 0.4 | 47 | 10 | 29 | 14 | 52.0 | 25.3 | 0.8 | 20 | 47 | 5.1 | 39 | 35 | 31 | 8 |
| | 平 均 | | 5.2 | 15 | 22 | 9 | 55 | 19.9 | 11.0 | 1.4 | 25 | 28 | 8.1 | 46 | 39 | 38 | 13 |
| | 範囲 | | | | | | | | | 0.9-1.9 | 10-42 | 10-47 | 3.7-15.8 | 37-56 | 32-44 | 27-59 | 2-24 |
| | | 2018/ 2 | 0.3 | 1 | 22 | 3 | 74 | 5.8 | | 1.8 | 23 | 17 | 23.8 | 36 | 34 | | |
| 100 | 間声② | 2018/ 8 | 0.3 | | | | | 3.2 | 0.2 | 1.7 | 22 | 15 | 14.5 | 41 | 36 | 61 | 17 |
| TOOmm 超プラ | 国本し | 2018/ 8 | 0.3 | | | | | 6.2 | 0.4 | 1.6 | 30 | 14 | 21.1 | 39 | 35 | | |
| 無し~ | | 2018/ 2 | 2.0 | 0 | 21 | 3 | 76 | 4.1 | | 1.5 | 17 | 16 | 18.1 | 37 | 34 | 55 | 38 |
| ッ (がれ | 北陸 | 2018/12 | 0.8 | 0 | 19 | 0 | 81 | 0.0 | 0.0 | | | | 9.8 | 38 | 36 | | |
| き等主 体) | | 2019/ 2 | 0.0 | 1 | 54 | 1 | 44 | 16.3 | 0.0 | 1.5 | 20 | 29 | 6.2 | 40 | 34 | | |
| 1117 | 中国③ | 2019/ 2 | 0.1 | 5 | 81 | 2 | 12 | 17.7 | 1.6 | | | | 9.2 | 40 | 36 | | |
| | | 2019/ 2 | 10.0 | 0 | 35 | 1 | 64 | 1.2 | 0.0 | 1.9 | 15 | 19 | 10.4 | 34 | 31 | 53 | 28 |
| | 平 均 | | 1.7 | 1 | 39 | 2 | 59 | 6.8 | 0.4 | 1.7 | 21 | 18 | 14.1 | 38 | 35 | 56 | 28 |
| | 範囲 | | | | | | | | | 1.5-1.9 | 17-30 | 14-29 | 6.2-23.8 | 34-41 | 31-36 | 53-61 | 17-38 |
| 全 平 | 均 | | | | | | | | | 1.4 | 24 | 25 | 9.9 | 43 | 38 | 41 | 15 |
| 全範 | 囲 | | | | | | | | | 0.9-1.9 | 10-42 | 10-47 | 3.7-23.8 | 34-56 | 31-44 | 27-61 | 2-38 |

表4.4.1 現場試験の結果一覧

注1) 「----」は、試験未実施。

注2) 強度試験は、全て、表層覆土を除去して、廃棄物露呈面の表層で行ったものである。このため、地盤内部では、上表の値よりも密度が大き く、空隙率が小さくなり、粘着力が増加しているものと想定される。

(1) 衝撃加速度試験の結果と解釈

本来キャスポルは、一般的な盛土工事等の施工管理等に用いるものであり、多くの測定結果をもとに インパクト値から相関関係式を用いて各種の値が算出できるようになっている。ただし、キャスポルで 精度よく測定できる土質の範囲として、最大粒径が37.5mm以下、10mm以上の礫を30%以上含まない土質材 料とされる。安定型処分場のうち、がれき等が主体でプラスチックを基本的に受け入れていない処分場 であれば、この条件の範囲内にある可能性があり、その場合は前述の相関関係式により地盤の粘着力等 を推定できる。

一方で、10cm超のプラスチックが混入する地盤の場合は条件に合致しないため、キャスポルが有する

相関関係式による推定はできない。このため、10cm以上のプラスチックが混入する地盤に対象を絞って (表4.4.1に示す安定型処分場16地点、及び不法投棄現場4地点での値⁶⁾)、インパクト値*I*_aと粘着力*c*を プロットしたのが図4.4.1である。以下の式5ように、インパクト値*I*_aと粘着力*c*の間には相関があり、10 cm以上のプラスチックが混入する地盤において、キャスポルを粘着力の概略値を推定するために使用す ることが可能である。

$$c = 1.7I_a - 0.98$$
 (5)

ここで、c;粘着力(kN/m^2)、 I_a ;キャスポルによるインパクト値である。



図4.4.1 インパクト値(Ia)と粘着力(c)の関係

(10cm以上のプラスチックが混入した安定型処分場16地点と不法投棄現場4地点での試験結果)

プラスチック等の平面状物(2次元物)や繊維等の線状物(1次元物)の混入割合が増えると、インパクト値I_aは減少し、停止安息角は増加することや、ガラス陶磁器やがれき等の塊状物(3次元物)の混入割合が増えると、インパクト値I_aは増加し、停止安息角は減少することが、図4.4.2に示す結果から明らかとなった。したがって、埋立廃棄物中にプラスチック等の平面状物や線状物の割合が高くなると埋立地盤は柔軟で斜面安定性の高い地盤が形成され、がれき等の塊状物の割合が高くなると埋立地盤は固い地盤が形成される。



図4.4.2 廃棄物組成とインパクト値(Ia)の関係(関東①処分場内14箇所での試験結果)

(2) 安息角試験の結果と解釈

安息角試験で得られた停止安息角は、基本的に廃棄物斜面の安定勾配とみることができる。現場では、 長期間安定することが必要であり、この停止安息角を斜面安定性の指標として用いることが良い。表 4.4.2に安息角試験の結果を示す。この結果より、停止安息角は最大で44°から最小で31°の範囲であり、 限界安息角は最大で56°から最小で34°の範囲にあることが分かる。

| | 地点名 | 停止安息角(°) | 限界安息角(°) | | | |
|---------|-----|----------|----------|--|--|--|
| | L1 | 32 | 38 | | | |
| 東北① | L2 | 40 | 42 | | | |
| | L3 | 38 | 43 | | | |
| 東北2 | L4 | 42 | 47 | | | |
| 明古① | L5 | 40 | 43 | | | |
| | L6 | 36 | 37 | | | |
| | L7 | 34 | 37 | | | |
| 明古の | L8 | 34 | 36 | | | |
| | L9 | 36 | 41 | | | |
| | L10 | 35 | 39 | | | |
| 関東③ | L11 | 38 | 47 | | | |
| 明古众 | L12 | 36 | 42 | | | |
|) 用 (4) | L13 | 40 | 46 | | | |
| | L14 | 40 | 51 | | | |
| | L15 | 44 | 49 | | | |
| 中部 | L16 | 40 | 46 | | | |
| | L17 | 44 | 56 | | | |
| | L18 | 43 | 51 | | | |
| 山戸① | L19 | 31 | 34 | | | |
| TEU | L20 | 34 | 40 | | | |
| 中国2 | L21 | 35 | 39 | | | |
| 平 | 均 | 38 | 43 | | | |

表4.4.2 安息角試験の結果一覧

図4.4.3に限界安息角と停止安息角の関係を示す。この結果より、限界安息角と停止安息角の間には高い正の相関関係(R² ≥ 0.8)が見られる。これより、安定型廃棄物処分場では各処分場(各地点)ごとに 廃棄物の組成・形状・材質等、様々なバラつきの要因が存在するが、限界安息角と停止安息角の関係に はそれらの要因はほとんど影響せず、正の相関関係を持つことがわかる。



図4.4.3 停止安息角と限界安息角の関係
また、図4.4.4に安息角と繊維廃材含有率の関係を示す。この結果より、繊維廃材含有率の増加に伴い 停止安息角および限界安息角も増加する傾向にあることがわかる。粒状材料を多く含む廃棄物試料では、 主に廃棄物の摩擦抵抗と粘着力が斜面の形成に寄与しているが、繊維廃材を多く含む廃棄物試料では、 摩擦抵抗と粘着力に加えて引張抵抗が斜面の形成に寄与するため、急斜面の形成が可能となると考えら れる。



図4.4.4 繊維廃材含有率と安息角の関係

10cm以上のプラスチックが混入する地盤(表4.4.1に示す安定型処分場16地点、及び不法投棄現場4地 点での値⁹⁾での安息角試験による停止安息角と一面せん断試験による内部摩擦角をプロットしたのが図 4.4.5である。粘着力*c*が*c* < 10 kN/m²の地点(長尺のプラスチックの混入が多い柔らかい地盤)では、 以下の式6の関係が経験的に見出せることが分かった。このような場合には、安息角試験を内部摩擦角の 概略値を推定するために使用することが可能である。

$$\phi = 1.3\alpha_r - 13 \tag{6}$$

ただし、算定結果が $\phi > \alpha_r$ のときは $\phi = \alpha$ とすると安全側の評価となる。



図4.4.5 停止安息角と内部摩擦角(φ)

(100mm超のプラスチックが混入した安定型処分場16地点と不法投棄現場4地点での試験結果)

引張抵抗は、式7の無限長斜面法による粘着力を無視したときの斜面安定計算式⁹で、ζ(引張抵抗角) として表される。

$$Fs = \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} + \frac{\tan \zeta \cdot \sin(1.5\theta)}{\sin \theta \cdot \cos \theta}$$
(7)

