

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  
(K2402,) K2304, K22033

平成25年3月

(代表研究者)	山脇 敦	公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団
	島岡 隆行	九州大学大学院工学研究院
	勝見 武	京都大学大学院地球環境学堂
	大嶺 聖	九州大学大学院工学研究院
	川寄 幹生	埼玉県環境科学国際センター
	土居 洋一	NPO 最終処分場技術システム研究協会
	柴 暁利	同済大学
	川井 晴至	九州大学東アジア環境研究機構
	坂口 伸也	前田建設工業株式会社

補助事業名 環境研究総合推進費補助金研究事業（平成 22 年度～24 年度）

所 管 環境省

国庫補助金 55,619,000 円（3 年度の総計）

研究課題名 不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価

研究期間 平成 22 年 4 月 1 日～平成 25 年 3 月 31 日

代表研究者名 山脇 敦（公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団）

共同研究者名 島岡 隆行（九州大学大学院工学研究院）

勝見 武（京都大学大学院地球環境学堂）

大嶺 聖（九州大学大学院工学研究院）

川寄 幹生（埼玉県環境科学国際センター）

土居 洋一（NPO 最終処分場技術システム研究協会）

柴 暁利（同済大学環境科学与工程学院）

川井 晴至（九州大学東アジア環境研究機構）

坂口 伸也（前田建設工業株式会社）

	頁
総合研究報告書概要	1
本文	7
1. 研究背景と目的	7
1. 1 研究背景	7
1. 2 研究目的	7
2. 研究方法	8
3. 結果と考察	9
3. 1 文献及び事例調査結果	9
3.1.1 国内外の既存研究文献の整理結果	9
3.1.2 斜面崩壊事例の整理結果	10
3. 2 現場及び室内実験結果	14
3.2.1 安息角試験について	14
3.2.2 衝撃加速度試験（キャスポル）について	16
3.2.3 一面せん断試験について	18
3.2.4 現場土圧試験について	21
3.2.5 引張試験について	23
3.2.6 基礎実験結果について	23
3.2.7 試料サンプリング方法について	27
3. 3 実験結果のまとめ	29
3. 4 斜面安定性解析結果と斜面安定性評価法について	33
3. 5 堆積廃棄物の斜面安定特性	43
4. 結論	46
[巻末資料] 不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)	47
(1) 適用範囲	47
(2) わが国の不法投棄等現場で考えられる斜面崩壊のパターン	47
(3) 評価手順	49
(4) 概略評価方法	50
(4.1) 概略評価の基本事項	50
(4.2) 廃棄物種類及び原地盤の傾斜の有無による現場分類	52
(4.3) 安息角試験の方法と試験結果の利用方法	53
(4.4) 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	54
(4.5) 斜面安定解析の方法	56
(4.6) 堆積廃棄物の斜面安定性の概略評価方法	59
(5) 詳細評価方法	60
(5.1) 詳細評価の基本事項	60
(5.2) 一面せん断試験の方法と試験結果の利用方法	60
(5.3) 現場土圧試験の方法と試験結果の利用方法	61
(5.4) 引張試験の方法と試験結果の利用方法	63
(5.5) 斜面安定性評価方法	63
(参考) 整形断面について	64
(備考) 長期間堆積させる場合の留意事項	65
5. 参考文献	66
6. 研究発表	68
7. 知的財産権の取得状況	68
研究説明図	69
英文概要	70

## 環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書概要

- ・研究課題名＝不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価
- ・研究番号 ＝ (K2402,) K2304, K22033
  
- ・国庫補助金精算所要額 (円) ＝55,619,000 (3年度の総計)
  
- ・研究期間 (西暦) ＝平成 22 年 4 月 1 日～平成 25 年 3 月 31 日
  
- ・研究代表者名＝山脇 敦 (公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団)
  
- ・研究分担者名＝島岡 隆行 (九州大学大学院工学研究院)、勝見 武 (京都大学大学院地球環境学学)、大嶺 聖 (九州大学大学院工学研究院)、川寄 幹生 (埼玉県環境科学国際センター)、土居 洋一 (NPO 最終処分場技術システム研究協会)、柴 暁利 (同済大学)、川井 晴至 (九州大学東アジア環境研究機構)、坂口 伸也 (前田建設工業株式会社)

### ・研究目的

公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団 (以下、財団という) では、産業廃棄物の不法投棄等現場の生活環境保全上の支障やそのおそれ (以下、支障等という) の除去を都道府県等が投棄行為者等に代わって実施する場合の都道府県等への支援事業 (廃棄物処理法及び産廃特措法に基づく事業) を平成 10 年度から行っている。この支援事業で、堆積廃棄物崩壊による支障等があった事案は平成 22 年度末までに 16 件もあった。さらに、平成 22 年度末で依然全国に約 1,800 万 t の産業廃棄物の不法投棄等が残存しており、この中にも急勾配に盛られ崩壊の危険にある現場が多数存在し、早急な対応が望まれている。

これらの憂慮すべき現状を受け、本研究は、堆積廃棄物の土質工学的特性を踏まえて適切に堆積廃棄物の斜面安定性評価を行えるようにすることで、社会的な課題である残存不法投棄等現場の適切かつ経済的な支障除去の推進に資することを目的とするものである。

### ・研究方法

3 カ年の研究方法は以下の①～⑦のとおり。国内 7、海外 2 の計 9 現場での実験や採取試料による室内実験等を行って、堆積廃棄物の斜面安定性評価方法を提示した。

#### ①研究文献の整理

国内及び諸外国の関連研究文献の収集・整理と課題の抽出。

#### ②廃棄物斜面崩壊事例や崩壊のおそれのある事案の資料整理・現地調査

文献資料による国内外の崩壊事例調査、崩壊のおそれのある国内不法投棄等現場の調査、調査結果をもとにした崩壊原因や廃棄物の種類、組成、堆積状態等の整理。

#### ③現場での載荷・崩壊実験

表 1 に示す国内外での載荷・崩壊実験の実施。廃棄物層の安定性や崩壊メカニズム等の把握。

#### ④不法投棄等廃棄物を用いた強度実験等

国内外 9 現場等での表 1 に示す各種強度実験等の実施。試験・試験結果をもとにした種々の堆積廃棄物層の強度特性や適切な強度定数( $\phi$ : 内部摩擦角、 $c$ : 粘着力 等)の求め方に関する研究。

#### ⑤土質力学に基づく斜面安定性評価方法の検討

③、④の結果により把握した堆積廃棄物と通常の地盤材料との違いをもとに、堆積廃棄物の特性をふまえた斜面安定性評価方法について土質力学をベースに研究。

#### ⑥種々の堆積廃棄物の特性に応じた斜面安定性評価方法のあり方の検討

堆積廃棄物特有の条件をふまえた強度定数の与え方や斜面安定性評価方法に関する研究。

⑦不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価方法の提示（マニュアル化）

①～⑥の結果を整理し、不法投棄等現場の堆積特性別の斜面安定性評価方法を提示。

表1 強度実験等の実施項目と目的

実験・試験項目	実験・試験の概要と目的
載荷・崩壊実験	堆積廃棄物層の斜面安定性や崩壊メカニズムを探ることを目的に行う現場実験。（国内1箇所、海外1箇所で開催）
安息角試験	不法投棄等現場の安定斜面勾配判断のために新たに提案するもの。現場試験により適用性を確認する。（国内外9現場で実施）
衝撃加速度試験（キャスポル）	国土交通省近畿地方整備局が開発した簡易地盤強度測定法。現場試験により不法投棄等現場への適用性を確認する。（国内外9現場で実施）
一面せん断試験	地盤のせん断強度測定のための試験法。不法投棄等現場向けのポータブル試験機を作成して、現場試験等により適用性を確認する。（国内外7現場で実施）
現場土圧試験	不法投棄等現場のせん断強度を比較的容易に計測することを目的に新たに提案するもの。現場試験等により適用性を確認する。（国内3現場で実施）
引張試験	ブラウンシュバイク工科大学のケルシュが開発した試験法。国内用に小型の試験機を作成し、適用性を確認する。（室内試験）
その他、基礎実験等	堆積廃棄物層の基礎的挙動を探ることを目的とした試験、実験。（現場引抜試験、室内引抜試験、大型土圧試験、非破壊試験等）

・結果と考察

(1) 研究文献の整理結果

国内での関連研究が極めて少ないなかで、関連する海外の都市固形ごみ(MSW)層の力学研究文献等を収集整理した。その結果、海外の研究者は、ごみ層の斜面安定性評価のための強度算定は土質工学的アプローチで可能とみていること、せん断強度の構成要素には都市固形ごみに含まれる繊維質（プラスチック類等）による引張抵抗もあること、ごみ層の強度（せん断抵抗）の試験方法としては、一面せん断試験が一般的に適すとみられていることなどを確認した。

都市固形ごみ層の斜面安定性評価式としては、ドイツ・ブラウンシュバイク工科大学のケルシュ(Koelsch)<sup>9)</sup>が廃棄物の引張抵抗を考慮した極限平衡式を次のとおり示している。

$$T = (G \cdot \tan \phi + c \cdot b + G \cdot \tan \zeta \cdot \sin(1.5 \theta)) / (\mu \cdot \sin \theta \cdot \tan \phi + \cos \theta) \quad \dots \dots (1) \text{式}$$

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)、 $\mu$ ：安全率(Fs)の逆数、

安全率(Fs)：すべり面に沿って斜面が極限平衡状態になるようにせん断強度定数を低減させる係数、

b：すべり面長(m)、 $\phi$ ：内部摩擦角(°)、c：粘着力(kN/m<sup>2</sup>)、 $\theta$ ：すべり面の傾斜角(°)、 $\zeta$ ：引張抵抗角(°)

(2) 廃棄物斜面崩壊事例や崩壊のおそれのある事案の資料整理・現地調査の結果と考察

文献調査により国内1件（不法投棄等現場）、海外16件（都市固形ごみ埋立地等。くず鉤堆積地は除く）の崩壊事例について調べた。その結果、崩壊は、廃棄物層の斜面勾配が15°～20°の緩勾配でも多数発生し斜面勾配が崩壊の決定的な要因にはなっていない、崩壊した全17事例で大量降雨や内部水位の上昇など何らかの形で水による影響が崩壊原因にあげられている、地震による崩壊は世界的にも確認されていない（ただし、くず鉤事例では散見される）、低密度埋立が崩壊要因として指摘される例が少なくない、といったことが分かった。

わが国の不法投棄等現場で崩壊がほとんど発生していない要因として、(4)の強度実験の結果から、海外の都市固形ごみ埋立地や盛土地盤に比べ、不法投棄等現場が崩壊力に対して非常に大きな摩擦抵抗を有することがあげられ、これは、不法投棄等現場では行為者がより受入量を増やそうとして良く締固めていること、コンクリートがら等の重量物を含み、生ごみ等の高水分量の廃棄物がほとんど無いことなどによる。

(3) 現場での載荷・崩壊実験の結果と考察

わが国の不法投棄等現場と廃棄物性状が類似した上海市廃棄物老港処理場内の区画で写真1のとおり、従来の土質力学に基づく円弧すべり法解析で安全率(Fs)が0.6となる崩壊が想定された斜面を構築して、載荷実験を行った。載荷後、斜面の両側面及び背面を掘削し、背面から10m<sup>3</sup>の注水、背面からのバックホウによるプッシュを行ったが、斜面の崩壊はもとより変位も生じなかった。このことから、従来の土質工学に基づく斜面安定解析法では、明らかに廃棄物層の斜面安定性を過小評価していること



写真1 載荷実験(斜面高9m,勾配63.5°,載荷重8.6 kN/m<sup>2</sup>)

がわかった。

斜面崩壊現象の把握のために、国内不法投棄等現場で写真2に示すとおり、天端から約0.8mを残しその下をバックホウで矩形トンネル状にゆっくり掘削した。



写真2 不法投棄等現場（中部地方）での崩壊実験  
（左写真：矩形トンネル状の掘削 右写真：崩壊後）

その結果、約0.9m掘り進んだところで急激な変位が生じ崩壊した。このとき廃棄物層の崩壊部に働いた引張

応力は  $34 \text{ kN/m}^2$  で、室内引張試験で堆積厚5m相当の鉛直荷重で得られた引張応力を上回った。崩壊は、通常の土のように鉛直方向ではなく、 $40^\circ$ の角度で流れ落ちるように崩壊した。これは繊維状物等の引張抵抗に起因していると考えられ、繊維状物等を有する廃棄物層の崩壊は、引張抵抗が働きにくくなる繊維の主方向である水平方向に近くなるよう、比較的緩い勾配で生じやすいことが示唆された。

#### (4)不法投棄等廃棄物を用いた強度実験等の結果と考察

##### ①実験結果について

不法投棄等現場の斜面安定性をみるために、安息角試験、衝撃加速度試験(呼称：キャスポル<sup>44)</sup> <sup>45)</sup>、一面せん断試験、現場土圧試験、引張試験等を行った。このうち、安息角試験と現場土圧試験は不法投棄等現場用に新たに開発した試験法であり、一面せん断試験と引張試験はわが国に適するようにポータブル化、小型化した試験機を作成して行ったものである。国内外9現場で行った主な強度実験結果を表2に示す。

表2 主な強度実験結果

現場名	現場種類	廃棄物種類 ( )内：プラ類の重量比	一面せん断試験結果		停止安息角(°)	現場法面勾配(°)	引張試験結果 $\tau$ (°)
			$\phi$ (°)	$c$ ( $\text{kN/m}^2$ )			
関東①	不法投棄等現場	繊維状物等 (16%)	46	3	50	40~62、90(表層崩壊)	18
中部①	不法投棄等現場	繊維状物等 (6%)	51	4	45~52	40~60(クラック発生)	----
中部②	不法投棄等現場	繊維状物等(容積比50%)	(47) <sup>注1)</sup>	(3) <sup>注1)</sup>	45	24~25	----
九州	不法投棄等現場	土砂分主体 (ほぼ0%)	45	3	44	30~42	----
関東②	不法投棄等現場(管理型処分場)	土砂分主体 (2%)	----	70以上	(35) <sup>注2)</sup>	30(当初計画勾配で埋立)	----
関西	一般廃棄物処分場(斜面崩壊地)	土砂分主体 (ほぼ0%)	----	----	36	40(表層崩壊場所の勾配)	----
東北	震災廃棄物仮置場	篩下残渣 (0.4%、木6%)	47	11	40	38~42	----
中国・上海	都市ごみ埋立地	繊維状物等 (16%)	33~43	6~4	(45) <sup>注2)</sup>	42~53	----
ジャカルタ	都市ごみ埋立地	繊維状物等 (未調査：生ごみ等、水分多い)	----	----	36~40	約40	----

注1) 「一面せん断試験結果」の( )内は、現場土圧試験による結果。

注2) 「停止安息角」の( )内は、本報告書で定めた試験法によらない、廃棄物の積み上げ勾配。

一連の実験により国内の産業廃棄物不法投棄等現場は通常の盛土地盤に比べ高い強度定数を有していることを確認した。内部摩擦角( $\phi$ )や停止安息角<sup>43)</sup> (盛りこぼしを含む角度)は、砂がおおよそ $30^\circ$ であるのに対し、表2に示した国内不法投棄等現場では、プラスチック等の繊維状物等を含む現場の場合は $45^\circ$ 以上、土砂分主体の現場でも $35\sim 45^\circ$ と非常に大きな値を示した。要因として、不法投棄等現場では投棄量を増やすため良く締め固められていることや、がれき等による噛み合わせ効果によるものと考えられる。また、繊維状物等を含む現場は土砂地盤には無い引張抵抗を有し弾性的挙動を示す。引張抵抗は、図1のとおり、不法投棄等現場の繊維状物の主方向が水平方向であることから、すべり面のうち垂直に近い部分で良く働き、これが廃棄物斜面が非常

一面せん断試験により $\phi$ 、 $c$ を計測

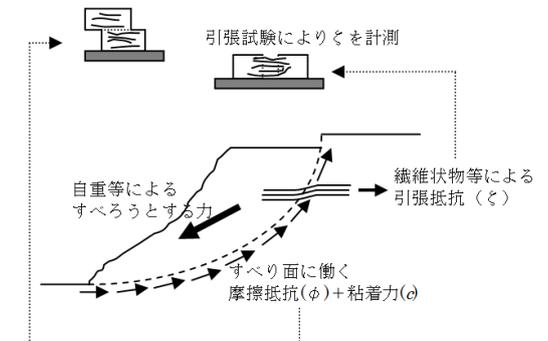


図1 繊維状物等を含む現場での斜面崩壊モデル

図1のとおり、不法投棄等現場の繊維状物の主方向が水平方向であることから、すべり面のうち垂直に近い部分で良く働き、これが廃棄物斜面が非常

な急勾配で安定することに大きく寄与している。

また、廃棄物層の水分量が飽和状態に近くなるまでに増加するとせん断抵抗が低下することを室内実験で確認した。わが国の不法投棄等現場では水分を多く含む廃棄物が少なく、このことが一方でわが国の廃棄物層の大規模崩壊がほとんど無く、他方で東南アジア等の生ごみ等の埋立地で多発している一つの原因と考えられる。

②斜面安定性評価のための試験法について

一面せん断試験のφと安息角試験から得られた停止安息角は、各現場ではほぼ同じ値をとった。また、これら試験値は、不法投棄等現場で形成されている急勾配斜面の勾配とほぼ同じ値であった。このことから、各試験の不法投棄等現場への適用性と、停止安息角が概略検討段階でφの代替として活用できることが窺えた。さらに、原地盤が平地の場合の不法投棄等現場での表層崩壊やクラックの発生は、いずれも停止安息角以上の急勾配部で発生していることや、安息角の現場確認実験（重機による载荷実験）の結果から、停止安息角が安定斜面勾配の判断指標になり得ることを確認した。また、キャスポル試験によって現場内の部分的な強度の弱い場所や締固めが不十分な場所の特定が可能になることが推察された。提案した主な試験法を図2に示す。

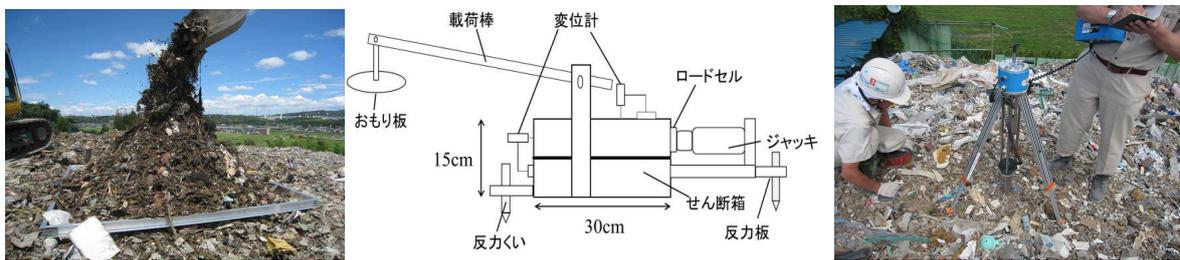


図2 「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」に示した主な試験法  
(左：新たに提案した安息角試験 中：作成した現場一面せん断試験機 右：衝撃加速度試験)

(5) 堆積廃棄物の斜面安定性の解析・評価方法の検討

ケルシュの引張抵抗を考慮した(1)式により、実験9現場を対象として円弧すべり法による斜面安定解析を行った。関東①現場での計算結果は図3であるが、引張抵抗(ζ)を考慮することにより、堆積廃棄物層が90°の直壁で安定していることが説明可能となる。他の現場の解析結果でも現場の状況を良く表しており、わが国の不法投棄等現場に適用できることを確認した。

また、不法投棄等現場の特性をふまえて(2)式に示す簡易評価式（無限長斜面法で引張抵抗を考慮し粘着力を無視したもの）を新たに提案し、試算の結果、(1)式による円弧すべり計算とほぼ同様の安全率が得られ、不法投棄等現場用の簡易評価式として適用性が高いことを確認した。

$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \theta} + \frac{\tan \zeta \cdot \sin(1.5\theta)}{\sin \theta \cdot \cos \theta} \quad \dots \dots (2)式$$

ここに、Fs：安全率、 その他変数：(1)式と同じ

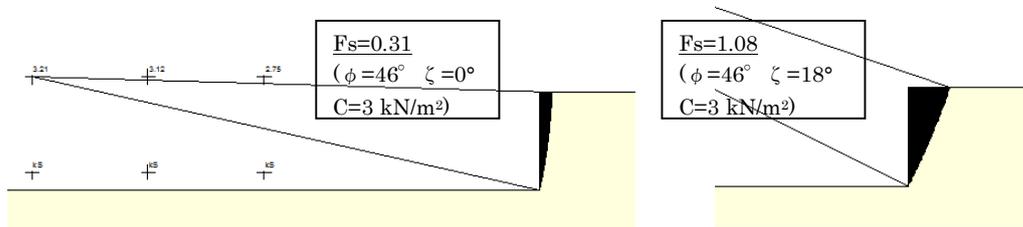


図3 円弧すべり解析による斜面安定解析結果(関東①現場)  
左図：従来解析法(引張抵抗なし) 右図：引張抵抗考慮 (計算は、GGU-STABILITY VERSION9<sup>52</sup>)による)

(6) 堆積廃棄物の特性に応じた堆積廃棄物の斜面安定性評価方法の提示

研究結果を整理し、表3に示す構成の「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」を本報告書の巻末に添付資料として提示した。マニュアル案には、行政等による迅速な一次的な判断が可能になる概略評価と、対策立案等のため必要な詳細評価とに分けて示した。同マニュアル案で示した現場

分類と強度定数の目安値を表4に、繊維状物等を含む現場での斜面整形の参考断面を図4に示す。わが国の不法投棄等現場の廃棄物層は概して非常に高いせん断強度を有しており、廃棄物層内のすべりよりも、谷地等の傾斜地上での廃棄物層の一体的なすべりや地すべり地帯等での原地盤のすべり、水の集中的な浸透等の水に起因したすべりに注意する必要がある。

表3 「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」の構成

(1) 適用範囲 (2) わが国の不法投棄等現場で考えられる斜面崩壊のパターン (3) 評価手順 (4) 概略評価方法 ・現場分類、安息角試験方法、衝撃加速度試験方法、斜面安定解析方法、概略評価方法 (5) 詳細評価方法 ・一面せん断試験方法、現場土圧試験方法、引張試験方法、斜面安定性評価方法 (参考) 整形断面について (備考) 長期間堆積させる場合の留意事項	①安息角を上回る急傾斜斜面での表層崩壊 ②谷地等の傾斜地上に堆積した廃棄物層の大雨時等における大規模崩壊 ③谷地等の傾斜地上の堆積地での原地盤(下層土)のすべり ④廃棄物層内への水の集中的な浸透に起因したすべり ⑤生ごみ等の水分や降雨、その他崩壊要因による廃棄物層内でのすべり(主に海外事例)
---	--

表4 不法投棄等現場の斜面安定評価上の現場分類と強度定数の目安値

現場分類	現場特性	斜面安定評価方法	概略評価時に用いる強度定数の目安値		
			c (kN/m <sup>2</sup> )	φ (°)	ζ (°)
大型がれき、角材等の粗大物主体	小規模不法投棄等(最大高さ10m程度)	現場評価	安息角試験等により評価		
繊維状物等混入多(粗大物少)	急傾斜大規模不法投棄等になり得る	引張抵抗を考慮した廃棄物層の安定評価	0~5	40 <sup>注1)</sup>	10~15(0~10) <sup>注2)</sup>
細粒分主体(プラ、繊維分あり)	小規模不法投棄等(最大高さ10m程度)	引張抵抗を考えない廃棄物層の安定評価	0~5	35 <sup>注1)</sup>	-----
土砂分、がれき主体(プラ等ほぼ無し)	土砂特性。燃え殻等で固結化の場合あり	既往土質工学に基づく評価法	「道路土工-盛土工指針」等による		

注1) 安息角試験による値を用いることが基本。  
 注2) ( )内は、締固め不十分等の場合。

【安定計算結果】  
 最小安全率  $F_s=1.41$   
 ((2)式による  $F_s=1.44$ )  
 【安定計算条件】  
 ・廃棄物地盤の強度定数  
 $c=3 \text{ kN/m}^2$   $\phi=40^\circ$   
 $\zeta=15^\circ$   $\gamma=9 \text{ kN/m}^3$   
 ・地下水なし  
 ・震度なし  
 ・ビショップ法により引張抵抗考慮  
 ・計算は、  
 "GGU-STABILITY Version.9"<sup>52)</sup>による

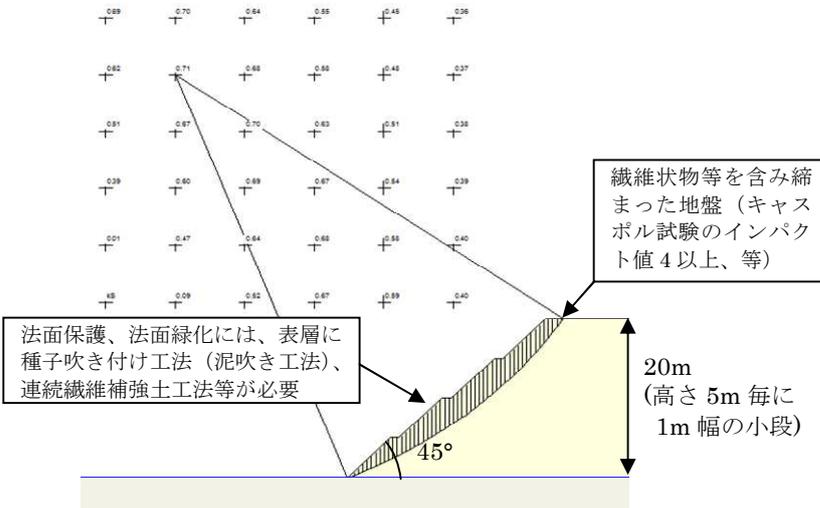


図4 繊維状物等を含む不法投棄等現場での整形断面参考図

(景観上の問題がある場合等で45°勾配が難しいときは、現場特性に応じて法勾配を設定する)

・環境政策への貢献

(1) 堆積廃棄物の斜面安定性の迅速かつ適切な評価

研究成果として提示した「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」には、行政が自前で実施できる簡易な斜面安定性評価法(概略評価)を示した。平成22年度末で依然全国に約1,800万tの産業廃棄物不法投棄等が残存するなかで、対策が必要な現場の迅速な見極めが求められている。本成果により、行政による堆積廃棄物の斜面安定性の迅速な判断が可能になる。

(2) 調査・解析の経済的な委託

これまで、堆積廃棄物の斜面安定性評価法については、現地調査法や安定解析法が確立されていない状況にあった。このため不法投棄等現場の斜面安定対策を講じようとした場合には、現場が実験フィールドのようになり、種々の現場試験や解析がやみくもに実施されるようなケースがあった。研究成果として提示した「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」を活用することにより、経済的な現場調査・解析が可能になり、地質調査会社、コンサルタント等への委託費用の大幅な削減が期待できる。

また、比較的安価でかつ適切に強度定数等を把握できる新たな現場試験法として、「安息角試験」、「衝撃加速度試験（呼称：キャスポル試験）」、「一面せん断試験」、「現場土圧試験」を示しており、こうした試験の活用により自治体の地質調査会社等への委託費用の削減が期待できる。

### (3) 効果的・経済的な斜面安定対策の実施

これまで、不法投棄等現場で斜面安定対策を講ずる場合は盛土の安定勾配にならって 1:2 勾配（約 27°）や、それよりも緩い勾配で整形されることがほとんどであった。本研究により斜面安定性評価を行うことにより、プラスチック等を含む一般的な不法投棄等現場ならば、1:1 勾配（45°）でも斜面安定が説明されるようになる。したがって、行政代執行により投入される対策工事費の大幅な削減が可能になる。過去には、斜面掘削・整形に 20 億円以上を投じた案件もあり、今後も規模の大きい事案であれば 1 事案で億単位の費用削減効果が生まれる可能性がある。

### (4) 処分場設計や廃棄物地盤利用時における研究成果（廃棄物地盤の力学特性）の応用

本研究では、これまで知見がほとんど無かったプラスチック等の繊維状物等を含む廃棄物地盤の強度特性や、その評価方法を示すことができた。繊維状物等を含む廃棄物地盤は、弾性体的挙動を示すとともに、高い斜面安定性（せん断強度特性）を示す。例えば、プラスチック等を含む安定型処分場の設計や、未利用廃棄物地盤に重量物を設置しようとする場合等、廃棄物力学を必要とする際に、本研究成果を応用することにより、経済的な設計等に資することが期待できる。

## ・研究成果の実現可能性

本研究は、実際に斜面崩壊のおそれがある不法投棄等現場で実験を行って斜面安定性評価方法を提示したものであり、実験現場の所管自治体では、既に実験結果を対策立案上の参考資料として役立てている。

研究成果として提示した「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」には、行政で活用しやすいことを前提に、簡易な調査・評価法も示しており、平成 22 年度末で依然全国に約 1,800 万 t の産業廃棄物不法投棄等が残存しているなかで、本成果が行政で広く活用されることが見込まれる。

さらに、不法投棄等事案の他にも、本研究の中間成果を入手した自治体から、震災廃棄物の仮置場の斜面勾配を設定するために活用したいとの相談や、新規に設置する安定型処分場の斜面勾配設定のために活用したいという相談も受けており、各方面での成果活用が期待できる。

## ・結論

一連の実験により国内の産業廃棄物不法投棄等現場は通常の盛土地盤に比べ高い強度定数を有していることを確認した。要因として、不法投棄等現場では投棄量を増やすため良く締め固められていることに加え、がれき等による噛み合わせ効果やプラスチック等による引張抵抗によることを把握した。また、プラスチック等の繊維状物等を含む現場と含まない現場とは強度特性が異なり、繊維状物等を含む現場は土砂地盤には無い引張抵抗を有し弾性体的挙動を示す。

研究成果として、繊維状物等の有無等により現場分類し、各々に対応した斜面安定性評価法を示した。試験方法として、新たに安息角試験、現場土圧試験を開発しその有効性を確認したとともに、一面せん断試験、引張試験等と併せて斜面安定性評価に必要となる一連の試験を提示した。斜面安定解析については、引張抵抗を考慮することで現場の状況を良く表す結果を得た。また、不法投棄等現場の特性をふまえて、新たに簡易評価式を提案し適用性を確認した。これらの成果をまとめ、「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」として本報告書巻末に提示した。

地震振動に対する廃棄物地盤挙動の検証、降雨浸透による細粒分連行や帯水の可能性等と強度との関係の検証、地盤中のプラスチック等の物理・化学的な長期安定性の検証は、今後の研究課題である。

# 本文

## 1. 研究背景と目的

### 1. 1 研究背景

堆積廃棄物の斜面安定性については、確立した評価方法が無い状況にあるため、土質力学に基づく地盤の斜面安定性の評価方法（円弧すべり解析等）を援用するなどして類推しているのが現状である。このような中で、本研究は、廃棄物堆積現場での載荷・崩壊実験等により、堆積廃棄物の崩壊現象を把握し、土質力学をベースに研究を行う。つまり、従来の土質力学的手法により評価可能な場合における堆積廃棄物の土質力学定数の与え方や、堆積廃棄物特有の条件を加味する必要がある場合における対応した新たな定数の与え方や斜面安定性の評価方法について提案を行うものである。

公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団（以下、「財団」という）では、不法投棄等現場の生活環境保全上の支障やそのおそれ（以下、「支障等」という）の除去を都道府県等が投棄行為者等に代わって実施する場合の都道府県等への支援事業（廃棄物処理法及び産廃特措法に基づく事業）を平成 10 年度から行っている。この支援事業で、堆積廃棄物崩壊のおそれがあつた事案は平成 22 年度末までに 16 件もあつた。さらに、平成 22 年度末で依然全国に約 1,800 万 t の産業廃棄物の不法投棄等が残存しており、この中にも急勾配に盛られ崩壊の危険にある現場が多数存在し、早急な対応が望まれている。

### 1. 2 研究目的

本研究は、産業廃棄物の不法投棄等の不適正処分（以下、「不法投棄等」という）のうち、堆積廃棄物の斜面崩壊の危険がある現場を対象として、崩壊の危険性（斜面安定性）についての評価方法を研究、開発しようとするものである。図 1.2.1 に研究の概要を示す。

本研究は、堆積廃棄物の地盤工学的特性を踏まえて適切に堆積廃棄物の斜面安定性評価を行えるようにすることで、社会的な課題である残存不法投棄等現場の適切かつ経済的な支障除去の推進や合理的な現場管理（危機管理）に資することを目的に行ったものである。とくに、廃棄物堆積現場の斜面安定性については、盛土斜面に比べ安定性が一般的に高いことが現場経験的に知られているところであり、堆積廃棄物のこのような斜面安定性を科学的に示して、斜面安定性評価方法をマニュアル化してとりまとめることを具体的な目的とした。さらに、アジア地域にも同様の現場は多数存在し、海外への技術移転も期待できる。

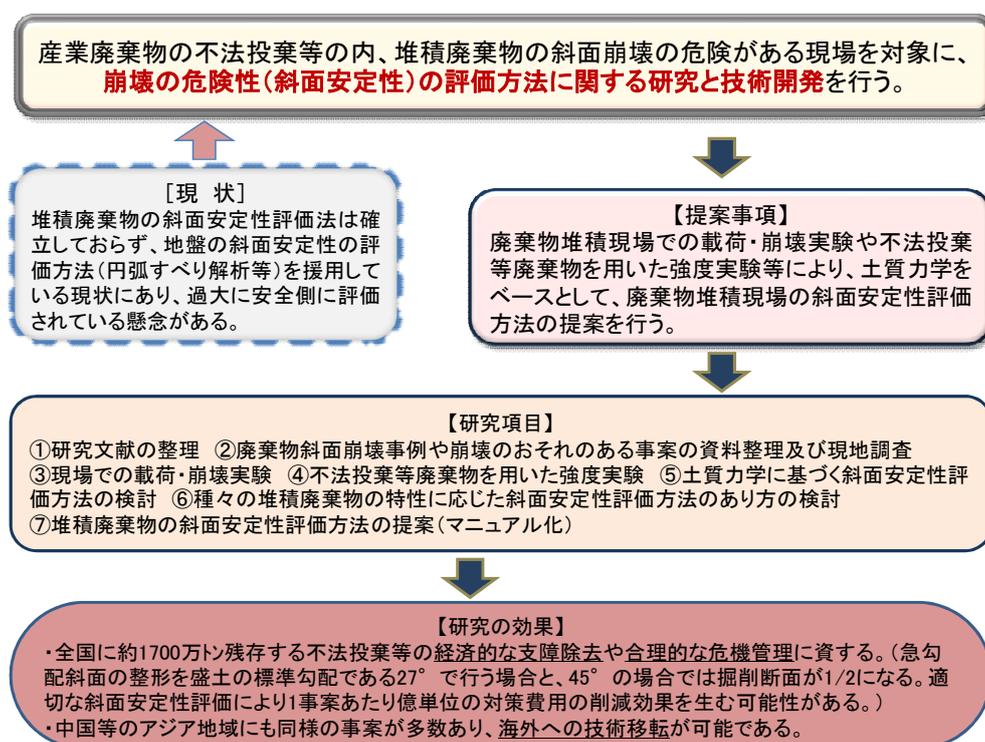


図 1.2.1 研究（3年計画）の概要

## 2. 研究方法

### (1) 全体研究計画

全体3ヵ年の研究項目は次のとおり。各研究項目の概要を示した研究フローを図2.1.1に示す。

- ① 研究文献の整理
- ② 廃棄物斜面崩壊事例や崩壊のおそれのある事案の資料整理・現地調査
- ③ 現場での載荷・崩壊実験
- ④ 不法投棄等廃棄物を用いた強度実験
- ⑤ 土質力学に基づく斜面安定性評価方法の検討
- ⑥ 種々の堆積廃棄物の特性に応じた斜面安定性評価方法のあり方の検討
- ⑦ 堆積廃棄物の斜面安定性評価方法の提示（マニュアル化）

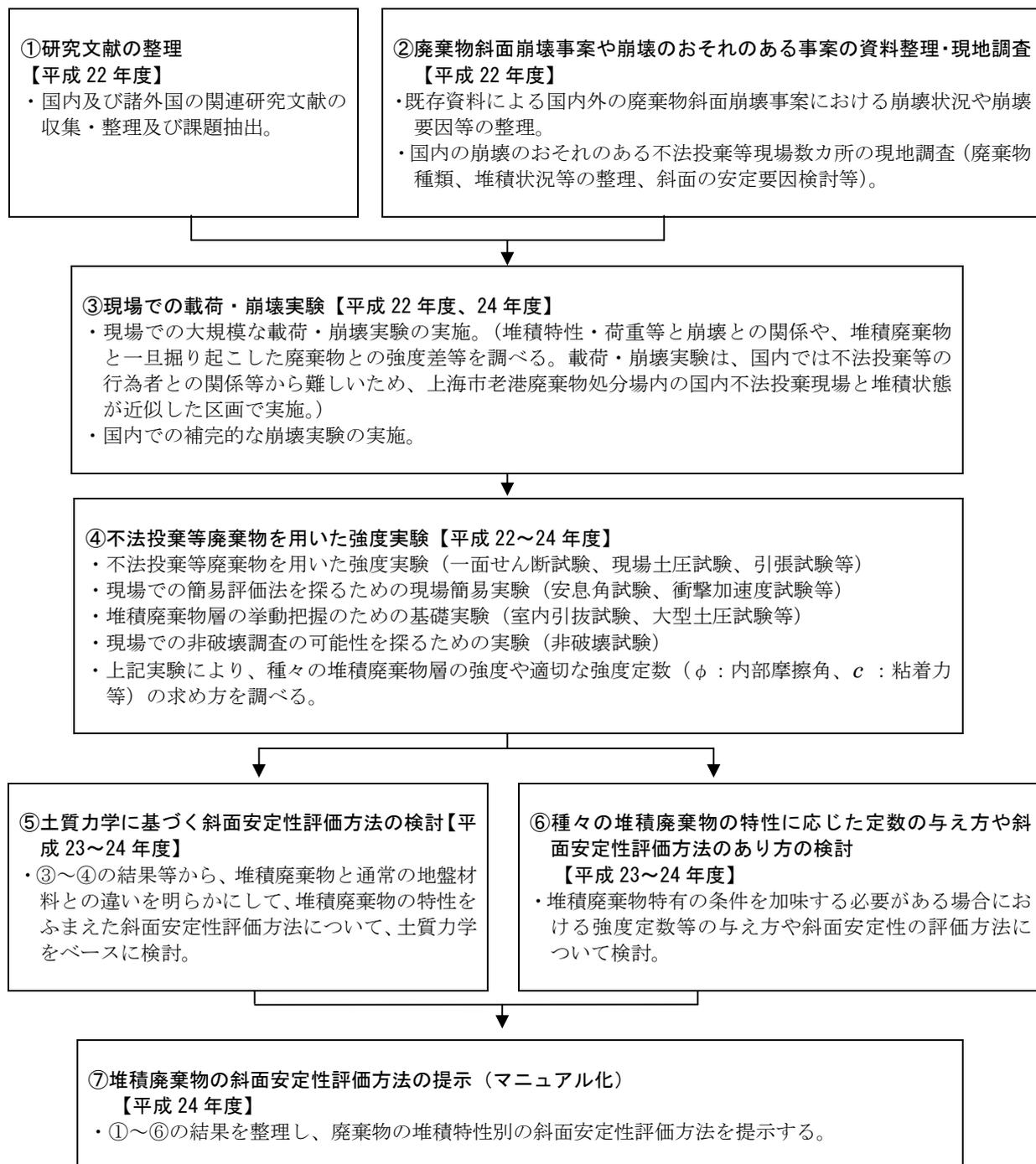


図 2.1.1 研究の全体フロー

## (2) 研究の実施方法

斜面崩壊のおそれが指摘されていた国内産業廃棄物不法投棄等現場 5 箇所その他、斜面表層が崩壊した一般廃棄物処分場 1 箇所、震災廃棄物の篩下残渣のストック場所 1 箇所（篩下残渣による不法投棄等現場と性状が類似）、海外 2 現場の計 9 現場で一連の実験を行った。さらに、国内の一部現場からは廃棄物試料を採取し、九州大学内で強度把握のための補完的実験や、廃棄物層の基本的特性を把握するための基礎実験を行って、斜面性評価方法を提示した。

