

2020年10月23日

産業廃棄物安定型最終処分場の試験・設計方法に関するマニュアル(案)

勝見 武 京都大学大学院地球環境学堂（代表研究者）
大嶺 聖 長崎大学大学院工学研究科
土居 洋一 特定非営利活動法人最終処分場技術システム研究協会
山脇 敦 公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団
坂口 伸也 前田建設工業株式会社

(謝辞)

本マニュアル(案)は、2017～2019年度「環境研究総合推進費(委託費)」(課題番号3-1707)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、現場試験を実施させて頂いた処分場管理者の方々をはじめ、現場試験を担当して頂いた大洋基礎工業㈱の方々、動的安定解析等を担当して頂いた前田建設工業㈱の石黒健氏ら、本研究にご協力を頂いた識者、行政の方々に深く感謝する。

問い合わせ先：京都大学大学院地球環境学堂 勝見 武

E-mail; katsumi.takeshi.6v@kyoto-u.ac.jp

公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団 山脇 敦

E-mail; yamawaki@sanpainen.or.jp

本マニュアルの構成

1. 適用範囲

2. 設計のための必要事項と試験法

- (1) 安定型処分場の構造・維持管理についての規定事項
- (2) 本マニュアルの目的と設計のための必要事項
- (3) 安定型処分場の地盤強度特性
- (4) 安定型処分場の地盤分類別の強度特性と力学定数の目安値
- (5) 強度試験法
- (6) 荷重の種類と評価方法

3. 安全性確保のための留意点

- (1) 地盤中の浸透水の流れ
- (2) 埋立廃棄物が浸透水質に与える影響

4. 設計方法

- (1) 貯留構造物
- (2) 土えん堤と埋立勾配、高さ
- (3) 浸透水集排水施設

5. 搬入管理と展開検査上の留意点

- (1) 搬入管理に関する規定事項
- (2) 合理的な埋立方法
- (3) 展開検査等による搬入管理上の留意点

1. 適用範囲

本マニュアル(案)は、産業廃棄物安定型最終処分場（以下、「安定型処分場」という。）を対象に、安定型処分場での地盤強度を評価する際の試験方法と、安定型処分場を増設あるいは新設する際の基本的な設計方法を提示するものである。

安定型処分場は、産業廃棄物の安定5品目の埋立を行うものであるが、近年、中国の廃プラスチック輸入規制等を受け、多くの処分場で廃プラスチックの埋立量が増加している。廃プラスチックが混入した廃棄物地盤では力学特性や降雨の排水特性が、焼却灰や燃え殻等を主体に埋め立てる一般廃棄物最終処分場とは異なる面が多い。一方で、主にがれき類や陶磁器類を受け入れて廃プラスチックの受け入れをしていない安定型処分場もあるが、このような場合は従来の土質力学に基づいた評価が基本的に可能である。

このため、本マニュアル(案)は、プラスチック等が混入する安定型処分場を主な対象とし、一般廃棄物の最終処分場を対象とした既存の技術要領（「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領、全国都市清掃会議」¹⁾等）に示されていないような安定型処分場の特性をふまえた強度試験方法、土えん堤や埋立勾配の設定方法と関連する留意事項を主に記載している。

なお、本マニュアル(案)は現時点での知見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. 設計のための必要事項と試験法

(1) 安定型処分場の構造・維持管理についての規定事項

最終処分場の構造・維持管理については「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令、令和2年3月改正」で定められている。安定型処分場は、産業廃棄物のうち安定5品目(廃プラスチック類、ゴムくず、がれき類、金属くず、ガラス・陶磁器くず)と環境大臣が指定する産業廃棄物(石綿含有廃棄物を処理基準に則り無害化処理したもの等)について受け入れ可能な処分場であり、図1のイメージ図のとおりの構造が示されている。具体的には、主に次の事項が規定されている。

[構造基準]

- ① 埋立地の周囲には、みだりに人が立ち入るのを防止することができる囲いが設けられていること。
- ② 入口の見やすい箇所に、最終処分場であることを表示する立札その他の設備が設けられていること。
- ③ 地盤の滑りを防止し、又は最終処分場に設けられる設備の沈下を防止する必要がある場合は、適当な地滑り防止工又は沈下防止工が設けられていること。
- ④ 廃棄物の流出防止のための擁壁、堰堤その他の設備であって、次の要件を備えたものが設けられていること。
 - イ. 自重、土圧、波力、地震力等に対して構造耐力上安全である。
 - ロ. 廃棄物、地表水、地下水及び土壤の性状に応じた有効な腐食防止のための措置が講じられている。
- ⑤ 水質検査を行うための浸透水採取設備が設けられていること。

[維持管理基準]

- ⑥ 浸透水の水質検査の実施。
- ⑦ 搬入物の展開検査の実施。
- ⑧ 埋立処分終了後に埋立処分以外に利用する場合は約50cm以上の土砂等の覆いにより開口部を閉鎖。

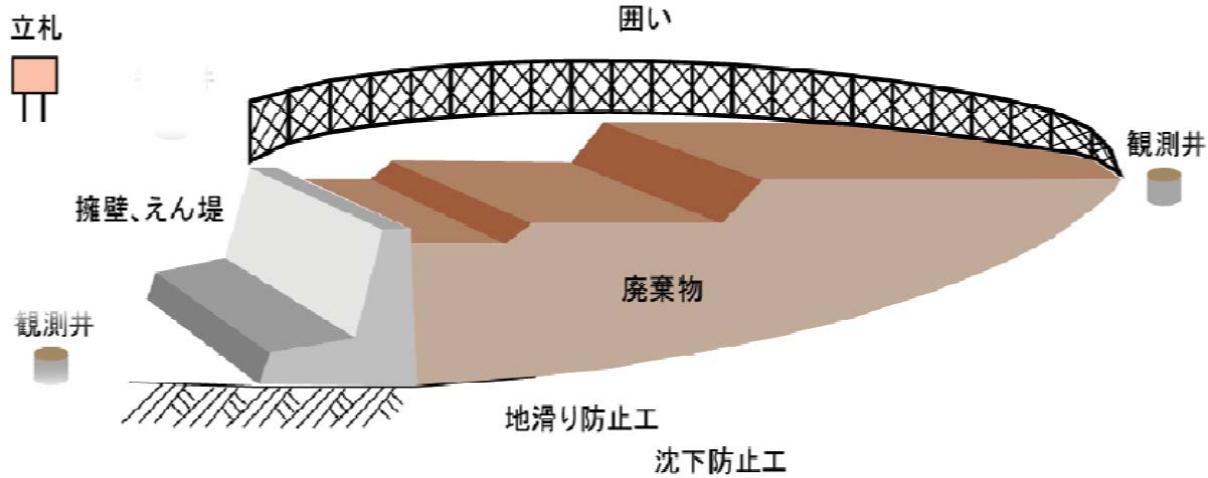
また、安定型処分場について、平成10年7月の「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令の運用に伴う留意事項について」に以下の①が、平成10年6月の「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令の一部改正について」に以下の②③④が記載されている。

[構造基準]

- ① 擁壁等の安定を保持するため必要と認められる場合における埋立地内部の雨水等を排出する設備の設置。

[維持管理基準]

- ② 搬入された廃棄物を埋め立てる前に搬入車両から降ろして拡げ、安定型産業廃棄物以外の廃棄物の混入がないことを確認する展開検査の義務付け。
- ③ 安定型産業廃棄物以外の廃棄物の混入がないことを確認するため、浸透水の水質検査を義務付け。基準を超えた場合には、産業廃棄物の搬入及び埋立処分の中止その他生活環境保全上必要な措置を講ずることを義務付け。
- ④ 最終処分場周縁の地下水の水質検査の義務付け。水質が悪化した場合には、その原因の調査その他の生活環境保全上必要な措置を講ずることを義務付け。



(「<https://www.env.go.jp/council/former2013/03haiki/y0320-09/mat03-07.pdf>」より)

図1 安定型処分場の構造イメージ

(2) 本マニュアルの目的と設計のための必要事項

本マニュアルは、(1)に示した安定型処分場についての規定で明記されていない事項について、これまでの研究成果を踏まえて記述（提案）するもので、処分場の土えん堤や埋立勾配の設定方法や、浸透水の安全性確保に関する留意事項について記載している（図2）。特に、廃棄物の強度特性をより現実的に評価することや、土えん堤をスリム化・急勾配化することによって、埋立容量増加の可能性を示している。併せて、浸透水の安全性の問題についても言及している。

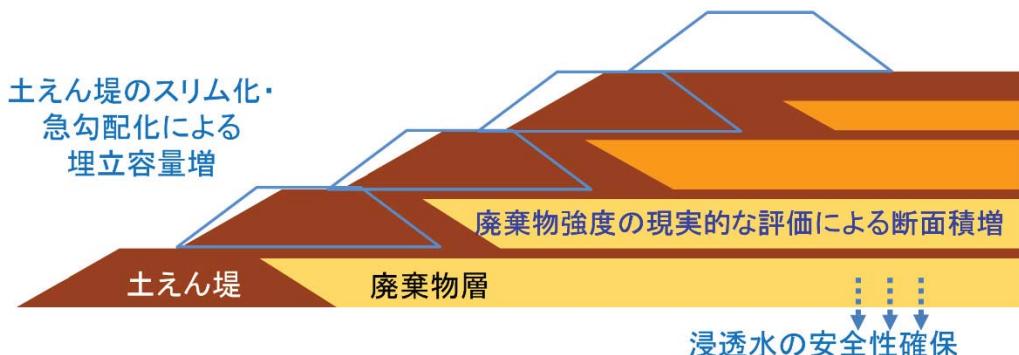


図2 安定型処分場の土えん堤・廃棄物層と本マニュアルの目的

埋立勾配の設定等のための廃棄物層の強度評価にあたっては、埋立対象の廃棄物種類を定めたうえで、廃棄物地盤の特性をふまえた強度試験を実施して、次のような強度定数を設定する必要がある。

- ・廃棄物層のせん断強度を定めるための粘着力(c)、内部摩擦角(ϕ)
 - (プラスチック等の引張抵抗を詳細に評価する場合には、引張抵抗(γ)が必要)
- ・廃棄物層の安定勾配を概略的にみる場合の停止安息角（及び自立可能な最大勾配を示す限界安息角）
- ・廃棄物層の硬度を概略的にみる場合のキャスカル試験による I_a 値（衝撃加速度）
- ・廃棄物層の締まり具合や将来の沈下発生を推測するための空隙率

また、これらの強度定数の設定の考え方の例を、新規処分場の建設と既存処分場の拡張とに分けて表1に示した。

表1 廃棄物地盤の強度定数設定の考え方の例

段階	強度定数設定の考え方
(1) 新規処分場の計画・設計	埋立廃棄物が類似すると考えられる既存の処分場（同じ会社の埋立中の処分場等）での試験値を活用する。類似処分場が存在しない場合は、強度定数の範囲（本マニュアルの表3に記載）を用いる。
(2) 既存処分場拡張の計画・設計	既存区画と類似した廃棄物の埋立を考える場合は既存区画での試験値を活用できる。埋立廃棄物が既存区画と異なる場合は、強度定数の範囲（本マニュアルの表3に記載）を参考に推定する。

(3) 安定型処分場の地盤強度特性

これまでに安定型処分場で行った現場強度試験（10処分場の埋立年数等の異なる26箇所）の結果を図3、表2にまとめた。図3は、表2に示した各処分場での強度試験結果について、概ね長さ10cm超のプラスチックの混入が多い処分場とそうではない処分場（陶磁器、がれき類等が主体）に区分して各強度項目の平均値をレーダーチャートに示したものである。

図3、表2から、概ね長さ10cm超のプラスチックの混入が多い処分場とそうではない処分場との間には明瞭な差があり、プラスチックが多い処分場では、概して、空隙が多くキャスボルIa値（衝撃加速度）、一面せん断試験による粘着力(c)をみると、埋立後の時間経過（年数）の増加に伴って、空隙率が減少し、Ia値や粘着力(c)が上昇傾向にある。このような地盤では、長尺のプラスチック等が地盤内で折り返される等して存在し、そうした部分で空隙が生まれ柔らかい地盤が形成され、その空隙は上層の埋立荷重等により長時間かけて減少し地盤の硬度が増していく。このため長尺のプラスチックを埋め立てている処分場では、長期間に渡る地盤沈下を想定する必要がある。

表2で、10cm超のプラスチックの混入が多い処分場のなかで埋立後経過年別のデータがある処分場（東北①、関東①、中部①）の空隙率、地盤の硬度を表すキャスボルIa値（衝撃加速度）、一面せん断試験による粘着力(c)をみると、埋立後の時間経過（年数）の増加に伴って、空隙率が減少し、Ia値や粘着力(c)が上昇傾向にある。このような地盤では、長尺のプラスチック等が地盤内で折り返される等して存在し、そうした部分で空隙が生まれ柔らかい地盤が形成され、その空隙は上層の埋立荷重等により長時間かけて減少し地盤の硬度が増していく。このため長尺のプラスチックを埋め立てている処分場では、長期間に渡る地盤沈下を想定する必要がある。

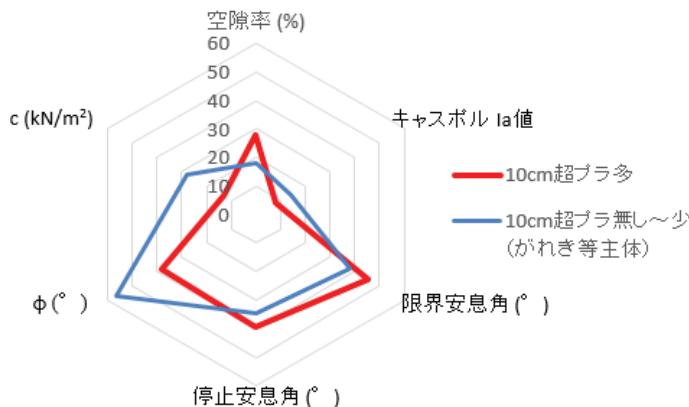


図3 廃棄物地盤分類別の力学強度平均値

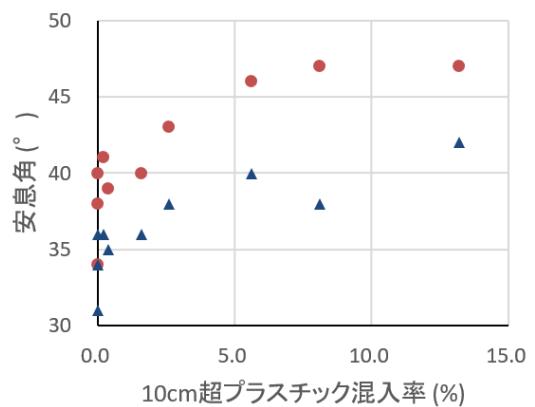


図4 10cm超プラスチック混入率と安息角
(●限界安息角、▲停止安息角)