ここに、*Fs*:安全率、 ϕ :内部摩擦角(°)、 θ :斜面勾配(°)、 ζ ;引張抵抗角(°)である。 ここで、式7で斜面勾配(θ)が限界安息角(α_c)のときに引張抵抗が働いて*Fs* = 1.0とし、斜面勾配(θ) が停止安息角(α_r)のときに引張抵抗が働かずに(式7右辺第2項 = 0)、*Fs* = 1.0とすると、この2つの関 係から式8が得られ、引張抵抗角(ζ)を概算することができる。

$$\tan \zeta = \frac{\sin \alpha_{c} \cos \alpha_{c}}{\sin(1.5\alpha_{c})} \left(1 - \frac{\tan \alpha_{r}}{\tan \alpha_{c}} \right)$$
(8)

式8に、表4.4.1に示した10cm以上のプラスチックが多い地点の平均値の限界安息角 α_c =46°、停止安息角 α_r =38°を代入すると、引張抵抗角 ζ =7°となる。この値は、緩く堆積したときの引張抵抗と考えられるため、10cm以上のプラスチックが混入する地盤ではこの程度の値を安定計算で考慮して概略評価することもできる。

(3) 空隙率試験の結果と他の物理的指標との関係

本試験による廃棄物層の諸物性値を表4.4.3に示す。

| | 地点名 | 埋立年数(年) | 空隙率(%) | 含水比(%) | 湿潤密度(g/cm³) | 乾燥密度(g/cm³) |
|--|-----|---------|--------|--------|-------------|-------------|
| | L1 | 1 | 25.2 | 37.6 | 1.42 | 1.03 |
| 東北① 東北② 関東① 関東③ 関東④ 中部 中国① 中国② | L2 | 10 | - | 18.5 | 1.94 | 1.64 |
| | L3 | 0 | 45.6 | 11.8 | 0.89 | 0.80 |
| 東北② | L4 | 4.5 | 31 | 32.4 | 1.28 | 0.97 |
| 明古① | L5 | 19 | 9.5 | 30 | 1.54 | 1.18 |
| | L6 | 0 | - | 24.2 | 1.53 | 1.23 |
| | L7 | 2 | 15.7 | 16.9 | 1.54 | 1.32 |
| 明古の | L8 | 0.3 | 16.5 | 23.4 | 1.79 | 1.45 |
| 地 東北① 東北② 東北② 関東① 関東② 関東③ 関東④ 関東④ 日 中部 日 中国① 日 中国② 平均 | L9 | 0.3 | 15.1 | 22.4 | 1.7 | 1.39 |
| | L10 | 0.3 | 14.3 | 30 | 1.58 | 1.22 |
| 関東③ | L11 | 10 | 25.6 | 25.5 | 1.38 | 1.10 |
| 問志の | L12 | 0.1 | 37 | 10 | 1.5 | 1.36 |
| | L13 | 15 | 21 | 28 | 1.6 | 1.25 |
| | L14 | 0 | 41 | 21 | 1.2 | 0.99 |
| | L15 | 0.9 | 29 | 23 | 1.2 | 0.98 |
| 中部 | L16 | 1.8 | 22 | 29 | 1.4 | 1.09 |
| 東北② 関東① 関東② 関東③ 関東④ 中部 中国① 中国② | L17 | 8 | 14 | 19 | 1.6 | 1.34 |
| | L18 | 15 | 17 | 23 | 1.5 | 1.22 |
| 中国① | L19 | 10 | 18.8 | 14.9 | 1.95 | 1.70 |
| TEU | L20 | 0 | 28.7 | 19.8 | 1.54 | 1.29 |
| 中国2 | L21 | 0.4 | 46.6 | 20.1 | 0.75 | 0.62 |
| 平均 | | - | 24.9 | 22.9 | 1.47 | 1.20 |

表4.4.3 廃棄物層における諸物性値

空隙率については、最大で46.6%、最小で9.5%とデータのバラつきが見られる。これは、表4.4.1で示したように、各地点の廃棄物組成が様々であり、かつ廃棄物のサイズ・形状・材質等も多様であったことが原因と考えられ、廃棄物地盤の不均質性がよく反映している。

図4.4.6に異なる区画等での堆積年数別のデータが得られている5つの安定型処分場での堆積経過時間と本試験法による空隙率の関係を示す。各処分場とも空隙率は埋立後に時間経過とともに減少し、と

くに、100mm超のプラスチックが混入している処分場では空隙率の埋立初期での変化が大きい。これは、 長尺のプラスチックが混入している処分場では埋立初期の沈下が激しいことを表しており、処分場設計 等の際に沈下量を推定する際の参考にするとよい。



図4.4.7および図4.4.8に空隙率と埋立後経過年数および繊維廃材含有率の関係を示す。空隙率のデー タにバラツキは見られるものの、図4.4.7より、埋立後経過年数が大きくなるに伴い空隙率は小さくなる 傾向が見られる。これは降雨や上載荷重等による密実化が進むため時間の経過とともに空隙率が低下す るからであると考えられる。上載荷重および降雨の影響が顕著に表れる地盤とそうでない地盤では異な る挙動を示す可能性が示唆されることから、埋立後5年以前と5年以上経過地盤に分類して結果の整理を 行う。図4.4.8より、埋立後5年未満および埋立後5年以上経過地盤の両方において、廃棄物層に含まれる 繊維廃材含有率の増加に伴い空隙率が増加する傾向にある。これは、繊維廃材を多く含む廃棄物地盤で は転圧後の繊維廃材のリバウンドによって転圧効果があまり見られないためであると考えられる。

安定型処分場11か所での試験結果から、埋立物の10cm超物の混入が多くなると、空隙率が高くなる結果が得られている(図4.4.9)。したがって、埋立量を増やす(埋立層の空隙を減らし密度を高める)ためには、廃プラスチック等の埋立廃棄物のサイズを小さくする必要があることが分かる。



図4.4.7 空隙率と埋立後経過年数の関係



図4.4.8 空隙率と繊維廃材含有率の関係



図4.4.9 10cm超物の混入率と空隙率の関係(11箇所での試験結果)

図4.4.10に乾燥密度と繊維廃材含有率の埋立後経過年数別の関係を示す。乾燥密度の値にバラツキは 見られるが、図4.4.10より、繊維廃材含有率の増加に伴い乾燥密度は減少する傾向にあることがわかる。 また、埋立後5年未満の地盤に比べ、埋立後5年以上経過の乾燥密度は大きい傾向にある。これは、上述 のように、繊維廃材含有率を多く含む地盤では転圧や上載荷重による密実化が進まないためであると考 えられる。また、廃棄物固体密度の小さい繊維廃材の増加によって、相対的に密度が減少した可能性も 考えられる。

図4.4.11に示す乾燥密度と空隙率の関係より、埋立後経過年数にかかわらず、空隙率の増加に伴い乾 燥密度は減少する傾向にあることがわかる。これより、廃棄物層における乾燥密度への影響要因は、廃 棄物の固体密度の大小だけでなく、地盤内空隙率の大小であることもわかる。



図4.4.10 乾燥密度と繊維廃材含有率の関係



図4.4.11 乾燥密度と空隙率の関係

図4.4.12に含水比と繊維廃材含有率の関係を示す。含水比と繊維廃材含有率の関係はバラつきが大き く、明確な相関は見られない。廃棄物層内の含水比は試験を実施する前の天候に大きく依存すると考え られるが、現場試験では試験前の天候の条件を統一することは困難であるため、結果のバラつきが生じ たと考えられる。しかしながら、山脇ら²⁵⁾はプラスチック等が混入した廃棄物地盤では、流下する水の 一部はプラスチック等の凹部に溜まりながら流下し、貯留された水はゆっくりと流下するとしている。 つまり、繊維廃材含有率の増加に伴い含水比は大きくなる可能性が示唆される。



図4.4.12 含水比と繊維廃材含有率の関係

(4) 廃棄物層の固体密度

現場試験により得られた諸物性値から廃棄物層における廃棄物の固体密度 ρ_F を式8を用いて算出した。 また、繊維廃材、粒状廃材および20 mm篩い下のそれぞれの固体密度 (ρ_f 、 ρ_g 、 ρ_s) の範囲を仮定し、仮 定値を用いて算出した廃棄物の固体密度 ρ_c (式9参照)と現場試験結果から求めた廃棄物の固体密度 ρ_F を 比較することにより、仮定値の妥当性を評価するとともにそれぞれの廃棄物の固体密度 (ρ_f 、 ρ_g 、 ρ_s) の範囲を決定した。 ρ_c は、仮定値の最大値と最小値を用いて算出した $\rho_{c,max}$ および $\rho_{c,min}$ と ρ_F の関係から 次のように算出した。 $\rho_{c,max} \leq \rho_F$ ならば、仮定値の最大値、 $\rho_{c,min} \geq \rho_F$ ならば、仮定値の最小値、 $\rho_{c,max} >$ $\rho_F > \rho_{c,min}$ ならば、仮定値の範囲から比例計算によりそれぞれの廃棄物の個体密度を算定し、 ρ_F を算出し た。さらに、本研究で対象とした21地点において、現場試験結果より算出した廃棄物固体密度 ρ_F と最も 乖離の小さい廃棄物固体密度 $\rho_{c,opt}$ (式10参照)を最小二乗法により算出し、本研究におけるそれぞれの 廃棄物固体密度 ($\rho_{f,opt}$ 、 $\rho_{g,opt}$ 、 $\rho_{s,opt}$)を決定した。

