

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)

不法投棄等の斜面安定性評価研究グループ

山脇 敦	公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団（代表研究者）
島岡 隆行	九州大学大学院工学研究院
大嶺 聖	長崎大学大学院工学研究科
勝見 武	京都大学大学院地球環境学堂
土居 洋一	NPO 最終処分場技術システム研究協会（現：長野県短期大学）
川寄 幹生	埼玉県環境科学国際センター
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（平成 22 年度：小原孝之）

（謝辞）

本マニュアル(案)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研究の成果による。ここに記して謝辞を表す。

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²⁾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

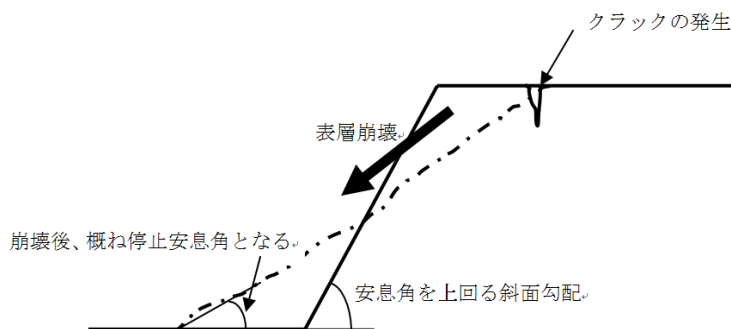
わが国の不法投棄等現場での斜面崩壊として、次の 5 つのパターンがあげられる。

- 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生ゴミ等の水分や降雨、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れき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、生ゴミ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ろうとする。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）。

なお、海外で発生している遮水工上でのすべりも同様の現象であり、傾斜地盤に遮水シート等の遮水工が施されている場合は、すべりに対する留意が必要である。

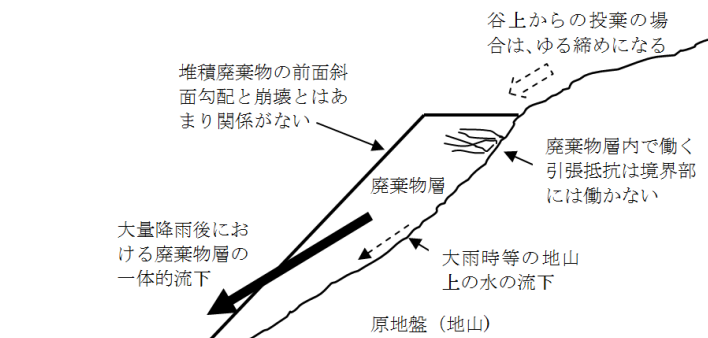
③谷地等の傾斜地上の堆積地での原地盤（下層土）のすべり（図3）

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。

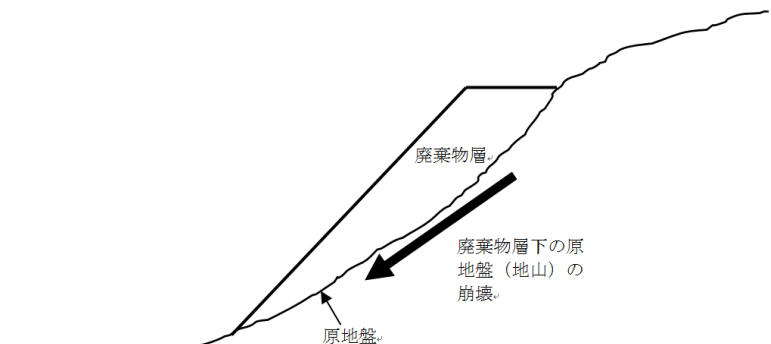
④廃棄物層内への水の集中的な浸透に起因したすべり（図4）

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

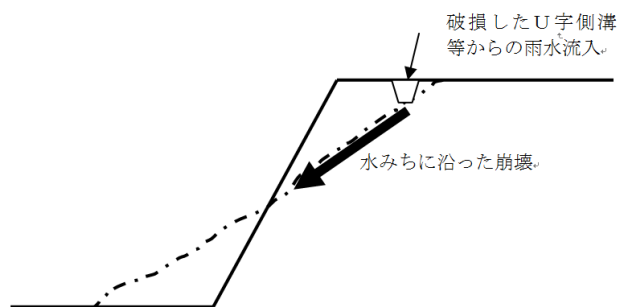
事例として、昭和40年代の一般廃棄物処分場の斜面上に法肩と平行に設置されたコンクリート製U字側溝の継ぎ目が破損し、そこから集水した雨水が廃棄物層内に入り込んで、このU字側溝を起点とした表層崩壊が生じた事例がある。なお、この事例はプラスチック等の混入が少ない土・灰分主体の埋立であり、プラスチック等主体の現場に比べ水が抜けにくかったことも崩壊につながった可能性がある。