表2 安定型処分場での強度試験結果

区分	安定型 処分場 名	調査 年月	埋立後 経過年	廃棄物組成				10cm超混入率		現場密度・空隙試験			キャスボル		安息角試験		一面せん断試験	
				プラス チック	ガラス・陶 磁器、が れき類	金属、 その他	土砂分 /2cm篩 下	10cm超 物 混入率	10cm超 プラ 混入率	湿潤 密度	含水比	空隙率	I_a	限界 安息角	停止 安息角	ϕ	c	(kN/m ²)
				(年)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(°)	(°)	(kN/m ²)	
東北①		2018/ 8	0.0	---	---	---	---	6.2	2.6	0.9	12	46	5.3	43	38	32	4	
		2017/ 8	1.0	5	19	10	66	---	---	1.4	38	25	13.3	38	32	51	10	
		2014/12	3.8	---	---	---	---	---	---	1.4	42	16	15.8	51	41	41	22	
		2017/ 8	10.0	17	15	18	50	---	---	1.9	19	---	10.7	42	40	51	11	
東北②		2019/ 6	4.5	22	24	7	47	20.7	13.2	1.3	32	31	6.4	47	42	28	17	
		2019/ 6	4.5	---	---	---	---	8.0	5.6	1.2	35	30	8.8	46	40	---	---	
10cm 超プラ 多	関東①	2017/ 8	0.0	5	26	6	63	---	---	1.5	24	---	10.1	37	36	27	13	
		2015/ 4	0.1	7	44	6	43	---	---	1.5	10	37	7.7	42	36	41	24	
		2015/ 4	15.0	6	18	10	66	---	---	1.6	28	21	7.6	46	40	35	24	
	関東②	2017/ 8	19.0	6	9	7	78	---	---	1.5	30	10	5.7	43	40	23	19	
		2019/10	10.0	25	7	5	63	12.5	8.1	1.4	26	26	6.1	47	38	53	11	
		2013/11	0.0	14	25	4	57	---	---	1.2	21	41	3.7	51	40	---	---	
中部①	関東③	2013/ 8	0.9	14	25	4	57	---	---	1.2	23	29	6.1	49	44	59	2	
		2014/ 8	1.8	14	25	4	57	---	---	1.4	29	22	7.2	46	40	36	8	
		2013/11	8.0	14	25	4	57	---	---	1.6	19	14	9.7	56	44	36	18	
		2013/11	15.0	17	28	12	43	---	---	1.5	23	17	7.3	51	43	38	5	
中国①	2015/ 8	0.3	6	30	5	59	---	---	1.1	25	39	8.3	46	38	27	11		
	2019/11	0.4	47	10	29	14	52.0	25.3	0.8	20	47	5.1	39	35	31	8		
平均				5.2	15	22	9	55	19.9	11.0	1.4	25	28	8.1	46	39	38	13
範囲									0.9-1.9	10-42	10-47	3.7-15.8	37-56	32-44	23-59	2-24		
10cm 超プラ 無し～ 少 (がれ き等主 体)	関東③	2018/ 2	0.3	1	22	3	74	5.8	---	1.8	23	17	23.8	36	34	---	---	
		2018/ 8	0.3	---	---	---	---	3.2	0.2	1.7	22	15	14.5	41	36	61	17	
		2018/ 8	0.3	---	---	---	---	6.2	0.4	1.6	30	14	21.1	39	35	---	---	
	北陸	2018/ 2	2.0	0	21	3	76	4.1	---	1.5	17	16	18.1	37	34	55	38	
		2018/12	0.8	0	19	0	81	0.0	0.0	---	---	---	9.8	38	36	---	---	
		2019/ 2	0.0	1	54	1	44	16.3	0.0	1.5	20	29	6.2	40	34	---	---	
中国③	2019/ 2	0.1	5	81	2	12	17.7	1.6	---	---	---	---	9.2	40	36	---	---	
	2019/ 2	10.0	0	35	1	64	1.2	0.0	1.9	15	19	10.4	34	31	53	28		
平均				1.7	1	39	2	59	6.8	0.4	1.7	21	18	14.1	38	35	56	28
範囲									1.5-1.9	17-30	14-29	6.2-23.8	34-41	31-36	53-61	17-38		
全 平 均									1.4	24	25	9.9	43	38	41	15		
全 範 囲									0.9-1.9	10-42	10-47	3.7-23.8	34-56	31-44	27-61	2-38		

注1) 「---」は、試験未実施。

注2) 強度試験は、全て、表層覆土を除去して、廃棄物露呈面の表層で行ったものである。このため、地盤内部では、上表の値よりも密度が大きく、空隙率が小さくなり、粘着力が増加しているものと想定される。

(4) 安定型処分場の地盤分類別の強度特性と力学定数の目安値

これまでの安定型処分場での強度試験結果（表2）をもとに、安定型処分場の地盤分類とその地盤強度定数の目安を整理したものを表3に示す。プラスチック等の纖維状物等^{注)}を含む処分場の地盤強度定数を調べる際の参考にするとよい。

注) プラスチック等の纖維状物等 :

本マニュアルでは、安定5品目のうち線状物（一次元物）とシート状物（二次元物）を指し、具体的には線状、シート状の廃プラスチックやゴムくず等が該当する。重量組成を調べた安定型処分場では、そのほとんどが廃プラスチックであった。

表3 安定型処分場の地盤分類と力学強度値の目安

地盤分類	受け入れ廃棄物種類	力学特性	力学評価方法	
			評価方法	力学定数の目安値
①概ね10cm超のプラスチック等の纖維状物等を多く含む地盤	廃プラスチックを受け入れている処分場。	空隙が多く地盤が柔らかい（キャスボルIa値、粘着力が小）。半面、纖維状物等による引張抵抗を有し粘り強く弾性的（resilient）な強度特性を有する。	廃棄物のサイズが大きく、既往の土質試験法の適用は難しい。 大型の一面せん断試験や概略評価手法である安息角試験、キャスボル等での評価が必要。 引張抵抗の詳細把握には引張試験が必要。	内部摩擦角（ ϕ ） 23°～59°（平均38°） 粘着力（ c ） 2～24 kN/m ² (平均13 kN/m ²) 停止安息角 32°～44°（平均39°）
②概ね10cm超のプラスチック等をほとんど含まない地盤	がれき類やガラス・陶磁器を主に受け入れている処分場で、廃プラスチックは基本的に受け入れていない処分場。	力学特性は土地盤に近く、①地盤に比べ比重が重く、固い地盤（粘着力大）が形成される。	基本的に既往の土質工学手法で評価可能	



①10cm超のプラスチックを多く含む地盤



②10cm超のプラスチックをほとんど含まない地盤

(5) 強度試験法

a. 強度試験の基本事項

概ね 10 cm 超のプラスチック等が混入する処分場の設計等（埋立勾配等の設定等）のために地盤の強度評価を行うにあたっては、個々の廃棄物サイズが大きいことや、廃棄物を乱さない状態での採取が難しいことから、既存の室内土質試験での評価は難しい。このため、表 4 に提案する現場試験を行うと良い。新規処分場の設計を行う際は、実現場での試験はできないため、埋立廃棄物が類似すると考えられる既存の処分場（同じ会社の埋立中の処分場等）での試験値を活用する必要がある。

なお、処分場の計画時の現場調査方法等については、「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領、全国都市清掃会議」¹⁾に詳細が示されているため、本マニュアルでは割愛している。

表 4 安定型処分場の設計等のために必要になる主な調査・試験と留意事項等

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">・ボーリング調査・地下水調査（・非破壊調査）	<ul style="list-style-type: none">・ボーリング調査や地下水調査は、斜面の安定性に大きな影響を与える処分場内部の残留水位の有無を知るために重要である。・1) 以下の現場試験は廃棄物層表層での試験になるため、ボーリング調査により、表層より下層が密度が高いことを知ることは、表層での試験が安全側の評価になることを確認できる。・非破壊調査（高密度表面波探査等）により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)せん断抵抗の評価	<ul style="list-style-type: none">・現場一面せん断試験	<ul style="list-style-type: none">・処分場の埋立断面の設計のためには廃棄物層のせん断抵抗（粘着力、内部摩擦角による）を知る必要があり、廃棄物層を乱さずに試験できる現場での一面せん断試験の実施が望ましい。
2)斜面安定性の詳細評価	<ul style="list-style-type: none">・引張試験	<ul style="list-style-type: none">・引張試験は引張抵抗の有無が斜面安定性評価への影響が大きいときに実施することでより実態的な評価が可能になる。
3)簡易試験法	<ul style="list-style-type: none">・衝撃加速度試験・安息角試験・現場空隙率試験	<ul style="list-style-type: none">・衝撃加速度試験（キャスバル）は地盤の硬度を簡易的に調べるもので、粘着力との相関がある。一面せん断試験を補完するかたちで実施することで合理的な調査が可能になる。・安息角試験は安定勾配を調べるものであり、10 cm 超のプラスチックを含む地盤では内部摩擦角との相関がある。一面せん断試験を補完するかたちで実施することで合理的な調査が可能になる。・空隙率試験は地盤中に占める空隙の割合を調べるもので、地盤の締固め状況や将来の沈下発生を推測するために活用できる。

b. 一面せん断試験

廃棄物地盤の原位置強度は、一面せん断試験^{②)}により把握することができる。

廃棄物地盤は、含まれる廃棄物の種類や組成が処分場や対象地点によって大きく異なる。そのため、安定計算に用いる強度定数は、原位置試験を行うことによって求めることができるので望ましい。原位置試験が難しい場合は、対象地の廃棄物層をサンプリングし、室内試験によって強度定数を求める事もできるが、できるだけ現場の密度に合わせて供試体を作製する必要がある。また、廃棄物の大きさに応じて供試体の寸法（サイズ）を大きくする必要がある。大きな廃棄物を取り除いて小さい寸法の供試体で試験を行うと、堆積廃棄物の強度を適切に表わしていないので注意が必要である。



図5 廃棄物地盤での一面せん断試験

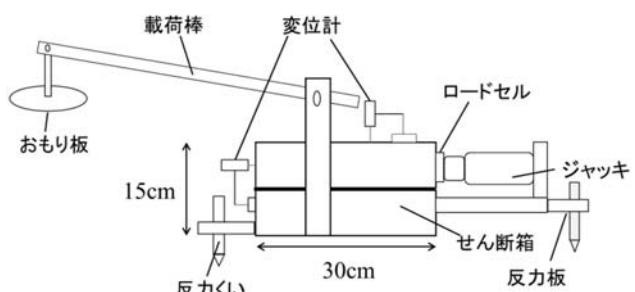


図6 一面せん断試験機

①一面せん断試験機

廃棄物層について土質力学に基づく斜面安定性評価を行うためには、モール・クーロンの破壊規準による強度定数（ ϕ ：内部摩擦角、 c ：粘着力）を求める必要がある。原位置では三軸圧縮試験が困難であり、室内試験では装置が大掛かりとなるため、強度定数のみを求める場合には、一面せん断試験が適している。堆積廃棄物を対象とした現場試験用に改良した一面せん断試験機を図5、図6に示す。せん断箱の寸法は幅30cm、奥行30cm、高さ15cmである。

②一面せん断試験の方法

現場の堆積廃棄物の表面を平坦に整形し、せん断箱の大きさに合わせて4つの側面を切り取り、ブロックの供試体を作製する。このとき、プラスチックや木片などが含まれている場合は、グラインダーを用いて廃棄物を切断することにより供試体を成形することができる。

せん断はジャッキを用いて手動で行い、せん断スピードは1mm/minとする。載荷棒により実荷重の10倍の載荷圧をかけることができ、その時、杭により下箱を固定することで反力をとる仕組みとなっている。反力杭はスクリュー型となっており、長さ22cm、直径2.5cmとなる。これによって、様々なものが混在している廃棄物地盤でも容易に反力がとれる。上載圧については、20kgの重りで約20kN/m²程度まで載荷可能である。せん断応力がピークを示さない場合は、せん断変

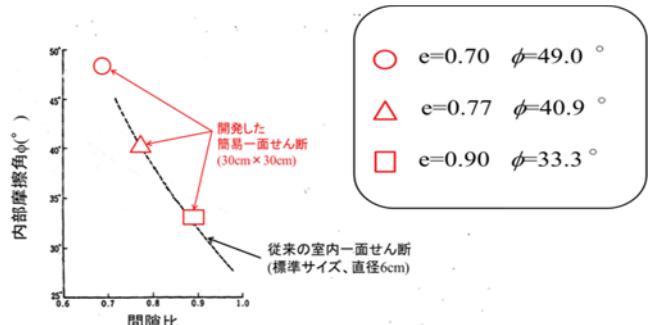


図7 室内試験結果との比較(豊浦砂)

