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

山脇 敦¹・土居 洋一²・大嶺 聖³

¹正会員 産業廃棄物処理事業振興財団 (〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町二丁目 6-1)

E-mail: yamawaki@sanpainet.or.jp

²正会員 長野県短期大学生活科学科 (〒380-8556 長野市三輪八丁目 49-7)

E-mail: doi@nagano-kentan.ac.jp

³正会員 長崎大学大学院工学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町一丁目 14)

E-mail: omina@nagasaki-u.ac.jp

産業廃棄物安定型最終処分場等のプラスチック等が混入した廃棄物地盤は、土砂地盤とは異なる強度特性を有することが現場経験的には知られているものの、強度試験法や地盤利用等に際しての解析・評価法は確立されていない。本研究では国内外 19 現場 29 箇所での現場試験により、プラスチック等が混入した廃棄物地盤は柔軟で降伏しにくい強度特性を有することを把握した。また、沈下計測と実証载荷実験により、こうした地盤は沈下しやすい反面、不同沈下は発生しにくいことを確認し、その要因として廃棄物の水平方向の繋がりにより荷重を広範囲で受けることが推察された。提案した試験法について、衝撃加速度試験、安息角試験により粘着力、内部摩擦角、極限支持力が推定できたとともに、現場空隙試験による空隙率が各種強度定数と関係することが窺えた。

Key Words: waste landfill, repose angle test, impact bearing test, void test, bearing capacity

1. はじめに

プラスチック等が混入した廃棄物地盤は、わが国の廃棄物排出量の約 9 割を占める産業廃棄物により構成されることが多く、産業廃棄物安定型最終処分場、廃棄物処理法政令第 269 号(平成 9 年)の施行前に設置された許可又は届出の対象外の小規模最終処分場、不法投棄支障除去現場等、数多く存在する。

プラスチック等が混入した廃棄物地盤については、不法投棄等現場を対象とした既往研究^{1), 2), 3)}で、プラスチック等の繊維状物等によって働く引張抵抗⁴⁾と、大小の廃棄物の噛み合わせ等から生じる大きな摩擦抵抗を有し、斜面安定性が極めて高いことを把握した。しかし、このような廃棄物地盤は、研究者や建設事業者からフワフワで使えないとの見方をされることが多く、処分場等での重量構造物設置による地盤利用はほとんどなされておらず、強度特性も十分には把握されていない。

本研究は、廃棄物の個々のサイズが土砂に比べて格段に大きく既往の土質試験法の適用が困難であるプラスチック等が混入した廃棄物地盤を対象に、

種々の強度特性の把握と有効な力学試験法を提案することを目的とする。

2. 研究方法

(1) 研究方法の概要

地盤利用や斜面安定性の評価の際に必要なせん断強度、支持力、沈下特性を把握することを目的に、現場一面せん断試験(または現場土圧試験)⁵⁾、地盤の平板载荷試験⁶⁾(JGS1521-2003)、沈下板を用いた沈下計測⁷⁾(JGS1712-2003)、不同沈下に関する実証载荷実験を行った。また、廃棄物地盤では組成のばらつきを危惧され、試験数が多くなることが想定されるため、簡易で安価な試験法が求められる。このため、せん断強度の簡易試験法として、既存の衝撃加速度試験^{8), 9)}と提案した安息角試験¹⁰⁾の有効性を調べた。さらに、地盤強度や沈下量に影響すると考えられる地盤中の空隙量を調べるための現場空隙率試験を提案し実施した。

表-1 実験現場一覧

区 分	現場 種類	現場名	堆積 時間 年	主な組成(重量比)	湿潤 密度 g/cm ³
10cm 超の プラ あり	安定 型処 分場	東北A1	3.8	*プラ54%, 陶磁器がれき等45%	1.4
		関東A1	0.1	プラ7%, 土等43%, 陶磁器類44%	1.5
			15.0	プラ6%, 土等66%, 陶磁器類18%	1.6
			0.0	プラ14%, 土砂57%, がれき類 25%, ゴム皮革1%, 金属類1%, その他2%	1.2
		0.9	1.2		
		1.8	1.4		
		8.0	1.6		
		15.0	プラ17%, 土砂43%, がれき類28%	1.5	
	不法 投棄	中国A	0.3	プラ6%, 土等59%, 陶磁器類30%	1.1
		関東C1	10.0	プラ16%, 土陶磁器等74%, 金属4%	1.2
		中部C1	1.5	プラ6%, がれき類50%, 土等35%	1.2
			1.5	(頂上部)上記よりプラスチック多	0.9
		中部C2	13.0	*プラ50%, がれき等13%	0.7
中部C3	0.5	がれき類主体(プラ少)	---		
10cm 以下 プラ あり	管理 型処 分場	関東B1	0.1	プラ8%, 土等73%, がれき類10%	1.2
		中部B	0.1	プラ13%, 土等78%, 陶磁器類5%	1.1
			0.1	プラ1%, 土等65%, 陶磁器類30%	1.5
		震災仮置場 東北	0.5	土等80%, がれき類14%, 木6%	1.1
プラ なし	管理 型処 分場	東北B	0.8	燃え殻	1.5
			0.8	ばいじん	1.2
		関東B2	12.0	土・燃え殻等85%, がれき類12%	1.4
	不法 投棄	東北C	10.0	がれき類等(土砂分主体)	2.0
		九州C中腹	9.0	がれき類等(土砂分主体)	1.4
		九州C頂上	12.0	がれき類等(土砂分主体)	1.7
		一廃処分場 関西D	40.0	焼却灰等(土砂分主体)	1.1
海外 10cm 超プラ あり	埋立 地	上海GL-1m	7.0	プラ22%, 土陶磁器等29%	1.1
		上海GL-3m	7.0	プラ9%, 土陶磁器等52%	1.2
		ジャカルタ	0.2	生ごみ(果実殻等), レジ袋等	---
		トルコ	0.6	*生ごみ49%, 容器包装24%	1.0