各廃棄物の固体密度の仮定値を示す。繊維廃材密度および20mm篩い下密度の仮定値はWong¹¹によって 行われた既往研究を参考に決定した。また、一般的に普通コンクリートの比重は2.3、ガラスの比重が2.5 ~2.6程度であることから粒状廃材の仮定値を決定した。

$$\rho_F = \frac{\rho_d}{1 - n_a - w \frac{\rho_d}{\rho_w}} \tag{8}$$

 $\rho_a:$ 乾燥密度 (g/cm^3) 、 ρ_w :水の密度 (g/cm^3) 、 n_a :空隙率、w:含水比

$$\rho_c = \frac{P_f + P_g + P_s}{\frac{P_f}{\rho_f} + \frac{P_g}{\rho_g} + \frac{P_s}{\rho_s}} \tag{9}$$

P: 廃棄物の質量混入率、ρ: 固体密度、添え字f: 繊維廃材、g: 粒状廃材、s: 20 mm篩い下。

$$\rho_{c,opt} = \frac{P_f + P_g + P_s}{\frac{P_f}{\rho_{f,opt}} + \frac{P_g}{\rho_{g,opt}} + \frac{P_s}{\rho_{s,opt}}}$$
(10)

添え字opt:最適値である。

図4.4.13に $\rho_c \ge \rho_F$ の関係を示す。仮定値から算出した $\rho_c \ge \rho_F$ の関係が概ね $\rho_c = \rho_F$ であることから、算出に用いた仮定値の妥当性が確認された。本研究における繊維廃材密度は $\rho_f=0.90\sim1.27$ g/cm³、粒状廃材密度は $\rho_g=2.30\sim2.60$ g/cm³、20mm篩い下密度は $\rho_s=2.40\sim2.90$ g/cm³である。また、表4.4.4より、それぞれの廃棄物固体密度は $\rho_f=1.27$ g/cm³、 $\rho_g=2.60$ g/cm³、 $\rho_s=2.85$ g/cm³であった。本研究により得られた廃棄物固体密度は比較的高い値であることが明らかとなった。



表4.5 推定された廃棄物固体密度

| | 最適值 (g/cm ³) |
|----------------------|--------------------------|
| 繊維廃材密度ρ <i>f,opt</i> | 1.27 |
| 粒状廃材密度ρg.opt | 2.60 |
| 20mm篩い下密度p s,opt | 2.85 |

以上の結果から、10 cm超物の混入率と空隙率の関係と、廃棄物組成とキャスポルで求まるインパクト 値I_aと安息角の関係から、埋立を高密度化し埋立量を増加させ、適度な地盤の固さと十分な斜面安定性 を得るには、廃プラスチック等のサイズを小さくし(処分基準に示された廃プラスチックを15 cm以下に することの遵守等)、プラスチック等やがれき類、ガラス・陶磁器等の形状、サイズの異なる廃棄物を 適度に混合(粒度分布の均等化)して埋め立てることが有効になると言える。

研究目標達成度: 現場試験を当初計画以上に実施し、プラスチックやがれき等を含む廃棄物層に適す る試験法を提案したことから、当初目標どおりに達成できた。

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

値にばらつきは見られるが、空隙率の増加に伴い乾燥密度は減少すること、埋立後5年未満の地盤に比 べ、埋立後5年以上経過の地盤では構造が密実になり乾燥密度が大きくなる傾向にあること等が明らか となった。また、廃棄物組成の観点からは、プラスチック等の平面状物(2次元物)や繊維等の線状物(1 次元物)の混入割合が増えると、インパクト値(地盤の硬度)は減少し、停止安息角は増加すること、 ガラス陶磁器やがれき等の塊状物(3次元物)の混入割合が増えると、インパクト値は増加し、停止安息 角は減少することが明らかとなった。したがって、埋立廃棄物中にプラスチック等の平面状物や線状物 の割合が高くなると埋立地盤は柔軟で斜面安定性の高い地盤が形成され、がれき等の塊状物の割合が高 くなると埋立地盤は固い地盤が形成されることを明らかにし、廃棄物組成と力学特性の関係を初めて明 らかにした。また、インパクト値と停止安息角は、それぞれ地盤の粘着力、内部摩擦角と良い相関を持 つことを示しており、廃棄物地盤の強度特性を簡便に評価しうる可能性を示している。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

埋立を高密度化し埋立量を増加させ、適度な地盤の固さと十分な斜面安定性を得るには、廃プラスチ ック等のサイズを小さくし(処分基準に示された廃プラスチックを15 cm以下にすることの遵守等)、プ ラスチック等やがれき類、ガラス・陶磁器等の形状、サイズの異なる廃棄物を適度に混合(粒度分布の 均等化)して埋め立てることが有効になる。また、インパクト値と停止安息角を求めることで、比較的 簡便に廃棄物地盤の粘着力と内部摩擦角を把握しうると言える。

6. 国際共同研究等の状況

1) 国際緊急援助隊専門家チーム(独立行政法人国際協力機構)

派遣国:スリランカ国

カウンターパート:スリランカ政府、スリランカ国家建築研究所(National Building Research Organization)

参加者:山脇 敦

実施内容:Meethotamulla 廃棄物処分場の大規模崩落被害への応急対策及び復旧活動に従事 (2017年4月20日~25日)

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

1) 山脇 敦・土居洋一・大嶺 聖:土木学会論文集C(地圏工学), Vol.73, No.2, pp.212-223 (2017)

プラスチック等が混入した廃棄物地盤の強度特性と現場試験法

2) A. Yamawaki, Y. Doi and K. Omine: Waste Management & Research, Vol.35, Issue 7, pp.730-738 (2017)

Slope stability and bearing capacity of landfills and simple on-site test methods

 高井敦史・義経浩平・乾 徹・勝見 武:第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 41-46 (2017) 配向角の異なる軟プラスティック混合土のせん断特性と内部構造観察

- 4) 諸富鉄之助・Purbashree Sarmah・勝見 武・高井敦史・乾 徹・山脇 敦・大嶺 聖・土居洋
 一・坂口伸也:第13回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 325-330. (2018)
 安定型廃棄物処分場埋立層の強度と溶出特性に及ぼす諸要因の影響
- P. Sarmah, Y. Nakase, T. Katsumi, A. Yamawaki, A. Takai, K. Omine, S. Ideguchi, Y. Doi and T. Ishiguro: Proceedings of the 8th Japan-China Geotechnical Symposium (accepted) (2020)

Mechanical and leaching characteristics of inert waste landfills,

<その他誌上発表(査読なし)>

- A. Takai, K. Yoshitsune, T. Inui and T. Katsumi, Geo-Environmental Engineering 2017 -16th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering, pp. 55-60. (2017) Shear strength of soil-plastic mixtures by direct shear test and X-ray CT
- 2) 山脇 敦:建設リサイクル, Vol. 81, pp. 38-41 (2017)
 プラスチック等が混入した廃棄物地盤の強度特性と簡易現場試験方法,
- 3) 山脇 敦:産廃振興財団NEWS, No. 87, Vol. 25, pp. 16-19 (2017) スリランカにおけるごみ処分場堆積物崩落に対する国際緊急援助隊専門家チームに参加して
- 4) T. Morotomi, P, Sarmah, A. Takai, T. Inui, T. Katsumi, K. Omine, Y. Doi, A. Yamawaki and S. Sakaguchi: Geo-Environmental Engineering 2018 - 17th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering (2018) Field and Laboratory Tests on Strength and Leaching Characteristics of Inert Waste Landfills in Japan
- 5) P. Sarmah, T. Katsumi, A. Yamawaki, A. Takai, K. Omine, Y. Doi and S. Sakaguchi: Proceedings of the 8th CECAR, Tokyo. (2019) Management of Landfills Reclaimed with Construction and Demolition Wastes - Strength Characterization for Stability Assessment

(2) 口頭発表(学会等)

- 諸冨鉄之助・勝見 武・高井敦史・乾 徹・Purbashree Sarmah・山脇 敦・大嶺 聖・土居洋 一・坂口伸也:第53回地盤工学研究発表会(2018) 安定型廃棄物処分場の安全性に及ぼす諸要因の影響に関する検討
- A. Yamawaki, Y. Doi, K. Omine and T. Katsumi: Proceedings of ISWA2018 World Congress, Kuala Lumpur, Malaysia (2018)
 Waste Landfills Including Plastics Store Rainwater, Releasing It Slowly
- P. Sarmah, T. Katsumi, A. Yamawaki, A. Takai, K. Omine, Y. Doi and S. Sakaguchi IPB&KU International Symposium on Education and Research in Global Environmental Studies (2018)

Test and design methods for safe and sustainable inert waste landfills in Japan

4) P. Sarmah, Y. Nakase, T. Ishiguro, T. Katsumi, A. Takai and A. Yamawaki 第55回地盤工学 研究発表会 (2020)