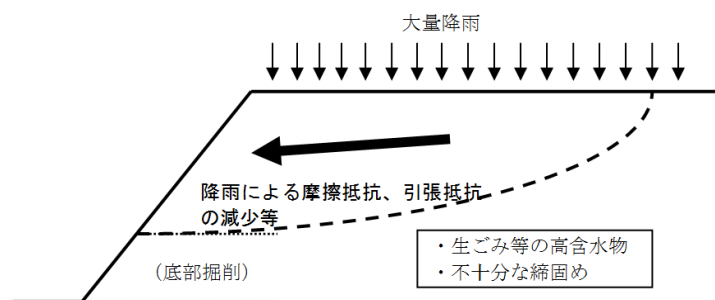
図(2) 谷地等の傾斜地上に堆積した廃棄物層の大雨時等における大規模崩壊



図(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



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



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

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固められており、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や、水処理を停止した不適正な管理型処分場で内部水位が上昇している場合等には、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。

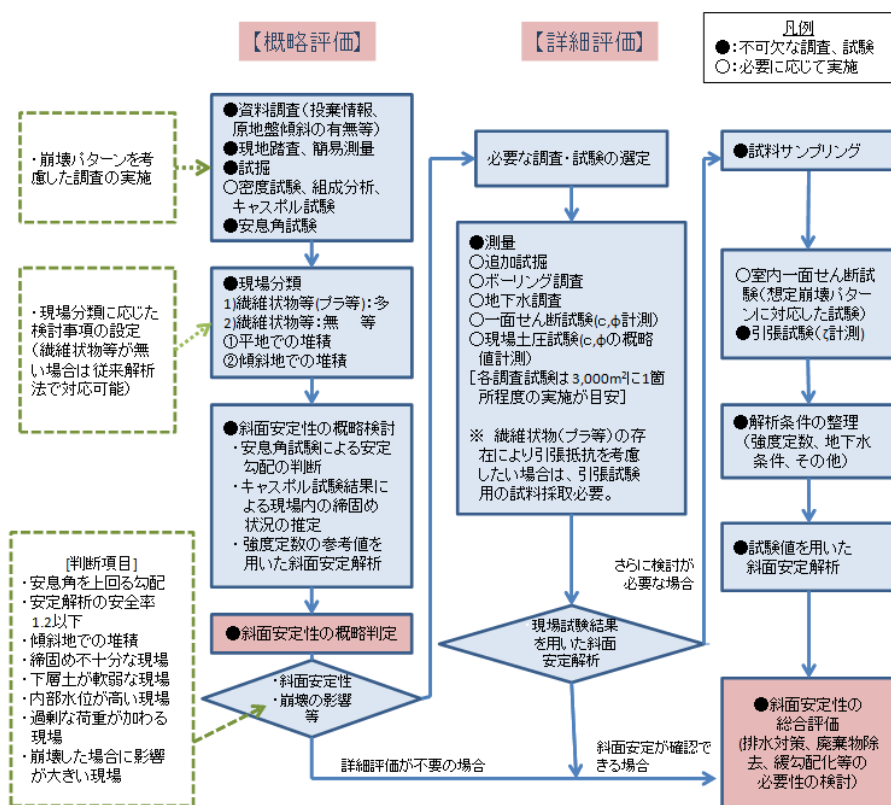
なお、不法投棄等現場の現地調査方法については、「支障除去のための不法投棄現場等現地調査マニュアル」⁵⁴⁾に、迅速かつ的確な初期対応、対策工を想定した事前調査、対策工設計のための調査に分けて記載しているので、とくに「迅速かつ的確な初期対応」の部分を参考にするとよい。