位 35 mm のせん断応力をせん断強度とする(JIS A 1216:2009 より)。上箱の先端にロードセルをつけてせん断応力を求め、せん断箱に変位計をつけてせん断変位を測る。それより粘着力 c と摩擦抵抗角 ϕ を算定する。試験機の各部にペアリングをとりつけており摩擦を低減している。この試験機は現場で用いる上で便利なように、各部品をばらして、持ち運びができるようになっている。なお、各部が取り外せる仕組みとなっており、室内試験用の部品を取り付けることで、せん断箱を現場試験時と同様のものを使用し、室内試験を行うこともできる。この場合は、せん断はモーターを用いて自動で行い、せん断スピードは現場試験同様 1 mm/min とし、上載圧はエアシリンダーにより載荷する。試験機の性能は、豊浦砂を用いた試験により確認され、図 7 に示すように従来の室内一面せん断試験機(直径 60 mm)と非常に良い一致を示す。ここでは、豊浦砂の粘着力 c を 0 とし、 ϕ のみを算定した結果を示している。

c. 引張試験

一面せん断試験ではすべり面が水平方向となり、廃棄物の堆積面と一致する。そのため、せん断時にプラスチックなどの長い材料による引張効果が十分に発揮されていない。とくに、すべり面が水平方向から傾く場合には、その効果を考慮する必要がある。

10 cm 超のプラスチック等の長尺物が多く混入する場合等に、廃棄物層の引張強さを評価するためには引張試験²⁾の実施が必要になる。引張箱を 2 つ連結させて、上載圧を変えて引張強さを求めるこにより、拘束圧の依存性を考慮した引張強さが算定される。

プラスチック類の引張強度を求めるための引張試験機を図 8 に示す。この試験機は、ブラウンシュヴァイク工科大学の Koelsch(ケルシュ)博士により開発された試験機³⁾を参考に国内向けに小型化して作製したものである。引張箱は幅 50 cm, 奥行 50 cm, 高さ 50 cm の箱を 2 つ連結させたものとなる。2 つの箱とともに引張部分である連結側の面は解放されている。片方の箱をアンカーで固定し、もう片方の箱にジャッキをつけ、固定された箱と反対の方へ引っ張ることで試験を行う。

一面せん断試験同様に、圧密過程と引張過程があり、圧密過程では沈下量が落ち着く、もしくは 20 分程度を目安として圧密を打ち切ることとした。この時、載荷圧、沈下量、土圧を測定する。土圧は引張ジャッキ部分に取り付けたロードセルより測定する。引張過程では、引張スピードは一面せん断試験同様に 1 mm/min とし、引張変位、引張応力、垂直変位を測定する。また、上載圧を 3 回以上変化させて試験を行い、引張強度の上載圧依存性を確認する。

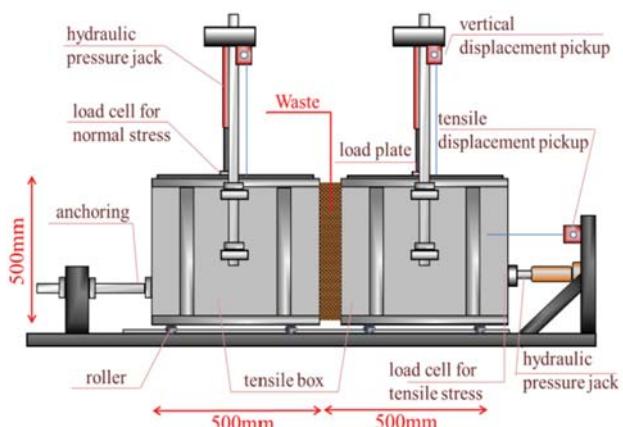


図 8 引張試験機（作製例）

d. 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

処分場の埋立断面の概略設計時等には、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（キャスボル^{4),5)}

キャスボルにより得られるインパクト値(**Ia**)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⁶⁾

安息角試験による停止安息角(**α**)は、廃棄物地盤の安定勾配の目安となるとともに、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⁶⁾

廃棄物地盤中の空隙率は、地盤の締固め状況の目安になるものであるが、将来の地盤沈下状況を推測するために役立つ。

ii 衝撃加速度試験（キャスボル）の方法と試験結果の利用方法

衝撃加速度試験（キャスボル^{4),5)}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できる。また、衝撃加速度試験（キャスボル）によるインパクト値(**Ia**)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(**Ia**)の影響範囲は、土地盤（珪砂）では広さ方向が直径で 13～24 cm、深さ方向が 9～22 cm である⁴⁾ のに対し、10 cm 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 110 cm、深さ方向が 40 cm 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、加速度計を内臓したランマー（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 キャスボル測定器の概要

キャスボル測定器は、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。キャスボ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**)、コーン指數(**qc**)、道路の平板載荷試験から得られる地盤反力係数(**k₃₀**)等の測定を目的とするものである。

③キャスボル測定器の構造

キャスボル測定器は本体部（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 50 mm、質量 4.5 kg のランマー（重錘）を高さ 45cm から自由落下させ、ランマーに内蔵の加速度計で衝撃加速度を測定し、その最大値を検出して結果をインパクト値 (I_a) 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9にキャスボル測定器を示す。

④衝撃加速度試験（キャスボル）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、20～30 m 程度間隔で実施することが望ましい。なお、1 箇所あたり 20 cm 程度の間隔で 5 回測定する。図9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）」⁴⁾ を参照。



図9 キャスボル (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

本来キャスボ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、キャスボルで精度よく測定できる土質の範囲として、最大粒径が37.5 mm 以下、10 mm 以上の礫を30%以上含まない土質材料とされる。安定型処分場のうち、がれき等が主体でプラスチックを基本的に受け入れていない処分場であれば、この条件の範囲内にある可能性があり、その場合は「簡易支持力測定器（キャスボル）利用手引き」⁵⁾に示されている相関関係式により地盤の粘着力等を推定できる。

一方で、10 cm 超のプラスチックが混入する地盤の場合は条件に合致しないため、キャスボルが有する相関関係式による推定はできない。

このため、10 cm 超のプラスチックが混入する地盤に対象を絞って（表2に示す安定型処分場 16 地点、及び不法投棄現場 4 地点での値⁶⁾）、キャスボル Ia 値と粘着力をプロットしたのが図10である。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（式1、図10）、10 cm 超のプラスチックが混入する地盤において、キャスボ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。

$$c=1.7Ia-0.98 \quad \dots \dots \dots \text{ 式 1}$$

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

⑥廃棄物地盤での衝撃加速度試験の適用範囲

式1は、10 cm 超のプラスチックが混入した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、試験の影響範囲は、試験地点を中心に直径 1 m、深さ 40 cm 程度の範囲となる。

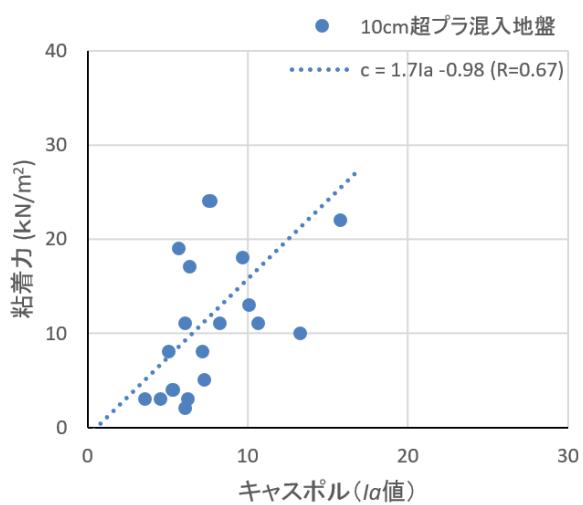


図 10 キャスボル(Ia)と粘着力(c)の関係
(10 cm 超のプラスチックが混入した安定型処分場
16 地点と不法投棄現場 4 地点での試験結果)

iii 安息角試験^{⑥)}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。安息角を土質工学では、「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」としており、「上方から落下させたときにできる円錐の山の斜面角度」を表すものである。

従来の研究^{⑦)}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。

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11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(1.0~2.0 m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、0.45 m³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(1.0~1.5 m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行い、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、廃棄物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11上左)。
- カ) 重機が持ち込めない現場では、人力で図11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(3,000 m²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11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。



図 11 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)

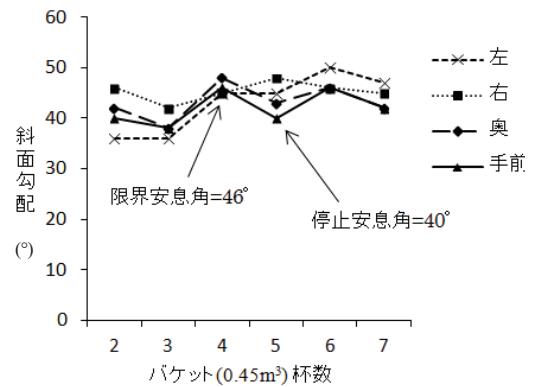


図 12 安息角試験による停止安息角と限界安息角（中部地方の安定型処分場での例）

④停止安息角と限界安息角の決定

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 11 上左の右側斜面）の勾配をみることが基本になる。これは、バックホウ・バケットで廃棄物を撒きこ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 0.45 m^3 バケットの場合では、バケット杯数（撒きこぼしの杯数）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 12 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

10 cm 超のプラスチックが混入する地盤（表

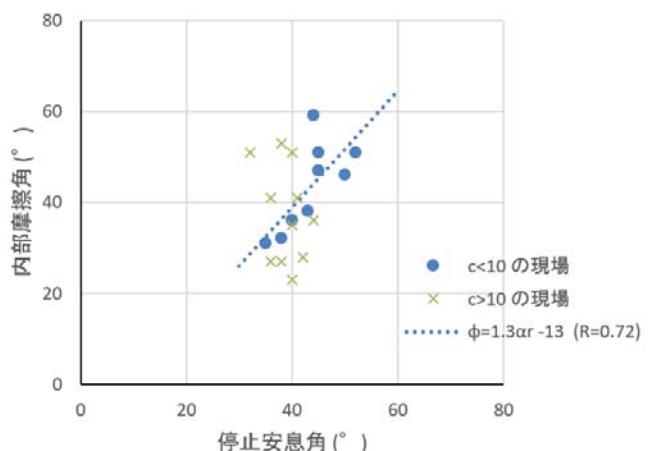


図 13 停止安息角と内部摩擦角(ϕ)
(10cm 超のプラスチックが混入した安定型処分場
16 地点と不法投棄現場 4 地点での試験結果)

2に示す安定型処分場16地点、及び不法投棄現場4地点での値⁶⁾での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をプロットしたのが図13である。粘着力<10 kN/m²の地点（長尺のプラスチックの混入が多い柔らかい地盤）では、以下の関係が見出せる。このような場合には、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。

- $c < 10 \text{ kN/m}^2$ のとき、

$$\phi = 1.3\alpha_r - 13 \quad \dots \dots \dots \text{式 2}$$

ただし、算定結果が $\phi > \alpha_r$ のときは、 $\phi = \alpha_r$ とすると安全側の評価になる。

④) 引張抵抗角の概略評価

図14、図15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2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。

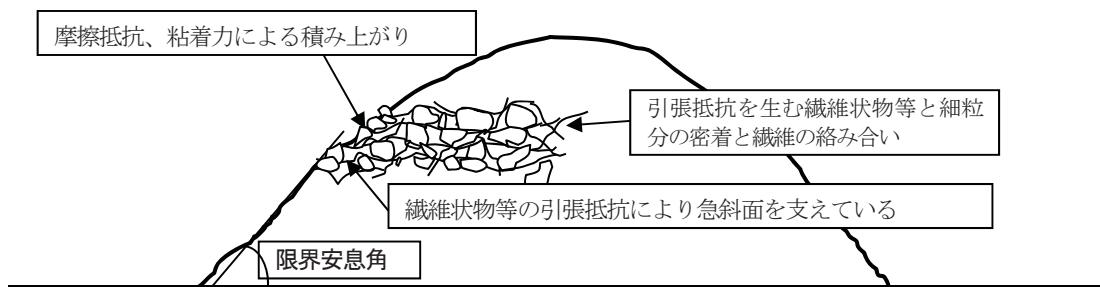


図 14 急勾配堆積斜面に働く引張抵抗と摩擦力の発現イメージ

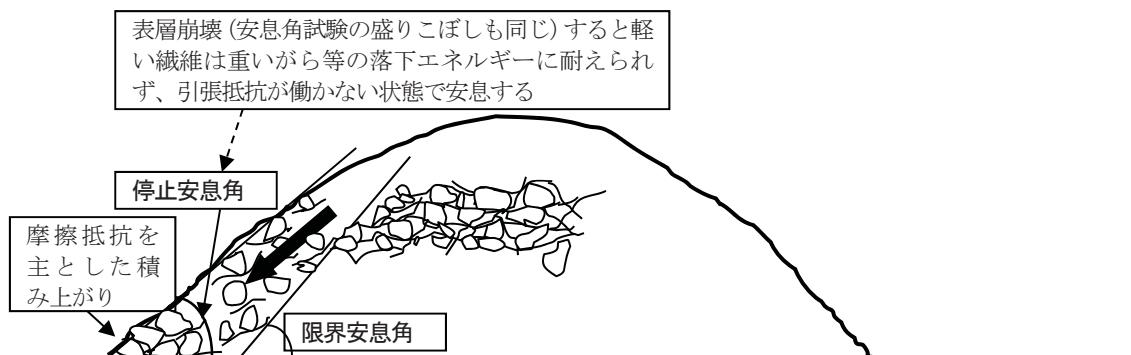


図 15 表層崩壊後の摩擦抵抗、粘着力による積み上がり (停止安息角)

引張抵抗は、式3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⁶⁾で、 ζ （引張抵抗角）として表される。

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

ここに、 Fs ；安全率

ϕ ；内部摩擦角（°）

θ ; 斜面勾配 (°)

ζ ; 引張抵抗角 (°)

ここで、式3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 (式3右辺2項 = 0) $F_s = 1.0$ とすると、この2つの関係から式4が得られ、引張抵抗角(ζ)を概算することができる。

$$\tan \zeta = \frac{\sin \alpha_c \cdot \cos \alpha_c}{\sin(1.5\alpha_c)} \left(1 - \frac{\tan \alpha_c}{\tan \alpha_r}\right) \quad \dots \dots \dots \text{式 4}$$