注) 主な組成の「*」は、搬入記録による値。(他は組成分析の値)

図-1 現場一面せん断試験器と実施状況(関東A1現場)

(2) 試験現場

現場試験は、2010～2015年度の6年間に、プラスチック等が混入した廃棄物地盤14現場と、比較のためプラスチック等を含まない廃棄物地盤5現場で実施した。内訳は、安定型処分場4現場(場内で埋立年数等が異なる場所を含めた全9箇所)、産業廃棄物不法投棄現場6現場(同8箇所)、管理型処分場4現場(同6箇所)、一般廃棄物処分場1現場、震災廃棄

物仮置場1現場、海外埋立地3現場(同4箇所)の計19現場(同29箇所)である(表-1)。このうち、中部A1現場(安定型処分場)は、ほぼ同一の組成で埋立時期の異なる複数の区画を有していることから、5箇所での強度試験と沈下計測、実証载荷試験を行った。なお、現場試験は現場毎のニーズ(地盤利用、斜面安定性評価等)に合わせて行った場合があり、現場によって試験項目が一部異なる。

(3) 現場一面せん断試験, 現場土圧試験

現場一面せん断試験を12現場(17箇所)、同試験の簡易試験法である現場土圧試験を5現場で行って、せん断強度を調べた。

廃棄物地盤での現場試験用に改良した一面せん断試験器を図-1に示す。せん断箱の寸法は幅30cm、奥行30cm、高さ15cmである。廃棄物地盤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。

現場土圧試験(図-2)は、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 , ϕ)を推定することを目指したものである。杭と地表面が傾斜する一般的な場合、図-2に示すクーロン土圧の考え方を適用できるものと仮定し、この時の受働土圧の合力 P と杭を倒す時の力 T のモーメントの釣り合い式から強度定数が推定される。現場土圧試験から推定される粘着力および内部摩擦角は、現場一面せん断試験から得られる粘着力および内部摩擦角とそれぞれ正の相関関係があることが示されている¹¹⁾。そのため、時間的な制約で現場一面せん断試験ができない場合は、現場土圧試験で強度定数の概略値を求めることができる。

(4) 平板载荷試験

地盤の平板载荷試験(図-3)は、安定型処分場4現場(8箇所)、管理型処分場3現場、不法投棄現場1現場の計8現場(12箇所)で行った。平板载荷試験では沈下が急激に増加し沈下軸と平行になる载荷圧力が極限支持力とされるが、このような現象が生じなかった場合には载荷板径の10%の沈下量のときの载荷重が極限支持力とされる⁶⁾。プラスチック等が混入した廃棄物地盤は変形しやすいことから通常の土砂地盤に用いられる载荷板径300mmではすぐに沈下量が30mmに達してしまい、極限支持力が過小に評価される可能性がある。このため、出来るだ

図-2 現場土圧試験のモーメント釣合い図と実施状況(東北B現場)

図-3 平板载荷試験(左:中部A1, 右:関東B1現場)

け大きな載荷板を用いることが望ましいが、本研究では反力に現場で調達可能な重機(0.7 m³級バックホウ:重量約16t等)を用いたため、この反力の範囲で載荷圧-沈下量の関係が把握できるよう、事前の急速載荷試験結果等をもとに載荷板径を選定した。

(5) 衝撃加速度試験(キャスポル)

土地盤を対象とした簡易支持力測定法であるキャスポル^{8),9)}(図-4左)は、衝撃加速度法に着目して国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所が開発したもので、廃棄物地盤の強度評価にも有効である可

能性があり、18現場(28箇所)で試験を行った。

キャスポルは、直径50mm、質量4.5kgのランマーを高さ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インパクト値(Ia)として表示する。土地盤での多くの試験結果からインパクト値と各種強度定数との関係式が提示されているが、廃棄物地盤は物性が異なりこれらの関係式を用いることができないため、廃棄物地盤での関係性を調べた。

また、衝撃加速度試験(キャスポル)の廃棄物地盤中での影響範囲(計測結果に影響を及ぼす水平及び鉛直範囲)を調べた。水平方向の影響範囲は、深さを20cm(一般的な土砂地盤での影響範囲)に固定し、地盤中に40cm×40cmから10cmピッチで120cm×120cmまでの穴を掘り(図-4中)、各々廃棄物を一定密度(0.938 g/cm³)で穴の中に充填し、衝撃加速度試験を実施した。鉛直方向の影響範囲は、1m×1m×1mの土槽を用いて、一定密度(0.938 g/cm³)の廃棄物の厚さを10cmから47cmまで変化させて、高さ10cm毎に衝撃加速度試験を実施した(図-4右)。実験には10cm以上のプラスチック等が混入した中部地方の安定型処分場(中部A1現場)から採取した試料を用いた。