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により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」⁵⁴⁾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は、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ことが重要である。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 3,000m²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」⁴⁷⁾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)⁴⁹⁾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」⁵⁴⁾（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 $\angle$ (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 ^{注2)} []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 [1]
2) 紐状物、シート状物（繊維状物等）混入多 ^{注1)} （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 [2]
3) 細粒分主体 ^{注1)} （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 [1]
計					15 [1]	6 [3]	21 [4]

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) 事案件数：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。

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, α_c ）と停止安息角（repose angle after avalanching, α_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⁴³⁾。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。

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に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、0.45m³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（3,000m²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 ϕ （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。

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。



写真(6) キャスポル測定器(本体部, 表示部)



写真(7) 測定状況

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⁴⁴⁾⁴⁵⁾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(ϕ)、コーン指数(q_c)、道路の平板載荷試験から得られる地盤反力係数(K_{30})等の測定を目的とするものである。

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（Ia）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

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）」⁴⁴⁾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」⁴⁵⁾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、

$I_a(\text{インパクト値}) \geq 4.0$ 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」⁴⁷⁾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

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）を援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(ϕ)、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)¹⁾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。

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

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)、 μ ：安全率(F_s)の逆数、

b ：すべり面長(m)、 ϕ ：内部摩擦角($^\circ$)、 c ：粘着力(kN/m²)、 θ ：すべり面の傾斜角($^\circ$)、 ζ ：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（原地盤あるいは遮土工）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、こうしたケースを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、原地盤上の直線と与えることを考えるとよい。

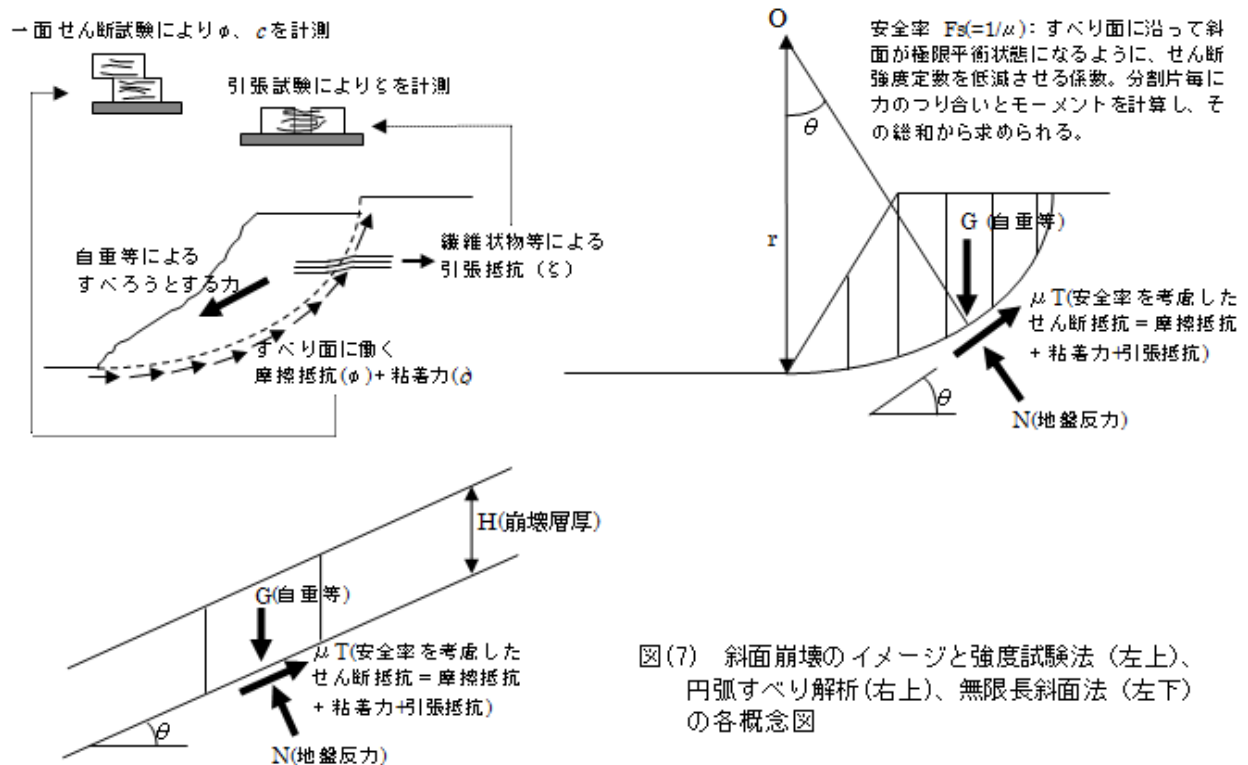
検討の初期段階で、斜面の安定性を概略的に知りたい場合には、次の無限長斜面法（斜面勾配 θ と崩壊

