

## 廃棄物地盤の強度、浸透特性と斜面安定性

山脇 敦<sup>1</sup>, 土居洋一<sup>2</sup>, 大嶺 聖<sup>3</sup>

1 産業廃棄物処理事業振興財団

2 大洋基礎工業(株)

3 長崎大学大学院・工学研究科

## 概 要

廃棄物地盤にはシート状のプラスチックやがれき等が混入していることが多く、通常の土砂地盤とは異なる強度特性を有することが現場レベルでは推察されてきたが、強度特性等に関する工学的なデータは十分に蓄積されていない状況にある。このような中、国内外の 27 現場 (49 箇所) で強度試験、ボーリング調査、大型カラム試験等を行って廃棄物地盤の強度・浸透特性を調べた。長尺のプラスチック等が混入した廃棄物地盤は特有の引張抵抗が働くこと等から高いせん断抵抗を有するが、大量降雨に起因した傾斜原地盤上の廃棄物層の一体的なすべりは原地盤側のすべり抵抗が支配的になり引張抵抗と無関係に生じ得る。不法投棄現場や安定型処分場等の廃棄物地盤で想定される斜面崩壊パターンや、斜面安定性評価に際して層中に雨水が長時間貯留する浸透特性をふまえた評価が必要なことを示した。

キーワード：廃棄物地盤、強度特性、雨水浸透、安息角、斜面安定性

## 1. はじめに

土砂粒子より大きいプラスチックやがれき等が混入した産業廃棄物安定型最終処分場 (以下、「安定型処分場」という) や不法投棄現場等の廃棄物地盤の強度特性や浸透特性について十分なデータが蓄積されていない状況の中で、安定型処分場の断面設計や不法投棄現場の斜面安定化対策においては従来の土質工学的手法が援用されてきた。

一方、現場レベルでは廃棄物地盤は通常の盛土よりも斜面安定性が高いことが知られ、安定型処分場の管理者からは廃棄物地盤に対応した合理的な処分場の設計や跡地利用時の地盤強度評価が求められている。逆に、産業廃棄物不法投棄現場では、事業者が廃棄物地盤の高い斜面安定性を過信して谷地に廃棄物を投棄して、多量降雨時に大規模斜面崩壊が発生した事例がある。多量降雨に起因した廃棄物地盤の斜面崩壊は国内外で発生しており国内では廃棄物が河川をせき止めた事例があり海外では住宅多数を崩壊させて死者が生じた事例が幾多ある<sup>1)2)3)</sup>。

また、廃棄物地盤は長尺 (時には 1m 超) のシート状物や塊状物が混入している場合が多く、既往の土質試験法の適用が困難な場合がある。

このような中で、2010 年から廃棄物地盤の斜面安定性評価、跡地利用、適正管理等を目的とした研究、調査により、国内外の廃棄物地盤 27 現場 (49 箇所) で、廃棄物地盤に適用可能と考えられる強度試験や浸透試験を行って、強度特性や浸透特性を調べた。地盤強度試験により、廃棄

物地盤は概してせん断強度が大きく斜面安定性が高いことを確認した。また、大型カラム試験では、シート状のプラスチックが地盤中に存在する場合には、プラスチック等の上面等に雨水が長時間貯留する浸透特性があることが分かった。本稿は、これまで行った種々の研究、調査で得たデータから、廃棄物地盤の強度特性や雨水浸透特性を整理することで、廃棄物地盤で想定される斜面崩壊の類型化や、斜面安定性評価のあり方を考えたものである。

## 2. 廃棄物地盤の強度特性

## 2.1 試験現場の概要

廃棄物地盤には、産業廃棄物等の投棄による不法投棄現場、廃プラスチック類、ゴムくず、金属くず、ガラスくず・コンクリートくず・陶磁器くず、がれき類を受け入れ可能な安定型処分場、これら以外の産業廃棄物も受け入れ可能な管理型処分場、災害廃棄物の仮置場といったものがある。このうち安定型処分場には自主的にプラスチック類を受け入れないとする処分場もある。また、発展途上国の埋立地では産業廃棄物と一般廃棄物の区別がなくレジ袋等のプラスチックの他、厨芥類を受け入れることが多い。現場試験はこうした廃棄物地盤 27 現場 (49 箇所) で行っており、代表的な現場の写真を図 1 に示す。図 1 上段は、長尺のプラスチックが混入した不法投棄現場、安定型処分場 (覆土前)、Sri Lanka の埋立地で、写真でみる範囲では 3 現場の廃棄物地盤表層の様相は類似している。



図1 代表的試験現場  
 上段の3現場：長尺プラスチック混入地盤  
 下段の3現場：長尺プラスチック非混入地盤

図1下段は、長尺のプラスチックが混入していない不法投棄現場、安定型処分場、管理型処分場（プラスチックは数cm程度に細かく破碎されている）で、様相は粒径の大きい土砂地盤に近い。

プラスチックを受け入れる安定型処分場（プラスチック類は15cm以下にして埋め立てることが廃棄物処理法で求められている）、海外の埋立地（Landfill）では破碎前あるいは粗破碎後の一定長以上のプラスチック類が存在する。これに対し管理型処分場は廃棄物受入料金が安定型処分場より高額になるため、プラスチックは一般に不可避免的に他の廃棄物に混じって混入した破碎選別後の小片等に限られる。同様に、プラスチックを受け入れないとする安定型処分場でも不可避免的に混入する小片等に限られる。なお、不法投棄現場には通常、長尺のプラスチックが混入するが、図1左下の解体業者ががれき類を主体に投棄した九州現場のようにプラスチックが確認できない現場もある。

## 2.2 現場試験方法

### (1) 空隙率試験

廃棄物地盤中の空隙率は、地盤強度や沈下量と関係することが推察されるが、現場で容易に空隙率を計測する方法は確立されていない。このため、水置換による土の密度試験<sup>4)</sup> (JGS1612-2003)の実施後に掘削試料(50kg程度)を水(150ℓ程度)の入った断面積一定のドラム缶大の容器(内径56.7cm、高さ83.0cm)に投入し、掘削容積と実容積(水位上昇分)の比から表層地盤の空隙量を概略的に調べる方法(図2)を考案して、17現場(30箇所)で実施した。空隙率(空気間隙率; $n_a$ )は、(1)式から求まる。

$$n_a = (V - V_{s+w}) / V \quad (1)$$

ここに、 $V$ :土の密度試験の掘削容積、 $V_{s+w}$ :容器中の水位増分( $\Delta h$ )から求まる試料の実容積、 $\Delta h$ :棒等で十分に攪拌し試料中の空気を抜いた後の水位増分である。

なお、水温による試料や水分の体積変化(例:ポリエチレン線膨張率<sup>5)</sup> =  $100 \sim 200 / 10^6 K^{-1}$ )等は、求める精度に比べ小さく無視している。

### (2) せん断強度試験

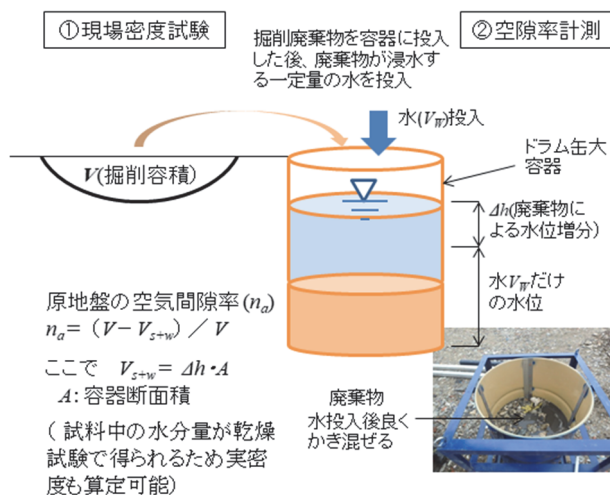


図2 空隙率試験方法

せん断強度は、30cm×30cm×15cmのせん断箱を測定箇所地に盤を乱さないように設置して行う現場一面せん断試験<sup>6)</sup>により調べることを基本とした。補完的試験として、根入れ深さを変えて杭を打ち込み、深さが異なる3個以上の受働土圧を測定し、モーメントとの釣り合い方程式を立てることで強度定数( $c$ ,  $\phi$ )を推定する現場土圧試験<sup>6)</sup>を5箇所で行った。

### (3) 安息角試験

廃棄物地盤での現場簡易強度試験法として考案した安息角試験<sup>7)</sup>は、斜面の安定勾配の把握等を目的としたもので、現場で重機(バックホウ)を用いて廃棄物を山状に積み上げ、その過程で斜面角度を計測した値を安息角とするものであり、25現場(45箇所)で実施した。