さらに、廃棄物地盤内の衝撃の伝搬の仕方を調べるため、アクリル板付き土槽中で衝撃加速度試験を行って、錘の地盤衝突前後のビデオ画像を撮影し、アクリル面側の個々の廃棄物の動きを調べた。

(6) 安息角試験

廃棄物地盤での安息角試験は、斜面の安定勾配の把握等を目的に新たに考案したもので、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、18現場(26箇所)で試験を行った(図-5)。

従来の研究¹²⁾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

図-4 衝撃加速度試験(キャスポル) 左から 中部C1現場、影響範囲確認用の試料充填穴、槽内での実施状況

図-5 安息角試験 左：中部 A1, 右：東北 B (燃え殻)

図-6 安息角試験例 (中部 A1 現場 1.8 年経過地盤)

図-7 現場空隙率試験の方法

を、停止安息角は限界安息角を越える斜面で生じる崩れが停止した時の斜面角としている。本研究では試験試料と廃棄物地盤の連続性を考慮して廃棄物が露呈した水平な地盤上に底面寸法が3m×3mの金属製の枠を設置して、試験直前に周辺で掘削して得られた廃棄物を用いて、金属製枠内で安息角を調べた。停止安息角はバックホウ・バケットの手前側(図-5左写真の右法)の崩れが停止した時の斜面角をみた。これは、バックホウ・バケットで廃棄物を撒きこぼすとバケット手前側が廃棄物が滑り落ちやすいため若干勾配が緩くなり、これが崩れ後の勾配とみ

なせることによる。また、容量0.45 m³バケットでは、バケット杯数(撒きこぼし杯数)で3~4杯目以降(廃棄物の山の高さは概ね1.0~1.5m)に値が安定してくることを確認しており、4杯目以降の値から停止安息角を求めた(図-6)。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。また、試料中の水分による影響を避けるために、降雨時や大雨後は避けて試験を実施した。

(7) 現場空隙率試験

廃棄物地盤中の空隙率については、現場で容易に計測する方法が確立されていないため、水置換による土の密度試験方法¹³⁾(JGS1612-2003)の実施後に掘削試料(50kg程度)を水(0.15 m³程度)の入った断面積一定のドラム缶大の容器(内径567mm、高さ830mm)に投入し、掘削容積と実容積(水位上昇分)の比から地盤の空隙量を概略的に調べる方法(図-7)を考案して、8現場(15箇所)で空隙率を測定した。空隙率(空気空隙率; n_a)は、式(1)から求まる。

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

V : 土の密度試験の掘削容積(掘削孔の内径60cm、深さ40cm程度)

V_{s+w} : 容器中での水位増分(Δh)から求まる試料の実容積

Δh : 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

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¹⁴⁾ = $100 \sim 200 / 10^{-6} \text{K}^{-1}$)等は、求める精度に比べ小さく無視している。

中部 A1 現場・堆積後1年地盤で現場空隙率試験を実施して得られた試料実密度は2.02 g/cm³で、同現場からの採取試料を用いた室内試験(土粒子の密度試験^{15), 16)}による実密度2.14 g/cm³との比は、94.4%である。室内試験値が若干大きい原因として、現場空隙率試験で十分に気泡が除去されていないことが考えられる。一方、現場空隙率試験で用いる試料重量は50 kg程度で土粒子の密度試験の200倍程度ある。このため、現場空隙率試験は、空隙率を高精度で測定するものではないが、地盤圧縮の進行状況等の概略把握のために活用できる簡易で巨視的な試験法になっている。

(8) 沈下計測

中部地方の安定型処分場(中部 A1 現場)で、沈下板を用いた地表面沈下量測定方法により、現場での

水準測量で調べた。

図-8 沈下計測場所と沈下板設置断面図(中部A1)

図-9 コンクリート版上の載荷実験

継続的な沈下計測を行った。15年間堆積した層厚約20mの廃棄物地盤上に、2014年4月～8月に3層で高さ計9.5m(中間覆土2層計1mを含む)の埋立を行った際に、埋立3層の各上面に沈下板を設置して(図-8)、約2.5年間の継続的な沈下計測を行った。

(9) 不同沈下に関する実証載荷実験

廃棄物地盤の利用に際しては、廃棄物の不均一性に起因した不同沈下に対する懸念が建設事業者等から指摘されている。このため、実規模レベルで不同沈下の発生状況を調べる実証載荷実験を行った。

中部地方の安定型処分場(中部A1現場)の覆土上(1.5m厚の表層覆土を1m掘削した位置)に、コンクリート版(八角形:径7m, 厚さ1m)を設置し、大型土のうにより偏心荷重をコンクリート版に作用させ、不同沈下の発生の有無を調べた(埋立終了約1.5年後, 図-9)。なお、偏心荷重には当該地盤で設置が検討されていた小型風力発電設備(ハブ高さ30m, 風車重量9.8kN, 発電容量10kW)の設計荷重¹⁷⁾を用いた。載荷実験は、常時荷重相当を約20時間作用させ、その後、暴風時荷重から同15%増までの荷重を計約2時間作用させて、不同沈下の発生状況を

