

平成 28 年 10 月 18 日
改訂 平成 30 年 8 月 17 日

プラスチック等が混入した廃棄物地盤の利活用のための地盤評価マニュアル(案)

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)
大嶺 聖 長崎大学大学院工学研究科
土居 洋一 長野県短期大学
川寄 幹生 埼玉県環境科学国際センター
坂口 伸也 前田建設工業株式会社
島岡 隆行 九州大学大学院工学研究院
勝見 武 京都大学大学院地球環境学堂
川井 晴至 九州大学東アジア環境研究機構 (平成 26 年度まで)

(研究協力者)

松井 榮 大洋基礎工業株式会社 (現場試験支援)
穂積 雅光 株式会社忠光製作所 (試験機器製作支援)
古屋 善徳 株式会社セット設計事務所 (偏心載荷実験支援)
廣岡 明彦 九州工業大学 (振動実験支援)
小林 優子 長野県短期大学 (注水排水実験支援)
Klaus-Peter Salomo Ingenieugesellschaft für Geotechnik und Umweltmanagement (ドイツ)
İlker SEL ORTADOĞU ENERJİ (トルコ)

(謝辞)

本マニュアル(案)は、平成 25～27 年度「環境研究総合推進費補助金」(課題番号 3K133011)の支援を受けて行われた研究の成果による。ここに記して謝辞を表す。また、現場試験等の実施にあたってご協力頂いた処分場や行政等の多くの関係の方々に厚く感謝する。

問い合わせ先：(公財)産業廃棄物処理事業振興財団 山脇 敦
電話; 03-3526-0155 E-mail; yamawaki@sanpainet.or.jp

1) 適用範囲

本マニュアル(案)は、産業廃棄物安定型処分場等で、プラスチック等の繊維状物等が混入した廃棄物地盤を主な対象として、その利活用に向けた地盤評価方法を示すものである。

焼却灰や燃え殻等による廃棄物地盤の強度特性は、土地盤に類似していることから従来の土質力学に基づいた評価が基本的に可能である。一方、概ね10cm以上のプラスチック等の繊維状物等が多く混入している場合は地盤の硬度は低下するものの、廃棄物相互の絡み合い等によって弾性的(resilient)で高いせん断強度を有するとともに、大きな空隙によって透水性が良いなど、特性が土地盤と大きく異なることから、利活用のための合理的な地盤評価方法を示すことを目的として本マニュアル(案)を提示するものである。

なお、本マニュアル(案)は現時点での知見^{26),27)}をもとに本研究グループによる提案として提示するものであり、今後、新たな知見が得られた際には随時改訂していくことを予定している。

2) 評価手順

廃棄物地盤では、個々の廃棄物が土粒子に比べ遙かに大きいこと等から、地盤の力学評価のためには大がかりな現場試験等が必要になり、試験費用も高額になる。このため、廃棄物地盤の利活用の可能性を探るための概略評価方法と、具体的に構造物の設置等に向けた検討時等を行う詳細評価方法に分けて、その手順を示した(図1)。本マニュアル(案)では、図1右下の実施検討を除く部分について記載している。

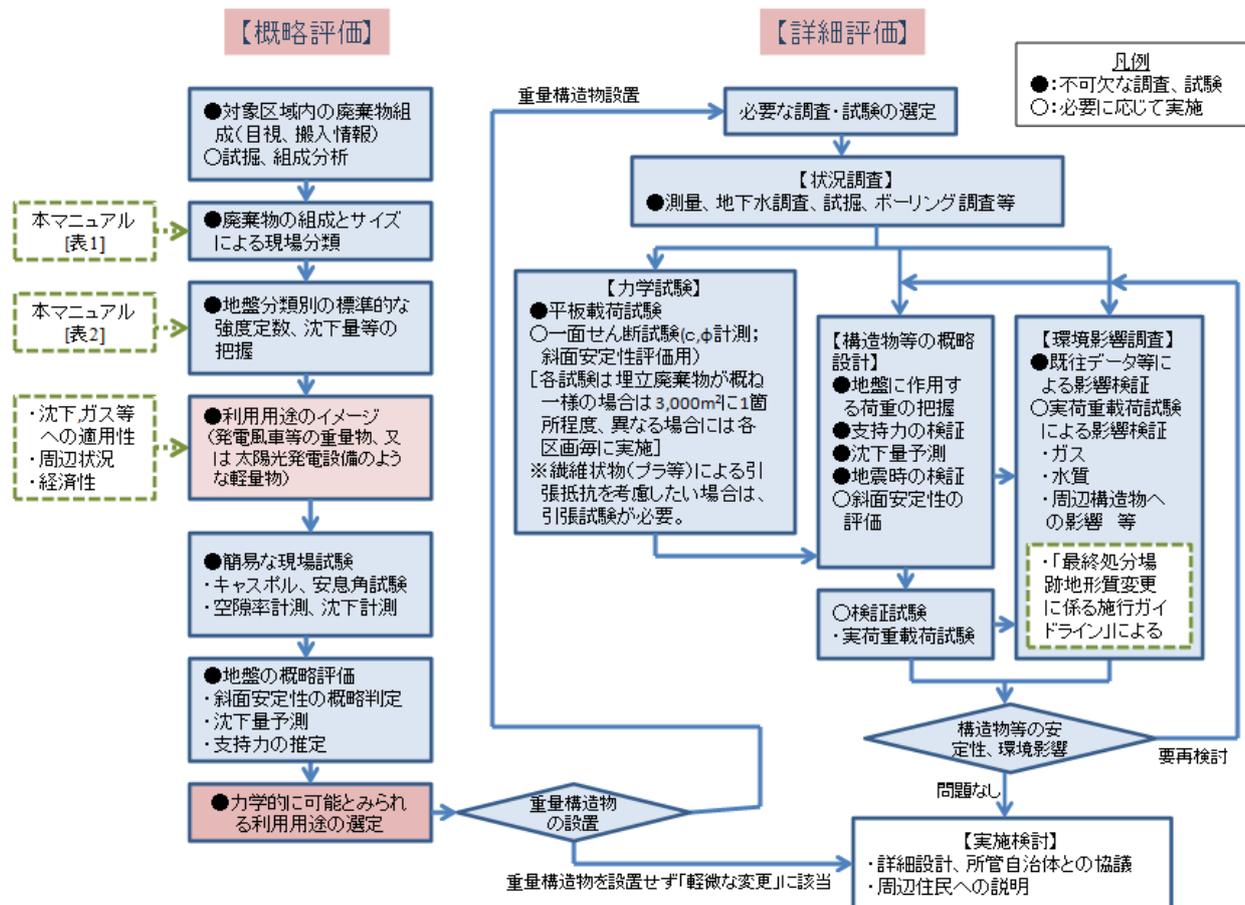


図1 廃棄物地盤の利活用に向けた地盤評価手順

3) 現場分類と判断方法

i 現場分類

廃棄物地盤は、力学特性の違いから、組成とサイズにより以下のように大別することができる。

- ① 概ね 10cm 超のプラスチック等の繊維状物等を多く含む地盤 (図 2)
- ② ふるい下等で 10cm 以下のプラスチック等を含む地盤 (図 3)
- ③ 焼却灰、燃え殻等が主でプラスチック等の繊維状物等をほとんど含まない地盤 (図 4)



図 2 ① 10cm 超のプラスチック等の繊維状物等を多く含む地盤 (左; 表層 右; 試掘断面)



図 3 ② ふるい下等で 10cm 以下のプラスチック等を含む地盤 (左; 表層 右; 試掘断面)



図 4 ③ 焼却灰、燃え殻等が主でプラスチック等をほとんど含まない地盤 (左; 表層 右; 試掘断面)

ii 廃棄物地盤で想定される主な利用用途と力学面、環境面での必要検討事項

現状で想定される廃棄物処分場等の廃棄物地盤の利用用途と力学面、環境面で必要となる主な検討事項を表 1 に示す。実際の検討にあたっては、力学面では構造物等毎に定められている設計指針類、環境面では「最終処分場跡地形質変更に係る施行ガイドライン」⁴⁾ や各種環境法令の遵守が必要になる。

なお、廃棄物地盤では杭基礎構造物については、遮水シートや水・ガス等の影響への懸念があることから、表 1 には直接基礎で可能な構造物等を示した。

表 1 想定される廃棄物地盤の利用用途と必要検討事項

利用用途	力学面の主な検討項目と留意事項				環境面の主な検討項目と留意事項			
	支持力 滑動 転倒	沈下	耐震性	斜面 安定	有害ガス 発生	内部温度 上昇	地下水	
重量 構造物	水処理施設等の 廃棄物処理 設備 [直接基礎]	●	●	●	△	●	●	△
	風力発電設備 [直接基礎]	●	△	●	△	●	△	△
その他	太陽光発電 設備	×	△	×	×	△	△	×
	駐車場 (舗装)	×	△	×	×	△	△	×
	公園・緑地	×	×	×	△	△	△	△

凡例 ●：検討必要 △：場合により検討必要 ×：基本的に検討不要

iii 廃棄物地盤分類別の強度特性と評価方法の概要

廃棄物地盤分類別の強度特性と力学評価方法の概要を表 2 に示す。

表 2 廃棄物地盤の力学特性による分類と利活用のための力学評価方法の概要

地盤分類	主な廃棄物種類 【主な対象現場】	力学特性	力学評価方法	
			せん断強度	支持力、沈下
①概ね 10cm 超のプラスチック等の繊維状物等を多く含む地盤（目視で確認できない程度；重量比 1-2%以下は②）	廃プラスチック、がれき類、ガラス・陶磁器くず、金属類 【安定型処分場、不法投棄等支障除去現場】	比重の軽い埋立物が多く地盤が柔らかい（地盤反力係数、粘着力が小）が、廃棄物の噛み合わせ効果等により内部摩擦角は大きい。繊維状物等による引張抵抗を有し粘り強く弾性的 (resilient) な強度特性を有し、地震時も 1000gal 超の強振動で無い限り土地盤よりも働く水平土圧は小さい。	〔概略評価〕 安息角試験、キャスボル 〔詳細評価〕 一面せん断試験、引張試験、引張を考慮した安定計算	〔概略評価〕 安息角試験、キャスボル 〔詳細評価〕 平板載荷試験、沈下計測、不同沈下確認載荷試験
②10cm 以下のプラスチック等を含む地盤	ふるい下、プラスチック等の破砕物、プラキヤップ等の小型物 【管理型処分場等】	①と③の中間的な力学特性を有する。噛み合わせ効果等により内部摩擦角や粘着力は大きい、繊維が短く引張抵抗は働かない。	〔概略評価〕 同上 〔詳細評価〕 一面せん断試験	同上
③プラスチック等をほとんど含まない地盤	焼却灰、燃え殻 【管理型処分場、一般廃棄物処分場】	力学特性は土地盤に近く、①に比べ比重が重く、固い地盤（粘着力大）が形成される。	既往土質工学手法で評価可能	