表 2.1.1 実験・研究の実施事項と実施方法

実施事項	実施方法
研究文献の整理	・国内外の関連研究 25 文献の収集・整理
斜面崩壊事例の調査	・国内外の大規模崩壊 17 事例の文献調査
載荷・崩壊実験	・上海市老港廃棄物処分場内の国内不法投棄現場に類似した区画での載荷・崩壊実験（国内での実施が難しいため） ・中部①現場内での崩壊実験
一面せん断試験 [強度実験]	・試験機製作 ・関東①、九州、関東②、中部①、中部②の産業廃棄物不法投棄等現場、東北篩下残渣堆積地、上海処分場の計 7 現場で実験 ・九州大学内での関東①現場及び九州現場の試料を用いた室内実験
現場土圧試験 [強度実験]	・試験機製作 ・中部①、中部②、東北の計 3 現場で実験
現場引抜試験 [現場簡易実験]	・関東①の産業廃棄物不法投棄等現場で実験
安息角試験 [現場簡易実験]	・試験方法設定 ・全現場実験場所（上海、関東①、九州、関東②、中部①、中部②、関西、東北、ジャカルタ近郊埋立地の計 9 現場）で実施
重機による法肩載荷実験 [確認のための簡易実験]	・中部②、東北現場で、安息角の妥当性確認のために実施
衝撃加速度試験（呼称：キヤスポル） [現場簡易実験]	・全現場実験場所（9 現場）で実施
FWD(重錘落下)試験 [現場簡易実験]	・中部②で、衝撃加速度試験との比較のために実施
室内引抜試験 [基礎実験]	・九州大学内での関東①現場の試料を用いた室内実験
大型土圧試験 [基礎実験]	・九州大学内での関東①現場の試料を用いた室内実験
非破壊試験	・関東①、九州、関東②現場で実施
斜面安定解析	・現場実験場所を対象に、Koelsch の式、及び無限長斜面法に基づく簡易式により試算
斜面安定性評価方法の検討	・上記研究結果をもとに検討

## 3. 結果と考察

### 3.1 文献及び事例調査結果

#### 3.1.1 国内外の既存研究文献の整理結果

堆積廃棄物の斜面安定性評価に関する研究は、都市固形ごみに関してドイツ、米国、英国で主に行われており、これらの論文の整理結果等から、各国の研究者は総じて次のようにみていることを把握した。

#### ① 都市固形ごみ層の力学的特性や試験方法について

- ・ごみ層の斜面安定性評価等のための強度算定は土質工学的アプローチで可能<sup>1)5)7)</sup>。
- ・変位が大きくなってもせん断破壊が生じにくいなど、ごみ層は土層と比較して、弾性的挙動を示す<sup>5)6)</sup>。
- ・せん断強度の構成要素には、都市固形ごみに含まれる繊維質（プラスチック類等）による引張抵抗もある<sup>1)3)7)</sup>。
- ・せん断強度には都市固形ごみに含まれる繊維質の方向により強度が異なる異方性が存在することや、密度の増加に応じてせん断強度が増すことが窺える<sup>1)10)11)12)15)22)</sup>。
- ・ごみ層の強度（せん断抵抗）の試験方法としては、一面せん断試験が一般的に適する<sup>1)2)11)</sup>。

#### ② 斜面安定性評価方法について

都市固形ごみ層の斜面安定性評価は、現状で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）によりなされている。例えば、ドイツの Koelsch<sup>1)</sup>は廃棄物の引張抵抗を考慮した極限平衡式を次のとおりに示している。

$$T = (G \cdot \tan \phi + c \cdot b + G \cdot \tan \zeta \cdot \sin(1.5 \theta)) / (\mu \cdot \sin \theta \cdot \tan \phi + \cos \theta)$$

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)、 $\mu$ ：安全率(Fs)の逆数、  
b：すべり面長(m)、 $\phi$ ：内部摩擦角(°)、c：粘着力(kN/m<sup>2</sup>)、 $\theta$ ：すべり面の傾斜角(°)、 $\zeta$ ：引張抵抗角(°)

### 3.1.2 斜面崩壊事例の整理結果

#### (1) 国内外の堆積廃棄物層の大規模斜面崩壊事例について

国内の産業廃棄物不法投棄等現場で大規模な斜面崩壊が確認されているのは、平成10年以前に中部地方の山中斜面(勾配20~30°)に斜面上方から産業廃棄物を大量投棄され多量降雨時に谷上を廃棄物層が一体的にすべり落ちた事例が1件あるのみである。

海外での堆積廃棄物の崩壊状況について、南アフリカのG.E.Blight (University of the Witwatersrand)ら<sup>27)</sup>が、1928~2000年に発生した世界の22例のくず鉱(tailings, coal waste等)及び都市固形ごみ(MSW)の堆積場所での大規模崩壊事例を整理している。その結果ではくず鉱堆積場での崩壊が18例あるのに対し、都市固形ごみ堆積地での崩壊は4例と少ない。くず鉱堆積場での崩壊主因は、過剰堆積によるものが4例、地震によるものが1978年の静岡県(現)伊豆市・持越鉱山の崩壊事例を含めて3例など、盛土の崩壊事例と似たような原因により崩壊が生じている。これに対し、都市固形ごみ堆積地での崩壊主因は、間隙水圧の上昇や大雨による水に起因したものが3例、十分な締め固めが行われなかったことによるものが1例となっており、過剰堆積や地震を主因した崩壊事例はこの中にはない。

わが国の産業廃棄物不法投棄等廃棄物に性状が近く力学的挙動が未解明な都市固形ごみ堆積地での崩壊事例について、さらに文献収集により調べた。その結果、国内1件、海外16件の堆積廃棄物層(くず鉱を除く)の崩壊事例を収集し(表3.1.2)、その崩壊要素を表3.1.1のとおりまとめた。表3.1.1から、崩壊は斜面勾配が15~20°程度でも多数生じていて斜面勾配が崩壊の決定的な要因にはなっていないこと、全17事例で大量降雨や内部水位の上昇など何らかの形で水による影響が崩壊要因にあげられていること、地震による崩壊は世界的にも確認されていない、といったことがわかる。

崩壊面(すべり面)は、廃棄物層と下層土(原地盤)の間で多くが生じており、廃棄物層が全体的にすべるような崩壊が主であり、特に遮水工のある事例では、該当判明5事例の全てが遮水シートと粘土材との境界面等の遮水工内を崩壊面とした崩壊である。図3.1.1に示すインドネシアでの崩壊事例は、下層土(原地盤)と廃棄物層の間のすべり抵抗が水の影響により減少し廃棄物層の重力による滑動力に抗しきれなくなり、火災により引張抵抗が小さくなった部分に鉛直方向のクラックが生じ、やがてこの部分を起点として全体的な斜面崩壊が生じたケースであり、代表的な大規模崩壊のパターンである。

なお、廃棄物層の長期的な有機質分の分解による強度低下の可能性が指摘されることがあるが、今回の事例調査では、該当ケースはクラックが発生した(崩壊は無し)ポーランドの事例<sup>29)</sup>のみで、このケースでも埋立後300年以上を経過してからクラックが生じている。

表3.1.1 堆積廃棄物層(くず鉱を除く)の既往大規模崩壊17事例の崩壊要素  
(国内1件、アジア・中東4件、欧州3件、北米6件、南米2件、アフリカ1件)

崩壊に関連した要素	該当事例数	非該当数	不明数
遮水工のない堆積地や埋立地等で発生した事例	9	6	2
遮水工のある処分場で発生した事例	6	9	2
堆積高さ(標高差)が30mを超える事例	12	4	1
堆積層の斜面勾配が35°以上の事例	5	11	1
下層土(原地盤)が5°程度以上の傾斜地での事例	8	7	2
崩壊面が廃棄物と下層土の間で生じた事例	10	5	2
うち崩壊が遮水工内で生じた事例(6事例中)	5	0	1
内部水位上昇等、水に関する事項に起因した事例	17	0	0
うち崩壊前に大量の降雨があった事例	9	8	0
過去に火災・爆発が確認された事例	5	-----	12
低密度埋立または締め固めが不十分な事例	4	-----	13
地震が崩壊原因の事例	0	17	0

注1)堆積高さ(標高差)が30mを超える事案は、12件と過半を占めるが、標高差が30m以下の小規模事案については情報を把握しきれていない可能性があり、堆積高さとの関係ははっきりとは言えない。

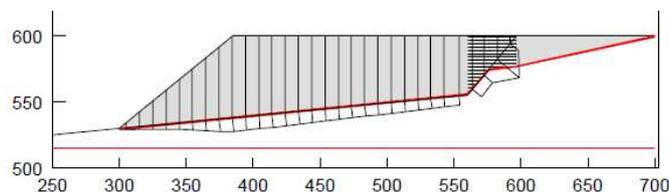
2)廃棄物堆積層の斜面勾配は、35°以上の事例は5件と少なく、崩壊は斜面勾配が15~20°程度の事案でも多数発生。

3)崩壊面は、判明15事案中10件(67%)で崩壊が下層土(原地盤)と廃棄物層の間で生じており、廃棄物斜面の法肩部での小規模な崩壊ではなく、廃棄物層が全体的に崩壊するケースが調査事例では多い。

4)遮水工が敷設されている処分場では、該当判明5事例の全てが遮水工内の遮水シートと粘土材との間等の接合部で

崩壊（滑動）が生じている。

- 5) 崩壊した全 17 件で、何らかの形で水が影響しているが、水による影響の内訳は、多量の降雨が主因と考えられている事例は半数の 9 件で、その他は、不適切な管理等による処分場内部水位の上昇や、遮水工の接合部での水分過多等が指摘されている事例。
- 6) 崩壊前や崩壊時に火災や爆発が発生した事例は 5 件あり、廃棄物層の斜面安定性を保っている繊維状物等による補強効果が火災により消滅したことが崩壊の引き金になったとの海外研究者の見方がある。なお、火災等の発生については、文献に「火災等発生」が明記されていない事例については未確認である。
- 7) オープンダンプ等のケースで低密度の埋立てや締固めが不十分なことが崩壊の一因にあげられている事例も 4 例ある。また、残留水圧や原地盤面付近を流下する水流による影響は、締固めが十分でない場合に特に大きいと考える海外研究者もいる。



(taken by Bandung Institute of Technology) (堆積高さ 60~70m。斜面勾配 30~45° の堆積地で 3 日間の激しい降雨後に崩落。)

図 3.1.1 代表的な崩壊事例 (インドネシア、2005 出典: Koelsch,<sup>1)</sup>)

表 3.1.2 収集した国内外の既往大規模崩壊事例の一覧

場所 (発生年)	堆積地形態 /遮水工	廃棄物層の 高さ/勾配	下層土 勾配	崩壊状況	主な 崩壊面	推定崩壊原因	参 考 文 献
①静岡県三島市 (1998)	不法投棄 遮水工無し	30m 以上 20~30°	約 10°	廃棄物層と下層 土崩壊 2~3 万 m <sup>3</sup>	下層土 上	豪雨による下層土 上(谷)の流量増加	(県情 報)
②Rizal, Philippines(2009)	処分場 遮水工あり	高さ不明 50°以上	不明	処分場周り壁崩 壊、2000m <sup>3</sup> 流出	不明	豪雨、メタンガス 爆発、低密度埋立	39)40) 41)
③Bandung, Indonesia(2005)	堆積地 遮水工無し	60~70m 30~45°	5~ 10%	廃棄物 270 万 m <sup>3</sup> 崩壊、死者 147	下層土 上	豪雨、火災、締固 め機械不調	30)31) 33)
④Athens, Greece(2003)	処分場 遮水工不明	60~80m 勾配不明	不明	廃棄物 80 万 m <sup>3</sup> 崩壊	不明	火災、内部水位上 昇	32)
⑤Payatas, Philippines(2000)	堆積地 遮水工無し	34m 34°	水平~ 緩逆勾 配	廃棄物 120 万 m <sup>3</sup> 崩壊、死者 220 不 明 200~800 人	廃棄物 層中	台風後の残留水圧 増加、低密度埋立、 火災発生	32)33) 36)42)
⑥Hiriya, Israel(1997-1998)	処分場 遮水工無し	60m 45°以上	ほぼ水 平	廃棄物流出による 河川堰止め	廃棄物 層中	多量降雨、崩壊前 の覆土、ボーリング	29)
⑦Bogata, Colombia(1997)	処分場 遮水工あり	100m 15~20°	約 5°	廃棄物 180 万 m <sup>3</sup> 崩壊、河川堰止め	遮水工 内等	浸出水再循環による 内部水位上昇	28)37)
⑧Durban, South -Africa(1997)	処分場 遮水工あり	60m 20~25°	約 5°	廃棄物 16 万 m <sup>3</sup> 崩壊	遮水工 内等	液体廃棄物等による 間隙水圧上昇	27)28)
⑨North America (1997)	埋立地 遮水工無し	45m 25°	55°(埋 戻土)	廃棄物、埋戻土 10 万 m <sup>3</sup> 崩壊	埋戻し 斜面上	粘土での埋戻しによる 内部水位上昇	28)
⑩North America (1996)	処分場 遮水工あり	20m 20°	5°以下	廃棄物 10 万 m <sup>3</sup> 崩壊	遮水工 内等	遮水工・ベントナ イトの水分増加	28)
⑪Colerain, Ohio USA(1996)	処分場 遮水工無し	75m 21°	2°(一部 15°)	廃棄物 120 万 m <sup>3</sup> 崩壊	下層土 上等	つま先部凍結による 内部水位上昇	28)33) 35)
⑫Europe (1994)	処分場 遮水工あり	22m 35°	7~27°	廃棄物 6 万 m <sup>3</sup> 崩 壊	遮水工 内	遮水シート下の粘 土層の水分増加	28)
⑬Istanbul, Turkey(1993)	堆積地 遮水工無し	45m 45°以上	約 7°	廃棄物 50~100 万 m <sup>3</sup> 崩壊 死者 27	下層土 上等	多量降雨による内 部水位上昇、火災、 締固め未実施	28)29)
⑭Sao Paulo, Brazil(1991)	衛生埋立地 遮水工不明	100m 超 約 21°	約 12°	廃棄物 6.5 万 m <sup>3</sup> 崩壊	廃棄物 層中	多量降雨	34)
⑮North America (1989)	埋立地 遮水工無し	20m 19°	ほぼ水 平	廃棄物 50 万 m <sup>3</sup> 崩壊	下層土 内	多量降雨、つま先 部の掘削	28)
⑯Kettleman City USA(1988)	処分場 遮水工あり	30m 17°	水平(一 部 25°)	廃棄物 49 万 m <sup>3</sup> 崩壊	遮水工 内	遮水シートと粘土 層間の水分過多	28)35) 38)
⑰North America (1984)	埋立地 遮水工無し	23m 10~15°	5°以下	廃棄物 11 万 m <sup>3</sup> 崩壊	下層土 下	多量降雨による内 部水位上昇	28)

## (2) 国内での斜面崩壊等の状況

これまでの支障除去支援事業及び本研究で現地調査や実験を行った斜面崩壊のおそれ等が指摘された 21 件の産業廃棄物不法投棄等事案と、1 件の昭和 40 年代に埋め立てられた一般廃棄物処分場崩壊事案における投棄地地形、廃棄物の種類・形状、堆積高、斜面勾配、投棄量、及び崩壊、クラックの発生状況の一覧を表 3.1.3 に示す。表 3.1.3 で投棄地地形別にみると、平地での投棄事例は全 15 件あるが、表面崩壊やクラックが発生したのは 2 件のみで、うち 1 件は直壁 (90°) での表面くずれ (写真 3.1.1)、1 件は 60°斜面上でのクラック発生であり、大規模崩壊は発生していない。

これに対し、傾斜地上での投棄事例は全 7 件で、うち大規模崩壊 (写真 3.1.2)、表層崩壊、表面くずれが発生した事案は半数以上の 4 件 (一般廃棄物処分場の崩壊事案 1 件を含む：写真 3.1.2~4) あり、廃棄物の性状や堆積廃棄物層の前面斜面勾配に関係なく大規模崩壊を含めて発生している。



写真 3.1.1 厚さ 1m の表面くずれが生じた直壁 (関東①現場)



写真 3.1.2 大規模崩壊が生じた傾斜地上投棄地 (崩壊後再投棄された斜面、静岡県三島市)



写真 3.1.3 一般廃棄物処分場 (関西現場) での表層崩壊 (停止安息角を上回る 40°の斜面で、破損した U 字溝から降雨時に大量の水が入り崩壊したとみられる。崩壊の幅約 3~10m、奥行き平均 2m、崩壊高 20m。崩壊後の灰等の廃棄物の勾配は停止安息角とほぼ同じ 30°。)



写真 3.1.4 同左・破損した U 字溝を起点とした崩壊

## (3) わが国の不法投棄等現場での斜面崩壊のパターン

過去の崩壊事例から、わが国の不法投棄等現場でも傾斜地上の投棄事案では、大雨時や降雨後に大規模崩壊が起こりうる事が窺える。傾斜地上の事案のうち、とくに、谷上から投棄を行った事案は、下側から積み上げた事案に比べ締固めが不十分になることから、斜面安定性は低い。また、傾斜地事案では、地盤自体が斜面崩落地帯に属する場合等、廃棄物層よりも地山層が弱い場合も多く、この場合には地山層のすべりにより堆積廃棄物層全体がすべり落ちるケースも考えられる。また、破損した U 字溝から水が大量に廃棄物層に流れ込んでその水みちが崩落面となった一般廃棄物処分場での崩壊事例等、崩壊は水に関係している。

一方、平地上の投棄事案は、停止安息角 (3.2.1 参照) 以上の斜面勾配を有する事案での小規模な表層崩壊に限られている。

なお、海外の都市固形ごみ堆積地では平地上での大規模崩壊事例もあるが、このような事例はいずれも不十分な締固めや、生ごみや熱帯降雨による大量の水分含有があるケースで、わが国の不法投棄等現場のように、水分が少なく、行為者が限られた土地にできるだけ多く投棄しようとして締固められている状況とは、大きく異なる (わが国の不法投棄等現場が高いせん断強度を有することは、次節以降に示す一連の実験で確認している)。

ただし、3.5 に示す崩壊実験のように、斜面底部を掘削した場合等、何らかの崩壊要因を与えた場合には、廃棄物層内で引張抵抗が働きにくい比較的ゆるい勾配の崩壊面をもって斜面が崩壊する可能性はある。

以上から、わが国の不法投棄等現場で想定すべき斜面崩壊として、「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル (案)」に示す次の 5 パターンがあげられる。

- ①安息角を上回る急傾斜斜面での表層崩壊
- ②谷地等の傾斜地上に堆積した廃棄物層の大雨時等における大規模崩壊
- ③谷地等の傾斜地上の堆積地での原地盤 (下層土) のすべり
- ④廃棄物層内への水の集中的な浸透に起因したすべり
- ⑤生ごみ等の水分や降雨、その他崩壊要因による廃棄物層内でのすべり (主に海外事例)

表 3.1.3 支障除去支援事業及び本研究で調査・実験を行った崩壊のおそれがあった国内不法投棄等事案一覧

事案※1	投棄地地形	主な廃棄物種類 (重量比)	廃棄物の形状	ブラ等、 繊維状物等の 有無※2	堆積標 高差 [堆積 深] (m)	斜面勾 配(°)	投棄量 (m <sup>3</sup> )	斜面崩壊、クラックの 発生状況
関東・H22 現地調査事案	平地	建設混合廃棄物	粗(無破砕 等が主)	○	5	45	1,650	
関東・H23 現地調査事案	平地	がれき類、土砂類、プラ スチック類	中(粗大物 もあり)	○	18	30~45	不明	
関東・H12 (1/3 支援事業)	平地	プラスチック類、燃えがら	中(一次破 砕物等)	○	16	35	13,000	
近畿・H12 (3/4 支援事業)	平地	がれき類・土砂 90%、プラ スチック類 10%	中(一次破 砕物等)	○	8	30~40	9,600	
四国・H16 (3/4 支援事業)	平地	プラスチック類 80%、金属 くず 11%	中(一次破 砕物等)	○	9	20~55	3,400	
中部・H17 (3/4 支援事業)	平地	土砂等 41%、がれき類 22%、プラ類 21%	中(一次破 砕物等)	○	17	35~45	123,000	
関東・H20 (特措法事業)	ほぼ 平地	プラ類 49%、汚泥 13%、が れき類 10%	中(一次破 砕物等)	○	50	30~45	910,000	
関東・H22 現地調査事案	平地	木くず、繊維くず、金属く ず	中(一次破 砕物等)	○	20	31~38	50,000	
関東・H23 実験事案	平地	礫・陶磁器 46%、砂類 28%、プラ類 16%	中(一次破 砕物等)	○	18	40~90	54,000	直壁部で1m厚表面崩 れ発生
中部・H24 実験事案	平地	プラ類 6%、木くず 3%、が れき類 50%、土砂等 35%	中(一次破 砕物等)	○	11	40~60	9,100	60°斜面法肩にクラック 発生
関東・H22 現地調査事案	平地	木くず、繊維くず、残土等	細	●	10	40~41	13,000	
関東・H22 現地調査事案	平地	建設混合廃棄物(木く ず、プラ)、残土	細	●	7	40	11,250	
関東・H22 現地調査事案	平地	建設混合廃棄物(木く ず、プラ、残土)	細	●	8	35~55	11,250	
関東・H22 現地調査事案	平地	建設混合廃棄物(残土、 がれき類、木くず)	細(篩下 等)	●	6	45	2,500	(流出防止用万能塀が 傾斜)
関東・H23 実験事案	平地	土砂・燃え殻等 85%、が れき類 12%、プラ類 2%(現 地実験でブラ等未確認)	細(土砂様 分主体)	×	40	30	1,070,000	
中部・H15 (1/3 支援事業)	傾斜 地	木くず、がれき類、プラ類	中(一次破 砕物等)	○	60[30]	20~30	18,000 (谷上か ら投棄)	大規模崩壊(多量降雨 時)
中部・H16 (特措法事業)	傾斜 地	プラスチック類、廃タイヤ	中(一次破 砕物等)	○	30 [8]	40~70	130,000 (谷上か ら投棄)	(落石発生)
中部・H24 実験事案	谷~ 平地	(容積比)プラ類 48%、木く ず・紙くず類 37%	中~粗(長 繊維物多)	○	30	24~25	530,000	
関東・H17 (3/4 支援事業)	傾斜 地	木くず 81%、金属くず 19%、がれき類	粗(無破砕 等が主)	×	10	60~70	7,000	表面くずれ発生
北陸・H17 (特措法事業)	傾斜 地	木くず 75%、燃えがら 25%	粗(解体角 材等)	×	13	30~50	18,600	
九州・H23 実験事案	傾斜 地	がれき類・土砂 100%	細(土砂様 分主体)	×	40[15]	30~40	110,000 (谷上か ら投棄)	急勾配の一部斜面表 層崩壊 (周辺は地滑り地帯)
(参考) 関西・ 一般廃棄物処 分場・実験事案	傾斜 地	灰、土砂分主体(繊維状 物は散見される程度)	細(土砂様 分主体)	×	30 [擁壁 上 20]	40	不明	降雨後に擁壁上で幅 約 10m の表層崩壊

注 1) 「事案※」 現地調査事案：本研究で斜面勾配計測等の現地調査を行った事案

実験事案：本研究で一面せん断試験、安息角試験等の現場実験を行った事案

1/3 支援事業、3/4 支援事業、特措法事業：当該の支障除去支援事業で把握した事案でありデータは自治体資料等による

注 2) 「ブラ等、繊維状物等の 有無※」 凡例 ○:10cm 以上のブラ等あり ●:ブラ等はあるが 10cm 以上ほとんどなし ×:ほぼ無し

### 3. 2 現場及び室内実験結果

現場及び実験室で行った各種試験で得られた結果を以下に列挙する。なお、各々の試験方法は、巻末資料「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」に示している。

#### 3.2.1 安息角試験について

##### (1) 試験の目的と実験方法

廃棄物が示す安定的な法面勾配を調査することを目的に実施した。

試験は、バックホウのバケットにより廃棄物を撒きこぼすことにより、廃棄物の山を形成させ、その法面勾配をスラントルールで計測した。(写真 3.2.1~3.2.6)

各試験サイトにより使用するバックホウの容量が異なり、また廃棄物の種類や寸法も異なることから、廃棄物の山の高さをおおよそ 1.0~1.5m となるように実験した。なお、廃棄物は掘削直後の水分変化が生じていない状況で実施した。

##### (2) 試験現場の廃棄物組成

表 3.2.1 に示す廃棄物組成の現場で試験を実施した。

##### (3) 安息角試験結果

###### ① 試験方法に関して

表 3.2.1 に示すように、平成 22 年度から 3 ヶ年で 9 箇所サイトで安息角の測定を実施した。当初は、明確な手法も定めず、バックホウのバケットから撒きだされる廃棄物を山状にし、その斜面勾配を計測していた。平成 23 年度より、廃棄物の数量と安息角の関係を確認する手法を取り入れた。

現在は、廃棄物高さ 1.5m を目標に底面寸法が 3m の金属製の枠を作製し、この中に廃棄物の山を形成させることで、おおよそ 1.0~1.5m の廃棄物の山を形成させ斜面を測定する手法になっている。

###### ② 試験結果のまとめ

これまでの試験結果の一覧を表 3.2.2 に示す。

###### ③ 試験結果の評価

安息角（ここでは、停止安息角<sup>43)</sup>）試験の結果と、現場で得られた一面せん断試験の内部摩擦角( $\phi$ )とを比較すると(表 3.2.3)、ほぼ同様な値が得られている。このことは、安息角試験を実施することにより、廃棄物の一面せん断試験の $\phi$ を簡易的に知ることが可能であることが理解される。

##### (4) 安息角試験結果の利用方法

現場法面勾配の調査結果と安息角試験結果(停止安息角)

表 3.2.1 実験実施場所の廃棄物組成

年度	現場名	実験場所の廃棄物組成(重量比)
平成 22 年度	上海市老港処分場(埋立処分場)	・プラ類 22%、石・陶器 29%(GL-1m) ・プラ 9%、石・陶器 52%(GL-3m)
平成 23 年度	関東①(不法投棄等現場:旧中間処理施設)	プラ類 16%、礫・陶磁器 46%、砂類 28%、金属 4%、木くず 1% (dim1+dim2=4%)
	関東②(不法投棄等現場:管理型処分場)	土砂・燃え殻等 85%、がれき類 12%、プラ類 2%、金属 1%
	九州(不法投棄等現場:安定型処分場)	がれき類・土砂等 100% (プラ類なし)
平成 24 年度	中部①(不法投棄等現場:旧中間処理施設)	プラ類 6%、木くず 3%、がれき類 50%、土砂等 35%、金属 3%、その他 3% (dim1+dim2=12%)
	中部②(不法投棄等現場:旧中間処理施設の隣接地)	[容積比・既存資料]プラ類 50%、木くず・紙くず類 37%、コンクリート等 13%
	関西(一般廃棄物処分場)	灰、土砂分主体(繊維状物は散見される程度)
	東北(震災篩下残渣)	プラ類 0.4%、木くず 6%、がれき類 14%、5mm 以下土砂等 80%
	ジャカルタ近郊(サムルバツ埋立地)	生ごみ、プラ類等の生活ごみ(果実殻等の生ごみ多)

表 3.2.2 安息角試験の結果一覧表

現場名	計測値(°)	限界安息角(°)	停止安息角(°)	高さ(cm)	試験の状況
上海	45~60	—	—	—	積み上げ状態
関東①	40~60	60	50	154	バケット 10 杯
関東②	35~45	—	—	—	積み上げ状態
九州	36~50	50	44	130	バケット 10 杯
中部①1	40~58	58	52	145	バケット 10 杯(プラ多)
中部①2	35~53	53	45	154	バケット 10 杯(プラ少)
中部②1	45~52	48	45	128	バケット 9 杯
中部②2	36~54	—	—	—	繊維部
関西	32~40	40	36	42	袋使用(人力)
東北 1	32~45	45	40	115	湿潤
東北 2	32~43	43	40	116	1 日乾燥
ジャカルタ 1	34~58	55	36	205	当日搬入
ジャカルタ 2	37~58	58	40	173	1 年間埋立て

表 3.2.3 一面せん断試験結果と安息角試験結果の比較

現場名	一面せん断試験( $\phi$ )(°)	停止安息角(°)	現場法面勾配(°)
上海	33(GL-1m) 43(GL-3m)	—	42~53
関東①	46	50	40~62
関東②	—	—	30
九州	—	44	30~42
中部①1	51	52	40~60
中部①2	—	45	40~60
中部②1	—	45	24~25
中部②2	—	—	24~25
関西	—	36	40
東北 1	47	40	38~42
東北 2	47	40	38~42
ジャカルタ 1	—	36	40
ジャカルタ 2	—	40	40

を比較すると、ほとんどの場合、現場法面勾配は安息角試験で得られた停止安息角とほぼ同じか、あるいはそれより小さな値であることが分かる。不法投棄等の場合、行為者は多量の廃棄物を盛り立てる必要性から、勾配や形状を非常によく考えて盛り立てを実施している。しかしながら、最終的には廃棄物の種類や組成により廃棄物の盛りこぼしが生じて法面は形成されている。多くの不法投棄等現場の場合、想定される盛り立て状況は、廃棄物を盛りこぼしながら盛り立て法面を固め、その結果、廃棄物の盛りこぼしを含めた安定斜面が形成され完成しているものと考えられる。

以上から、ある程度長期的な安定勾配を考えると、十分な廃棄物の山を形成した後の盛りこぼしで形成された勾配を計測する必要があり、最終的には停止安息角を安全な斜面か否かを判断する材料に使用することが適切であると考えられる。



写真 3.2.1 関東①現場



写真 3.2.2 九州現場写真



写真 3.2.3 中部①現場



写真 3.2.4 東北現場



写真 3.2.5 インドネシア埋立地



写真 3.2.6 中部②現場

#### (5) 重機による载荷実験(安息角確認実験)

##### ① 東北現場での法肩载荷実験

現場の停止安息角が 40°である東北現場の堆積法面で、バックホウのバケットにより勾配 40°の法面上の法肩部を押し込んだところ(写真 3.2.7)、法肩が約 20cm 沈下するとともに、約 2cm のはらみだしが生じたが、砂地盤等で生じようような法面崩壊は生じなかった(写真 3.2.8)。

##### ② 中部①現場での载荷実験

安息角試験後(停止安息角は繊維状物等少の地点 45°、繊維状物等多の地点 52°)、重機のバケットで円錐頂部を押し込んだところ(写真 3.2.9)、繊維状物等が多い廃棄物では圧縮され高さが約 30cm 低下し、その後バケッ



写真 3.2.7 法肩部へのバケット载荷(東北現場)



写真 3.2.8 载荷後(20cm 沈下、2cm はらみだし)



写真 3.2.9 鉛直上方からの载荷実験(中部①・繊維状物等少)



写真 3.2.10 鉛直上方からの载荷実験後(中部①・繊維状物等多)

安息角実験後の停止安息角の廃棄物山ではバックホウで鉛直上方から押ししても崩壊現象は生じない。繊維状物等が多い山(写真 3.2.10)では、押し込み後 30cm 程度沈み、解放後 10cm 程度戻った。(繊維状物等少: 写真 3.2.9 ではほとんど戻らない)

トによる荷重を解放すると約 10cm 程度上昇するリバウンドが確認できた(写真 3.2.10)。また、繊維状物等少(土主体)の地点では、圧縮後のリバウンド現象はほとんどみられなかった。

なお、いずれも円錐の頂部を押し込んでも廃棄物が圧縮されるだけで崩壊現象は生じなかった。

### ③ 中部②現場での法肩載荷実験

停止安息角(45°)以下となる 40°と停止安息角以上の 60°の廃棄物の山(高さ 1.5m)を構築し、バックホウにて法肩部を上方から押したところ(写真 3.2.11~12)、40°側は下方に圧縮されるのみであったが、60°側は崩壊現象を示した。



### ④ 安息角確認実験についての考察

3 現場での重機による載荷実験(安息角確認実験)の結果、いずれ

の現場でも停止安息角以下の斜面では鉛直上方からの荷重で斜面崩壊現象が生じないことを確認した。また、中部②現場では安息角以上の山では鉛直上方からの荷重により崩壊現象が生じることを確認した。

以上から、停止安息角が安定斜面勾配の有力な判断指標となり得ることが確認できた。

写真 3.2.11 圧縮されただけの 40°山 写真 3.2.12 崩壊した 60°山(左側)

## 3.2.2 衝撃加速度試験(キヤスポル)について

### (1) 試験の目的と実験方法

不法投棄等現場で簡易に廃棄物層の強度定数を知ることは、急斜面に盛り立てられた廃棄物層の状態を把握することの第一歩となる。現状では、不法投棄等現場において的確かつ簡易に判断する手法が無いことから、運搬が容易で試験が簡単な衝撃加速度試験(呼称「キヤスポル」<sup>44)45)</sup>の適用性を検討した。

### (2) 試験実施案件の概要

キヤスポル試験を実施した現場の廃棄物組成及び現場法面勾配と廃棄物の堆積高さを表 3.2.4 に示す。この表から、3 ヶ年で実施した現場は廃棄物の組成やその埋立て状況(勾配や高さ)が異なり、同一の視点から見ることは困難であることが窺える。

表 3.2.4 実施した現場の状況

実施年度	現場名	廃棄物組成(重量比)	現場法面勾配	廃棄物堆積高さ
平成 22 年度	上海 1(GL-1m)	プラ類 22%、石・陶器 29%	42° ~53°	9m
	上海 2(GL-3m)	プラ類 9%、石・陶器 52%		
平成 23 年度	関東①	プラ類 16%、礫・陶磁器 46%、砂類 28%、金属 4%、木くず 1%	40° ~62°	約 18m
	九州	がれき類・土砂等 100% (プラ類なし)	30° ~42°	約 40m
	関東②	土砂・燃え殻 85%、礫類 12%、プラ類 29%、金属 1% (dim1+dim2=4%)	30°	約 40m
平成 24 年度	中部①1 (中部①2 は頂上部で 繊維状物が多く締固 めが不十分な地点)	プラ類 6%、木くず 3%、瓦礫類 50%、 土砂等 35%、金属 3%、その他 3% (一 面せん断試験を行った繊維状物が少 ない地点) (dim1+dim2=12%)	40° ~60°	約 11m
	中部②	プラ類、礫・陶磁器	24° ~25°	約 30m
	関西	灰、土砂分主体	約 40°	約 30m
	東北	プラ類 0.4%、木くず 6%、瓦礫類 14%、 5mm 以下土砂 80%	38° ~42°	約 3m
	ジャカルタ	生ごみ、プラ類等の生活ごみ(果実殻 等の生ごみ多)	約 40°	約 6.5m

### (3) 衝撃加速度試験結果

表 3.2.5 キャスポル試験結果

3 年間に実施した衝撃加速度試験（キャスポル試験）をその他の試験結果と比較し、関連性を検討した。表 3.2.5 にキャスポル試験結果とその他の試験結果の比較一覧表を示す。表 3.2.5 のキャスポル試験結果より、3 か年で実験した現場におけるインパクト値と一面せん断試験結果より得られた、粘着力  $c$  及び内部摩擦角  $\phi$  との関係を図 3.2.1 と図 3.2.2 に示した。

現場名	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 (°)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	インパクト値 (Ia)	相関式による計算値	
					$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
上海 1 (GL-1m)	6	33	1.1	4.3	31	19
上海 2 (GL-3m)	4	43	1.2	3.7	27	19
関東①	3	46	1.2	6.3	45	21
九州	3	45	1.4	7.8	56	23
関東②	70 以上	—	—	20 以上	142 以上	35 以上
中部①1 (繊維状物少)	4	51	1.2	5.4	39	20
中部①2 (繊維状物多)	—	—	0.9	3.6	26	19
中部②	—	—	0.7	4.6	33	20
関 西	—	—	1.1	6.7	48	22
東 北	11	47	1.1	4.5	33	20
ジャカルタ	—	—	—	2~10	15~72	17~25

一覧表及びインパクト値と粘着力、内部摩擦角との関係から、以下の点が明らかである。

- ・3 か年の実験では、廃棄物地盤におけるインパクト値 (Ia) はおおそ 4 から 8 程度の範囲にある。
- ・土砂分主体の関東②、九州、関西現場のインパクト値 (Ia) が高い。
- ・インパクト値 (Ia) とその他の実験結果（一面せん断試験の  $c$  及び  $\phi$ ）との関連性を調べたが、相関性ははっきりとは見られなかった。
- ・インパクト値 (Ia) を用いてキャスポル試験で得られている土地盤用の相関式で  $c$  及び  $\phi$  を求めてみたが、一面せん断試験結果で得られた値とかけ離れたものとなり、相関式は廃棄物地盤にそのままでは適用できないことが分かった。

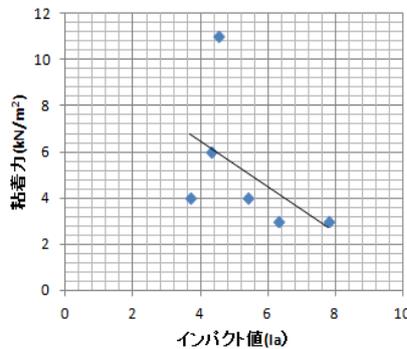


図 3.2.1 インパクト値と粘着力の関係

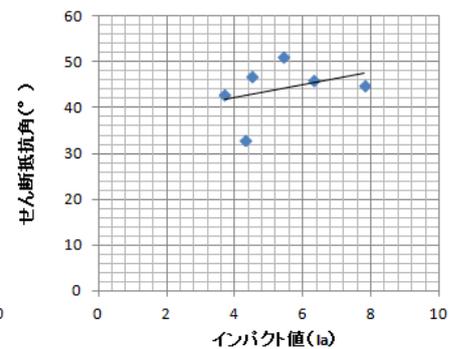


図 3.2.2 インパクト値と内部摩擦角の関係

### (4) 現場試験としての適用性等に関する考察と課題整理

衝撃加速度試験は、不法投棄等現場で容易に廃棄物地盤の強度を知り、法面勾配等の安定性を評価することを目的で実施した。このため、衝撃加速度の試験結果のみならず、他の現場試験との関連性も得られることを期待した。しかしながら、これまでの実験では、他の試験（とくに一面せん断試験結果）とのはっきりとした相関性は得られていない。