3. 結果と考察

(1) セン断強度、支持力等の強度特性

現場試験結果の一覧を表-2に示す。表-2から、10cm以上のプラスチック等が混入した現場は、プラスチック等が無い地盤に比べて概して、地盤反力係数(k_v)、粘着力(c)、キャスポルのインパクト値(I_a)が小さいが、内部摩擦角や安息角は大きい。また、極限支持力も平均値でプラスチックが無い地盤を上回っている。とくに、プラスチックと残コンクリート等の混埋立がなされ徹底的な締固めが行われている東北A1現場(安定型処分場)では極限支持力が2000 kN/m²以上ある。

10cm以下のプラスチック等が混入した地盤の各強度定数は、10cm以上のプラスチック等を含む地盤とプラスチック等が無い地盤の中間的な値を示すが、安息角はプラスチック等が無い地盤とほぼ同様に小さい(図-10)。

海外の埋立地は、わが国の10cm以上のプラスチック等が混入した現場に近い強度定数を示すが、生ごみ主体の埋立のため含水比は遙かに大きい。わが国の廃棄物処分場や不法投棄等現場で大規模斜面崩壊の発生はほぼ皆無なのに対し、海外の埋立地で大規模斜面崩壊が頻発しているのは、主としてこの地盤中の水分量の差に起因していると考えられる。

次に、平板載荷試験の載荷圧力-沈下量曲線を図-11に示す。ばいじんで形成された東北B現場を除いて、載荷圧を増しても急激な沈下の進行は生じておらず、実際の極限支持力はさらに大きい可能性がある。このうち、反力不足により試験を終え、実際の極限支持力がより大きいことが明らかな現場は、東北A1現場、中部A1現場8年、15年堆積地盤、東北C現場であり、これら以外の現場では載荷板径の10%の沈下量で極限支持力が決められている。

(2) 沈下計測結果

中部A1現場での沈下量計測結果を図-12に示す。沈下は埋立初期や上層埋立や覆土がなされた際に大きく進んでいる。また、表-3から新規埋立終了後から表層覆土開始前の321日(約0.9年)間に新規埋立1層目は344mm, 2層目は58mm, 3層目は53mm層厚が減少し、下層ほど減少量が多い。したがって、埋立初期の沈下の主要因は載荷重と考えられる。埋立終了約2年後の636日から170日間(約0.5年)の新規埋立1～3層の層厚変化量は計4mmで沈下量

表-2 19 現場 29 箇所での現場力学試験結果

区分	現場名	堆積時間 年	含水比 %	空隙率 %	極限支持力 kN/m ²	地盤反力係数 MN/m ³	粘着力 kN/m ²	内部摩擦角 °	停止安息角 °	限界安息角 °	キャスボル Ia
10cm以上のプラあり	東北A1	3.8	42	16	>2000	111	22 *	41 *	41	51	15.8
	関東A1	0.1	10	37	330	12	24 *	41 *	36	42	7.7
		15.0	28	21	700	24	24	35	40	46	7.6
	中部A1	0.0	21	41	140	5	---	---	40	51	3.7
		0.9	23	29	320	8	2	59	44	49	6.1
		1.8	29	22	---	---	8	36	40	46	7.2
		8.0	19	14	>480	8	18	36	44	56	9.7
		15.0	23	17	>640	12	5	38	43	51	7.3
	中国A	0.3	25	39	340	8	11	27	38	46	8.3
	関東C1	10.0	31	---	---	---	3	46	50	60	6.3
	中部C1	1.5	21	---	---	---	4	51	45	53	5.4
		1.5	13	---	---	---	3 *	51 *	52	58	3.6
	中部C2	13.0	17	---	---	---	3 *	47 *	45	55	4.6
	中部C3	0.5	---	---	---	---	---	---	36	42	---
	平均	5.1	23	26	619	24	11	42	42	50	7.2
10cm以下のプラあり	関東B1	0.1	31	49	1600	51	40	50	40	42	13.3
	中部B	0.1	26	21	300	9	---	---	34	38	7.8
		0.1	19	17	---	---	---	---	36	38	12.8
	東北E	0.5	40	---	---	---	11	47	40	45	4.5
	平均	0.2	29	29	950	30	26	49	38	41	9.6
プラなし	東北B	0.8	22	39	---	---	45	19	36	40	14.6
		0.8	32	38	565	179	---	---	36	38	19.1
	関東B2	12.0	---	---	---	---	>70	0	---	---	20.0
	東北C	10.0	18	---	>360	59	14	17	35	37	9.2
	九州C中	9.0	23	---	---	---	3	45	44	50	7.8
	九州C上	12.0	---	---	---	---	18	33	---	---	12.2
	関西D	40.0	14	---	---	---	---	---	36	40	6.7
	平均	12.1	22	39	463	119	20	23	37	41	12.8
海外10cm以上のプラあり	上海-1m	7.0	39	---	---	---	6	33	---	---	4.3
	上海-3m	7.0	45	---	---	---	4	43	---	---	3.7
	ジャカルタ	0.2	72	---	---	---	---	---	36	55	5.8
	トルコ	0.6	45	28	---	---	4 *	52 *	36	47	4.2
	平均	3.7	50	28	---	---	5	43	36	51	4.5

注) 粘着力, 内部摩擦角の「*」は, 現場土圧試験による値。
(他は一面せん断試験による値)

図-10 廃棄物地盤分類別の限界安息角

は急減している。しかし, 年換算で 8 mm の層厚変化があることや, 下層の 15 年経過地盤(層厚約 20m)でも年換算で 12 mm の沈下が生じていることから, 当該処分場のような長尺のプラスチック等が混入した廃棄物地盤では, 長期間沈下が継続することが推察される。なお, 沈下板設置位置から約 30m 離れた地点に設置した実証載荷実験用のコンクリート版も表層とほぼ同じ沈下量を示した(図-12)。

