

## D4-2

## 不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価のための試験・解析法に関する一考察

○ (正) 山脇敦<sup>1)</sup>、(フェロー) 島岡隆行<sup>2)</sup>、(正) 大嶺聖<sup>3)</sup>、(正) 勝見武<sup>4)</sup>、(正) 川寄幹生<sup>5)</sup>、  
(正) 土居洋一<sup>6)</sup>、柴暁利<sup>7)</sup>、(正) 川井晴至<sup>8)</sup>、坂口伸也<sup>9)</sup>、小原孝之<sup>9)</sup>

<sup>1)</sup>産業廃棄物処理事業振興財団、<sup>2)</sup>九州大学大学院工学研究院、<sup>3)</sup>長崎大学大学院工学研究科、<sup>4)</sup>京都大学大学院地球環境学堂、<sup>5)</sup>埼玉県環境科学国際センター、<sup>6)</sup>長野県短期大学生活科学科、<sup>7)</sup>同済大学環境科学と工程学院、<sup>8)</sup>九州大学東アジア環境研究機構、<sup>9)</sup>前田建設工業株式会社

## 1. はじめに

堆積廃棄物の斜面安定性については、経験的に急勾配で安定することが知られているが、その試験・評価方法は確立されていない状況にある。産業廃棄物の不法投棄等は未だ全国に約 1,800 万トン残存し、この中には斜面崩落のおそれがある事案が多数あり、適切な斜面安定性評価方法の確立が急務になっている。このようななかで、わが国の不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価に適する強度試験法や解析法について、土質力学の知見をベースに、国内外 9 現場での強度試験等により検討した。

## 2. 堆積廃棄物の強度試験についての考え方

廃棄物層の斜面安定性に寄与するせん断抵抗は、次式により表すことができる。

$$T = c \cdot l + N \cdot \tan \phi + \tau(Z) \cdot l \quad \dots \dots \dots (1) \text{式}$$

ここに、 $T$ ：崩壊面に働く全せん断抵抗 (kN/m)

$c$ ：粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)、 $l$ ：すべり面の長さ (m)

$N$ ：すべり面に働く垂直力、 $\phi$ ：クーロン公式の内部摩擦角 (°)

$\tau(Z)$ ：すべり面に働く引張抵抗 (kN/m<sup>2</sup>)

(1)式右辺の各項を模式化すると図 1 になる。また、Koelsch(ケルシュ)<sup>1)</sup>は繊維状物等による引張抵抗を次のとおり与えている。

$$\tau(Z) = G/b \tan \zeta \cdot \sin(1.5\theta) \quad \dots \dots \dots (2) \text{式}$$

ここに、 $G/b$ ：単位幅あたりのすべり面上の廃棄物重量 (kN/m<sup>2</sup>)

$\zeta$ ：引張抵抗角(°)、 $\theta$ ：すべり面の傾斜角(°)

(1)式、(2)式からせん断抵抗を知るために必要となる強度定数

は、内部摩擦角( $\phi$ )、粘着力( $c$ )、引張抵抗角( $\zeta$ )であり、これ

らの試験法について、図 1 のとおりすべり面と堆積繊維の方向を考えると、一面せん断試験<sup>2)</sup>と引張試験<sup>3)</sup>が適することが分かる。本研究の一面せん断試験は、現場で廃棄物層を乱さないように地上で 30cm×30cm×15cm に切り出し整形して同じ大きさのせん断箱によりせん断抵抗を計測するものであり、不法投棄等現場用に試験機を製作して試験した。引張試験は、ケルシュが開発した試験機を参考に国内用に小型化したものを製作して試験した。また、砂のような粘着力がない材料では、 $\phi$ と安息角が基本的に同じ値を示すことから、簡易評価法として、不法投棄等現場用に開発した安息角試験<sup>4)</sup>(重機により廃棄物を上方から少しずつ撒きこぼして形成された山の傾斜角を計測するもの)も併せて実施した。

## 3. 強度試験結果と考察

国内外 9 現場で行った強度試験結果を表 1 に示す。試験現場は、引張抵抗が働くプラスチック等の繊維状物等を有する現場(関東①、中部①、中部②、上海、ジャカルタ)と、繊維状物等がほとんど無い現場(九州、関東②、関西)、及びプラスチック等は有するものの長さ 7cm 程度以下に破碎・選別されている現場(東北)で実施した。