また、不法投棄等現場では埋立て当事者は重機等を用いて埋立て作業を実施しており、基本的にはかなり密な廃棄物地盤が形成されているものと想定される。この状況を、数値的に判断することが重要であるが、衝撃加速度試験の結果では廃棄物の組成により得られるインパクト値 (Ia) に差異が生じていること等から、地盤強度定数の計測を目的とした一般的な利用での比較は現状では難しい。

従来の土地盤でのキャスポル試験の活用では、礫の最大粒径 37.5mm で 10mm 以上の礫を 30%以上含まない土質材料に適用した場合に、インパクト値と CBR、内部摩擦角、粘着力との間に高い相関関係が得られており、一次回帰式が示されている。廃棄物に関してもこのような関係式が成立することが望ましいが、現状では試料数が少ないことから、明確な提案をするには至っていない。

ここで衝撃加速度試験の利用方法の提案として、廃棄物地盤における最低インパクト値の考えを取り入れ利用する方法がある。不法投棄等現場でキャスポル試験（衝撃加速度試験）を実施した場合に、絶対に必要な最低限の数値を基準化する考えである。廃棄物地盤の安定性の点から考えると、ある一定の締め固まった

状況を把握することが重要であると考え。

とくに、法面の崩壊が生じない状況の判断としては、これまでの現場実験結果から、繊維状物等を含む現場の場合、

Ia(インパクト値) $\geq 4.0$  程度とみられる。

この数値の意味であるが、現在まで3カ年で実施した現場実験結果では、明らかに廃棄物がゆるく堆積し、クラックが発生しているなど安定性が乏しい場所では、インパクト値が4以下を示しており、この値が安全側の最低ラインであると考えたものである。

また、衝撃加速度試験は、同一現場内で廃棄物組成が近似した場所であれば、法肩付近等の平坦部の締め固め程度の比較に用いることは可能である。(試験場所については、斜面安定性を判断することが本来の目的のため法面で試験値を得たいところであるが、キャスポル試験は法面で実施することができない。)

### 3.2.3 一面せん断試験について

現場一面せん断試験は、廃棄物組成の異なる5現場で実施した。現場のプラスチック含有量に着目して試験結果を順にみる。

#### (1) プラスチック含有率 0% (九州現場)

安定型最終処分場に許可容量を大幅に上回る約11万 $m^3$ の廃棄物が、平均勾配 $20^\circ$ の原地盤に斜面上側から投下され埋め立てられたと推定される不法投棄等現場となる。試験現場は建設残土や碎石等が主に投棄されている場所であり、礫類や雑物類(5mm以下)が大半を占める。

現場密度試験より、湿潤密度 $\rho_t = 13.6 \text{ g/cm}^3$ 、含水比 $w = 23.3\%$ であった。この試験現場において地表面を1~2m程度掘削し、上載圧1種類で現場一面せん断試験を行った。現場試験後、廃棄物を持ち帰り、室内一面せん断試験を行い粘着力・内部摩擦角を求めた。

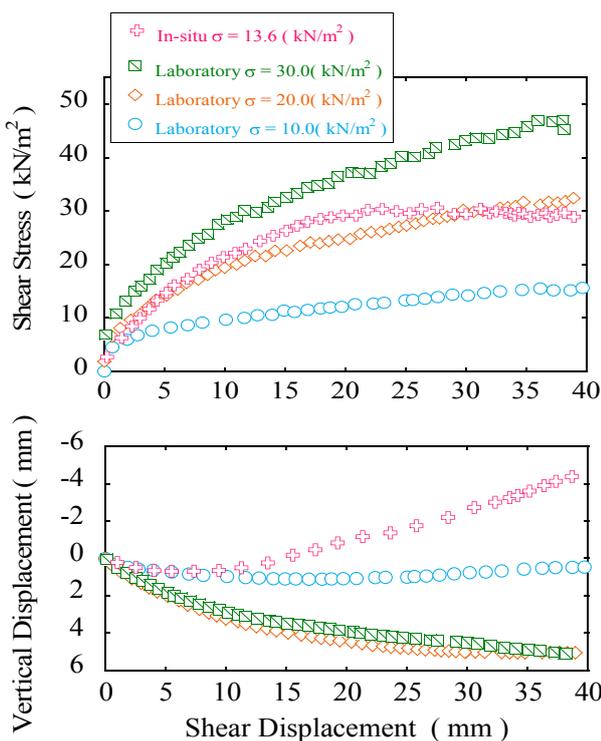


図 3.2.3 プラスチック 0% 現場・室内一面せん断試験結果  
せん断応力・垂直変位 - せん断変位関係

帰り、室内一面せん断試験を行い粘着力・内部摩擦角を求めた。

プラスチック含有率 0% の廃棄物に対する一面せん断試験結果、せん断応力・垂直変位 - せん断変位関係を図 3.2.3 に示す。図 3.2.3 には、上載圧 1 種類の現場一面せん断試験結果と、廃棄物を室内に持ち帰り、現場と同密度・同含水比で締め固めて供試体を作製し、上載圧 3 種類で室内一面せん断試験を実施した試験結果の両方を示す。図 3.2.3 の現場試験結果より、せん断応力 - せん断変位関係ではせん断応力にピーク値がみられる。

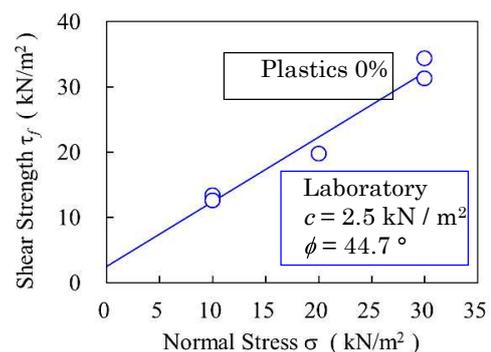


図 3.2.4 プラスチック 0% 一面せん断試験結果  
せん断強度 - 上載圧関係

#### (2) プラスチック含有率 6% (中部①現場)

産業廃棄物中間処理施設に保管基準を大きく上回る廃棄物が残置された不法投棄等現場となる。平地に高さ約11mで廃棄物が積まれており、崩壊の危険性が懸念されている現場となる。また、九州現場とは異なり様々な廃棄物が混在している。ここで、プラスチック含有率は6.1%であった。さらに現場密度試験より、湿潤密度 $\rho_t = 1.18 \text{ g/cm}^3$ 、含水比 $w = 20.7\%$ となる。この試験現場においても地表面を2m程度掘削し、

上載圧 3 種類で現場一面せん断試験を行った。

プラスチック含有率 6.1 % 廃棄物に対する現場一面せん断試験結果、せん断応力・垂直変位 - せん断変位関係が図3.2.5となる。図は現場一面せん断試験上載圧 3 種類での試験結果となる。図3.2.5より、せん断応力 - せん断変位関係ではせん断変位の増加に伴いせん断応力が線形的に増加し、ピークがみられない。さらに垂直変位 - せん断変位関係では、せん断時に収縮する傾向を示す。

せん断強度 - 上載圧関係を図3.2.6に示す。図より、現場・室内試験でのせん断強度の差はほとんどみられない。さらに、様々な材料が混在する廃棄物においても、せん断強度 - 上載圧関係は比例関係を示すことが認められる。これより、図から粘着力・内部摩擦角を算定すると、現場試験では粘着力  $c = 3.9 \text{ kN/m}^2$  , 内部摩擦角  $\phi = 50.6^\circ$  となり、室内試験では粘着力  $c = 4.5 \text{ kN/m}^2$  , 内部摩擦角  $\phi = 47.5^\circ$  となった。

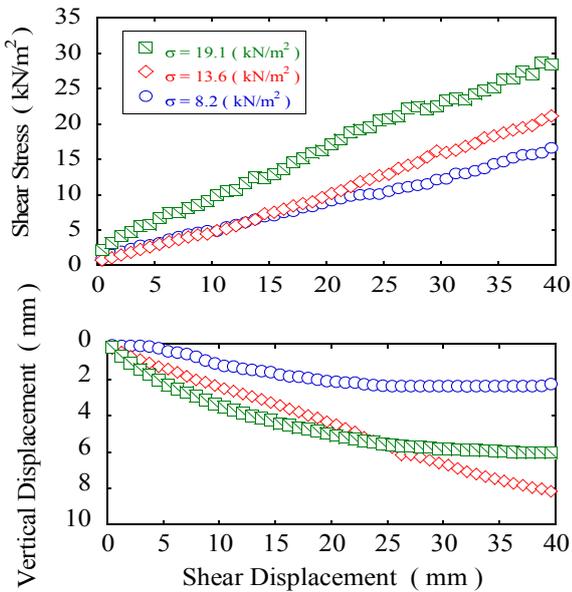


図 3.2.5 プラスチック 6 % 現場一面せん断試験結果  
せん断応力・垂直変位 - せん断変位関係

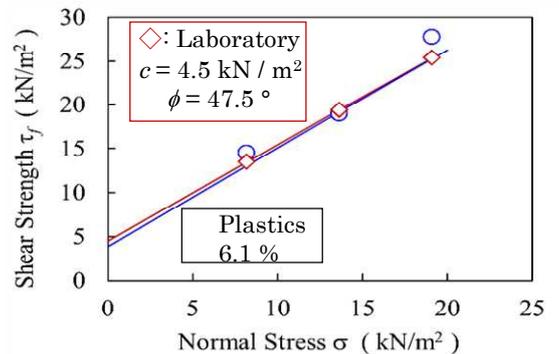


図 3.2.6 プラスチック 6 % 一面せん断試験結果  
せん断強度 - 上載圧関係

### (3) プラスチック含有率 16.5 % (関東①現場)

産業廃棄物中間処理施設に保管基準を大きく上回る約 5.4万 $\text{m}^3$  の廃棄物が残置された不法投棄等現場となる。急勾配斜面 (90°の勾配で約11 mの高さの直壁) が存在し、崩壊の危険性が懸念されている現場となる。廃棄物組成試験結果より試験現場には様々な産業廃棄物が混在しており、プラスチック含有率は 16.5 % となる。現場密度試験より、湿潤密度  $\rho_t = 1.20 \text{ g/cm}^3$  , 含水比  $w = 30.5 \%$  であった。この試験現場において、地表面から2 m(GL-2m)と4 m(GL-4m)を掘削し、GL-2m で上載圧3種類で試験を行い、GL-4mでは上載圧1種類で試験を行った。

プラスチック含有率16.5%の廃棄物に対する現場一面せん断試験結果、せん断応力・垂直変位 - せん断変位関係が図3.2.7となる。図3.2.7はGL-2m (上載圧3種類), GL-4m (上載圧1種類)での現場一面せん断試験結果となる。図3.2.7より、せん断応力-せん断変位関係ではせん断変位の増加に伴いせん断応力が線形的に増加し、ピークがみられない。さらに垂直変位 - せん断変位関係では、せん断時に終始膨張傾向を示す。さらにここで、上載圧が大きいほど膨張傾向が大きくなる傾向を示した。

次に、GL-2mとGL-4mでの試験結果を比較する。これより、同上載圧 $\sigma = 13.6 \text{ kN/m}^2$ でのせん断応力・垂直変位はともにGL-4mが高い値を示した。GL-4mではGL-2mに比べて土被り圧が大きいことから、より大きな応力履歴を受けていたこととなる。これより、堆積廃棄物においても土被り圧の増加により強度が増加する傾向を示すことが明らかとなった。

せん断強度 - 上載圧関係を図3.2.8に示す。図3.2.8より、プラスチック含有率 16.5 % の廃棄物においても現場試験と室内試験でのせん断強度は同程度となる。図3.2.8より粘着力・内部摩擦角を算定すると、現場試験では粘着力  $c = 2.9 \text{ kN/m}^2$  , 内部摩擦角  $\phi = 46.2^\circ$  , 室内試験では粘着力  $c = 3.0 \text{ kN/m}^2$  , 内部摩擦角  $\phi = 43.8^\circ$  となる。

以上より、乱さない供試体 (現場試験時) と乱した供試体 (室内試験時) ではせん断応力・垂直変位 -

せん断変位関係では差が生じるものの、せん断強度には大きな差はみられず、一面せん断試験より求まる強度定数、粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$  は現場・室内試験ともに同様の値を得ることができる。これより、室内試験により粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$  を概ね求めることができる。

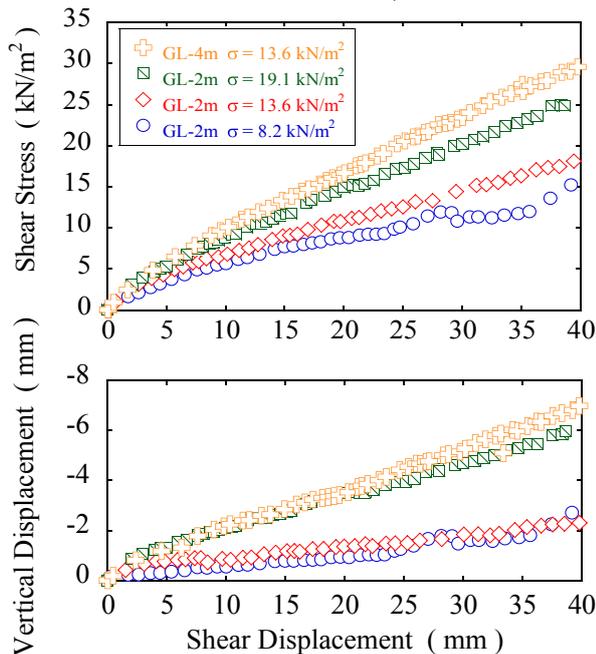


図 3.2.7 プラスチック 16.5 % 現場一面せん断試験結果  
せん断応力・垂直変位 - せん断変位関係

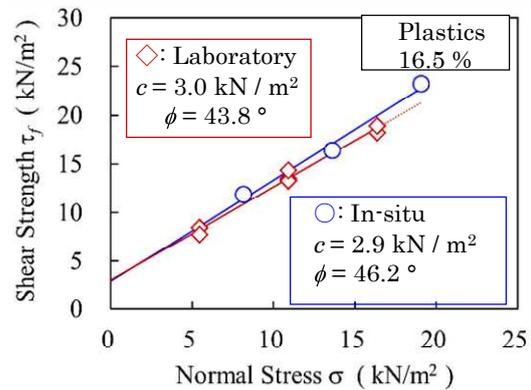
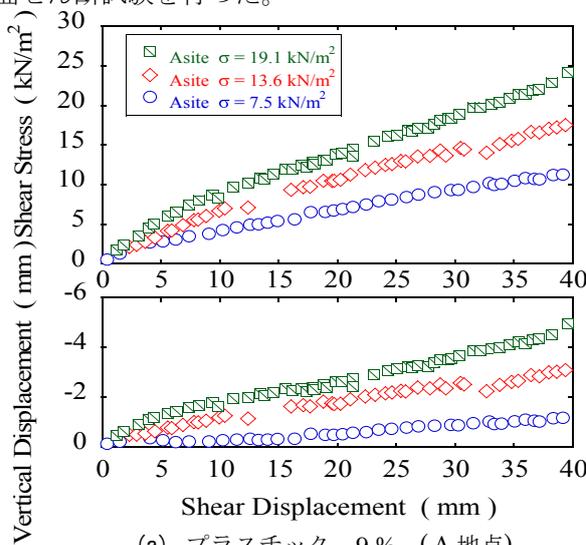


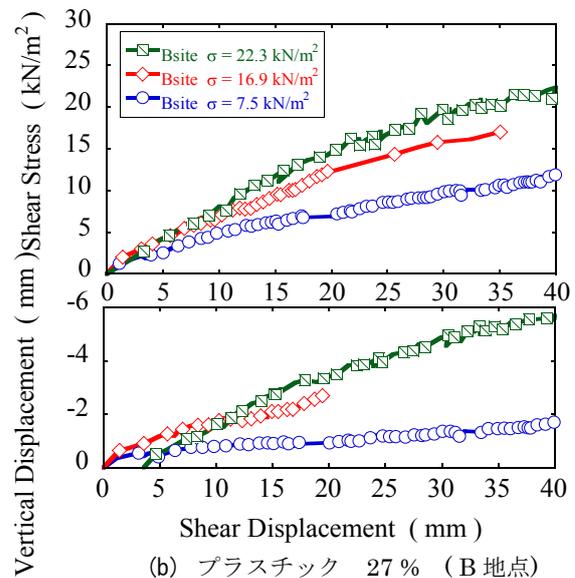
図 3.2.8 プラスチック 16.5 % 一面せん断試験結果  
せん断強度 - 上載圧関係

(4) A:プラスチック等含有率9%、B:27% (上海現場)

国内の不法投棄等現場では行為者が土地の管理者である場合が多く、試験可能な現場が少ない。そのため、日本の不法投棄等現場と廃棄物の組成に近い中華人民共和国の上海老港廃棄物処分場においても現場試験を行った。この試験現場では、組成の異なる2か所 (A 地点: GL-3m、B 地点: GL-1m) において、現場試験を行った。2 か所とも同様であり、奥行方向に距離が異なる場所を試験現場として選定した。2 か所の廃棄物組成試験結果より、A 地点ではプラスチック含有率は 9 % であり、これまで示した日本の不法投棄等現場と同程度の廃棄物組成となる。さらにB 地点ではプラスチック含有率(繊維類を含む)が 27 % であり、これまでの不法投棄等現場と比べると最もプラスチック含有率が多く、礫・陶磁器類の割合が少ない。現場密度試験結果より、A 地点では湿潤密度  $\rho_t = 1.21 \text{ g/cm}^3$ 、含水比  $w = 45 \%$  であり、B 地点では湿潤密度  $\rho_t = 1.06 \text{ g/cm}^3$ 、含水比  $w = 39 \%$  であった。この試験現場においても地表面を 2m 程度掘削し、現場一面せん断試験を行った。



(a) プラスチック 9 % (A 地点)



(b) プラスチック 27 % (B 地点)

図 3.2.9 プラスチック等 9 % , 27 % 一面せん断試験結果  
せん断応力・垂直変位 - せん断変位関係

プラスチック含有率 9 % の A 地点での廃棄物と 27 % の B 地点での廃棄物に対する現場一面せん断試験結果、せん断応力・垂直変位 - せん断変位関係が図3.2.9となる。図3.2.9より、A 地点、B 地点の両地点において、せん断応力 - せん断変位関係では、せん断応力はせん断変位の増加に伴い増加を続けピークが現れない。さらに、垂直変位 - せん断変位関係より、せん断時に終始膨張傾向を示し、上載圧が大きいほど膨張傾向は大きくなる。この傾向は、プラスチック含有率 16.5 % の廃棄物に対する試験結果と同様の傾向を示している。試験結果では、プラスチック含有率がある一定以上となることで、それ以下の廃棄物とは異なるせん断挙動を示す傾向がみられた。プラスチック含有率が高い廃棄物の現場せん断挙動は、せん断変位の増加に伴いせん断応力は線形的に増加を続けピークを示さず、せん断時は終始膨張傾向を示す挙動を示している。これはプラスチックの補強効果なるものによってせん断挙動に影響が及んでいるためであると思われる。

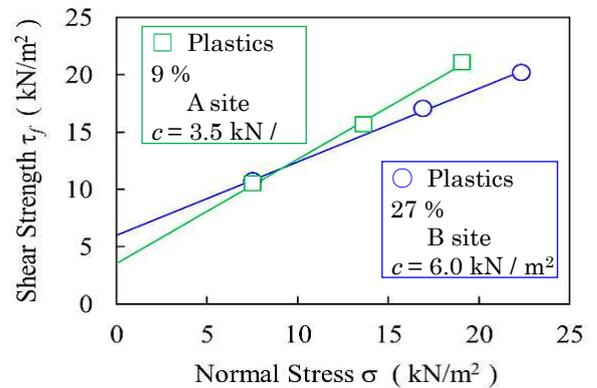


図 3.2.10 プラスチック 9 % , 27 % 一面せん断試験結果  
せん断強度 - 上載圧関係

さらに図3.2.9より、せん断強度 - 上載圧関係を描いた図が図3.2.10となる。図より粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$  を求めると、A 地点では粘着力  $c = 3.5 \text{ kN/m}^2$ 、内部摩擦角  $\phi = 42.5^\circ$  となり、B 地点では粘着力  $c = 6.0 \text{ kN/m}^2$ 、内部摩擦角  $\phi = 32.6^\circ$  となった。

### 3.2.4 現場土圧試験について

3 か所の堆積廃棄物の現場において現場土圧試験を実施した。写真 3.2.13 に現場土圧試験の実施状況を示す。長さ 90cm の杭を 7 本並べて、摩擦の影響を考慮して内側の 5 本の杭に作用する土圧の合力を求めた。このときの有効幅は、 $B=27\text{cm}$  である。また、杭が傾くときに、根入れが浅いと杭の自重で回転モーメントが作用し、その影響が無視できないため、5 つの杭の自重 ( $W=17.3\text{kgf}$ ) を考慮する必要がある。そのため、受働土圧係数を逆算する場合は、杭の傾斜を考慮できるクーロン土圧の考え方を用いる。



写真 3.2.13 現場土圧試験の実施状況

実測結果から、土圧の合力が最大値を示すときを破壊とし、このときの杭の傾斜角  $\theta$  は約  $100\sim 110^\circ$  であった。現場土圧試験の結果から強度定数を算定することができるが、ここでは、地表面の傾斜角  $i=0$ 、壁面の摩擦角は  $\delta=(2/3)\phi$  と仮定する。また、土圧には土の単位体積重量  $\gamma$  が影響するため、この値については、各現場で求めた湿潤単位体積重量を用いることとする。

#### (1) 中部①現場

現場の堆積廃棄物は、プラスチックが少ない場所とプラスチックが多い場所がある。一面せん断試験はプラスチックが少ない場所のみで実施した。また、現場土圧試験は、プラスチックが少ない場所とプラスチックが多い場所の二箇所で行った。プラスチックが少ない場所の土の単位体積重量は、 $\gamma=1.2 \text{ gf/cm}^3$  であった。土圧の計算では、いずれの場所もこの値を用いることとする。図3.2.11に現場土圧試験の実験結果を示す。図の縦軸は、「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」に示した(4)式の左辺より求められる。横軸に根入れ深さ  $H$  をとって直線近似を行い、この直線の傾きから受働土圧係数  $K_p$  が算定される。さらに、同マニュアル(案)の(5)式のクーロン土圧係数において、杭の傾斜角 ( $\theta$ )、地表面の傾斜角 ( $i$ ) および

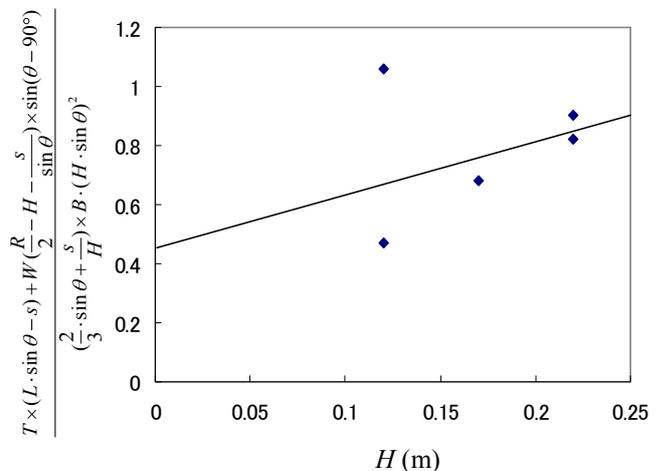


図 3.2.11 現場土圧試験の実験結果  
(中部①：プラスチックが少ない場所)

壁面の摩擦角 ( $\delta$ ) を与えると内部摩擦角  $\phi$  が算定される。また、この直線の切片から粘着力が算定される。このようにして推定された粘着力と内部摩擦角は以下のとおりである。

<現場土圧試験により算定された強度定数：プラスチックが少ない場所>

$$c = 5.5 \text{ kN/m}^2, \quad \phi = 52^\circ$$

また、現場一面せん断試験により得られた強度定数は以下のとおりである。

<現場一面せん断試験の実測値>

$$c = 3.9 \text{ kN/m}^2, \quad \phi = 50.6^\circ$$

これらの結果を比較すると、現場土圧試験から求めた強度定数は、現場一面せん断試験の実測値と概ね一致することがわかる。

一方、プラスチックが多い場所で行った現場土圧試験の結果を図3.2.12に示す。この結果をもとに、上述と同様の方法で求めた強度定数を以下に示す。

<現場土圧試験により算定された強度定数：プラスチックが多い場所>

$$c = 2.5 \text{ kN/m}^2, \quad \phi = 51^\circ$$

この場所での一面せん断試験は実施していないが、現場土圧試験により求めた強度定数は、プラスチックが少ない場所で求めた値とあまり変わらない結果が得られている。

次に、東北地方の震災篩下残渣堆積地で実施した現場土圧試験の結果を図3.2.13に示す。現場の土の単位体積重量は、 $\gamma = 1.1 \text{ gf/cm}^3$ であった。データにかなりばらつきがあるため、最大と最小値の二つを除いた残りのデータで直線を求めた。この結果をもとに、上述と同様の方法で求めた強度定数を以下に示す。

<現場土圧試験により算定された強度定数>

$$c = 2.1 \text{ kN/m}^2, \quad \phi = 43^\circ$$

また、現場一面せん断試験により得られた強度定数は以下の通りである。

<現場一面せん断試験の実測値>

$$c = 10.8 \text{ kN/m}^2, \quad \phi = 47.3^\circ$$

これらの結果を比較すると、現場土圧試験から求めた強度定数は、現場一面せん断試験の実測値よりやや小さな値を示しているが、概算値としては妥当な値が得られている。

次に、中部②の不法投棄等現場で実施した現場土圧試験の結果を図3.2.14に示す。この結果をもとに、上述と同様の方法で求めた強度定数を以下に示す。

<現場土圧試験により算定された強度定数>

$$c = 3.1 \text{ kN/m}^2, \quad \phi = 47^\circ$$

この現場で一面せん断試験は、1つの上載圧 (13.6 kN/m<sup>2</sup>) のみの条件で実験を行った。そのため、強度定数は得られていない。このときのせん断強度は、24 kN/m<sup>2</sup>であった。現場土圧試験により算定された

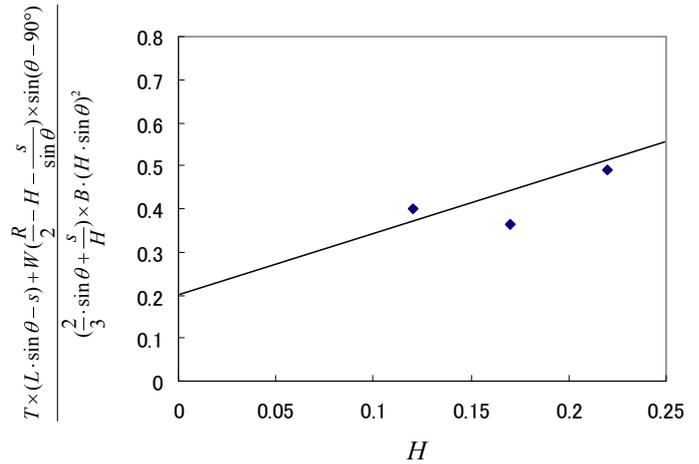


図 3.2.12 現場土圧試験の実験結果 (中部①：プラスチックが多い場所)

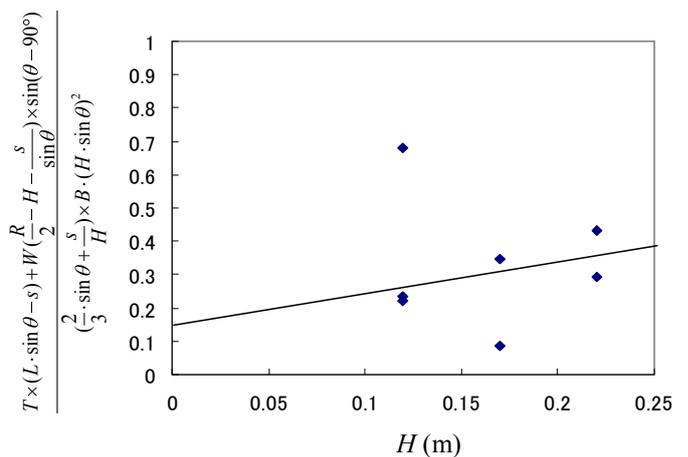


図 3.2.13 現場土圧試験の実験結果 (東北：震災篩下残渣堆積地)

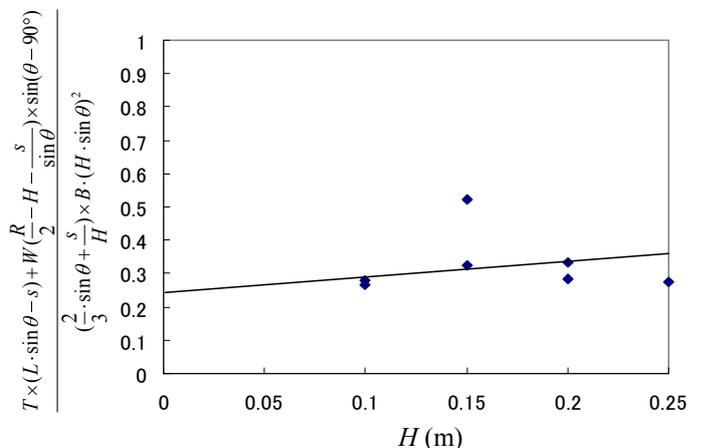


図 3.2.14 現場土圧試験の実験結果 (中部②)

強度定数を用いて、上載圧 13.6 kN/m<sup>2</sup> のせん断強度を求めると 18kN/m<sup>2</sup> となるので、ばらつきを考えると概ね妥当な値であると考えられる。

### 3.2.5 引張試験について

関東①不法投棄等現場の GL-2m での廃棄物を用いて大型引張試験を行った。供試体は湿潤単位堆積重量 9.0 kN/m<sup>3</sup> 程度で作製した。試験は上載圧 50, 100, 150, 200 kN/m<sup>2</sup> の 4 条件で試験を行った。

図 3.2.15 に引張試験結果、引張応力・垂直変位—引張変位関係曲線を示す。図より、引張応力—引張変位関係では、引張応力は確かに発現し、上載圧を増加させるにつれ引張応力も増加する。上載圧が大きいほど引張応力のピーク値は明確に表れ、引張変位が小さい値でピーク値を示す。また、垂直変位—引張変位関係では、すべての条件において収縮を示し、上載圧が大きいほど収縮量が減少する。これは、引張応力が大きいほどプラスチック類の伸び変形が大きくなるため収縮の減少を抑制したと容易に理解できる。さらに、図より、引張応力のピーク値を引張強度とし、引張強度—上載圧関係を描いた図が図 3.2.16 となる。

図 3.2.16 より、引張強度—上載圧関係は比例関係となり、上載圧に依存しない強度(図の切片)と上載圧に依存する強度(図の傾き)が存在することが分かる。これより、引張強度を以下の式で定義する。

$$Z = c_T + \sigma \tan \zeta$$

ここに、Z: 引張強度(kN/m<sup>2</sup>)     $c_T$ : 引張粘着力 (上載圧に依存しないパラメータ) (kN/m<sup>2</sup>)

$\zeta$ : 引張摩擦角(°) (上載圧に依存するパラメータ)

図より、 $c_T$ ,  $\zeta$  は  $c_T = 10.3 \text{ kN/m}^2$ ,  $\zeta = 18.2^\circ$  となる。

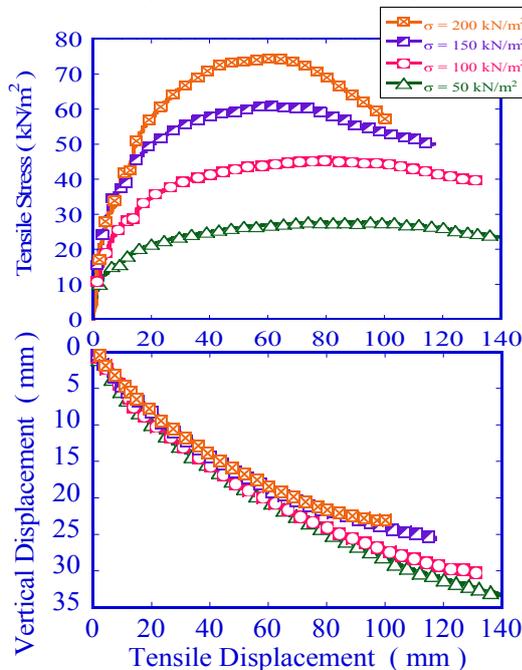


図 3.2.15 大型引張試験結果  
引張応力・垂直変位—引張変位関係

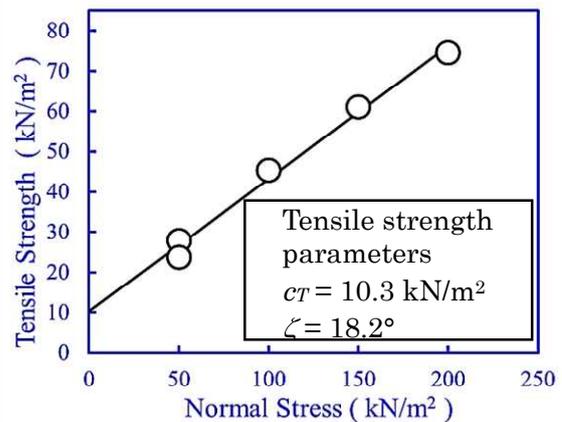


図 3.2.16 引張試験結果  
引張強度—上載圧関係曲線

### 3.2.6 基礎実験結果について

本節では堆積廃棄物の基本的な力学特性等を把握するために実施した基礎的な室内実験及び現場実験の結果を示す。

#### (1) 関東①現場から採取した試料を用いた堆積廃棄物地盤の土質試験

関東①現場から採取した試料を用いて、表 3.2.6 に示す土質試験を実施した。試験は「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」表(1) (産業廃棄物不法投棄等現場の斜面安定性評価上での分類) 中の紐状物、シート状物と細粒分主体の堆積廃棄物の力学特性の違いを明らかにする観点から、採取した試料を篩いなしで用いた篩なし試料と、篩下 19mm の試料の二つに分けて実施した。

堆積廃棄物地盤から採取した試料は、従来の土質試験に基づいて実施可能と考えられるが、大きなプラスチックや礫分を含んでいるため、これらの取り扱い(試料から除去するかどうか等)及びその影響をどのよ

うに評価するかは今後の課題である。また、堆積廃棄物地盤の斜面安定性を評価する上で、粘着力  $c$  及び内部摩擦角  $\phi$  は大きな影響を及ぼすが、これらの地盤強度定数は三軸圧縮せん断試験によって求められるケースがこれまでの廃棄物地盤調査では多いようである。

今回の三軸圧縮せん断試験結果は一面せん断試験結果と比べ大きな粘着力を有しているが、データの変動も大きく、定量的なデータを得るには至っていない。三軸圧縮せん断試験の堆積廃棄物地盤への適用性については、より詳細な検討が必要である。

## (2) 関東①現場から採取した試料を用いた一軸圧縮試験

堆積廃棄物地盤試料には大きな礫やプラスチックを含むため、三軸せん断試験を実施する場合、大型の試験機を用いなければならない。しかし、大型の試験は時間と費用がかかるため、比較的簡易かつ安価に実施できる一軸圧縮試験<sup>46)</sup> ( $\phi$  100mm,  $h=200$ mm) の適用を試みた。

試験は関東①現場から採取した試料を用い、採取した試料をそのまま用いた篩なし試料 ( $\phi$  100mm と比べ明らかに大きい礫やプラスチックは除去) と、篩下 19mm の試料及び篩下 19mm の試料からプラスチックを手選別により除去したプラ除去試料の三つのケース

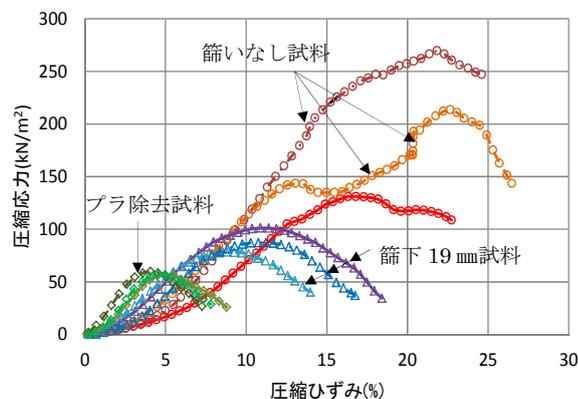
表 3.2.6 関東①現場の試料を用いた土質試験結果

試験項目	単位	篩なし試料	篩い下19mm試料	準拠規格	備考
一般					
土粒子の密度: $\rho_s$	$g/cm^3$	2.260	2.255	JIS A 1202	
自然含水比: $w_n$	%	21.4	26.7	JIS A 1203	
粒度					
礫分	%	70.6	52.9	JIS A 1204	
砂分	%	15.6	24.5		
シルト、粘土分	%	13.8	22.6		
締固め					
試験方法		B-c	B-c	JIS A 1210	モールド内径15cm、高さ12.5cm
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$	$g/cm^3$	1.291	1.208		
最適含水比 $w_{opt}$	%	28.1	33.2		
せん断					
試験条件		CD	CD	JGS 0524	$\phi$ 100mm, $h=200$ mm 側圧15, 30, 45kPa
内部摩擦角 $\phi_d$	$^\circ$	47.9	46.3		
粘着力 $C_d$	$kN/m^2$	38.3	34.8		
透水					
透水試験方法		定水位	定水位	JIS A 1218	透水円筒内径15cm、長さ12.5cm
透水係数 $k$	$m/s$	1.17E-03	3.01E-04		

でそれぞれ三回実施した。試験結果を表 3.2.7 及び図 3.2.17 に示す。プラ除去試料、篩下 19mm 試料、篩なし試料の順に最大圧縮応力及び破壊ひずみが大きくなった。また、プラ除去試料では供試体中央がはらみ出すように破壊したが、篩なし試料では圧縮応力のピークが過ぎた後も中央部のはらみ出しの变形は確認されず、

表 3.2.7 一軸圧縮試験結果 (3 回の平均値)

項目	単位	篩なし試料	篩い下19mm試料	プラ除去試料
湿潤密度	$(g/cm^3)$	1.41	1.55	1.54
含水比	(%)	28.1	33.1	28.5
プラ含有量	(%)	3.6	3.8	-
最大圧縮応力	$(kN/m^2)$	206	89.2	58.3
破壊ひずみ	(%)	16.2	8.6	3.8
弾性係数 $E_{50}$	$(kN/m^2)$	1,686	1,473	2,086



篩いなし試料 篩下 19mm 試料 プラ除去試料

図 3.2.17 一軸圧縮試験結果 (左: 応力ひずみ関係、右: 圧縮応力ピーク後の供試体の状態)

供試体全体が圧縮変形した。

次に、一軸圧縮試験の供試体の一部からプラスチックを取り出し、長さや幅を測定した結果を図 3.2.18 に示す。篩なし試料から採取したプラスチックの重量は 7.1 g でその数は 122、長さが 40mm 以上のものは 43 で全体の 35.2%であった。篩下 19mm の試料から採取したプラスチックの重量は 7.2 g でその数は 90、長さが 40mm 以上のものは 13 で全体の 13.5%であった。両供試体の最大圧縮応力が大きく異なっていることから、長さが 40mm 以上のプラスチックが供試体の変形を拘束し、大きな圧縮応力の発現に寄与していると考えられる。