(3) 空隙率と強度, 沈下量との関係

a) 各種強度定数と空隙率の経年変化

10 cm 以上のプラスチック等が混入した中部 A1 現場(安定型処分場)での堆積時間と各種強度定数と空隙率の関係を図-13 に示す。堆積時間の経過とともに地盤中の空隙が少なくなり, 地盤の極限支持力, 地盤反力係数, キャスボルのインパクト値(Ia)が顕著に増加しており, 空隙率と種々の強度定数が関係していることが窺える。地盤の極限支持力は, 埋立終了後 1~2 年の間の増加が著しく, その後は緩やかに増加している。

b) 沈下量と空隙率の関係

中部 A1 現場の空隙率は表-2 から当初の 0.9 年間で 41% から 29% へ減少しており, この差分が沈下すると考えると, 沈下量は層厚あたり 120 mm/m (12%) となる。実際の表層(3 層目, 層厚 3 m)の 321 日間(約 0.9 年間)の層厚当たりの沈下量は表-3 から 18 mm/m (53 mm/3 m) であり, 空隙率の差から求められる沈下量の 15% しかない。要因として, 屈曲したプラスチック等が形状的に圧縮されることにより周辺の空隙も減少させて沈下が進むことが考えられる(図-23 中参照)。

(4) 不同沈下に関する実証載荷実験結果

中部 A1 現場での大型土のうによる偏心載荷実験の結果を図-14 に示す。沈下量は最大でコンクリート版の載荷側で 4 mm, 対面側で 3 mm であり, ほぼ均一な沈下で不同沈下の発生はなかった。また, コンクリート版端部から載荷軸と 90° 方向に 6.5 m 離れた地点でも, コンクリート版とほぼ同様の沈下履歴を示し最大で 3 mm の沈下が計測された。除荷後はコンクリート版載荷側の沈下量が 1 mm に回復しており, 廃棄物地盤が弾性的挙動を示すことも確認された。当該地盤の地盤反力係数は表-2 (中部 A1, 堆積時間 0.9 年, 8 年) から 8 MN/m³ 程度, 載荷圧は最大(端部)で 58.7 kN/m² で, 不同沈下が生じなかったことから荷重が底版に均等に作用したとすると地盤反力は 29.4 kN/m², 計算される沈下量は 3.7 mm となり, 実証載荷実験結果と合致する。

図-11 平板载荷試験結果 (代表例)

図-12 中部 A1 現場での沈下量計測結果

表-3 埋立終了後の層別変化量 (中部 A1 現場)

経過日数 (埋立 終了後) (日)	期間層厚変化(減少)量			
	下層15年経過 地盤(h=20m) (mm)	1層目 (h=4m) (mm)	2層目 (h=3.5m) (mm)	3層目 (h=3m) (mm)
0	96	272	9	0
18	28	37	36	38
95	-1	19	7	10
321	8	16	6	5
小計	131	344	58	53
636	26	11	17	34
806	6	4	-2	2

注) 0日の層厚変化量は埋立開始から終了まで(66日間)の値

(5) 衝撃加速度試験の適用性

a) 一面せん断試験結果との比較

各試験現場で現場一面せん断試験等の実施場所近傍にて、キャスポルで5点以上計測したインパクト値 (Ia) の平均値を表-2に示した。このうち、比較可能な国内18箇所でのインパクト値 (Ia) と一面せん断試験、現場土圧試験の結果をプロットしたものを図-15に示す。

図-13 中部 A1 現場での強度定数の経年変化

図-14 実証载荷実験結果

図-15 左から、廃棄物地盤において、キャスポルにより得られるインパクト値 (Ia) は、一面せん断試験による粘着力 (c) と相関を示し、その相関式は式 (2) のとおりである。

$$c = 2.8Ia - 9.5 \quad (2)$$

ここに、 c : 粘着力 (kN/m^2)

Ia : キャスポルによるインパクト値

インパクト値 (Ia) と内部摩擦角 (ϕ) の関係をみると (図-15 右)、相関係数が小さく明確な関係は現れていない。この結果には、プラスチック等が混入した廃棄物地盤は柔らかくても (Ia が小)、概して大きな内部摩擦角を有することが現れている。

b) 影響範囲確認実験結果

衝撃加速度試験の影響範囲確認実験結果を図-16に示す。試験実施場所の原地盤のインパクト値 (Ia) は7.1~7.7と廃棄物地盤よりも大きいことから、広さ、深さが増すと Ia は減少する。 Ia の影響範囲として図から Ia が最小値を示すまでの範囲を読むと、広

図-15 衝撃加速度試験と現場一面せん断試験結果の関係 左: Ia - 粘着力, 右: Ia - 内部摩擦角

図-16 廃棄物地盤の衝撃加速度試験の影響範囲

ラスチック等の廃棄物の堆積が実現場と同様に水平方向に卓越するなかで、衝突後の動きが廃棄物間を伝播して主に水平方向に広がる様子が確認できた。

c) 衝撃加速度試験の適用範囲

式(2)は、表-2に示した国内の廃棄物地盤での試験結果をもとにしたものであり、国内の廃棄物地盤で概略的に粘着力を推定したい場合に利用可能なものである。また、インパクト値が10を超えると式(2)と実測値の乖離が大きく(図-15左)、この範囲では式(2)による粘着力の推定は難しい。また、試験の影響範囲は、試験地点を中心に直径1m、深さ40cm程度の範囲となる。