Mechanical characterization of inert waste with different fibrous contents,

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

- 1) 感謝状、独立行政法人国際協力機構、2017年7月20日、山脇 敦(スリランカへの国際緊急援助隊 に参加の件)
- 2) 感謝状、外務大臣、2018年1月31日、山脇 敦(スリランカへの国際緊急援助隊に参加の件)
- 8. 引用文献
- 山脇 敦・島岡隆行・大嶺 聖・勝見 武・川嵜幹生・土居洋一・柴 暁利・川井晴至・坂口伸也・ 小原孝之(2013): 不法投棄等現場の堆積廃棄物層で留意すべき斜面崩壊に関する研究, 第24回廃 棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, pp. 549-550.
- 2) 山脇 敦・島岡隆行・勝見 武・大嶺 聖・川嵜幹生・土居洋一・柴 暁利・川井晴至・坂口伸也 (2013):平成24年度環境研究総合推進費補助金研究事業総合研究報告書 不法投棄等現場の堆積 廃棄物の斜面安定性評価
- 3) 高井敦史・義経浩平・乾 徹・勝見 武(2017):配向角の異なる軟プラスチック混合土のせん断 特性と内部構造観察,第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集,pp.41-46
- 4) 宮本慎太郎・安福規之・大嶺 聖・石蔵良平・川井晴至・山脇 敦(2015):組成割合の異なる埋 立廃棄物の変形・強度特性,土木学会論文集C(地圏工学), Vol.71, No.4, pp.278-291.
- 5) 近畿地方建設局近畿技術事務所(1996): 簡易支持力測定器による試験方法
- 6) 近畿地方整備局近畿技術事務所(2005): 簡易支持力測定器(キャスポル)利用手引き
- 7) 山脇 敦・大嶺 聖・土居洋一・川嵜幹生・坂口伸也・島岡隆行・勝見 武・川井晴至(2016): 環境研究総合推進費補助金循環型社会推進研究事業総合研究報告書 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.
- 8) 松倉公憲・恩田裕一(1989): 安息角 定義と測定法にまつわる諸問題, 筑波大学水理実験センタ ー報告, No. 13, pp. 27~35.
- 9) 山脇 敦・土居洋一・大嶺 聖(2017):プラスチック等が混入した廃棄物地盤の強度特性と現場 試験方法:土木学会論文集C(地圏工学), Vol. 73, No. 2, pp. 212-223.
- 10) W. W. Y. Wong (2009): Investigation of the Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste as a Function of Placement Conditions, Department of Civil and Environmental Engineering, California Polytechnic State University, 45p.

Ⅱ-5 容量と密度の増加等につながる設計法に関する研究

前田建設工業(株)

坂口 伸也・石黒 健

平成29年~令和元年度研究経費(累計額):2,343千円(研究経費は間接経費を含む) (平成29年度:363千円、平成30年度:344千円、令和元年度:1,636千円)

[要旨]

我が国では、施工や維持管理の容易性や経済性の観点から、土えん堤とその背面の廃棄物層からなる 盛土ダム形式の構造が採用されることが多い。実際の廃棄物地盤の安定性を考慮すると、勾配の大きい 土えん堤であっても全体として十分に高い安定性を期待しうる可能性があることから、円弧すべり法に よる安定解析と動的応答解析を行った。その結果、現場試験の結果に基づいて算出される合理的な斜面 勾配は1:1.8であり、厳しい条件でも十分な安定性を発揮しうること、地盤中に繊維廃材が存在する場合 には、引張抵抗と上載荷重の寄与により廃棄物一土えん堤全体の安定性が大幅に改善すること、廃棄物 斜面の地震時安定性に影響を及ぼす第一の要因は廃棄物組成であること等を明らかにした。このことか ら、現行設計より勾配を大きくすることにより、容量増加が実現できると言える。

[キーワード]

安定解析、遠心模型実験、土えん堤、急勾配、引張抵抗

1. はじめに

我が国においては、擁壁では不可能な埋立て高さ(埋立容量)を確保できること、基礎岩盤にコンク リートダムのような硬固な岩盤を必須としないこと、施工や維持管理の容易性、コスト面等の優位性か ら、土えん堤とその背面の廃棄物層からなる盛土ダム形式が採用されることが多い。盛土ダム形式の土 えん堤は、安全側の設計法により1:2~1:3の緩勾配で施工されることが多いものの、実際の廃棄物地盤 は図1.5.1に示すように掘削面が鉛直に自立するほど安定性が高く、水平方向に作用する側方土圧は一 般的な地盤と比べると極めて小さいと考えられることから、勾配の大きい土えん堤であっても十分に高 い安定性を期待しうる可能性がある。



図1.5.1 千葉市産業廃棄物中間処理施設の不法投棄廃棄物の状況

2. 研究開発目的

安定型処分場の貯留構造物形式としては、コンクリートダム、盛土ダム、擁壁等があり、主として、 処分場の最終埋立高さ、地盤条件、施工条件および埋立計画等を勘案して決定される¹⁾。我が国の現状に おいては、最終埋立高さと埋立て量の確保、基盤条件、コスト、施工性等の面から盛土ダム(土えん堤) 形式が数多く採用されている。コンクリート擁壁は高さが5m~10m程度以下の盛土で採用され、主働土 圧もしくは静止土圧を考慮した試行くさび法により設計が行われる²⁾。盛土ダム(土えん堤)形式の場合 であっても、土えん堤—廃棄物層一体斜面の地震時安定性は土えん堤に作用する廃棄物層からの静的及 び動的土圧の大小に大きく左右される。本サブテーマでは、受入容量の増加による処分場の長寿命化を 期待し、現行の1:2勾配より急勾配で設計することの妥当性を明らかにするとともに、廃棄物の埋め立て 方法や処分場構造の設計に資する知見を提示することを目的としている。

3. 研究開発方法

本サブテーマでは、埋立て勾配における土えん堤-廃棄物層-体斜面の安定性を以下の2手法により 検討した。

(1) プラスチックの引張抵抗を考慮しない一般的な円弧すべり法による安定解析

(2) 引張抵抗角を考慮した円弧すべり法による安定解析

さらに、これらの手法が主に通常地震動(L1)を想定していること、及び、円弧滑り法自体があくま で静的な力の釣り合いに基づく解析手法であり、地震時の土えん堤と廃棄物層の動的相互作用等を考慮 していないことから、

(3) 土えん堤---廃棄物層斜面の強震時(L2)及び動的相互作用を考慮した動的応答解析

により強震時の挙動を照査した。動的応答解析は、安定型処分場の設計において日常的に用いられてい るものではないが、廃棄物斜面が大規模、かつ民家等の近接条件上、斜面の強振時あるいは地震後の安 定性確保が重要である場合などにおいて本手法を採用することを想定し実施した。さらに、本手法を用 いて処分場斜面の安定性に影響を及ぼす幾つかの要因を考慮した一連の感度解析を実施し、廃プラスチ ック等を混入する廃棄物の埋め立てや斜面部の構造、施工におけるいくつかの留意点を抽出した。

(1) 土えん堤―廃棄物層一体斜面の安定解析(円弧すべり法)

安定型処分場の現行設計手法¹⁾に従い、既往現場強度のばらつきの範囲内で最も保守的な値を選定して円弧すべり計算を実施し、斜面の安定勾配を求めた。想定したモデルと採用した物性値は以下の通りである。

1) 土えん堤―廃棄物層一体斜面モデル

図3.5.1に安定解析(円弧すべり法)に用いたモデルを示す。我が国の安定型処分場の標準的なモデル として、土えん堤の1段辺り高さを5mとし、4段、埋立高さH=20 mの斜面を想定した。なお、斜面の勾配 については、土えん堤を含む斜面勾配を1:2(現行)、1:1.5、1:1とした3モデルを作成した

2) 設計条件

設計は現行設計手法¹⁾に従った。盛土内には水位を想定せず、設計水平震度 $k_h = 0.15$ (L1相当)を考慮した。廃棄物層の引張強度は陽な形では考慮しておらず、現場一面せん断試験により得られた物性値に含まれるものとした。

3) 廃棄物層の物性条件

廃棄物層の物性は、表4.4.1に示した既往の現場実験データ(原位置一面せん断、安息角試験、現場密 度試験等)を基に設定した。図3.5.2にこれらのデータを限界安息角と粘着力の関係として整理した。前 述したように、廃プラスチック等を多く混入する廃棄物は限界安息角が大きく(引張抵抗を有し)、転 圧面での粘着力cは小さくなる。よって、現場データは概して左上から右下に向けて分布し、また現場の 転圧によりこの関係が上方に移動することになる。本安定解析では、廃プラスチック等を含む廃棄物層 を想定し、粘着力を、図の下限値 $c = 5 \text{ kN/m}^2$ に固定した。また廃棄物層の単位体積重量 γ_t は、表4.4.1の 平均値より13.2 kN/m³とした。安定解析では、廃棄物層の内部摩擦角 ϕ をパラメータとして変化させ、 各々の安全率(所要値1.0)を算出した。

4) 土えん堤の物性条件

本検討では、図3.5.1中に示すような廃棄物層と土えん堤を含む、深部のすべり線を想定して解析を行った(斜面の全体的な崩壊の有無を検討するため)。土えん堤の物性は、盛土を対象とした既往の設計 手法³⁾⁴⁾に示された設計値を参照し、中間土を想定して図3.5.1中に併記した値に固定した。







図3.5.2 現地廃棄物層の限界安息角と粘着力の関係

(2) 引張抵抗角を考慮した円弧すべり法による安定解析

廃棄物地盤の斜面安定性解析は、土質工学で用いられる断面方向の2次元の極限平衡法(円弧すべり解 析等)を援用する解析法が用いられてきている。一方、この方法では堆積廃棄物層が急傾斜でも安定し ていることは説明できない。これは、廃棄物層では従来の円弧すべり解析で用いられる内部摩擦角(ϕ)、 粘着力(c)の他に引張抵抗を有することに起因する。従って、プラスチック等の繊維状物等が多量に混入 している場合には引張抵抗を考慮した安定解析を行うことでより実態的な評価が可能になる。ただし、 引張抵抗は、繊維状物等と細粒分の密着や繊維状物等間の絡み合いにより生まれるものであり、締固め が不十分などの緩い堆積ではあまり期待できない。