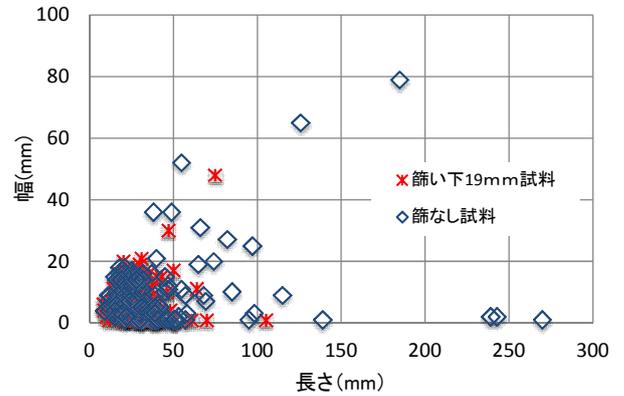


図 3.2.18 供試体に含まれるプラスチックの長さや幅の分布図

### (3) 大型土槽を用いた堆積廃棄物地盤の水平土圧に関する実験

繊維状物を含む堆積廃棄物の力学特性を把握するために、高さ 1.1m、幅 1.15m、奥行き 0.8m の土槽に関東①現場から採取した試料を充填した。試料は 4 層に分け、25kPa を載荷しながら充填した後、10kPa 毎に上載圧を増加させながら 50kPa まで載荷した。図 3.2.19 に水平土圧分布の結果を示す。土槽中央の水平土圧が卓越し、上下端に向かい減少する円弧のような水平土圧分布となり、通常地盤に比べ弾性的挙動が卓越することが示唆された。

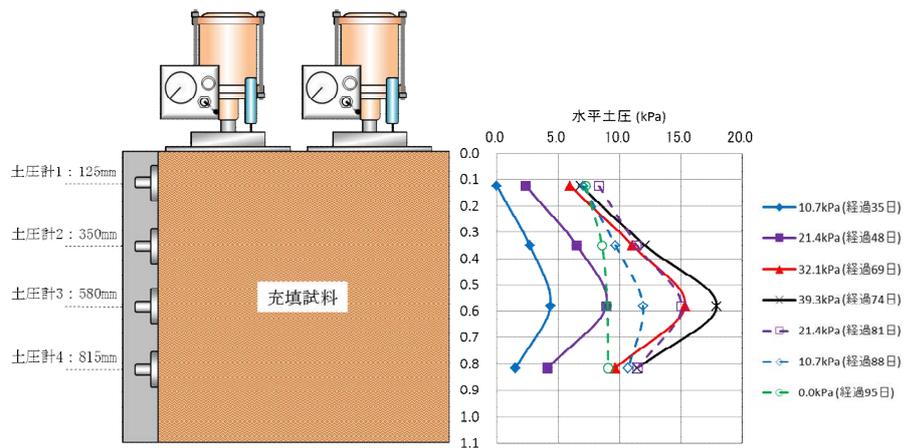


図 3.2.19 水平ごみ圧分布 (経過 35 日を基準とした増減を表示)

### (4) 大型土槽を用いた堆積廃棄物地盤中のプラスチックに発生するひずみ測定に関する実験

堆積廃棄物地盤に含まれる繊維状物等は引張抵抗を有し、堆積廃棄物地盤の安定性に大きく寄与することが各種実験により明らかになりつつある。そこで、プラスチックにひずみゲージを貼付け、堆積廃棄物地盤中のプラスチックに発生するひずみ (プラスチックの伸び) を直接計測することを試みた。図

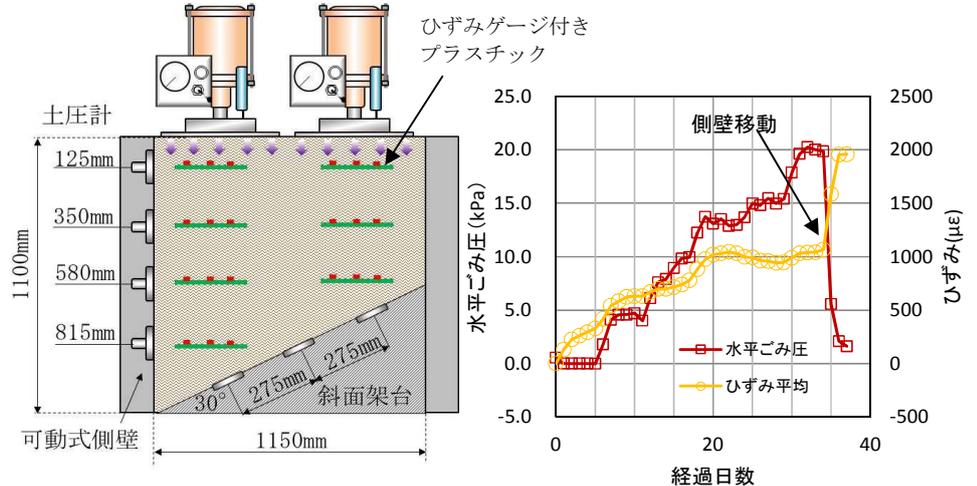


図 3.2.20 実験模式図

図 3.2.21 水平ごみ圧とひずみ結果

3.2.20 に実験の模式図を示す。

大型土槽内に斜面架台を設置し、傾斜地上の堆積廃棄物地盤を模擬した。また、図中左側の側壁は可動式となっており、50kPa まで上載した後、経過日数 35 日に側壁を主働土圧が発生する方向に移動させた。図 3.2.21 に土槽深さ 580mm 位置での水平土圧及びプラスチックのひずみの経時変化を示す。上載圧の増加に伴い充填試料は圧縮され、水平土圧及びひずみも増加している。圧縮に伴いプラスチックが引張りを受けていることがわかる。また、経過日数 35 日の側壁移動後に、プラスチックのひずみが大きく上昇し、充填試料は自立した。側壁移動に伴う応力開放時の土粒子の動きに対し、プラスチックによる拘束効果が発揮されたと考えられる。

### (5) プラスチックの室内引抜き試験

現場におけるプラスチックの引抜き試験では、引抜くプラスチックの材質や形状にばらつきがあるため、定量的なデータを得ることが難しい。そこで、人為的に作成したプラスチックを 100mm 重ねあわせるように配置し、片方のみを引抜いた結果、重ねあわせ部分で引拔力が伝達することが確認された (図 3.2.22)。プラスチック等の繊維状物の引抜抵抗は、引抜かれる繊維状物単体だけではなく、他の繊維状物の影響を受けることが示唆された。

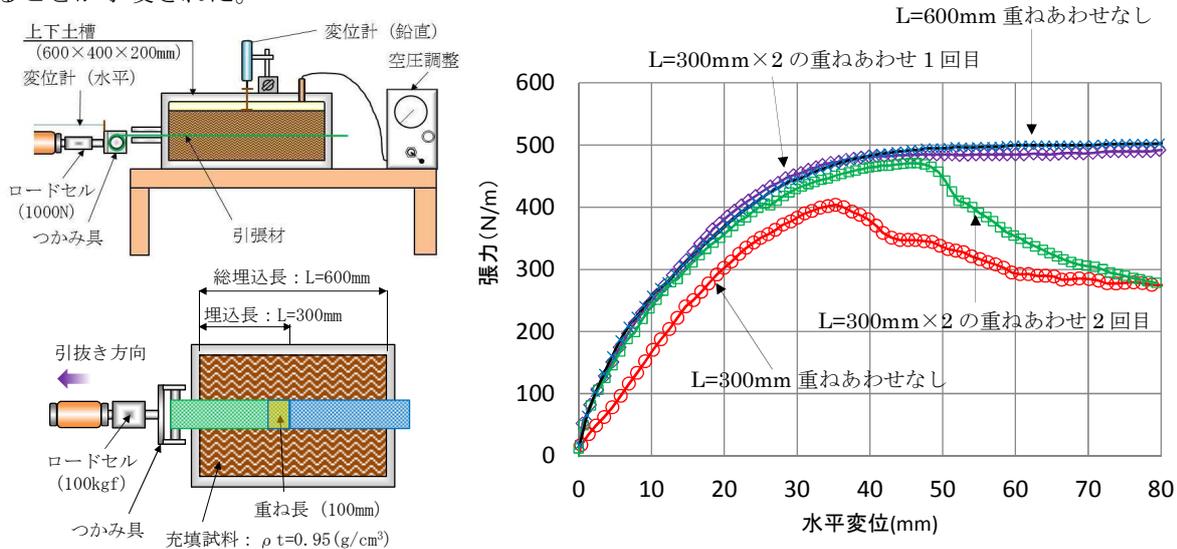


図 3.2.22 実験装置 (左) とプラスチックの引抜変位-張力の結果 (右)

#### (6) プラスチックの引抜き試験

関東①現場で廃棄物層から露呈している繊維状物等を図 3.2.23 左のとおりに引き抜いて、そのときの引抜力 (引抜抵抗) をみた (図 3.2.23 右に計測結果の例を示す)。

引抜抵抗の最大値は、プラスチックが引抜ける場合は 40~100N であり、破断して引抜ける場合は概ね 10 倍の 400~500N を計測した。破断して引抜ける場合は、周辺部の地盤も引抜きに伴い変位することが確認された。また、土被り厚が厚い程、引拔力が大きくなった。

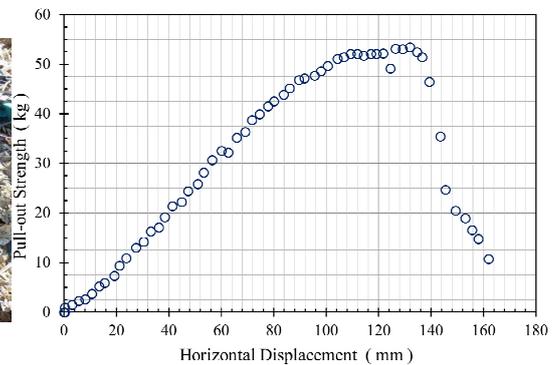


図 3.2.23 現場引抜試験と引抜変位-引抜力の結果

試験結果から、廃棄物層に

働くであろう引張抵抗は、層内での繊維状物等の絡み合いや付着等による抗力が主で、それらを発現させる要因として土被り厚=載荷重あるいは先行荷重が担っていることが推察される。

また、試験では堆積層中の埋設長が最短 8cm のもので引抜力を有した (これより短いものは引き抜くと層断面から繊維状物等がポロポロと落ちるような状態で引抜力は計測できなかった)、少なくともこの程度の長さの繊維状物は廃棄物層が持つ引張抵抗に寄与しているものとみられる。このことから、「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」表(1)注1で、概略評価段階で引張抵抗を考慮できる現場の概ねの目安として 10cm 以上の繊維状物を含む現場とした。

#### (7) FWD (重錘落下試験) の堆積廃棄物地盤への適用について

小型 FWD システム (東京測器研究所) を用いて、中部②現場の地盤反力係数  $K_{30}$  及び地盤弾性係数  $E$  の計測を試みた。FWD はキャスポルと同様に加速度計を内蔵しているが、載荷板の大きさ、重錘、落下高さが設定でき、外部変位センサの取付けにより重錘落下による影響範囲の測定も可能である。

図 3.2.24 に堆積廃棄物地盤表層のプラスチックを多く含む箇所での測定結果を示す。落下高さを変えて計測した載荷応力は直線となり、沈下量 1.25mm 時の載荷応力として算出した地盤反力係数  $K_{30}$  は  $3.1 \text{ (MN/m}^3\text{)}$

で、地盤弾性係数  $E$  は  $1.2(\text{MN}/\text{m}^2)$  であった。同現場内での測定結果では、プラスチックが多い箇所では、 $K_{30}=3.1\sim 5.1(\text{MN}/\text{m}^3)$ 、 $E=1.1\sim 1.7(\text{MN}/\text{m}^2)$ 、プラスチックが少なく土砂分が多い箇所では  $K_{30}=11.0\sim 16.4(\text{MN}/\text{m}^3)$ 、 $E=3.3\sim 4.7(\text{MN}/\text{m}^2)$  であった。また、外部変位センサによる重錘落下の影響範囲は  $0.35\text{m}$  程度であった (図 3.2.25)。

FWD によって計測された地盤反力係数  $K_{30}$  は、キャスポルのインパクト値から換算される地盤反力係数と一致することが別途確認されており、プラスチックが多い箇所の地盤弾性係数  $E=1.1\sim 1.7(\text{MN}/\text{m}^2)$  は一軸圧縮試験の  $E_{50}$  (表 3.2.7 参照) と一致している。しかし、FWD は動的な計測結果であり、静的な現場平板載荷試験の試験結果に比べ大きな値を計測するとの報告もある。今後は現場平板載荷試験と併用して試験を実施する等、データの蓄積が必要と考えられる。

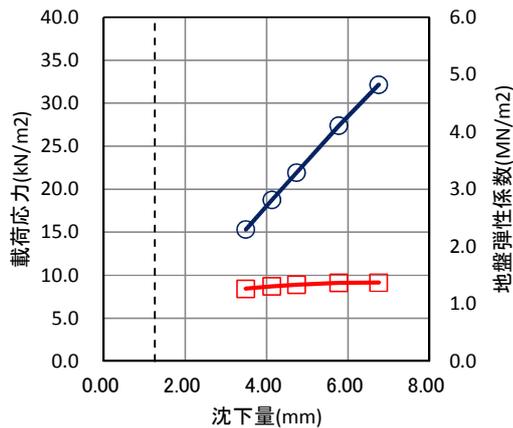
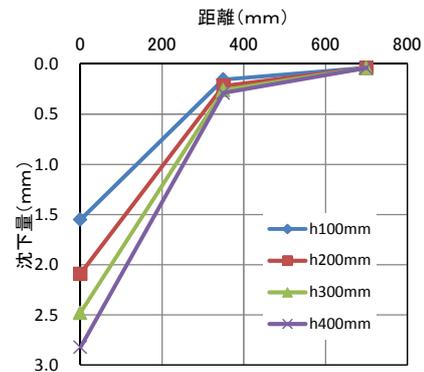


図 3.2.24 FWD 計測結果



(凡例は重錘落下高さ)

図 3.2.25 外部変位センサによる影響範囲

### 3.2.7 試料サンプリング方法について

従来、土質力学試験においては不攪乱試料採取し、供試体を作成、各種力学試験を実施することになっている。しかし、本研究対象である不適正処分された堆積廃棄物層において、不攪乱試料採取は非常に困難を伴う。これは、廃棄物層の成り立ちは、各地から不適正に搬入される産業廃棄物であり、発生場所により廃棄物組成も、個々の廃棄物の大きさも様々であることによる。そのため、一つの現場においても、場所によって組成が異なることがほとんどである。現場での土質力学試験を行う場合は不攪乱供試体を用いて試験を行うことが適しているとは言うまでもないが、実験室内で行う試験の場合は、不攪乱試料採取は一般に難しいことから、攪乱試料を用いて、試験回数を多くすることも検討すべきである。

#### ①不攪乱試料採取

不攪乱試料採取を実施する場合は、せん断箱の形状により、道路工事等で使用されている大型から中型のカッターやコアドリル等(写真 3.2.14)を用いる手法が考えられる。しかし、廃棄物層内には、金属、コンクリート、石、プラスチック、木材、繊維等様々な材質の物が不均質に存在しているため、金属の塊による刃の欠損、紐状物による絡まり、高速回転時の発熱によるプラスチック類の変質・付着等が生じる可能性は否めない。また、ごみ山では、不法投棄された廃棄物の質や廃棄物層内の環境によってメタンガス等の可燃性ガスが生じている場合もあり、切断時に火花が生じると火災が生じる危険性があるため、細心の注意を払う必要がある。

写真 3.2.15 に現場一面せん断試験用に廃棄物層から供試体を切り出すための位置決め及び供試体成形後の写真を示した。

まず、供試体用の型枠を用いて、切り出す位置を決める。



写真 3.2.14 中型カッターとコアドリル



写真 3.2.15 試料採取位置の選択及び供試体の成形

廃棄物層には大きながれき類や布類等が混入しているため、採取位置を決めた後、ポール等を周辺層内に突き刺し、切り出しに不適な廃棄物の存在がないことを確かめると良い。切り出し位置を決めたら、周辺から手鍬や鋤を用いて周辺から徐々に掘削を行う。適度な大きさの供試体を切り出した後、型枠を徐々にはめながら、電動グラインダー、万能ばさみ、カッター等を用いて成形を行う。不攪乱試料採取を行う場合は、型枠をはめた後、底部を鋏等を用いて切断し、枠をはめたまま、ビニール袋等で梱包し水分の蒸発を抑え、さらに、型枠からこぼれ落ちないように堅牢な容器に入れる必要がある。

その他の不攪乱試料採取法として、試料採取器を打撃により廃棄物層に打ち込み採取する手法も考えられるが、大きく厚みのある廃棄物の存在、及び弾力性を有するプラスチック類が存在するため、打撃・切断による試料採取はさらに困難を伴うことが多い。写真 3.2.16 に厚さ 3mm のステンレス板 (300mm×300mm×250mm) で作成した試料採取器 (討ち入れ部に刃を作成) を用いて試験的に実施した不攪乱試料採取試験時の写真を示した。重機による加圧・打ち込みにより、試料採取が行える場合もあるが、打ち込みによりステンレス製の採取器が熱を帯びるため、水分の蒸発が早まるので、有姿のまま保存するためには迅速な梱包が必要である。

#### ②攪乱試料の採取における必要事項

実験室内で土質力学試験を行う場合、試料採取とともに、試料採取時に現場でしか得ることができない情報、廃棄物層の密度は現場で測定する必要がある。廃棄物層の密度を測る公定法は規定されておらず、最大粒径が極めて大きい土用の試験法で廃棄物地盤に適用可能である「水置換による土の密度試験」<sup>47)</sup>(JGS1612)を参考に実施する。また、採取後の試料から実験室内で得る情報として、含水比や粒度分布等の情報があることも考慮すると、土の含水比試験方法 (JIS A1203) を参考に、最小でも 30kg 以上の容積を掘削し、廃棄物層密度、廃棄物層含水比を求めるべきである。写真 3.2.17 に水置換による廃棄物層現場密度試験状況を示した。実験室内での土質力学試験用に採取する廃棄物試料は、掘削試料全てを密封保管し、粒径、組成等を調べるべきである。しかし、廃棄物層には様々な大きさの廃棄物が混入しており、土質力学装置の大きさにより、充填する廃棄物の最大粒径も決まるため<sup>注)</sup>、現地である程度大きな廃棄物を除く場合はそれらの重量、見かけ容積等を記録しておくことが必要である。



写真 3.2.16 試料採取試験器及び重機による打ち込み



写真 3.2.17 水置換による廃棄物層密度試験

注)「土の圧密定体積一面せん断試験方法」(地盤工学会基準: JGS0560)では、最大粒径 0.85mm を超える土に対しては供試体直径を最大粒径の 70 倍程度を標準とするが、粒径幅の広い土ではその条件を緩和することができる。高さは供試体直径の 1/3 程度とする。供試体の断面形状は正方形、長方形でも良いと記されてため、あまり大きな廃棄物を用いて試験することは適切ではないと考えられる。その他の文献「室内大型一面せん断試験の実施事例」(全地連「技術 e-フォーラム 2002」よなご、(株)藤井基礎設計事務所、姉川学利ら)<sup>51)</sup>によると、600mm×600mm のせん断枠で最大粒径 150mm まで可能と記されている。

### 3. 3 実験結果のまとめ

国内外 9 現場で行った実験（採取試料を用いた室内実験を含む）の結果一覧を表 3.3.1 に示す。一連の実験で把握できた事項は次のとおりである。

#### ○わが国の不法投棄等現場の廃棄物層が持つ高い摩擦抵抗

- ・わが国の不法投棄等現場での一面せん断試験と現場土圧試験による内部摩擦角（ $\phi$ ）と停止安息角（盛りこぼしを含む角度）はいずれも 45°程度を示しており、一般的な盛土地盤の値である 30°程度や、ジャカルタの埋立地の停止安息角 36°～40°と比べて、非常に大きい。要因として、わが国の不法投棄等現場では、行為者が用地内にできるだけ多くの投棄をするため良く締固めていることや、プラスチック等の繊維状物等に加え海外の都市固形ごみには含まれないコンクリートがら等の雑多な廃棄物による噛み合わせ効果によることが推察される。また、ジャカルタの埋立地の停止安息角が比較的小さいのは、都市固形ごみに多量に含まれる生ごみや熱帯降雨による水分量の多さにより摩擦抵抗が小さくなっているためとみられる。わが国の不法投棄等現場の強度特性上の特質として、非常に高い摩擦抵抗を有することが第一にあげられる。

#### ○プラスチック等の繊維状物等の有無による異なる強度特性

- ・プラスチック等の繊維状物等を多く含む場合（上海、関東①、中部①、中部②、ジャカルタ）とほとんど含まない場合（九州、関東②、関西）を比較すると、試験結果全般に明らかな差異がある。
- ・繊維状物等を含まない場合は、一面せん断試験で得られる「せん断変位－せん断応力」曲線で通常の土質材料と同様にせん断応力にピークが現れることや、キャスポル試験（衝撃加速度試験）でのインパクト値（衝撃加速度）が大きいなど、通常の盛土地盤と同様の強度特性を有する。
- ・繊維状物等を含む場合は、一面せん断試験の「せん断変位－せん断応力」曲線にピークが現れない、キャスポル試験のインパクト値が小さい、大型土槽試験で弾性体的土圧分布を示すなど、盛土地盤とは明らかに挙動が異なり、弾性体的特徴を有する。
- ・繊維状物等を含む場合は、一面せん断試験や現場土圧試験で摩擦抵抗（ $\phi$ ：内部摩擦角）は大きく、粘着力（ $c$ ）は小さい値を示す。また、引張試験や現場引抜試験により引張抵抗を有することが確認されており、繊維状物等を含む不法投棄等現場が急勾配で安定するのは、高い摩擦抵抗と引張抵抗によっていることが示唆される。
- ・震災廃棄物の破碎後篩下残渣（長さ数 cm 程度の木くずやプラスチック等を含む）も、上記の繊維状物等を多く含む現場に匹敵する強度定数、安息角を示す。

#### ○一面せん断試験等の $\phi$ 、停止安息角、及び現場の急勾配斜面勾配がほぼ一致

- ・一面せん断試験及び現場土圧試験の  $\phi$  と停止安息角は、各現場でほぼ同じ値をとった。また、これら試験値は、不法投棄等現場で形成されている急勾配斜面の勾配とほぼ同じ値であった。このことから、これらの試験の信頼性と、停止安息角が概略検討段階で  $\phi$  の代替として活用できることが窺える。

#### ○一面せん断試験の現場と室内の試験結果に大差が無い

- ・関東①現場の試料による比較では、廃棄物層を乱さない状態で行った現場実験結果と、乱した採取試料を用いた室内試験の結果について、斜面安定性評価を行う上で問題となるような顕著な差は生じていない。

#### ○停止安息角以上の勾配の斜面で表層崩壊が発生

- ・不法投棄等現場内で安定している急勾配斜面は概ね、停止安息角～限界安息角（盛りこぼしを含まない角度）の範囲内にある。
- ・斜面全体が停止安息角以上で形成されていた関西現場で表層崩壊が発生した。
- ・掘削されて直壁（勾配 90°）が形成されていた関東①現場では、法肩から奥行き方向 1m 程度の範囲の表面崩壊が生じた。
- ・停止安息角以上の急勾配（約 60°）で積み上げられていた中部①現場では、斜面の法肩から約 1m の部分に法肩に平行に長さ約 10m、幅数 cm のクラックが発生した。
- ・ジャカルタ近郊のシパユン埋立地（安息角試験を行ったサムルバツ埋立地とごみ質がほぼ同様）では、サムルバツでの停止安息角を上回る 50° 以上の勾配で盛られた高さ 5m 程度の法面で表層崩壊が生じた。
- ・停止安息角以下で盛られていた東北現場の堆積場所（法勾配 40°）での、法肩へバックホウ・バケツ

トによる載荷実験では、沈下、はらみだしは生じたものの斜面崩壊はしなかった。

- ・ 停止安息角 45°の中部②現場で、勾配 40°と 60°の廃棄物の山（高さ 1.5m）を構築して行ったバックホウ・バケットによる載荷実験では、40°の山は下方に圧縮されるのみであったが、60°の山は崩壊現象を示した。
- ・ 以上から、停止安息角は、安定斜面勾配の指標になりうることが窺える。

○キャスポル試験は現場の締固め状況に応じた結果を示す

- ・ 繊維状物等を多く含む現場ではインパクト値は一般的な盛土地盤よりも小さい値をとるが、締固めの状態を反映した値が得られた。とくに、インパクト値が 4 以下の場所では明らかに締固めが不十分であったり、急勾配斜面上にクラックが生じており、指標として活用できる可能性があることが窺えた。
- ・ 不法投棄等地盤でのインパクト値からの強度定数の推定は、現状ではデータ不足により困難である。

○非破壊試験は廃棄物地盤への適用性を高めるには十分なデータ蓄積が必要

- ・ 表面波探査を 2 現場、電気探査を 1 現場で行った。表面波探査では、計測可能深度（概ね 10m）の範囲で原地盤面の推定は可能であるが、現状では廃棄物層内部の密度差や空洞の把握等はできない。電気探査（二次元比抵抗法探査）では、現状では本探査のみでの地下水位の計測は難しく、ボーリング調査との併用が必要である。いずれの試験も廃棄物地盤への適用性を高めるには、十分なデータ蓄積が必要である。

表 3.3.1(1) 実施した現場・室内実験結果一覧（その1：平成22～23年度実施分）

項目	上海市老港処分場 (都市固形ごみ)	国内産業廃棄物不法投棄等現場				
		関東①	九州	関東②		
当該地の用途	海面埋立処分場	旧中間処理施設	安定型処分場	管理型処分場		
原地形(底面)	平地	平地	約20°の斜面	平地		
廃棄物組成(重量比) (一面せん断試験実施地点)	・プラ類 22%、石・陶器 29% (GL-1m) ・プラ 9%、石・陶器 52% (GL-3m)	プラ類 16%、礫・陶磁器 46%、砂類 28%、金属 4%、木くず 1% (dim1+dim2=4%)	がれき類・土砂等 100% (プラ類なし)	土砂・燃え殻等 85%、がれき類 12%、プラ類 2%、金属 1%		
湿潤密度 [乾燥密度] (一面せん断試験実施地点)	1.1 g/cm <sup>3</sup> (GL-1m) 1.2 g/cm <sup>3</sup> (GL-3m)	1.2 g/cm <sup>3</sup> [0.9 g/cm <sup>3</sup> ]	1.4g/cm <sup>3</sup> [1.1 g/cm <sup>3</sup> ]	1.4g/cm <sup>3</sup>		
含水比 [含水率] (一面せん断試験実施地点)	39% (GL-1m) 45% (GL-3m)	31% [23%]	23% [19%]	未計測		
廃棄物堆積高さ	9m (実験場所)	約 18m	約 40m	約 40m		
廃棄物法面勾配	42°～53°(付近の廃棄物築堤部法勾配)	40°～62°(法部) 約 90°(切削部)	30°～42°	約 30°(=処分場計画勾配)		
過去の斜面崩壊等	未確認	90° 壁の幅 1m の崩壊	急勾配部表層崩壊あり (地山崩壊危険地域)	なし		
載荷実験 (現場)	従来解析法で十分崩壊が想定される断面、荷重で崩壊、変位なし	未実施	未実施	未実施		
崩壊実験 (現場) せん断強さ(約 3m <sup>3</sup> の地盤に連続した立方体の強さ)	12 kN/m <sup>2</sup> (GL-1m) 15 kN/m <sup>2</sup> (GL-3m) (平均繊維長と同等の約 20cm でピーク)	未実施	未実施	未実施		
安息角試験 (現場) (盛りこぼしを含む角度=停止安息角～限界安息角)	約 45°～60° (掘削物積上げ勾配)	50°～60° (バケツ 10 杯分、円錐高さ 154cm)	44°～50° (バケツ 10 杯分、円錐高さ 130cm)	約 35°～45° (掘削物積上げ勾配)		
一面せん断試験	現場試験	c	6 kN/m <sup>2</sup> (GL-1m) 4 kN/m <sup>2</sup> (GL-3m)	3kN/m <sup>2</sup>	未計測	70 kN/m <sup>2</sup> 以上
		φ	33°(GL-1m) 43°(GL-3m)	46°	未計測	未計測
	室内試験	c	未実施	3kN/m <sup>2</sup>	3kN/m <sup>2</sup>	(別途三軸試験結果=55 kN/m <sup>2</sup> )
		φ	未実施	44°	45°	(別途三軸試験結果=35°)
	せん断変位一応力の関係	せん断応力のピーク無し	せん断応力のピーク無し	せん断応力のピークあり	(固結状態に近く変位 35mm まで実験できず未計測)	
キャスポル試験 (現場一面せん断試験実施地点)	Ir (インパクト値)		4.7 (GL-1m) 4.1 (GL-3m)	6.3 (現場内では締固まり状況に対応して 3.0～7.4)	7.8	20 以上
	地盤相関式で算定した c, φ	c	31 kN/m <sup>2</sup> (GL-1m) 27 kN/m <sup>2</sup> (GL-3m)	45 kN/m <sup>2</sup>	56 kN/m <sup>2</sup>	142 kN/m <sup>2</sup> 以上
		φ	19°(GL-1m) 19°(GL-3m)	21°	23°	35°以上
現場引抜試験 (廃棄物層からの 1 本の繊維状物等の引抜抵抗力試験)	未実施	抜ける場合 =40～100N 破断する場合 =400～500N	試験断面に引抜対象となる繊維状物が無く未実施	試験断面に引抜対象となる繊維状物が無く未実施		
室内引抜試験 (L=60cm 土槽からの繊維状物等の引抜試験)	未実施	最大引抜力=52N (上載圧 5kPa、繊維埋込長 32.5cm)	繊維状物なく未実施	繊維状物なく未実施		
引張試験 (室内) (L=1m の引張箱を用いた引張試験)	未実施	ζ= 18.2° cτ= 10.3 kN/m <sup>2</sup>	未実施	実施		
大型土圧試験 (室内)	未実施	弾性体的土圧分布を計測	未実施	未実施		
透水係数 (定水位：室内)	未実施	1.17E-3m/s	未実施	未実施		
非破壊試験	未実施	表面波探査：原地盤面の推定は可能。内部密度や空洞の把握は現状では困難 電気探査（二次元比抵抗法）：ボーリング調査との併用により地下水位の推定可能。 (表面波探査：関東①関東②で実施、電気探査：九州で実施)				

表 3.3.1(2) 実施した現場・室内実験結果一覧（その2：平成24年度実施分）

項目	国内産業廃棄物不法投棄等現場		一般廃棄物処分場崩落現場 (関西)	震災節下残渣 堆積地 (東北)	ジャカルタ近 郊サムルバツ 埋立地		
	中部①	中部②					
当該地の用途	旧中間処理施設	旧中間処理施設の 隣接地	一般廃棄物処 分場	ストックヤード	Landfill		
原地形(底面)	平地	平地	谷地(詳細不明)	平地	平地		
廃棄物組成(重量比) (一面せん断試験実施地点)	プラ類 6%、木くず 3%、がれき類 50%、 土砂等 35%、金属 3%、その他 3% (dim1+dim2=12%)	[容積比・既存資料] プラ類 50%、木く ず・紙くず類 37%、 コンクリート等 13%	灰、土砂分主 体(繊維状物 は散見される 程度)	プラ類 0.4%、木く ず 6%、がれき類 14%、5mm 以下土 砂等 80%	生ごみ、プラ 類等の生活ご み (果実殻等の 生ごみ多)		
湿潤密度 [乾燥密度] (一面せん断試験実施地点)	1.2[1.0]g/cm <sup>3</sup> (頂上: 繊維状物多, 転圧少 0.9[0.8]g/cm <sup>3</sup> )	0.7 g/cm <sup>3</sup> [0.6 g/cm <sup>3</sup> ]	1.1 g/cm <sup>3</sup> [0.9 g/cm <sup>3</sup> ]	1.1[0.8]g/cm <sup>3</sup> (表層) 1.1[0.8]g/cm <sup>3</sup> (GL-2m)	未計測		
含水比 [含水率] (一面せん断試験実施地点)	21% [17%] (頂上:繊維状物多, 転圧少 13% [11%])	17% [15%]	14% [12%]	42%[29%](表層) 37%[27%](GL-2m)	簡易土壌水分 測定器による 容積含水率 =72%		
廃棄物堆積高さ	約 11m	約 30m	約 30m	約 3m	約 6.5m~30m		
廃棄物法面勾配	40°~60°	24°~25°	約 40°	38~42°	約 40° (埋立終 了部は 30°で 整形覆土)		
過去の斜面崩壊等	60°の最急勾配部に クラック発生	未確認	降雨後に斜面 表層部崩壊	なし	付近の埋立地 内で 50° 以上 の法面が崩壊		
載荷実験 (現場)	未実施	未実施	未実施	未実施	未実施		
崩壊実験 (現場) 引張応力(長さ約 0.9m, 高さ約 0.8m の廃棄物層の片持ち梁 の崩壊時の引張応力)	34 kN/m <sup>2</sup> (表面から厚さ 0.8m の範囲)	未実施	未実施	未実施	未実施		
安息角試験 (現場) (盛りこぼしを含む角度=停 止安息角~限界安息角)	45°~53°(繊維状物 少) (頂上:繊維状物多, 転圧少 52°~58°)	一面せん断試験場所 45°~48°	36°~40°	掘削直後の湿った 状態 40°~45° 1 日間乾燥後試料 40°~43°	埋立直後物: 36°~55° 一年経過物: 40°~58°		
重機による法肩載荷実験	未実施	40°法面: 圧縮のみ 60°法面: 崩壊 (積上高 1.5m)	未実施	40°実斜面: 圧縮及 び 2cm の斜面はら み出しのみ	未実施		
一面せん 断試験	現場 試験	c	4 kN/m <sup>2</sup> (繊維状物 少)	上載圧 13.6kN/m <sup>2</sup> のとき, せん断強度 24kN/m <sup>2</sup> (C, φ は未計測)	未実施	11 kN/m <sup>2</sup>	未計測
		φ	51°(繊維状物少)		未実施	47°	未計測
	室内 試験	c	5 kN/m <sup>2</sup> (同上)	未実施	未実施	未実施	未実施
		φ	48°(同上)	未実施	未実施	未実施	未実施
せん断変位一応 力の関係		せん断応力の ピーク無し	せん断応力の ピーク無し	-	せん断応力の ピーク無し	未実施	
現場土圧 試験 (試行 解析結果)	c		6kN/m <sup>2</sup> (繊維状物少) 3kN/m <sup>2</sup> (繊維状物多)	3kN/m <sup>2</sup>	未実施	2kN/m <sup>2</sup>	未実施
	φ		52°(繊維状物少) 51°(繊維状物多)	47°	未実施	43°	未実施
キャスポ ル試験 (現 場一面せん 断試験 実施地点)	Ir (インパクト値)		5.4(繊維状物少) 3.6(繊維状物多, 締固 め不十分)	4.6	6.7	4.5	2~10(高さ 6.5m の山)
	地盤相関 式で算定 した c, φ	c	26 kN/m <sup>2</sup> (繊維状少) 36 kN/m <sup>2</sup> (繊維状多)	33 kN/m <sup>2</sup>	48 kN/m <sup>2</sup>	33kN/m <sup>2</sup>	15~72kN/m <sup>2</sup>
		φ	19°(繊維状物少) 20°(繊維状物多)	20°	22°	20°	17~25°
FWD (重錘 落下)試験	地盤弾性係数 E (MN/m <sup>2</sup> )	未実施	1.1~1.7 MN/m <sup>2</sup> (繊維状物多) 3.3~4.7 MN/m <sup>2</sup> (繊維状物少)	未実施	未実施	未実施	未実施
	地盤反力係数 K <sub>30</sub> (MN/m <sup>3</sup> )	未実施	3.1~5.1 MN/m <sup>3</sup> (繊維状物多) 11.0~16.4 MN/m <sup>3</sup> (繊維状物少)	未実施	未実施	未実施	未実施
引張試験 (室内) (L=1m の引張箱による試験)	未実施	未実施	未実施	未実施	未実施	未実施	

### 3. 4 斜面安定解析結果と斜面安定評価法について

都市固形ごみ (MSW) の堆積層の斜面安定計算は、各国の研究者により、多くの場合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) によって、斜面安定性を評価するための研究が行われている。しかし、本研究で実施した載荷実験では従来のせん断抵抗に摩擦力と粘着力をみた円弧すべり解析では廃棄物層の急勾配での斜面安定を説明できないことがわかった。

不法投棄等現場の斜面安定性をより適切に評価するためには、本研究でも明らかになった廃棄物層特有の引張抵抗を考慮する必要がある、以下に引張抵抗を考慮した解析・評価法を紹介する。

#### (1) 円弧すべり解析 (分割法) による斜面安定解析法

円弧すべり解析は、**図 3.4.1** に示すように円弧の崩壊面を想定して斜面を鉛直方向にスライスして計算していく分割法により一般に行われる。解析法には、**図 3.4.1** 右図で、分割片の底面 (崩壊面) での力のつり合いから条件式を作るフェレニウス法、鉛直方向の力のつり合いから条件式を作るビショップ法、水平方向の力のつり合いから条件式を作る

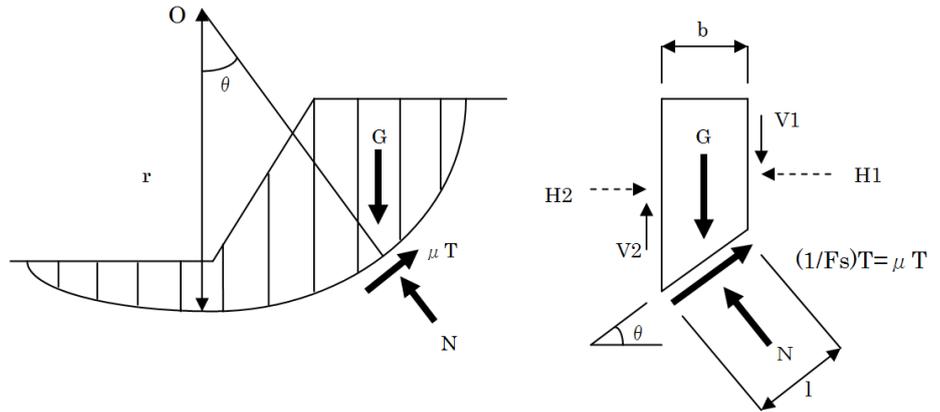


図 3.4.1 分割法による斜面のスライスと分割片に働く力

ヤンプ法、など種々の解析法が存在する。廃棄物層では、水平方向を主として引張抵抗が働くことから、**図 3.4.1** 右図の分割片の両側面に働く水平力  $H_1$ 、 $H_2$  の差による影響がある。水平方向の力のつり合いを考える場合は、未知数が多くなり解析困難になるか解析誤差が大きくなる。このため廃棄物層では、 $H_1$ 、 $H_2$  に関係なく鉛直方向の力のつり合いをとるビショップ法が適する。以下に、ビショップ法をもとに引張抵抗を考慮したときの条件式を示す。

安全率(Fs)を、「すべり面に沿って斜面が極限平衡状態になるように、せん断強度定数を低減させる係数」と定義して、安全率を考慮したせん断抵抗力を表すと、

$$(1/F_s)T = \mu T$$

ここに、 $\mu$  : 安全率  $F_s$  の逆数

$T$  : 分割片底面 (崩壊面) のせん断抵抗力 (kN/m)