式4に、表2に示した 10 cm 超プラスチックの地点の平均値の限界安息角 $\alpha_c = 46^\circ$ 、停止安息角 $\alpha_r = 38^\circ$ を代入すると、引張抵抗角 $\zeta = 7^\circ$ となる。この値は、緩く堆積したときの引張抵抗と考えられるため、10 cm 超のプラスチックが混入する地盤ではこの程度の値を安定計算で考慮して概略評価することもできる。

iv 現場空隙率試験⁶⁾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、それに伴って粘着力等が増加する（図17）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）⁸⁾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16左側のように水置換による土の密度試験（JGS 1612-2003）⁸⁾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）⁹⁾。
- 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ことができる。
- 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¹⁰⁾ = 100~200/10⁶K⁻¹）等は求める精度に比べ小さく無視している。

②堆積時間と空隙率の関係

図17に異なる区画等での堆積年数別のデータが得られている5つの安定型処分場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。各処分場とも空隙率は埋立後に時間経過とともに減少し、とくに、10 cm超のプラスチックが混入している処分場では空隙率の埋立初期での変化が大きい。これは、長尺のプラスチックが混入している処分場では埋立初期の沈下が激しいことを表しており、処分場設計等の際に沈下量を推定する際の参考にするとよい。

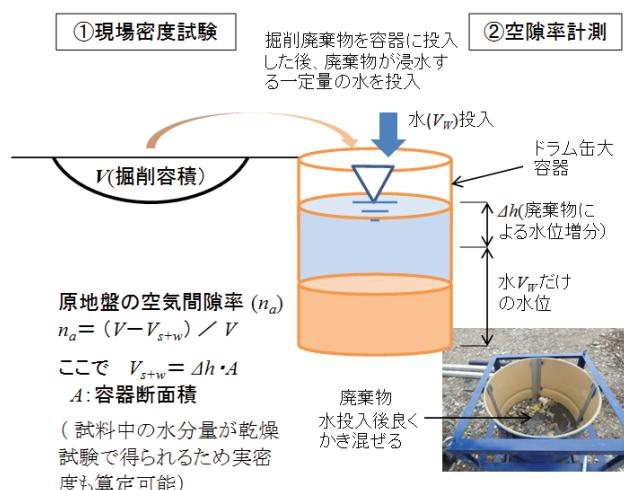


図16 現場空隙率試験の方法

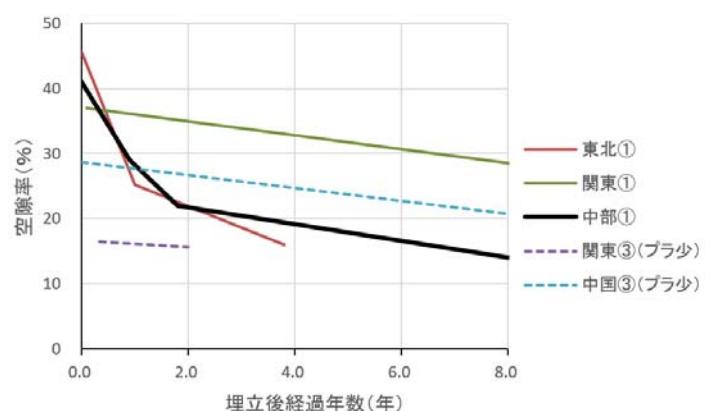


図17 空隙率と堆積時間の関係
(5つの安定型処分場の異なる区画での試験結果)

(6) 荷重の種類と評価方法

土えん堤を含めた埋立断面の設計にあたっては、土圧（廃棄物層によるもの）、残留水圧、地震荷重を考慮する必要がある。

このうち、土圧については、大型土槽による実験や振動台実験の結果¹¹⁾から、プラスチック等が混入した廃棄物では、通常の土砂地盤ほどには土圧が壁面に作用しないことを確認しており、貯留構造物としての擁壁等の設計に際しては、日本道路協会：道路土工 拥壁工指針¹²⁾等に示された既往の算定方法で土圧を計算すれば、安全側の評価となる。

残留水圧は、処分場の廃棄物層内に内部水位が形成された場合に静水圧として働くものであり、類似の処分場での内部水位の形成状況等を勘案して、考慮する必要がある。ただし、プラスチック等が多く混入した廃棄物層では、基本的な透水性が極めて高いため、大きな静水圧が働くことは考えにくい注)。

地震荷重の算定は、日本道路協会：道路土工 拥壁工指針¹²⁾等に示されている震度法によることが基本となる。

図18に東北①処分場でのボーリング結果をとりまとめる。図18(a)に標準貫入試験によるN値の、図18(b)にペネ試料の含水比の深度方向分布を示す。廃棄物地盤のN値は①に示すように地盤の深さ方向にはほぼ線形的に増加する傾向を示し、廃棄物の強度が上載荷重依存性を有する事が明白である。図18(b)の含水比は15%～40%の範囲内ではらついており、深さ方向の変化傾向は見られない。その複雑な変化は、不均一な廃棄物が互層状態で堆積していることを示唆する。深度15mの周辺には相対的にN値が低い箇所(②)が見られ、その深度の含水比も周辺より高い値を示す(③)。ボーリングコアの観察記録によると、この深度の廃棄物は粘性土分を多く含有しており、土質部分の性状の違いが表れている。図18(c)は同一処分場で計測されたS波速度の値を示しており、N値と同様に明瞭な上載荷重依存性が認められる(本データは後述する動的応答解析のパラメータ設定に用いられる)。S波速度においても深度10m付近に一部低い値が介在するとの報告があり、廃棄物地盤であっても一般的な盛土地盤と同様な物性の現れ方を示しているようである。図18(d)は、図18(a)のN値と上載荷重 σ_v (KN/m²)を用いてMeyerhofの式

$$Dr=21\times\sqrt{(N/0.7+\sigma_v/98)}$$

により相対密度に換算した値の深度方向の分布を示す(単位体積重量は表2の平均値を採用)。図18(a)では、深度20m以深のN値が50を超える値を示している。これに対応し、深部の換算相対密度は安定的にDr=80%～90%の範囲内にあり、④の粘性土混じり廃棄物層を除けば、深部の廃棄物層が非常に良く締まっている事(高い安定性を有するであろう事)が伺われる。図18(e)には含水比と換算相対密度の関係を示す。若干の右下がりの傾向は見られるものの、両者に明瞭な相関性は認められない。廃プラスチック等の繊維状物を多く含む廃棄物は転圧面では空隙が大(密度が小)となるが、廃棄物層が埋め立てと共に上載荷重によって圧縮、密実化され、締固まり度合いの均一化が深度方向に生じている事(転圧面と埋め立て完成時では状況が異なる事)を伺わせる。

注) ボーリング調査結果では孔内に水位は確認されておらず、盛土内に内部水位は形成されていない。現場試験を実施した他のプラスチックが混入した処分場においても、処分場底部に深さ1m程度の内部水位が形成されている例はあったが、高い内水位が形成されている事例は無かった。) 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、その位置を地下水位(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、留意が必要である。

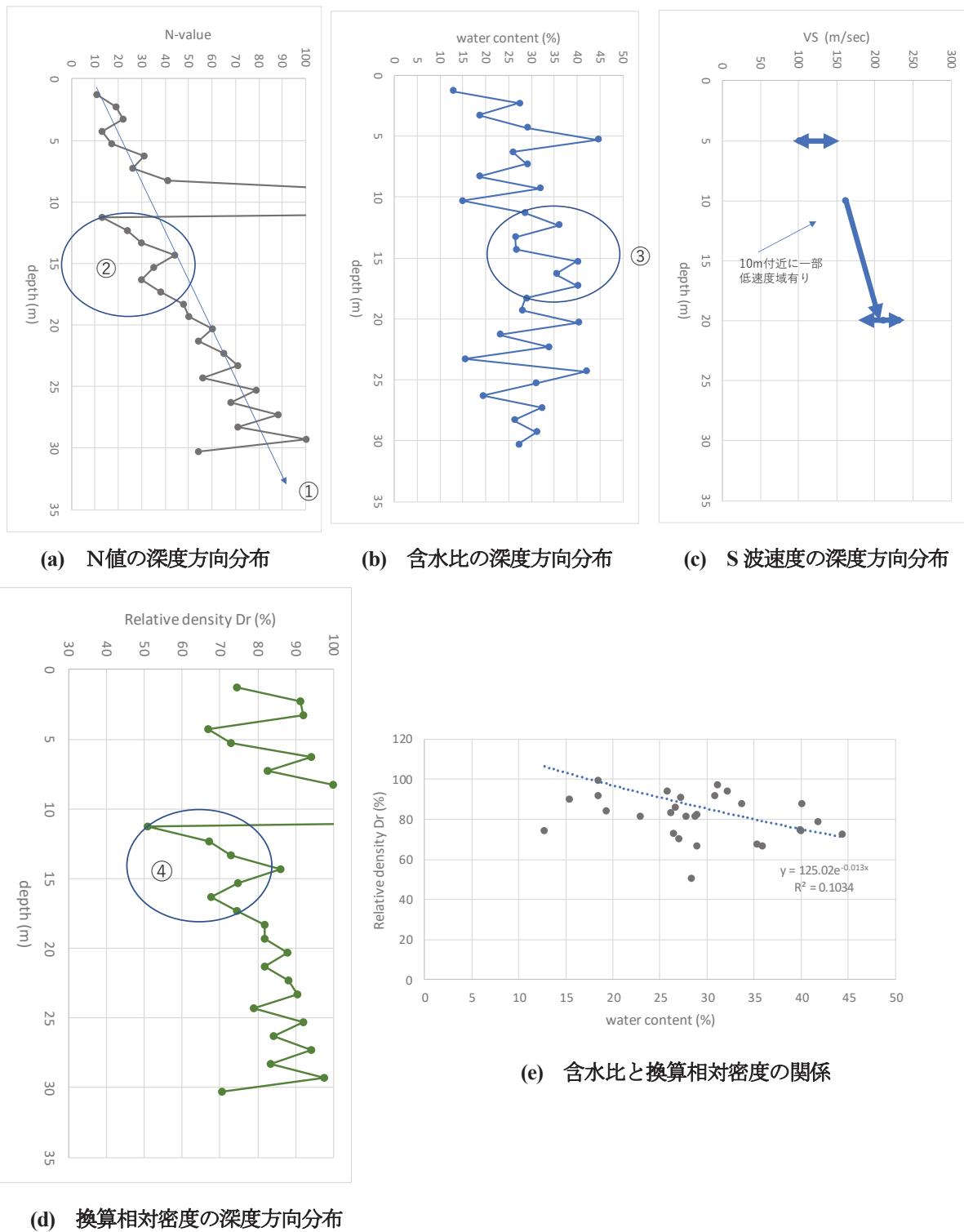


図 18 東北①処分場におけるボーリングおよびS波検層の結果

3. 安全性確保のための留意点

(1) 地盤中の浸透水の流れ

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凹部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凹部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、図20）。

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20；大型カラム実験（図21）で10cm以上のものを除いたケース(2)と、10cm以上のものをカッティングしたケース(3)は、無調整の標準ケース(1)に比べて排水開始が早く、排水ピーク量も高くなっている。実験値は表5に示す）。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。

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、次の貯留関数式で簡略的に表すことができる¹³⁾。

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

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

ただし、 $S > C$ のときは、

$$Q = q_{in} \quad \dots \dots \dots \text{式 2'}$$

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

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_{in} ：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)

なお、廃棄物の凹部等に貯留された水によるゆっくりとした水の流れは、中部①現場の試掘底面（集水井戸で把握している内部水位よりも25m高い位置）で、試掘後6時間後に湛水し始めたことでも確認している。

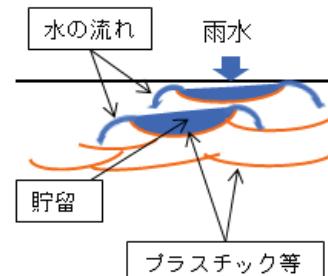


図19 廃棄物地盤中の水の流れのイメージ

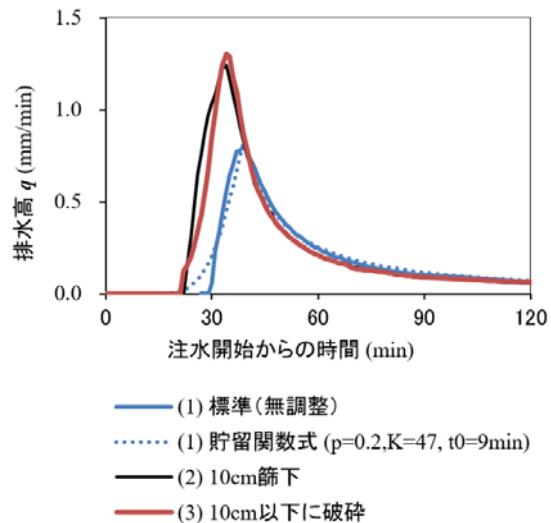


図20 注水排水実験結果
(東北①型処分場からの採取試料)

(2) 埋立廃棄物が浸透水質に与える影響

大型カラム試験の結果から、土層（覆土層）を設けることや、廃棄物と土との混合埋立を行うことはTOC等の値を低減する効果があることが確認できた（図21右、ケース2、ケース3）。高密度でカラムに廃棄物を充填した場合には密度相当分のTOC等の水質悪化がみられた（図21右、ケース5）。

また、10cm超のプラスチックを篩により除去したケースと、10cm超のプラスチックを破碎（裁断）して10cm以下にしたケースと比較した大型カラム実験（表5）では、10cm超を除去したケース(2)ではEC、TOC、BODが無調整のケース(1)に比べ低下したが、裁断したケース(3)（プラスチックの混入重量は無調整試料と同じ）では、無調整試料とTOC等の値に差は認められなかった。

したがって、TOC等はプラスチック等の量に依存しており、安定型処分場ではプラスチック等の混入量を減らすことが、浸透水のTOC等の値を下げることに結びつくと考えられる。