層厚を一定として、すべり面での力のつり合いをみる方法) で、引張抵抗を考慮し不法投棄等地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(F_s)を簡単に求めることができる。

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

ここに、 F_s ：安全率 $F_s = 1 / \mu$ 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位があることは考えにくい^{注)}、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」⁵³⁾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。また、水処理を停止した不適正な管理型処分場を対象にする場合には、当然このとながら内部水位の上昇を考慮した解析が必要になる。

(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」⁵³⁾に示された方法(震度法)で、a)に記述した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(ϕ)に寄与し、通常の盛土より大きな ϕ 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」⁵³⁾や「道路土工―切土工・斜面安定工指針」⁵⁶⁾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 ²)	ϕ (内部摩擦角) (°)	ζ (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 (紐状物等が少ない場合は0~10) 注3)	c 及び ϕ の目安値は本研究による一面せん断試験結果、 ζ は同引張試験結果による
	締固め不十分等 注2)	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等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 ϕ 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」 ⁵³⁾ 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。 ϕ 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ボ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 $\text{dim1} + \text{dim2} = 4\%$ の不法投棄等現場で ζ (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 ζ が大きくなることが想定されるが、現状では組成と ζ 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(Fs)の評価方法を示す。

- ・Fs（常時、降雨時） ≥ 1.2 ^{注)} のとき : 斜面が安定と判定
- ・Fs（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」⁵³⁾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 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（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 Fs（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（原地盤あるいは遮土工）が傾斜（概ね 5°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ボ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、追加試掘等）
- 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)	・測量 ・追加試掘 ・ボーリング調査 ・地下水調査 (・非破壊調査)	・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 ・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） ・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
1) 大型がれき、角材等の粗大物主体	・大型がれき等による安息角試験	・一般に解析が困難であるため、現場での評価を優先する
2) 紐状物、シート状物（繊維状物等）混入多 (粗大物少)	・現場一面せん断試験 ・現場土圧試験 ・試料サンプリング ・室内引張試験 ・室内一面せん断試験 ・斜面安定解析	・一面せん断試験は、本研究で有効性を確認 ・簡易に実施できる現場土圧試験もある ・採取試料による引張試験により引張抵抗の把握が可能 ・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） ・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3,000m²に1箇所程度を目安に実施する
3) 細粒分主体（ブラ、繊維分あり）	・上記、2)と同様。ただし、引張試験は不要	
4) 土砂分、がれき主体（ブラ等ほぼ無し）	・既往の土質力学に基づく道路等の調査・解析法による	
下層土(原地盤)傾斜現場での検討事項	・すべり面に対応した室内一面せん断試験	・廃棄物層と下層土の境界面を想定した一面せん断試験 ・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）

(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。

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⁵⁸⁾による強度定数（ ϕ ：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。

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/m² 程度まで载荷可能である。

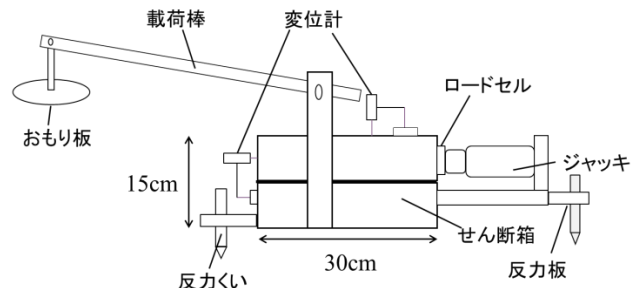
せん断応力がピークを示さない場合は、せん断変位 35mm のせん断応力をせん断強度とする（JIS A 1216:2009 より）。上箱の先端にロードセルをつけてせん断応力を求め、せん断箱に変位計をつけてせん断変位を測る。それより粘着力 c と摩擦抵抗角 ϕ を算定する。試験機の各部にベアリングをとりつけており摩擦を低減している。この試験機は現場で用いる上で便利のように、各部品をばらして、持ち運びができるようになっている。なお、各部が取り外せる仕組みとなっており、室内試験用の部品を取り付けることで、せん断箱を現場試験時と同様のものを使用し、室内試験を行うこともできる。この場合は、せん断はモーター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、 ϕ 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。