ビショップ法により、分割片で鉛直方向の力のつり合いをとると、

$$N \cdot \cos \theta + \mu T \cdot \sin \theta = G + V_1 - V_2$$

ここで、簡略して、 $V_1 = V_2 = 0$  とおくと、

$$N = (G - \mu T \cdot \sin \theta) / \cos \theta \quad \dots \dots \dots (1) \text{式}$$

ここに、 $N$  : 分割片底面 (崩壊面) に働く垂直力 (kN/m)

$G$  : 分割片の重量 (kN/m)

$V_1, V_2$  : 分割片の両側面に働く鉛直力 (kN/m)

$\theta$  : 分割片底面の中点と円弧中心  $O$  を結ぶ直線と鉛直線のなす角 (= 分割片底面勾配) ( $^\circ$ )

崩壊面に働くせん断抵抗( $T$ )は、引張抵抗を考慮すると、

$$T = \frac{c \cdot l}{(\text{粘着抵抗})} + \frac{N \cdot \tan \phi}{(\text{摩擦抵抗})} + \frac{\tau(Z) \cdot l}{(\text{引張抵抗})} \quad \dots \dots \dots (2) \text{式}$$

ここに、 $c$  : 一面せん断試験等で求められるクーロン公式による粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)

$\phi$  : 一面せん断試験等で求められるクーロン公式によるせん断抵抗角 (= 内部摩擦角) ( $^\circ$ )

$\tau(Z)$  : 分割片底面に働く引張抵抗力 (kN/m<sup>2</sup>)

$l$  : 分割片底面の長さ (m)

(1)式を(2)式に代入して、(3)式が得られる。

$$T = \frac{c \cdot l \cdot \cos\theta + G \cdot \tan\phi + \tau(Z) \cdot l \cdot \cos\theta}{\mu \sin\theta \cdot \tan\phi + \cos\theta}$$

ここで、 $b$  : 分割片の幅(m) とすれば、

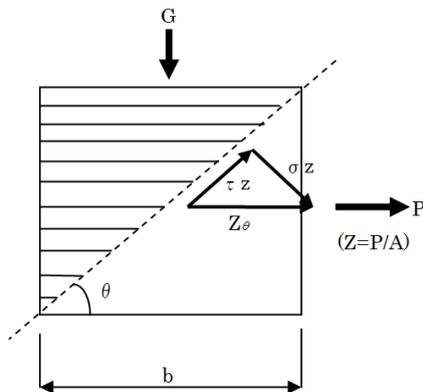
$$T = \frac{c \cdot b + G \cdot \tan\phi + \tau(Z) \cdot b}{\mu \cdot \sin\theta \cdot \tan\phi + \cos\theta} \dots \dots \dots (3)式$$

$\mu$  (安全率の逆数) は、(3)式と分割片毎の円弧の中心  $O$  でのモーメントのつり合いの総和式(4)とから求められる。最小安全率(Fs)は、円弧中心と円弧半径( $r$ )を変えて計算していくことにより、 $\mu$  が最大 (安全率が最小) となる値を求めることにより定まる。

$$\mu = \frac{r \cdot \sum Gi \cdot \sin\theta i}{r \cdot \sum Ti} \dots \dots \dots (4)式$$

(2) 引張抵抗の与え方

ドイツのケルシュ(Koelsch) は引張抵抗を次のとおりに与えている<sup>49)</sup>。引張抵抗に寄与する繊維状物等が水平方向に卓越して堆積しているため、引張抵抗力を水平方向におくと各分力は図 3.4.2 のとおりになる。



引張抵抗力を  $P$  とすれば、  
鉛直面に働く応力は、 $Z = P/A$   
勾配  $\theta$  の崩壊面では、 $Z_\theta = Z \cdot \sin\theta$   
崩壊面に沿うせん断抵抗は、  
 $\tau_z = Z_\theta \cdot \cos\theta = Z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta$   
崩壊面に働く垂直力は、  
 $\sigma_z = Z_\theta \cdot \sin\theta = Z \cdot \sin^2\theta$

図 3.4.2 崩壊面に働く引張抵抗力

崩壊面に沿う引張応力は、せん断抵抗  $\tau_z$  の他に、引張抵抗応力  $Z_\theta$  による垂直力  $\sigma_z$  によって追加的な摩擦抵抗  $\tau_R(z)$  が生じる。

$$\begin{aligned} \tau(z) &= \tau_z + \tau_R(z) \\ &= Z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta + \sigma_z \cdot \tan\phi \\ &= Z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta + Z \cdot \sin^2\theta \cdot \tan\phi \\ &= Z \cdot \sin\theta (\cos\theta + \sin\theta \cdot \tan\phi) \dots \dots \dots (5)式 \end{aligned}$$

(5)式から、崩壊面に働く引張抵抗応力の強さは、崩壊面の勾配に応じて異方性を示すことがわかる。異方性をみるために、最大引張応力との比をとると、

$$\tau(z)/Z = \sin\theta (\cos\theta + \sin\theta \cdot \tan\phi) \dots \dots \dots (6)式$$

(6)式で、不法投棄等現場での代表的な値である  $\phi = 40^\circ$  と  $\phi = 35^\circ$  のときの曲線を示したのが図 3.4.3 である。いずれも崩壊面が  $60^\circ$  付近で引張抵抗応力のピークになっている。

ケルシュは、(6)式による理論値の他、各種実験結果や既往の補強土等に関する研究データをもとに、引張抵抗応力の異方性を表す(6)式右边を図

3.4.3 中の  $\sin(1.5\theta)$  という近似関数と補正係数を用いて表して、(5)式を次のとおりにおいた。

$$\tau(z) = Z \cdot a_z \cdot \sin(1.5\theta) \dots \dots \dots (7)式$$

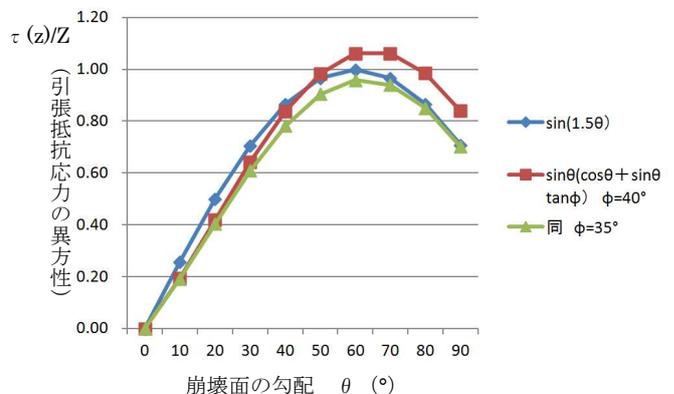


図 3.4.3 崩壊面の勾配に応じた引張抵抗応力の変化

ここに、 $a_z$ ：引張抵抗応力の活性度

引張抵抗応力の活性度( $a_z$ )は、図 3.4.3 の  $\sin(1.5\theta)$  と実際の応力との差であり、 $\phi = 35^\circ \sim 40^\circ$  の範囲での(6)式の理論値との差は、ピーク( $\theta = 60^\circ$ )で $-4\% \sim +6\%$ である。このように差があまりないことから、簡略化して次のとおりにおける。

$$\tau(z) = Z \cdot \sin(1.5\theta) \quad \dots \dots \dots (8)式$$

一方、引張抵抗応力  $Z$  は、引張試験の結果から、次のとおりに表示される。

$$Z = G/b \cdot \tan \zeta \leq Z_{max} \quad \dots \dots \dots (9)式$$

ここに、 $G$ ：上載圧 (=分割片の重量) (kN/m)

$b$ ：載荷幅 (=分割片の幅) (m)

$Z_{max}$ ：引張試験から求まる最大引張強度 (kN/m<sup>2</sup>)

注) 「3.2.5 引張試験」では、 $Z = c_z + \sigma \tan \zeta$  を示した。ケルシュは、この  $c_z$  (上載圧に依存しない引張強度) を、土と同様に材料間の付着または固着効果によるもので異方性が少なく、一面せん断試験等で得られるクーロン公式の  $c$  (粘着力) と同一のものとみなして、(9)式では無視している。

(8)式と(9)式から、

$$\tau(z) = G/b \cdot \tan \zeta \cdot \sin(1.5\theta) \quad \dots \dots \dots (10)式$$

(10)式を(3)式に代入し、(11)式 (ケルシュの式) が得られる。

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

注) 本項は、図 3.4.3 以外は、Koelsch の文献<sup>49)</sup>pp.108-138 を要約して示したものである。

### (3) せん断抵抗の異方性

実際の現場でのせん断強度の異方性を、(11)式を用いて、実験により強度定数が得られている関東①現場の値を用いて調べる。せん断方向が繊維と水平なケース( $\theta = 0^\circ$ )と垂直なケース( $\theta = 90^\circ$ )で比較をすると、(11)式で、 $b$ (計算幅)=1m、 $\mu$ (安全率の逆数)=1 とおくと、

$$T(\theta = 0^\circ) = \frac{c + G \cdot \tan \phi}{1} = \frac{3 + 50 \times \tan 46^\circ}{1} = 54.7 \text{ kN/m}^2$$

$$T(\theta = 90^\circ) = \frac{c + G \cdot \tan \phi + G \cdot \tan \zeta \cdot \sin(1.5 \times 90^\circ)}{\tan \phi} = \frac{13.3 + 50 \times \tan 18^\circ \times \sin(135^\circ)}{\tan 46^\circ} = 64.0 \text{ kN/m}^2$$

$$T(90^\circ) / T(0^\circ) = 64.0 / 54.7 = 1.17$$

注)  $G$ ：図 3.5.5 の実験の垂直応力と同じ 50kN/m<sup>2</sup>(堆積深 5m に相当)  $c$ 、 $\phi$ 、 $\zeta$ ：関東現場①の試験結果

計算結果から、繊維方向に  $90^\circ$  の角度でせん断した場合は、水平方向のせん断に比べ、せん断強度が 17% 増となる。3.5 図 3.5.5 に示す本計算と同条件の繊維方向とせん断方向で行った実験での、せん断強度差  $T(90^\circ) / T(0^\circ)$  は約 15% であり、本計算結果とほぼ同様の実験結果を得ている。このことから、(11)式の不法投棄等現場への適用性について、せん断強度の異方性の面から確認できることと、異方性は主に(11)式の分子第 3 項の引張抵抗に起因していることがわかる。

### (4) 無限長斜面を仮定した斜面安定性解析

無限長斜面による斜面安定計算法<sup>50)</sup>は、図 3.4.4 のとおりに単純斜面を想定して行うものである。計算も簡単で、分割法のように計算プログラムによる解析が不要のため、検討の初期段階で斜面安定性の概略を知るのに有効である。とくに不法投棄等現場では、引張抵抗を考慮することにより、後述のとおり極めて適用性が高いものとなる。

$$N = G \cdot \cos \theta \quad (= \gamma \cdot b \cdot H \cdot \cos \theta) \quad \dots \dots \dots (12)式$$

$$T_G = G \cdot \sin \theta \quad (= \gamma \cdot b \cdot H \cdot \sin \theta) \quad \dots \dots \dots (13)式$$

ここに、 $N$ ：分割片底面に働く垂直力(kN/m)

$\theta$ ：分割片の勾配(°)

$b$ ：分割片の幅(m)

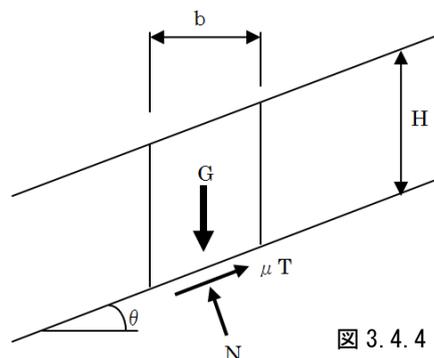


図 3.4.4 無限長斜面計算法

- H : 分割片の高さ (平均堆積高さ) (m)
- $\gamma$  : 廃棄物層の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)
- T<sub>G</sub> : 分割片底面に働く滑動を起こそうとする力(kN/m)

分割片底面のせん断抵抗力(T)は、(2)式と(10)式から、

$$T = c \cdot l + N \cdot \tan \phi + \tau(Z) \cdot l$$

$$= c \cdot l + G \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi + G/b \cdot \tan \zeta \cdot \sin(1.5 \theta) \cdot l \quad \dots \dots \dots (14)式$$

ここで、安全率を分割法と同様に定義すれば、T<sub>G</sub>と $\mu T$ はつり合っているから、

$$T_G = \mu T$$

∴ F<sub>s</sub>=(1/μ)=T/T<sub>G</sub> (13)式と(14)式を代入して、

$$F_s = \frac{c}{\gamma H \sin \theta \cdot \cos \theta} + \frac{\tan \phi}{\tan \theta} + \frac{\tan \zeta \cdot \sin(1.5 \theta)}{\sin \theta \cdot \cos \theta} \quad \dots \dots \dots (15)式$$

(粘着抵抗分)                      (摩擦抵抗分)                      (引張抵抗分)

とくに、不法投棄等現場では、これまでの実験結果から、*c*(粘着力)が小さいことがわかっているため、*c*を無視すれば、(16)式のとおり、安全率(F<sub>s</sub>)を、崩壊面を想定しなくても、内部摩擦角( $\phi$ )、引張抵抗角( $\zeta$ )と斜面勾配( $\theta$ )だけから簡単に求めることができる。

$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \theta} + \frac{\tan \zeta \cdot \sin(1.5 \theta)}{\sin \theta \cdot \cos \theta} \quad \dots \dots \dots (16)式$$

(摩擦抵抗分)                      (引張抵抗分)

例えば、「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」図(13)に示した勾配 45°、高さ 20m、高さ 5m 毎に幅 1m の小段を設ける場合の安全率は、

a)分割法 (ビショップ法) による計算結果 F<sub>s</sub>=1.41 (マニュアル(案)図(13)より)

b)無限長斜面法による計算 ((16)式による)

・勾配 45° (小段無視) での計算

$$F_s = (\tan 40^\circ) / (\tan 45^\circ) + (\tan 15^\circ \cdot \sin(1.5 \times 45^\circ)) / (\sin 45^\circ \times \cos 45^\circ)$$

$$= 0.839 + 0.495$$

(摩擦抵抗分)                      (引張抵抗分)

$$= 1.33$$

・小段を含めた平均勾配 ( $\tan^{-1}(20m/23m)=41^\circ$ ) での計算

$$F_s = (\tan 40^\circ) / (\tan 41^\circ) + (\tan 15^\circ \cdot \sin(1.5 \times 41^\circ)) / (\sin 41^\circ \times \cos 41^\circ)$$

$$= 0.965 + 0.475$$

(摩擦抵抗分)                      (引張抵抗分)

$$= 1.44 \quad \approx 1.41(\text{分割法による計算結果})$$

したがって、*c*(粘着力)が小さい不法投棄等現場では、強度定数と斜面平均勾配だけから、(16)式により、簡単に、分割法に極めて近い値を得ることができる。

なお、図 3.4.4 のイメージで、地山斜面上を厚さ H の廃棄物層がすべり落ちる場合の安全率を計算するときには、(15)式で H に廃棄物層の平均的な厚さを代入することで、分割法とほぼ同様の値を得ることができる。

### (5) 解析で用いるパラメータについて

#### ①強度定数

不法投棄等現場の斜面安定解析式として示した(11)式、(16)式または(15)式で必要となるパラメータは、地形条件を除けば、 $\gamma$  (単位体積重量)、*c* (粘着力)、 $\phi$  (内部摩擦角)、 $\zeta$  (引張抵抗角)の4つである。これまでの現場実験等の結果や既往文献から、これらの値は表 3.4.1 のとおりである。

表 3.4.1 現場実験結果等による不法投棄等現場の強度定数

パラメータ	設定方法	不法投棄等現場（海外現場を除く）での試験結果	＜参考＞ドイツ/Toolkit Landfill Technology <sup>1)</sup> の値
$\gamma$ （湿潤単位体積重量）	現場密度試験（水置換法）(JGS1612)による	<ul style="list-style-type: none"> <li>繊維状物等を含む現場 <math>\gamma = 0.7 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3</math> [乾燥密度 <math>0.6 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3</math>]</li> <li>繊維状物等を含まない現場 <math>\gamma = 1.1 \sim 1.4 \text{ g/cm}^3</math> [乾燥密度 <math>0.9 \sim 1.1 \text{ g/cm}^3</math>]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>未処理の都市固形ごみ [乾燥密度 <math>0.5 \sim 1.0 \text{ t/m}^3</math>]</li> <li>機械的生物処理都市固形ごみ（エアレーション後） [乾燥密度 <math>0.8 \sim 1.5 \text{ t/m}^3</math>]</li> </ul>
$c$ （粘着力）	一面せん断試験による（概略値は現場土圧試験で把握可能）	$c = 3 \sim 5 \text{ kN/m}^2$ （篩い下残渣 $11 \text{ kN/m}^2$ ） ※焼却灰等による固結現場を除く	$c < 10 \text{ kN/m}^2$
$\phi$ （内部摩擦角）	一面せん断試験による。（概略値は安息角試験による停止安息角、または現場土圧試験で把握可能）	<ul style="list-style-type: none"> <li>繊維状物等を含む現場 <math>\phi = 44 \sim 51^\circ</math> [停止安息角 <math>45 \sim 50^\circ</math>] （参考：ジャカルタ近郊埋立地・埋立直後物の停止安息角 <math>36^\circ</math>）</li> <li>繊維状物等を含まない現場 <math>\phi = 36 \sim 45^\circ</math> [停止安息角 <math>36 \sim 44^\circ</math>]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>未処理の都市固形ごみ <math>\phi = 25 \sim 30^\circ</math></li> <li>機械的生物処理都市固形ごみ（エアレーション後） <math>\phi = 30 \sim 35^\circ</math></li> </ul>
$\zeta$ （引張抵抗角）	引張試験による	<ul style="list-style-type: none"> <li>繊維状物等を含む現場 <math>\zeta = 18^\circ</math> （※<math>\text{dim}1 + 2 = 4\%</math>）<sup>注1)</sup> （組成分類：プラ類 <math>16\%</math>） <math>Z_{\text{max}} \approx 75 \text{ kN/m}^2</math>（<math>\sigma &lt; 200 \text{ kN/m}^2</math>）<sup>注2)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>未処理の都市固形ごみ <math>\zeta = 25 \sim 35^\circ</math> （※<math>\text{dim}1 + 2 &gt; 30\%</math>）<sup>注1)</sup> <math>Z_{\text{max}} = 210 \text{ kN/m}^2</math> <sup>注2)</sup></li> <li>機械的生物処理都市固形ごみ（エアレーション後） <math>\zeta = 10 \sim 14^\circ</math> （※<math>\text{dim}1 + 2 &lt; 20\%</math>） <math>Z_{\text{max}} = 75 \text{ kN/m}^2</math> <sup>注2)</sup></li> </ul>
＜参考＞ $w$ （含水率）		$w = 12 \sim 23\%$ （篩い下残渣 $27 \sim 29\%$ ）	$w \leq 40\%$

注1) ※ $\text{dim}1 + \text{dim}2$ : 40mm以上の線状物と面状物の全体に占める重量割合

注2) 不法投棄等現場の  $Z_{\text{max}}$  は垂直荷重  $\sigma < 200 \text{ kN/m}^2$  の範囲での値であり、垂直応力を増やせばさらに  $Z_{\text{max}}$  が増加することが見込まれる。ドイツの  $Z_{\text{max}}$  は、"GGU-STABILITY VERSION9"<sup>52)</sup>のマニュアル 8.10Table2、による。

表 3.4.1 から実験を行ったわが国の不法投棄等現場での強度定数をみると次の範囲にある。

$c$ （粘着力） $\approx 3 \sim 5 \text{ kN/m}^2$ （焼却灰、燃え殻等による固結状態の現場を除く）

$\phi$ （内部摩擦角）繊維状物等を含む場合  $\approx 45 \sim 50^\circ$

繊維状物等を含まない場合  $\approx 36 \sim 45^\circ$

$\zeta$ （引張抵抗角）繊維状物等を含む場合  $\approx 15 \sim 20^\circ$

上記をドイツの"Toolkit Landfill Technology"<sup>1)</sup>に示された値と比べてみる。Toolkitで例示されている未処理の都市固形ごみは、生ごみを含み含水率が40%程度<sup>注)</sup>とわが国の不法投棄等現場の含水率の12~23%と大きく異なる。含水率が40%程度までに高くなると、本研究でも示唆したように繊維状物間の摩擦抵抗が減少することが想定され、その結果、Toolkitの $\phi$ （内部摩擦角）がわが国の不法投棄等現場の値よりも小さくなっているとみられる。機械的生物処理(MBT)都市固形ごみは、エアレーション後のもので、こちらの方がわが国の不法投棄等現場の廃棄物の性状には近いとみられるが、由来が生活ごみを主体としたものであることや処理段階でリサイクル可能な金属やRDF用の可燃物（プラスチック、木片、紙等）が抜かれている場合があり、やはりわが国の不法投棄等廃棄物とは異なるため、同列での比較はできない。

また、 $\zeta$ （引張抵抗角）のところを示した廃棄物組成( $\text{dim}1 + \text{dim}2 = 40\text{mm}$ 以上の線状物と面状物の全体に占める重量比率)は、わが国の不法投棄等現場ではドイツのToolkitに示された $\text{dim}1 + \text{dim}2$ の標準値を大きく下回っているが、逆にみると、わが国の不法投棄現場では $\text{dim}1 + \text{dim}2$ 以外のがれき等の固形物の占める割合が大きいということであり、このことが、水分量とともに、 $\phi$ （摩擦抵抗）の値を大きくしている理由の一つと考えられる。

注) Toolkitの著者ケルシュの文献<sup>3)</sup>で、実験で使用した未処理の都市固形ごみの含水率は44%である。同文献でも水分量が少ない都市固形ごみの $\phi$ や $\zeta$ の値が大きくなるの実験結果が示されている。

## ②概略評価時に用いる強度定数の目安値

検討の初期段階で斜面安定性を概略的に評価することと利便性を図ることを目的に、この段階で用いる適当な強度定数について考える。

初期段階では不確定要素が多いことから安全側の解析が求められるため、多量降水時の水分量増加による摩擦抵抗、引張抵抗の減少を考慮すると、**3.3図 3.3.5**で飽和状態と考えられるまでに水分量を増加したときのせん断強度が約12%減少していることから、先に示した値からこの分を差し引くと、概ね次のとおりになる。なお、 $\alpha$ （引張抵抗角）の値は、現時点では実験ケースが少なく、実際の検討では引張試験により求めることが必要となるが、実現場での試料を用いた試験結果で $\alpha=18^\circ$ を得ていることと、ドイツの Toolkit<sup>1)</sup>でも $\alpha \geq 10^\circ$ としていることから、概略評価段階の目安として下記の値を示した。

（繊維状物等を含む不法投棄等現場の概略評価時に用いる実用上の強度定数の目安値）

$c$ （粘着力） $\approx 0 \sim 5 \text{ kN/m}^2$

$\phi$ （内部摩擦角）繊維状物等を含む場合  $\approx 40 \sim 45^\circ$

繊維状物等を含まない場合  $\approx 30 \sim 40^\circ$

$\alpha$ （引張抵抗角）繊維状物等を含む場合  $\approx 10 \sim 15^\circ$

## ③内部水位、地震震度

廃棄物層の内部水位は、(11)式、(16)式では考慮していない。これは、繊維状物等を含む現場の場合、極めて透水係数が高く内部帯水の可能性が低いとみられることによる。このため、下流側での通水阻害構造や中間覆土（灰分の投棄等を含む）等があり内部水位の上昇が考えられる場合や、土砂分主体の現場等で地下水位が高いことが想定される場合等には、既存の円弧すべり解析での内部水位の与え方が記載されている道路、橋梁等の設計指針（「道路土工—盛土工指針、(社)日本道路協会」<sup>53)</sup>等）を参考にして、内部水位を与えるとともに、(11)式、(16)式または(15)式に間隙水圧の項を加えて解析する必要がある。

地震時については、繊維状物を含む廃棄物層が地震で崩壊した事例を本研究では確認していないことに加え、引張抵抗を有し弾性的挙動を示すことから、地震振動に対する安定性は基本的に高いことが想定され、解析方法の研究は行っていない。地震振動（長時間繰り返し振動も含む）に対しては、繊維状物等が持つ引張抵抗が極めて有効に働くとみられ、地震時の解析ではこのような効果を考慮して行う必要があるが、現状では解析方法は確立していない。

このため、現場近隣に住宅や重要構造物がある場合等、地震時を考慮する必要がある場合は、安全側の評価になると思われるが、道路・橋梁等の設計指針（「道路土工—盛土工指針」<sup>53)</sup>等）に示されている震度法による地震力を(11)式、(16)式または(15)式に加味するなどして解析する必要がある。

### （6）実験現場での斜面安定性解析適用例と解析方法の適用性

現地実験を行った9現場について、円弧すべり計算（ビショップ法、九州現場では直線すべり面を仮定）で斜面安定解析を行った結果を表3.4.2の計算結果一覧表、及び図3.4.5～13に示す。引張抵抗を考慮した解析は(11)式により、計算プログラムに“GGU-STABILITY VERSION9”<sup>52)</sup>を使用した。また、表3.4.2には、簡易に計算できる無限長斜面法による安全率の計算結果も併せて示している。

強度定数には、一面せん断試験で $\phi$ （摩擦抵抗角）を計測していない現場では、近似した値が得られている安息角試験による停止安息角を $\phi$ に用いた。一面せん断試験の $c$ （粘着力）、引張試験の $\alpha$ （引張抵抗角）を計測していない現場では、これまでの現場実験結果で得られた値から設定した目安値である（5）②に示した値を与えて計算した。

図3.4.5～13の分割法（ビショップ法）による計算結果は、崩壊現場や法肩にクラックが発生している現場では最小安全率が得られたすべり面（円弧）が実際の崩壊面やクラックが生じている場所にほぼ一致しているうえ、これらの崩壊やクラックが発生している現場で計算結果の安全率が低くなっていることから、良く現場の状況を表していると言える。したがって、本解析方法のわが国の産業廃棄物不法投棄等現場への適用性が高いことが窺える。

次に、無限長斜面法による安全率の計算結果をみる。計算は、斜面上の投棄事案で崩壊想定面である廃棄物層の平均厚さを与えることのできる九州現場を除いて、粘着力( $c$ )を無視して斜面勾配と $\phi$ 、 $\alpha$ だけで評価できる(16)式によった。計算結果をみると $c$ の値が大きい東北現場と、高さが低く $c$ の影響が大きいサムルバツ現場を除いて、各現場ともに分割法による計算結果とほぼ同様の値を得た。また、地山斜面上のすべりを想定して(15)式により計算した九州現場でも分割法とほぼ同様の値を得た。

したがって、粘着力( $c$ )の値が小さいわが国の不法投棄等現場では、斜面の安全率を知る方法として、(16)式による無限長斜面法が、計算の簡単さと併せて極めて有効である。また、傾斜地上の堆積現場のすべりを考える場合にも、(15)式により平均的な堆積厚を与えて概略的な安全率を知ることができる。

引張抵抗については、表 3.4.1 の試算では、引張試験を行った現場を除いて、引張抵抗の効果をみるため (5) ②に示した値の目安値の範囲のうち上限側の値である $\zeta=15^\circ$ を用いた。この結果、上海現場では載荷試験での斜面安定が説明できた。一方、締固めが不十分であり法肩にクラックが入っている中部①と、停止安息角を若干上回っている斜面勾配を有するとともに近傍の同様の埋立地で崩壊が生じているサムルバツの計算結果の安全率が 1.2 を上回っている。この 2 つの現場は、「3.2.2 衝撃加速度試験 (キヤスポル) について」で示した法面の崩壊が生じない判断の目安とした「インパクト値が 4.0 を下回っている現場」である。この 2 つの現場について表 3.4.1 で無限長斜面法で $\zeta=10^\circ$ を与えたときの計算結果をみると、安全率はいずれも 1.2 を下回った。締固めが不十分な場合は、プラスチック等の繊維状物と土砂等の細粒分の密着度が小さくなり引張抵抗は働きにくくなる。したがって、概略評価の段階 (引張試験を行わない段階) の $\zeta$ の与え方としては、インパクト値が 4.0 を下回っている現場では $\zeta=0\sim 10^\circ$ 程度とすることが過大評価を避けるために適当とみられる。

また、引張抵抗は、ドイツ Toolkit<sup>9)</sup>でも区分されているように、その発生源であるプラスチック等の繊維状物等の多少により左右されることが予想される。しかし、上述したクラックの入っている中部①現場は、 $\text{dim1}+\text{dim2}=12\%$ であり、関東①現場の $\text{dim1}+\text{dim2}=4\%$ を上回っている。このように、現状では、不法投棄等廃棄物については引張抵抗と繊維状物の量や長さとの関係は見出せてはいない。このため、関東①現場を下回る $\text{dim1}+\text{dim2}<4\%$ の現場で(16)式等による事前解析により斜面安定のために $\zeta>10^\circ$ が必要となる場合等で、 $\zeta$ の値が斜面安定性に重大な影響を与える場合には、引張試験により $\zeta$ を求める必要がある。

これらの検討結果により、概略評価時に用いる強度定数の参考値を、「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」表(2)に例示した。

#### (7) 安全率の指標について

分割法や無限長斜面法で得られた安全率の判断指標としては、「道路土工—盛土工指針」<sup>53)</sup>による盛土の長期間経過後 (供用時)の許容安全率の目安値として示されている $F_s=1.2$ が、廃棄物地盤についても妥当なことが、本計算で表層崩壊やクラック発生などで安定性が低いとみられた関東、九州、中部①の各現場の安全率が 1.2 以下となっていることから窺える。廃棄物層は不均一性等の不確定要素が盛土地盤よりも大きいと考えられるが、反面、廃棄物層の解析にあたっては密度やせん断強度が大きい深層の強度定数を試験の難しさから与えることができない等のマイナス評価をしている部分もあり、全体的にみて盛土地盤の判断指標を用いても妥当な計算結果になっているものと考えられる。

#### (8) 斜面安定性の解析・評価法について

上述のとおり、廃棄物層の斜面安定性について、計算が容易な無限長斜面法や、円弧すべり解析により、現場状況を良く説明できた。いずれの解析法も旧来から土地盤で用いられてきた解析法に引張抵抗を加味したものであり、計算に必要なパラメータも少なく、近年の計算技術を活用した有限要素法等の解析法に比べると簡易な計算法である。

解析法については、有限要素法による弾性解析及び弾塑性解析で大型土槽実験結果の解析を試みたが、実験結果と良く整合させることはできなかった。廃棄物層は、組成や成り立ちが土層より一層複雑であり、細密な解析ではパラメータの与え方等の不確定要素が増えて逆に実態を説明するのが難しくなる面がある。現場試験法も同様で、試験方法が容易で各種要素を全体的にみる安息角試験が良く現場の状況を表した。廃棄物層の力学特性について未解明な部分も残るが、「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」では、斜面安定性が結果として評価可能になる比較的容易な一連の試験・解析法を示した。

表 3.4.2 斜面安定解析結果一覧

項目	上海市老港処分場 (都市固形ごみ)	国内産業廃棄物不法投棄等現場			
		関東①	九州	関東②	
原地形(底面)	平地	平地	約 20°の斜面	平地	
計算断面の斜面勾配	63°(実験切削斜面)	90°(切削部)	約 30°	約 30°	
引張抵抗材の有無	プラ等 多い	プラ等 多い	プラ等 無し	プラ等 無し	
キャスボル・インパクト 値 (締固め状態の目安)	4.4	6.3 (3.0~7.4)	7.8	20 以上	
引張抵抗無視 (従来法)	$\gamma$ (単位体積重量)	11.5 kN/m <sup>3</sup> (GL-1m と -3m の平均; 以下同様)	12 kN/m <sup>3</sup>	14 (18) kN/m <sup>3</sup> ( )内は下層粘土層値	14 kN/m <sup>3</sup>
	$c$ (粘着力)	5 kN/m <sup>2</sup>	3 kN/m <sup>2</sup>	3 (60)kN/m <sup>2</sup>	70kN/m <sup>2</sup> 以上
	$\phi$ (摩擦抵抗角)	38°	46°	45°(0°)	0°
	Fs(分割法) Fs(無限長斜面)	<u>0.56</u> < 1.2 <u>0.40</u> < 1.2	<u>0.31</u> < 1.2 (90°は計算不能)	<u>1.92</u> (1.20) <u>1.88</u> (1.15) 注)	<u>1.14</u> 以上 -----
引張抵抗考慮	$\zeta$ (引張抵抗角)	15°(仮定値)	18°(測定値)	繊維状物等無し (*;平均堆積厚 H=9m で計算)	繊維状物等 無し
	Fs(分割法) 注)	<u>0.93</u> < 1.2	<u>1.08</u> < 1.2		
	Fs(無限長斜面)	<u>1.06</u> < 1.2	(90°は計算不能)		
計算結果についての 考察	$\zeta=15^\circ$ (本研究で提示した参考値)を与えることにより、安全率が大幅に上昇。実際の $\zeta$ は参考値より大きいことや、分割法解析が安全側の値を示すことが窺える。				

項目	国内不法投棄等現場		関西(一般廃棄物処分場)	東北(震災篩い下残渣)	サマルバツ埋立地	
	中部①	中部②				
原地形(底面)	平地	谷~平面	谷(詳細不明)	平地	ほぼ平地	
計算断面の斜面勾配	60°(クラック発生)	24°~25°	40°	40°	40°	
引張抵抗材の有無	プラ等多い	プラ等多い	灰、土分主体	細粒分主体	生ごみ、プラ主体	
キャスボル・インパクト 値 (締固め状態の目安)	3.6 (締固めが不十分な地点)	4.6	6.7	4.5	2~10	
引張抵抗無視 (従来法)	$\gamma$ (単位体積重量)	9 kN/m <sup>3</sup> (締固めが不十分な地点)	7 kN/m <sup>3</sup>	11 kN/m <sup>3</sup>	11 kN/m <sup>3</sup>	10 kN/m <sup>3</sup> (仮定値)
	$c$ (粘着力)	4 kN/m <sup>2</sup>	3 kN/m <sup>2</sup> (仮定値)	3 kN/m <sup>2</sup> (仮定値)	11kN/m <sup>2</sup>	3 kN/m <sup>2</sup> (仮定値)
	$\phi$ (摩擦抵抗角)	51°	45° (停止安息角)	36° (停止安息角)	47°	36° (停止安息角)
	Fs(分割法) Fs(無限長斜面)	<u>0.96</u> < 1.2 <u>0.71</u> < 1.2	<u>3.13</u> $\geq$ 1.2 <u>2.19</u> $\geq$ 1.2	<u>0.93</u> < 1.2 <u>0.87</u> < 1.2	<u>3.45</u> $\geq$ 1.20 <u>1.28</u> $\geq$ 1.20	<u>1.22</u> $\geq$ 1.2 <u>0.87</u> $\geq$ 1.2
引張抵抗考慮	$\zeta$ (引張抵抗角)	15° [10°]	15°(仮定値)	繊維状物等がほぼ無し	繊維状物等が無し	15° [10°]
	Fs(分割法) 注)	<u>1.37</u> $\geq$ 1.2	<u>3.45</u> $\geq$ 1.2			<u>1.56</u> $\geq$ 1.2
	Fs(無限長斜面)	<u>1.33</u> [1.12]	<u>2.62</u> $\geq$ 1.2			<u>1.34</u> [1.18]
計算結果についての 考察	クラックが発生し実際の安定性は低い。本地点のような締固め不十分な地点では引張抵抗を減じた方が妥当。					