4) プラスチックを含む廃棄物地盤の特性

i 廃棄物地盤分類別の強度定数の目安

廃棄物地盤分類別の強度試験結果（国内 19 現場、29 箇所）をもとに作成した地盤分類別の力学特性を表したレーダーチャートを図 5 に、地盤分類別の強度定数等の平均値を表 3 に示す。検討の最初期段階では、表 3 の値を用いて廃棄物地盤の利活用の可能性を探ると良い。

（表 3 から分かる地盤分類別の主な強度特性は表 2 に示した。）

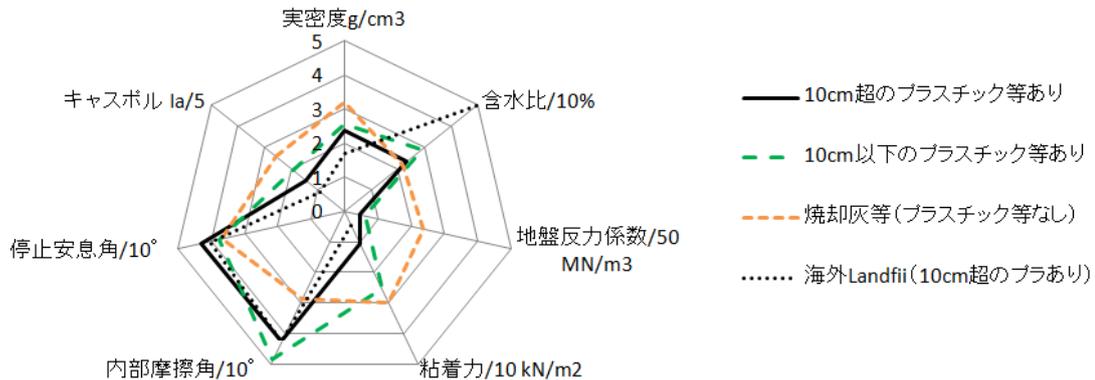


図 5 廃棄物地盤の分類別の強度特性（19 現場、29 箇所の試験結果による）

表 3 廃棄物地盤の地盤分類別の力学強度値の平均値と範囲（19 現場、29 箇所の試験結果のまとめ）

組成	廃棄物サイズ	区分	箇所数	堆積時間	含水比	湿潤密度	実密度	空隙率	極限支持力	地盤反力係数	粘着力	内部摩擦角	停止安息角	キャスポル
				年	%	g/cm ³	g/cm ³	%	kN/m ²	MN/m ³	kN/m ²	°	°	Ia
プラスチック混入	含10cm超	安定型処分場（埋立後1年未満）	4	0.3 (0~0.9)	20 (10~25)	1.3 (1.1~1.5)	2.4 (2.0~2.7)	37 (29~41)	283 (140~340)	8 (5~12)	12 (2~24)	42 (27~59)	40 (36~44)	6.5 (3.7~8.3)
		安定型処分場（埋立後1年以上）	5	8.7 (1.8~15.0)	28 (19~42)	1.5 (1.4~1.6)	2.4 (2.2~2.9)	18 (14~22)	955 (480~2000)	39 (8~111)	15 (5~24)	37 (35~41)	42 (40~44)	9.5 (7.2~15.8)
		不法投棄	4	6.5 (1.5~13.0)	21 (13~31)	1.0 (0.7~1.2)	----	----	----	----	3 (3~4)	49 (46~51)	48 (45~52)	5.0 (3.6~6.3)
		計	13	5.5	23	1.3	2.4	26	619	24	11	42	43	7.2
プラスチック混入	概ね10cm以下	管理型処分場	3	0.1 (0.1~0.1)	25 (19~31)	1.3 (1.1~1.5)	2.6 (1.5~4.1)	29 (17~49)	950 (300~1600)	30 (9~51)	40 (40)	50 (50)	37 (34~40)	11.3 (7.8~13.3)
		震災廃棄物（選別残渣）	1	0.2	40	1.1	----	----	----	11	47	40	4.5	
		計	4	0.2	29	1.2	2.6	29	950	30	26	49	38	9.6
焼却灰等・プラ無	概ね30cm以下	管理型処分場	3	4.5 (0.8~12.0)	27 (22~32)	1.4 (1.2~1.5)	3.2 (2.8~3.6)	39 (38~39)	565 (565)	179 (179)	58 (45~70)	19 (19)	36 (35~36)	17.9 (14.6~20.0)
		不法投棄	4	7.9 (0.5~12.0)	21 (18~23)	1.7 (1.4~2.0)	----	----	360 (360~)	59 (59)	12 (3~18)	32 (17~45)	38 (35~44)	9.7 (7.8~12.2)
		一般廃棄物処分場	1	40.0	14	1.1	----	----	----	----	----	----	36	6.7
		計	8	10.6	22	1.5	3.2	39	463	119	30	29	37	12.8
合計			25	6.3	24	1.3	2.5	29	648	41	17	40	40	9.2
海外(Landfill) 10cm超のプラ有り			4	3.7 (0.2~7.0)	50 (39~72)	1.1 (1.0~1.2)	1.7 (1.7)	28 (28)	----	----	5 (4~6)	43 (33~43)	41 (36~45)	4.5 (3.7~5.8)

注) 箇所数は、同一現場内で区画等が異なり廃棄物種類や堆積年数や異なる箇所数（試験数）を含むもの。

ii 10cm 以上のプラスチック等が混入した廃棄物地盤の強度特性、沈下特性

(強度特性)

①地盤中に 10cm 程度以上の長尺のプラスチック等の繊維状物が混入した現場では、そうでない現場に比べ斜面の安定勾配を表す安息角が顕著に大きい (図 6) など、粘り強い (resilient) 強度特性を有する。

②10cm 超のプラスチック等が混入した中部地方の安定型処分場では、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、キャスポルのインパクト値(Ia)が顕著に増加した。地盤の極限支持力は、埋立終了後 1~2 年間の強度増加が著しく、その後は緩やかに強度が増加した (図 7)。

(沈下特性)

③ 同上地盤では、堆積層厚に比例して沈下が生じ、とくに堆積後 1~2 年間に顕著な沈下が進んだが、その後も双曲線状に長期間の沈下が生じた (図 8、図の例では堆積 10 年後で層厚 10m のとき 9mm/年の沈下)。沈下量は埋立廃棄物の組成や埋立時の締固め状況により異なるが、10cm 以上のプラスチック等が混入した安定型処分場等で沈下量の目安をみるには図 8 を参考にすると良い。

④ 沈下は、埋立層毎の沈下計測結果から、上層埋立直後に顕著な沈下が生じることから廃棄物自重によるプレロード効果による沈下が大きいと言えるが、降雨 (特に埋立初期降雨) によっても沈下が生じる (図 9)。

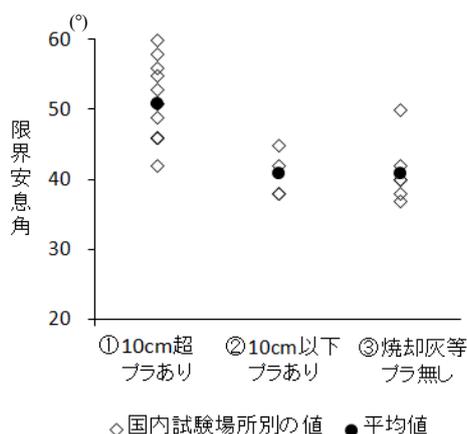


図 6 廃棄物地盤分類別の限界安息角

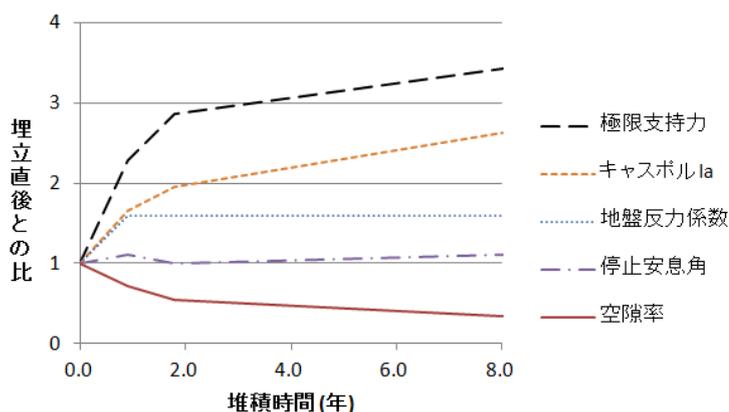


図 7 中部地方の安定型処分場での強度定数の経年変化

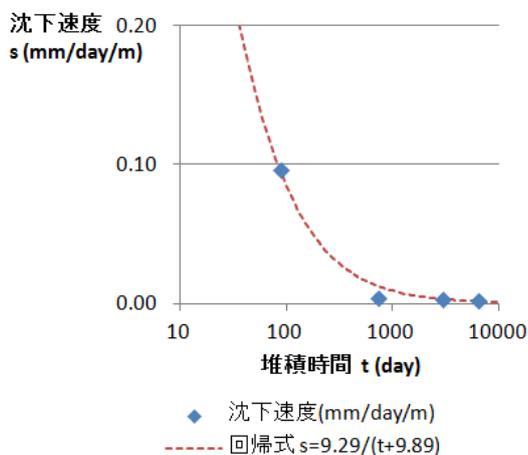


図 8 沈下速度と堆積時間の関係
(中部地方の 10cm 以上のプラスチックが混入した安定型処分場)