一面せん断試験の結果、国内の繊維状物等を有する現場では $\phi=46\sim 51^\circ$ 、 $c=3\sim 4 \text{ kN/m}^2$ 、土砂主体の九州現場で $\phi=45^\circ$ 、 $c=3 \text{ kN/m}^2$ 、破碎・選別残渣である東北現場で $\phi=47^\circ$ 、 $c=11 \text{ kN/m}^2$ と、いずれも土砂地盤に比較して、 $\phi$ は大きく、 $c$ が小さい、礫相当の非常に大きい摩擦抵抗を示した。わが国の不法投棄等現場の堆積廃棄物は、通常の土より粒径分布が遙かに広く、大小重軽の廃棄物が混じり合うことによる噛み合わせ効果や、不法投棄行為者が限られた土地により多く投棄しようとし良く締め固めていることが、大きな摩擦抵抗を有する要因と考えられる。なお、関東②現場は焼却灰や燃え殻主体の旧管理型処分場で廃棄物層が固結状態にあり、せん断抵抗が 70kN/m<sup>2</sup>以上あることを確認して試験を終えたものである。海外の現場では $\phi$ の値がやや小さいが、これは、生活ごみ主体で生ごみが多量の水分を含むことや、がれき等の重量物が少ないことから、摩擦抵抗が小さくなっているものと考えられる。

安息角試験では、撒きこぼしにより形成される山の斜面表面を重量物等がすべり落ちて斜面が安定した後の勾配で

一面せん断試験により $\phi$ 、 $c$ を計測

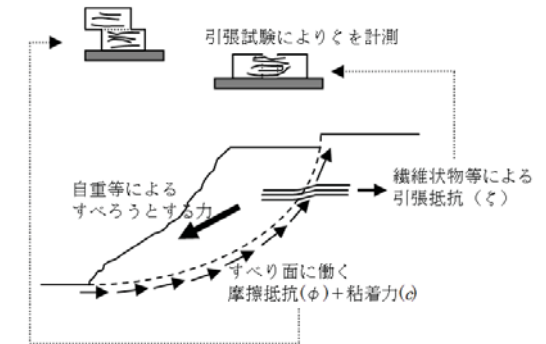


図 1 繊維状物等を含む現場の斜面モデル

表 1 強度試験と斜面安定解析結果

現場名	現場種類	廃棄物種類 ( )内:プラ類 重量比(%), 含水比 w(%), 湿潤密度 $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	一面せん断試験		停止 安息 角(°)	廃棄物法面 勾配(°) ( )内:地山	引張 試験 $\zeta$ (°)	安定解析結果 <sup>注4)</sup> (安全率) $F_{S1}$ :円弧す べり法、 $F_{S2}$ :(3)式
			$\phi$ (°)	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )				
関東 ①	不法投棄等現場 (90°壁で表層崩壊)	繊維状物等 (16) w=31, $\gamma$ =1.2	46	3	50	40~62,90 (平地)	18 <sup>注3)</sup>	$F_{S1}$ =1.08 (90°壁) $F_{S2}$ : 90°は計算不能
中部 ①	不法投棄等現場(60° 斜面上にクラック)	繊維状物等 (6) w=13%, $\gamma$ =0.9(60°斜面)	51	4	45~ 52	40~60 (平地)	-----	$F_{S1}$ =1.23, $F_{S2}$ =1.12 ( $\theta$ =60°, $\zeta$ =10°)
中部 ②	不法投棄等現場	繊維状物等 (容積比 50) w=17% , $\gamma$ =0.7	(47) <sup>注1)</sup>	(3) <sup>注1)</sup>	45	24~25 (谷~平地)	-----	$F_{S1}$ =3.45, $F_{S2}$ =2.62 ( $\theta$ =24.5°, $\zeta$ =15°)
九州	不法投棄等現場	土砂分主体(ほぼ 0) w=23%, $\gamma$ =1.4	45	3	44	30~42 (約 20°斜面)	-----	$F_{S1}$ =1.92, $F_{S2}$ =1.88 ( $\theta$ =28°, $\zeta$ =0°)
関東 ②	不法投棄等現場 (管理型処分場)	土砂分主体(2)/固結状態 w : 未計測, $\gamma$ =1.4	-----	70 以上	(35) <sup>注2)</sup>	30 (平地)	-----	$F_{S1}$ >1.14 ( $\zeta$ =0°) $F_{S2}$ : 計算不能
関西	一般廃棄物処分場 (斜面崩壊発生)	土砂分主体 (ほぼ 0) w=14%, $\gamma$ =1.1	-----	-----	36	40 (不明)	-----	$F_{S1}$ =0.93, $F_{S2}$ =0.87 ( $\theta$ =40°, $\zeta$ =0°)
東北	震災廃棄物 仮置場	篩下残渣(0.4、木くず 6) w=40%, $\gamma$ =1.1	47	11	40	38~42 (平地)	-----	$F_{S1}$ =3.45, $F_{S2}$ =1.28 ( $\theta$ =40°, $\zeta$ =0°)
中国 上海	都市ごみ埋立地 (試験斜面勾配:63°)	繊維状物等 (16) w=42%, $\gamma$ =1.15	33~ 43	6~4	(45) <sup>注2)</sup>	42~53 (平地)	-----	$F_{S1}$ =0.93, $F_{S2}$ =1.06 ( $\theta$ =63°, $\zeta$ =15°)
ジャ カル タ	都市ごみ埋立地	繊維状物等(生ごみ等)容 積含水率 72%, $\gamma$ :未計測	-----	-----	36~ 40	約 40 (平地)	-----	$F_{S1}$ =1.56, $F_{S2}$ =1.34 ( $\theta$ =40°, $\zeta$ =15°)