注) Fs(分割法): (11)式による安全率。 Fs(無限長斜面): (16)式による安全率。ただし九州( )内: (15)式で H、c 考慮。

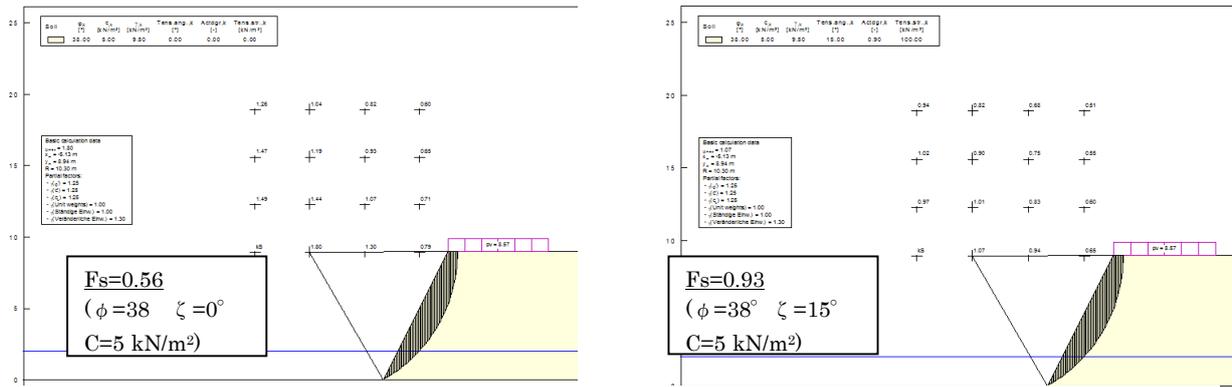


図 3.4.5 分割法による斜面安定解析結果（上海現場：高さ 9m） 左図：引張抵抗なし 右図：引張抵抗考慮

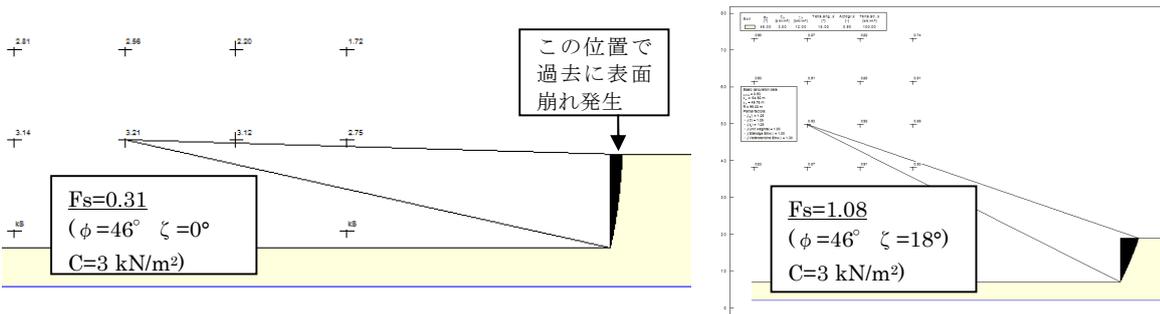


図 3.4.6 分割法による斜面安定解析結果（関東①現場：直壁高 11.5m） 左図：引張抵抗なし 右図：引張抵抗考慮

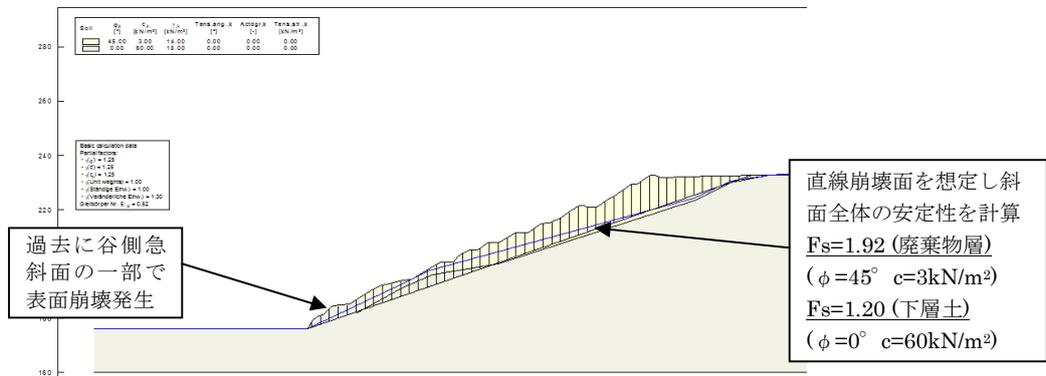


図 3.4.7 分割法による斜面安定解析結果（九州現場：標高差 40m）

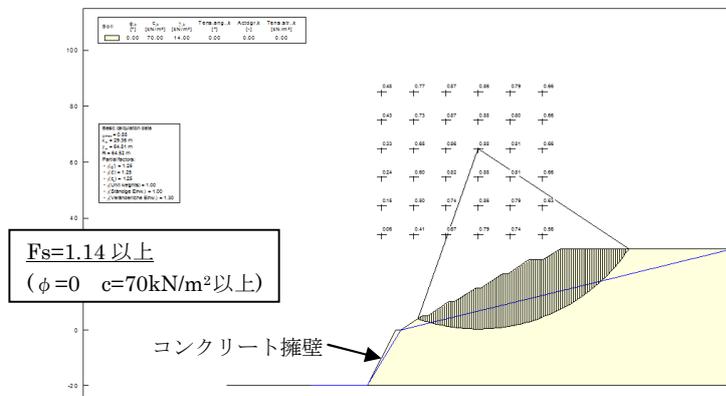


図 3.4.8 分割法による斜面安定解析結果（関東②現場：標高差 40m）

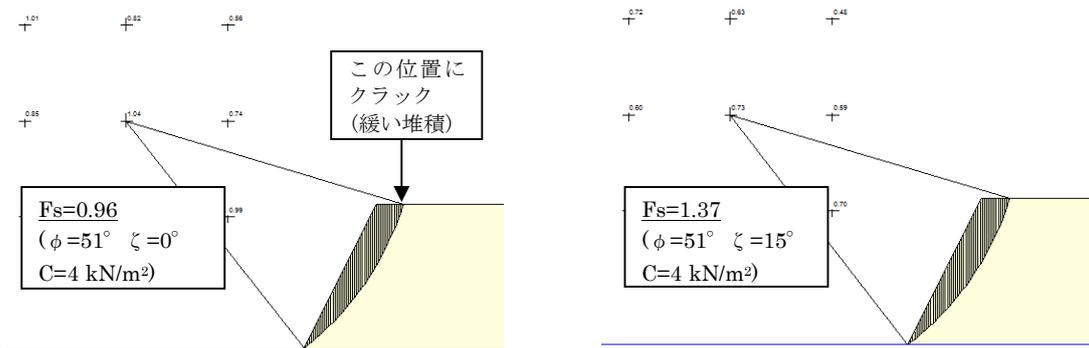


図 3.4.9 分割法による斜面安定解析結果 (中部①現場: 高さ 11m)  
 左図: 引張抵抗無視 右図: 引張抵抗考慮

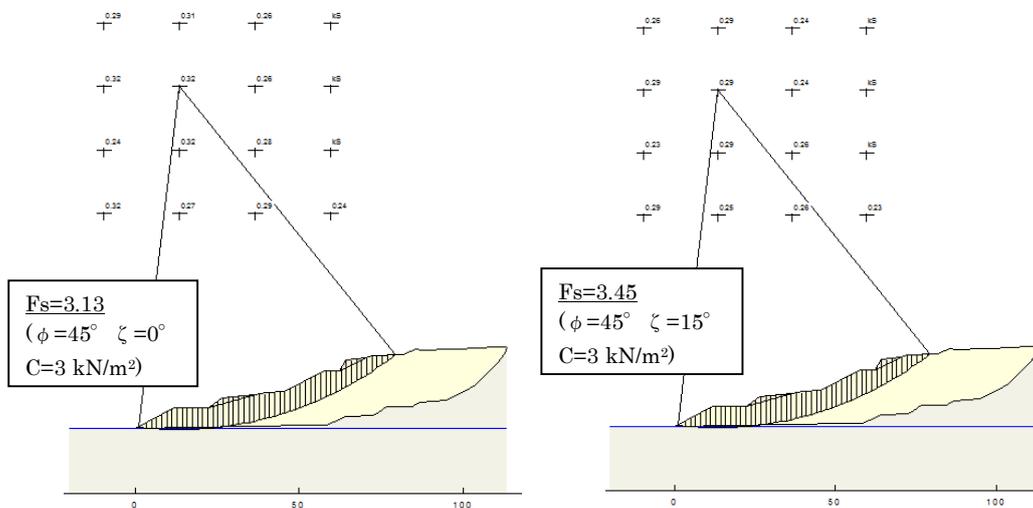


図 3.4.10 分割法による斜面安定解析結果 (中部②現場・実験を実施した北側斜面: 標高差 30m)  
 左図: 引張抵抗無視 右図: 引張抵抗考慮

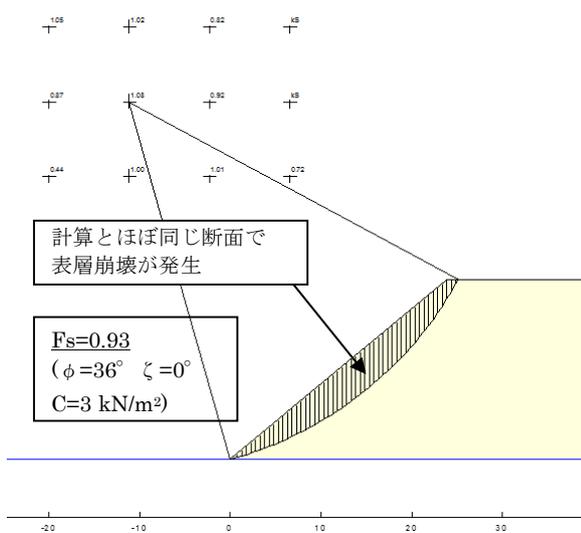


図 3.4.11 分割法による斜面安定解析結果 (関西現場: 高さ 20m)

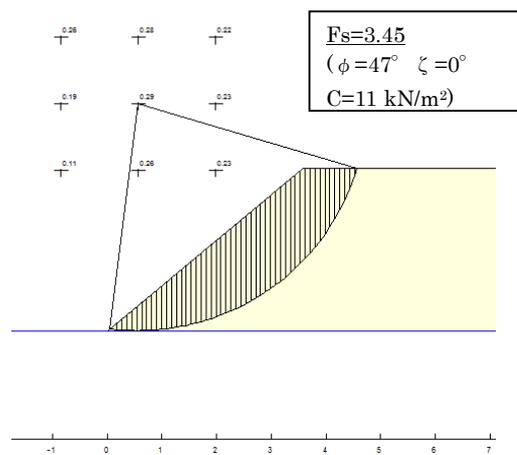


図 3.4.12 分割法による斜面安定解析結果 (東北現場: 高さ 3m)

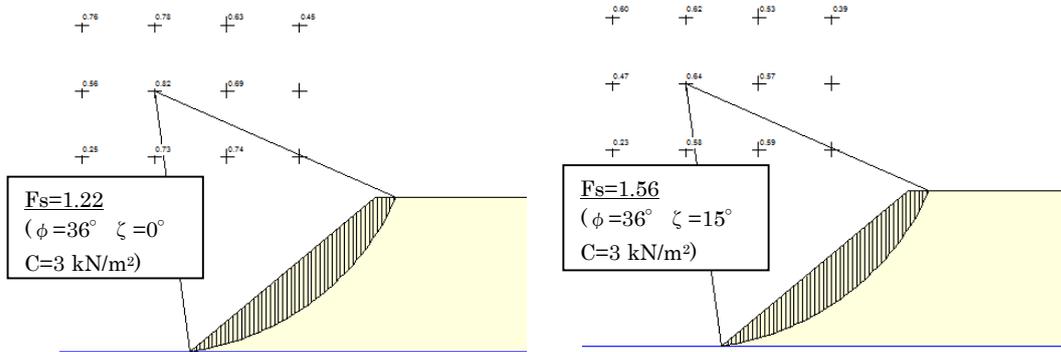


図 3.4.13 分割法による斜面安定解析結果（インドネシア サムルバツ埋立地内：高さ 6.5m）  
左図：引張抵抗無視 右図：引張抵抗考慮

注）図 3.4.5～13 の計算は、すべて”GGU-STABILITY VERSIN9”<sup>52)</sup>により行った。

### 3.5 堆積廃棄物の斜面安定特性

本研究で把握できた堆積廃棄物の斜面安定特性の整理結果を以下に示す。

#### (1) 高い斜面安定性



写真 3.5.1 载荷実験（上海）  
斜面高 9m、勾配 63.5°、载荷重 8.6 kN/m<sup>2</sup>

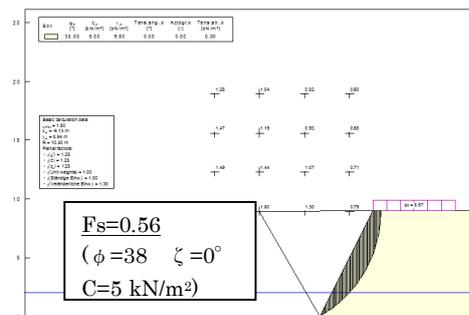


図 3.5.1 同左・既往解析法による斜面安定計算結果  
（計算は”GGU-STABILITY VERSION9”<sup>52)</sup>による）

わが国の不法投棄等現場と廃棄物性状が類似した上海市老港廃棄物処分場内の区画で写真 3.5.1 のとおりに、円弧すべり法解析による安全率(Fs)が 0.56 となる崩壊が想定された斜面（図 3.5.1）を構築して、载荷実験を行った。载荷後、斜面の両側面及び背面を掘削し、背面から 10m<sup>3</sup>の注水、背面からのバックホウによるプッシュを行ったが、斜面の崩壊はもとより変位も生じなかった。したがって、従来の土質工学に基づく斜面安定解析法では、明らかに廃棄物層の斜面安定性を過小評価していることがわかる。

#### (2) 廃棄物種類により異なる斜面安定特性

斜面安定特性は、プラスチック等の繊維状物等を含む場合と含まない場合とでは、大きく異なる。繊維状物等を含む場合は、土構造が有する摩擦抵抗( $\phi$ )、粘着力( $c$ )の他に、繊維状物等と土等の細粒物との圧着・付着や繊維状物等自体の絡み合いにより生じる引張抵抗を有し、このことが廃棄物層が 90°に近いような斜面でも安定する主要因となっている。

また、わが国の不法投棄等現場では、行為者が用地内にできるだけ多くの投棄をするため良く締固めていることや、プラスチック等の繊維状物等に加え海外の都市固形ごみには含まれないコンクリートがら等の雑多な廃棄物による噛み合わせ効果や締固め効果により、盛土地盤や海外の都市固形ごみ埋立地に比べ、極めて高い摩擦抵抗を有していることも、急勾配で安定することに大きく寄与している。

繊維状物等を含む場合は、堆積物の性状が土と類似しており、挙動は土構造と基本的に同様である。

#### (3) プラスチック等の繊維状物等を含む場合の力学特性

繊維状物等を含む場合は、土構造に比べて弾性的な挙動を示す。具体的には、土槽実験で弾性体に近い土圧分布が得られたこと、積み上げた廃棄物を上方から押して沈下させ力を解放すると上方への復元がみられたこと、重機走行時の振動が大きいこと等があげられる。

弾性体的挙動を示す主要要素は、鉛直方向は空隙の多さとプラスチック等の積層によるクッション効果、水平方向は細粒分中に密着して存在している繊維状物等自体がもつ伸縮ばねによる。繊維状物等を含む層の概略的な地盤構成モデル図を図 3.5.2 に示す。

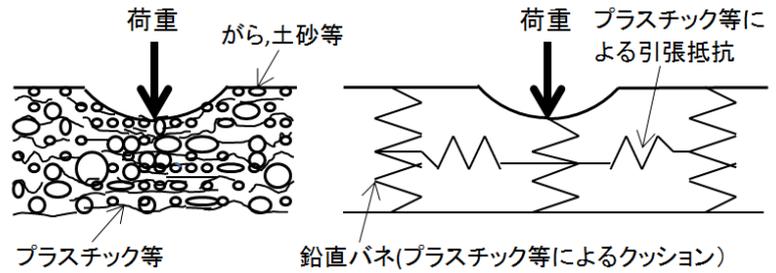


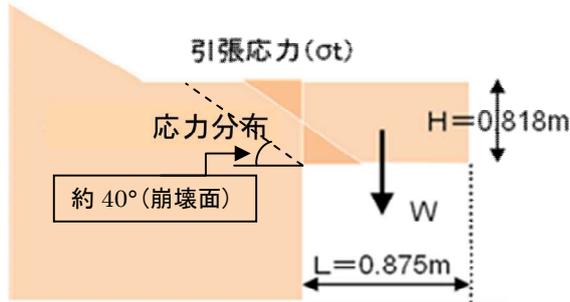
図 3.5.2 繊維状物等を含む場合の地盤の構成(左)と力学モデル概略図(右)

(4) 繊維状物等を含む層のせん断強度

繊維状物等を含む廃棄物層の実際の強度を把握するために、国内不法投棄等現場で、写真 3.5.2 及び図 3.5.3 に示すとおり、層の上部 0.818m の下をバックホウで矩形トンネル状にゆっくり掘削した。その結果、0.875m 掘り進んだところで急激な変位が生じ崩壊した。このとき廃棄物層に働いた引張応力は 33.7 kN/m<sup>2</sup> である。これに対し、写真 3.3.1 の上海での載荷実験の際に想定崩壊面に働いていたとみられるせん断強度は概ね 40 kN/m<sup>2</sup> である。また、関東①現場から採取した試料を用いた引張試験で載荷重 50 kN/m<sup>2</sup> (概ね廃棄物層厚 5m 分の荷重に相当) のときの最大引張応力は 30 kN/m<sup>2</sup> 弱であった。以上から、繊維状物等を含む廃棄物層は実現場の表層近くにおいても 30~40 kN/m<sup>2</sup> 程度の引張応力に耐え、その絶対値は採取試料による引張試験で得られる引張強度よりも大きな値を示したことがわかる。



写真 3.5.2 不法投棄等現場(中部①)での崩壊実験  
(左写真: 矩形トンネル状の掘削 右写真: 崩壊後)



$$W = H \times L \times \gamma = 0.818\text{m} \times 0.875\text{m} \times 12\text{ kN/m}^3 = 8.589\text{ kN/m}$$

$$M = W \times L / 2 = 8.589 \times 0.875 / 2 = 3.758\text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

$$\sigma_t = M / Z \quad (Z = B \cdot H^2 / 6)$$

$$= 3.758 / (1.0 \times 0.818^2 / 6) = 33.7\text{ kN/m}^2$$

ここに、 $\sigma_t$ : 片持ち部に働く引張応力、 $M$ : 同曲げモーメント、 $Z$ : 断面係数(m<sup>3</sup>)、 $B$ : 片持ち梁部の単位奥行き(1m)、他図示

図 3.5.3 廃棄物層(片持ち部)に働いた引張応力

また、崩壊面については、通常の土であれば鉛直方向に崩壊するはずであるが、40°の角度をもって崩壊したことは繊維状物等の引張抵抗に起因しているものと考えられる。このことから、過剰な水分量等による摩擦抵抗の減少や図 3.5.3 のような底部掘削等、何らかの原因による廃棄物層内での崩壊を考えると、引張抵抗が働きにくくなる繊維の主方向である水平方向に近くなるよう、比較的ゆるい勾配で生じることが示唆される。

(5) せん断強度の異方性と水分量との関係

室内実験で、不法投棄等現場から採取した試料を用いて、プラスチック等の繊維状物等の積層方向(繊維の方向)とせん断方向を、現場での一面せん断試験と同様に同じ向きにした場合と、90°の角度をつけてせん断したケースで、せん断応力の差をみた(図 3.5.5)。その結果、90°の角度を付けた場合に約 15%せん断応力が増加した。廃棄物層内では繊維が水平方向に主に堆積しているため、廃棄物層の崩壊面からみると、崩壊面(円弧)の水平に近い部分では繊維方向とせん断方向が近くなり引張抵抗の働きが少なくなり、逆に崩壊想定面が鉛直に近い部分では引張抵抗が増す(図 3.5.4)。したがって、引張抵抗が良く働く繊維状物等を含む締固まった層では、砂地盤で生じるような崩壊面が鉛直に近い崩壊は生じにくく、このため急勾配でも斜面が安定する。

次に、図 3.5.5 で試料の含水比を基本ケースの 10%から 50% (せん断中に水が浸み出る状態のため飽和状態とみられる) にした場合は、せん断応力が約 12%低下した。多量の水分によるせん断強度の低下は、東南

アジア地域等で水分量の多い堆積現場において、廃棄物層内で緩勾配にて大規模な崩壊が生じていることから示唆される。以上から、繊維状物等を含む廃棄物層のせん断強度は、異方性と水分量による影響があることがわかる。

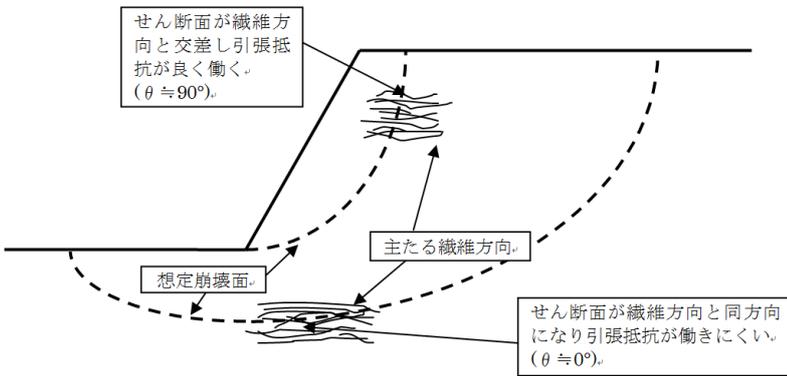


図 3.5.4 せん断強度の異方性

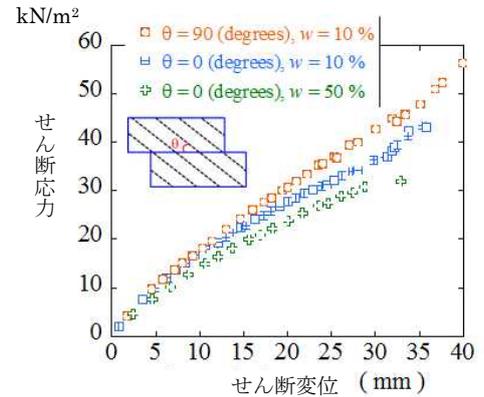


図 3.5.5 繊維方向、水分量とせん断強度の関係 (垂直応力=50kN/m²)

(6) 安息角試験からみた斜面安定特性

9 現場での実験結果と安定解析結果から、安定斜面勾配は、安息角試験によって知ることができることを把握した (詳細は 3.2.1 参照)。安息角試験をモデル的に示したのが図 3.5.6~3.5.7 である。

繊維状物等を含む廃棄物層は、図 3.5.6 のように繊維状物等による引張抵抗の発現によって急勾配で斜面安定する。安息角試験で鉛直上方からのまきこぼしでうまく積み上がった場合がこれに相当し、この状態の斜面勾配が「限界安息角」となる。安息角試験で、さらにまきこぼしを増やしていくと、図 3.5.7 のように、斜面上をがら等の重量物が転げ落ちるようになり、やがて安定的な勾配、すなわち「停止安息角」となる。このとき、軽い繊維状物等は重いがら等の落下エネルギーに耐えられずほとんど引張抵抗は働かない状態で斜面が形成されると考えられる。そして、斜面は摩擦抵抗と粘着力によりほぼ形成され、このことが、停止安息角と一面せん断試験による摩擦抵抗角( $\phi$ )とほぼ一致している要因と考えられる。なお、繊維状物等を含む層の粘着力( $c$ )が、これまでの現場実験結果で 3~5 kN/m² と小さいことも停止安息角と一面せん断試験による摩擦抵抗角( $\phi$ )とが一致している一因である。また、不法投棄等現場の安息角は、繊維状物等を含まないケースでも通常の土よりは大きな値を示したが、これは、大小様々な廃棄物の構成による噛み合わせ効果による摩擦抵抗の発現によることが大きいと考えられる。

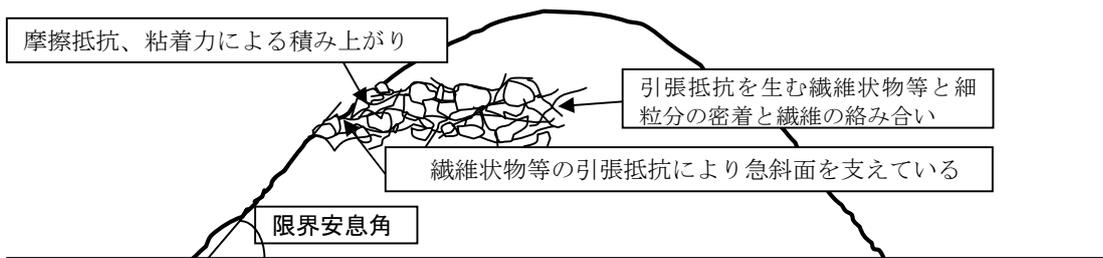


図 3.5.6 急勾配堆積斜面に働く引張抵抗と摩擦力の発現イメージ

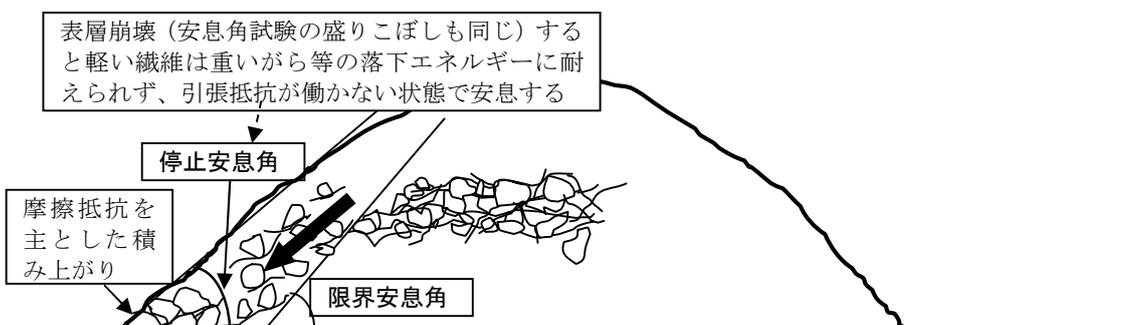


図 3.5.7 表層崩壊後の摩擦抵抗、粘着力による積み上がり (停止安息角)

#### 4. 結論

一連の実験により国内の産業廃棄物不法投棄等現場は通常の盛土地盤に比べ高い強度定数を有していることを確認した。要因として、不法投棄等現場では投棄量を増やすため良く締め固められていることに加え、がれき等による噛み合わせ効果やプラスチック等による引張抵抗によることを把握した。また、プラスチック等の繊維状物等を含む現場と含まない現場とは強度特性が異なり、繊維状物等を含む現場は土砂地盤には無い引張抵抗を有し弾性体的挙動を示す。

研究成果として、繊維状物等の有無等により現場分類し、各々に対応した斜面安定性評価法を示した。試験方法として、新たに安息角試験、現場土圧試験を開発しその有効性を確認したとともに、一面せん断試験、引張試験等と併せて斜面安定性評価に必要となる一連の試験を提示した。斜面安定解析については、引張抵抗を考慮することで現場の状況を良く表す結果を得た。また、不法投棄等現場の特性をふまえて、新たに簡易評価式を提案し適用性を確認した。これらの成果をまとめ、「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」として本報告書巻末に提示した。

地震振動に対する廃棄物地盤挙動の検証、降雨浸透による細粒分連行や帯水の可能性等と強度との関係の検証、地盤中のプラスチック等の物理・化学的な長期安定性の検証は、今後の研究課題である。

## [巻末資料]

### 不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)

#### (1) 適用範囲

ここに示す斜面安定性評価方法は、わが国の産業廃棄物不法投棄等<sup>2)</sup>の現場（以下、「不法投棄等現場」という）について、斜面安定性の現状評価や、行政代執行等による崩壊防止対策（生活環境保全上の支障の除去対策）の必要性を検討するためのものである。

また、本評価方法を産業廃棄物不法投棄等現場以外の堆積廃棄物層の斜面安定性評価の際に参考とする場合には、対象とする廃棄物の強度特性、作用する荷重、堆積期間に応じた物性変化(長期的な強度劣化等)の他、対象物の重要性等の必要条件も勘案して、対象物に適した検討を進める必要がある。

なお、本マニュアル案は、本研究グループによる提案として提示するものである。

注) 産業廃棄物不法投棄等：廃棄物処理法第 16 条に違反する事案、または同法第 12 条の産業廃棄物処理基準もしくは第 12 条の 2 の特別管理産業廃棄物処理基準に適合しない処分。

#### (2) わが国の不法投棄等現場で考えられる斜面崩壊のパターン

わが国の不法投棄等現場での斜面崩壊として、次の 5 つのパターンがあげられる。

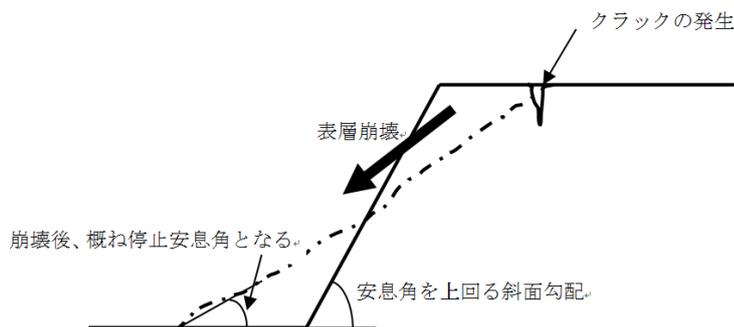
- ①安息角を上回る急傾斜斜面での表層崩壊
- ②谷地等の傾斜地上に堆積した廃棄物層の大雨時等における大規模崩壊
- ③谷地等の傾斜地上の堆積地での原地盤（下層土）のすべり
- ④廃棄物層内への水の集中的な浸透に起因したすべり
- ⑤生ごみ等の水分や降雨、その他崩壊要因による廃棄物層内でのすべり（主に海外事例）

#### 【「本文 3.1.2 斜面崩壊事例の整理結果」参照】

廃棄物地盤は、プラスチック等の繊維状物等を含む場合にはその引張抵抗により、また、繊維状物等を含まない場合であってもがら等による噛み合わせ効果や灰分の固結作用等により、一般的な盛土や地山よりも、概して高いせん断強度を有する。このため、廃棄物層内での崩壊は安息角を上回って盛った斜面の表層崩壊が主で、この他は傾斜地上等での水に起因したすべりである。

なお、東南アジア等で発生している廃棄物層内の大規模な崩壊は、生ごみ等による廃棄物層自体が持つ大量の水分や熱帯特有の降雨特性（短時間での大量降水）が起因しているとみられ、状況がわが国の不法投棄等現場とは大きく異なる。

#### ①安息角を上回る急傾斜斜面での表層崩壊（斜面勾配の安息角化）（図(1)）



図(1) 安息角を上回る急傾斜斜面での表層崩壊



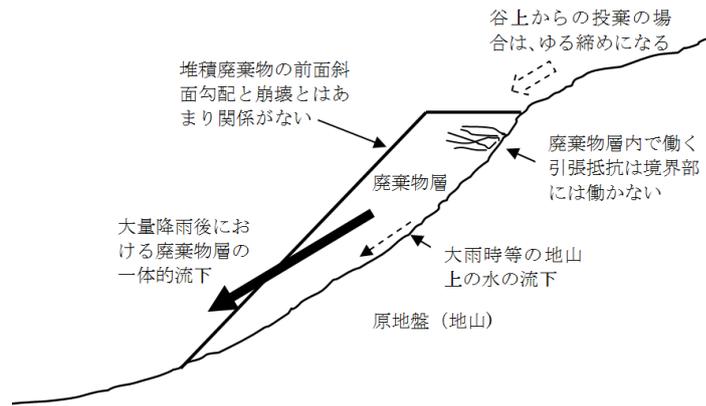
急傾斜面上で法肩に沿ったクラック

斜面は安息角で安定するため、安息角を上回った角度で積み上げた場合は、崩壊して安息角になるうとする。斜面上の法肩に平行にクラックの発生がみられ、大規模に発達したクラックを起点として崩壊が生じる。このケースでも大量降雨後の崩壊が報告されている。

なお、このケースは基本的に安息角に向かう表層崩壊であり、斜面が長大でない限り大規模な崩壊にはつながらない。

#### ②谷地等の傾斜地上に堆積した廃棄物層の大雨時等における大規模崩壊（図(2)）

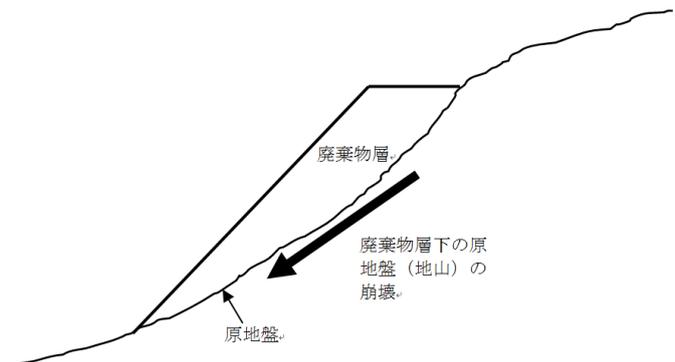
廃棄物層のせん断抵抗よりも、廃棄物層と原地盤の間のすべり抵抗が小さいことから、大量降雨が引き金となって生じる大規模斜面崩壊。世界の大規模崩壊の典型的なパターンで、国内でも1例確認している。このケースは、斜面上の物体のすべりと基本的に同じ現象であり、すべり（崩壊）と廃棄物層前面の斜面勾配とはほとんど関係がない（過去の崩壊事例をみても斜面勾配とは関係なく崩壊が生じている）。



図(2) 谷地等の傾斜地上に堆積した廃棄物層の大雨時等における大規模崩壊

③谷地等の傾斜地上の堆積地での原地盤（下層土）のすべり（図(3)）

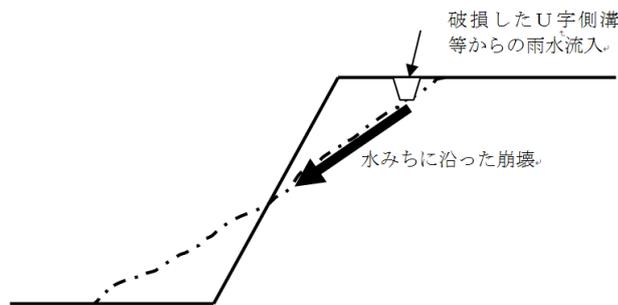
廃棄物層のせん断抵抗よりも、原地盤（地山）のせん断抵抗が小さい場合に、検討を要する傾斜地の斜面崩壊。地山崩壊危険地域での堆積現場では十分な検討が必要になる。



図(3) 谷地等の傾斜原地盤上の堆積地での原地盤（下層土）のすべり

④廃棄物層内への水の集中的な浸透に起因したすべり（図(4)）

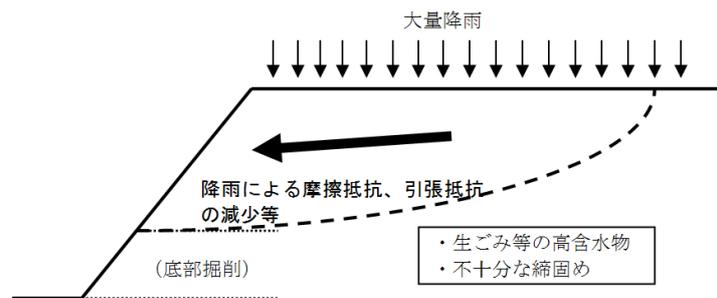
何らかの原因により廃棄物層に集中的に水が流れ込んだ場合に流水方向に大きな水みちが形成され、水みちに沿った崩壊が生じるもの。把握している事例として、昭和40年代の一般廃棄物処分場の斜面上に法肩と平行に設置されたコンクリート製U字側溝の継ぎ目が破損し、そこから集水した雨水が廃棄物層内に入り込んで、このU字側溝を起点とした表層崩壊が生じた事例がある。なお、この事例はプラスチック等の混入が少ない土・灰分主体の埋立であり、プラスチック等主体の現場に比べ水が抜けにくかったことも崩壊につながった可能性がある。



図(4) 廃棄物層内への水の集中的な浸透に起因したすべり

⑤生ごみ等の水分や降雨、その他崩壊要因による廃棄物層内でのすべり（図(5)）

東南アジア等の多雨地帯で、生ごみ等の多量の水分を含む廃棄物が不十分な締固め状態で埋立られた場合に発生している



図(5) 生ごみ等の水分や降雨、その他崩壊要因による廃棄物層内でのすべり（主に海外事例）

廃棄物層内でのすべり。引張抵抗が働きにくい比較的緩勾配の崩壊面により大規模な斜面崩壊が生じ得る。海外事例では、ゆる締めの場合に大量降雨後に摩擦抵抗や引張抵抗が小さくなって崩壊したとみられている事例が多い。わが国の産業廃棄物不法投棄等現場には多量の水分を含む廃棄物がほとんど無いことと、限られた土地により多く投棄するため良く締められており、通常は考えにくい崩壊。

ただし、図(5)のように底部掘削を行うなど、何らかの崩壊要因を与えた場合には、国内でもこのような廃棄物層内での崩壊が発生する可能性はある。(現場崩壊実験で確認)

### (3) 評価手順

現地踏査や簡単な現場試験により迅速に不法投棄等の斜面安定性を評価する概略評価と、詳細な現地試験や採取試料を用いた室内実験により評価する詳細評価を示す。

概略評価の結果により斜面安定性が危惧される場合や、堆積状況・周辺状況等から斜面崩壊によって甚大な被害の発生が想定される場合等に、必要に応じて詳細評価を行う。

#### ①概略評価

不法投棄等現場に入ってから試験等の実施は不法投棄等の行為者との関係等から容易でない場合がほとんどであることや、不法投棄等の発見後に応急措置の必要性等について迅速に判断する必要があることから、初期段階に比較的簡単に実施できる概略評価法を示した。

なお、不法投棄等現場の現地調査方法については、「支障除去のための不法投棄現場等現地調査マニュアル」<sup>54)</sup>に、迅速かつ的確な初期対応、対策工を想定した事前調査、対策工設計のための調査に分けて記載しているので、とくに「迅速かつ的確な初期対応」の部分の参考にするといよい。

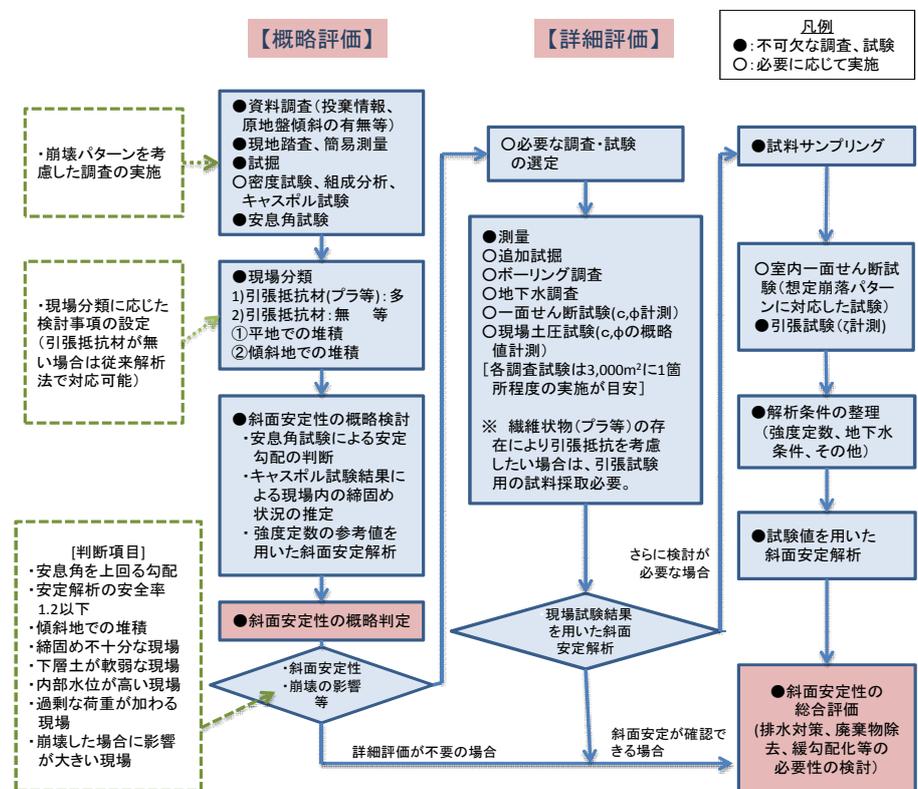
#### ②詳細評価

現場での強度試験や採取試料を用いた室内試験により堆積廃棄物層特有の力学特性を詳細に調べて判断する詳細評価法を示した。

詳細評価は、現場試験や室内試験のとりまとめに少なくとも3か月間程度を要することや、相当の調査費用が発生することから、概略試験結果により斜面安定性が危惧される場合や、堆積状況・周辺状況等から斜面崩壊した場合に大きな被害が想定される場合等に、必要に応じて行うことが合理的である。

#### ③産業廃棄物不法投棄等現場の斜面安定性評価フロー

斜面安定性評価フローを図(6)に示す。



図(6) 不法投棄等現場の斜面安定性評価フロー

#### (4) 概略評価方法

##### (4.1) 概略評価の基本事項

概略評価は、簡便かつ迅速に不法投棄等現場の斜面安定性を評価することを目的とする。概略評価は、次の順で行う。

- ①投棄された廃棄物種類や原地盤の傾斜状況等についての資料調査
- ②現地踏査による斜面勾配、堆積高さ等の堆積状況、クラックの発生状況、斜面や法尻での漏水状況等の確認
- ③試掘による堆積廃棄物種類、堆積状況の確認等
- ④必要に応じた試験・分析（現場密度試験、組成分析、衝撃加速度試験）の実施
- ⑤堆積廃棄物種類及び原地盤の傾斜の有無による現場分類
- ⑥安息角試験による斜面勾配の妥当性の評価
- ⑦安息角試験結果や概略的斜面安定解析結果による概略評価

##### ①資料調査

資料調査の方法は、「支障除去のための不法投棄現場等現地調査マニュアル」<sup>54)</sup>の「迅速かつ的確な初期対応」(p11～p19)に記載している。

とくに、斜面安定性評価にあたっては、廃棄物の性状（種類、締め固まり状況等）や投棄・埋立の方法を知ることが重要である。投棄行為者の所有資料やマニフェスト、周辺住民への聞き込み等により、投棄された廃棄物の種類について、できれば平面方向や深さ方向での投棄物の違い、特大物の投棄の有無等の詳細まで把握することが望ましい。また、投棄・埋立の方法についても、投棄前の原地盤の掘削・整形状況、投棄の方法（下側からの積み上げ、上方からの投下等）の他、ダンプ投下後の締固め状況などの詳細まで把握することが望ましい。例えば、上方からの投下の場合、下から積み上げた場合よりも締固めが不十分になり、崩壊のリスクは高い。こうした資料調査が、適切な評価に結びつくと同時に、調査の簡略化や費用節減に結びつく。