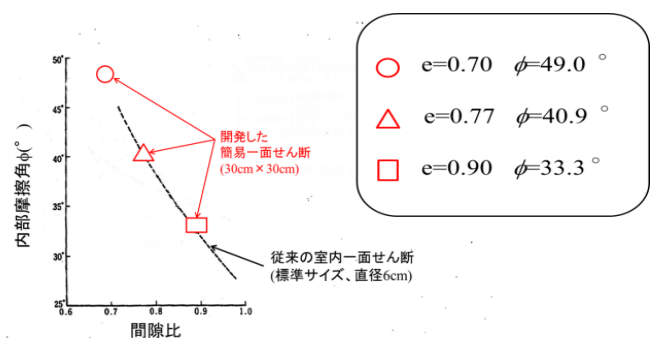
(5.3) 現場土圧試験の方法と試験結果の利用方法

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。



図(8) 開発した一面せん断試験機



図(9) 室内試験結果との比較(豊浦砂)

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。

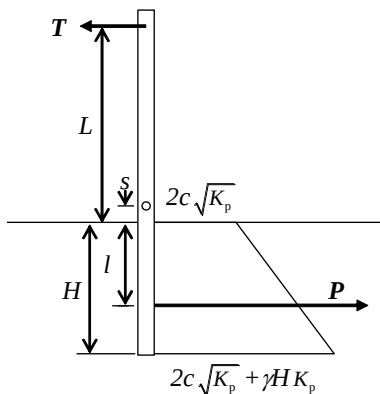
このときの受働土圧の合力 P と杭を倒すときの力 T のモーメントの釣合いは以下のように表わすことができる。

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

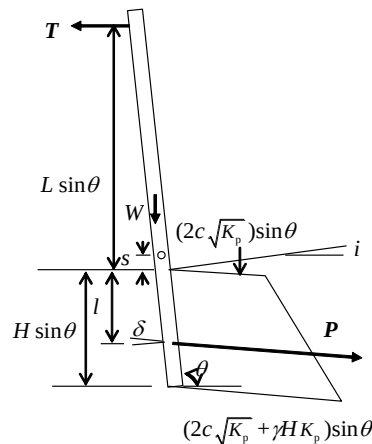
$$\approx 0.8 \times 2c\sqrt{K_p} + \frac{1}{2}\gamma HK_p \quad \dots \dots \dots (3) \text{式}$$

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_p : ランキンの受働土圧係数 ($= (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$)
- 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。

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

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

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

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(°)

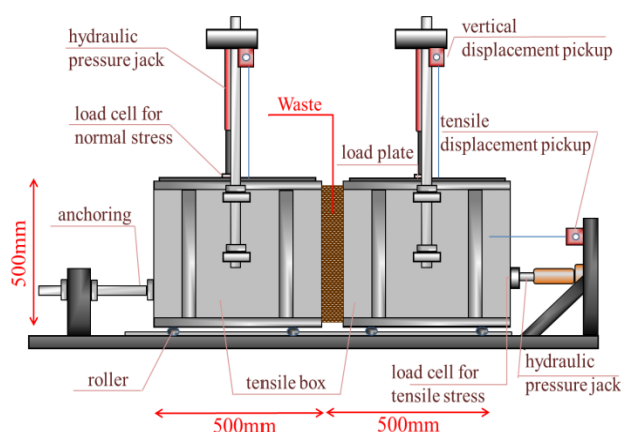
(4)式または(4)式の左辺は、杭を倒すときの力 T および杭の長さなどの試験条件から求めることができる。この値を縦軸、根入れ深さ H を横軸に実験結果をプロットする。根入れ深さを変えて実験を行うことにより、グラフの直線を得ることができる。(3)式または(4)式より、この直線の切片は、 $0.81 \times 2c\sqrt{K_p}$ 、傾きは $1/2 \gamma K_p$ となる。したがって、土の単位体積重量 γ が分かると、 K_p を求めることができる。さらに、この値を直線の切片の式に代入すると、粘着力 c が求められる。杭の傾斜を考慮する場合は、(5)式で示されるクーロン土圧に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