(6) 安息角試験の適用性

a) 一面せん断試験結果との比較

各現場で現場一面せん断試験等の実施場所近傍で行った安息角試験結果を表-2に示した。このうち、比較可能な、国内17箇所での安息角試験による停止安息角と現場一面せん断試験等の内部摩擦角の関係をプロットしたものが図-18であり、停止安息角は、現場一面せん断試験による内部摩擦角(ϕ)に近い値をとっている。とくに、一面せん断試験で得られる粘着力(c)が $c \leq 5 \text{ kN/m}^2$ の範囲では、停止安息角と内部摩擦角がほぼ等しくなっており、停止安息角(α_r)と内部摩擦角(ϕ)の関係は概ね次のように表せる。

$c \leq 5 \text{ kN/m}^2$ のとき、

$$\phi = \alpha_r \quad (3)$$

ここに、 ϕ : 内部摩擦角($^\circ$)

α_r : 安息角試験による停止安息角($^\circ$)

$c > 5 \text{ kN/m}^2$ のとき、

$$\phi = 1.6\alpha_r - 28 \quad (4)$$

図-17 衝撃加速度試験の錘衝突後約0.03秒の画像

さ方向が110 cm(土地盤は13~24 cm⁹⁾)、深さ方向が40 cm(土地盤は9~22 cm⁹⁾)であり、広さ方向の影響範囲が土砂地盤に比べ格段に広い。

次に、衝撃加速度試験での錘の地盤衝突直後のビデオ画像を図-17に示す。ビデオ画像上で廃棄物の変位(動き)がスケールアップで確認できた範囲は水平方向80 cm、鉛直方向35 cmであった。実際のインパクト値への影響範囲(力の伝搬範囲)は変位がスケールアップで確認できた範囲よりも広いと考えられるため、この結果は、図-16による影響範囲(水平方向110 cm、鉛直方向40 cm)と概ね合致する。プ

図-18 安息角試験の停止安息角と内部摩擦角

図-19 含水比と停止安息角の関係

b) 含水比と停止安息角の関係

図-19に含水比と停止安息角の関係を示す。回帰式は弱い負の相関を示しているが、国内17箇所の含水比10～40%の範囲では含水比と停止安息角の間に明確な関係は現れていない。国内のプラスチック等を含む廃棄物地盤では空隙が大きく透水性が極めて良いため、廃棄物試料中の水分はプラスチック等の表面等に長時間滞っている少量の水と考えられる。このため、関東A1現場・15年経過地盤で行った安息角試験では掘削直後試料の停止安息角は40°、掘削後山積みし1日経過した試料の停止安息角は41°で、ほとんど差が無かった。一方、海外の廃棄物地盤は生ゴミ等により飽和状態に近い過剰な水分を含

むことがあり、この場合、摩擦抵抗や引張抵抗が減少して停止安息角が小さくなると推察される。したがって、安息角試験では水分による影響を受けないように、降雨時や大雨後の試験は避ける必要がある。また、十分に乾燥させた試料でも摩擦抵抗が減少することが考えられるため、安息角試験は、掘削直後の試料を用いる必要がある。

c) 安息角試験と引張抵抗

安息角試験のモデル図を図-20に示す。また、これまでの現場区分別の安息角試験での限界安息角と停止安息角の平均値を表-4に示す。限界安息角と停止安息角の差は廃棄物の形状やサイズの差により生じており、10cm以上のプラスチック等の繊維状物を含む現場では平均で8°、海外のレジ袋等を多く含む現場では平均で15°の差があるが、粉体状（ばいじん）の東北B現場では2°の差しかない。限界安息角は、試験中に崩れる前に急勾配で立ち上がったときの角度であるから、長尺物を含む場合は斜面内で、粘着力、摩擦力の他に、長尺物による引張抵抗力が働いていると考えられる。引張抵抗は無限長斜面法において、廃棄物地盤では値が小さい粘着力を無視（ $c \approx 0$ ）したとき、式（5）^{1), 2), 3)}で、 ζ （引張抵抗角）として表される。

$$F_s = \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} + \frac{\tan \zeta \cdot \sin (1.5 \theta)}{\sin \theta \cdot \cos \theta} \quad (5)$$

ここに、 F_s ：安全率

φ ：内部摩擦角（°）

θ ：斜面勾配（°）

ζ ：引張抵抗角（°）

式（5）で斜面勾配（ θ ）が限界安息角（ α_c ）のときに引張抵抗が働いて $F_s = 1.0$ とし、斜面勾配（ θ ）が停止安息角（ α_r ）のときに引張抵抗が働かずに（式（5）右辺2項 = 0） $F_s = 1.0$ とすると、この2つの関係から式（6）が得られる。

$$\tan \zeta = \frac{\sin \alpha_c \cdot \cos \alpha_c}{\sin (1.5 \alpha_c)} \left(1 - \frac{\tan \alpha_r}{\tan \alpha_c} \right) \quad (6)$$

