

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結果

はじめに

本研究は、産業廃棄物不法投棄等のうち堆積廃棄物の斜面崩壊の危険がある現場を対象に、評価方法が確立していない堆積廃棄物の斜面安定性評価方法について、研究・開発したものです。平成22年度～24年度に行った研究の結果を報告します(平成22年度の中間報告を産廃振興財団NEWS No.63に、平成23年度の中間報告を同No.67に掲載しています)。

1. 研究メンバー

山脇 敦(代表研究者;財団)、島岡 隆行(九州大学)、勝見 武(京都大学)、大嶺 聖(九州大学)、川嵯 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(中国・同済大学)、川井晴至(九州大学)、

坂口 伸也(前田建設工業(株)、平成22年度は同・小原孝之)

2. 実施した実験・試験と目的

国内7、海外2の計9現場で表1に示す実験・試験と採取試料による室内実験を行いました。これらのうち、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、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す。

3. 現場での载荷・崩壊実験結果

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解析

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
载荷・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箇所を実施)
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(キャスボル)	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)



写真1 載荷実験(斜面高9m、勾配63.5°、載荷重8.6kN/m²)



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)

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、載荷実験を行いました。載荷後、斜面の両側面及び背面を掘削し、背面から10m³の注水、背面からのバックホウによるプッシュを行いましたが、斜面の崩壊はもとより変位も生じませんでした。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がわかりました。

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ました。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ました。このとき廃棄物層の崩壊部に働いた引張応力は34

kN/m²で、室内引張試験で堆積厚5m相当の垂直荷重で得られた引張応力を上回っています。崩壊は、通常の土のように鉛直方向ではなく、40°の角度で流れ落ちるように崩壊しました。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い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ました。

4. 不法投棄等廃棄物を用いた強度実験等の結果

①実験結果について

表2に主な強度実験の結果を示します。

一連の実験により国内の産業廃棄物不法投棄等

表2 主な強度実験結果

現場名	現場種類	廃棄物種類	一面せん断試験結果		停止安息角(°)	現場法面勾配(°)
			φ(°)	c(kN/m ²)		
関東①	不法投棄等現場	繊維状物等	46	3	50	40~62、90(表層崩壊)
中部①	不法投棄等現場	繊維状物等	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	(47)	(3)	45	24~25
九州	不法投棄等現場	土砂分主体	45	3	44	30~42
関東②	不法投棄等現場(産廃管理型処分場)	土砂分主体	—	70以上	(35)	30(当初計画勾配で埋立)
関西	一般廃棄物処分場(斜面崩壊発生地)	土砂分主体	—	—	36	40(崩壊場所の勾配)
東北	震災廃棄物仮置場	篩い下残渣	47	11	40	38~42
中国・上海	都市ごみ埋立地	繊維状物等	33~43	6~4	(45)	42~53
ジャカルタ	都市ごみ埋立地	繊維状物等(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、本研究で定めた試験法によらない、廃棄物の積み上げ勾配。

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ました。内部摩擦角(ϕ)や停止安息角(盛りこぼしを含む角度)は、砂がおおよそ 30° 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° 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ます。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ます。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します。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に急勾配で安定することに大きく寄与しています。

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ました。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、このことが廃棄物層の大規模崩壊がわが国ではほとんど無く、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ます。実際に、東南アジア等では、写真2のようなイメージで廃棄物層内で

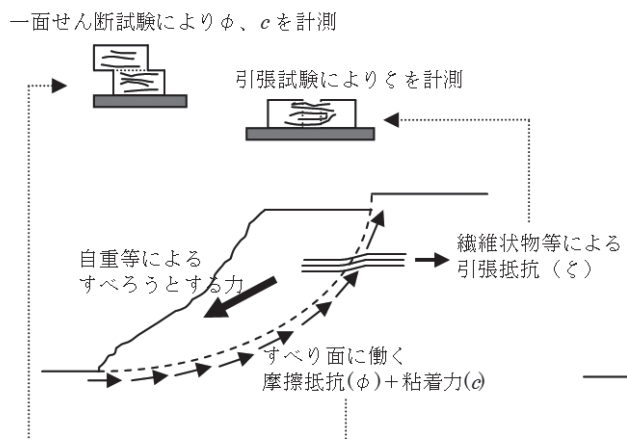


図1 繊維状物等を含む現場での斜面崩壊モデル

比較的緩勾配での崩壊が生じています。

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 と安息角試験で得られた停止安息角は、各現場でほぼ同じ値をとりました。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した。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ました。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(重機による載荷実験)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ました。キャスポール試験は、現場内の部分的な強度の高低や締め固めが不十分な場所の特定が可能であることが推察されました。提案した主な試験法を図2に示します。