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¹⁾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、次のとおりを行う。

- 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） ≥ 1.2 （注）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」⁵³⁾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。

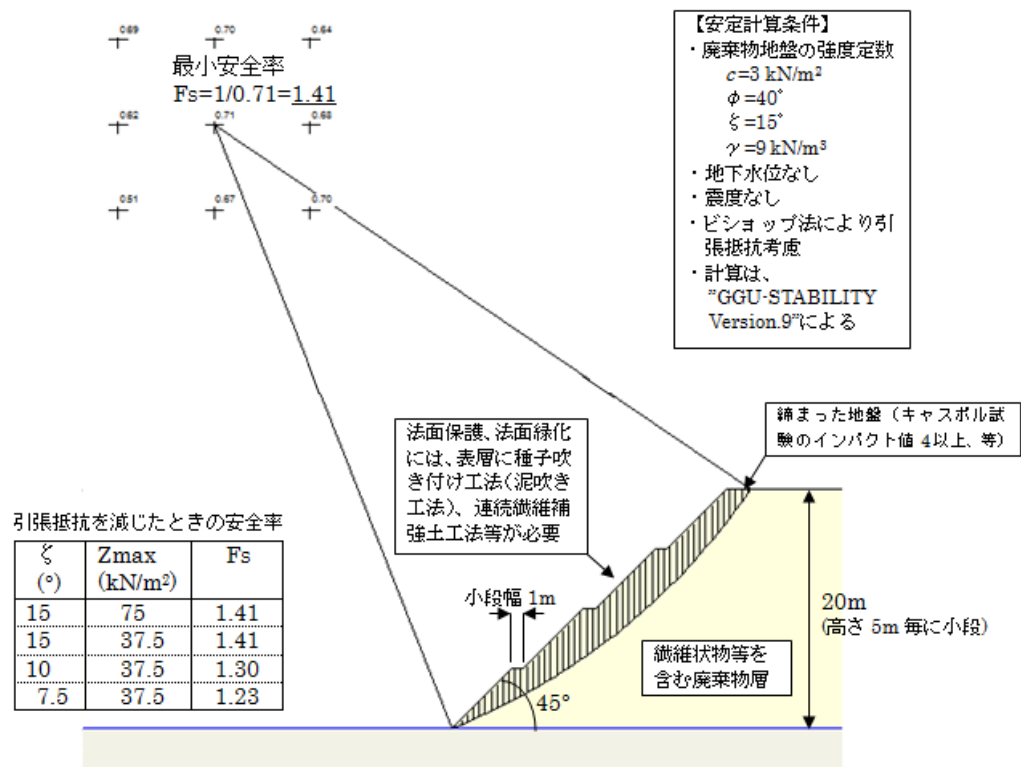
図(13)は、大規模な不法投棄等が多く、挙動が盛土と異なる繊維状物等を含む（紐状物、シート状物の混入が多い）現場での参考整形断面である。

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」⁵³⁾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（ σ 、 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°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°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⁵⁹⁾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 σ （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°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。

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²⁾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。

参考文献

- 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, Florian Koelsch : 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 Tests 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、喜多佑介、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., 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、6th 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 19th Annual GRI Conference (presented at the NAGS 2005)
- 15) Gordon P. Boutwell : SLIDES 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, 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, D.Russell V. Jones : 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, 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, Ademaro de Lamare Neto : Effect of fibre on shear trength of residue from mechanical-biological pretreatment of waste, International Journal of Environment and Waste Management 2006-vol.1
- 22) Yunmin Chen, Tony L.T.Zhan, Wei-an Ling : 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
- 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, 6th 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, APLAS Sapporo 2008, The 5th Asian-Pacific Landfill Symposium
- 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 '05-10th 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 FAILURE. 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
- 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
- 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 (キャスポル) 利用手引き, 2005 年 6 月
- 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
- 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)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
- 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
- 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