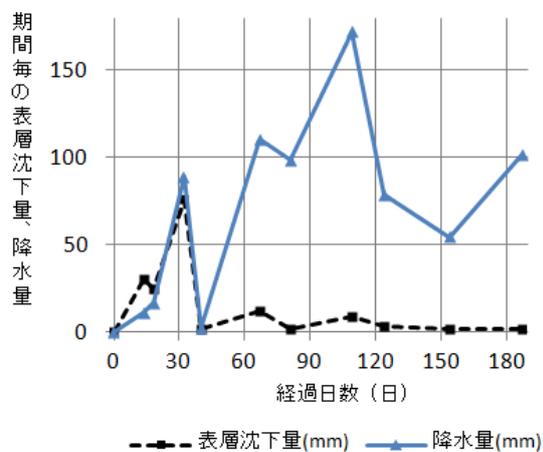


図 9 埋立終了後の沈下量と降水量の関係

iii プラスチック等が混入した廃棄物地盤中の水挙動

プラスチックが混入した廃棄物地盤では、大きな空隙を有することから雨水の透水性は基本的に極めて良い。しかし、地盤中では図 10 のように雨水はプラスチック等の表面等に貯留されながら流下し、一定量が流下した後の廃棄物表面等に貯留された水は極めてゆっくりと流下する。この流下量は地盤中の貯留量をパラメータとした貯留関数で表すことができる (式 1~3)。プラスチック等の表面等に貯留能力がある廃棄物が多い程、内部貯留可能量が大きくなり、ピーク排水量が小さく、ピーク到達時間が長くなる (図 11 ; 2cm 篩下の 2cm アンダー試料の排水ピークが標準ケースに比べて早く高くなっている)。このため、最終処分場ではプラスチック等の貯留能力の大きい廃棄物が多い程、水処理等のピーク対応量を抑制できる。

なお、地盤中には長期間雨水の一部が貯留され、極めてゆっくりと排水が進むことから、ボーリングや試掘により、このゆっくりとした流れの水を捉えて、その水位を地下水位 (安定計算で残留水圧を与える水位) と見誤ることがあるので、斜面安定計算時等には留意が必要である。

プラスチック等が混入した廃棄物地盤中の水の流れ (水収支) は、ドラム缶大カラムによる注水排水実験の結果等から、次の貯留関数式で表すことができる²⁷⁾。

$$S=K \cdot q^p \quad \dots \dots \dots \text{式 1}$$

$$dS/dt=q \quad \dots \dots \dots \text{式 2}$$

ただし、 $S>C$ のときは、

$$q=q_m \quad \dots \dots \dots \text{式 2'}$$

$$q(t+t_0)=q(t) \quad \dots \dots \dots \text{式 3}$$

ここに、 S : 貯留量 (貯留高) (mm)

C : 内部貯留可能量 (高) (mm)

K, p : 貯留関数の定数(q が mm/hr のとき)

q : 排水量 (排水高) (mm)

q_m : 雨水浸透量 (雨水浸透高) (mm)

$q(t+t_0)$: 排水の遅滞時間(t_0)を考慮した t_0+t_0 時の排水量 (排水高) (mm)

廃棄物の表面等に貯留された水によるゆっくりとした水の流れは、図 12 のように、集水井戸で確認されている内部水位よりも、25m 高い地点での試掘で、試掘後 6 時間後に湛水し始めた例からも確認できる。



図 12 内部水位より 25m 高い地点での試掘後 6 時間後の湛水 (中部地方の安定型処分場)
(左: 試掘時 右: 試掘 6 時間後の湛水)

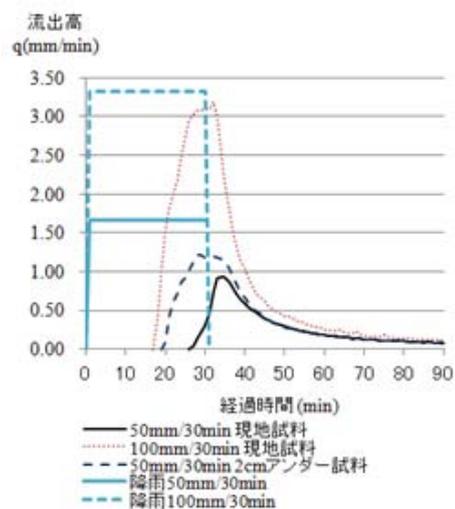
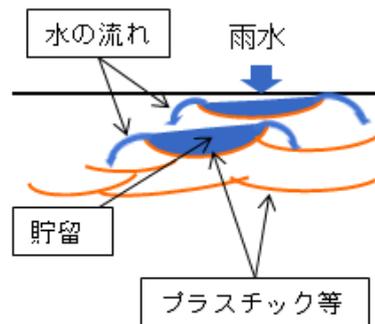


図 11 注水排水実験結果
(関東地方の安定型処分場からの採取試料)

iv プラスチック等が混入した廃棄物地盤地表部での硫化水素ガスの発生状況

金属の腐食等を生じられる硫化水素ガスについて、プラスチック等が混入した廃棄物地盤（関東地方の不法投棄等現場）の地表部での調査を行った。純水 2ℓ が入ったボトルを観測井戸脇及び地表部に設置し、ポリバケツで蓋をした（図 13）。一定期間放置後、純水の pH、電気伝導度、硫酸イオン濃度等の変化を観察した（表 4）。

井戸脇に設置した純水は、一定放置後、酸性から弱酸性になった。ポリバケツで覆っているため、密閉空間であり、構造物の設置とは状況が異なるが、内部に廃棄物層がある地盤の上に構造物を設置する場合、局所的な弱酸性雰囲気形成される可能性は否めないため、このような現場では、硫化水素等腐食性ガスによる構造物への影響を考慮する必要がある。



図 13 観測井戸脇（左図）及び地表部（中央図）に設置した純水ボトル及び放置状況（右図）

表 4 廃棄物地盤地表部での発生ガスの影響

放置期間	設置場所	pH	EC(mS/m)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)
138日間 7/17~12/1	井戸脇E2-1	4.5	2.49	0.50	0.28	0.21	<0.1
	井戸脇E2-2	2.7	76.7	94.2	0.20	<0.1	<0.1
	地表DE	5.3	0.34	0.14	0.27	0.55	<0.1
66日間 12/1~2/4	井戸脇E2-1	4.8	2.01	0.21	0.25	0.12	<0.1
	井戸脇E2-2	4.6	1.84	0.20	0.26	0.12	<0.1
	井戸脇E2-3	4.6	1.77	0.20	0.25	0.12	<0.1
	地表DE-1	5.7	0.14	<0.1	0.23	0.11	<0.1
	地表DE-2	5.8	0.14	<0.1	0.26	0.12	<0.1
	地表DE-3	5.7	0.14	<0.1	0.25	0.11	<0.1
77日間 2/4~4/22	井戸脇E4-1	5.9	0.91	0.59	0.18	<0.1	0.18
	井戸脇E4-2	5.5	0.80	0.73	0.17	0.25	0.19
	井戸脇E4-3	5.3	1.07	1.22	0.15	0.31	0.16
	地表DE-1	5.9	0.30	0.17	<0.1	0.10	<0.1
	地表DE-2	5.7	0.20	0.15	<0.1	0.11	<0.1
	地表DE-3	6.1	0.26	0.14	<0.1	0.08	<0.1

注) 平成 26 年 7 月～平成 27 年 4 月。放置期間の最終日に pH 等を測定



図 14 観測井戸 E2 及び E4 の硫化水素ガス濃度変化

観測井戸 E2 と E4 は 10m 離れているが、図 14 から分かるように、硫化水素ガス濃度は異なっている。表 4 から、硫化水素ガス濃度が高い E2 井戸の方が、pH や EC（電気伝導度）の値が高く、周辺環境に与える影響が大きいことが推察される。

v 小型風力発電設備基礎に相当するコンクリート版の沈下状況と周辺のスガス等の発生状況

実際の廃棄物地盤の利活用にあたっては、重量構造物設置時の不同沈下や重量構造物設置に伴うスガス発生等の懸念を指摘されることが多い。このため、実際にプラスチック等が混入した廃棄物地盤（中部地方の安定型処分場）の表層覆土上にコンクリート版（径 7m、厚さ 1m、直接基礎；杭無し）を設置して（図 16）、小型風力発電設備（図 17 を想定）が建設されたときにコンクリート版に働く偏心荷重を作用させて（図 18）、不同沈下の状況やスガス発生状況を調べた（図 19）。その結果、荷重的に最も厳しい暴風時荷重（風速 32m/s）の 15%増に相当する偏心荷重を作用させても不同沈下は生じず（図 20）、スガス発生にも変化は生じなかった。

概ね 10cm 以上のプラスチック等が混入した廃棄物地盤では、鉛直方向の荷重が繊維状物等の繋がりにより水平方向に広く分散され（図 15）²⁶⁾、不同沈下は生じにくい。ただし、管理型処分場等で搬入ダンプ単位等毎に組成が大きく異なる場合は、不同沈下に対する詳細な検討が必要になる。

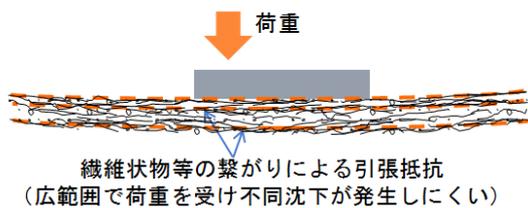


図 15 プラスチックが混入した廃棄物地盤の荷重分担イメージ



図 16 廃棄物地盤上に設置したコンクリート基礎（径 7m、厚さ 1m）

注）コンクリート版の設置は、廃棄物埋立終了の 9 ヶ月後、載荷実験は、同 18～19 ヶ月後。



図 17 想定した小型風力発電設備 h=30m (Excel10 by TenArrows)