5. 堆積廃棄物の斜面安定性の解析・評価方法

ケルシュ(ドイツ)による引張抵抗を考慮した(1)式で円弧すべり法による斜面安定解析を行うことにより、例えば、関東①現場(計算結果を図3に示す)で堆積廃棄物層が 90° の直壁で安定していることが計算上で説明できます。他の8現場の解析結果でも現場の状況を良く表しており、不法投棄等現場に適用できることを確認しました。また、わが国の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ました。

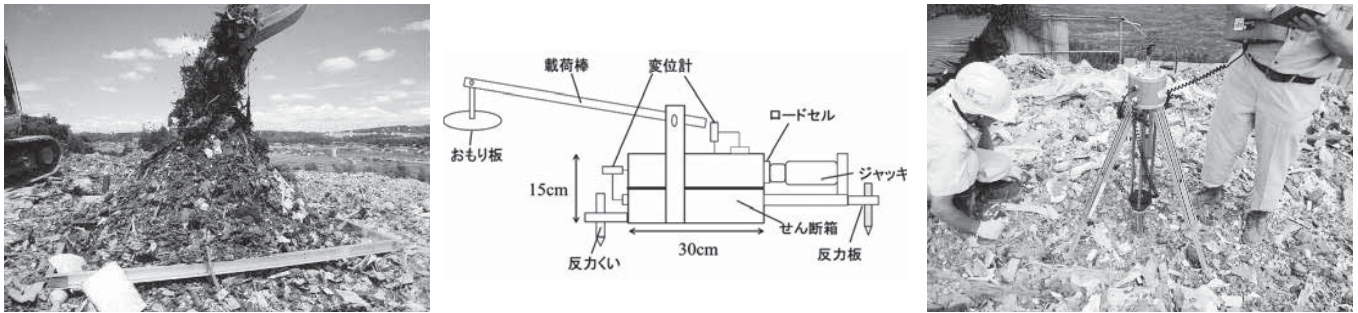


図2 「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」に示した主な試験法
 (左：新たに提案した安息角試験 中：作成した現場一面せん断試験機 右：衝撃加速度試験)

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

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

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

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を示しています。同マニュアル案での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に示します。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ります。

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)」を提示しました。マニュアル案には、行

7. 今後の研究課題

繊維状物等を含む廃棄物層は、東日本大震災でも崩壊事例が報告されていないことや、海外でも地震による崩壊事例がみあたりません。このため、

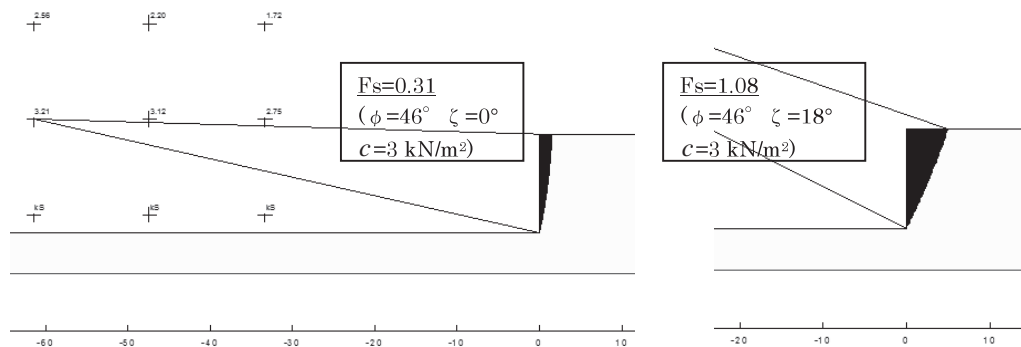


図3 円弧すべり解析による斜面安定解析結果(関東①現場)
 左図：従来解析法(引張抵抗なし) 右図：引張抵抗考慮 (計算は、GGU-STABILITY VERSION9による)

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 ²)	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 ^{注1)}	10~15 (0~10) ^{注2)}
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)	引張抵抗を考慮しない廃棄物層の安定評価	0~5	35 ^{注1)}	—
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、締め固め不十分等の場合。

【安定計算結果】
 最小安全率Fs=1.41
 ((2)式によるFs=1.44)
 【安定計算条件】
 ・廃棄物地盤の強度定数
 c=3kN/m² φ=40°
 ζ=15° γ=9 kN/m³
 ・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”による