従来の研究<sup>8)</sup>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。本研究では、崩れが停止した時の斜面角である停止安息角は、バックホウ・バケットの手前側(図3写真の各右法面)の勾配をみた。これは、バックホウ・バケットで廃棄物を撒きごぼすとバケット手前側では廃棄物が滑り落ちやすいため若干勾配が緩くなることから、これを崩れの後の勾配とみることができるとある。また、容量0.45m<sup>3</sup>バケットの場合では、バケット杯数(撒きごぼしの杯数)で3~4杯目以降に値が安定してくることを確認しているため、4杯目以降の値から決定することとした(図4参照)。限界安息角は、同様にバケット手前側の4杯目以降の勾配で廃棄物が積み上がった斜面角(角度が大きくなったときの値)とした。

### (4) 衝撃加速度試験

土砂地盤の簡易な強度定数測定法である衝撃加速度試験(キャスポル)<sup>9)</sup>について、廃棄物地盤での簡易試験法としての適用性を調べることを目的に26現場(48箇所)で実施した。計測されるインパクト値( $I_a$ )と廃棄物地盤



図3 安息角試験 左：中部-3，右：東北-5(燃え殻)

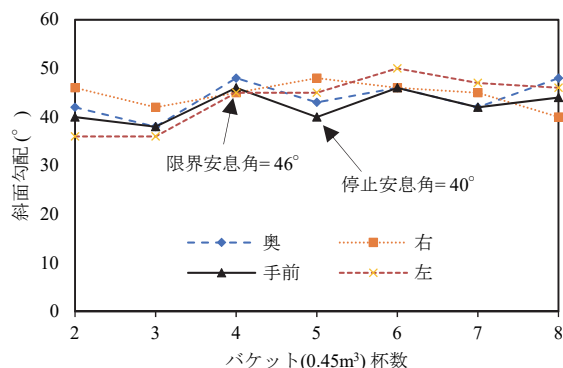


図4 安息角試験例 (中部-3：堆積時間 1.8年)

の強度定数 (粘着力, 内部摩擦角) との関係等を調べた。

#### (5) 平板載荷試験

地盤の平板載荷試験<sup>10)</sup> (JGS1521-2003) を9現場 (14箇所) で実施した。

#### (6) 現場毎の試験項目と試験場所

現場毎に試験の目的が斜面安定性評価, 跡地利用, 場内適正管理と異なるため, 試験項目は各現場で一定していない。また, 各試験は基本的に廃棄物地盤の表層で行った。

### 2.3 現場試験結果と考察

#### (1) 廃棄物地盤での試験結果一覧

試験結果一覧を表1に示す。表1では, 廃棄物地盤が廃棄物の受入形態により, 図1でみたように長尺のプラスチックが混入した場合とそうでない場合に様相的に区分できることや, 安定型処分場でのプラスチックの受入が15cm以下に制限されていることから, 目安として10cm超のプラスチックの混入の有無で区分した。このため, 表1で10cm超プラ混入の安定型処分場では長さ15cmまでのプラスチックの混入が基本となる。

なお, 表1の東北-4現場 (震災廃棄物仮置場) は, 土砂代替材としての利用を目的として選別破碎したものの仮置場であり長尺プラスチックの混入は確認できなかった。また, 関西 (処分場) は表層崩壊が生じた一般廃棄物処分場で崩壊断面を調べた範囲では長尺プラスチックは無かった。

表1に示した堆積時間は, 処分場の管理者等へのヒアリングによる当該地の埋立開始から現場試験時までの経過時間を示している。表1に示した主な組成については, 現場で30kg程度の廃棄物を採取して廃棄物種類別に手選別して重量を計測する組成分析による値を基本としている。

なお, 表中で「主な組成」の合計が100%に満たない場合があるが, その場合の「その他」分はスペースの関係で表示していない。

#### (2) 強度定数間の関係性

一連の現場試験で調べた強度定数は表1のとおりであり, これらの間の関係性をみた。図5は堆積年数と空隙率の関係で, データにばらつきはあるが堆積年数が増加すると空隙率が減少する傾向を示している。表1の中部-3現場は堆積した廃棄物を一度掘り返して順次埋立し直した現場で, ほぼ同様の廃棄物組成で堆積時間別の地盤のデータがとれている。この現場では堆積時間0~8年の間で堆積時間経過とともに空隙率が減少している。廃棄物自重により時間経過とともに空隙率が減少するものと考えられるが, 過去の現場沈下計測で降水により地盤面が低下することが確認されている<sup>11)</sup>ことを踏まえると, 空隙率の減少には, 自重の他, 降水も寄与していると考えられる。

図6は一面せん断試験等で調べた粘着力と内部摩擦角の分布で, 10cm超プラスチックの有無で差をみると, 内部摩擦角の分布に明確な差はみられないが, 平均値で比べると内部摩擦角は10cm超プラスチック混入地盤の方がやや大きい。粘着力は10cm超プラスチック混入地盤の値は15kN/m<sup>2</sup>以下に集中しており, 平均値は10cm超プラスチック混入地盤は11kN/m<sup>2</sup>, 同非混入地盤は28kN/m<sup>2</sup>で, 10cm超プラスチック混入地盤の粘着力は顕著に小さい。

図7は衝撃加速度試験によるインパクト値と停止安息角の分布をみたもので, インパクト値と停止安息角には緩やかな負の相関がみられ, 10cm超プラスチック混入地盤のインパクト値は小さい (8以下に集中) ものの停止安息角の平均値は10cm超非混入地盤より大きい。この要因として, 長尺のプラスチックは地盤中に屈曲して存在することから, 長尺のプラスチックが多く混入すると柔らかい地盤が形成されてインパクト値は小さくなるものの, 安定な斜面勾配を表す停止安息角は長尺プラスチックの存在により大きくなっていることが可能性として考えられる。

図8はインパクト値と粘着力の関係性をみたもので, インパクト値と現場一面せん断試験等で地盤を乱さずに調べた粘着力の間には相関がみられ, 粘着力はインパクト値から回帰式により算定した値の概ね±10kN/m<sup>2</sup>の範囲にある。図9は,  $c \leq 10 \text{ kN/m}^2$  ( $I_a \leq 6.5$ に相当) の試験箇所について, 停止安息角と内部摩擦角の関係性をみたもので, 両者には相関がみられ, 内部摩擦角は停止安息角から回帰式により算定した値の概ね±5°の範囲にある。安息角試験は地盤掘削試料 (乱した試料) を用いた試験であり, 粘着成分が少ない試料で内部摩擦角と相関を示しているものと考えられる。現場一面せん断試験の実施には時間や費用を要するため, 廃棄物地盤のせん断強度を概略的に把握するために, 簡易的な試験で得られるインパクト値や停止安息角を用いることは有効となる。