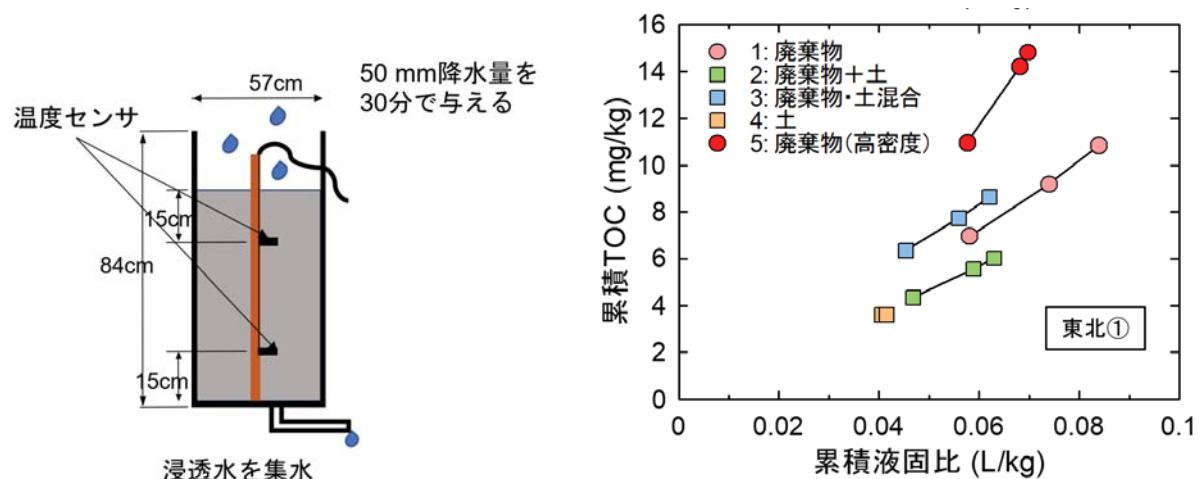


図21 大型カラム実験（左：実験カラム装置、右：実験結果）

表5 大型カラム試験での10cm超のプラスチックを除去、及び破碎したケースとの比較

ケース	層厚 (cm)	密度 (g/cm)	10cm超 重量比 (%)	排水 開始 (分)	24時間 累積 排水量 (L)	1か月後の排水の水質					
						EC (mS/cm)	TOC (mg/L)	BOD (mg/L)	T-N (mg/L)	pH	SS (mg/L)
東北① (1) 標準(無調整)	57	1.2	13.7	30	7.9	4.8	110	36	9	7.9	180
1年堆積 試料 (2) 10cm篩下	57	1.1	11.4	22	10.8	4.5	97	30	9	7.6	53
1年堆積 試料 (3) 10cm以下に破碎	60	1.1	13.7	21	9.5	4.4	110	35	11	7.7	140

4. 設計方法

安定型処分場の設計事項のうち、廃プラスチック混入等による安定型処分場特有の強度特性をふまえた設計が必要になる事項について以下に示す。

(1) 貯留構造物

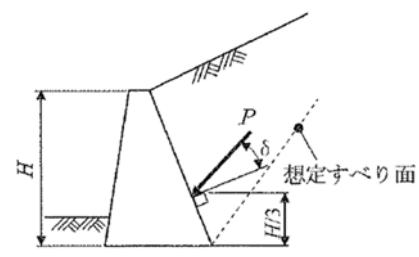
貯留構造物には、盛土ダムによるものその他、コンクリート擁壁等がある。

コンクリート擁壁の設計に際して考慮する土圧については、大型土槽による実験や¹¹⁾ 振動台実験¹¹⁾の結果から、プラスチック等が混入した廃棄物では、通常の土砂地盤ほどには土圧が壁面に作用しないことを確認している。このため擁壁等の設計に際しては、日本道路協会：道路土工 拥壁工指針¹²⁾等に示された既往の算定方法で土圧を計算すれば、安全側の評価となる。

安定型処分場の貯留構造物形式としては、コンクリートダム、盛土ダム、擁壁等があり、主として、処分場の最終埋立高さ、地盤条件、施工条件および埋立計画等を勘案して決定される¹⁾。我が国の現状においては、最終埋立高さと埋立て量の確保、基盤条件、コスト、施工性等の面から盛土ダム（土えん堤）形式が数多く採用されている。コンクリート擁壁は高さが5~10m程度以下の盛土で採用され、図22に示すように主働土圧もしくは静止土圧を考慮した試行くさび法により設計が行われる¹²⁾。後述するように、盛土ダム（土えん堤）形式の場合であっても、土えん堤—廃棄物層一体斜面の地震時安定性は土えん堤に作用する廃棄物層からの静的及び動的土圧の大小に大きく左右される。

擁壁背面に作用する廃棄物層の静的・動的土圧について、廃棄物への廃プラスチック等の混入の影響を調べた実験事例を図23(a)(b)に示す¹¹⁾。

図23(a)では固定壁に土圧計を設置し、背面地盤を鉛直に載荷した際に固定壁に作用する側方土圧を計測している。廃プラスチック等を含む廃棄物に相当するケース2では、まさ土を用いたケース1に比べてかなり小さな土圧値が得られており、図中に模式的に示したように、纖維状廃棄物があかたもジオテキスタイルのように挙動し、纖維状廃棄物の引張抵抗が側方土圧を大きく軽減しているものと考えられる。プラスチック混入物を途中で遮断したケース3の土圧がケース1, 2の中間的な値を取ることはその証左といえる。図23(b)は、振動台上に設置した土槽内に同様



(a) 重力式擁壁の場合

図22 重力式擁壁の設計の考え方¹²⁾

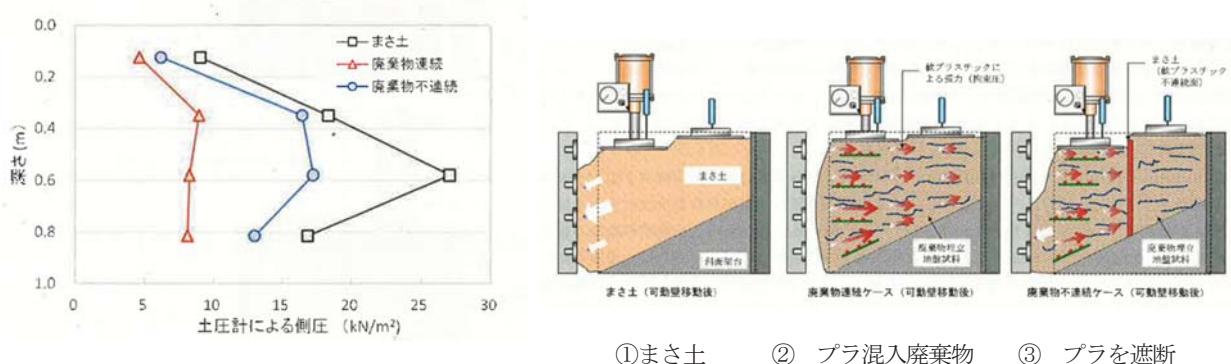


図23(a) 固定壁で計測された廃棄物及びまさ土の静的土圧の比較例¹¹⁾

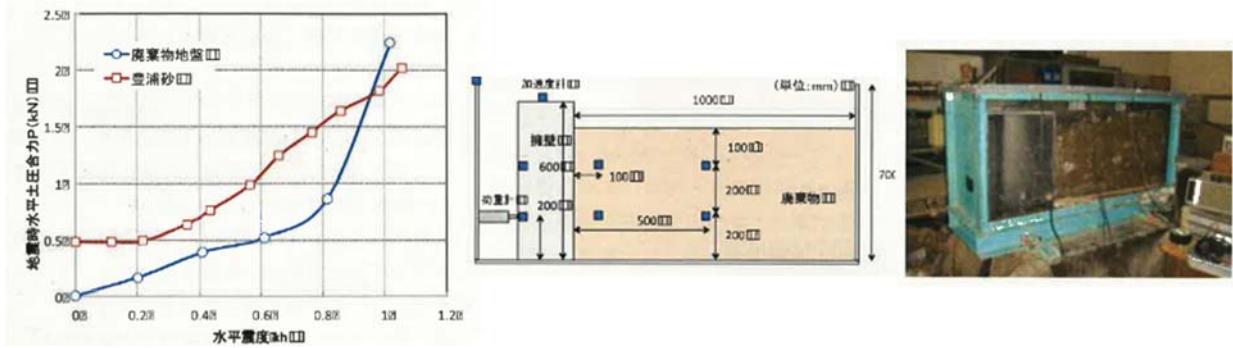


図 23(b) 振動台実験による廃棄物地盤の動土圧の計測事例¹²⁾

な固定壁を設置し、加振時（地震時）の動土圧を計測した事例であるが、側方土圧の動的成分に関しても、廃プラスチック等を混入する廃棄物層の値は、豊浦標準砂に比べて相当小さな値を示している。動的挙動においても纖維状廃棄物の引張抵抗がこれを混入する廃棄物層の動的せん断抵抗を向上させ、動土圧を低減しているものと考えられる。本検討では、物部岡部による動土圧算定式による値との比較から、その1/2～1/4程度の値が実際に擁壁に加わるものと評価されており、逆に現行指針で用いられている静的、動的荷重を設計で採用することにより安全側の評価が可能となることを示している。

廃棄物層が廃プラスチック等の纖維状廃棄物を混入することにより発揮される引張抵抗角として原位置試験結果からは $\zeta = 7^\circ$ 、巻末資料に記載した室内一面せん断試験結果でも 6° 程度の内部摩擦角の増加量が報告されている。例えば、静止土圧係数 K_0 は Jaky 式 $K_0 = 1 - \sin\phi'$ 、擁壁背面が垂直で摩擦のない場合の主働土圧係数はクーロン土圧式 $K_A = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$ により算定される。いづれも土の内部摩擦角 ϕ の増大により静止土圧係数や主働土圧係数が減少する事を示しており、図 23(a)(b) に示した実験結果は、廃プラスチック等の混合による廃棄物層の引張抵抗角の発揮、内部摩擦角の増大の結果として理解される。また弾性体においては静止土圧係数 K_0 とポアソン比 v は $K_0 = v/(1-v)$ の関係にあり、 K_0 値の減少は、図 23(b) のケース 2 に模式的に示したように、廃棄物と纖維状廃棄物の間の引っ張り摩擦抵抗により側方変形が低減（せん断剛性が増大）することを意味している。これらに関しては、後の遠心載荷実験結果の箇所で再度論ずる。

(2) 土えん堤と埋立勾配、高さ

土えん堤を含めた埋立断面の勾配、高さの設計を行うためには、斜面安定解析を行う必要があるが、これまでの現場試験や安定解析の結果からは、土えん堤を含めた埋立勾配は 1:1.8 で安全性が確保できることを確認している。

我が国においては、擁壁では不可能な埋立て高さ（埋立容量）を確保できること、基礎岩盤にコンクリートダムのような硬固な岩盤を必須としないこと、施工や維持管理の容易性、コスト面等の優位性から、土えん堤とその背面の廃棄物層からなる盛土ダム形式が採用されることが多い。本項では、この構造形式における埋立て勾配と高さについて記載する。

盛土ダム形式の貯留構造物の設計は、想定した高さと勾配を有する斜面に対して既往設計手法¹⁾¹⁴⁾を用いた安定性照査に基づき行われる。以下では、特に廃プラスチック等を混入する廃棄物層斜面における埋立て勾配について、既往の原位置試験により得られた物性値を用いた安定解析の事例を示す。本マニュアルでは、土えん堤を含めた埋立て勾配を 1:1.8 とすることで地震時を含めた安定性を十分に確保できることを確認している。以下では本埋立て勾配における土えん堤—廃棄物層一体斜面の安定性を以下の 2 手法によりダブルチェックする。

- ① プラスチックの引張抵抗を考慮しない一般的な円弧滑り法による安定解析（安定勾配の逆算）
- ② 引張抵抗角を考慮した円弧すべり法による安定解析（①で得られた安定勾配での再確認）

さらに、これらの手法が主に通常地震動（L1）を想定していること、及び、円弧滑り法自体があくまで静的な力の釣り合いに基づく解析手法であり、地震時の土えん堤と廃棄物層の動的相互作用等を考慮していないことから、引き続き

③ 土えん堤—廃棄物層斜面の強震時（L2）及び動的相互作用を考慮した動的応答解析（強震時挙動の確認）による照査を試みた事例を報告する。動的応答解析は安定型処分場の設計において日常的に用いられているものではないが、廃棄物斜面が大規模かつ民家等の近接条件上、斜面の強振時あるいは地震後の安定性確保が重要である場合などにおいて本手法を採用することを想定し、実務設計者の参考となるよう、事例の提示を試みた。さらに、本手法を用いて処分場斜面の安定性に影響を及ぼす幾つかの要因を考慮した一連の感度分析を実施し、廃プラスチック等を混入する廃棄物の埋め立てや斜面部の構造、施工における幾つかの留意点を抽出、提示した。

- ① 土えん堤—廃棄物層一体斜面の安定解析（円弧すべり法）

処分場の現行設計手法¹⁾に従い、既往現場強度のばらつきの範囲内で最も保守的な値を選定して円弧すべり計算を実施し、斜面の安定勾配を求めた。想定したモデルと採用した物性値は以下の通りである。

1) 土えん堤—廃棄物層一体斜面モデル

図 24 に安定解析（円弧すべり法）に用いたモデルを示す。我が国の安定型処分場の標準的なモデルとして、土えん堤の 1 段辺り高さを 5 m とし、4 段、埋立高さ $H = 20$ m の斜面を想定した。なお、斜面の勾配については、土えん堤を含む斜面勾配を 1:2（現状）、1:1.5、1:1 とした 3 モデルを作成した

2) 設計条件

設計は現行設計手法¹⁾に従った。盛土内には水位を想定せず、設計水平震度 $k_h = 0.15$ （L1 相当）を考慮した。廃棄物層の引張強度は陽な形では考慮しておらず、現場一面せん断試験により得られた物性値に含まれるものとした。