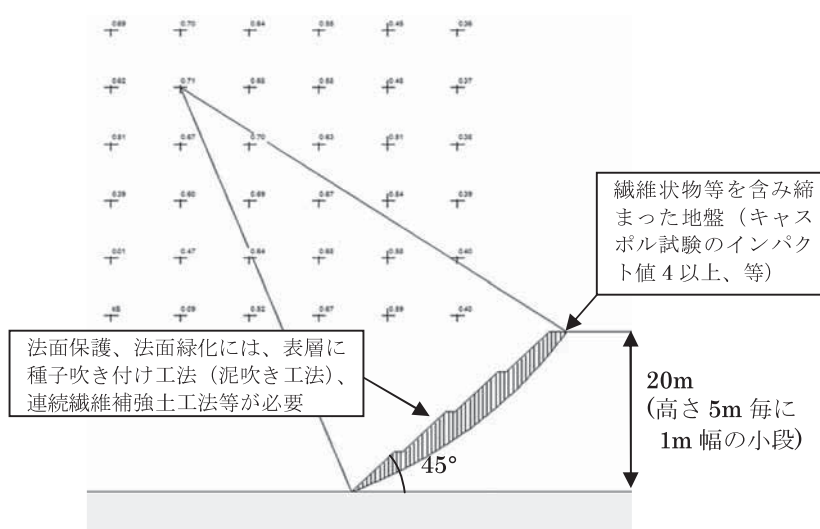


図4 繊維状物等を含む不法投棄等現場での整形断面参考図
 (景観上の問題がある場合等で45°勾配が難しいときは、現場特性に応じて法勾配を設定する)

本研究では、地震振動に対する廃棄物地盤挙動の検証は行っておらず、今後の研究課題です。また、廃棄物地盤中への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も今後の研究課題です。

おわりに

研究結果として提示した「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概略評価や、廃棄物地盤に対応した現地調査や安定解析の方法を示しており、行政による堆積廃棄物の斜面安定性の迅速な概略判断や、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ます。また、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したが、本研究により、平地での繊維状物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り、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ります。

さらに、繊維状物等を含む廃棄物地盤は、高いせん断強度特性を示すことから、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されます。

なお、「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)」は当財団HPに掲載予定です。また、同マニュアル(案)に解説編や参考資料を加えた「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価方法(大成出版社)」も発刊予定です。

[謝辞]

本研究は平成22年度「循環型社会形成推進科学研究補助金」(課題番号K22033)、平成23年度「環境研究総合推進費補助金」(課題番号K2304)、平成24年度「環境研究総合推進費補助金」(課題番号K2402)の支援を受けて行われた。

不法投棄等現場堆積廃棄物の 斜面安定性評価に関する研究 (中間報告)

本研究は、産業廃棄物不法投棄等現場(堆積廃棄物)の斜面安定性評価方法をマニュアル化することによって、都道府県等の方々に一層効率的に支障除去を行うためにお役立て頂くことを目的として研究を進めており、研究初年度の平成22年度は文献調査や中国上海市での裁荷・崩壊実験等を行いました。これまでの研究で、今まであまり認識されていなかったような事項も確認できましたので、中間報告としてご紹介致します。(本研究は、平成22年度「循環型社会形成推進科学研究費補助金」(課題番号K22033)の支援を受けて実施した。)

研究の背景と目的

当財団が行っている不法投棄等現場の生活環境保全上の支障やそのおそれの除去についての都道府県等への支援事業では、平成10年度～22年度の

間に、堆積廃棄物崩壊による支障等があった事案は15件もありました。さらに、平成21年度末で依然全国に約1,700万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