この他の強度定数間の関係, 例えば, 空隙率と粘着力やインパクト値, プラスチック混入率と内部摩擦角や停止安息角といった間には関係性を見いだせていない。

表 1 廃棄物地盤での強度試験結果

現場 種類	現場/試験箇所	堆積 時間 年	主な組成 %	湿潤	含	空	粘着	内部	停止	限界	イン	極限支	地盤
				密度 g/cm <sup>3</sup>	水 比 %	隙 率 %	力 kN/m <sup>2</sup>	摩擦 角 °	安息 角 °	安息 角 °	パク ト値 I <sub>a</sub>	持力 kN/m <sup>3</sup>	反力 係数 kN/m <sup>2</sup>
10cm 超 プラ混入地盤 平均		5.1		1.3	30	26	11	40	41	48	7.0	619	24
不法 投棄	関東-1	10.0	プラ 16, 土がれき等 74, 金属 4	1.2	31	---	3	46	50	60	6.3	---	---
	中部-1	13.0	**プラ 50, がれき等 13	0.7	17	---	* 3	47	45	55	4.6	---	---
	中部-2 中腹	1.5	プラ 6, がれき等 50, 土等 35	1.2	21	---	4	51	45	53	5.4	---	---
	中部-2 頂上	1.5	中腹よりプラスチック多	0.9	13	---	* 3	51	52	58	3.6	---	---
安定 型処 分場	北海道	1.5	プラ 11, 土等 79, がれき等 5	1.7	29	8	6	38	44	48	5.6	---	---
	北海道 重機走行	1.5	プラ 14, 土等 82, がれき等 2	1.5	35	10	29	44	40	50	8.4	---	---
	東北-1	0.0	----	0.9	12	46	4	32	38	43	5.3	---	---
	東北-1	1.0	プラ 5, 土等 66, がれき等 19	1.4	38	25	10	51	32	38	13.3	---	---
	東北-1	3.8	----	1.4	42	16	* 22	41	41	51	15.8	>2000	111
	東北-1	10.0	プラ 17, 土等 50, がれき等 15	1.9	19	---	11	51	40	42	10.7	---	---
	東北-2 黒色地盤	4.5	プラ 22, 土等 47, がれき等 24	1.3	32	31	17	28	42	47	6.4	---	---
	東北-2 茶色地盤	4.5	----	1.2	35	30	---	---	40	46	8.8	---	---
	関東-2	0.0	プラ 5, 土等 63, がれき等 26	1.5	24	---	13	27	36	37	10.1	---	---
	関東-2	0.1	プラ 7, 土等 43, がれき等 44	1.5	10	37	* 24	41	36	42	7.7	330	12
	関東-2	15.0	プラ 6, 土等 66, がれき等 18	1.6	28	21	24	35	40	46	7.6	700	24
	関東-2	19.0	プラ 6, 土等 78, がれき等 9	1.5	30	10	19	23	40	43	5.7	---	---
	関東-3	10.0	プラ 25, 土等 63, がれき等 7	1.4	26	26	11	53	38	47	6.1	---	---
	中部-3	0.0	----	1.2	21	41	---	---	40	51	3.7	140	5
	中部-3	0.9	プラ 14, 土等 57, がれき等 25,	1.4	23	29	2	59	44	49	6.1	320	8
	中部-3	1.8	ゴム皮革 1, 金属類 1, その他 2	1.4	29	22	8	36	40	46	7.2	---	---
	中部-3	8.0	----	1.6	19	14	18	36	44	56	9.7	> 480	8
	中部-3	15.0	プラ 17, 土砂 43, がれき等 28	1.5	23	17	5	38	43	51	7.3	> 640	12
中国-1	0.3	プラ 6, 土等 59, がれき等 30	1.1	25	39	11	27	38	46	8.3	340	8	
中国-2	0.4	プラ 47, 土等 14, 繊維類 13	0.8	20	47	8	31	35	39	5.1	---	---	
海外 Land- fil	China GL-1m	7.0	プラ 22, 土・がれき等 29	1.1	39	---	6	33	---	---	4.3	---	---
	China GL-3m	7.0	プラ 9, 土・がれき等 52	1.2	45	---	4	43	---	---	3.7	---	---
	Indonesia	0.2	生ごみ (果実殻等), レジ袋等	---	72	---	---	---	36	55	5.8	---	---
	Turkey	0.6	**生ごみ 49, 容器包装 24	1.0	45	28	* 4	52	36	47	4.2	---	---
	Sri Lanka	10.0	プラ 20, 土等 53, 繊維類 18,	1.1	59	15	10	36	40	48	5.2	---	---
10cm 超 プラ非混入 平均		5.0		1.5	23	25	28	38	36	40	12.7	706	75
不法 投棄	東北-3	10.0	がれき類等 (土砂分主体)	2.0	18	---	14	17	35	37	9.2	360	59
	中部-4	0.5	がれき類主体	---	---	---	---	---	36	42	---	---	---
	九州 中腹	9.0	がれき類等 (土砂分主体)	1.4	23	---	3	45	44	50	7.8	---	---
	九州 頂上	12.0	----	1.7	---	---	18	33	---	---	12.2	---	---
震災	東北-4 (仮置場)	0.5	土等 80, がれき等 14, 木 6	1.1	40	---	11	47	40	45	4.5	---	---
安定 型処 分場	関東-4	0.3	プラ 1, 土等 74, がれき等 22	1.8	23	17	---	---	34	36	23.8	---	---
	関東-4	0.3	----	1.7	22	15	17	61	36	41	14.5	---	---
	関東-4	0.3	----	1.6	30	14	---	---	35	39	21.1	---	---
	関東-4	2.0	プラ 0, 土等 76, がれき等 21	1.5	17	16	38	55	34	37	18.1	---	---
	北陸	0.8	がわら主体	---	---	---	---	---	36	38	9.8	---	---
	中国-3	0.0	プラ 1, 土等 44, がれき等 54	1.5	20	29	---	---	34	40	6.2	---	---
	中国-3	0.1	プラ 5, 土等 12, がれき等 81	---	---	---	---	---	36	40	9.2	---	---
中国-3	10.0	プラ 0, 土等 64, がれき等 35	1.9	15	19	28	53	31	34	10.4	---	---	
管理 型処 分場	東北-5 燃え殻	0.8	燃え殻主体	1.5	22	48	45	19	36	40	14.6	---	---
	東北-5 ばいじん	0.8	ばいじん主体	1.2	32	---	---	---	36	38	19.1	565	179
	関東-5	12.0	プラ 2, 土等 85, 陶磁器等 12	1.4	---	---	> 70	0	---	---	20.0	---	---
	関東-6	0.1	プラ 8, 土等 73, 陶磁器等 10	1.2	31	49	40	50	40	42	13.3	1600	51
	中部-5 プラ多部	0.1	プラ 13, 土等 78, 陶磁器等 5	1.1	26	21	---	---	34	38	7.8	300	9
	中部-5 プラ少部	0.1	プラ 1, 土等 65, 陶磁器等 30	1.5	19	17	---	---	36	38	12.8	---	---
一廃	関西 (処分場)	40.0	焼却灰等 (土砂分主体)	1.1	14	---	---	---	36	40	6.7	---	---

注 1) \* : 現場土圧試験による粘着力, 内部摩擦角。その他は一面せん断試験による値。

注 2) \*\*: 搬入記録による値。その他は組成分析による値。

注 3) 主な組成: 各欄にはプラスチックと組成割合が高い廃棄物とその割合を示しており, 合計値は 100%にならない場合がある。

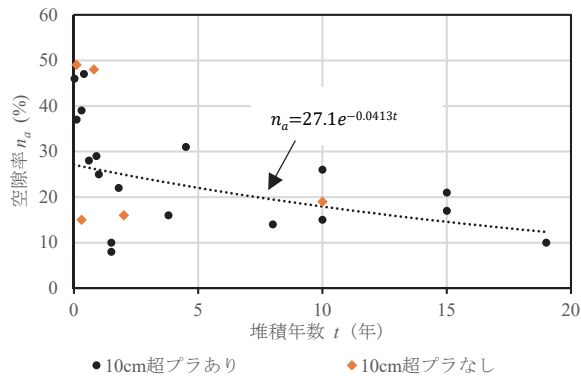


図5 堆積年数と空隙率の関係

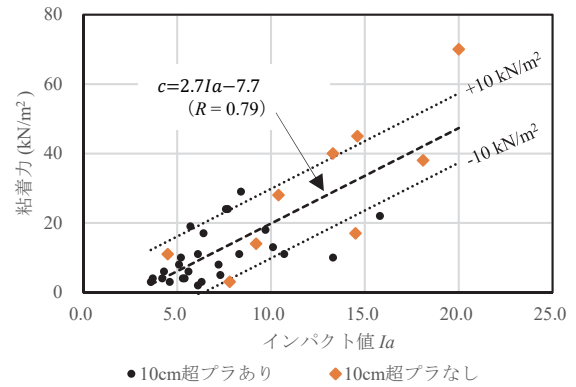


図8 インパクト値と粘着力の関係 (37箇所)

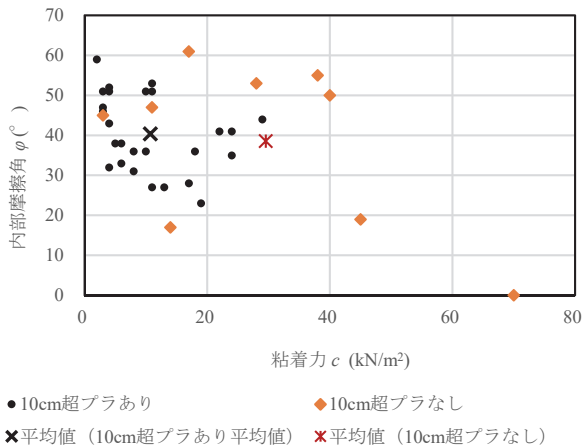


図6 廃棄物地盤での粘着力と内部摩擦角の分布

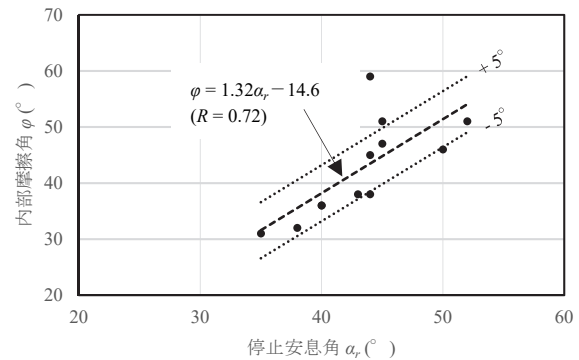


図9 停止安息角と内部摩擦角の関係 (c ≤ 10 の国内 10箇所と Sri Lanka 現場)