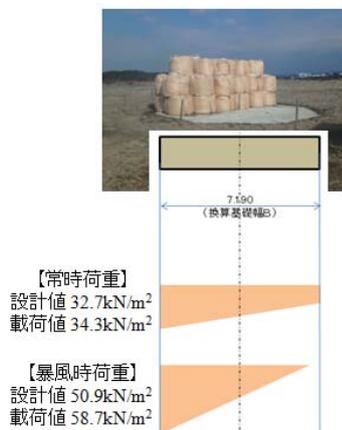


図 18 偏心載荷実験



図 19 発生ガス調査

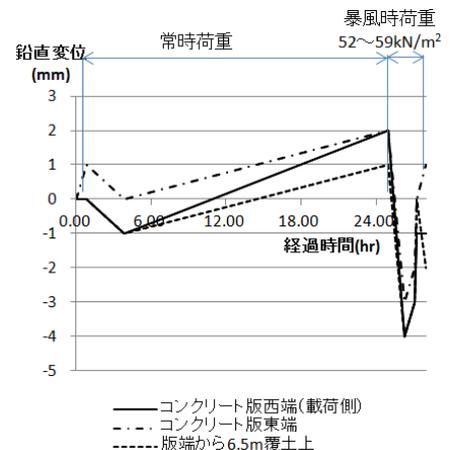


図 20 偏心載荷実験での鉛直変位

5) 概略評価方法

a. 簡易な現場試験法

i 地盤の概略評価時に用いる簡易な現場試験

重量構造物の設置の可能性等を把握するための概略評価時には、高額な試験費用を要しない簡易な現場試験を行って先ず概略的な評価を行うことが合理的である。有効性を確認している簡易な現場試験法は次のとおり。

① 衝撃加速度試験（キャスポル^{12, 13)}

キャスポルにより得られるインパクト値(I_a)は、地盤のせん断強度を評価するための粘着力(c)と相関がある。

② 安息角試験

安息角試験による停止安息角(α)は、地盤のせん断強度を評価するための内部摩擦角(ϕ)と相関がある。

③ 現場空隙率試験

廃棄物地盤中の空隙率は、堆積時間の他、極限支持力等の強度定数や沈下速度と関係する。

ii 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

衝撃加速度試験（キャスポル^{12, 13)}により、現場の部分的な強度の高低や不安定な場所を特定することが可能である。また、衝撃加速度試験（キャスポル）によるインパクト値(I_a)は、地盤のせん断強度や極限支持力を評価するための粘着力(c)と相関があることが確認されており、衝撃加速度試験は粘着力(c)を概略的に知るために活用できる。

衝撃加速度試験から得られるインパクト値(I_a)の影響範囲は、土地盤（珪砂）では広さ方向が直径で 13～24cm、深さ方向が 9～22cm である¹²⁾のに対し、10cm 以上のプラスチックを含む廃棄物地盤では、広さ方向が直径で 110cm、深さ方向が 40cm 程度あり、特に広さ方向の影響範囲が格段に広く、衝撃加速度試験は廃棄物地盤の概略評価に適している。

①試験の目的と方法

簡易に廃棄物地盤の強度定数を推定するために、運搬が容易で試験が簡単な衝撃加速度試験法を適用することが可能である。衝撃加速度試験法とは、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。

②キャスポル測定器の概要

キャスポル測定器は、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で、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、ランマーに内臓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。図 21 にキャスポル測定器を示す。

④衝撃加速度試験（キャスポル）の試験方法

ア) 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、地盤面を出来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。

イ) 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。

ウ) 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かめる。

エ) 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。

オ) 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。図 21 右に測定状況を示す。

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）」¹²⁾ を参照。



図 21 キャスポル（左；測定器の本体と表示部 右；測定状況）

⑤廃棄物地盤での試験結果の利用方法

本来キャスポルは一般的な盛土工事等の施工管理等に用いるものであり、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が算出できるようになっている。ただし、キャスポルで精度よく測

定できる土質の範囲として、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おり、廃棄物地盤ではこの条件に合致しないことがほとんどであるうえに、長尺な繊維状物等も混入しており、「簡易支持力測定器(キャスポル)利用手引き」¹³⁾に示されている相関関係式による粘着力等の推定はできない。

廃棄物地盤については、国内 18 箇所でのキャスポルと一面せん断試験の結果から以下のように、インパクト値(Ia)と粘着力の間に相関が見出されており(式 4、図 22)、キャスポルを粘着力の概略値を推定するために使用することが可能である。

$$c=2.8 Ia-9.5 \quad \dots \dots \dots \text{式 4}$$

ここに、 c ; 粘着力(kN/m²)、 Ia ; キャスポルによるインパクト値

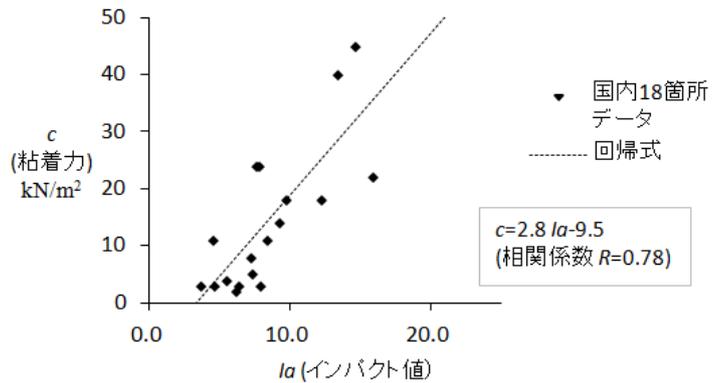


図 22 キャスポル(Ia)と一面せん断試験による粘着力(c)の関係 (安定型処分場等の国内 18 箇所での試験結果)

⑥ 廃棄物地盤での衝撃加速度試験の適用範囲

式 4 は、表 3 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 4 と実測値の乖離が大きく(図 22)、この範囲では式 4 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。

iii 安息角試験の方法と試験結果の利用方法

廃棄物地盤の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。また、安息角試験で測定される停止安息角は、地盤のせん断強度や極限支持力を評価するための内部摩擦角(ϕ)と相関があることが確認されており、安息角試験は内部摩擦角(ϕ)を概略的に知るために活用できる。

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。

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¹⁴⁾。

②廃棄物の安息角の試験方法

試験の手順と留意点は次のとおり。試験の実施例を図 23 に示す。

ア) バックホウのバケットにより廃棄物を撒きこぼし、山を形成する。撒きこぼす際には、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できるだけゆっくり落下させる。

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。

イ) 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をスランートルール等で測定する。

ウ) 使用する廃棄物は、試験直前に掘削したものをを用い、廃棄物の水分量が変化しない状況で実施する。

エ) 同一廃棄物を用いて試験する場合は、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。

オ) 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（図 23 上左）。

カ) 重機が持ち込めない現場では、人力で図 23 下右のように 2 本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。

キ) 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。

ク) 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。

③安息角の測定

計測は図 23 上右に示すように、廃棄物斜面を直接計測し値を把握する。

④停止安息角と限界安息角の決定

安息角試験では、廃棄物の法面勾配と廃棄物の高さを計測しグラフ化することで、限界安息角と停止安息角を把握することができる。



図 23 安息角試験

（上左；重機による撒きこぼし 上右；安息角の計測）
（下左；高さの計測 下右；人力による安息角試験）

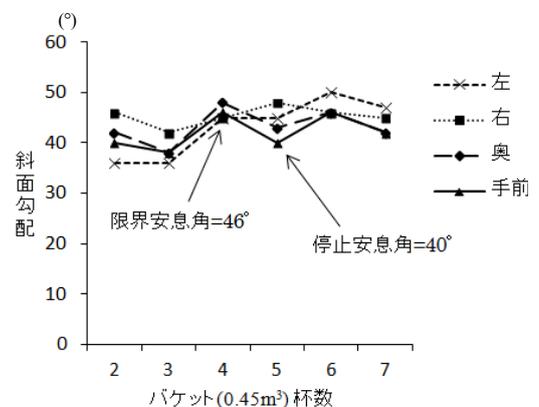


図 24 安息角試験による停止安息角と限界安息角 (中部地方の安定型処分場での実施例)

崩れが停止した時の斜面角である停止安息角の決定にあたっては、バックホウ・バケットの手前側（図 23 上左の右側斜面）の勾配をみるのが基本になる。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ためである。

また、これまでの試験結果で、容量 0.45m³ 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と良い。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）とすると良い。（以上、図 24 参照）

④安息角試験結果の利用方法

ア) 廃棄物斜面の安定勾配

安息角試験で得られた停止安息角は、基本的に廃棄物斜面の安定勾配とみることができる。

停止安息角は、廃棄物を撒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。

イ) 内部摩擦角

これまでの国内 17 箇所での試験結果（図 25）

から、安息角試験による停止安息角と一面せん断試験による内部摩擦角には、以下の関係が見出されており、安息角試験を内部摩擦角の概略値を推定するために使用することが可能である。

- ・ $c < 5\text{kN/m}^2$ のとき、

$$\varphi = \alpha_r \quad \dots \dots \dots \text{式 5} \quad (\text{式 6 の結果と比較して安全側の値を用いても良い})$$

ここに、 α_r ; 安息角試験による停止安息角(°)

- ・ $c > 5\text{kN/m}^2$ のとき、

$$\varphi = 1.6\alpha_r - 28 \quad \dots \dots \dots \text{式 6}$$

ただし、算定結果が $\varphi > \alpha_r$ のときは、 $\varphi = \alpha$

なお、内部摩擦角が小さい地盤（ばいじん等）では、式 6 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 25）、式 6 よる推定は危険である。