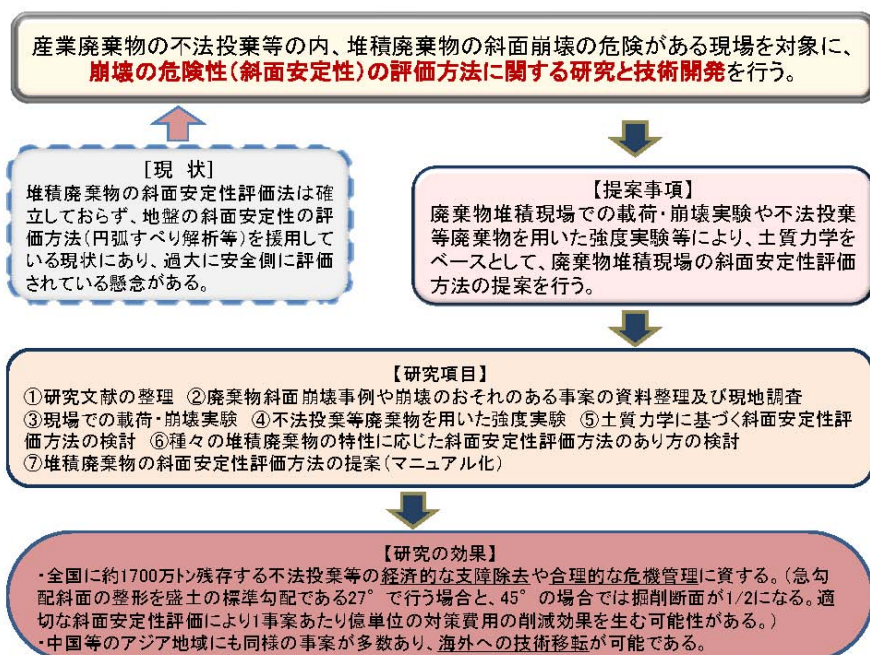


図1 研究(3年計画)の概要

まれている状況にあります。

一方、堆積廃棄物の斜面安定性については、廃棄物堆積斜面が盛土斜面に比べ安定性が高いことが現場経験的に知られていますが、確立した評価方法が無い状況にあり、盛土等の土構造物の斜面安定性評価方法を援用するなどして類推しているのが現状です。

このようななかで、本研究は堆積廃棄物の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としています。さらに、中国等のアジア地域にも同様の現場は多数あり、海外への技術移転も可能となるという効果も期待できます。

研究メンバー

山脇 敦(代表研究者；財団)、島岡 隆行(九州大学)、勝見 武(京都大学)、大嶺 聖(九州大学)、川崎 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(中国・同济大学)、小原 孝之(前田建設工業株式会社)

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います。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が把握できました。

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。
- ・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、弾性体的挙動を示す。

- ・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(廃プラスチック類等)による引張抵抗もある。
- ・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。
- ・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。

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)によりなされるケースが大多数です。例えば、ドイツのKoelsch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ます。

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

T：すべり面でのせん断抵抗、G：自重等による鉛直荷重、 μ ：安全率の逆数、b：すべり面長

[強度定数]

ϕ ：せん断抵抗角、C：粘着力、 ζ ：引張抵抗角(繊維質による引張抵抗による)

[異方性]

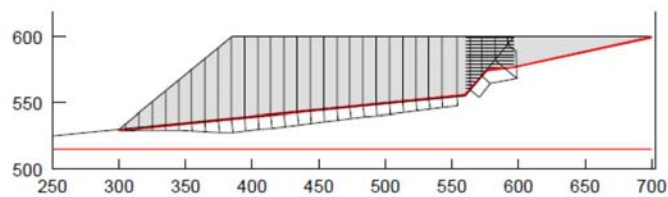
$\sin(1.5 \theta)$ で与えており、 θ (繊維方向の水平面となす角) $= 60^\circ$ で最大値をとる

堆積廃棄物層の崩壊事例について

国内1件、海外15件の堆積廃棄物層(鉱物残渣を除く)の崩壊事例について文献調査を行った結果を表1に示します。調査結果から、崩壊は斜面勾配が15~20度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、崩壊した全16事例で大量降雨や浸出水位の上昇など何らかの形で水による影響があげられているこ



(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。Koelsch らによる)

図 2 代表的な崩壊事例(インドネシア、2005)

表 1 堆積廃棄物層(鉱物残渣を除く)の既往崩壊 16 事例の崩壊要素

(わが国の産業廃棄物不法投棄等事例 1 件、海外の都市固形ごみの堆積事例 15 件の計 16 件の崩壊要素)

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	1
遮水工のある処分場で発生した事例	6	9	1
堆積高さ(標高差)が 30m を超える事例	11	4	1
堆積層の斜面勾配が 35 度以上の事例	5	11	0
下層土(原地盤)が 5 度程度以上の傾斜地での事例	7	7	2
崩壊面が廃棄物と下層土の間で生じた事例	10	4	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	16	0	0
うち崩壊前に大量の降雨があった事例	8	8	0
過去に火災・爆発が確認された事例	5	-----	11
低密度埋立てまたは締め固めが不十分な事例	4	-----	12
地震が崩壊原因の事例	0	16	0

と、地震による崩壊は世界的にも確認されていない(ただし鉱物残渣事例では散見されます)、といったことが分かりました。

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滑るような崩壊が主であり、特に遮水工のある事例については、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す。

また、崩壊は東南アジア地域等の低密度埋立場所が多く発生しています。廃棄物層の密度が増すと強度も増す関係があるとの既存研究結果と考え併せると、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ことは、不法投棄等の現場では行為者がより受入量をより増やそうとして高密度埋立になっていることが要因として推察されます。