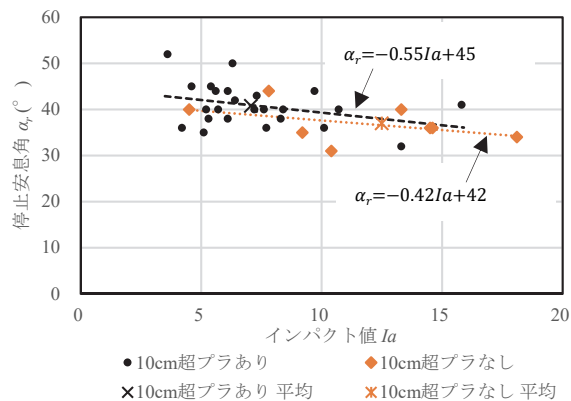


図7 インパクト値と停止安息角の分布

原因として、強度定数に影響するパラメータが表1に示したものよりも実際には多いことが考えられる。例えば、組成は表1に示した種別で重量ベースで調べているが、この他に、比重が軽いプラスチック等の長さ、面積、体積ベースの組成や、より詳細な廃棄物の種類別の組成（例えば硬度による分類等）、廃棄物種類間の構造的な位置関係等が影響している可能性がある。こうした強度定数に与える要因分析は今後の研究課題である。

(3) 廃棄物地盤のプラスチック有無別の強度特性

10cm 超プラスチック混入地盤の強度定数は概して、同

非混入地盤に比べ内部摩擦角、安息角がやや大きく、湿潤密度、粘着力、インパクト値、地盤反力係数が小さい。

表1で、10cm 超プラスチック混入地盤の支持力については、地盤反力係数は小さいものの極限支持力は堆積時間が3年程度以上経過した地盤では10cm 超プラスチック非混入地盤と同等の値を示している。同様の廃棄物組成で堆積時間別のデータがとれている中部-3現場をみると、堆積時間が長くなるに従って空隙率が減少し、粘着力、インパクト値、極限支持力、地盤反力係数が高まっている。また、北海道現場で重機走行している地盤のインパクト値は非走行部より高い。埋立当初は柔らかな地盤が形成されるものの時間経過や締固めにより地盤強度が次第に高まっている。長尺のプラスチック混入地盤は埋立当初は柔らかい地盤が形成されるものの、時間経過や締固めにより空隙が減少し極限支持力が増す。

10cm 超プラスチック非混入地盤については、長尺物が存在しないことと、破碎されがれき、陶磁器や土等の混入割合が高いことから、粒径の大きい土砂地盤と類似した強度特性を示している。このため、地盤強度試験や斜面安定解析では、既往の土質工学に基づく手法の適用が可能と考えられる。

(4) 地盤強度 (インパクト値) のばらつき

表1に示したインパクト値は一面せん断試験や安息角試験位置での値であるが、インパクト値はその周辺でも計

測しており、その値を図10に示す。図10には同一の地盤条件（堆積時間、埋立廃棄物種類）で20m程度間隔でインパクト値を3点以上計測している現場の値を示している。

図10では、10cm超プラスチック混入現場を太線で、そうでない現場を細線で示している。図10で、10cm超プラスチック混入現場のインパクト値は概して非混入現場よりも値が小さく、かつ測点間のばらつきが小さくなっている。インパクト値は廃棄物地盤では試験器周辺の廃棄物種類（がれき、木くず、プラスチック等）の違いにより、ばらつきが大きくなることが考えられるが、10cm超プラスチック混入現場では堆積した長尺プラスチックによる特性が支配的になり、埋立地の種類（不法投棄、安定型処分場、海外Landfill）に関係無くインパクト値が一様に小さく、かつ、ばらつきも小さくなっているものと考えられる。

(5) 10cm超プラスチックの影響確認試験

10cm超プラスチックの強度特性等へ与える影響を調べることを目的に、東北-1現場で埋立直後の廃棄物750kgを採取し、ふるい分けにより10cm超プラスチックを分別し、均等混合した後に、順次、10cm超プラスチックの混入率が0%、5%、10%、20%になるように試料を作成し、安息角試験、インパクト値計測を行った<sup>12)</sup>（図11）。インパクト

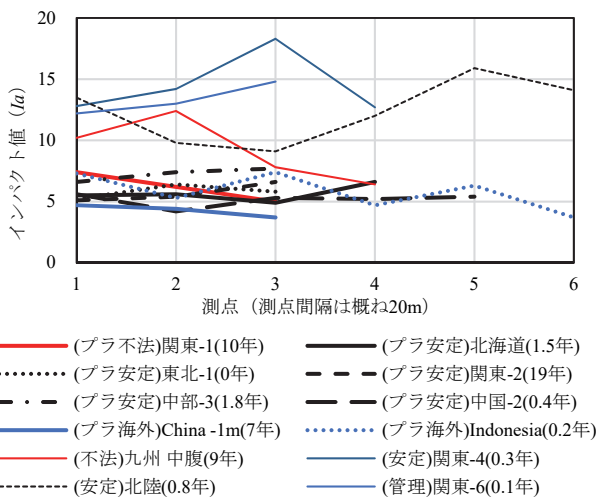


図10 インパクト値の測点間のばらつき



図11 10cm超プラスチック混入率別の安息角試験  
(左から、混入率0%、5%、10%、20%)

表2 10cm超プラスチック混入率別の安息角，インパクト値

ケース	10cm超プラ混入率 (%)	限界安息角 (°)	停止安息角 (°)	インパクト値 Ia
ケース①	0	49	40	4.2
ケース②	5	52	42	3.9
ケース③	10	58	42	3.8
ケース④	20	62	44	3.6

ト値は、試料をドラム缶に70kg投入し層厚低下がみられなくなるまで突き固めて計測した。表2に試験結果を示す。

表2では、10cm超プラスチックの混入率の増加に伴い限界安息角、停止安息角が増加しており、斜面安定性が高まることが窺える。インパクト値は逆に10cm超プラスチックの混入率の増加に伴い減少しており、10cm超プラスチック混入により柔らかい地盤が形成されることが分かる。

2.4 引張抵抗

埋立地では、廃棄物はダンプトラックから1台毎に投下され、締固めが進むように厚さ10cm程度の薄層毎に埋立が進められることから、長尺のプラスチック等のシート状物や線状物は水平方向に卓越して堆積する。不法投棄現場においても、一定の土地により多くを投棄したいという目的は同じであることや、ダンプトラックからの投下により柔らかい長尺物は基本的に鉛直方向に立ち上がりにくいことから、同様の堆積状態になっている。この結果、これらの長尺物による水平方向の引張抵抗力が働く。

引張抵抗力を調べるために図12に示す引張試験機を作成して引張試験<sup>1)</sup>を行った<sup>13)</sup>。引張箱は幅50cm、奥行50cm、高さ50cmの箱を2つ連結させたもので、2つの箱共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った。

引張試験で引張抵抗力は図13に示すPのように働く。図13の鉛直面に働く引張抵抗応力(Z)を求めると(2)式のように表すことができる<sup>14)15)</sup>。

$$Z = \frac{c}{b} \tan \zeta \leq Z_{max} \tag{2}$$

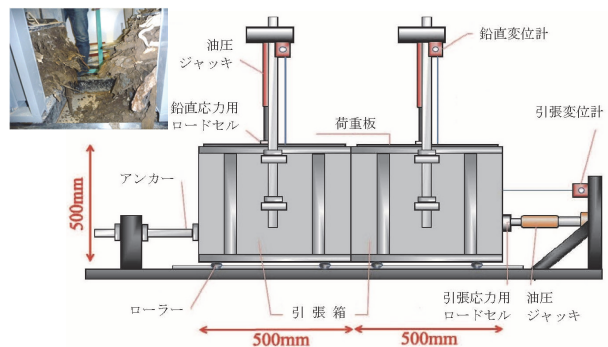


図12 引張試験機と試験後の状況 (左上)