ウ) 引張抵抗角

図 26、図 27 に示すとおりプラスチック等の繊維状物が混入した廃棄物地盤では限界安息角と停止安息角の差は引張抵抗分（引張抵抗が緩く働いている状態）と考えることができる。実際に、これまでの現場試験結果でも、表 5 のとおりに長尺のプラスチック等の繊維状物等を含む現場ほど、限界安息角と停止安息角の差は大きくなっている。逆に、繊維状物等を含まない東北地方のばいじん地盤では限界安息角と停止安息角の差は 2° と小さい。

引張抵抗は、式 7 の無限長斜面法による粘着力を無視したときの斜面安定計算式¹⁾²⁾で、 ζ （引張抵抗角）として表される。

$$F_s = \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} + \frac{\tan \zeta \cdot \sin(1.5\theta)}{\sin \theta \cdot \cos \theta} \quad \dots \dots \dots \text{式 7}$$

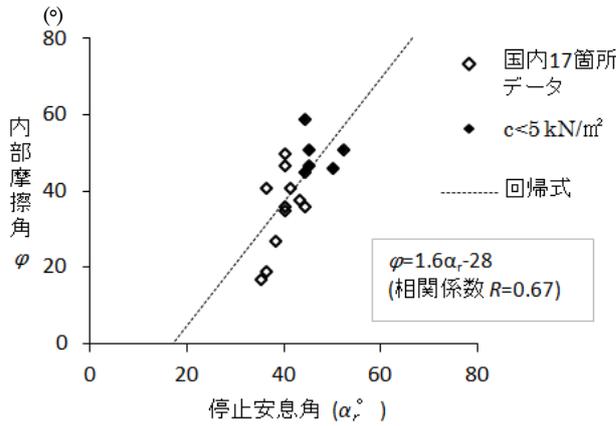


図 25 停止安息角と一面せん断試験による内部摩擦角(φ) (安定型処分場等の国内 17 箇所での試験結果)

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 (°)

ここで、式7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7 右辺2項 = 0) $F_s = 1.0$ とすると、この2つの関係から式8が得られ、引張抵抗角(ζ)を概算することができる。表5に現場毎に式8により計算した引張抵抗角の平均値を示す。

$$\tan \zeta = \frac{\sin \alpha_c \cdot \cos \alpha_c}{\sin(1.5\alpha_c)} \left(1 - \frac{\tan \alpha_r}{\tan \alpha_c}\right) \quad \dots \dots \dots \text{式 8}$$

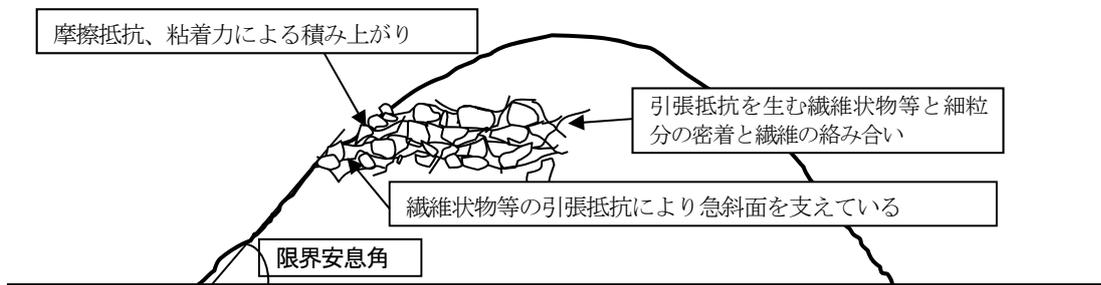


図 26 急勾配堆積斜面に働く引張抵抗と摩擦力の発現イメージ

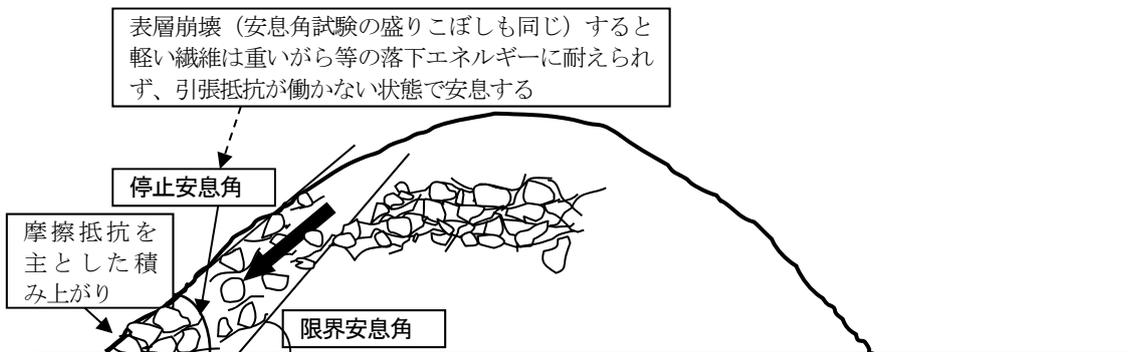


図 27 表層崩壊後の摩擦抵抗、粘着力による積み上がり（停止安息角）

表 5 現場区分別の停止安息角、限界安息角の試験結果と引張抵抗角算定結果
(各現場で得られた値の平均値)

プラスチック等の サイズ	箇所 数	限界安息角	停止安息角	$\alpha_r - \alpha_c$ (°)	引張抵抗角 ζ (°)
		α_r (°)	α_c (°)		
含10cm超	13	51	43	8	7
概ね10cm以下	4	41	38	3	-----
プラスチック無し	7	41	37	4	-----
例) 東北ばいじん地盤		38	36	2	-----
海外埋立地	2	51	36	15	11

注) プラスチック等のサイズが10cm以下の場合は限界安息角と停止安息角の差が小さく、引張抵抗を計上していない。

iv 現場空隙率試験の方法と試験結果の利用方法

廃棄物地盤中の空隙率は埋立後に時間経過とともに減少し、それに伴って極限支持力等が増加する（図7）ことや、空隙率が大きい程、沈下速度が速いことが確認されており、空隙率は地盤の締固まり状態や沈下量を推定するための指標となる。

廃棄物地盤中の空隙率は、水置換による土の密度試験（JGS 1612-2003）⁵⁾の実施後に、現場でドラム缶大の容器に廃棄物を水浸することで容易に調べることができる。

①試験の目的と方法

現場空隙率試験は次のとおりにより地盤中の空隙率（空隙率）を現場で調べるものである。

- ア) 廃棄物地盤上で、図28左図のように水置換による土の密度試験（JGS 1612-2003）⁵⁾を行って、掘削容積（地盤に掘った穴の容積）と、掘削廃棄物の重量を調べる。
- イ) 掘削容積を調べた穴の近傍から採取した試料を試験室の乾燥炉に入れて含水比を調べる（土の含水比試験；JIS A1203:2009）⁶⁾。
- ウ) 土の密度試験での掘削廃棄物の全量を、容積を計量できる水を入れた容器に投入し（このとき、棒等で十分に攪拌し試料中の空気を抜く）、廃棄物投入前後の水位の増分を計測し、容積の増分を計算する。掘削容積からこの容積の増分（廃棄物の実容積）を差し引いた容量と掘削容積の比が空隙率となる。また、試料の実容積から試料の実密度も計算できる。

注1) 廃棄物投入後に一定量の水（150リットル程度）を容器に投入する方法を採れば、試験の過程で、試料のほぐし後のふけ率、注水による廃棄物の容積減少も併せてみる事ができる。

注2) 水温による試料の体積変化（例：ポリエチレン線膨張率⁷⁾ = 100~200/10⁶(K⁻¹) 等は求める精度に比べ小さく無視している。

②試験結果の利用方法

図29に13箇所での堆積経過時間と本試験法による空隙率の関係を示す。堆積年数別のデータが得られている安定型処分場では、空隙率は埋立後に時間経過とともに一定の関係で減少している。また、図7に示したとおり中部地方の安定型処分場では、時間経過とともに空隙率が減少し各種強度定数が増加しているとともに、空隙率が大きいほど沈下速度が速いことも確認している。このため、各現場で空隙率と強度定数、沈下量のデータを蓄積し、これらの関係を把握することで、将来の強度や沈下量を推定することも可能になる。

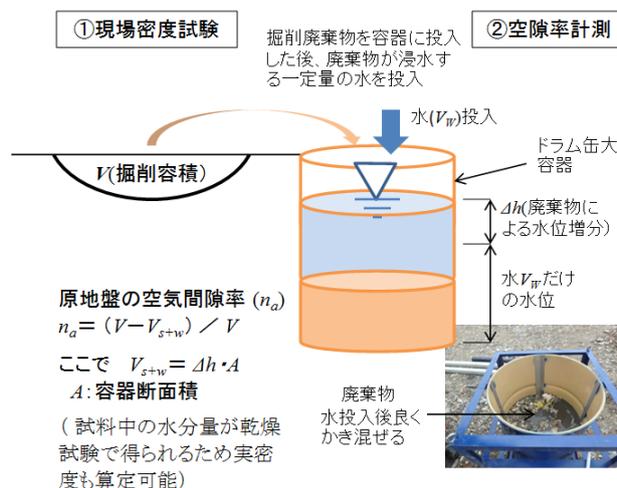


図28 現場空隙率試験の方法

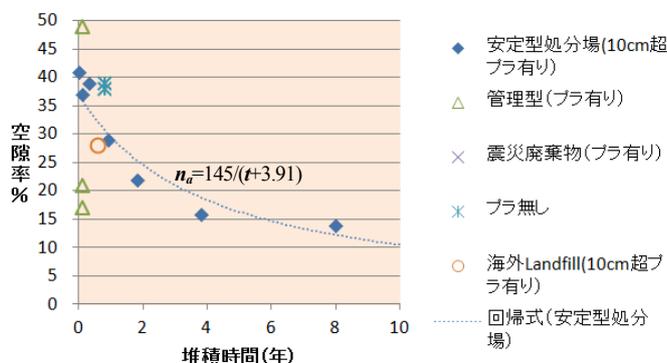


図29 空隙率と堆積時間の関係
(安定型処分場等の13箇所での試験結果)

b. 廃棄物地盤利用のための概略地盤評価方法

i 支持力の概略評価

廃棄物地盤の利用検討の初期段階等には、キャスポルによるインパクト値(Ia)から推定される粘着力(c)と、安息角試験の停止安息角から推定される内部摩擦角(ϕ)を用いて、「建築基礎構造設計指針」¹⁰⁾に示された支持力公式によって極限支持力の概略値を知ること、地盤利用の可能性を探ると良い。