現場での 荷重・崩壊実験等

急勾配廃棄物斜面の安定性や崩壊現象を把握するために、実験可能な中国上海市の老港廃棄物処分場内で、荷重・崩壊実験等を行いました。

①急勾配廃棄物斜面の安定性に関する予備実験(裁荷実験)

土質力学に基づく既存の計算法から斜面崩壊が十分想定される廃棄物斜面(勾配63.5度、高さ9m、延長6m、覆鋼板による上載荷重8.6kN/m²)を構築し荷重実験を行いました(図2)。この条件では変位は計測されなかったため、斜面背後を掘削し斜面背面から重機(バックホー)によりプッシュしましたが、斜面は振動するものの、はっきりとした変位は計測できませんでした。さらに、水による影響をみるために斜

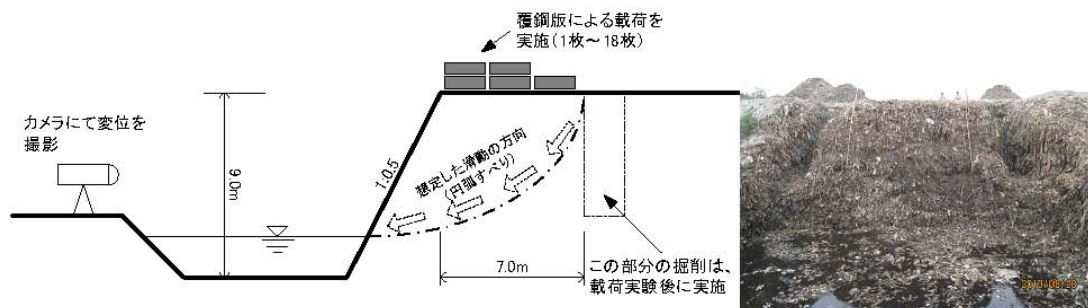


図3 上海市老港廃棄物処分場での載荷実験(左：載荷断面図、右：実験時写真)

表2 上海市老港廃棄物処分場での崩壊実験方法と実験結果



地点・ケース	密度 kN/m ³	自重による 垂直応力 kN/m ²	せん断 強さ kN/m ²	ピーク時変位 mm
GL-1.0m 不攪乱	5.4	5.4	11.6	159
GL-1.0m 再構成	4.9	7.6	10.1	221
GL-3.0m 不攪乱	12.4	19.0	14.9	155

面背後から地下水位高よりやや高い位置から斜面前面方向へ水が流れるように注水(2度に分けて計約10m³)を行いました。やはり変位は計測できませんでした。

② 廃棄物層の崩壊実験

老港廃棄物処分場での急勾配斜面が想定以上の安定性を示したことから、当該廃棄物層のせん断強度や崩壊現象を把握するために、現地で原地盤から周辺を掘削することにより切り出した概ね3m³の廃棄物層に水平荷重を与えて、崩壊過程及びせん断強度を計測しました(表2)。実験は、深度1m、深度3m及び一旦掘り起こした廃棄物を再構築したものの計3ケースで行い、実験結果は、廃棄物自重による垂直応力5～19kN/m²に対して、せん断強さは10～15kN/m²程度、そのときの変位量は引張抵抗として主に働いたと考えられる廃プラスチック類の平均長25cmに近い15～22cmでした。3ケースの比較では、廃棄物密度が高いケースほどせん断強度も高くなっています。

おわりに

中国・老港廃棄物処分場での実験により、急勾配堆積廃棄物層の極めて高い斜面安定性を確認しました。また、密度とせん断強さの間に比例的な関係がみられたことから、実験室で再整形した廃棄物であっても密度を現地と同等にすれば現地並みのせん断強さが得られることが窺えました。また、別途現場で行った廃棄物の安息角試験では、安息角が約60度を示し急勾配斜面(裁荷実験での勾配63.5度)の高い安定性を裏付けました。

以上のようなことから、不法投棄等現場についても現地での安息角試験等や実験室での一面せん断試験等により強度定数が求まれば、斜面安定性評価ができることが窺えました。今後は、廃棄物特有の引張抵抗、異方性の他、わが国の不法投棄等現場の多様な廃棄物の性状や、崩壊主因になっている水の影響を考慮した強度定数の定め方や安定性評価の方法を中心に研究を進めることを予定しています。

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 (平成23年度末中間報告)