##### ②現地踏査

現地踏査は、(2)に示した斜面崩壊のパターンを考慮して行う。斜面勾配は、スラントスケール(水準器)で計測できる。ゴルフ等で用いられる携帯計測機があれば、斜面勾配や堆積高さを計測できる。

崩壊に直接関係するクラックの有無や、漏水や廃棄物層内への水の流入の可能性を把握することはとくに重要である。クラックについては、とくに、表層崩壊を引き起こす斜面上の斜面背後の法肩付近で法肩に沿って入る長いクラックに注意する必要がある。このような法肩に平行なクラックは、短時間後に斜面崩壊が生じる可能性もあるため（海外の事例ではクラック確認後5日後に崩壊した事例もある）、安全を確保できる範囲での斜面整形（クラックから斜面側の廃棄物を掘削し緩勾配化）や、付近への立ち入り禁止措置等の応急措置が必要になる。

漏水については、本研究で調査した国内現場をみる限りでは、プラスチック等の繊維状物等を多く含む現場では降水時以外に斜面中腹からの漏水は通常みられないことから、雨水は大方迅速に排水されているものと想定される。一方、土砂、燃え殻等が主体の現場では、試掘した2現場でいずれも試掘中に内部帯水を確認したことから、降水時や降水後の漏水状況の調査等により、内部帯水状況を想定してみるのが重要である。また、(2)の崩壊パターン④に示したように、排水側溝が設けられている場合に、排水側溝が破損すれば、逆に破損箇所から雨水が層内に流れ込むことになり、斜面崩壊の危険が生じることになる。表層崩壊を起こした事例では、コンクリート製のU字側溝の各継ぎ目に隙間が生じていた。廃棄物層は土地盤に比べ柔らかいことから固いU字側溝が廃棄物層の沈下等の変化に追従できないことが想定され、このような現場では維持管理が極めて重要になる。現地踏査にあたってもこのような排水側溝の他、構造物等の異物との境界部など、層内に水が入り込む可能性のある場所を調べる必要がある。

さらに、斜面崩壊した場合の影響や被害を考えるために、斜面下側の居住等の状況や、河川、道路等のインフラ等も調べる。

##### ③試掘による堆積廃棄物種類、堆積状況の確認等

堆積廃棄物層を外から見るだけでは、専門家でも斜面安定性を評価することは不可能である。また、ボーリング調査でも長短固柔の雑多な廃棄物層のコアを正確に抜くことは困難である。このため、必ず試掘によ

り内部の廃棄物の種類や大きさ、堆積状況（締まり具合等）を確認する。試掘は、可能であれば、廃棄物種類が異なる可能性がある場所毎に（またはトレンチ掘削で）、重機で掘削可能な深さ 5m 程度まで行うことが望ましい。試掘方法の詳細については、「支障除去のための不法投棄現場等現地調査マニュアル」（p36～p37）に記載している。なお、調査の初期段階に現場内で廃棄物種類の相違等の推測が困難な場合には、同マニュアルに記載しているように、まず 3,000m<sup>2</sup>に一箇所程度の試掘を行って、廃棄物種類に顕著な差がみられるような場合に、必要に応じて範囲を狭めて調べていくことが効率的である。

#### ④必要に応じた試験・分析（現場密度試験、組成分析、衝撃加速度試験）の実施

##### a)現場密度試験

廃棄物層の現場密度（単位体積重量）は、解析時に使用する他、廃棄物層の締まり具合を知るためにも重要である。このため、概略評価段階に、試掘場所等を利用して現場密度試験を実施しておくことが望ましい。試掘時には、深度別に現場密度試験を行うことも可能であり、廃棄物層内部の堆積状況を把握するためにも有効である。現場密度試験の方法としては、廃棄物地盤は空隙が大きいことから、「地盤調査の方法と解説」<sup>47)</sup>に示された現場密度試験のうち「水置換法」（JGS1612）が適する。

##### b)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要件であり、試掘時に採取した試料等を用いて、概略評価段階で実施することが望ましい。廃棄物地盤強度には、廃棄物の形や長さも影響を及ぼすため、次のケルシュ(Koelsch)<sup>48)</sup>による区分を参考に組成分析を行うと強度特性把握上、有益なデータが得られる。

###### 1)廃棄物形状：（以下の、mass %）

- ・線状物 dim1(one side long, two short)；ワイヤー、ケーブル、ロープ等
- ・面状物 dim2(two sides long, one short)；シート、ホイル等
- ・箱状物 dim3(all sides long)；箱、岩等
- ・細粒分 (all sides short i.e<40mm)

###### 2)長さ：

- ・最大廃棄物長さ [mm]
- ・<8mm の[mass %]
- ・8mm ～ 40mm の[mass %]
- ・<40mm の[mass %]

この他、組成分析の方法については、「支障除去のための不法投棄現場等現地調査マニュアル」<sup>54)</sup>（p36～p37）に記載している。

廃棄物層特有の引張抵抗は、上記の一定長以上の線状物(dim1)と面状物(dim2)により発現している。したがって、引張抵抗の程度を考えるために上記区分での組成分析が必要である。ちなみに dim1+ dim2=4% の不法投棄等現場で $\alpha$ (引張抵抗角)=18°を得ている。

##### c)キャスポル試験（衝撃加速度試験）

現場内での廃棄物種類や堆積状況を簡易に比較できる試験として、国土交通省近畿地方整備局で開発したキャスポル試験（衝撃加速度試験）がある。試験方法や活用方法は(4.4)に示す。

#### ⑤堆積廃棄物種類及び原地盤の傾斜の有無による現場分類

(4.2)に示す。

#### ⑥安息角試験による斜面勾配の妥当性の評価

斜面の安定勾配は安息角試験で評価できるため、平地の原地盤上の不法投棄等現場で、内部水位が特に高くない現場であれば、安息角試験により斜面勾配の妥当性についての概略評価が可能である。詳細は、(4.3)に示す。

#### ⑦安息角試験結果や概略的斜面安定解析結果による概略評価

安息角試験で得られたデータ（停止安息角）や(4.5)表(2)に示す強度定数の参考値を用いて斜面安定解析を行うことにより、斜面安定性の概況を把握できる。

斜面崩壊の危険が高い傾斜地上の不法投棄等現場の場合は、斜面崩壊は廃棄物層の前面法勾配とあまり関係なく生じることから安息角試験では崩壊の危険を判断できず斜面安定解析が必要になる。また、内部水位が高い場合や何らかの荷重が作用している場合等、安息角だけでは判断できない場合は同様に斜面安定解析が必要になる。解析・評価方法の詳細は、(4.5)に示す。

(4.2) 堆積廃棄物種類及び原地盤の傾斜の有無による現場分類

斜面安定性評価を行う際は、せん断強度の発現特性の面から、プラスチック等の紐状物、シート状物（以下「繊維状物等」という）の有無、細粒分へのプラスチック等の混入状況、大型がれき・角材等の状況により区分する。また、斜面崩壊特性の面から、原地盤が平地の場合と傾斜地の場合に区分する。

産業廃棄物の不法投棄等は投棄の特性上、建設解体現場等の発生源からの直送物、一次破碎物、選別残渣に分けられるため、このような大別が可能になる。斜面安定性評価上での現場分類を表(1)、写真(1)に示す。

表(1) 産業廃棄物不法投棄等現場の斜面安定性評価上での分類

廃棄物の形状・種類	現場特性	強度パラメータ	類似挙動物	適する試験、解析方法	事案件数 <sup>注2)</sup> [ ]内:崩壊数		
					平地	傾斜地	計
1) 大型がれき、角材等の粗大物主体	小規模不法投棄等。最大堆積高 10m 程度	摩擦、噛み合せ効果	石積み	噛み合わせ等が複雑で解析は難しいが、物理的に小規模投棄に限定されるため、現場評価で対応。	1	2 [1]	3
2) 紐状物、シート状物（繊維状物等）混入多 <sup>注1)</sup> （粗大物少）	急傾斜大規模不法投棄等になり得る。	摩擦、粘着、引張	弾性体	一面せん断試験、引張試験、安息角試験。引張を考慮した安定計算。	9 [1] ※	3 [1]	12
3) 細粒分主体 <sup>注1)</sup> （プラ、繊維分あり）	小規模不法投棄等。最大堆積高 10m 程度	摩擦、粘着	弾性体	一面せん断試験、安息角試験。（三軸圧縮試験の適用性は今後の検討課題）	4	0	4
4) 土砂分、がれき主体（プラ等ほぼ無し）	土砂特性。燃え殻等で固結化の場合あり	摩擦、粘着	盛土	既往土質工学手法で対応可能。	1	1 [1]	2
計					15 [1]	6 [3]	21

注1) 上表2)と3)の強度特性に与える違いは主に引張抵抗の有無である。引張抵抗は、現場引抜試験結果から長さ10cm程度の繊維状物でも抵抗があることを確認しており、10cm以上の長さの繊維状物等の有無が概ねの区分の目安になる。10cm以上の繊維状物等が少ない場合等、両者の区分の判断が難しいときで、引張抵抗の有無により斜面安定性評価に決定的な影響を及ぼす場合は、引張試験を行って確認する必要がある。

注2) 該当事案数：斜面崩壊のおそれが指摘されていた代表的な支障除去事業事案と本研究で平成22年度から現地調査及び現地実験を行った事案の計21事案の内訳。[ ]内の崩壊数は、事案件数のうち、過去に崩壊、崩れ（落石を除く）が生じたことがある事案の件数。

※：2)の平地の[1]は、90°斜面(直壁)での厚さ1mの表面くずれが生じた事案。



1)① 粗大物主体の現場（角材主体）



1)② 粗大物主体の現場（無破碎物等）



2)① 紐状物、シート状物（繊維状物等）混入多の現場



2)② 同・斜面上の投棄現場



3) 細粒分主体（プラ、繊維分あり）の現場



4) 土砂分、がれき主体（プラ等ほぼ無し）の現場

写真(1) 産業廃棄物不法投棄等現場の斜面安定性評価上での分類毎の代表的事例写真

#### (4.3) 安息角試験の方法と試験結果の利用方法

不法投棄等現場における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。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。現状の廃棄物斜面の勾配が安息角以下の場合には、その廃棄物斜面は安定しているものと判断される。しかしながら、不法投棄等現場では、種々の崩壊要因があり、安息角のみで斜面の安定性を評価することなく、総合的な判断を行うことが重要である。

【「本文 3.2.1 安息角試験について」参照】

##### ①安息角試験の考え方

粉末を対象にした安息角試験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。土質工学では、安息角を「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」と示されている。結論的には、「上方から落下させたときにできる円錐の山の斜面角度」である。

従来の研究で、安息角には限界安息角（critical angle of repose,  $\alpha_c$ ）と停止安息角（repose angle after avalanching,  $\alpha_R$ ）の二つがあり、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言っている<sup>注)</sup>。廃棄物の安息角試験方法として、上記の研究を考慮して、以下の試験法を示す。

注) 松倉公憲, 恩田裕一: 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, pp27~35, 1989

##### ②安息角の試験方法

試験の手順と留意点は次のとおり。試験の実施例を写真(2)～(5)に示す。

- 1) バックホウのバケットにより廃棄物をまきこぼし、山を形成する。まきこぼす際には、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る(写真(2))。

注) バックホウ・バケットは大きすぎると落下幅が広がるため、0.45m<sup>3</sup>級またはそれ以下が適当。

- 2) 形成する廃棄物の山の寸法(高さ)は、廃棄物の形状と大きさ(廃棄物の最大寸法)を考慮して、必要な最低高さ(1.0～1.5m程度)を得るように実施する。実施後、形成された廃棄物の法面勾配と山の高さをスランートルール等で測定する(写真(3)(4))。法面勾配は、バケットの向きに関係するため必ず4方向について、平均的な勾配を計測する。
- 3) 使用する廃棄物は、実験直前に掘削したものをを用い、廃棄物の水分量が変化しない状況で実施する。
- 4) 同一廃棄物を用いて実験する場合は、ごみ同士の付着や微細粒子の欠落等の問題から最大2回までの繰り返し使用に限定する必要がある。
- 5) 廃棄物の山を形成するために、目標となる位置を定める目的で、地表面に定規を作製し設置することが望ましい。
- 6) 重機が持ち込めない現場では、人力で写真(5)のように2体の三脚間に吊した土嚢袋(30袋分程度以上)の底面をカッターで切ることによって積み上げる方法でも安息角の計測が可能である。
- 7) 試験の実施は、概略調査段階では、試掘(3,000m<sup>2</sup>に1箇所程度)で掘削された廃棄物を利用して、試掘場所毎に実施すると、効率的でかつ堆積状況に応じた安息角が得られる。

##### ③安息角の測定

限界安息角は、まきこぼしが少ない状態での急勾配部の傾斜角であり、停止安息角は、まきこぼしを増やしていきやがて斜面が4方向で勾配一定になったときの傾斜角である。斜面勾配が一定になったときの高さの計測により、2回目以降の試験で形成する山の高さの目安とする。



写真(2) 安息角試験の実施状況

写真(3) 安息角の測定

写真(4) 高さの測定

写真(5) 人力での安息角計測

#### ④安息角試験結果の利用方法

これまでの安息角試験の結果、廃棄物の斜面安定性を評価する値としては、安息角試験で得られた停止安息角を用いることが適切である。

停止安息角は、廃棄物をまきだすことで形成される山が斜面勾配の最大角度を超え、滑ることにより安定した状況を示している。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。

これまでの実験では、安息角試験による停止安息角と、現場で形成されている廃棄物法面勾配、及び一面せん断試験の $\phi$ （内部摩擦角）は、各現場でほぼ同じ値を得ており、安息角試験の簡易評価法としての有効性が確認されている。

#### (4.4) 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

不法投棄等現場において、廃棄物の埋立状況を把握する手法として衝撃加速度試験（キャスポル）を用いることにより、不法投棄等現場の全体像（部分的な強度の高低や不安定な場所の特定）を把握することが可能である。

しかし、本試験法では、廃棄物の種類や形状、水分量等の種々の条件が異なる他の現場と厳密な比較を行うことや、強度定数を推定することは困難である。使用に際しては、この点を考慮した利用方法が求められる。

【「本文 3.2.2 衝撃加速度試験(キャスポル)について」参照】

##### ①試験の目的と方法

不法投棄等現場で簡易に廃棄物層の強度定数を知ることは、急斜面に盛り立てられた廃棄物の性状を把握することの第一歩となる。現状では、不法投棄等現場において的確、簡易に判断する手法が無いなかで、運搬が容易で試験が簡単な衝撃加速度試験の適用が可能であると判断するものである。

衝撃加速度法とは、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。

##### ②キャスポル試験器の概要

キャスポル試験器は、国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所が開発した簡易支持力測定器<sup>44)45)</sup>で、試験器が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( $\phi$ )、コーン指数( $qc$ )、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。

##### ③キャスポル測定器の構造

キャスポル測定器は本体部（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 50mm、質量 4.5kg のランマー（重錘）を高さ 45cm から自由落下させ、ランマーに内蔵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。

写真(6)にキャスポル試験機及び測定器を示す。

##### ④衝撃加速度（キャスポル）の試験方法

###### 1) 測定位置の選定



写真(6) キャスポル測定器(本体部, 表示部)



写真(7) 測定状況

測定位置は、平坦な箇所を選ぶ。なお、そのような箇所が見当たらない場合には、地盤面をできるだけ乱さないようにハンドスコップ、直ナイフなどで平らに整形するか、または試験用砂を薄く散布して平坦に仕上げる。

## 2) 測定器の設置

ランマーが測定地盤に対して鉛直に落下するように、測定器を設置する。

## 3) 表示部及び出力部の準備

電源を入れ、表示部及び出力部が正常に機能することを確認する。

## 4) 測定

- 1.ランマーを所定の位置まで引き上げ、ストッパーに固定する。
- 2.ストッパーを解除して、ランマーを自由落下させる。
- 3.測定結果をデータシートに記入する。

## 5) 試験箇所数

試験は、短時間で実施できることから、法肩付近等の崩壊の危険性が高いと思われる場所を主に、20～30m 程度間隔で実施することが望ましい。なお、1箇所あたり 20cm 程度の間隔で5回測定する。写真(7)に測定状況を示す。

注) 試験方法の詳細は「簡易支持力測定器による試験方法（近畿地方建設局近畿技術事務所）」<sup>44)</sup>を参照。

## ⑤不法投棄等現場での試験結果の利用方法

一般的な盛土工事等の施工管理にキャスポルを用いる場合、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を算出している。また、キャスポルで精度よく測定できる土質の範囲としては、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言われている。廃棄物の場合、精度よく測定できる土質の寸法とは大きく異なる状況である。

「簡易支持力測定器（キャスポル）利用手引き」<sup>45)</sup>では、相関性の高い CBR、内部摩擦角、粘着力に関して、多くの試験結果より一次回帰式が示されており、その際の相関性の図では、インパクト値が 5～30 程度の値である。しかしながら、廃棄物層では今まで計測したインパクト値が、1.5～8 程度であり、その数値の差が顕著である。この点から、廃棄物地盤はこれまでのインパクト値で適正に評価することが難しいことが理解される。

ここで考えられる衝撃加速度試験結果の利用方法であるが、廃棄物地盤における最低インパクト値の考えを取り入れる提案である。考え方としては、不法投棄等現場でキャスポル試験（衝撃加速度試験）を実施した場合に、絶対に必要な最低限の数値（目安）を定めるというものである。

廃棄物地盤の安定性の点から考えると、締め固めが不十分な状態では斜面崩壊のリスクが高まるため、締め固まり状態を把握することが重要になる。ただし、斜面で試験が実施できれば斜面の状態を直接的に調べることができるが、キャスポル試験は斜面上での計測が不可能であるため、斜面上の法肩付近で計測するなどの対処が必要になる。

これまでの現場実験結果から、法面の崩壊が生じない状況の一つの判断の目安値としては、  
繊維状物等を含む現場の場合、

$I_a$ (インパクト値)  $\geq 4.0$  程度とみられる。

この数値の意味であるが、現在までに実施した不法投棄等現場の結果では、明らかに廃棄物がゆるく堆積し、クラックが発生するなど安定性が乏しい場所では、インパクト値が 4 以下を示しており、この値が安全側の最低ラインとみられることによる。

なお、土砂主体の現場の場合は、インパクト値が繊維状物等を含む場合に比べて大きな値となることと、盛土地盤の地盤定数を求めるサウンディング方法としてポータブルコーン貫入試験(JGS 1431)、スウェーデン式サウンディング試験(JIS A 1221)等が確立されていることから、こうした既往の土質力学の方法により評価するとよい。これらの試験方法は「地盤調査の方法と解説、(社)地盤工学会」<sup>47)</sup>に示されている。

#### (4.5) 斜面安定解析の方法

斜面安定解析は廃棄物の形状・種類別に、次のとおりに行う。

- ①大型がれき、角材等の粗大物主体の現場
  - ・安息角試験による現場評価で対応
- ②紐状物、シート状物（繊維状物等）混入多の現場
  - ・引張抵抗を考慮した斜面安定解析
- ③細粒分主体の現場
  - ・一面せん断試験結果等を用いた斜面安定解析
- ④土砂分、がれき主体の現場
  - ・従来用いられてきた土質力学に基づく解析方法で対応可能

【「本文3. 4 斜面安定性解析結果と斜面安定性評価法について」参照】

##### ①大型がれき、角材等の粗大物主体の現場

大型廃棄物の積み上げによる堆積現場であり大規模になりにくいことと、複雑な積み上げ構造であり解析が非常に難しいことから、安息角試験を主体とした現場評価で対応する。

粗大物主体の現場の場合、主に斜面を安定させている構造骨格材（粗大物）と構造骨格材の間に入って構造骨格材を支える細粒分で構成されるケースが多い。このため、可能ならば骨格をなす粗大物を含めて安息角試験を行うことが望ましい。ただし、バックホウのバケットで持ち上げることのできない角材等がある場合は、持ち上げられるものだけで安息角を計測して現地の堆積勾配のうち崩れが生じている部分と比較して停止安息角を推定する方法や、可能ならば粗大物等の堆積部をバックホウのバケットで鉛直下方に押しして小規模な崩壊を生じさせて停止安息角を計測する方法がある。

また、降雨時には表面細粒分の流下に伴って斜面表面から粗大物が落下する危険があるため、現地調査により骨格構造や雨水による細粒分流出の可能性について調べることも重要である。

##### ②紐状物、シート状物（繊維状物等）混入多の現場

###### a)引張抵抗を考慮した解析

不法投棄等現場で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）を採用する解析法が取られてきたが、堆積廃棄物層が急傾斜で安定していることを、従来の解析法では説明できない。本研究では繊維状物等を含む廃棄物層は従来の円弧すべり解析で用いられる内部摩擦角( $\phi$ )、粘着力( $c$ )の他に引張抵抗を有することを示した。従って、紐状物、シート状物が多量に混入している現場についての斜面安定解析には、この引張抵抗を考慮する必要がある。

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)<sup>1)</sup>が(1)式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が、これは本研究で実施した引張試験結果と合致している。

$$T = \frac{G \cdot \tan \phi + c \cdot b + G \cdot \tan \zeta \cdot \sin(1.5\theta)}{\mu \cdot \sin \theta \cdot \tan \phi + \cos \theta} \quad \dots \dots (1)式$$

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)、 $\mu$ ：安全率( $F_s$ )の逆数、

$b$ ：すべり面長(m)、 $\phi$ ：内部摩擦角( $^\circ$ )、 $c$ ：粘着力(kN/m<sup>2</sup>)、 $\theta$ ：すべり面の傾斜角( $^\circ$ )、 $\zeta$ ：引張抵抗角( $^\circ$ )

また、安定解析の方法としては、本研究やドイツ等での既往研究で、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、(1)式の極限平行式を用いた円弧すべり法等が基本となる。

なお、斜面崩壊は、(2)の崩壊パターンに示したとおり、下層土（原地盤）上のすべりや、弱い下層土部分でのすべりを考慮する必要があることから、紐状物、シート状物が多量に混入している現場についても、こうしたケースについても併せて解析する必要がある。また、この原地盤に沿ったすべりの場合、解析時のすべり面には、原地盤上の直線で与えることを考えるとよい。

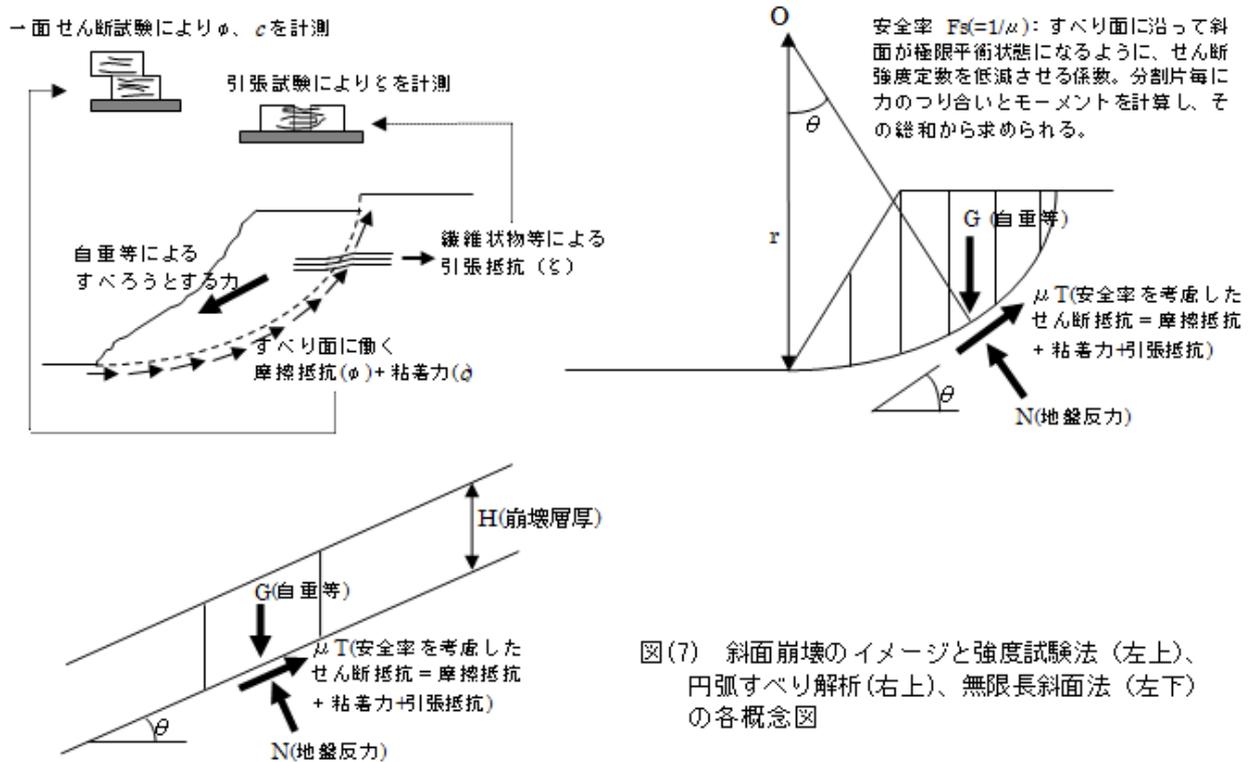
検討の初期段階で、斜面の安定性を概略的に知りたい場合には、次の無限長斜面法（斜面勾配 $\theta$ と崩壊

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、引張抵抗を考慮し不法投棄等地上盤では小さい粘着力(c)を無視した(2)式により、崩壊面を想定しなくても安全率(Fs)を簡単に求めることができる。

$$F_s = \frac{\tan \phi + \frac{\tan \zeta \cdot \sin(1.5\theta)}{\sin \theta \cdot \cos \theta}}{\tan \theta} \dots \dots \dots (2) \text{式}$$

ここに、Fs:安全率 Fs=1/μ この他の変数は(1)と同じ。

図(7)に、廃棄物層の斜面崩壊に対応した強度試験法及び解析法の概念図を示す。



図(7) 斜面崩壊のイメージと強度試験法(左上)、円弧すべり解析(右上)、無限長斜面法(左下)の各概念図

b)解析ケース

(常時の検討)

解析ケースについては、既往の崩壊事例で地震による崩壊はみあたらないことから、この段階では常時を基本に考えるとよい。また、逆解析で、どの程度の強度定数を持つ場合に斜面が安定するかを計算しておけば、詳細評価の実施の判断や詳細評価時の試験方法の選定のために役立つ。

(高水位時の検討)

廃棄物層の崩壊は、事例調査結果からも引張抵抗を考慮した斜面安定解析の試算結果からも、降雨等により廃棄物重量や廃棄物層内水位が高まったとき、谷地の不法投棄等現場で浸透水の作用を受けたときが、明らかに崩壊リスクが高い。

したがって、降雨時の水位の設定が重要になる。繊維状物等を含む廃棄物層は、透水性が極めて高いことから、下流側での通水阻害構造や中間覆土(灰分の投棄等を含む)等がなければ、廃棄物層内に地下水があることは考えにくい<sup>52)</sup>、プラスチック等の凹部での表面保水による重量増の影響は生じる。また、飽和状態近くまで水を含むようなことが生じる場合には、摩擦抵抗角等の強度定数が低下することもあり得る。

土砂分主体の現場等で、地下水が高いことが考えられる場合は、詳細評価で地下水調査を行う必要がある。概略評価時に概略的に地下水位を与える場合には、「道路土工—盛土工指針、(社)日本道路協会」<sup>53)</sup>が参考になる。

注) 不法投棄等の堆積期間が長期間になっている場合は、長期間の間に土等の細粒分が雨水とともに徐々に深部へ移行し、これにより、下層部では透水係数が小さくなり内部帯水が生じる可能性がある。

(地震時の検討)

繊維状物等を含む廃棄物層が地震で崩壊した事例は、本研究では確認していない。これは、繊維状物等が持つ引張抵抗が振動(長時間繰り返し振動も含む)に対して極めて有効に働いているためと考えられる。このため、地震時の解析ではこのような効果を考慮して行う必要があるが、現状では解析方法は確立していない。

現場近隣に住宅や重要構造物がある場合等、地震時を考慮する必要がある場合は、繊維状物等を含む廃棄物層では安全側の評価になると思われるが「道路土工—盛土工指針」<sup>53)</sup>に示された方法(震度法)で a) の引張抵抗を考慮して行う方法がある。

③細粒分主体の現場

篩下残渣等の細粒分主体の現場では、引張抵抗に寄与する繊維状物等は存在しないため、従来用いられてきた円弧すべり法により解析可能である。ただし、本研究で、細粒分主体の現場において数 cm 程度の木くずや廃プラスチック片であっても摩擦抵抗( $\phi$ )に寄与し、通常の盛土より大きな $\phi$ や安息角を得ていることから、解析にあたっては、現場での安息角試験の結果などにより(詳細評価では一面せん断試験の実施が望ましい)、適切な強度定数を与える必要がある。

②と同様に傾斜地盤上の投棄等の場合は、下層土(原地盤)上のすべりや、弱い下層土部分でのすべりについても考慮する必要がある。

④土砂分、がれき主体の現場

性状的に既往の土質力学で扱う土質の範囲にあり、従来用いられてきた土質力学に基づく解析法で対応できる。

<参考>概略評価で行う斜面安定解析で用いる強度定数について

概略評価段階では一面せん断試験や引張試験による強度定数が得られていないため、表(2)を参考にして、強度定数を概略的に与えて斜面安定解析を行うとよい。なお、土砂、がれき主体の現場では、現地の土質をふまえて「道路土工—盛土工指針」<sup>53)</sup>や「同一切土工・斜面安定工指針」<sup>56)</sup>を参考にして強度定数を定めるとよい。

表(2) 概略評価で行う斜面安定解析で用いる強度定数の参考値

現場分類		c(粘着力) (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (内部摩擦角) (°)	$\zeta$ (引張抵抗角) (°)	備考
紐状物、シート状物(繊維状物等)混入多の現場	締固め十分	0~5	安息角試験による停止安息角を用いる(目安値 40°)	10~15 (紐状状物等が少ない場合は 0~10) <sup>注3)</sup>	c 及び $\phi$ の目安値は本研究による一面せん断試験結果、 $\zeta$ は同引張試験結果による
	締固め不十分等 <sup>注2)</sup>	0~5	安息角試験による停止安息角を用いる(目安値 40°)	0~10	締固めが不十分な緩い堆積では繊維状物と細粒分が密着しておらず、概略評価段階では引張抵抗をあまり期待しない
細粒分主体の現場 (プラ、繊維分あり)		0~5	安息角試験による停止安息角を用いる(目安値 35°)	0	c 及び $\phi$ の目安値は本研究による一面せん断試験の結果による
土砂分、がれき主体の現場 (プラ等ほぼ無し)		礫および礫まじり砂 0 砂 0 砂質土 30 以下 粘性土 50 以下	礫および礫まじり砂 40°、砂 30°~35°、砂質土 25°、粘性土 15° (安息角試験によってもよい)	0	「道路土工—盛土工指針」 <sup>53)</sup> による値 (安息角計測結果もほぼ同様の値を示している)

注1) 上表の値は、安全側で概略評価を行うことを念頭に、低めの値を示している。本研究の実験結果では、繊維状物等を含む廃棄物で飽和状態近くなるとせん断強度が約 12%低下したが、上表の目安値はこの分も考慮して低めの値としている。 $\phi$  の値に停止安息角を用いるケースで、廃棄物層が飽和状態近くまでなりうるような現場の場合は、同様に停止安息角よりも低い値を用いた方がよい。

注2) 「締固め不十分」の目安の一つとして、斜面上法肩付近のキャスポール試験で得られるインパクト値の平均値が 4 以下の現場。

注3) 組成分析で線状物と面状物の重量割合  $dim1 + dim2 = 4\%$  の不法投棄等現場で $\zeta$ (引張抵抗角)=18°を得ている。線状物と面状物の割合が増えれば $\zeta$ が大きくなることが想定されるが、現状では組成と $\zeta$ との関係は見出せていない。このため、概略評価段階では、この結果を参考に安全側の値を設定する必要がある。

#### (4.6) 堆積廃棄物の斜面安定性の概略評価方法

堆積廃棄物の斜面安定性の概略評価は、次のとおりに行う。

- ①安息角による斜面勾配の評価
- ②斜面安定解析で得られた安全率による評価
- ③堆積状況や周辺環境等を考慮した総合評価（詳細評価の必要性の検討）

##### ①安息角による斜面勾配の評価

堆積廃棄物の斜面勾配の妥当性については、安息角試験で評価できる。停止安息角以下の斜面勾配であれば、特別な条件が無い限り、基本的に斜面整形の必要は生じない。

ただし、堆積高さが高く（20m程度が目安）崩壊による影響が大きい場合、廃棄物層への相当の雨水流入がある場合や、原地盤上や下層土でのすべりについては、②の斜面安定解析や③の総合評価（概略評価）の結果をふまえた詳細評価により評価する必要がある。

##### ②斜面安定解析で得られた安全率による評価

廃棄物層は、不均一性が大きいことから、円弧すべり法（すべり面を直線に仮定した場合を含む）等で得られる安全率の評価にあたっては、こうしたことを考慮する必要がある。参考として、次のとおりの安全率( $F_s$ )の評価方法を示す。

- ・  $F_s$ （常時、降雨時） $\geq 1.2$ <sup>注)</sup> のとき : 斜面が安定と判定
- ・  $F_s$ （常時、降雨時） $< 1.2$  のとき : 詳細評価の実施

注)「道路土工—盛土工指針」<sup>53)</sup>による盛土の長期間経過後（供用時）の許容安全率の目安値。廃棄物層は不均一性等の不確定要素が盛土よりも大きいと考えられるが、反面、廃棄物層の解析にあたっては密度やせん断強度がより大きい深層の強度定数を試験の難しさから与えることができない等のマイナス評価をしている部分もある。こうしたことと、実現場での解析結果【本文3.4参照】をふまえて、既往の土質力学に基づく評価を踏襲して参考値を示した。なお、地震時の検討を行う場合は、同指針で  $F_s = 1.0$  が斜面安定の目安値として示されている。

##### ③堆積状況や周辺環境等を考慮した総合評価（詳細評価の必要性の検討）

概略評価で斜面崩壊の危惧が残る現場については、詳細評価を行う必要が生じる。また、詳細評価の実施は、①②に加え、崩壊した場合の影響等も考慮して決める必要がある。

詳細評価の実施は、上記条件によって現場毎に決められるものであるが、本研究での現場実験や文献調査の結果からみると、判断の目安として次の事項のいずれかに該当する場合等が想定される。

- ・ 停止安息角を上回る斜面勾配
- ・ 斜面安定解析で得られた安全率  $F_s$ （常時、降雨時） $< 1.2$  となる現場
- ・ 崩壊した場合に周辺への影響が大きい現場  
(例：高さ 20m 程度以上の現場、住宅や、道路・河川等の公共インフラに近接した現場等)
- ・ 下層土（原地盤）が傾斜（概ね  $5^\circ$ 以上）している現場
- ・ 下層土が軟弱な現場（廃棄物地盤よりも原地盤のせん断強度が低い場合が多く注意が必要）
- ・ 非常にゆるい（締固めが不十分な）堆積現場  
(例：繊維状物等を含む現場の斜面上法肩付近でのキャスポル試験によるインパクト値の平均値が 4 以下となる現場)
- ・ 法肩に沿ったクラックが発生している現場  
(安全を確保できる範囲で、クラックから斜面側の廃棄物掘削、緩勾配化を図ることが優先)
- ・ 内部水位が高い現場、その他、過剰な荷重が加わることが想定される現場

(5) 詳細評価方法

(5.1) 詳細評価の基本事項

詳細評価は、概略評価の結果により、必要と判断される場合に行う。詳細評価は次の手順で行う。

- ①必要な調査・試験の選定
- ②現場調査・試験（測量、ボーリング調査、地下水調査、追加試験等）
- ③現場での強度試験（一面せん断試験等）
- ④採取試料を用いた室内での強度試験（引張試験等）
- ⑤引張抵抗を考慮した斜面安定解析
- ⑥全調査結果に基づく詳細評価

詳細評価で行う調査・試験の選定は、概略評価結果や現場状況に応じて定める必要がある。参考に、現場分類別に実施の検討が必要と考えられる調査・試験と現場調査等の留意事項を表(3)に示す。

表(3) 詳細評価で現場分類別に実施の検討が必要と考えられる調査・試験と留意事項等

現場分類	実施の検討が考えられる事項	備考
共通事項 (現場調査・試験)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・測量</li> <li>・追加試験</li> <li>・ボーリング調査</li> <li>・地下水調査</li> <li>(・非破壊調査)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・概略評価時に懸念された事項を念頭にして実施事項や試験の実施数を検討する</li> <li>・現場規模に応じ調査方法を選定する（詳細は、「支障除去のための不法投棄現場等現地調査マニュアル」参照）</li> <li>・非破壊調査（高密度表面波探査等）は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</li> </ul>
1) 大型がれき、角材等の粗大物主体	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大型がれき等による安息角試験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一般に解析が困難であるため、現場での評価を優先する</li> </ul>
2) 紐状物、シート状物（繊維状物等）混入多 (粗大物少)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現場一面せん断試験</li> <li>・現場土圧試験</li> <li>・試料サンプリング</li> <li>・室内引張試験</li> <li>・室内一面せん断試験</li> <li>・斜面安定解析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一面せん断試験は、本研究で有効性を確認</li> <li>・簡易に実施できる現場土圧試験もある</li> <li>・採取試料による引張試験により引張抵抗の把握が可能</li> <li>・現場での一面せん断試験が日程上の問題等から十分でなかったときには、室内試験も可能（現場と室内の結果に差があまりないことから）</li> <li>・現場試験は、法肩付近等の崩壊の危険性が高いと思われる場所で3,000m<sup>2</sup>に1箇所程度を目安に実施する 【試験・解析方法は、(5.2)～(5.5)に示す】</li> </ul>
3) 細粒分主体（プラ、繊維分あり）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上記、2)と同様。ただし、引張試験は不要</li> </ul>	
4) 土砂分、がれき主体（プラ等ほぼ無し）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・既往の土質力学に基づく道路等の調査・解析法による</li> </ul>	
下層土(原地盤)傾斜現場での検討事項	<ul style="list-style-type: none"> <li>・すべり面に対応した室内一面せん断試験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄物層と下層土の境界面を想定した一面せん断試験 【試験方法等は、(5.2)に示す】</li> <li>・下層土の強度試験（現場一面せん断試験等：既往土質力学に基づく方法で可）</li> </ul>

(5.2) 一面せん断試験の方法と試験結果の利用方法

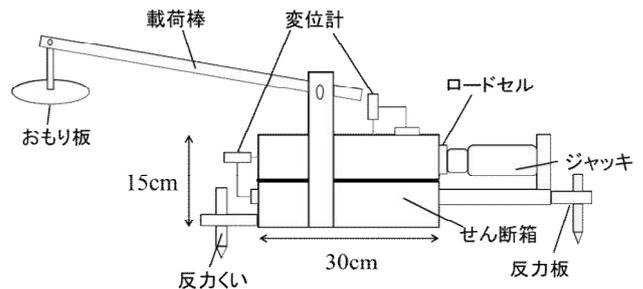
不法投棄等の堆積廃棄物の原位置強度を推定するために、一面せん断試験を実施する。

堆積廃棄物は、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、安定計算に用いる堆積廃棄物の強度定数は、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。この場合、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。