斜面安定解析での引張抵抗の考慮の仕方として、ケルシュ(Koelsch)⁵⁾が式11の引張抵抗を考慮した極限平衡式を示している。この式では引張抵抗を垂直荷重(G)に比例するように与えている。

なお、式11では、長尺のプラスチックが混入した廃棄物地盤では、空隙が大きく残留水圧が働くこと は考えにくいことから、残留水圧の項は除いている。

$$T = \frac{G \cdot \tan \varphi + c \cdot b + G \cdot \tan \zeta \cdot \sin(1.5\theta)}{\mu \cdot \sin \theta \cdot \tan \varphi + \cos \theta}$$
(11)

ここに、*T*: すべり面でのせん断抵抗(kN/m)、*G*: 自重等による鉛直荷重(kN/m)、 μ :安全率(Fs)の逆数、 *b*: すべり面長(m)、 ϕ : 内部摩擦角(°)、*c*: 粘着力(kN/m²)、 θ : すべり面の傾斜角(°)、*ζ*: 引張抵 抗角(°)である。

また、安定解析の方法としては、既往研究で、円弧すべり法等の極限平衡式を用いた解析方法が現場 状況を良く説明できている。このため、廃棄物地盤での斜面安定解析方法としては、式11の極限平行式 を用いた円弧すべり法等が基本となる。

検討の初期段階で、斜面の安定性を概略的に知りたい場合には、次の無限長斜面法(斜面勾配θと崩 壊層厚を一定として、すべり面での力のつり合いをみる方法)で、引張抵抗を考慮して、長尺のプラス チック混入地盤では小さい値をとる粘着力(c)を無視した式12⁶⁾により、崩壊面を想定しなくても安全率 (*Fs*)を求めることができる。

$$Fs = \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} + \frac{\tan \zeta \cdot \sin(1.5\theta)}{\sin \theta \cdot \cos \theta}$$
(12)

ここに、Fs:安全率 Fs=1/µ である。

ここでは、今度は斜面勾配を1:1.8に固定し、土えん堤を考慮しない高さ30mの斜面モデル(安全側に 設定したモデル)を用いて、原位置で確認した引張抵抗の実測値を用いた安定解析を実施して、本勾配 の妥当性を再確認した。

(3) 土えん堤---廃棄物層---体斜面の強震時(L2)及び動的相互作用を考慮した動的応答解析

前述の円弧すべり法による安定解析は、あくまで静的な力の釣り合いに基づいており、地震時の土え ん堤と廃棄物層の動的相互作用や非一体的な挙動、強震時の地盤の著しい非線形性などを考慮できない。 さらに本研究では、廃プラスチック等の繊維廃材が混入する廃棄物を念頭に置いているが、繊維廃材の 混合により土えん堤に作用する背面廃棄物層の静的・動的土圧が大きく低減することが既往研究により 報告されており、これによる斜面の地震時安定性の向上が期待される。そこで、繊維状物の混入が土え ん堤一廃棄物層一体斜面の地震時安定性に及ぼす影響を実験的に調べ、動的応答解析によってこれを確 認した。

1) 動的遠心載荷実験

遠心載荷実験装置内に高さ10 m(土えん堤2段×5 m)の廃棄物斜面モデルを作製し、これを100 gal→ 400 galまで段階的に加振して斜面の強震時挙動や崩壊メカニズムを調べた。実験装置や廃棄物斜面の モデル化、実験結果の評価等の詳細については巻末資料に詳述した。本実験は実廃棄物地盤を綿密に再 現したものではなく、斜面の崩壊メカニズムおよび廃プラスチック等の繊維状物の含有が、処分場斜面 の地震時安定性に及ぼす影響を定性的に調べることが目的である。

実験に用いた遠心載荷装置を写真3.5.1に、土えん堤一廃棄物層一体斜面モデル(1/50)を図3.5.3に 示す。実験装置の制約上、モデルは高さ10m(50g遠心場)、土えん堤は2段、斜面勾配は1:1とした。土 えん堤はセメント改良盛土を想定し、剛なアクリルで製作し単位体積重量を土相当に調整した。廃棄物 層は7号珪砂を相対密度60%に締固めて模擬的に再現している(基礎地盤は90%に密固め)。実験は珪砂 のみ(繊維無)のケースと、これに繊維補強材を混入した繊維有の2ケースを実施した。繊維有の模型地 盤では、コンクリート補強用繊維(ポリプロピレン製、直径D = 0.4 mm×長さL = 30 mm)を重量比1% となるよう厚さ1 cm毎に混入しながら同じ相対密度60%に締固めた。この模型地盤を50gの遠心場に置いた後、底面の振動台により100 gal→400 gaLまで連続的に加振した(f = 1 Hz、20波)。加振中に土 えん堤に加わる側方土圧と廃棄物層の地中加速度を計測した。



写真3.5.1 動的遠心載荷実験装置

図3.5.3 土えん堤-廃棄物層モデル(1/50)

2) 非線形動的FEM解析

本解析は、この後に述べる感度分析(処分場斜面の各種要因の寄与度分析)を目的として実施してい るが、その前に動的遠心載荷実験で観察された斜面の不安定化メカニズム、および繊維状物混入の効果 について定性的なチェックを試みた。さらに、本解析手法を用いた感度分析を実施して、廃棄物層斜面 の地震時安定性に及ぼす影響を、①廃棄物層における繊維状物混入の有無、②土堰堤の剛性(セメント 改良土と粘性土を想定)、③入力地震動の大きさ(L1、L2)、④斜面勾配、の4項目について評価した。 ①、②については廃棄物層や土堰堤の動的物性の違いを表現し、③は入力に用いた地震動(阪神大震災 の神戸波)をL1,L2相当に設定して用いた。④の斜面勾配については、1:1、1:1.5、1:2の3種類の勾配で FEMモデルを作成した。

土えん堤一廃棄物層一体斜面の地震時挙動を再現し、その安定性に影響を及ぼす諸要因と寄与度を検 討する目的で非線形動的FEM解析を実施した。実務設計者の参照データとなり得る結果を取得するため、 解析は土木設計の分野で汎用的に用いられている解析コード「Soil Plus」⁷⁾を用いた。本解析では基本 運動方程式を直接積分法(ニューマーク-β)により時刻歴で解き、地盤内の変位と応力を求める。地盤 材料(土えん堤及び廃棄物層)は地震時の非線形性を考慮するために履歴型Ramberg-Osgoodモデルによ り表現している。土えん堤と廃棄物層の境界部にはジョイント要素を配置しており、Mohr-Coulomb則に 基づくせん断抵抗と剥離が表現される。廃棄物層内には水位が存在しない前提に基づき、全応力解析を 行っている。

図3.5.4に解析に用いた処分場斜面モデルを示す。標準的な安定型処分場のモデルとして、高さH=20m, 土えん堤高さh=5m×4段の斜面を想定した。解析ではまず、N値30相当の堅硬な基礎地盤の上に、4層毎に 順次土えん堤と背面廃棄物要素を追加する静的盛り立て解析を実施した。この際の廃棄物層の変形特性 は原位置試験により実測された地盤剛性を反映した非線形弾性体として表現した。得られた盛り立て完 了時の地盤内各要素の初期応力状態を用いて、地震時応答解析に用いる廃棄物および土えん堤の動的変 形特性(Ramberg-Osgoodモデルのための微小ひずみ時のせん断剛性Go、せん断剛性低減率G/Go~せん断 ひずみy関係、減衰定数h~y関係。いずれも初期拘束圧依存)を各要素毎に求めた。このモデルに対し、 基礎地盤底面より図3.5.5に示す地震動(阪神大震災における神戸記録波)を入力し、地震時の地盤内応 答を求めた。図3.5.4に示すように、モデル下面と左右境界には粘性境界を配置し、左右部に関しては自 由地盤と連結した(エネルギー伝達境界)。入力地震動に関しては神戸記録波をL2クラスと想定し、便 宜的に加速度振幅をその1/2に低減した波形をL1クラスとした。斜面の勾配については、前出の円弧すべ り計算と同じく、土えん堤を含んだ勾配で1:1(図3.5.4)、1:1.5、1:2の3種類のFEMモデルを作成した。



図3.5.4 解析モデルの概要



図3.5.5 採用した入力地震動波形

解析に用いた各種物性値の一覧を表3.5.1に示す。土えん堤と廃棄物層の両者に対して、①単位体積 重量 ② 盛り立て解析に用いる静的ヤング率とポアソン比 ③ Ramberg-Osgoodモデルに必要な動的変 形特性(S波速度、G/G₀~y、h~y関係) ④ ジョイント要素に必要な強度定数(Mohr-Coulomb則のc, ϕ) を定める必要がある。これらは主として、本マニュアル表1中に示した既往の実廃棄物処分場での現場計 測値及び廃棄物の動的変形特性を詳細に調べたZekkos⁸⁾らの研究成果を援用して定めた。

| | 乾燥密 γ dg/cr | 度 n ³) | 含水 比 (%) | 単位体 積重量 γ _t (kN/m ³) | V _s (m/sec) | 基準ひずみ ア _{0.5} | 最大減 衰率 h _{max} | 初期せん断 剛性 G ₀ (kN/m ²) | G0拘 束依性数 の | 初期減 衰率 h | 想定 N値 | 一軸 圧縮 q _u (kN /m ²) | 静的ヤング率 E(kN/m ²) | ポアソン 比 V | 粘着 力 c(kN/ m ²) | 内部 摩擦 角 ¢(°) |
|-----|----------------|-----------------------|----------------|--|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|--|------------------|----------------|----------|---|---------------------------------|----------------|--------------------------------------|-----------------------|
| 十년日 | 粘土 | | _ | 17.0 | 100 | 3.50E-03 | 0.10 | 17335 | _ | 0.03 | 4 | | 11200 | 0.333 | 30 | 20 |
| 工堰埞 | 改良土 | | | 19.0 | 400 | 5.00E-04 | 0.10 | 309994 | _ | 0.03 | _ | 300 | 30000 | 0.333 | 150 | 0 |
| 成本地 | 剛廃棄物 | 1.4 | 25 | 17.2 | 175 | 1.25E-03 | 0.15 | 図参7(c)のVs | 0.6 | 0.03 | | | 図参7(b)より | 0.365 | 20 | 35 |
| 兇苿牣 | 柔廃棄物 | 0.8 | 25 | 9.8 | 95 | 7.00E-03 | 0.11 | 分布より算出 | 0.8 | 0.03 | | | 算出 | 0.234 | 5 | 45 |
| 支持 | 寺地盤 | | | 19.0 | 291.6 | 4.00E-04 | 0.28 | 164735 | _ | 0.03 | 30 | _ | 84000 | 0.450 | | _ |