式（6）から求めた ζ （引張抵抗角）を表-4に示す。

図-20 安息角試験のモデル図

表-4 限界安息角, 停止安息角, 推定引張抵抗角

プラスチック等の サイズ	箇所 数	限界 安息角 α_c (°)	停止 安息角 α_r (°)	$\alpha_c - \alpha_r$ (°)	引張 抵抗角 ζ (°)
含10cm超 例) 中部C1現場(頂部)	13	51	43	8	7.1
		58	52	6	5.1
概ね10cm以下	4	41	38	3	-----
プラスチック無し 例) 東北B(ばいじん)	7	41	37	4	-----
		38	36	2	-----
海外埋立地	2	51	36	15	11.4

図-21 斜面安定性計算結果 (中部 C1 現場)

図-22 平板載荷試験と衝撃加速度試験, 安息角試験による極限支持力の比較

検証のため, 斜面勾配 60° でプラスチック等が約 10 m 緩く堆積し頂部にクラックが生じていた中部 C1 現場を対象に, 式 (5) により斜面安定計算を行うと (図-21), 式 (6) の ζ を考慮したとき, 安全率 $F_s = 0.95$ となり実態と整合した。

プラスチック等が混入した廃棄物の堆積現場で十分に締固められている場合には斜面勾配が 90° 近くでも安定することから, 安息角試験での限界安息角は引張抵抗が緩く働いている状態 (緩く盛られた中部 C1 現場と同様) と考えられる。

d) 安息角試験の適用範囲

式 (3) (4) は, 表-2 に示した国内の廃棄物地盤での試験結果をもとにしたものであり, 国内の廃棄物地盤で概略的に内部摩擦角を推定したい場合に利用可能なものである。また, 内部摩擦角が小さい地盤 (ばいじん等) では, 式 (4) で推定される内部摩擦角は一面せん断試験による値よりも大きくなる傾向があり (図-18), 式 (4) による推定は危険である。

(7) 衝撃加速度試験と安息角試験による支持力評価

衝撃加速度試験と安息角試験による, 式 (2), 式 (3), 式 (4) から推定される c, ϕ を建築基礎構造設計指針¹⁹⁾の支持力公式・式 (7) に代入して, 平板載荷試験で求められている極限支持力と比較した (図-22)。平板載荷試験による極限支持力と, 衝撃加速度試験, 安息角試験による c, ϕ を支持力公式に代入して得られた極限支持力の間には, ばいじん地盤 (東北 B 現場) を除けば, 一定の相関が見られた。

$$q_u = i_c \cdot \alpha \cdot c \cdot N_c + i_r \cdot \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot \eta \cdot N_r \quad (7)$$

q_u : 単位面積あたりの極限支持力度 (kN/m²)

N_c, N_r : 支持力係数

c : 支持地盤の粘着力 (kN/m²)

γ_1 : 支持地盤の単位体積重量 (kN/m³)

α, β : 基礎の形状係数

i_c, i_r : 荷重の傾斜に対する補正係数

B : 基礎幅 (m) (載荷板径 0.3~1 m)

η : 基礎の寸法効果による補正係数

注) 式 (7) は根入れ項を省略している。

図-22 では, 支持力公式による極限支持力は, 平板載荷試験による値よりも大きめであるが, これは, 平板載荷試験では試験時の載荷重が十分でなく極限支持力に達していない現場が 4 箇所ある (図-22 の △印) ことに加え, この他の現場でも試験中に地盤の降伏現象が生じず載荷板径の 10 % の沈下量で極限支持力を決めていることから, 概して平板載荷試験の極限支持力は小さめになっているためと考えられる。

衝撃加速度試験と安息角試験は, いずれも 1 m³ 程度のディメンジョンを持つため, 30cm × 30cm × 15cm の範囲で行う一面せん断試験よりも広い範囲の c, ϕ や支持力が得られていると考えられる。従って, 衝撃加速度試験と安息角試験は, 廃棄物地盤 ((5) c), (6) d) に示した範囲, ばいじん地盤は除く) で地盤利用等の検討初期に概略的な支持力を把握したいときや, 高価な平板載荷試験の実施数抑制のために中間補間的に利用する際の経済的な試験法となり

図-23 左：土槽中のプラスチック，中：衝撃加速度試験での変位伝搬イメージ，右：実証载荷試験での荷重分担イメージ

得ると考えられる。

(8) 廃棄物地盤中の衝撃，荷重の伝搬

図-23左は，図-17の土槽中央部，深さ10cm以深のプラスチックの位置を示したものである。土槽中の廃棄物は土のう袋から投入し密度が原地盤と等しくなるように締め固めたもので，ダンパアップで投下される実地盤に近い状態と考えられる。プラスチック等は水平方向に卓越するように堆積しているが，薄いプラスチックが一定の厚さ持って堆積しており，図-23中のようにプラスチックが屈曲して堆積している。プラスチックは地盤中で非連続の箇所もあるが，衝撃による変位は他の廃棄物を介して主に水平方向に伝搬される。鉛直方向はプラスチックの屈曲等で生じる空隙により衝撃が吸収されやすく伝搬範囲は水平方向に比べると小さい。さらに，実証载荷実験では载荷したコンクリート版の端部から6.5m離れた地点でもコンクリート版と同様に沈下したことから，廃棄物地盤では，図-23右のようにプラスチック等の繋がりにより，荷重が水平方向に分散され広い範囲で荷重を受けることや，廃棄物に不均一性があるにも関わらず広範囲で一定の挙動を示すことが推察される。