3) 廃棄物層の物性条件

廃棄物層の物性は、表2に示した既往の現場実験データ（原位置一面せん断、安息角試験、現場密度試験等）を基に設定した。図25にこれらのデータを限界安息角と粘着力の関係として整理した。前述したように、廃プラスチック等を多く混入する廃棄物は限界安息角が大きく（引張抵抗を有し）、転圧面での粘着力cは小さくなる。よって、現場データは概して左上から右下に向けて分布し、また現場の転圧によりこの関係が上方に移動することになる。本安定解析では、廃プラスチック等を含む廃棄物層を想定し、粘着力を図の下限値 $c=5\text{ kN/m}^2$ に固定した。また廃棄物層の単位体積重量 γ_t は、表2の平均値より 13.2 kN/m^3 とした。安定解析では、廃棄物層の内部摩擦角 ϕ をパラメータとして変化させ、各々の安全率（所要値1.0）を算出した。

4) 土えん堤の物性条件

本検討では、図24中に示すような廃棄物層と土えん堤を含む、深部のすべり線を想定して解析を行った（斜面の全体的な崩壊の有無を検討するため）。土えん堤の物性は、盛土を対象とした既往の設計手法¹⁵⁾¹⁶⁾に示された設計値を参照し、中間土を想定して図24中に併記した値に固定した。

図26に円弧滑り法による安定解析結果を示す。廃棄物層の内部摩擦角と地震時安全率の関係を斜面勾配毎に求め、許容安全率（1.0）を確保しうる所要内部摩擦角を図のように求めた。図27に、この所要内部摩擦角と斜面勾配の関係を図示した。本結果と図25の横軸（限界安息角 $>30^\circ$ ）を見ると、現状の1:2勾配は十分過ぎるほどの安全率を有することが明白である。一方、安定勾配の設定に際しては、廃棄物層の物性（廃プラスチック等の繊維状物や土砂分の含有率など）や転圧効果（粘着力）のばらつきを考慮し、表2中の原位置一面せん断の最小内部摩擦角の値（関東①2017/8における $\phi=23^\circ$ ）を安全側に採用した。図27より、これに対応する斜面勾配は1:1.8となる。

今後、新たな処分場の設計や増設を行う場合、ここに示したような安定解析手法により設計を行うことが可能であるが、その場合、用いる設計定数（廃棄物および土えん堤の物性値）に関しては、既存埋立エリアにおける各種物性の現場実測値を用いるか、あるいは搬入予定の廃棄物の物性（廃プラスチック混合率等）を想定したうえで、適切な値を定める事が必要となる。

次の引張抵抗を考慮した安定解析では、今度は斜面勾配を1:1.8に固定し、土えん堤を考慮しない高さ30mの斜面モデル（安全側に設定したモデル）を用いて、原位置で確認した引張抵抗の実測値を用いた安定解析を実施して、本勾配の妥当性を再確認している。

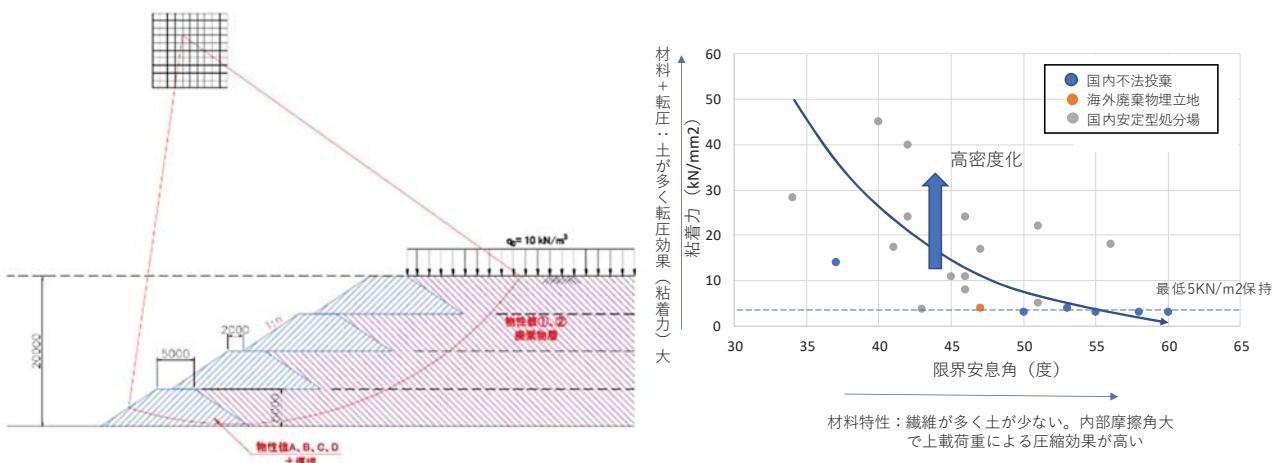
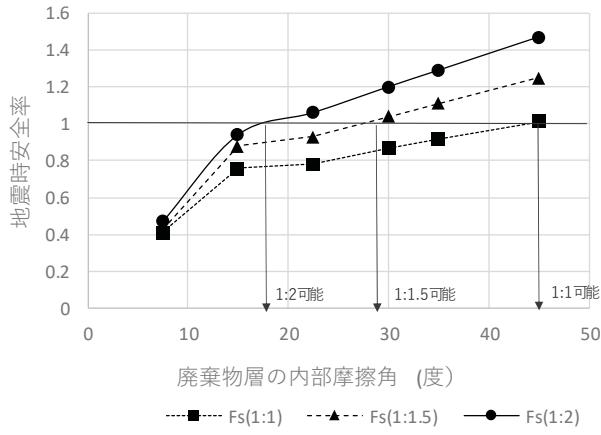


図24 土えん堤—廃棄物層斜面の円弧すべり計算モデル 図25 現地廃棄物層の限界安息角と粘着力の関係



【試算条件】：
①廃棄物層：廃棄物層のcを5KN/m²に固定。γ=13.2KN/m³（現場平均値）
②土堰堤：中間土相当（c=15KN/m², φ=25°, γ=18KN/m³）
③震度：kh=0.15（L1相当）

図26 廃棄物層の内部摩擦角と地震時安全率の関係

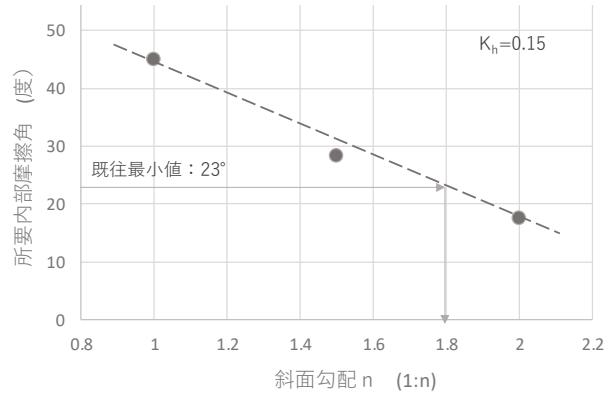


図27 斜面勾配と所要内部摩擦角の関係

② 引張抵抗角を考慮した円弧すべり法による安定解析

a. 極限平衡法（円弧すべり法による解析）

廃棄物地盤の斜面安定性解析は、土質工学で用いられる断面方向の2次元の極限平衡法（円弧すべり解析等）を援用する解析法が用いられてきている。

一方、この方法では堆積廃棄物層が急傾斜でも安定していることは説明できない。これは、廃棄物層では従来の円弧すべり解析で用いられる内部摩擦角(φ)、粘着力(c)の他に引張抵抗を有することに起因する。従つて、プラスチック等の纖維状物等が多量に混入している場合には引張抵抗を考慮した安定解析を行うことでより実態的な評価が可能になる。ただし、引張抵抗は、纖維状物等と細粒分の密着や纖維状物等間の絡み合いにより生まれるものであり、締固めが不十分などの緩い堆積ではあまり期待できない。

斜面安定解析での引張抵抗の考慮の仕方として、ケルシュ(Koelsch)³⁾が(1)式の引張抵抗を考慮した極限平衡式を示している。この式では引張抵抗を垂直荷重(G)に比例するように与えている。

なお、(1)式では、長尺のプラスチックが混入した廃棄物地盤では、空隙が大きく残留水圧が働くことは考えにくいことから、残留水圧の項は除いている。

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

ここに、T：すべり面でのせん断抵抗(kN/m)、G：自重等による鉛直荷重(kN/m)、μ：安全率(Fs)の逆数、b：すべり面長(m)、φ：内部摩擦角(°)、c：粘着力(kN/m²)、θ：すべり面の傾斜角(°)、ζ：引張抵抗角(°)

また、安定解析の方法としては、既往研究で、円弧すべり法等の極限平衡式を用いた解析方法が現場状況を良く説明できている。このため、廃棄物地盤での斜面安定解析方法としては、(1)式の極限平行式を用いた円弧すべり法等が基本となる。

検討の初期段階で、斜面の安定性を概略的に知りたい場合には、次の無限長斜面法（斜面勾配θと崩壊層厚を一定として、すべり面での力のつり合いを見る方法）で、引張抵抗を考慮して、長尺のプラスチック混入地

盤では小さい値をとる粘着力(c)を無視した(2)式^⑥により、崩壊面を想定しなくても安全率(F_s)を簡単に求めることができる。

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

ここに、 F_s : 安全率 $F_s = 1 / \mu$ この他の変数は(1)と同じ。

図28に、廃棄物層の斜面崩壊に対応した強度試験法及び解析法の概念図を示す。

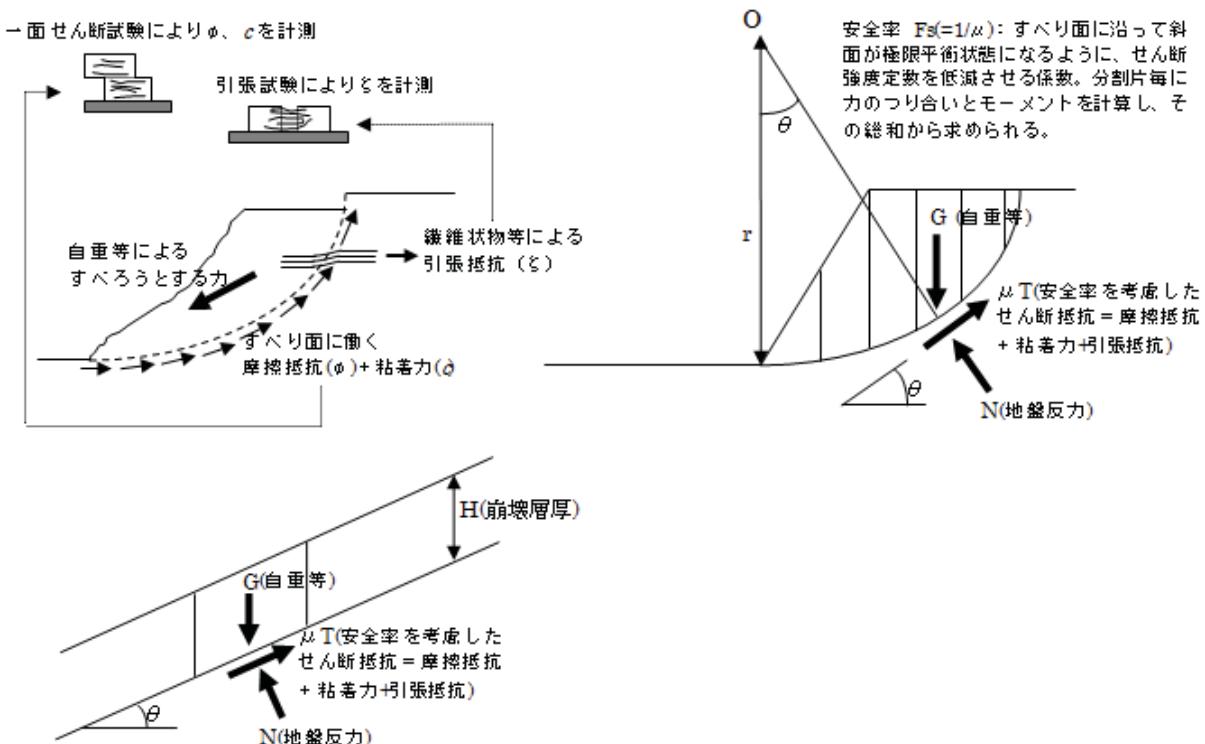
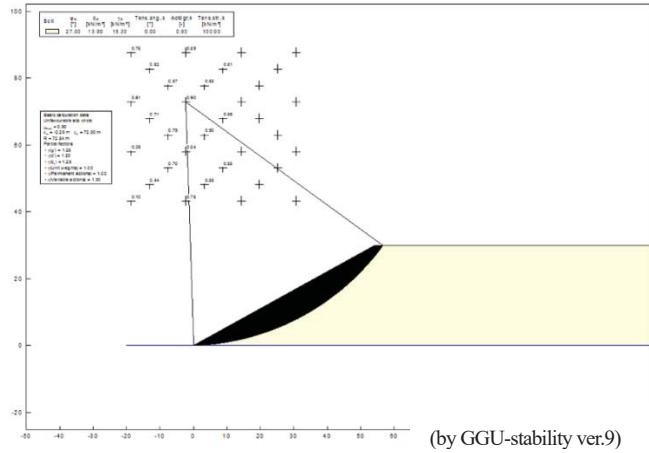


図28 廃棄物層の斜面崩壊に対応した強度試験法及び解析法の概念図
(左上：斜面崩壊のイメージと強度試験法、右上：円弧すべり解析、左下：無限長斜面法)

b. 引張抵抗を考慮した極限平衡法（円弧すべり法）による斜面安定解析例

高さ 30 m の一様斜面での安定計算結果を図29に示す。10 cm 超のプラスチック等が混入した現場では、土えん堤上の小段を考慮しない厳しい条件でも、引張抵抗 (ζ) を考慮すれば、斜面勾配 1 : 1.8 で安全性が確保できている。



埋立経過年	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	Fs(円弧すべり安全率)			ζ (°) 安息角試験より	備考
				斜面勾配(h=30m)	ζ 考慮 1: 2.0 1: 1.8 1: 1.8			
関東① 0.1年	2017/8/24	0	15.3	13	27	1.19	1.11	---
東北① 0.0年	2018/8/27	0	8.9	4	32	1.27	1.16	1.27
東北② 4.5年	2019/6/24	4.5	12.8	17	28	1.39	1.28	1.39