表3.5.1 FEM解析に用いた各種物性値の一覧

廃棄物の単位体積重量 γ

図3.5.6に、表4.4.1に示した既往現場計測結果を含水比と乾燥密度(水置換法による)の関係として 示した。現場の含水比と乾燥密度は大きくばらつき、Zekkosら⁸⁾の分析結果によると、廃棄物層の繊維状 物の混合比率の大小が、これに関わっている(繊維状物を多く混合すると地盤中の空隙が大きく、乾燥 密度が小さくなる)。本解析では、Zekkosら⁸⁾のデータ範囲との整合性も参照し、図中に赤線で示した上 下限値を採用した。上限を「剛な」(繊維状物を含まない、がれきや土砂主体の)廃棄物の、下限を「柔 な」(繊維状物を多く含む)廃棄物の値とした。なお含水比については全体平均値の25%に統一した。 これにより、静的盛り立て解析および動的応答解析に入力する湿潤単位体積重量を定めた。土えん堤の γについては、NEXCOの設計指針等³⁾に示された盛土の代表的な物性値を参照し、前出の円弧すべり解析 と同じ値を設定した。



図3.5.6 廃棄物層の乾燥密度と含水比の関係

② 静的ヤング率とポアソン比

図3.5.7に、現地処分場で実測されたキャスポルによる I_a 値と平板載荷試験により求められた地盤反力 係数 K_{30} の関係を示す。繊維状物を多く含む柔な廃棄物ほど I_a や K_{30} が小さく、剛な廃棄物ほど大となる。 解析では図中に記した上下限値を採用した。この地盤反力係数 K_{30} をブシネクス解に基づく換算式($E = 0.267 \times K_{30}$)により変形係数に置き換えた。なお、この変形係数 E_0 は転圧面表層で得られた値であることから、盛立て中の上載荷重による変形係数の増大を考慮し、非線形弾性 $E = E_0 \times (\sigma_v/\sigma_{vo})^n$ にて各盛り立 て段階毎に変形係数を算出して与えた。ここに、 σ_{vo} は E_0 (K_{30})を求めた時の土被りとして深度30 cm(平 板載荷試験の影響深度60 cmの1/2相当)の値を、また拘束圧依存性nは後述する微小ひずみ時のせん断剛 性 G_0 の依存性と同じ値を与えた。ポアソン比vは、弾性体における静止土圧係数 K_0 との関係式($K_0 = v / (1 - v)$)より、遠心載荷実験にて得られた実測初期土圧係数の値より逆算した値を表3.5.1のように定めた (土えん堤は便宜的に1/3とした)。



図3.5.7 廃棄物層の静的変形係数の設定

③ Ramberg-Osgoodモデルに必要な動的変形特性

動的解析に用いる廃棄物層のG₀(S波速度Vs)、G/G₀~y、h~y関係は、Zekkosら⁴⁾による廃棄物の原位 置および室内試験結果を参照して定めた。図3.5.8は、Zekkosら⁸⁾がアメリカの現地廃棄物地盤において 実測したS波速度の深度方向分布を示す。Zekkosら⁸⁾は、廃棄物層のS波速度が深度方向に増大し拘束圧 依存性を有する事、及び剛な(繊維状物を含まない)廃棄物層のS波速度が深度方向に増大し拘束圧 依存性を有する事、及び剛な(繊維状物を含まない)廃棄物層のS波速度が深度方向に増大し拘束圧 ならなるの矢印は、わが国の実処分場で計測されたS波速度の実測値をデータ範囲として併記したが、こ れらはZekkosら⁸⁾の結果と調和的である。本解析では、図中に示した2本の上下限ラインを廃棄物層のS 波速度として採用した。図3.5.9、3.5.10は、廃棄物層の動的変形特性(G/G₀~y、h~y関係)を示す。図 3.5.10は、Zekkosら⁸⁾が室内の大型動的三軸試験により求めた実測データを示しており、繊維状物を多 く含む柔な廃棄物ではせん断ひずみの増加に伴うせん断剛性の低下率が小さく(粘り強く)、かつ減衰 定数hが小さくなる(弾性的に応答する)傾向を報告している。これらの傾向は、前述した遠心載荷実験 や一面せん断試験結果とも符合するものと考えられる。本解析においては、図中に示した上下限範囲を 廃棄物層の物性に振り分けた。図3.5.9には、前述のS波速度と図3.5.10を用いて設定したG~y、h~y関 係をまとめて示した。図中には粘性土とセメント改良土を想定した土えん堤材料の動的変形特性を併記 した。これらについては、表3.5.1中に記した想定N値や一軸圧縮強度を基に、国生⁹による粘性土とセメ ント改良土の動的変形特性に関する既往現場・室内実験データを参照して定めた。









図3.5.10 廃棄物の動的変形特性の実測値(Zekkos et.al)

④ ジョイント要素に必要な強度定数

土えん堤と廃棄物層の境界部にはジョイント要素を配置した。ジョイントは剥離に対しては抵抗しな いものとし、せん断方向に対してはMohr-Coulomb則に従うものとした。そのため廃棄物層の強度定数c, φを設定する必要がある。図3.5.11は、表1に示した既往実測データの中から、廃棄物層の乾燥密度と粘 着力c(原位置一面せん断試験結果)の関係、およびプラスチック混入率と停止安息角(≒内部摩擦角) の関係を示している。既述のように、繊維状物を多く含む柔な廃棄物では粘着力が小さく、停止安息角 が大となる。解析では、図中に赤線で示した上下限値を廃棄物層の物性として与えた。土えん堤の強度 定数(土えん堤同士の境界ジョイントに設定)については、想定したN値からの推定及び文献⁹⁰中の実測 値を採用した。



図3.5.11 廃棄物層の強度定数(境界ジョイント要素の物性値)

4. 結果及び考察

(1) 土えん堤-廃棄物層一体斜面の安定解析(円弧すべり法)の結果

図4.5.1に円弧滑り法による安定解析結果を示す。廃棄物層の内部摩擦角と地震時安全率の関係を斜 面勾配毎に求め、許容安全率(1.0)を確保しうる所要内部摩擦角を図のように求めた。図4.5.2に、こ の所要内部摩擦角と斜面勾配の関係を図示した。本結果と図3.5.2の横軸(限界安息角>30°)を見ると、 現状の1:2勾配は十分過ぎるほどの安全率を有することが明白である。一方、安定勾配の設定に際して は、廃棄物層の物性(廃プラスチック等の繊維状物や土砂分の含有率など)や転圧効果(粘着力)のば らつきを考慮し、表4.4.1中の原位置一面せん断の最小内部摩擦角の値(関東①2017/8における φ=23°) を安全側に採用した。図4.5.2より、これに対応する斜面勾配は1:1.8となる。

今後、新たな処分場の設計や増設を行う場合、ここに示したような安定解析手法により設計を行うこ とが可能であるが、その場合、用いる設計定数(廃棄物および土えん堤の物性値)に関しては、既存埋 立エリアにおける各種物性の現場実測値を用いるか、あるいは搬入予定の廃棄物の物性(廃プラスチッ ク混合率等)を想定したうえで、適切な値を定める事が必要となる。



①廃棄物層:廃棄物層のcを5KN/m2に固定。γ=13.2KN/m3(現場平均値)
 ②土堰堤 :中間土相当(c=15KN/m2,φ=25°,γ=18KN/m3))
 ③誘計震度:kh=0.15(L1相当)







(2) 引張抵抗角を考慮した円弧すべり法による安定解析の結果

高さ30 mの一様斜面での安定計算結果を図4.5.3に示す。10 cm以上の粗大なプラスチック等が混入し た現場では、土えん堤上の小段を考慮しない厳しい条件でも、引張抵抗(ζ)を考慮すれば、斜面勾配 1:1.8で安全性が確保できている。



| | | 埋立経過年 | γ (kN/m3) | c (kN/m2) | φ (°) | 斜面勾配 1:2.0 | (h=30m) 1:1.8 | エー/ く考慮 1:1.8 | く。) 安息角試験より | 備考 |
|----------|-----------|-------|--------------|--------------|----------|---------------|------------------|---------------------|----------------|---------------|
| 関東① 0.1年 | 2017/8/24 | 0 | 15.3 | 13 | 27 | 1.19 | 1.11 | | 1 | 長尺物:少 |
| 東北① 0.0年 | 2018/8/27 | 0 | 8.9 | 4 | 32 | 1.27 | 1.16 | 1.27 | 5 | 100mm超プラ2.6% |
| 東北2 4.5年 | 2019/6/24 | 4.5 | 12.8 | 17 | 28 | 1.39 | 1.28 | 1.39 | 5 | 100mm超プラ13.2% |