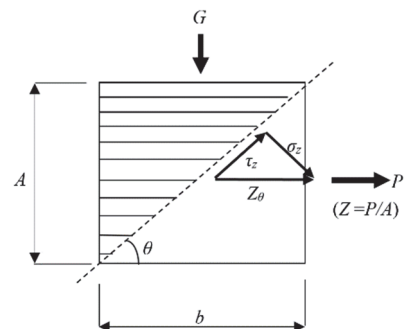


図13 引張試験で崩壊面に働く引張抵抗力

ここに、 $Z$ :鉛直面に働く引張抵抗応力 ( $\text{kN/m}^2$ ),  $G$ :上載圧 ( $\text{kN/m}$ ),  $b$ : 載荷幅 ( $\text{m}$ ),  $\zeta$ : 引張抵抗角 ( $^\circ$ ),  $Z_{\text{max}}$ : 引張試験から求まる最大引張抵抗応力 ( $\text{kN/m}^2$ ) である。

試験には関東-1 現場 (図 1 左上: 高さ 11.9m, 勾配  $90^\circ$  の廃棄物地盤で約 1m 幅の薄層崩れが生じたがその後は直壁を保った) から採取した試料を用いた。ランマーを使用するの突き固めが難しいため、廃棄物を詰め上載圧  $20 \text{ kN/m}^2$  を 10 分程度かけるといふ過程を 3 回にわけて行う供試体作製方法により現場と同様の密度  $0.95 \text{ g/cm}^3$  程度の供試体を作製した。上載圧  $50, 100, 150, 200 \text{ kN/m}^2$  の 4 条件で試験を行い、引張速度は  $1 \text{ mm/min}$  とした。

試験により計測した引張抵抗応力と上載圧から、 $\zeta = 18^\circ$ ,  $Z_{\text{max}} = 75 \text{ kN/m}^2$  (上載圧  $200 \text{ kN/m}^2$ ) が得られた。

図 13 で崩壊面 (点線部) に沿う引張応力  $\tau(z)$  には、せん断抵抗  $\tau_z$  の他に引張抵抗応力  $Z_\theta$  による鉛直力  $\sigma_z$  により追加的な摩擦抵抗  $\tau_R(z)$  が生じる。

$$\begin{aligned} \tau(z) &= \tau_z + \tau_R(z) = Z \sin \theta \cos \theta + \sigma_z \tan \phi \\ &= Z \sin \theta \cos \theta + Z \sin^2 \theta \tan \phi \\ &= Z \sin \theta (\cos \theta + \sin \theta \tan \phi) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $\theta$ : 崩壊面勾配 ( $^\circ$ ),  $\phi$ : 内部摩擦角 ( $^\circ$ ) である。

(3)式で内部摩擦角に  $10 \text{ cm}$  超プラスチック混入現場の代表値として  $\phi = 35^\circ \sim 40^\circ$  をとると、(4)式に近似する<sup>14)15)</sup>。

$$\tau(z) = Z \sin(1.5\theta) \quad (4)$$

(4)式から引張抵抗は崩壊面 (すべり面) に対しては異方性があり崩壊面勾配が  $60^\circ$  で最大となり水平の場合には働かない。したがって、実斜面にあてはめると、急勾配の堆積地では引張抵抗が斜面安定に大きく寄与するが、水平に近い崩壊面を考える場合には寄与しないと言える。

また、中部-3 現場で実規模の載荷実験を行い、不同沈下がほとんど生じない結果<sup>7)</sup>を得たが、このことも水平方向に働く引張抵抗が寄与したものと考えられる。

### 3. 廃棄物地盤の雨水浸透特性

#### 3.1 浸透経過確認実験

プラスチックが混入した廃棄物層中の水の流れを目視するために、アクリル板付きの土槽を用いた浸透経過確認実験<sup>11)</sup>を行った。

一側面がアクリル板の  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  の土槽に中部-3 現場試料を充填し、雨に見立てた一定量の水を 2 個のじょうろで注水し、アクリル板側からビデオ撮影することにより、土槽中の廃棄物層中の水の流れを観測した。土槽中の廃棄物密度は  $0.81 \text{ g/cm}^3$ , 廃棄物層の空隙率は  $51\%$  で、注水は  $15 \text{ mm}(15 \text{ L})$  を 30 分間で均等に注水した。

注水 10 分後、30 分後、20 日後の画像を図 14 に示す。水の浸透に凹凸はあるが、特定の水みちだけを流下するのではなく、シート状の廃棄物が水平方向に卓越して堆積している廃棄物層中を、時間経過とともに水平方向全体にも徐々に浸透が進んでいる。水の到達は、10 分後は最深  $0.07 \text{ m}$ , 30 分後は最深  $0.15 \text{ m}$  である。この流下速度は、それぞれ  $1.2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ,  $0.8 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  で、時間経過とともに

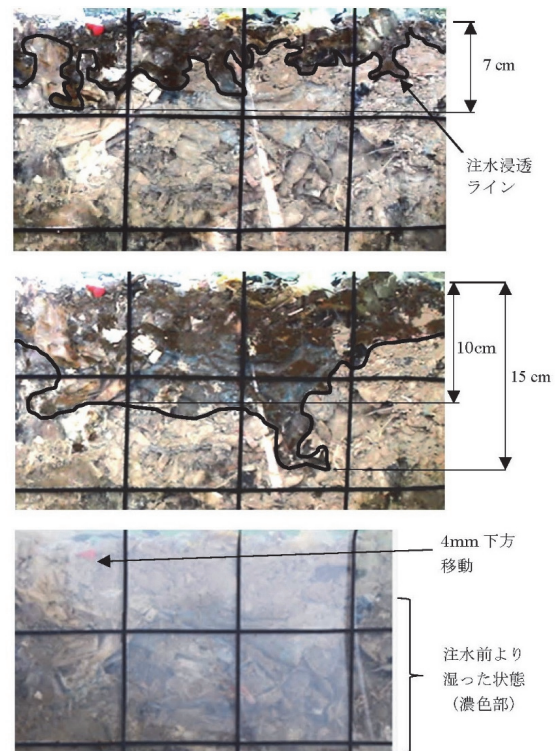


図 14 浸透経過確認実験  
(上: 注水 10 分後 中: 注水 30 分後 下: 注水 20 日後)

(下層側ほど) 流下速度が遅くなっている。30 分間でみると、平均的な浸透深  $100 \text{ mm}$  の中に空隙は高さ換算で  $51 \text{ mm}$  ( $=100 \text{ mm} \times 51\%$ ) あるのに対し、注水量は  $15 \text{ mm}$  と空隙に対して十分小さく、水は層中を不飽和の状態では流下している。注水 20 日後の図 14 下図では、左上の赤色三角形小片が図 14 上図に比べ  $30^\circ$  程度左回転し、下端位置は約  $4 \text{ mm}$  下方移動しており、この実験でも降水による沈下がみられた。画像からは、水の流下によりプラスチック等の廃棄物の配列を崩す様子は確認できなかったことから、 $15 \text{ mm}/30 \text{ min}$  程度の水勢では沈下は廃棄物の配列を維持した状態で進むことが窺えた。また、注水 20 日後においても、土槽の中下層では注水前よりも湿った状態にあることが目視でき、水の一部はプラスチック等の屈曲により生じる凹部等に長時間溜まることが確認できた。

#### 3.2 大型カラム試験等による浸透速度計測

大型カラム試験<sup>11)</sup>で用いたカラムは内径  $56.7 \text{ cm}$ , 高さ  $89 \text{ cm}$  のドラム缶大の鉄製容器を基本として、底面中心に排水口 ( $\phi 5 \text{ mm} \times 15$  穴) を設けて、注水量に対して十分な排水性能を有している。また、層厚と浸透速度の関係を見るために高さを 2 倍としたカラムも用いた。大型カラムへの充填試料は、表 1 に示した現場の中から採取したもので、充填密度は概ね採取現場と同等になるようにしている。比較のために試料を山砂 (購入土) としたケースも行った。注水量は  $50 \text{ mm}/30 \text{ min}$  を基本とした。

異方性を調べるケースは、現場での廃棄物埋立に近いように高さ  $10 \text{ cm}$  ずつ同じ 2 つの容器 ( $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ) に試料を同時に充填し、一方の容器を  $90^\circ$  回転させて注水す

ることにより浸透の異方性を調べた。

試験結果を表3に示す。注水開始からカラム底面からの排水開始までの時間は、同等の試料厚でみると廃棄物試料は山砂の1/4程度となっている。しかし、層厚を2倍近くにしたケース（関東-2試料(6)）では排水時間は標準ケース（同(1)）の約6倍になった。