注 1) 一面せん断試験：不法投棄等現場に適するようにポータブル化した試験機（せん断箱：30cm×30cm×15cm）を作成して得た  $\phi$ （内部摩擦角）、 $c$ （粘着力）。（ ）内は、現場土圧試験による結果。  
 注 2) 停止安息角：本研究で不法投棄等現場用に新たに定めた試験法による盛りこぼしを含む安息角。  
 （ ）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。  
 注 3) 引張試験：ケルシュが開発した試験機を参考に国内向けに小型化した試験機を作成して得た  $\zeta$ （引張抵抗角）。  
 注 4) 安定解析結果： $F_{S1}$ は“GGU-STABILITY VERSIN9”<sup>5)</sup>によりビショップ法で引張抵抗を考慮したときの計算結果。 $\theta$ は(3)式で与える斜面勾配(傾斜地は地山との平均勾配)。 $\zeta$ は関東①現場以外は仮定値。 $\phi$ 未計測現場は停止安息角を代用して計算。

ある停止安息角<sup>4)</sup>が、いずれの現場でも一面せん断試験による  $\phi$  とほぼ同じ値になった。安息角試験で形成される山の表面を重量物等がすべり落ちている状態ではプラスチック等の繊維状物が重量物の落下エネルギーに耐えられずに引張抵抗が働かない状態で積み上がるとみられることと、廃棄物層の粘着力が非常に小さいことから、停止安息角が摩擦抵抗のみで形成されて結果的に  $\phi$  と同等になるものと考えられる。さらに、停止安息角は現場で安定している法面勾配ともほぼ一致しているとともに、停止安息角以上の現場法面では斜面崩壊やクラックが生していることから、簡易評価法として、安息角試験が有効であることが確認できた。

引張試験は関東①現場の試料を用いて、国内用に製作した 50cm×50cm×50cm の箱を 2 つ連結した試験機により、 $\zeta$ =18°を得た<sup>3)</sup>。この値は、ケルシュ<sup>1)</sup>が未処理の都市ごみで得ている値 35°に比べて小さい。わが国の不法投棄等現場では都市ごみほどにプラスチック等の繊維状物が含まれていないことが要因として考えられる。

4. 斜面安定解析法について

不法投棄等現場の斜面安定解析は、(1)、(2)式を用いた円弧すべり法で行うことができる。ただし、円弧すべり法はすべり面や円弧中心点を仮定して最低安全率となるすべり面、円弧中心点を求めるものであり、基本的に計算機が必要になる。わが国の不法投棄現場の粘着力( $c$ )が極めて小さいことから、図 2 の無限長斜面法の安定計算式で引張抵抗を考慮し粘着力を無視することにより、(3)式のとおり、すべり面を仮定しなくても、簡単に概略的な安全率を算定することができる。(粘着力( $c$ )が大きい場合は(3)式に粘着力の項を加える必要がある。)

$$F_s = T / T_g \quad T \doteq N \cdot \tan \phi + \tau(Z) \cdot l \quad T_g = G \cdot \sin \theta \quad \text{より}$$

$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \theta} + \frac{\tan \zeta \cdot \sin(1.5\theta)}{\sin \theta \cdot \cos \theta} \quad \dots \dots (3) \text{式}$$

ここに、 $F_s$ : 安全率、 $T_g$ : すべりを起こそうとする力(kN/m)、 $\theta$ : 無限長斜面の勾配(°)、他(1)(2)式と同じ

表 1 右欄に安定解析結果を示す。9 現場での一面せん断試験、安息角試験、引張試験の各試験結果と、(1)、(2)式による円弧すべり計算及び(3)式の計算結果、現場状況(安定状態、クラック発生等)の間の相互の整合性が確認でき、これらの試験・解析法により、定量的に不法投棄等現場の斜面安定性を従来より実態に近く評価できた。

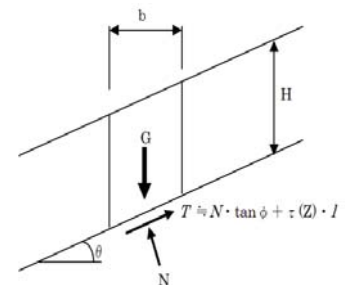


図 2 無限長斜面法概念図

[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。

[参考文献] 1) Florian Koelsch : MITTEILUNGEN Heft 133/1996 -ISSN 0343-1223-  
 2) 大嶺聖ら：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, 廃棄物資源循環学会研究発表会, 2011 年 11 月  
 3) 宮本慎太郎ら：大型引張試験による堆積廃棄物の引張強度特性, 平成 24 年度土木学会西部支部研究発表会, 2013 年 3 月  
 4) 土居洋一ら：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, 廃棄物資源循環学会研究発表会, 2012 年  
 5) Civilserve GmbH : GGU-STABILITY VERSION9 User Manual 6) 社団法人地盤工学会：斜面の安定・変形解析入門