図4.5.3 引張抵抗を考慮した円弧すべり法による解析例

(3) 土えん堤-廃棄物層一体斜面の強震時(L2)及び動的相互作用を考慮した動的応答解析の結果

1) 動的遠心載荷実験

図4.5.4(a)は、繊維状物を含まない斜面を最大加速度400 ga1(20波)で揺らした後の斜面変状を示す。 加振中、1、2段目の土えん堤が解放面側に大きく変位し、その背面に明瞭なすべり線が連続的に形成さ れて廃棄物層が全層に渡って崩壊している。図4.5.4(b)はこれに繊維状物を混入させた場合の結果であ るが、1段目土えん堤背面に局所的な変状は見られるものの、2段目土えん堤と背後の廃棄物層は安定性 を確保している。図4.5.5に、300 galおよび400 gal加振時の2段目土えん堤への作用側方土圧を、繊維 状物有り、無しの両ケースで比較した結果を示す。2つのケースで加振前の初期土圧は繊維状物有りのほ うが小さく、繊維状物混入によりポアソン比が減少していることがうかがえる。図4.5.5(a)の300 gal加 振時(及びその前段階)では、加振中この初期土圧に動的成分が加わり、加振終了後にほぼ初期値に戻 るという、いわば弾性的な挙動を示す。このような状況では土えん堤に顕著な変位は生じず、加振後の 斜面安定性は確保される。一方、図4.5.5(b)の400 ga1加振時では、繊維状物有りの場合には挙動に大き な変化は見られないが、繊維状物無しの場合、土えん堤に加わる過大な受働土圧がえん堤を解放面側に 大きく変位させ、その結果、背面の廃棄物層が主働崩壊して作用土圧が主働土圧まで大きく低減してい ることが分かる。繊維状物を混入する場合には、動土圧成分の振幅がかなり小さく、このような現象に は至っていない。あくまで定性的な考察ではあるが、L2レベルの強震時においては、このようなメカニ ズム(主働崩壊)で土えん堤一廃棄物層一体斜面が不安定化する可能性があること、廃棄物層が繊維状 物を混入する場合、引張抵抗の寄与により安定性の向上が見込まれる事が示唆される。繊維状物の引張 抵抗については、別途同一模擬材料を用いた一面せん断試験で確認を行っている。





(a)繊維状物の混入無し(400ga1加振後)
 (b)繊維状物の混入有り(300ga1加振後)
 図4.5.4 遠心模型実験での加振後の様子



図4.5.5 2段目土えん堤への作用土圧

400 gal加振後のモデル地盤の状況を図4.5.6に示す。図4.5.6(a)の繊維状物混入なしの場合、400 gal 加振後には1、2段目土えん堤が解放面側(左側)に大きく滑動・回転し、その背面地盤に連続的なすべ り線が明瞭に形成されている。400 gal×20波という激しい加振を受けた場合、土えん堤を含む斜面全体 が不安定化することを物語る。一方、繊維状物を混入した図4.5.6(b)では、1段目土えん堤は大きくスラ イドしているものの、2段目の土えん堤の変状は全く見られない。繊維状物混入の影響は、このように特 に大規模な地震動の作用下において顕著に現れる。



(a)繊維状物混入なし(400 gal加振後)
 (b)繊維状物混入有り(400 gal加振後)
 図4.5.6 遠心模型実験での加振後の様子

図4.5.7には、200 gal~400 gal加振における2段目土えん堤への作用側方土圧を示す。図より、繊維 物を混入する地盤では加振前(50g遠心場)での静止土圧の値が、混入無の場合に比べて小さな値を取る ことが判る。これは、遠心場においても繊維状物混入により地盤のポアソン比が減少し初期土圧が低減 することを反映している。200 galおよび300 galの加振(中規模地震動L1相当)では、繊維状物有り、 無しの両ケースとも、2段目土えん堤の変状や斜面崩壊は生じていない。この際の側方土圧は初期土圧に 動的土圧成分が加わり、加振終了後にはほぼ初期値に戻る言わば弾性的な土圧挙動を取る。この場合、 土えん堤と廃棄物は一体の挙動を示す。一方、図4.5.7(c)の400 galのケースでは、繊維状物有り、無し で顕著な違いが現れ、繊維無しの場合、かなり大きな受働土圧が加わった後、2段目土えん堤のスライド と共にこれが主働側へ大きく低減している。この結果は、繊維状物無の斜面の不安定化が、土えん堤に 加わる過大な受働土圧と土えん堤の解放面側への大変形、これに伴う背面廃棄物層の主働崩壊という、 一連の非一体的な挙動を伴って生ずる事を示している。繊維状物有のケースは300 galの時と大きくは 変わらず、強震動に対する粘り強さ(靱性)を有する事を示している。実際には、このケースでは大き くスライドした1段目土えん堤の背面を除去し、廃棄物層を再構築して同一の加振履歴をもう一度加え たが、2段目の土えん堤とその背面地盤には変状は全く生じなかった。このように、繊維状物を混入した 廃棄物層に十分な上載荷重が加わっている場合、繊維状物の引張抵抗と上載荷重の相乗効果により、そ の耐震性は繊維状物の無い場合に比べて格段に向上することが伺える(土えん堤が3,4段となり、さら に上載荷重が増えると、この相乗効果、靭性はさらに高まるものと考えられる)。



上記の繊維状物混入の効果を別手法により再確認する目的で、別途同一材料(珪砂7号)を同じ相対密度に調整した供試体を用いて一面せん断試験を実施した(上載荷重は遠心模型50g下の廃棄物層中央相

当の値に設定)。図4.5.8(a)に、繊維状物を混入させた一面せん断供試体(D=60mm×H=20mm,供試体寸法 及び作製の関係上、繊維状物の種類や混合比は遠心載荷の場合とやや異なる)の様子を示す。一面せん 断試験はせん断時の体積変化を許す定圧せん断と、これを許さない等体積せん断の2種類を実施した。図 4.5.8(b)に、定圧せん断時の水平変位~せん断応力および体積変化特性を示す。繊維状物を混入したケ ースでは、砂単体のケースに比べてせん断強度が増加するのみならず、水平変位の増加に対してせん断 応力が漸増する傾向を示し、脆性的挙動から延性的挙動に変化している。このことは遠心載荷実験にお ける2段目土えん堤背面の廃棄物層の強震時挙動を定性的に裏付けるものと思われる。せん断中の体積 変化は、その初期を除けば膨張側に推移しており、繊維状物を混入する場合ほど顕著となる。この結果 は、廃棄物のせん断強度を調べた既往の研究事例10)と符合する。地震中の地盤のひずみ速度は比較的大 きく、せん断中に体積変化が許されない可能性がある。そこで、同一試料を用いて等体積せん断を行っ た結果を、定圧せん断の結果も併記して図4.5.8(c)に示す。定圧せん断時の体積膨張に対応し、等体積 せん断時にはせん断後半で垂直応力が増加、定圧せん断時よりもより大きなせん断応力が発揮される。 繊維状物を混入したケースでは、せん断中の垂直応力の増加が繊維状物の引張抵抗を高める相乗効果に より、砂単体の場合の数倍のせん断応力を発揮するに至っている。また水平変位とせん断応力の関係は より延性的になり、ひずみ硬化タイプ(下に凸)の挙動を取るに至る。実際の加振時の地盤挙動は定圧 と等体積の中間にあると考えられるが、繊維状物の混入が廃棄物層のせん断強度やひずみ依存性、靭性 (粘り強さ)を大きく変える事が明白であり、これが図参3に示した強震時挙動の違いをもたらしている 可能性がある。図4.5.8(d)にせん断時のストレスパスを示すが、繊維状物の混入は内部摩擦角を6度増加 させており、前述の図4.5.3に示した引張抵抗を考慮した円弧すべり計算の設定条件の妥当性を裏付け る。



図4.5.8 一面せん断試験の試料と結果

2) 非線形動的FEM解析

図4.5.9は、感度分析結果の中から図4.5.5の実験条件に最も近い条件での解析結果を、加振終了後の 残留水平土圧コンターにより比較したものである。図中に赤・オレンジで示したエリアは、残留水平土 圧<0、すなわち土えん堤と背面廃棄物層が剥離し、背面地盤内に主働崩壊が生じる領域を示している。 図4.5.9(a)の繊維状物無しのケースでは斜面全層に渡って背面で主働崩壊が発生し、これらが連続した すべり線を形成している。図4.5.9(b)では1段目土えん堤の背面に局所的な主働崩壊が生ずる(遠心載荷 実験でも観察された)以外、斜面下層には顕著な変状の発生は認められない。図4.5.10には、地震動終 了後の土えん堤と背面地盤の剥離状況を示しており(境界部にはジョイント要素が配置されており、剥 離には抵抗できない)、繊維状物を混入しない場合、土えん堤のすべてが解放面側に大きく変位して背 面地盤と剥離し、非一体的な挙動を取っている事が伺われる。





感度分析の結果を図4.5.11に示す。図4.5.9と同様、加振終了後の残留水平土圧コンターを横並べして 示し、前述の4要因の影響が分かるように配置している。各種要因の寄与の仕方を表4.5.1にとりまとめ た。図中、青の組み合わせは廃棄物斜面が安定、もしくは著しい不安定化を生じない領域に、黄色は廃 棄物斜面が不安定化に向かう領域を示している。