注水量を2倍の100mm/30minとしたケースや廃棄物サイズを小さくしたケースでは排水開始時間が標準ケースより短くなった。緩詰め試料や再注水したケースでは排水開始時間に顕著な差は無かった。

廃棄物試料は空隙が大きいため表層付近での浸透速度は大きいですが、プラスチック等のシート状物が層中に存在する場合には、浸透水は層中で図15のようにシート状物の表層等に貯留しながら流下するため、カラムが長くなるに従い流下速度が遅くなることが考えられる。このことは、図14や、表3の排水開始時間が標準ケース(1)の値に比べ試料の最大長を短くしたケース（under 100mm）で早まっていることから推察される。

浸透の異方性については、90°回転させたケースの排水時間は無回転ケースの1/5以下になっており、水平方向に卓越して存在するシート状物等が浸透を阻害することにより、浸透には強い異方性があることが分かった。

### 3.3 廃棄物地盤での雨水浸透状況

長尺のプラスチック等のシート状物や線状物が多く埋め立てられている現場の雨水浸透状況を中部-3現場で

2015年4月1日から2016年7月31日まで現場計測により調べた。

中部-3現場は、面積約7.5万m<sup>2</sup>、埋立深さ約30mの安定型処分場で、末端に排水井戸を設置しポンプ排水を行っている。図16に中部-3現場での調査期間中の累積降水量、累積ポンプ排水量と排水井戸の水位変動を示す。図16は降水量、排水量、井戸水位を同じ単位（1000mm,m）で示すため、排水高として排水量を処分場面積で除した値を示している。井戸水位は対象期間の初期水位を0mとしたもので、この位置は処分場の埋立底面から概ね1~2m高い。地下水位は埋立底面の上1mの位置にあることが処分場管理者による試掘で確認されている。図16から、日々の降水量に変化がある中で、排水量は期間中概ね一定している（図16で累積排水高の勾配がほぼ一定）にも関わらず、井戸水位の変動は小さい。また、まとまった降雨後の井戸水位の上昇は1ヶ月程度遅れて現れている。なお、排水はポンプにより基本的に平日に概ね60~80m<sup>3</sup>/日（1.6~2.0mm/日）行って休日（土日祭日、12月27日~1月7日）は排水していない。このため、図16で2015年12月末~2016年1月上旬の間に井戸水位が上昇している。

次に、表層ではない、地中の含水比を計測している東北-1現場（埋立深さ約35mの安定型処分場）、中部-3現場、China現場の深度方向の含水比変化を図17に示す。東北-1現場はボーリングにより、その他は試掘により地中の含水比を調べた。図17で東北-1現場の含水比をみると、表層近くの含水比は小さく、深度4m以下ではばらつきはあ

表3 大型カラム試験等による注水開始から排水開始までの時間と排水量

		注水前試料					注水条件		試験結果				
		試料厚 mm	湿潤密度 g/cm <sup>3</sup>	含水比 %	プラ混入率 %	空隙率 %	注水量 mm	注水時間 min	排水開始時間 min	ピーク排水量 mm/min	総排水量		
											3時間後 mm	6ヶ月後 mm	
大型カラム試験	東北-1試料	(1) 採取試料	600	1.09	36.8	14	62.2	50	30	30	0.80	24.0	----
		(2) under 100mm 試料	600	1.09	36.8	14	----	50	30	21	1.30	30.2	----
	関東-2試料	(1) 採取試料	682	1.14	20.6	13	57.6	50	30	27	0.93	21.8	40.7
		(2) 採取試料(注水 100mm)	668	1.17	20.6	13	56.8	100	30	18	3.20	70.3	89.8
		(3) under 20mm 試料	682	1.45	20.6	<13	58.0	50	30	20	1.22	33.1	53.2
		(4) 緩詰め試料	687	0.85	20.6	13	68.4	50	30	28	0.96	22.4	38.7
		(5) (1)への再注水	682	1.15	21.1	13	57.6	25	30	29	0.30	8.9	20.8
		(6) 長カラム	1,200	1.20	20.8	13	46.4	50	30	166	0.02	0.2	----
	中部-3試料	(1) 採取試料	685	1.19	27.4	14	20.3	50	30	39	0.25	14.4	37.7
		(2) 採取試料(注水 100mm)	687	1.18	27.4	14	20.6	100	30	23	3.24	62.9	87.0
(3) under 100mm 試料		676	1.30	27.4	<14	22.9	50	30	38	0.38	16.3	38.1	
	山砂（購入土）	676	1.97	6.9	0	30.2	25	30	123	0.04	0.0	12.0	
異方性試験	normal (plastics=horizontal)	1,000	0.64	22.6	29	----	60	60	525	0.002	0.0	----	
	90° rotation (plastics=vertical)	1,000	0.64	22.6	29	----	60	60	94	0.127	6.4	----	

注1) 東北-1 試料：プラスチック 14%、繊維類 18%、陶磁器類 9%、20mm 以下の土砂等 52%、その他 7%；廃棄物長 最長 150mm

注2) 関東-2 試料：プラスチック 13%、陶磁器類 44%、20mm 以下の土砂等 38%、その他 5%；廃棄物長 最長 150mm

注3) 中部-3 試料：プラスチック 14%、20mm 以下の土砂等 57%、がれき類 25%、その他 4%；廃棄物長 最長 150mm

注4) 山砂(購入土)：粒径 2-75mm：47.8%、0.075-2mm：44.1%、0.075mm 以下：8.1%、最大粒径：9.5mm、Uc：22.25、吸水率：4.1%

注5) 異方性試験試料：プラスチック 29%、がれき類 19%、20mm 以下の土砂等 52%、金属その他 12%；廃棄物長 最長 150mm

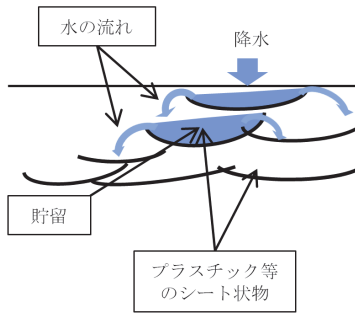


図 15 シート状物が混入した廃棄物地盤中の流れのイメージ

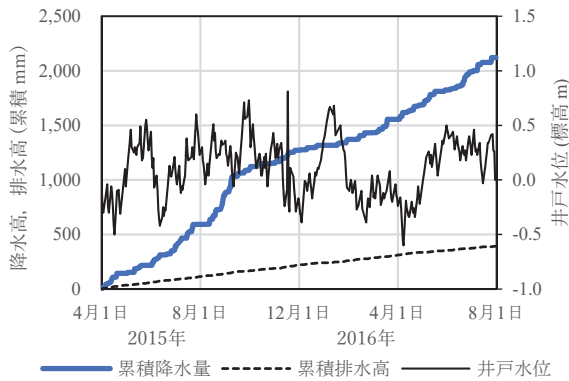


図 16 中部-3 現場の排水井戸水位の変動

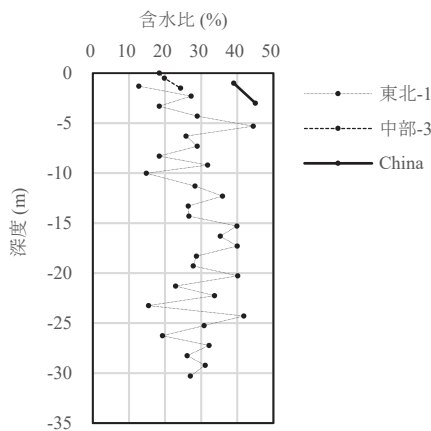


図 17 廃棄物地盤の深度方向の含水比

表 4 表層と地中部の含水比の比較 (単位: %)

	東北-1	中部-3	China
① GL.-1.5m 未満	13	19	39
② GL.-1.5m 以深 (~GL.-31m)	29	24 (GL.-1.5m)	45 (GL.-3m)
② - ①	17	5	6

るものの処分場底面近くまで含水比に顕著な傾向は現れていない。地下水位も GL.-31m まで確認されていない。また、中部-3 現場、China 現場ともに表層付近よりも GL.-1.5m~3m での含水比が高くなっている。東北-1 現場では、GL.-1.5m~31m の含水比の平均値は表層の値+17%となっている(表 4)。

### 3.4 考察

大型カラム試験では長さ 10cm 程度以上のプラスチック等が混入した試料は山砂に比べ表層付近での透水性は良いものの、カラムが長くなると排水時間はカラム長比よりも遙かに遅延した。また、浸透には異方性があることから、長尺のプラスチック等が混入した現場では、水平方向に卓越して堆積したプラスチック等のシート状物により流水が阻害され、水が屈曲したプラスチックの周り等の空隙に長時間貯留されることが窺える。安定型処分場で排水井戸水位変動が少ないこと、深度方向の含水比に顕著な傾向がみられないこと、地下水位が形成されていないことを含めて考えると、深さ方向に一樣の貯留能を有し、地下水位を形成する程の量ではない雨水がほぼ一樣に留まっていることが推察される。