「建築基礎構造設計指針」¹⁰⁾に示された支持力公式は、土地盤を対象に旧来から定められているものであるが、**図 30**に示すように、廃棄物地盤で平板载荷試験により得られた極限支持力と、キャスポル Ia 値から**式 4**により推定した粘着力と、安息角試験の停止安息角から**式 5、式 6**により推定した内部摩擦角を支持力公式(**式 9**)に代入して得られた極限支持力の間には相関が見られることから、検討の初期段階では、平板载荷試験が高価な試験であることも含めて、キャスポルと安息角試験による c 、 ϕ を用いて極限支持力の概略を把握することが合理的である。なお、ばいじん(焼却灰)地盤については、両者の間に隔たりがあり(**図 30**)、現状ではこの方法での推定は難しい。

図 30で、支持力公式による極限支持力は、平板载荷試験による値よりもやや大きめであるが、これは、平板载荷試験では試験時の载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 30**中の△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確認できないなかで载荷板径の10%の沈下量で極限支持力を決めていることから、概して平板载荷試験の極限支持力は小さめになっていることに起因していると考えられる。

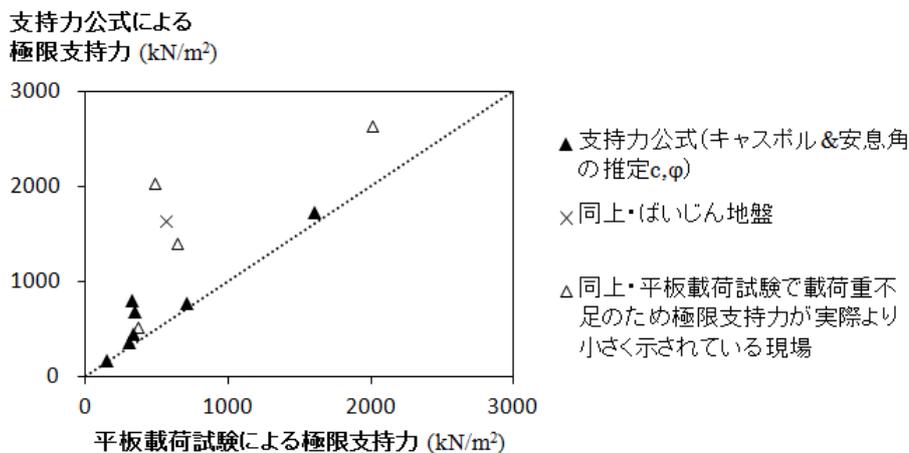


図 30 平板载荷試験と支持力公式による極限支持力の比較

「建築基礎構造設計指針(日本建築学会)」¹⁰⁾による支持力公式は、次のとおり。

$$q_u = i \cdot \alpha \cdot c \cdot N_c + i_r \cdot \beta \cdot r_l \cdot B \cdot \eta \cdot N_r \quad \dots \dots \text{式 9}$$

q_u : 単位面積あたりの極限支持力度(kN/m^2)

N_c 、 N_r : 支持力係数 c : 支持地盤の粘着力(kN/m^2)

r_l : 支持地盤の単位体積重量(kN/m^3) α 、 β : 基礎の形状係数

i_r : 荷重の傾斜に対する補正係数 B : 基礎幅(m) η : 寸法効果による補正係数

注) 上式は支持力公式の根入れ項を省略している。支持力公式の詳細は「建築基礎構造設計指針(日本建築学会)」¹⁰⁾を参照のこと。

ii 沈下量の概略評価

プラスチックが混入した廃棄物地盤では、埋立終了後 1～2 年の間に急激に沈下し、その後は長期間にわたってゆっくりと沈下が進む。

沈下量の予測は、継続的な沈下計測を行って、プロット図から回帰式等により予測する方法が精度が高いが、検討の初期段階では、既存の類似した組成を有する廃棄物地盤の計測結果（図 8）から推察する方法が簡単である。

なお、沈下が急激に進む埋立終了後 1～2 年の間に廃棄物地盤の利用を考える場合には、沈下に対する十分な検討が必要である。また、この間は地盤中の空隙が大きく廃棄物地盤強度が十分に発現していないことにも留意が必要である。

概ね 10cm 以上のプラスチックが混入した廃棄物地盤の沈下傾向を見るには、図 8 に示した中部地方の安定型処分場の沈下計測結果を参考にすると良い。

iii 斜面安定性の評価

既刊の「不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価マニュアル(案)」(斜面安定性評価グループ、平成 25 年 12 月 3 日)¹²⁾による。ただし、安息角試験方法は本マニュアル(案)の 5)、a、iii によることとし、斜面安定性の概略評価における粘着力、内部摩擦角、引張抵抗角の与え方は本マニュアル(案)の式 4～8 を参考とすること。

なお、本マニュアル(案)の 4) iii に示したとおり、プラスチック等が混入した廃棄物地盤では長期間雨水の一部が貯留され、極めてゆっくりと排水が進む。このため、ボーリングや試掘により、このゆっくりとした流れの水を捉えて、その水位を地下水位（安定計算で残留水圧を与える水位）と見誤ることがあるので、斜面安定計算時等には留意が必要である。

iv 力学的に可能とみられる利用用途の選定

廃棄物地盤上へ設置される重量構造物としては風力発電設備や水処理施設（老朽化した既存施設の更新時）等が想定されるが、その際に必要となる地盤支持力は通常は最大でも 100kN/m²程度^{注)}であり、極限支持力の目安はその 3 倍（建築基準法施行令による）の 300 kN/m²程度となる。

沈下については、廃棄物地盤では長期間沈下が継続（10cm 以上のプラスチックが混入した中部地方の安定型処分場の例では堆積 10 年後で層厚 10m のとき 9mm/年の沈下）することを念頭に用途を選定する必要がある。不同沈下については、詳細評価で、利用予定場所の廃棄物組成を詳細に調べて力学試験を行うことが必要になるが、10cm 以上の長尺物が多く、廃棄物の搬入元が一定しているなど設置検討地内の廃棄物種類に違いが無い場合には、プラスチック等の繊維状物の繋がりにより土地盤よりも遙かに広い範囲で荷重を受けるため、不同沈下は発生しにくい。

注) 例えば、2MW 級の大型風力発電設備では荷重が大きくなるが基礎径を 20m 規模にすることで、上述の極限支持力があれば静的安定計算上は設置可能になる。

6) 詳細評価方法

a. 詳細評価の基本事項

詳細評価は、実際に廃棄物地盤上に重量構造物等の設置を検討する際に、設計のために地盤強度等を得るために実施するものである。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、試掘等）
- ③現場での強度試験（平板載荷試験、一面せん断試験等）
- ④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、概略評価結果や設置を検討する構造物等の設計基準類に従っ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 6 に示す。

表 6 詳細評価時に想定される調査・試験と留意事項等

現場分類	想定される調査・試験	留意事項
共通事項 (現場調査・試験)	<ul style="list-style-type: none"> ・測量 ・追加試掘 ・ボーリング調査 ・地下水調査 (・非破壊調査) 	<ul style="list-style-type: none"> ・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」²⁵⁾ 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) 地盤支持力の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・平板載荷試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物地盤の支持力を内部摩擦角や粘着力から推定することは可能であるが、設計時には平板載荷試験の実施が必要
2) 摩擦抵抗等の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・現場一面せん断試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物地盤上に構造物基礎を設置する場合には、滑動評価のために摩擦抵抗を知る必要があり、設計時に精度の高い摩擦抵抗が求められる場合は一面せん断試験が必要 ・廃棄物層斜面の斜面安定性評価が必要な場合も一面せん断試験が必要
3) 斜面安定性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・引張試験 ・斜面安定解析 	<ul style="list-style-type: none"> ・法面の近傍（円弧すべり計算等による想定すべり面の範囲内）に構造物を設置する場合に検討が必要 ・引張試験は引張抵抗の有無が斜面安定性評価への影響大のときに実施すると実態的な評価が可能になる
4) 沈下量の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・沈下計測 	<ul style="list-style-type: none"> ・継続的な沈下計測データによる将来沈下量の予測
5) 地震時の検討	<ul style="list-style-type: none"> ・震度法による解析 	<ul style="list-style-type: none"> ・プラスチック等が混入した廃棄物地盤では従来から用いられている震度法により安全側の評価が可能
6) 不同沈下の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・高密度の平板載荷試験の実施 ・現地実証実験 	<ul style="list-style-type: none"> ・プラスチック等が混入した地盤では、不同沈下は発生しにくいですが、廃棄物地盤では異物混入や局所的に廃棄物組成が極端に異なることがあり得るため、不同沈下による影響が大きい構造物の場合には高密度の平板載荷試験の実施が必要 ・キャスポルで平板載荷試験の実施地点間を補間すれば経済的
7) 構造物設置時のガス等への影響評価	<ul style="list-style-type: none"> ・偏心載荷実験時のガス等の測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物地盤上の構造物設置時には「最終処分場跡地形質変更に係る施行ガイドライン」⁴⁾に従う必要があり、設計荷重の載荷時のガス発生等の影響を調べる事が求められる

b. 地盤の平板載荷試験

廃棄物地盤の内部摩擦角や粘着力から支持力を推定することは可能であるが、廃棄物地盤上の重量構造物設置を具体的に検討するとき（直接基礎設計時等）には、現状では平板載荷試験の実施が必要になる。とくに、不同沈下による影響が大きい構造物の設置を検討する際には、建設予定地内で複数の平板載荷試験の実施が必要になる。また、廃棄物地盤は土砂に比べ個々の構成物が大きいことと、できるだけ深い位置までの廃棄物を反映した支持力を得るために、試験時にはできるだけ大きな径の載荷板を用いることが望ましい。