感度分析の結果によると、廃棄物斜面の地震時安定性に影響を及ぼす第一の要因は廃棄物の組成(繊

維状物質の混入度合い)であり、繊維状物を多量に含むほど斜面の安定性が向上する。繊維状物が多い ほど廃棄物地盤の密度が低く(慣性力が小さく)、同時に繊維状物の引張抵抗による地震時剛性のねば り強さ等が発揮され、これらの相乗効果によって土えん堤に加わる土圧が大きく低減することによる。 この場合、L1のみならずL2においても斜面の不安定化領域は限定的であり、全体崩壊には至らない。ま た斜面勾配の影響もあるにせよ、さほど顕著ではない。ただし、剛性の高い土えん堤との組み合わせで は、処分場斜面の表層付近において地震動の増幅が局所的に発生し、土えん堤背面に変状が生ずる可能 性があるため留意が必要である。



図4.5.11 土堰堤-廃棄物層斜面の地震時安定性に関する感度分析結果

| | ~~~~ | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------|------------------------|------|------|-------|-----|
| 廃棄物層の組成 | 堰堤の剛性 | 地 雪 動 | 斜面勾配の | | | | |
| 洗来13/1 1 9/10/13 | 「たんちの」「「」」 | | 影響 | | | | |
| | 剛性の喜い堰垾 | L1 | 小 | | | | |
| 繊維質混入量士 | 例1110761078次 | L2 | 小 | | | | |
| 咖啡貝加八里八 | 剛性の低い堰堤 | L1 | 小 | | | | |
| | 剛住の心い返啶 | L2 | 小 | | | | |
| 供纵使泪了星山 | 図をあった。「個相」 | L1 | 小 | | | | |
| 減粧貝加八里小 | 剛性の高い塩埞 | L2 | 大 1) | | | | |
| 雄雄每泪了星小 | 剛性の低い堰坦 | L1 | + ²⁾ | | | | |
| 藏雅貝加八里小 | 剛住の心い返啶 | L2 | | 3 | 斜面は安 | 定,もしく | は著 |
| 1) 勾配が急→主働 | 崩壊が深部に拡大 | | | | しい不安 | 定化は生 | じない |
| 2)1:1.5,1:1斜面: 大。1:2斜面:主働崩 | 勾配急かつL1→L2で 壊→表層すべりに崩 | : | 斜面は不 | 安定化に | 向か | | |
| | | | | | | | |

表4.5.1 感度分析結果

逆に繊維状物の混入がなく、かつ粘性土のような剛性の低い材料で造成された土えん堤との組み合わ せでは斜面の安定性が大きく低下し、特に斜面勾配が急になるほど、地震動が大きくなるほど急激に不 安定領域が拡大する(つまり、青の組み合わせに比べて斜面構造物としてのねばり強さ、レジリエンシ ーが不足する)。遠心載荷実験ではアクリル製の剛な土えん堤モデルを使用し、図4.5.9ではセメント改 良土の剛性を与えた土えん堤モデルの解析結果を参照した。この場合、遠心載荷実験で見られたような、 最終的には背面地盤が主働崩壊に至るような斜面不安定化メカニズムが卓越する。一方図33中に示すよ うに、粘性土のような低剛性材料で造成された土えん堤の場合、廃棄物層からの側方土圧に対して抗土 圧構造物として抵抗することが困難となる。緩斜面の場合であっても土えん堤自体が大きく変形、不安 定化し、むしろ簡易設計手法と同じような円弧すべりの形態で全体崩壊する可能性さえ示唆されており、 留意が必要である。

表4.5.1は、あくまで「斜面が不安定化に向かう条件の組み合わせ」を定性的に示すものであり、各処 分場の地震時安定性に対する個別の定量的評価は、対象処分場の規模や物性条件、地盤条件等を勘案し た同様な解析を実施することで可能となる。

研究目標達成度: 安定解析や遠心模型実験等の各種検討を研究計画以上に実施し、科学的根拠に基づ く埋立断面の合理的設計を提案していることから、当初目標以上に達成できた。

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

安定解析の結果から、現状の1:2勾配での設計は十分過ぎるほどの安全率を有しており、現場試験で得 られた最も小さい強度定数を用いて計算した場合であっても、1:1.8の斜面勾配で十分に高い安定性を 発揮できることを明らかにした。さらに、繊維廃材に由来する引張抵抗を考慮した場合、高さ30mの一様 斜面で、土えん堤上の小段を考慮しない厳しい条件でも、斜面勾配1:1.8で安全性が確保できているこ とを示した。データが不十分なため安全側で行われてきた設計法を合理化するための知見を提示してい る。

また、動的応答解析の結果から、地盤中に繊維廃材が存在する場合には、引張抵抗と上載荷重の寄与 により廃棄物一土えん堤全体の安定性が大幅に改善すること、廃棄物斜面の地震時安定性に影響を及ぼ す第一の要因は廃棄物組成であること等を明らかにした。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

現行の1:2勾配での処分場設計は過度に安全側である可能性が高く、1:1.8の斜面勾配で処分場断面を 設計することが合理的であると言える。勾配を高めることで、土えん堤のスリム化と廃棄物受入容量の 増大が実現できる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

山脇 敦:産廃振興財団NEWS, No. 88, Vol. 25, pp. 11-14 (2017)
 スリランカ国ミートタムッラ処分場廃棄物斜面安全性評価のための現地調査団に参加して

(2) 口頭発表(学会等)

特に記載すべき事項はない。

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施 特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 全国都市清掃会議(2010):廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領 2010改訂版
- 2) 日本道路協会(2012):道路土工 擁壁工指針(平成24年度版)
- 3) 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(2016):設計要 領第一集,土工 建設編,1.総則,3-4 設計に用いる土質定数.
- 4) 鉄道総合技術研究所(2017):鉄道構造物等設計標準・同解説 設計計算例,盛土・切土.
- 5) F. Koelsch (2009): Toolkit Landfill Technology, Chapter 4.6, Static Stability of Landfills, German Geotechnical Society(DGGT).
- 山脇 敦・土居洋一・大嶺 聖(2017):プラスチック等が混入した廃棄物地盤の強度特性と現場試験方法:土木学会論文集C(地圏工学), Vol. 73, No. 2, pp. 212-223.
- 7) 伊藤忠テクノソリューションズ:地盤・浸透・耐震統合解析システム SoilPlus
- 8) D. Zekkos, M. Kabalan, S.M. Syal, M. Hambright and A. Sahadewa (2013): Geotechnical characterization of a municipal solid waste incineration ash from a Michigan monofill, Waste Management, Vol. 33, pp. 1442–1450.
- 9) 国生剛治(1982):土の動的変形特使と地盤の非線形震動応答、電力中央研究所報告
- 10) 宮本慎太郎・安福規之・大嶺 聖・石蔵良平・川井晴至・山脇 敦(2015):組成割合の異なる埋 立廃棄物の変形・強度特性,土木学会論文集C(地圏工学), Vol.71, No.4, pp.278-291.

III. 英文Abstract

Test and Design Methods for Safe and Sustainable Inert Waste Landfills

Principal Investigator: Takeshi KATSUMI Institution: Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyo, Kyoto 606-8501, JAPAN Tel: +81-75-753-9205 / Fax: +81-75-753-5116 E-mail: katsumi.takeshi.6v@kyoto-u.ac.jp Cooperated by: Nagasaki University, Nagano Prefectural College, Japan Industrial Waste Management Foundation, Maeda Corporation

[Abstract]

Key Words: Inert waste landfill, Waste ground, Mechanical properties, Leachate quality, Test and design methods

This research aimed at establishing a technical manual about appropriate test and design methods for inert waste landfills, based on results of various on-site and laboratory experiments and numerical analysis.

The on-site experiments were conducted at 21 waste grounds in 9 inert waste landfills in Japan in the 3-year research period. For quick and easy measurement of on-site strength parameters, a portable cone penetration test and a spiral pile pull-out test were newly developed. From on-site and laboratory verifications, shear strength predicted from those simple tests showed a good agreement with that measured by direct shear test. Therefore, time needed for measuring shear strength of waste ground can be significantly shortened by applying the simple tests developed.

From column leaching tests, it was found that plastics over 10 cm in waste ground can significantly affect its seepage properties and leachate quality. Large plastics store infiltrated water inside waste ground, while small plastics help drainage from waste ground. Leachate quality from waste ground was worsened with a longer travel time of infiltrated water. However, installation of a clean soil layer beneath waste and mixing clean soil with waste could improve the leachate quality because of its sorption performance against chemicals.

The on-site experiments demonstrated that dry density of waste ground decreases with an increase in porosity, as same as general ground. The dry density of waste ground landfilled less than 5 years ago is relatively higher than that of waste ground landfilled more than 5 years ago because of compression and consolidation with time. Because of cushioning of compaction effort, inclusion of large plastics needs to be avoided for densification of waste as well. With an increase in the content of planar waste (e.g. plastics) and linear waste (e.g. fibers), the stiffness of waste ground decreased but the angle of repose increased. Cohesion and internal friction angle of waste ground could be roughly estimated by the simple bearing capacity test using "CASPOL (or CASPFOL)" and the angle of repose test, respectively.

The results of stability analyses demonstrate that the slope of 1:2, which is currently used for design, can be changed to 1:1.8 even when the minimum strength obtained by the on-site experiments was used for calculation. By adopting this slope angle for design of landfills, increase in capacity can be expected.

Based on these findings, a tentative version of "Test and Design Manual for inert waste landfills" was issued.