また、表層付近では空隙が大きいこともあり蒸発が進み含水比が低下していることが考えられる。したがって、表層付近では廃棄物地盤の貯留能に余裕があり、豪雨時にはその雨量がほぼそのまま層内に貯留されるものと考えられる。

## 4. 廃棄物地盤の斜面安定性

長尺のプラスチック等が混入した廃棄物地盤は表 1 に示したように、通常の土砂地盤よりも内部摩擦角や安息角が大きいことに加え、水平方向に働く引張力により、高い斜面安定性を有する。また、既往研究で耐震性が高い<sup>16)</sup>ことや、地震による斜面崩壊事例が見当たらない<sup>3)</sup>ことが示されている。一方で、傾斜原地盤上の堆積地で多量降雨に関連した崩壊事例は世界中で多く報告されている<sup>12)3)</sup>。

表 1 に示した廃棄物地盤のうち、崩れやクラックが生じた現場を対象に斜面安定計算を行った。斜面安定計算は、一般的な二次元分割法と斜面上のすべりに対する適応性が高い(5)式、図 18 に示す無限長斜面法<sup>7)</sup>によった。分割法の計算は、平地上の堆積ケースでは円弧すべり法(ビショップ法)、斜面上の堆積ケースではヤンプ法により、GGU-stability version 9<sup>17)</sup>を用いて行った。また、引張抵抗角が求められているケースでは(4)式による引張抵抗を加えて計算した。(5)式の右辺第 3 項が(4)式による崩壊面に働く引張抵抗分である。計算結果を表 5 に示す。

$$F_s = \frac{c}{\gamma H \sin\theta \cdot \cos\theta} + \frac{\tan\phi}{\tan\theta} + \frac{\tan\zeta \cdot \sin(1.5\theta)}{\sin\theta \cdot \cos\theta} \quad (5)$$

ここに、 $F_s$ : 安全率、  
 $c$ : 粘着力 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )、  
 $\phi$ : 内部摩擦角 ( $^\circ$ )、  
 $\zeta$ : 引張抵抗角 ( $^\circ$ )、  
 $\theta$ : 斜面勾配 ( $^\circ$ )、  
 $\gamma$ : 単位体積重量 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )、  
 $H$ : 崩壊層高 (図 18 参照) (m) である。

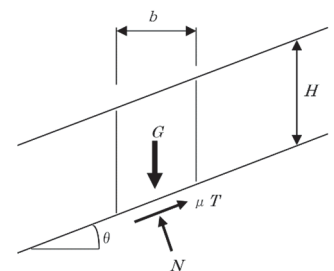


図 18 無限長斜面計算法

表5 斜面崩壊等が生じた現場での斜面安定計算結果

現場名	斜面条件					強度試験結果					分割法 強度試験値 $F_s$	無限長斜面法			
	表層 斜面 勾配 °	原地 盤 勾配 °	崩壊等 の形態	想定 崩壊 層厚 $H$ m	想定 崩壊 勾配 $\theta$ °	停止 安息 角 $\alpha_r$ °	単位体 積重量 $\gamma_t$ kN/m <sup>3</sup>	粘着 力 $c$ kN/m <sup>2</sup>	内部 摩擦 角 $\phi$ °	引張 抵抗 角 $\zeta$ °		強度 試験 値 $F_s$	$\gamma_t + 2$ $F_s$	$\gamma_t + \gamma_w'$ $F_s$	
関東-1	90	flat	薄層崩 れ	---	90	廃棄物層	50	12	3	46	18	1.08	---	---	---
中部-2	60	flat	クラッ ク発生	3	60	廃棄物層	52	9 $\gamma_w = 2.6$	3	51	---	0.96	0.97	0.92	0.91
関西	40	Inc- lined	表層崩 れ	3	40	廃棄物層	36	11	---	---	---	---	---	---	---
九州	30	20	クラッ ク発生	11	18	廃棄物層	44	14 $\gamma_w = 2.5$	3	45	---	2.63	3.14	3.13	3.13
						原地盤	---	18 (14)	60	0	---	1.28	1.33	1.16	1.13
Indonesia	40	flat	一部落 下	0	40	廃棄物層	36	---	---	---	---	---	---	---	---
Sri Lanka	45	flat	斜面崩 壊	20	45	廃棄物層	40	11 $\gamma_w = 1.5$	10	36	7	0.82	1.04	1.03	1.03
中部崩壊 現場	10	10	斜面 崩壊	24	10	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

- 注1) 想定崩壊層厚は鉛直方向の高さを示す。
- 注2) 分割法は、原地盤が傾斜している九州及び中部崩壊地ではヤンプ法により、その他はビショップ法によった。
- 注3) 無限斜面法で、原地盤上での計算は、荷重は廃棄物層の単位体積重量を用いて計算している。
- 注4) Sri Lanka の分割法による計算では、安息角試験から推測した引張抵抗 ( $\zeta = 7 \sim 9^\circ$ ) を考慮している。表中の強度定数は図 16 の①廃棄物層の値。
- 注5)  $\gamma_w'$ : 水が空隙を満たす時のその分の単位体積水重。空隙率には Sri Lanka は実測値、その他は表 1 の 10cm 超ブラあり・なしの平均値を用いた。

関東-1 現場, Sri Lanka 現場の計算結果と、参考に中部地方の大規模崩壊現場の崩壊断面を図 19 に示す。図 19 上図は高さ 11.9m の廃棄物層の直壁で、引張試験による引張抵抗角を用いて計算している。このような急勾配の崩壊面には引張抵抗の寄与が大きく安全率は 1.0 を上回り直壁が存在しうることを計算が示している。図 19 中図の Sri Lanka 現場では、強度定数に廃棄物層は現場一面せん断試験結果 (1 箇所) と衝撃加速度試験と安息角試験による推定値 (3

箇所) を用い、下層地盤はスリランカ国家建築研究所 (NBRO) による試験結果を用いて計算した<sup>2)18)</sup>。図 19 下図は、1998 年に大量降雨の際に斜面崩壊が生じた中部地方の不法投棄現場で、斜面勾配が 10°程度でも原地盤上の廃棄物層の一体的なすべりが生じ得ること示した。強度定数が不明のため実際の地盤状況を反映した計算はできないが、原地盤の強度定数にあまり高くない強度定数 (例えば、九州現場の値) を与えてヤンプ法で計算すれば、図のように原地盤上で廃棄物層の一体的なすべりが生じ得る結果になる。

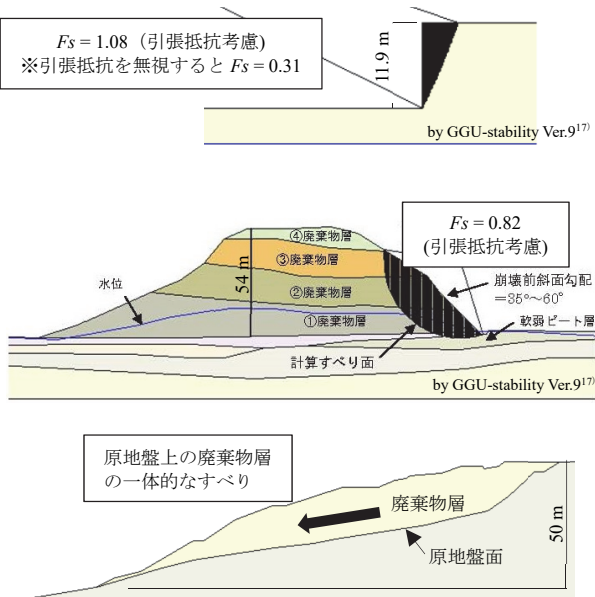


図 19 分割法による斜面安定計算結果と中部崩壊現場断面上: 関東-1 現場 (ビショップ法), 中: Sri Lanka (ビショップ法) 下: 中部斜面崩壊現場

平地での事例 (表 5 で原地盤勾配の欄に「flat」と記載した現場) をみると、いずれも表層斜面勾配が停止安息角を上回るケースで崩れやクラックが生じている。なお、表 1 に示した現場のうち平地上の堆積で斜面勾配が停止安息角以下のときは崩れやクラックは生じていない。