はじめに

本研究は、産業廃棄物不法投棄等のうち堆積廃棄物の斜面崩壊の危険がある現場を対象に、確立した評価方法がない堆積廃棄物の斜面安定性に関する評価方法について、研究・開発するものです。堆積廃棄物の斜面安定性評価方法を提案することで、都道府県等の方々が一層効率的に支障除去を行えるよう、平成22年度～24年度の3ヵ年計画で研究を進めています。研究の中間報告として、平成23年度までの研究結果をご報告致します。(平成22年度の結果報告は、産廃振興財団NEWS No.63に掲載しました。)

1. 研究メンバー(平成23年度)

山脇 敦(代表研究者；財団)
島岡 隆行(九州大学)
勝見 武(京都大学)
大嶺 聖(九州大学)
川崎 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(中国・同濟大学)
坂口 伸也(前田建設工業株式会社)

2. 現場実験および室内実験結果

平成22年度は中国上海市老港廃棄物処分場内での大規模な載荷・崩壊実験により、堆積廃棄物

層が従来の土質力学による試験・解析法では説明できない高い斜面安定性を有することを確認しました。平成23年度は、斜面崩壊のおそれが指摘されていた国内の3つの不法投棄等現場で、以下に示す一連の強度試験等を行いました。

(1) 一面せん断試験

廃棄物地盤の強度定数を把握することを目的に平成22年度に製作した一面せん断試験機(図1)を用いて、現場実験および採取試料を用いた室内実験を行って、廃棄物地盤の強度特性を調べました。現場実験は、千葉、佐世保、秩父の3箇所の産業廃棄物不法投棄等現場で行いました。このうち、千葉はプラスチック等の繊維状物やシート状物を多く含む現場であり、佐世保、秩父はほとんど繊維状物等を含まない現場です。現場一面せん断試験で得たせん断応力-せん断変位関係曲線(図2)では、繊維状物等を多く含む

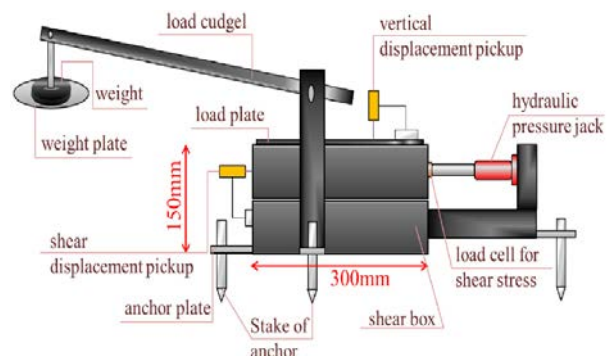


図1 一面せん断試験機の概要

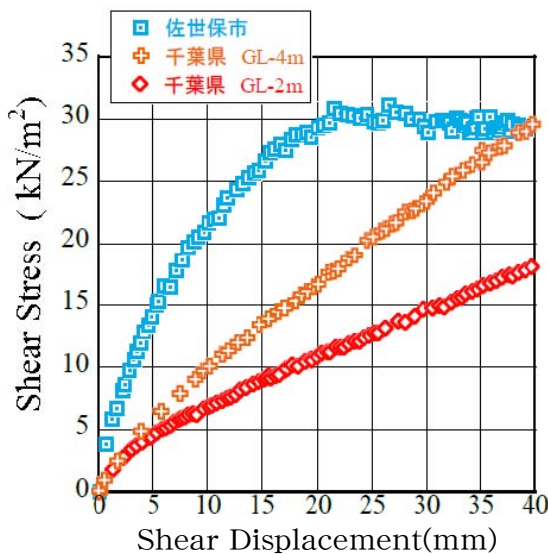


図2 せん断応力-せん断変位曲線

千葉現場ではせん断応力にピークが現れませんが、繊維状物等をほとんど含まない佐世保現場ではピークがみられ、密な砂や過圧密粘土の曲線に類似しています。各現場の強度定数(C、 ϕ)の試験結果(表1)では、内部摩擦角(ϕ)が $33^{\circ}\sim 46^{\circ}$ と盛土の一般的な値($25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 程度)よりも高く、崩れにくいことがわかります。

(2) 安息角試験

廃棄物層の安定的な法面勾配を調べることを目的に、重機を用いた安息角試験を不法投棄等現場で行いました(写真1)。バックホウのバケットにより廃棄物を撒きこぼして廃棄物の山(1.0



写真1 安息角試験(千葉現場)