図 29 引張抵抗を考慮した円弧すべり法による解析例

③ 土えん堤—廃棄物層一体斜面の強震時(L2)及び動的相互作用を考慮した動的応答解析

①、②に示した円弧すべり法による安定解析は、あくまで静的な力の釣り合いに基づいており、地震時の土えん堤と廃棄物層の動的相互作用や非一体化の挙動、強震時の地盤の著しい非線形性などを考慮できない。さらに本マニュアルでは、廃プラスチック等の繊維状物が混入する廃棄物を念頭に置いているが、先の図 23 に示したように、繊維状物の混合により土えん堤に作用する背面廃棄物層の静的・動的土圧が大きく低減することが既往研究により報告されており、これによる斜面の地震時安定性の向上が期待される。そこで以下では、繊維状物の混入が土えん堤—廃棄物層一体斜面の地震時安定性に及ぼす影響を実験的に調べ、動的応答解析によってこれを確認した事例を示す。

- 1) 動的遠心載荷実験：土えん堤—廃棄物層一体斜面の強震時挙動と不安定化メカニズムの確認
- 2) 非線形動的 FEM 解析：1)の定性確認及び廃棄物斜面の各種要因が安定性に及ぶ影響に関する感度分析
紙面の関係から、動的遠心載荷実験と結果の詳細、及び動的 FEM（有限要素法）解析のモデルと各種物性値の設定方法等については別途、巻末に掲載した。大規模斜面かつ民家等が近接するなど重要度の高い安定型処分場においては、既往の設計手法¹⁰⁾¹⁴⁾による照査に加えて、上記 2)に示すような動的応答解析を実施し地震時の安定性を確認しておくと安心である。一方、廃プラスチック等を混入する廃棄物に関しては、解析に用いる動的変形特性等の解析物性値にはこれまで明らかにされたものがなかったため、今回の解析で用いた諸物性を参考に巻末に提示しておいた。動的応答解析を実施する際のモデル化や解析物性値の設定に際して参考とされたい。

1) 動的遠心載荷実験

遠心載荷実験装置内に高さ 10 m（土えん堤 2 段×5m）の廃棄物斜面モデルを作製し、これを 100→400 gal まで段階的に加振して斜面の強震時挙動や崩壊メカニズムを調べた。実験装置や廃棄物斜面のモデル化、実験結果の評価等の詳細については巻末資料に詳述した。本実験は実廃棄物地盤を綿密に再現したものではなく、斜面の崩壊メカニズムおよび廃プラスチック等の繊維状物の含有が、処分場斜面の地震時安定性に及ぼす影響

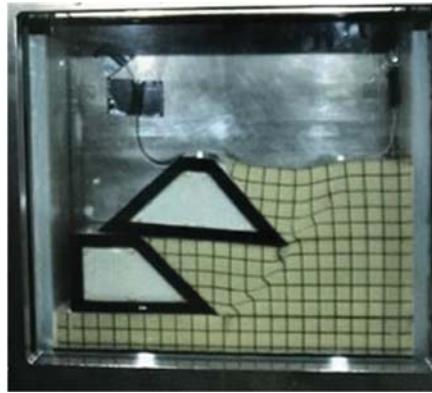


図 30(a) 繊維状物の混入無し (400 gal 加振後)

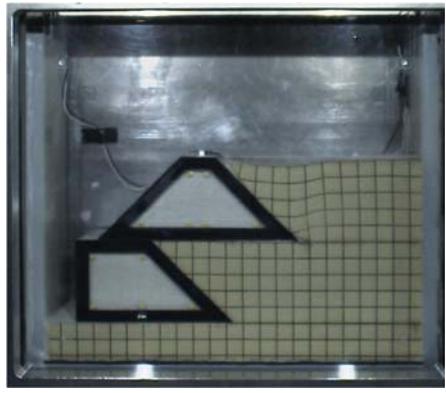


図 30(b) 繊維状物の混入有り (300 gal 加振後)

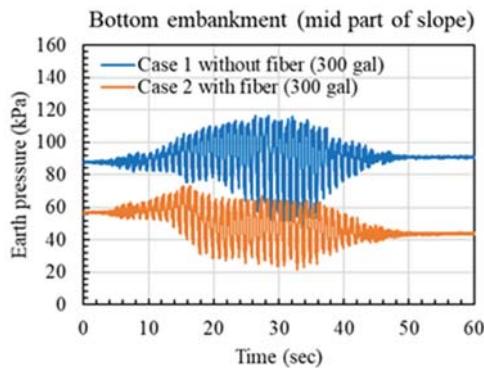
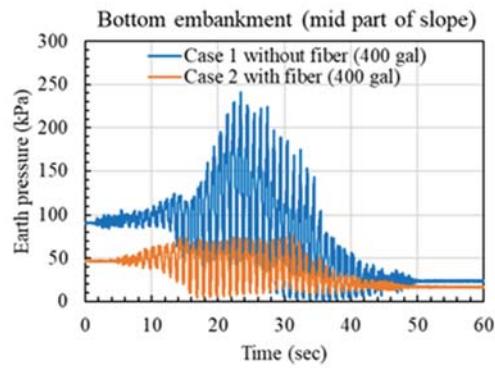


図 31(a) 2段目土壌堤への作用土圧 (300 gal 加振時)



(b) 400 gal 加振時

を定性的に調べることが目的である。図 30(a)は、繊維状物を含まない斜面を最大加速度 400 gal (20 波) で揺らした後の斜面変状を示す。加振中、1, 2 段目の土えん堤が解放面側に大きく変位し、その背面に明瞭なすべり線が連続的に形成されて廃棄物層が全層に渡って崩壊している。図 30(b)はこれに繊維状物を混入させた場合の結果であるが、1 段目土えん堤背面に局所的な変状は見られるものの、2 段目土えん堤と背後の廃棄物層は安定性を確保している。図 31(a)(b)には、300 gal および 400 gal 加振時の 2 段目土えん堤への作用側方土圧を、繊維状物有り、無しの両ケースで比較した。2 つのケースで加振前の初期土圧は繊維状物有りのほうが小さく、前出の図 23(a)に符合する (繊維状物混入によりポアソン比が減少)。図 30(a)の 300 gal 加振時 (及びその前段階) では、加振中この初期土圧に動的成分が加わり、加振終了後にほぼ初期値に戻るという、いわば弾性的な挙動を示す。このような状況では土えん堤に顕著な変位は生じず、加振後の斜面安定性は確保される。一方、図(b)の 400 gal 加振時では、繊維状物有りの場合には挙動に大きな変化は見られないが、繊維状物無しの場合、土えん堤に加わる過大な受働土圧がえん堤を解放面側に大きく変位させ、結果、背面の廃棄物層が主働崩壊して作用土圧が主働土圧まで大きく低減していることが分かる。繊維状物を混入する場合には、動土圧成分の振幅がかなり小さく、このような現象には至っておらず、前出の図 23(b)に示した振動台実験の結果を遠心場において再確認する結果となっている。あくまで定性的な議論ではあるが、L2 レベルの強震時においてはこのようなメカニズム (主働崩壊) で土えん堤一廃棄物層一体斜面が不安定化する可能性があること、廃棄物層が繊維状物を混入する場合、引張抵抗の寄与により安定性の向上が見込まれる事が示唆される。繊維状物の引張抵抗については、別途同一模擬材料を用いた一面せん断試験で確認を行っている。また繊維状物の混入は 1 段目土えん堤の挙動に別の影響を及ぼすことが分かっているが、紙面の関係から、それらの説明は巻末に譲る。

2) 非線形動的 FEM 解析

紙面の関係から、解析手法、解析モデルや廃棄物の動的物性値等は巻末に掲載した。本解析は、この後に述べる感度分析（処分場斜面の各種要因の寄与度分析）を目的として実施しているが、その前に動的遠心載荷実験で観察された斜面の不安定化メカニズム、および纖維状物混入の効果について定性的なチェックを試みた。

図32(a)(b)は、感度分析結果の中から**図31(a)(b)**の実験条件に最も近い条件での解析結果を、加振終了後の残留水平土圧コンターにより比較したものである。図中に赤・オレンジで示したエリアは、残留水平土圧<0、すなわち土えん堤と背面廃棄物層が剥離し、背面地盤内に主働崩壊が生じる領域を示している。**図(a)**の纖維状物無しのケースでは斜面全層に渡って背面で主働崩壊が発生し、これらが連續したすべり線を形成している。**図(b)**では1段目土えん堤の背面に局所的な主働崩壊が生ずる（遠心載荷実験でも観察された）以外、斜面下層には顕著な変状の発生は認められない。**図32(c)**には、地震動終了後の土えん堤と背面地盤の剥離状況を示しており（境界部にはジョイント要素が配置されており、剥離には抵抗できない）、纖維状物を混入しない場合、土えん堤のすべてが解放面側に大きく変位して背面地盤と剥離し、非一体的な挙動を取っている事が伺われる。

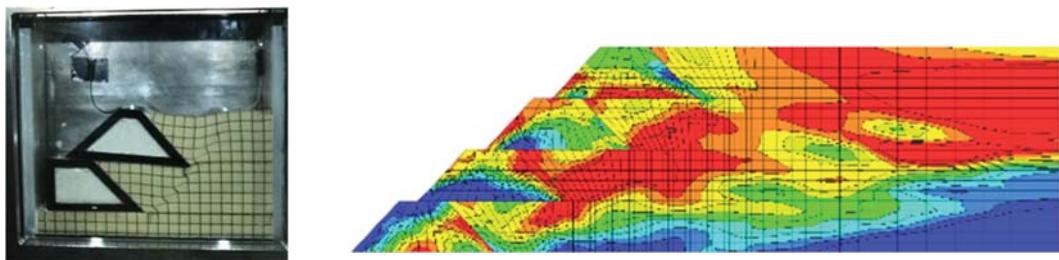


図32(a) 繊維状物無しの場合の残留側方土圧コンター

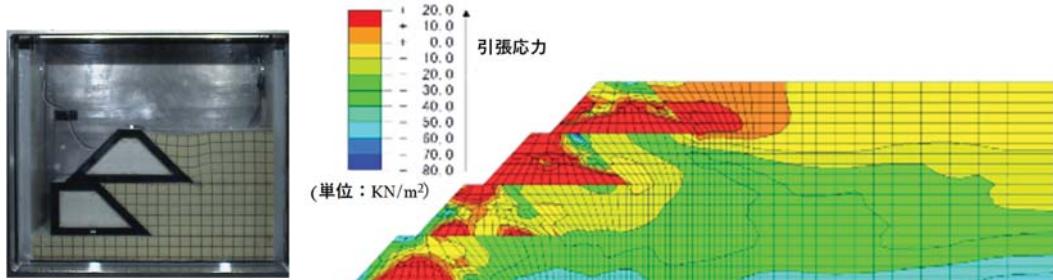


図32(b) 繊維状物有りの場合の残留側方土圧コンター

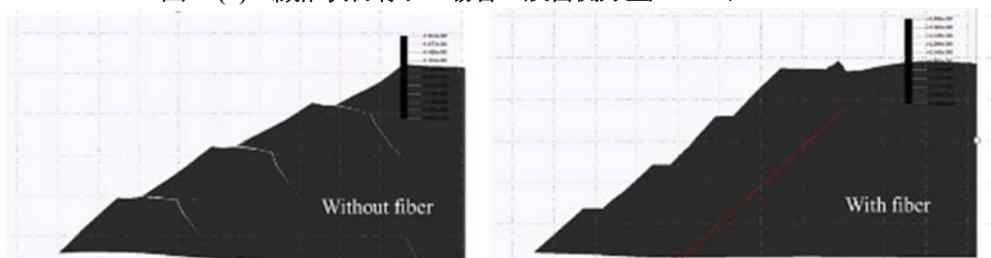


図32(c) 地震動終了時の土堰堤と背面廃棄物地盤の剥離（左：纖維状物無し 右：纖維状物有り）

以上の定性確認に引き続き、本解析手法を用いた感度分析を実施して廃棄物層斜面の地震時安定性に影響を及ぼす諸因子について検討した。感度分析で採用した因子は、① 廃棄物層における纖維状物混入の有無

② 土堰堤の剛性（セメント改良土と粘性土を想定） ③ 入力地震動の大きさ（L1、L2） ④ 斜面勾配の4項目である。①、②については巻末に示した手法により廃棄物層や土堰堤の動的物性の違いを表現し、③は入力に用いた地震動（阪神大震災の神戸波）をL1,L2相当に設定して用いた。④の斜面勾配については、簡易設計法で定めた安定勾配1:1.8を挟む形で1:1,1:1.5,1:2の3種類のFEMモデルを作成した。

感度分析結果を図33に示す。図32と同様、加振終了後の残留水平土圧コンターを横並べて示し、上記4要因の影響が分かるようにした。各種要因の寄与の仕方を表5にとりまとめた。図中、青の組み合わせは廃棄物斜面が安定、もしくは著しい不安定化を生じない領域に、黄色は廃棄物斜面が不安定化に向かう領域を示している。

感度分析の結果によると、廃棄物斜面の地震時安定性に影響を及ぼす第一の影響因子は廃棄物の組成（繊維状物質の混入度合い、すなわち混合埋立の有無）であり、繊維状物を多量に含むほど斜面の安定性が向上する。巻末資料に示した廃棄物物性を参考頂きたいが、繊維状物が多いほど廃棄物地盤の密度が低く（慣性力が小さく）、同時に繊維状物の引張抵抗による地震時剛性のねばり強さ等が発揮され、これらの相乗効果によって土えん堤に加わる土圧が大きく低減することによる。混合埋立を行った場合、L1のみならずL2においても斜面の不安定化領域は全般的に限定的であり、全体崩壊には至らない。また斜面勾配の影響もあるにせよ、さほど顕著ではない。ただし剛性の高い土えん堤との組み合わせでは、処分場斜面の表層付近において地震動の増幅が生じ、土えん堤背面に局所的な変状が生ずる可能性があるため留意が必要である（遠心載荷実験でも観察された現象であり、巻末資料中に詳述した）。一方混合埋立を行わない場合には、高剛性土えん堤であっても