地盤の平板載荷試験（JGS1521-2003、**図 31**、**図 32**）は、「地盤調査の方法と解説（地盤工学会）」⁵⁾に試験方法の詳細が示されており、廃棄物地盤においても同書に従って実施することが基本である。

廃棄物地盤での留意点は、プラスチック等の繊維状物を含む場合は、非常に粘り強い（resilient）挙動を示すことから、載荷による沈下の進みが早い（地盤反力係数が小）が、極限支持力や降伏荷重を知るためには相当な載荷圧力が必要となる。沈下量が大きいため、ジャッキや変位計のストロークも必要になる。

一方で、載荷のための反力を得るには重機を利用することが簡単であるが、重機の重量には限りがあるため、むやみに大きな沈下板を用いることもできない。ただし、廃棄物地盤上への設置が想定される風力発電設備や水処理施設（老朽化した水処理施設の廃棄物地盤上への移転等）の載荷重はそれほど大きくはなく、その場合は、極限支持力で 300kN/m^2 程度あることの判断で足りる。したがって、想定する構造物から求められる必要な支持力（許容支持力）と、極限支持力（許容支持力の3倍とされる⁵⁾）を求め、現地を得ることのできる反力（重機重量等）を踏まえて可能な範囲で最大の載荷板径を用いるのが良い。

例) バックホウ（バケット 0.7m^3 級）の場合、 16t （ $\approx 160\text{kN}$ ）程度の反力をとることができ、この場合は、載荷板直径を 600mm とすれば、約 500kN/m^2 までの載荷が可能になる。

なお、土地盤では「平板載荷試験によって求められる支持力特性は、載荷板直径の1.5倍～2.0倍程度の深さの地盤が対象になる⁵⁾」とされるが、プラスチックが混入した廃棄物地盤では、キャスポルの影響範囲実験で深さ方向に土地盤（珪砂）の2倍程度の影響範囲があったことから、平板載荷試験でも載荷板直径の3～4倍程度の深さまでの地盤が対象になっていると考えられる。



図 31 廃棄物地盤上での平板載荷試験
（載荷板径 1000mm）

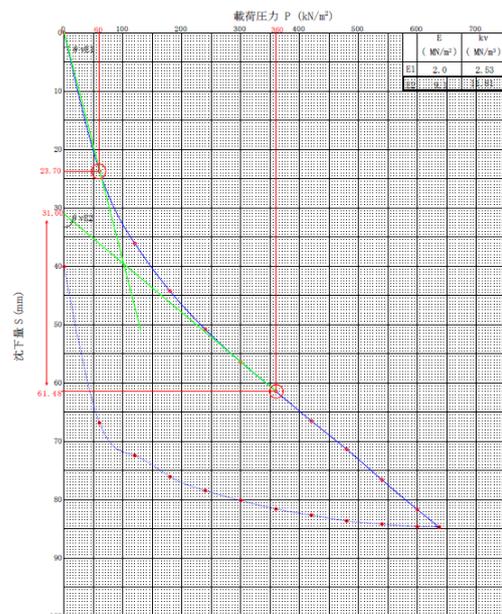


図 32 平板載荷試験結果例
（中部地方安定型処分場 8 年経過地盤）
[載荷板径 1000mm 極限支持力 $>640\text{kN/m}^2$]

c. 一面せん断試験

廃棄物地盤上に構造物基礎を設置する場合には、滑動評価のために摩擦抵抗を知る必要があり、設計時に精度の高い摩擦抵抗が求められる場合は一面せん断試験（図 33、図 34）が必要になる。

また、設置する構造物が法面に近く、斜面安定性評価が必要な場合も一面せん断試験が必要になる。

安定型処分場や不法投棄現場等で、埋立物が雑多でも、雑多な状態で一定している場合には、 c （粘着力）、 ϕ （内部摩擦角）を求める際の「垂直応力-せん断強度」の関係が直線状になり（図 35）、適切に c 、 ϕ を求めることができる。一方、管理型処分場など、埋立物が処分場内の近距離の範囲内で極端に異なることがある場合には、「垂直応力-せん断強度」の関係が乱れるため、こうした場合には現行の試験法では、数多くの試験を行うなどして適切な「垂直応力-せん断強度」の関係を求める必要がある。



図 33 廃棄物地盤での一面せん断試験

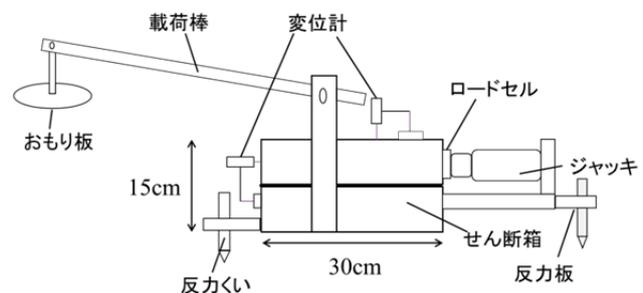


図 34 一面せん断試験機

具体的な試験方法は、「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)」（斜面安定性評価グループ、平成 25 年 12 月 3 日）¹²⁾に示している。

埋立物が処分場内の近距離の範囲内で極端に異なる場合は、図 36 のように「垂直応力-せん断強度」の関係が乱れるため、このような場合に、構造物設置予定地の適切な c 、 ϕ を知るためには、予定地内で一面せん断試験を多く実施することにより「垂直応力-せん断強度」図のプロット数を多くして評価するなどの対応が必要になる。

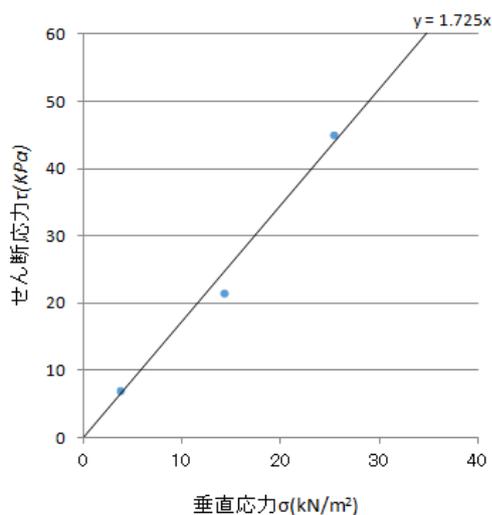


図 35 垂直応力-せん断強度
(中部地方安定型処分場 1 年経過地盤)

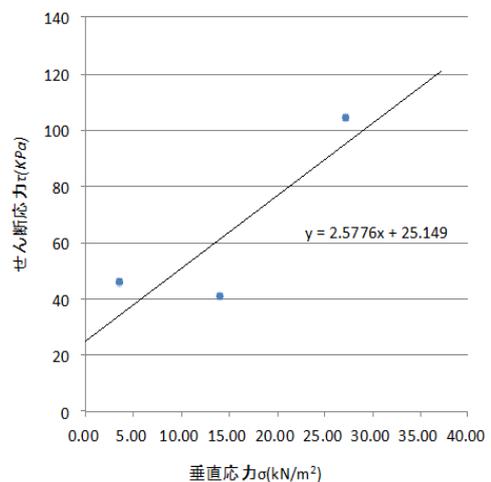


図 36 垂直応力-せん断強度
(関東地方管理型処分場埋立直後地盤)

d. 沈下量の評価

重量構造物等を設置を検討している廃棄物地盤の将来の沈下量を把握するためには、1～2年程度の継続的な沈下量計測を行って評価する必要がある。

プラスチック等が混入した廃棄物地盤では双曲線状に緩やかな沈下が継続することから、沈下量計測結果をもとに経過時間－沈下量（又は沈下速度）の関係を回帰式等により求めることにより、将来のおおよその沈下量を把握することができる（4）、ii 図8参照）。

沈下量を調べるための方法として、図37のように沈下板を設置して、水準測量により沈下量を計測する方法がある（「沈下板を用いた地表面沈下量測定方法」(JGS1712-2003)⁹⁾）。



図 37 廃棄物地盤上への沈下板の設置

e. 地震時の検討

振動台実験により、10cm以上のプラスチックが混入した廃棄物地盤では、水平震度が1を超えるような条件で無い限り、地震時に擁壁等に作用する水平土圧は、土地盤より小さいことを確認している。このため、このような廃棄物地盤の地震時の斜面安定計算や擁壁等の安定計算においては、土地盤で用いられる震度法による解析を行うことにより安定性を評価することができる。

固定壁に作用する地震時水平土圧について、10cm以上のプラスチックが混入した廃棄物地盤の振動台模型実験を行って、粘着力のない乾燥豊浦砂（相対密度90%）の結果¹¹⁾との比較を行った。廃棄物地盤は見かけ上の粘着力を有し、静止時には自立して水平土圧が作用しない状態であった。水平震度が大きくなると地震時水平土圧は徐々に大きくなるが、廃棄物地盤では、水平震度が1を超えるような加速度で無い限り、地震時に擁壁等に作用する水平土圧は、土地盤（豊浦砂）より小さくなる（図38）。