4. 結論

19現場29箇所での現場試験等により，長尺のプラスチック等が混入した廃棄物地盤は，柔らかく沈下が生じやすいものの大きな摩擦抵抗や特有の引張抵抗を有して，斜面安定性が高く，通常の盛土地盤よりも概して大きな極限支持力を持つことを把握した。径7mのコンクリート版上での実証载荷実験では不同沈下の発生は無く，プラスチック等が混入した廃棄物地盤では，繊維状物等の繋がりによって広い範囲で荷重を受けていることが推察された。実証载荷実験での沈下量は，载荷重と平板载荷試験（载荷径0.3m～1m）による地盤反力係数から計算した沈下量に合致し，平板载荷試験により構造物設置時の沈下量を推定できることが窺えた。また，簡易

な現場試験法である衝撃加速度試験，安息角試験により，それぞれ粘着力，内部摩擦角を推定可能なことが分かった。さらに，衝撃加速度試験と安息角試験による粘着力と内部摩擦角を用いて，支持力公式により極限支持力を推定できた。また，現場空隙率試験により計測した空隙率が各種強度定数と関係していることが窺えた。

謝辞：本研究を行うにあたり，環境省の2013～2015年度「環境研究総合推進費補助金」（課題番号3K133011）の支援を受けた。また，現場試験実施に際し協力頂いた川寄幹生氏（埼玉県環境科学国際センター），坂口伸也氏（前田建設工業株式会社），松井榮氏（大洋基礎工業株式会社）を始め，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) 山脇敦，島岡隆行，勝見武，大嶺聖，川寄幹生，土居洋一，柴暁利，川井晴至，坂口伸也：平成24年度環境研究総合推進費補助金研究事業総合報告書 不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価，pp. 1-70，2013。
- 2) 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，公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団編，pp. 1-180，大成出版社，2013。
- 3) Yamawaki, A., Omine, K., Doi, Y. and Kawasaki, M. : Slope Stability of Solid Waste Layers in Japan and Asia, *Modern Environmental Science and Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 23-30, 2016.
- 4) Koelsch, F. : Static Stability of Landfills, *Toolkit Landfill Technology*, Chapter 4. 6, pp. 1-24, German Geotechnical Society (DGGT), 2009.
- 5) Omine, K., Yamawaki, A., Kawasaki, M., Doi, Y., Sugimoto, S. and 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.
- 6) 社団法人地盤工学会：地盤の平板载荷試験，地盤調査の方法と解説，pp. 495-504，丸善，2004。

- 7) 社団法人地盤工学会：地表面の鉛直変位測定，地盤調査の方法と解説，pp. 609-616，丸善，2004.
- 8) 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.
- 9) 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，pp. 1-15，2005.
- 10) 土居洋一，山脇敦，川壽幹生，小林優子：篩分け堆積廃棄物の安息角試験結果を用いた斜面安定性評価の検討，第25回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 459-460，広島，2014.
- 11) 長浦万理，大嶺聖，杉本知史，蔣宇静，伊木康二：原位置土圧試験による堆積廃棄物地盤の簡易強度推定法，平成26年度土木学会西部支部研究発表会，CD-ROM，2015.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 国立天文台，平成26年理科年表，pp. 413-414，丸善，2013.
- 15) 社団法人地盤工学会：土粒子の密度試験，地盤材料試験の方法と解説，pp. 97-103，丸善，2009.
- 16) 川井晴至，島岡隆行，坂口伸也，山脇敦：プラスチックを多く含む廃棄物埋立地盤の土粒子の密度試験，土木学会第69回年次学術講演会，pp. 457-458，広島，2014.
- 17) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計 指針・同解説 2010年版，pp. 1-454，2011.
- 18) Civilserve GmbH, Steinfeld: GGU-STABILITY VERSION 9 User Manual, pp. 1-151, 2010.
- 19) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，第2版，pp. 105-121，2001.

(2016. 10. 28 受付)

MECHANICAL PROPERTIES OF WASTE GROUND INCLUDING PLASTICS AND EVALUATION METHOD ON SITE

Atsushi YAMAWAKI, Yoichi DOI and Kiyoshi OMINE

This research aims to clarify the mechanical characteristics of waste ground including plastics and propose methods to assess these characteristics. Mechanical characteristics of waste grounds including plastics have not been studied sufficiently in Japan, because such grounds have been considered to be very elastic and difficult to use as land. However, in the previous research, it has been reported that waste grounds including plastics have high slope stabilities. The authors investigate characteristics of the waste ground including plastics such as slope stability, bearing capacity, subsidence, etc. Sizes of individual solid waste pieces in landfill ground including plastic are fairly large compared with that of the soil particles. It would require a huge and expensive test facility to accurately reproduce such actual sites indoors. Accordingly, the tests were conducted primarily on site such as plate loading test, box shear test in 19 sites (29 places) of landfills inside and outside of Japan. For simplified on site-test, impact bearing test, repose angle test and void test are proposed. The results of plate loading test indicate that the solid waste ground of the landfills with plastics has sufficient strength to permit construction of a heavyweight structure (for example, wind power generation). And bearing capacity could be estimated from the proposed impact bearing test and repose angle test. In addition, differential settlement is found to be unlikely to occur by the demonstration experiment on a landfill in central Japan. It is believed to be due to the transfer in the horizontal direction of the vertical force due to connection of the fibers. By proposed strength evaluation, it is expected that the waste ground is used as land.