$\sim 1.5\text{m}$)を形成させ、その法面勾配を計測しました。試験で廃棄物を撒き出し続けると、ある傾斜を超えると斜面の表面崩壊や盛りこぼしにより流下する現象が発生し緩勾配化し、やがて勾配は一定化します。この勾配は、現場内の急勾配盛り立て部の平均的な勾配とほぼ等しく、廃棄物が長期的に安定する勾配であると考えられます。試験結果(表1)には安息角試験の初期に現れる最大勾配と安定化した緩勾配部の角度を示しています。なお、標準的な砂の安息角は概ね 30° であり、建設工事で規定される標準盛土勾配($27^{\circ}\sim 34^{\circ}$ 程度)と対応しています。表1で繊維状物等を多く含む現場(上海、千葉)の安息角は 45° を超えており、高い斜面安定性を有することがわかります。

(3) 一連の現場・室内実験結果のまとめ

この他、堆積廃棄物層中の繊維状物等の引き抜き抵抗を確認するための現場引抜き試験(写真2)や、廃棄物層の有する引張抵抗力を測定するための室内での引張試験(写真3)を行って、堆積廃棄物層が通常の土砂地盤にはない引張抵抗を持つことを確認しました。また、キャスポル試験(写真4)。測定器の錘を落下させたときの衝撃加速度：インパクト値を計測するもの)を行って、現場の締め固まり状況や堆積物種類に対応した値を得ました。さらに、繊維状物等が多い千葉現場の試料を用いて行った室内大型土圧試験では、土圧分布が土砂材料と異なり弾性体的土圧分布を示しました。一連の実験結果(表1)から、次の事項が窺えます。

- ・わが国の不法投棄等現場の強度定数は概して高い値を示す。産業廃棄物不法投棄等の現場では、行為者が用地内に出来るだけ多くを投棄しようとし良く締め固めていることや、都市ごみには含まれないコンクリートがら等による噛み合わせ効果によることが推察される。

表1 平成22～23年度に実施した主な現場・室内実験結果一覧

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			
			千葉現場	佐世保現場	秩父現場	
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%	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 (一面せん断試験実施地点)	0.6 g/cm ³ (GL-1m) 1.3 g/cm ³ (GL-3m)		1.2 g/cm ³	1.4g/cm ³	1.4g/cm ³	
含水比 (一面せん断試験実施地点)	39%(GL-1m) 45%(GL-3m)		31%	23%	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)	
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 ³ の地盤に連続した立方体の強さ)	12 kN/m ² (GL-1m) 15 kN/m ² (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～最大限界勾配)	約45°～60° (掘削物積上げ勾配)		46°～50° (バケツ10杯分、円錐高さ154cm)	38°～44° (バケツ10杯分、円錐高さ130cm)	約35°～40° (掘削物積上げ勾配)	
一面せん断試験	現場試験	C(粘着力)	7 kN/m ² (GL-1m) 4 kN/m ² (GL-3m)	6kN/m ²	未計測	70 kN/m ² 以上
		φ(内部摩擦角)	33°(GL-1m) 44°(GL-3m)	46°	未計測	未計測
	室内試験	C(粘着力)	未実施	3kN/m ²	8kN/m ²	(別途三軸試験結果=55kN/m ²)
		φ(内部摩擦角)	未実施	44°	38°	(別途三軸試験結果=35°)
	せん断変位-応力の関係		せん断応力のピークなし	せん断応力のピークなし	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 (現場内では締め固まり状況に対応して3.0～7.4)	7.8	20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	試掘断面に引抜対象となる繊維状物がなく未実施	試掘断面に引抜対象となる繊維状物がなく未実施	
引張試験(室内) (L=1mの引張箱を用いた引張試験)		未実施	最大引張応力 =22 kN/m ² (上載圧200kN/m ²)	未実施	実施	
大型土圧試験(室内)		未実施	弾性的土圧分布を計測	未実施	未実施	



写真2 現場引抜試験



写真3 引張試験(試験実施後)



写真4 キャスポル試験

- ・繊維状物等を多く含む場合(上海、千葉)と含まない場合(佐世保、秩父)を比較すると、試験結果全般に差異があり、繊維状物等を多く含む場合は、通常の土砂材料にはない引張抵抗を有し、弾性体的挙動を示す。
- ・現場で形成されている廃棄物法面勾配と、一面せん断試験の ϕ (内部摩擦角)、安息角試験の下限側値(盛りこぼしを含む角度)は、各現場ではほぼ同じ値をとっており、安価に実施できる安息角試験は平地での安定斜面勾配の評価法として有効と考えられる。

3. 斜面安定解析

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(ϕ)、粘着力(C)の他に引張抵抗を有することが確認できたことから、ケルシュ(Koelsch)による引張抵抗を考慮した次の極限平衡式(下線部が引張抵抗)を用いた斜面安