傾斜原地盤上の堆積地では、表層斜面勾配が停止安息角を下回る場合でも崩壊等が生じている。傾斜原地盤事例では安定計算のすべり抵抗に廃棄物層の高いせん断強度値を用いると安全率 ( $F_s$ ) が 1.0 を上回るが、原地盤の強度定数を用いると安全率が大きく低下し実態を反映する。

また、3.3 に示した表層での含水比低下を考慮して堆積層全体の含水比を表層値の 20% 増で単位体積重量 ( $\gamma_t$ ) を +2kN/m<sup>3</sup> としたケースと、豪雨時に計算断面付近で空隙が雨水で満たされたケース ( $\gamma_t + \text{空隙率} \times \text{単位体積水重}$ ) について、無限長斜面法で  $F_s$  を計算した (表 5)。このうち、傾斜原地盤のケースで原地盤の強度定数を用いたケース (表 5 の九州の 2 段目の無限長斜面法の計算値) では、自重の影響が大きく、豪雨等を想定して、単位体積重量を増

加させたケースで  $F_s$  が顕著に低下した。

これは、与えた強度定数が  $c = 60 \text{ kN/m}^2$ ,  $\phi = 0^\circ$  のため (5)式右辺第1項の寄与が大きくなっていることによるが、この他の原地盤でも一定の粘着力を有する限り類似した結果になる。

Sri Lanka 現場での崩壊事例は、沼地での過度な埋立が崩壊要因とみられており<sup>2)</sup>、図19中図の計算結果は実際の崩壊面を再現し、すべり底面は軟弱ピート層を横切っている。無限長斜面法では軟弱ピート層を考えずに計算を行っているため  $F_s$  は1.0を上回っており、このような地盤の場合には分割法による計算が必要になる。

## 5. 結論

- 1) 長尺のプラスチック等が混入した廃棄物地盤は、通常の土砂地盤に比べ、概して内部摩擦角が大きく、粘着力や地盤反力係数は小さい。また、特有の引張抵抗も働くことから、平地上の堆積地での斜面安定性は高い。
- 2) 長尺物が混入していない廃棄物地盤は、粒径の大きい土砂地盤に類似した強度特性を示す。
- 3) 長尺のプラスチック等が混入した廃棄物地盤は表層付近での透水性が高く、層の高い位置には残留水位が生じにくいものの、層中に雨水が一様に一定量貯留すると考えられ、雨水排水には長時間を要する。また、表層では蒸発等により含水比が低下しているため、斜面安定計算に表層での含水比を用いることは危険側の評価になる場合がある。
- 4) 平地に急傾斜で堆積した不法投棄等の廃棄物地盤では、斜面勾配が停止安息角を上回る場合に崩れやクラックが発生しており、停止安息角が概略的な斜面安定性の評価の目安になる。安息角試験は乱した試料による試験であり安定斜面勾配の安全側の概略評価になり得る。
- 5) 傾斜原地盤上の堆積地では、下層地盤のせん断抵抗が支配的になり、廃棄物層が持つ高いせん断強度や引張抵抗とは無関係にすべりが発生し得ることや、降雨時の雨水貯留により廃棄物層の自重が増すことが考えられ、こうしたことを考慮した斜面安定性評価が必要になる。
- 6) 長尺のプラスチック等が混入した廃棄物地盤で主に想定される斜面崩壊パターンとして、不法投棄現場等で停止安息角以上の勾配で堆積させた場合の崩れ、大量降雨に起因した傾斜原地盤上の廃棄物層の一体的なすべり、軟弱地盤上に過度に廃棄物が堆積した地盤での斜面崩壊が挙げられる。このうち、傾斜原地盤上の廃棄物層の一体的なすべりは、降雨による影響が大きく斜面勾配が  $10^\circ$  程度でも大規模崩壊が生じ得る。降雨の激甚化が進んでいる中で、とくに留意が必要である。

謝辞

本研究は、「環境研究総合推進費」2010～2012年度(課題番号 K2402)、2013～2015年度(課題番号 3K133011)、2017年度～2019年度(課題番号 3-1707)の支援を受けた。スリランカ国での強度試験は(独)国際協力機構(JICA)による現地調査団に参加し実施した。雨水浸透に関する研究支援をして頂いた大青工業(株)の他、現場試験に際し協力頂いた処分場、行政等の多くの関係の方々に厚く感謝する。

## 参考文献

- 1) Koelsch F.: Static stability of landfills, Toolkit landfill technology, chapter 4.6, pp.1-24, German geotechnical society (DGGT), 2009.
- 2) National building research organisation ministry of disaster management : Geotechnical assesment on the failure at Meethotamulla waste fill, pp.1-20, 2017.
- 3) 山脇敦: プラスチック等が混入した廃棄物層の斜面安定性等の力学特性と水挙動に関する研究, 長崎大学大学院工学研究科, pp.36-39, 2018.
- 4) 社団法人地盤工学会: 水置換による土の密度試験, 地盤調査の方法と解説, pp.579-586, 丸善, 2004.
- 5) 国立天文台, 平成26年理科年表, pp.413-414, 丸善, 2013.
- 6) Omine K., Yamawaki A., Kawasaki M., Doi Y., Sugimoto S., Nagaura B.: Estimation of strength of solid waste materials by in-situ direct shear and earth pressure tests, 7th International congress on environmental geotechnics, pp.1227-1233, Australia, 2014.
- 7) 山脇敦, 土居洋一, 大嶺聖: プラスチック等が混入した廃棄物地盤の強度特性と現場試験方法, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 73, No. 2, pp.212-223, 2017.
- 8) 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, pp.27-35, 1989.
- 9) 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, pp.1-13, 1996.
- 10) 社団法人地盤工学会: 地盤の平板載荷試験, 地盤調査の方法と解説, pp.495-504, 丸善, 2004.
- 11) 山脇敦, 土居洋一, 川崎幹生, 大嶺聖: プラスチック等が混入した廃棄物層の流出応答と沈下: 廃棄物資源循環学会論文誌, 第29巻, pp.139-151, 2018.
- 12) 産業廃棄物処理事業振興財団: 埋立廃棄物注水試験及び物理試験 研究結果報告, 大青工業(株)支援研究, pp.1-18, 2020.
- 13) 宮本真太郎, 安福規之, 大嶺聖, 山脇敦: 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, pp.491-492, 2013.
- 14) Kölsch F.: Leichtweiss-institut für wasserbau der technischen universität Braunschweig, mitteilungen heft 133/1996, Der einfluß der faserbestandteile auf die scherfestigkeit von siedlungsabfall, pp.1-158, 1996.
- 15) 不法投棄等の斜面安定性評価研究グループ: 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, pp.111-113, 2013.
- 16) Sarmahl P., Ishiguro T., Maruyama K., Xue T., Yamawaki A., Katsumi T., Takai A., Omine K., Doi Y.: Mechanical behavior of inert waste landfills under seismic condition, Journal of Material cycles and waste management, volume 24, issue 6, pp.2089-2107, 2022.
- 17) Civilserve GmbH, Steinfeld: GGU-stability version 9 user manual, pp.1-151, 2010.
- 18) Yamawaki A., Omine K., Doi Y., Matsui S.: Application of simple on-site test methods to large-scale collapse waste landfill in Sri Lanka, Proceedings of the technical forum on mitigation of geo-disasters in Asia, pp.174-175, 2019.

(2023.10.17 受付)

## Strength, infiltration characteristics and slope stability of waste ground

Atsushi YAMAWAKI<sup>1</sup>, Yoichi DOI<sup>2</sup> and Kiyoshi OMINE<sup>3</sup>

- 1 Japan Industrial Waste Management Foundation
- 2 Taiyo Soil Exploration Co. Ltd.
- 3 Graduate School of Engineering, Nagasaki University

### Abstract

Strength and permeability characteristics of waste ground mixed with plastic, debris, etc. at inert waste landfill sites and illegal dumping sites were investigated using in-situ strength tests, boring investigations, and large column tests conducted at 27 waste ground sites (49 locations) in Japan and overseas. Waste ground mixed with long plastic and other materials has high shear resistance and also has high slope stability due to its unique tensile resistance. On the other hand, for collapses that occur domestically and internationally due to heavy rainfall and in which the deposited waste layer slides on the sloping subgrade, the slip resistance of the subgrade, which generally has low shear resistance, becomes dominant. The slope stability evaluation should take into account the long-term storage of rainwater on the upper surface of the sheet-like materials in the waste layer. The slope failure patterns that are mainly assumed based on the strength and infiltration characteristics are also shown.

Key words: waste ground, strength characteristics, rainfall infiltration, angle of repose, slope stability