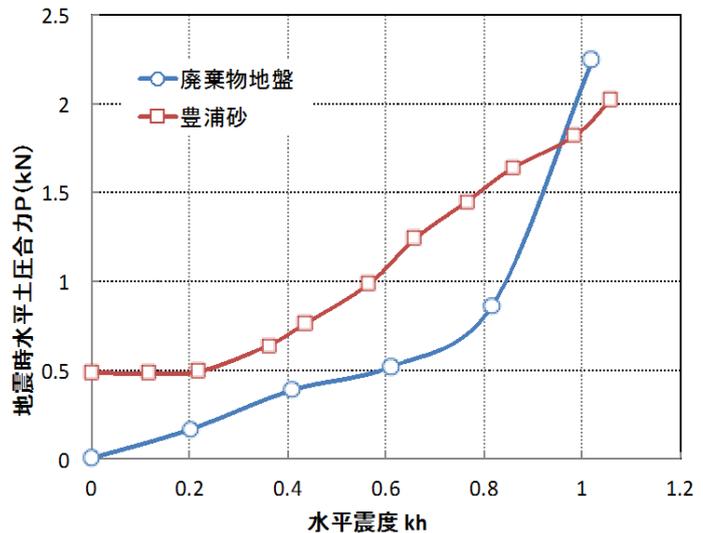


図 38 振動台実験による廃棄物層に作用する水平土圧（豊浦砂との比較¹¹⁾）

f. 不同沈下の検討

プラスチック等が混入した地盤では、不同沈下は発生しにくいですが、廃棄物地盤では異物混入や局所的に廃棄物組成が極端に異なることがあり得るため、不同沈下による影響が大きい構造物の設置を考える際には、詳細な検討が必要である。平板載荷試験を多く実施して（衝撃加速度試験や安息角試験を併用することが経済的）、載荷圧力-沈下量の関係に差が無いことを確認する方法がある。可能な場合には、4)、Vに示した現場実証実験により検証する方法もある。

不同沈下の発生の有無を検討する方法として、平板載荷試験で、できるだけ大きな載荷板（1000mm 径等）を用いて、構造物設置場所の中央部や端部で実施して、載荷圧力-沈下量の関係に差が無いことを確認する方法がある。廃棄物地盤では載荷による影響範囲は、衝撃加速度試験の影響範囲実験の結果から、土地盤に比べ、深さ方向で2~4倍、広さ方向で5~10倍程度広いことを確認している。このため、不同沈下の検討をする際には土地盤の検討時よりは間隔を広げられると考えられるが、廃棄物地盤には種々あり一概に測定間隔は決められない。

平板載荷試験は大がかりな試験であるため、多数実施すると非常に高価になる。経済的に検討する方法としては、支持力と相関があることが確認されている衝撃加速度試験や安息角試験を補間的に用いる方法がある。キャスポルを多数実施し地盤強度の概要を把握した上で数カ所の平板載荷試験を実施して、平板載荷試験結果と衝撃加速度試験結果の関係を調べて、平板載荷試験地点間の支持力は衝撃加速度試験や安息角試験結果から推定すれば経済的になる。また、確実に不同沈下の発生の有無を確認する方法として、4)、Vに示したようにコンクリート版等の版を設置して偏心載荷実験を行う方法がある。小型風力発電施設基礎等の小型の基礎であれば、基礎の施工費用はそれほど高額ではないため（4)、Vの例では200万円程度）、平板載荷試験費用と比較して実施の検討をすると良い。

g. 現場実証実験等による載荷時の発生ガス等の確認

廃棄物地盤上に重量構造物を設置するためには「最終処分場跡地形質変更に係る施行ガイドライン」⁴⁾（以下、「形質変更ガイドライン」という）に従う必要があり、想定する構造物等が設置された際のガス発生等による影響を調べることが求められる。

重量構造物設置時のガス発生等への影響は数値解析で説明することは現状では簡単では無く、実証的に把握する方が現実的と考えられる。実証的に把握する方法としては、4)、Vに示したように設計荷重に相当する重量物（大型土のう、土砂盛土、大型重機等）を一時的に設置してガス発生等を計測する方法がある。

以下に、荷重載荷による影響があり得ると考えられる悪臭及び可燃性ガスについて、その計測方法を形質変更ガイドライン⁴⁾を参考にまとめた。

i 悪臭

形質変更ガイドラインには、「廃棄物の締固めに伴うガスの発生の可能性が無い表層利用の場合のみの土地の形質の変更においては対象外とする。なお、人家が近隣にないなど生活環境に支障が生じない場合、この限りではない。」と記されている。ただし、悪臭ガスの中には硫化水素ガス等の腐食性のある空気より重い毒ガスも含まれるため、作業時及び廃棄物地盤利活用時における十分な配慮が必要である。

①悪臭ガスの防止の目安

悪臭発散防止措置は、当該工事を行う場所近隣に適用される悪臭防止法に基づき都道府県知事が定める規制

地域ごとの基準を満足することを目安とする。

②臭覚による臭気の判定

臭気の有無は、掘削を行う場所において、ガスの発生しやすい状況時に、掘削前は少なくとも1回、掘削中は毎日判定することが望ましい。臭気の判定は

臭覚によることとする。臭覚により臭気があると判断された場合は、臭気物質の分析を行う。

臭気の程度は表7に示す6段階臭気強度表示法を参考にする。悪臭防止法の規制濃度は、臭気強度2.5～3.5の範囲で定められているので、規制地域ごとに定められた規制基準に該当する臭気強度を基準として、簡易的には認知しきい値濃度（何の臭いであるか分かる弱い臭い）を目安として評価する。

ii 可燃性ガス

廃棄物が露出するような場合、可燃性ガス等は発生しやすい状況にある。可燃性ガス等の発生が予測される場合は、可燃性ガス等による火災、爆発、及び酸欠・中毒を含む労働災害防止を配慮することが必要である。

①可燃性ガス等の防止の目安

形質変更ガイドラインに示されている可燃性ガス等の発生基準の目安一覧を表8に示した。形質変更ガイドラインでは労働災害防止の観点から、可燃性ガス等が発生しないという条件の目安としてまとめている。

②可燃性ガス濃度の判定

可燃性ガス濃度の判定は、表8に示した発生基準値に従う。事前調査で発生基準値を超えた場合、可燃性ガス等への対策を講ずる必要があり、作業環境濃度の監視及び換気対策を行う必要がある。しかし、事前調査で対策を不要とした場合でも、局部的な有毒ガスの滞留が存在する可能性もあり、突発的な可燃性ガス等の発生に対しては注意が必要である。

③地表面における可燃性ガス等の確認方法

観測井のような特定地点の測定では把握できない場合、表層及び地表面から発生するガスの有無を把握する必要がある。図39に静置式チャンバー法による地表面発生ガス採取方法模式図及び解析例を示した。このように地表面発生ガスを採取・分析することにより、地表面からのガスの発生を把握することができる。

表7 6段階臭気強度表示法

臭気強度表示法	においの程度	臭気指数*1	臭気濃度*2
0	無臭		
1	やっと感知できるにおい(検知閾値濃度)		
2	何の臭いかわかる弱い臭い(認知閾値濃度)		
2.5		10～15	10～32
3	らくに感知できる臭い	12～18	15～63
3.5		14～21	26～126
4	強い臭い		
5	強烈な臭い		

*1: 臭気指数=10×log(臭気濃度)

*2: 臭気濃度: 三点比較式臭袋法を用いて測定した臭気濃度

表8 可燃性ガス等の発生基準の目安一覧

物質名	発生基準値	摘要
メタンガス	1.5%以下	爆発限界の30%以下
酸素	18%以上	労働安全衛生規則第585条
炭酸ガス	1.5%以下	同上
硫化水素ガス	10ppm以下	同上

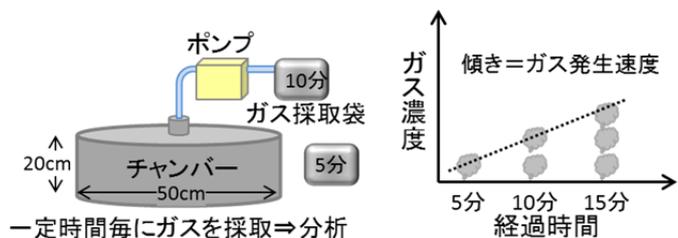


図39 静置式チャンバー法による地表面発生ガスの採取方法模式図及び解析例

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、2013 年 3 月
- 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（大成出版社）、2013 年 12 月
- 3) 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]、2011 年 1 月
- 4) 廃棄物最終処分場跡地形質変更に係る基準検討委員会：最終処分場跡地形質変更に係る施行ガイドライン
- 5) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説、2004 年 6 月
- 6) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、2009 年 11 月
- 7) 国立天文台：平成 26 年理科年表、平成 25 年 12 月
- 8) 地盤工学会：土質試験から学ぶ土と地盤の力学入門、2005 年 6 月
- 9) 日本道路協会：道路土工 擁壁工指針、2012 年 4 月改訂
- 10) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、第 2 版、2001 年 10 月
- 11) 渡辺健治ほか：模型実験による地震時土圧に関する一考察、第 26 回地震工学研究発表会講演論文集、pp.725-728、2001 年
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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、pp.27~35、1989
- 15) 土木学会：水理公式集 平成 11 年版、1999 年 11 月
- 16) 日本河川協会：河川砂防技術基準(案) 調査編、平成 24 年 6 月改訂
- 17) Florian Koelsch : Toolkit Landfill Technology, Chapter 4.6, Static Stability of Landfills, German Geotechnical Society(DGGT) , July 2009
- 18) Klaus-Peter Salomo: Schwimmende Gruendung von Windkraftanlagen auf Deponien am Beispiel der Deponie Georgswerder in Hamburg, Baugrundverbesserung in der Geotechnik, Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik, pp.451-466, Wien, 2012
- 19) Klaus-Peter Salomo, Detlef Krüger, Dirk Fischer: Großrahmenscherversuche auf der Deponie Wernsdorf, Oktober 2001
- 20) Stefan Melchior: Remediation and Future Use of the Hamburg-Georgswerder Landfill, IBA HAMBURG 2013
- 21) I.R.Fleming, B.F.Sparling and J.S.Sharma: Waste Mechanics Study Proposed Wind Turbine Foundation on Municipal Waste Landfill, October 2011
- 22) Tilman Wolfsteller: Construction and Operation of Windmills and Solar Power Plants on Landfills
- 23) Herrn Thomas Müllerschön: Windkraftanlage auf der Deponie West, Karlsruhe, August 2012
- 24) 松田雅央：カールスルーエ・エネルギーの丘見学、2015 年 9 月
- 25) 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
- 26) 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 年 6 月
- 27) 山脇敦、土居洋一、川寄幹生、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 年 7 月