定解析を行いました。

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

T:すべり面でのせん断抵抗、G:自重等による垂直荷重、
 μ :安全率の逆数、b:すべり面長
 ϕ :せん断抵抗角、C:粘着力、 ζ :引張抵抗角(繊維質による引張抵抗による)

引張抵抗角(ζ)を考慮することにより、繊維状物等を多く含む現場(上海、千葉)の急傾斜(60°~90°)での斜面安定を解析上で示すことが可能になります(図3で、引張抵抗を考慮した右図では、安全率 $F_s > 1$ となる)。

4. 斜面安定性評価方法

一連の実験・解析結果から、堆積廃棄物層の強度特性は、繊維状物等の引張抵抗材の有無により大きく異なり、引張抵抗材が含まれる場合には斜面安定性が通常の土砂盛土より高いことを確認し

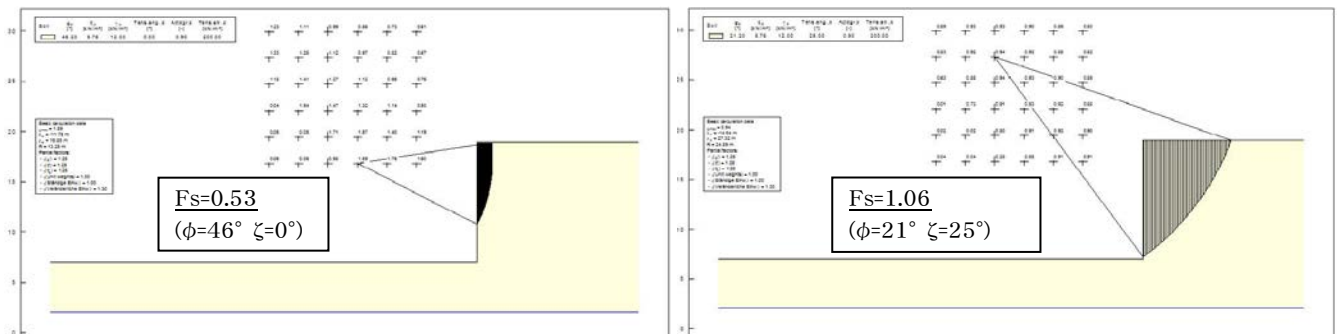


図3 斜面安定解析結果(千葉現場) 左:従来解析法(引張抵抗なし)、右:引張抵抗考慮

注) 計算には、“GGU-STABILITY Version9(Civilserve GmbH,Steinfeld)”を使用

表 2 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(案)

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	対応事案件数 []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。最大堆積高 10m程度	摩擦、噛み合わせ効果	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)繊維状物、シート状物混入多(粗大物少)	急傾斜大規模不法投棄になり得る。	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。	8	2 [1]	10
3)細粒分主体(プラ、繊維分あり)	小規模不法投棄。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(プラ等ほぼなし)	土砂特性。燃え殻等で固結化の場合あり	摩擦、粘着	盛土	既存土質工学手法で対応可能。	1	1 [1]	2
計					14	5 [3]	19



1)大型がれき・角材等現場



2)繊維状物等混入多現場



3)細粒分主体現場



4)土砂・がれき主体現場

ました。このような強度特性の他、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現地調査や現地実験を行った国内計19事案をもとに、廃棄物種類や原地盤の傾斜状況で、現場を分類したのが表2です。

表2のうち、2)は引張抵抗を有することから急傾斜の大規模不法投棄になり得て、事案数が最も多くなっています。2)の斜面安定性評価では引張試験等による引張抵抗の考慮が必要になります。

原地盤が傾斜している場合は、堆積廃棄物の種類にかかわらず、崩壊や表面くずれ等が発生しており、下層土のすべりや廃棄物層と下層土の間の境界面のすべりを考慮した斜面安定性評価が必要になります。

おわりに

一面せん断試験と安息角試験の結果が現場の堆積勾配と良く整合した結果を得ており、各々の試験の有効性が確認できました。斜面安定解析では、平地上の急勾配堆積現場が引張抵抗により安定状態にあることを数値的に示しました。研究成果は、斜面安定性評価だけでなく、廃棄物を利用した地盤の物理的安定性を把握することへの応用も期待できます。

研究最終年である平成24年度は、引張抵抗材の混入の程度や地山の傾斜状況等を考慮した斜面安定性評価方法に関する研究を進め、堆積廃棄物の斜面安定性評価方法を提案する予定です。

注)本研究は、平成23年度環境研究総合推進費補助金(課題番号 K2304)の支援を受けて実施した。