【「本文 3.2.3 一面せん断試験について」参照】

### ①一面せん断試験機

不法投棄等の堆積廃棄物について土質力学に基づく斜面安定性評価を行うためには、クーロンの破壊規準<sup>58)</sup>による強度定数 ( $\phi$ : 内部摩擦角,  $c$ : 粘着力) を求める必要がある。原位置では三軸圧縮試験が困難であり、室内試験では装置が大掛かりとなるため、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改良した一面せん断試験機を図(8)に示す。せん断箱の寸法は幅 30 cm, 奥行 30 cm, 高さ 15 cm である。

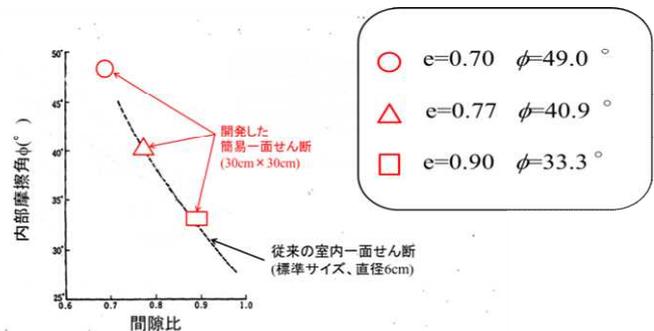


図(8) 開発した一面せん断試験機

### ②一面せん断試験の方法

堆積廃棄物の表面を平坦に整形し、せん断箱の大きさに合わせて4つの側面を切り取り、ブロックの供試体を作製する。このとき、プラスチックや木片などが含まれている場合は、グラインダーを用いて廃棄物を切断することにより供試体を成形することができる。

せん断はジャッキを用いて手動で行い、せん断スピードは 1mm / min とする。载荷棒により実荷重の 10 倍の载荷圧をかけることができ、その時、杭により下箱を固定することで反力をとる仕組みとなっている。反力杭はスクリー型となっており、長さ 22cm, 直径 2.5cm となる。これによって、様々なものが混在している廃棄物地盤でも容易に反力がとれる。上載圧については、20kg の重りで約 20 kN/m<sup>2</sup> 程度まで载荷可能である。



図(9) 室内試験結果との比較(豊浦砂)

せん断応力がピークを示さない場合は、せん断変位 35mm のせん断応力をせん断強度とする(JIS A 1216:2009 より)。上箱の先端にロードセルをつけてせん断応力を求め、せん断箱に変位計をつけてせん断変位を測る。それより粘着力  $c$  と摩擦抵抗角  $\phi$  を算定する。試験機の各部にベアリングをとりつけており摩擦を低減している。この試験機は現場で用いる上で便利のように、各部品をばらして、持ち運びができるようになっている。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、せん断箱を現場試験時と同様のものを使用し、室内試験を行うこともできる。この場合は、せん断はモーターを用いて自動で行い、せん断スピードは現場試験同様 1mm / min とし、上載圧はエアシリンダーにより载荷する。試験機の性能は、豊浦砂を用いた試験により確認され、図(9)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  $c$  を 0 とし、 $\phi$  のみを算定した結果を示している。

なお、堆積廃棄物の斜面崩壊では、谷地等の傾斜地上の堆積地で原地盤(下層土)のすべりが起こることがある。この場合は、堆積廃棄物と原地盤のせん断強度を評価する必要がある。一般に、異なる材料の境界面での摩擦特性は、弱い材料の強度に支配されることが知られている。一面せん断試験でこの境界のせん断強度を求めるためには、下箱に原地盤の土を詰め、上箱に堆積廃棄物を詰めて実験を行う。このような試験を行う場合、上載圧を作用させたときに、下箱に詰めた土が圧縮すると境界面がずれるため、土が圧縮しない程度に密に詰める必要がある。

### (5.3) 現場土圧試験の方法と試験結果の利用方法

堆積廃棄物の強度を求めるための試験として一面せん断試験があるが、廃棄物の種類によっては供試体の整形などに時間がかかる。また、対象地においても場所によって廃棄物の種類や組成が異なることがあるため、原位置強度を簡便に推定するための試験が求められている。

新たな試験法として現場土圧試験による現場強度の推定を行う。根入れ深さを変えて、3 箇所以上の受働土圧を測定することにより、強度定数の概算値を求めることができる。

【本文「3.2.4 現場土圧試験について」参照】

現場土圧試験は、長さ約 1m の鉄製の杭 (5~7 本) を 5cm 程度の間隔を開けてある深さまで打ち込み、それぞれの杭を結合させて受働土圧状態で地盤を破壊させるものである。様々な大きさの廃棄物が含まれる地盤では、杭の間隔が 5cm 程度でよいが、粒径が小さな砂質土のような地盤では杭の間隔を狭くする必要がある。また、人力で杭の上端を引いて地盤を破壊させるため、杭の深さは 20~30cm 程度が限度である。地盤を受働土圧状態で破壊させるときに、両端の杭には大きな摩擦が作用すると考えられるため、両端の杭を除いた、内側の杭の部分だけで土圧の合力を求める。根入れ深さを変えて、3 個以上の受働土圧を測定することにより、以下のように強度定数 (c と φ) の概算値を求めることができる。

①杭の傾斜を考慮しない場合の考え方 (ランキン土圧)

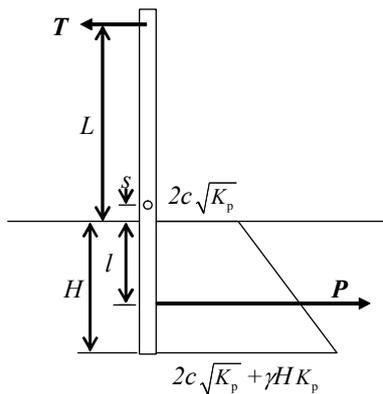
杭が傾斜せず、地盤の表面も水平である場合には、図(10)に示すランキン土圧の考え方を適用できる。

このときの受働土圧の合力 P と杭を倒すときの力 T のモーメントの釣合いは以下のように表わすことができる。

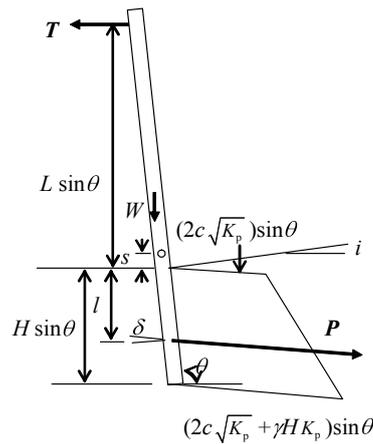
$$\frac{T L - s}{B H^2 \frac{2}{3} + \frac{s}{H}} = \frac{\frac{1}{2} + \frac{s}{H}}{\frac{2}{3} + \frac{s}{H}} \times 2c\sqrt{K_p} + \frac{1}{2}\gamma HK_p$$

$$\approx 0.8 \times 2c\sqrt{K_p} + \frac{1}{2}\gamma HK_p \quad \dots \dots \dots (3)式$$

- ここで、  
 H: 根入れ深さ(m)  
 L: 地表面から杭を引くときの力の作用点までの距離(m)  
 B: 土圧の有効幅(m)      s: 地表面から固定点までの距離(m)  
 γ: 土の単位体積重量(kN/m³)  
 K<sub>p</sub>: ランキンの受働土圧係数 (= (1 + sin φ) / (1 - sin φ))  
 c: 粘着力(kN/m²)      φ: 内部摩擦角(°)



図(10) 現場土圧試験による力の釣合い (杭が傾斜しない場合)



図(11) 現場土圧試験による力の釣合い (杭が傾斜する場合)

②杭と地表面の傾斜を考慮する場合の考え方 (クーロン土圧)

杭と地表面が傾斜する一般的な場合、図(11)に示すクーロン土圧の考え方を適用できる。このときの受働土圧の合力 P と杭を倒すときの力 T のモーメントの釣合いは次のように表わすことができる。

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

$$\approx 0.81 \times 2c\sqrt{K_p} + \frac{1}{2}\gamma HK_p \quad \dots \dots \dots (4)式$$

$$K_p = \frac{\sin^2(\theta + \phi)}{\sin^2 \theta \cdot \sin(\theta - \delta) \cdot \left\{ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi + i)}{\sin(\theta - \delta) \cdot \sin(\theta - i)}} \right\}^2} \quad \dots \dots \dots (5)式$$

- ここで、W: 杭の重量(kN)、 R: 杭の全長(m)、 θ: 杭の傾斜角(°)、 i: 地表面の傾斜角(°)、  
 δ: 壁面の摩擦角(°)

(4)式または(4)式の左辺は、杭を倒すときの力  $T$  および杭の長さなどの試験条件から求めることができる。この値を縦軸、根入れ深さ  $H$  を横軸に実験結果をプロットする。根入れ深さを変えて実験を行うことにより、グラフの直線を得ることができる。(3)式または(4)式より、この直線の切片は、 $0.81 \times 2c \sqrt{K_p}$ 、傾きは  $1/2 \gamma K_p$  となる。したがって、土の単位体積重量  $\gamma$  が分かると、 $K_p$  を求めることができる。さらに、この値を直線の切片の式に代入すると、粘着力  $c$  が求められる。杭の傾斜を考慮する場合は、(5)式で示されるクーロン土圧による受働土圧係数を用いることとする。

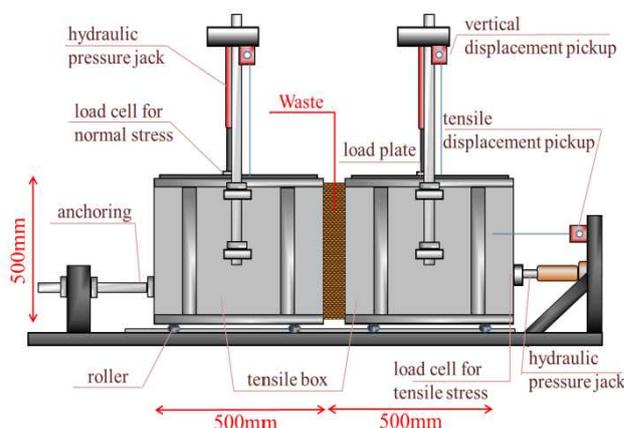
#### (5.4) 引張試験の方法と試験結果の利用方法

一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細長い材料の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。

堆積廃棄物の引張強さを評価するために、引張試験を行う。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。

【本文 3.2.5 引張試験について】参照】

プラスチック類の引張強度を求めるための引張試験機を図(12)に示す。この試験機は、ブラウンシュヴァイク工科大学の Koelsch (ケルシュ) により開発された試験機<sup>1)</sup>を参考に国内向けに小型化して作成したものである。引張箱は幅 50cm、奥行 50cm、高さ 50cm の箱を2つ連結させたものとなる。2つの箱ともに引張部分である連結側の面は解放されている。片方の箱をアンカーで固定し、もう片方の箱にジャッキをつけ、固定された箱と反対の方へ引っ張ることで試験を行う。



図(12) 引張試験機 (作成例)

一面せん断試験同様に、圧密過程と引張過程があり、圧密過程では沈下量が落ち着く、もしくは

20分程度を目安として圧密を打ち切ることとした。この時、載荷圧、沈下量、土圧を測定する。土圧は引張ジャッキ部分に取り付けたロードセルより測定する。引張過程では、引張スピードは一面せん断試験同様に 1mm/min とし、引張変位、引張応力、垂直変位を測定する。また、上載圧を3回以上変化させて試験を行い、引張強度の上載圧依存性を確認する。

#### (5.5) 斜面安定性評価方法

不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性の評価は、次のとおりに行う。

- ①安息角による斜面勾配の評価
- ②強度試験による強度定数を用いた斜面安定解析で得られた安全率による評価
- ③堆積状況や周辺環境等を考慮した総合評価

##### ①安息角による斜面勾配の評価

堆積廃棄物の斜面勾配については、安息角試験の結果を基本に評価する。停止安息角以下の斜面勾配であれば、締固めが不十分な現場、廃棄物層への相当の雨水流入がある場合、高含水物による埋立等の特別な条件が無い限り、基本的に斜面整形の必要は生じない。

ただし、原地盤上や下層土でのすべりについては②の斜面安定解析での評価が必要になる。

##### ②強度試験による強度定数を用いた斜面安定解析で得られた安全率による評価

一面せん断試験等の強度試験で得られた強度定数を用いて斜面安定解析を行う。斜面安定解析の方法は、(4.5)に示した。

荷重条件は、概略評価と同様に常時、降雨時の検討を中心に行う。

参考として、次のとおりに円弧すべり法（すべり面を直線に仮定した場合を含む）で得られる安全率(Fs)の評価方法を示す。

- Fs（常時、降雨時） $\geq 1.2$  <sup>注)</sup> のとき : 斜面が安定と判定
  - Fs（常時、降雨時） $< 1.2$  のとき : 排水対策、廃棄物除去・緩勾配化等の対策検討
- 注)「道路土工—盛土工指針」<sup>53)</sup>による盛土の長期間経過後（供用時）の許容安全率の目安値。地震時の検討を行う場合は、同指針で Fs=1.0 が斜面安定の目安値として示されている。

### ③堆積状況や周辺環境等を考慮した総合評価

①②の評価の他、斜面崩壊した場合の影響、景観上の問題等、現場特性や周辺環境上から発生する問題等を総合的に勘案して、排水対策や廃棄物除去・緩勾配化等の対策の必要性について評価する。

#### (参考) 整形断面について

停止安息角を上回る急傾斜部で斜面安定対策として想定する参考的な整形断面を図(13)に示す。

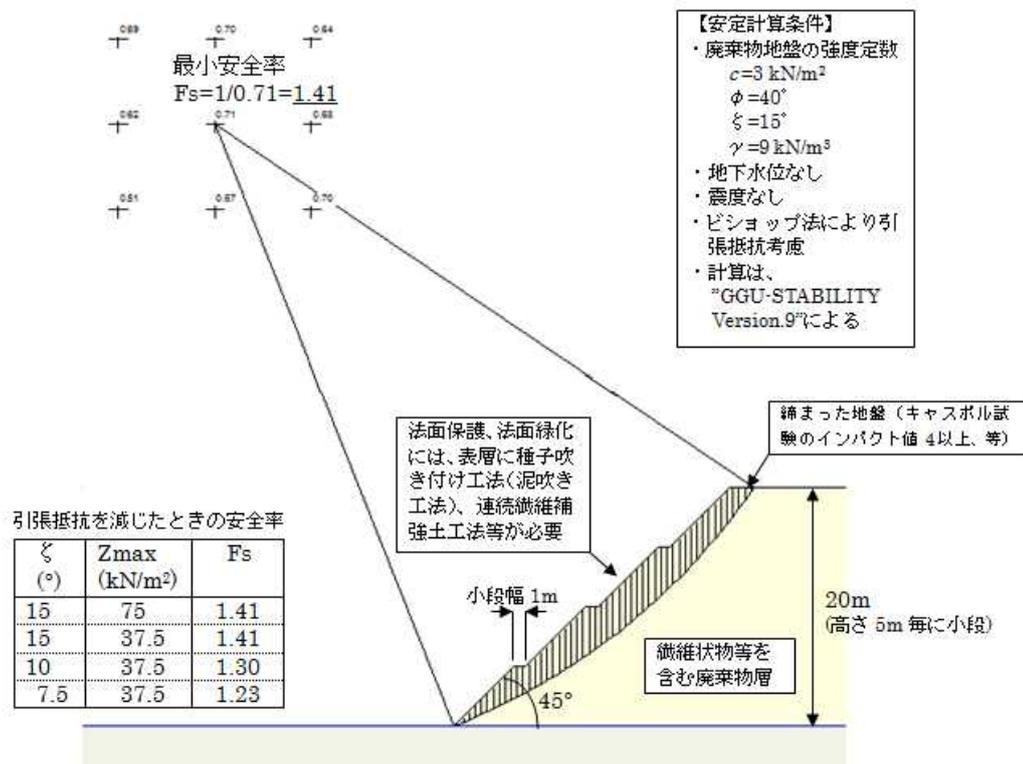
図(13)は、大規模な不法投棄等が多く、挙動が盛土と異なる繊維状物等を含む（紐状物、シート状物の混入が多い）現場での参考整形断面である。

本研究での現場実験で、繊維状物等を含む国内3現場で計測した停止安息角はいずれも45°を上回っていることから、斜面勾配は45°とした。高さは20mと仮定し、5m毎に幅1mの小段を設けたケースで、表(2)に示した強度定数の参考値（ $c=3\text{ kN/m}^2$ ,  $\phi=40^\circ$ ,  $\xi=15^\circ$ ）を用いて引張抵抗を考慮した円弧すべり法による安定計算を行い、十分な安全率が得られている。

45°勾配のため飛散防止や緑化のための覆土を同勾配で施すことは不可能であり、この勾配では緑化のためには種子吹付け工法（土砂分を含んだ泥吹き工法）、補強土工法（連続繊維補強土工法等）、グリッド（プラスチック製柵）を利用した緑化工法等が必要となる。

なお、小段の設定方法は、「道路土工—盛土工指針」<sup>53)</sup>が参考になる。ただし、45°勾配では重機の斜面内への搬入が難しくなるため、廃棄物の搬出作業等の管理が必要になる場合には、重機走行が可能な小段幅（2.5m程度）が必要になる。

施工にあたっては、締固めの徹底が不可欠であり、とくに斜面表面近傍（法肩等）の締固めは表層崩壊防止のために重要である。



図(13) 繊維状物等を含む不法投棄等現場での整形断面参考図  
 (景観上の問題がある場合等で45°勾配が難しいときは、現場特性に応じて法勾配を設定する)

## (備考) 長期間堆積させる場合の留意事項

### ①プラスチック等の強度劣化

廃棄物層に働く引張抵抗は、プラスチック等に起因しているため、長期的にはプラスチック等の劣化とともに低下することが考えられる。現状では、廃棄物層の長期強度劣化を定量的に示すことは困難であるが、参考のため、図(13)に引張抵抗( $\zeta$ 、 $Z_{max}$ )を低下させたときの安全率を示した。

廃棄物層内では長期間にわたり内部温度が $50^{\circ}\text{C}$ 程度あることも珍しくはなく、熱によるプラスチックの劣化が考えられる。プラスチックの熱による強度劣化を調べる方法として、投棄されているプラスチックの種類や形態毎に高温下での劣化実験を行って廃棄物層内部温度での熱劣化を外挿式(アレニウス・プロット)により予測する方法があるが、投棄物が雑多な不法投棄等現場ではこの方法は多大な労力を要し現実的には難しい。

プラスチックはその種類が多く、例えば温度 $50^{\circ}\text{C}$ で強度が半減する時間として、10時間~100年程度の幅を図示している文献<sup>59)</sup>もある。この範囲で考えると、不法投棄等現場でも10年~数十年後にプラスチックの平均的な強度が半減する可能性はある。

プラスチックの強度が半減した場合、引張抵抗に関係したパラメータである $\zeta$ (引張抵抗角)、 $Z_{max}$ (最大引張強度)が半減することが考えられる。実際に半減すると、安全率は、図(13)では、1.41から1.23に低下する。

また、プラスチックの化学的劣化速度は、経験則として、温度が $10^{\circ}\text{C}$ 上昇するごとに2倍になると言われており、廃棄物層の内部温度が高温になっている場合は特に留意が必要となる。実際に、海外での崩壊事例では、火災発生地点を起点とした崩壊が発生している【本文3.1.2図3.1.1の事例】。

不法投棄等現場では、廃棄物種類の多様性の他、内部温度の変化や継続性、降雨による加水分解劣化等、不確定要素が多い。また、都市固形ごみでは埋立後の時間経過による有機物分解等によって引張抵抗は減少するが逆に摩擦抵抗は増加するとの文献<sup>2)</sup>もあり、事前に長期的な強度変化を予測するのは現状では難しい。

したがって、堆積が長期間に及ぶ場合は、5年に1回程度、安息角試験を実施するなどの、継続的な強度把握が必要となる。

### ②細粒分の深部への移行による影響

廃棄物層内に雨水浸透がある場合は、長期間の間に土等の細粒分が雨水とともに徐々に深部へ移行し、これにより、上層部での摩擦抵抗の低減や、下層部での透水係数低減による内部帯水、間隙水圧の発生の可能性がある。これらの定量的な解析や評価は現状では難しく、長期間堆積させる場合には、①と同様、一定期間毎の安息角試験の実施等、継続的な現場の確認や調査が必要となる。

## 5. 参考文献

参考文献を報告書本文の目次順に示す。複数の項で引用している文献は、以下には初出の項にのみ記載しているが、本文中には引用箇所での都度、以下の文献番号を右肩に示している。

### 3.1.1 国内外の既存研究文献

- 1) Florian Koelsch : Toolkit Landfill Technology, Chapter 4.6, Static Stability of Landfills, German Geotechnical Society(DGGT) , July,2009
- 2) Florian Koelsch : SHEAR STRENGTH OF WASTE, Third international workshop “Hydro-Physico-Mechanics of Landfills” Braunschweig, Germany; 10-13 March 2009
- 3) F. Koelsch : MATERIAL VALUES FOR SOME MECHANICAL PROPERTIES OF DOMESTIC WASTE, SARDINIA 95 SITING,LINING DRAINAGE & LANDFILL MECHANICS
- 4) 山内一生、長野修治： 廃棄物掘削勾配に関する報告、廃棄物学会研究発表会講演論文集 15th(2004 年)
- 5) 東畑郁生、鶴野雅明、河野有司、亀田真加、喜多佑介、米内祐史： 一般廃棄物の力学的性質に関する研究、土木学会論文集 C vol.66(2010),No.3 pp.631-644
- 6) 東畑郁生、鶴野雅明： Laboratory Test on Creep and Shear Behavior of Municipal Solid Waste and Mitigation of Its Long-Term Subsidence, GeoCongress 2008: geotechnics of waste management and remediation
- 7) 東畑郁生、喜多祐介、伊藤竹史： 大型三軸試験による一般廃棄物地盤の力学特性の研究、2004 年 7 月 (第 39 回地盤工学研究発表会)
- 8) THONGTHAMCHART Chinoros, 竹村次郎、ISARORANIT Rattatam : Geotechnical Assessment of Slope Stability,Sai Noi Landfill,Thailand by KUSlope, 2006 Japan Society for the Promotion of Science, Core University Program
- 9) Mylene Palaypayon, 太田秀樹： Estimation of Shear Strength Parameters of Municipal Solid Waste in Landfills, 2006 Japan Society for the Promotion of Science, Core University Program
- 10) Dimitrios Zekkos, George A.athanasopoulos, Jonathan D.Bray, Athena Grizi, Andreas Theodoratos : Large-scale direct shear testing of municipal solid waste, Waste Management 30(2010)1544-1555
- 11) Jonathan D.Bray, Dimitrios Zekkos,Edward Kavazanjian Jr.,George A.Athanasopoulos, Micheal F. Riemer : Shear Strength of Municipal Solid Waste, JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, ASCE,JUNE 2009
- 12) Zekkos, D. , Bray, J. D. ,Stokoe,K. , Kavazanjian,E. ,Rathje,E., A.athanasopoulos, G. A. ,Riemer,M. , Matasovic,N. , Lee,J.J. , Seos,B. : Recent Findings on the Static and Dynamic Properties of Municipal Solid Waste, GeoCongress 2008: Geotechnics of Waste Management and Remediation
- 13) Nejan Huvaj-Sarihan, Timothy D. Stark : BACK-ANALYSES OF LANDFILL SLOPE FAILURES、6<sup>th</sup> International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, August 11-16, 2008
- 14) Richard Thiel, Monte Christie : Leachate Recirculation And Potential Concerns on Landfill Stability, Proceedings of the 19<sup>th</sup> Annual GRI Conference (presented at the NAGS 2005)
- 15) Gordon P. Boutwell : SLIDE HAPPEN -LANDFILL STABILITY ANALYSIS, CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY, APRIL 20, 2004 (THE 2002 ALEKSANDAR VESIC MEMORIAL LECTURE)
- 16) Robert m. koerner, Te-yang soong : Stability Assessment of Ten Large Landfill Failures, Geotechnical special publication no.103 (2000)
- 17) Neil Dixon (Loughborough University, UK), D.Russell V. Jones G.J. Fowmes : Interface shear strength variability and its use in reliability-based landfill stability analysis, Geosynthetics International,2006, 13, No.1
- 18) Neil Dixon (Loughborough University, UK), D.Russell V. Jones (Golder Associates ,UK) Ltd : Engineering properties of municipal solid waste, Geotextiles and Geomembranes volume23,Issue 3, June 2005
- 19) A. Sia, N. Dixon : A Probabilistic Analysis of Landfill Stability, <http://www.infogeos.com/>
- 20) G.L. Sivakumar Babu (Indian Institute of Science), Krishna R. Reddy Sandeep K. Chouksey : Constitutive model for municipal solid waste incorporating mechanical creep and biodegradation-induced compression, Waste Management 30(2010)
- 21) Claudio Fernand Mahler (University of Rio de Janeiro RJ Brazil), Ademaro De Lamare Neto : Effect of fibre on shear strength of residue from mechanical-biological pretreatment of waste, International Journal of Environment and Waste Management 2006-vol.1
- 22) Yunmin Chen, Tony L. Zhan, Wei-an Ling (浙江大学・中華人民共和国) : Mechanical properties of municipal solid waste from Suzhou landfill in china, GeoCongress 2008:Geotechnics of Waste Management and Remediation
- 23) 公益社団法人地盤工学会： 地山補強土工法 設計・施工マニュアル, 2011 年 8 月
- 24) 財団法人土木研究センター： ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル 改訂版, 平成 12 年 2 月
- 25) 財団法人土木研究センター： 法面保護用連続繊維補強土「ジオファイバー工法」設計・施工マニュアル, 平成 21 年 4 月
- 26) 北村佳則ら： あるローム盛土の原位置一面せん断試験とその強度の評価に関する研究, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 平成 17 年 9 月

### 3.1.2 斜面崩壊事例の整理結果

- 27) G.E.BLIGHT & A.B.FOURIE : A REVIEW OF CATASTROPHIC FLOW FAILURES OF DEPOSITS OF MINE WASTE AND MUNICIPAL REFUSE
- 28) Robert M. Koerner, Te-Yang Soong : Stability Assessment of Ten Large Landfill Failures

- 29) Nejan Huvaj-Sarihan, Timothy D. Stark : BACK-ANALYSES OF LANDFILL SLOPE FAILURES, 6<sup>th</sup> International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, August 11-16, 2008
- 30) F.Koelsch, K.Fricke, C.Mahler, E.Damanhuri : STABILITY OF LANDFILLS – THE BANDUNG DUMPSITE DESASTER
- 31) F.Koelsch, K.Fricke : COMMUNITY BASED LANDFILL MONITORING
- 32) Florian Koelsch, Gunnar Ziehmann : Landfill stability, May-June 2004 WASTE MANAGEMENT WORLD
- 33) Dr.Koelsch : HOMEPAGE (<http://www.dr-koelsch.de/>)
- 34) Jan Bauer, Florian Koelsch, Andre V.A.Borgatto : STABILITY ANALYSIS ACCORDING TO DIFFERENT SHEAR STRENGTH CONCEPTS EXEMPLIFIED BY TWO CASE STUDIES
- 35) Edward Kavazanjian : The Indispensable Role of Case Histories in Landfill Engineering
- 36) Edward Kavazanjian, Scott M.Merry : The 10 July 2000 Payatas Landfill Failure, Sardina '05-10<sup>th</sup> Waste Management and Landfilling Symposium
- 37) David M.Hendron, P.E : Large Landslide Risk in Solid Waste Facilities... Geotechnical Fundamentals Count (Geo-Strata)
- 38) James K.Mitchell, Raymond B.Seed, H.Bolton Seed : KETTLEMAN HILLS WASTE LANDFILL SLOPE FAILIRE. I: LINER-SYSTEM PROPERTIES, Journal of Geotechnical Engineering , Vol.116 No.4, April, 1990
- 39) Malaya News, August 19, 2009 PHILIPPINES : 'Operator to blame for Rizal landfill collapse'
- 40) Manila Bulletin Websites and Publications, August 5, 2009 : 'DNER bares findings on landfill collapse'
- 41) The Philippine Star, August 19, 2009: 'Katherine Adraneda , Mismanagement, faulty design blamed for landfill wall collapse'
- 42) Melanie A.Lasoff : Death Toll Rises in Manila Garbage Dump Collapse, Waste Age , August 1, 2000
3. 2. 1 安息角試験について
- 43) 松倉公憲, 恩田裕一 : 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, pp27~35, 1989
3. 2. 2 衝撃加速度試験 (キヤスポル) について
- 44) 近畿地方建設局近畿技術事務所 : 簡易支持力測定器による試験方法, 1996年5月
- 45) 近畿地方整備局近畿技術事務所 : 簡易支持力測定器 (キヤスポル) 利用手引き, 2005年6月
3. 2. 6 基礎実験結果について
- 46) 社団法人地盤工学会 : 地盤材料試験の方法と解説, 2009年11月
3. 2. 7 試料サンプリング方法について
- 47) 社団法人地盤工学会 : 地盤調査の方法と解説, 2004年6月
- 48) 株式会社藤井基礎設計事務所, 姉川学利ら : 室内大型一面せん断試験の実施事例, 全地連「技術 e-フォーラム 2002」よなご
3. 4 斜面安定解析結果と斜面安定評価法について
- 49) Florian Koelsch : MITTEILUNGEN Heft 133/1996 –ISSN 0343-1223-
- 50) 社団法人地盤工学会 : 斜面の安定・変形解析入門, 2006年8月
- 51) 榎明潔 : 摩擦体としての土における安定と変形の解析法, 2007年12月
- 52) Civilserve GmbH, Steinfeld : GGU-STABILITY VERSION9 User Manual, June 2010
- 53) 社団法人日本道路協会 : 道路土工—盛土工指針, 2010年4月
- [巻末資料] 不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)
- 54) 財団法人産業廃棄物処理事業振興財団 : 支障除去のための不法投棄現場等現地調査マニュアル, 2006年12月
- 55) 財団法人産業廃棄物処理事業振興財団 : 不法投棄及び不適正処理現場の対策と技術, 2010年4月
- 56) 社団法人日本道路協会 : 道路土工—一切土工・斜面安定工指針, 2009年6月
- 57) 社団法人日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 I 共通編 IV 下部構造編, 2012年3月
- 58) 社団法人地盤工学会 : 地盤工学用語辞典, 2006年3月
- 59) 大石不二夫 : 電気用プラスチックの劣化, プラスチックス, 24(2)
- 60) 本間精一 : 設計者のためのプラスチックの強度特性, 2011年4月

## 6. 研究発表

### (1) 論文発表

- ①平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会 (2011 年 3 月、北九州)  
「原位置一面せん断試験機による廃棄物地盤の強度特性の評価」
- ②産廃振興財団 NEWS (2011 年 8 月)  
「不法投棄現場等堆積廃棄物の斜面安定性評価に関する研究 (中間報告)」
- ③第 9 回環境地盤工学シンポジウム (2011 年 10 月、京都)  
「原位置一面せん断試験機を用いた堆積廃棄物のせん断強度特性」
- ④第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2011 年 11 月、東京)  
「国内の不法投棄等廃棄物の一面せん断試験によるせん断強度特性」
- ⑤平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会 (2012 年 3 月、鹿児島)  
「国内不法投棄廃棄物を用いた堆積構造から考察する堆積廃棄物のせん断強度特性」
- ⑥XII International Symposium on Environmental Geotechnology, Energy and Global Sustainable Development (Los Angeles, CA, June 27-29, 2012)  
“Shear property of solid waste materials by in-situ direct shear test”
- ⑦産廃振興財団 NEWS (2012 年 8 月)  
「不法投棄現場等堆積廃棄物の斜面安定性評価に関する研究 (平成 23 年度末報告)」
- ⑧平成 24 年度土木学会全国大会第 67 回年次学術会議 (2012 年 9 月、名古屋)  
「組成の異なる不法投棄堆積廃棄物の現場一面せん断強度特性の比較」
- ⑨同「帯状及び紐状廃棄物を含む廃棄物埋立地盤のごみ圧分布に関する基礎研究」
- ⑩第 23 回廃棄物資源循環学会研究発表会(2012 年 10 月、仙台)  
「不法投棄等現場の廃棄物を用いた安息角試験による簡易法面安定評価手法」
- ⑪同「廃棄物埋立地盤中に含まれる繊維状廃棄物の応力伝達に関する基礎的実験」
- ⑫第 57 回地盤工学シンポジウム(2012 年 11 月、東京)  
「プラスチック類の補強効果を考慮した堆積廃棄物の強度評価法の提案」
- ⑬平成 24 年度土木学会西部支部研究発表会 (2013 年 3 月、熊本)  
「大型引張試験による堆積廃棄物の引張強度特性」
- ⑭同「廃棄物埋立地盤における紐状廃棄物の補強メカニズムに関する基礎研究」

### (2) 研究成果についての講演

- ①NPO 法人廃棄物地盤工学研究会 第 23 回会員向け勉強会 (2012 年 12 月 15 日、福岡市)  
演題：「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価について」
- ②平成 24 年度産業廃棄物処理等技術研修会 (岡山県等開催、2013 年 2 月 14 日、岡山市)  
演題：「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価に関する研究」

## 7. 知的財産権の取得状況

なし

## 研究説明図（不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価）

研究期間 平成 22 年 4 月 1 日～平成 25 年 3 月 31 日  
 代表研究者 山脇敦(公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団)

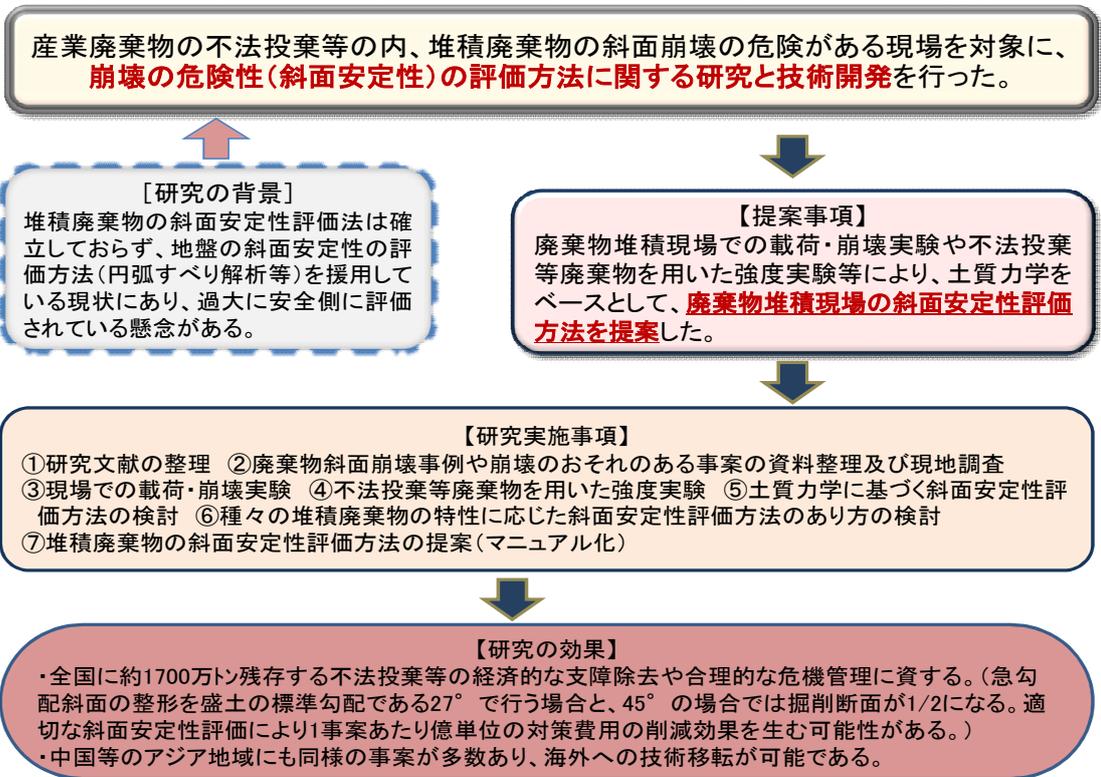


図 1 研究の背景と提案事項、研究実施事項、研究の効果



図 2 実施した载荷実験



図 3 実施した崩壊実験

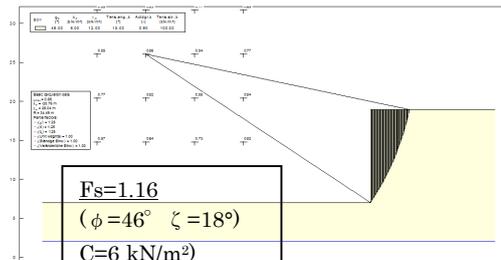


図 4 引張抵抗を考慮した安定解析

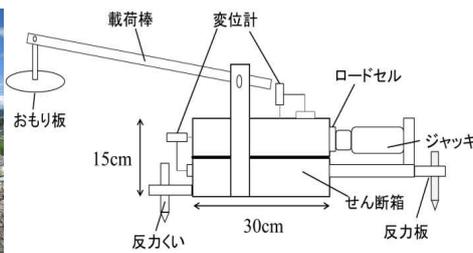


図 5 「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」に示した主な試験法  
 (左: 安息角試験 中: 作成した現場一面せん断試験機 右: 衝撃加速度試験)

## 英語概要

- ・ 研究課題名 =

Assessment of Slope Stability of Deposited Solid Waste at Sites of Illegal Dump and Other Inappropriate Disposal

- ・ 研究代表者名及び所属 =

Atsushi Yamawaki : Japan Industrial Waste Management Foundation

- ・ 共同研究者名及び所属 =

Takayuki Shimaoka : Kyushu University, Takeshi Katsumi : Kyoto University,  
Kiyoshi Omine : Kyushu University, Mikio Kawasaki : Center for Environmental Science in Saitama,  
Yoichi Doi : The Landfill Systems and Technologies Research Association of Japan an NPO,  
Chai Xiaoli : Tongji University, Seiji Kawai : Kyushu University, Shinya Sakaguchi : Maeda Corporation

- ・ 要旨 =

The present research is a three-year project to investigate and develop methods for assessment of slope failure risks of deposits of industrial solid waste that have been formed as a result of illegal dumping or other inappropriate treatment/disposal and are threatened to suffer slope failure.

There are no established methods to assess slope stability of solid waste deposits; in practice, methods based on soil mechanics (for example, circular slip surface analysis) are applied. This research aims to understand, based on soil mechanic science, slope stability of solid waste deposit. More specifically, proposals will be made eventually with regard to soil mechanic constants of waste deposits where conventional soil mechanic approach is applicable and any new such constants and slope stability assessment methods where addition of any conditions inherent to solid waste is found necessary.

During fiscal 2009-2012, a direct shear test, an angle of repose test, a tension test and other tests was conducted in the 9 dumping sites in Japan and overseas.

Based on findings, slope stability properties of deposited solid waste were arranged. And the assessment methods of slope stability of illegal dump and other inappropriate disposal was proposed. The assessment methods include tests methods such as a direct shear test, an angle of repose test, a tension test and other tests.

- ・ キーワード =

slope stability, solid waste, illegal dump, soil mechanics, direct shear test , repose angle