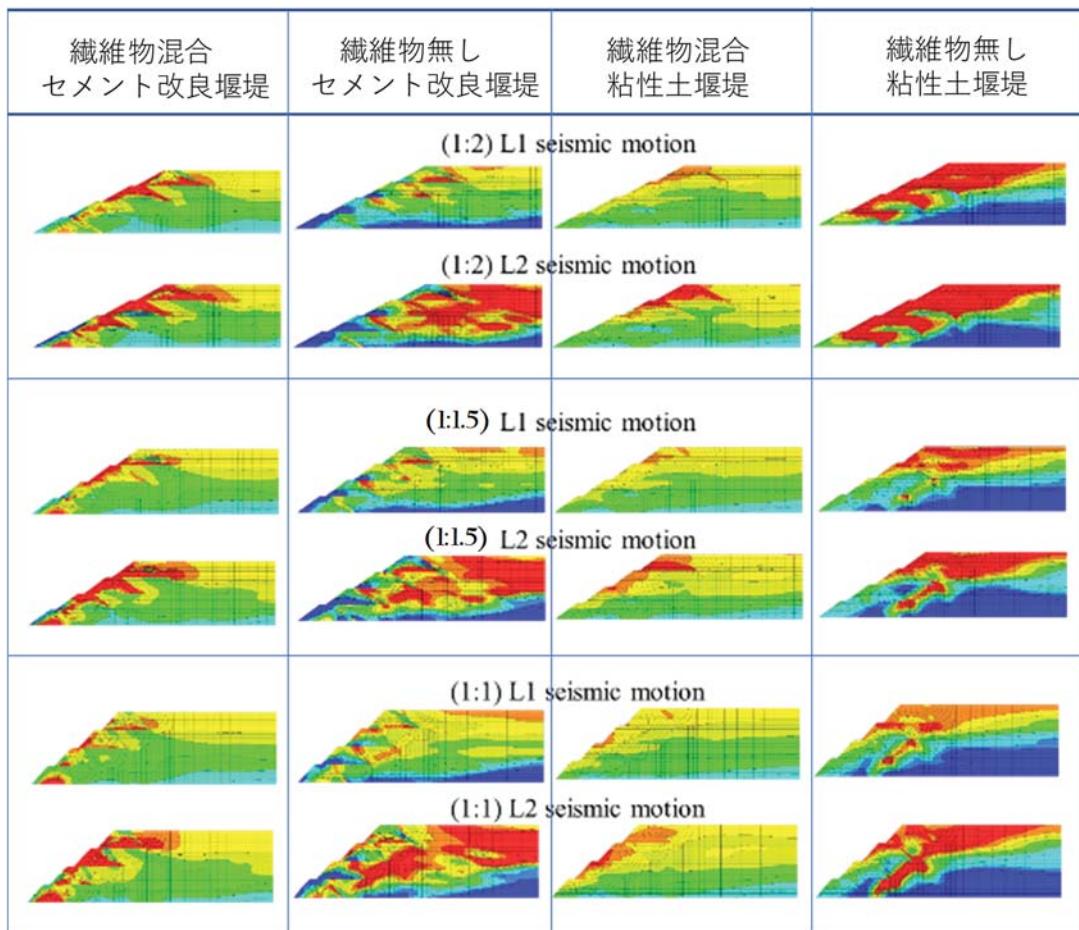


図33 土堰堤—廃棄物層斜面の地震時安定性に関する感度分析結果（残留側方土圧コンターの比較）

表5 非線形動的FEM解析による感度分析結果

廃棄物層の組成	えん堤の剛性	地震動	斜面勾配の影響	
繊維質混入量大 (混合埋立)	剛性の高いえん堤	L1	小	
		L2	小	
	剛性の低いえん堤	L1	小	
		L2	小	
繊維質混入量小 (非混合埋立)	剛性の高いえん堤	L1	小	
		L2	大 ¹⁾	
繊維質混入量小 (非混合埋立)	剛性の低いえん堤	L1	大 ²⁾	
		L2		
1) 勾配が急→主働崩壊が深部に拡大				
2) 1:1.5,1:1斜面：勾配急かつL1→L2で主働崩壊が深部に拡大。 1:2斜面：主働崩壊→表層すべりに崩壊モードが変化				
		斜面は安定,もしくは著しい不安定化は生じない		
		斜面は不安定化に向かう		

L2相当地震時に斜面の全体安定性が低下する可能性があるため留意が必要である(混合埋立の有無が最重要因子となる所以である)。

逆に纖維状物の混入がなく(非混合埋立)、かつ粘性土のような剛性の低い材料で造成された土えん堤との組み合わせでは斜面の安定性が大きく低下し、特に斜面勾配が急になるほど、地震動が大きくなるほど急激に不安定領域が拡大する(つまり、青の組み合わせに比べて斜面構造物としてのねばり強さ、レジリエンシーを発揮できない)。遠心載荷実験ではアクリル製の剛な土えん堤モデルを使用し、図32ではセメント改良土の剛性を与えた土えん堤モデルの解析結果を参照した。この場合、遠心載荷実験で見られたような、最終的には背面地盤が主働崩壊に至るような斜面不安定化メカニズムが卓越する。図33中に示すように、粘性土のような低剛性材料で造成された土えん堤、かつ混合埋立を行わない場合、廃棄物層からの側方土圧に対して抗土圧構造物として抵抗することが困難となる。緩斜面の場合であっても土えん堤自体が大きく変形、不安定化し、むしろ簡易設計手法と同じような円弧すべりの形態で全体崩壊する可能性さえ示唆されており、留意が必要である。混合埋立を採用した場合は、低剛性土えん堤であっても斜面の全体安定性が急激に低下する危険性は低いと考えられるが、粘性土土えん堤自体に大きな変状が発生し、地震後に土えん堤の大規模な修復が必要となる可能性があるので注意が必要である(図33を見ると、特にL2地震時に粘性土土えん堤の中に顕著な引張応力の発生が見られ、粘性土えん堤はこれに抵抗し得ない。同じくセメント改良土えん堤の中にも引張応力領域が見られるが、セメント改良土相当の高い粘着力を有するため、この場合、地震後の変状は限定的となる)。一方、動的解析では土えん堤の剛性としてセメント改良と粘性土の両極端を採用したが、実現場では粘性土よりも良質な材料を入手することも可能である。この場合、セメント改良等による高剛性土えん堤と混合埋立てを組み合わせることは必ずしも必要ではなく、土えん堤自体の地震時安定性が確保される、あるいは地震後に土えん堤の変状を容易に修復可能となる範囲内で、より経済的な土えん堤の設計を行うことができる。

表5は、あくまで「斜面が不安定化に向かう条件の組み合わせ」を定性的に示すものであり、各処分場の地震時安定性に対する個別の定量的評価は、対象処分場の規模や物性条件、地盤条件等を勘案した同様な解析を実施することで可能となる。

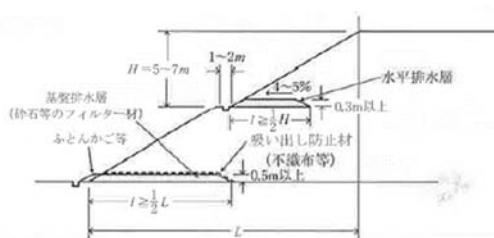
(3) 浸透水集排水施設

浸透水集排水施設は、埋立層内に浸入した雨水を速やかに排出させるための施設であり、一般廃棄物処分場では、底部集排水管、法面集排水管、堅形集排水管、集水ピット等に分類されている。

プラスチック等が混入する安定型処分場では、大きな空隙が形成されるため基本的に排水性は良いが、プラスチック等の凹部等に水が長時間貯留されることや、長尺のプラスチックが鉛直方向の水の流れを阻害することから、BOD等の水質対策のためには、やはり迅速な排水を促すための集排水施設は重要である。

また、発生ガス対策の観点からも、鉛直方向の排水性・通気性確保を目的とした集水設備（鉛直方向に敷設する有孔管等）を一定間隔に設けることが有効である。

前述の土えん堤—廃棄物層一体斜面の安定性検討に際しては、廃棄物層内の水位形成や土えん堤に作用する水圧荷重を想定していない。このため、特に斜面部近傍においては、廃棄物層の地下水位を定期的にモニタリングし、水位形成の無いことを確認したり、要領¹⁾に示される各種の浸透水集排水施設を検討すると良い。廃プラスチック等の繊維状物を多く混入する廃棄物層では、一般に空隙が大きく透水性は良好と考えられるが、プラスチックの凹凸部への水の貯留により、水平方向に対して鉛直方向の透水係数が見かけ上小さくなる場合があり、これへの対処として、図34(a)に示すような水平排水層¹⁷⁾を設け、これを図34(b)に示すような堅形集排水管へ導くことで迅速な盛土内排水が可能となる。水平排水層については、材料を購入して新たにこれを設けるのではなく、廃棄物埋め立て時の覆土として、極力粒径の大きな礫系の廃棄物をある層厚で埋立てることにより、その機能を期待できる。堅形集排水管に関しては、通気性確保の目的を併用することも可能であるが、不織布や碎石など粒径の大きい中間層を設ける場合はジオテキスタイル等で目詰まり対策をすることが長期的な排水性確保の面から有効である¹⁷⁾。



解説図4-9-9 水平排水層及び基盤排水層の例

図34(a) 盛土内水平排水層の例¹⁷⁾

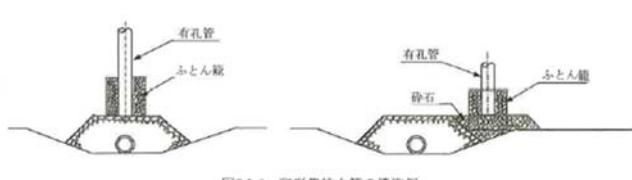


図7.2-5 堅形集排水管の構造例

図34(b) 堅形集排水管の例¹⁾

5. 搬入管理と展開検査上の留意点

(1) 搬入管理に関する規定事項

最終処分場の維持管理については「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令、平成29年6月改正」に定められている。安定型処分場については、飛散・流出の防止、悪臭発散の防止、火災発生防止のための必要な措置、ねずみ・害虫の発生防止のための必要な措置、囲い・立札、その他設備の機能維持、擁壁等の定期的な点検、地下水又は集排水設備から採取した水の定期的な水質検査、水質悪化が認められた場合の必要な措置、埋立廃棄物の種類・数量等の管理、埋立前の展開検査の実施、浸透水の定

期的な水質検査の実施と水質検査結果が基準に適合しない場合（BODは20mg/L超、CODは40mg/L超）の搬入及び埋立処分場中止措置について規定されている。以上のように、とくに水質管理について厳しい規定が設けられている。

また、廃プラスチックについては、廃棄物処理法施行令第6条第1項第3号（処分基準）で、「中空でないよう、かつ、最大径おおむね15cm以下に破碎、切断、若しくは溶融設備を用いて溶融加工すること」が規定されている。

（2）合理的な埋立方法

以下 i 示す10cm超物の混入率と空隙率の関係と、iiに示す廃棄物組成とキャスパルIa・安息角の関係から、埋立を高密度化（埋立量を増やす）し適度な地盤の固さと十分な斜面安定性を得るには、廃プラスチック等のサイズを小さくし（処分基準に示された廃プラスチックを15cm以下にすることの遵守等）、プラスチック等やがれき類、ガラス・陶磁器等の形状、サイズの異なる廃棄物を適度に混合（粒度分布の均等化）して埋め立てることが有効になると言える。

i 10cm超物の混入率と空隙率の関係

安定型処分場11箇所での試験結果から、埋立物の10cm超物の混入が多くなると、空隙率が高くなる結果が得られている（図35）。したがって、埋立量を増やす（埋立層の空隙を減らし密度を高める）ためには、廃プラスチック等の埋立廃棄物のサイズを小さくする必要がある。

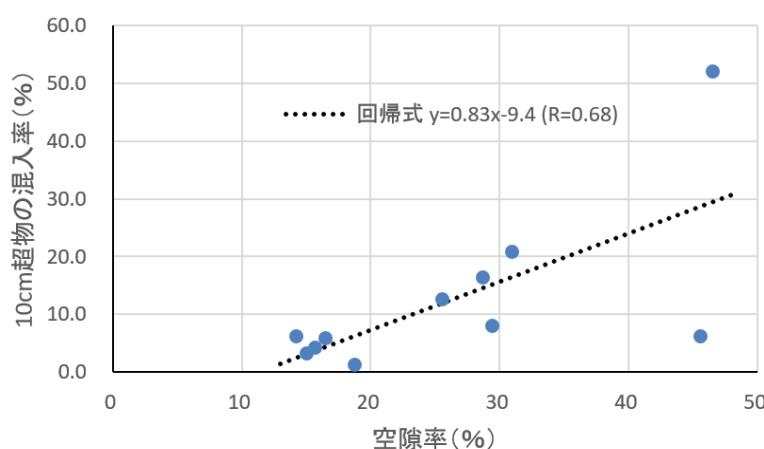


図35 10cm超物の混入率と空隙率の関係（11箇所での試験結果）

ii 組成とキャスボル I_a 値、安息角の関係

廃棄物組成と地盤の硬度を表すキャスボル I_a 値と斜面の安定勾配を表す停止安息角には、次のような関係がある。

- ・プラスチック等の平面状物（2次元物）や繊維等の線状物（1次元物）の混入割合が増えると、キャスボル I_a 値は減少し、停止安息角は増加する。（図16、図17）
- ・ガラス陶磁器やがれき等の塊状物（3次元物）の混入割合が増えると、キャスボル I_a 値は増加し、停止安息角は減少する。（図16、図17）

したがって、埋立廃棄物中にプラスチック等の平面状物や線状物の割合が高くなると埋立地盤は柔軟で斜面安定性の高い地盤が形成され、がれき等の塊状物の割合が高くなると埋立地盤は固い地盤が形成される。

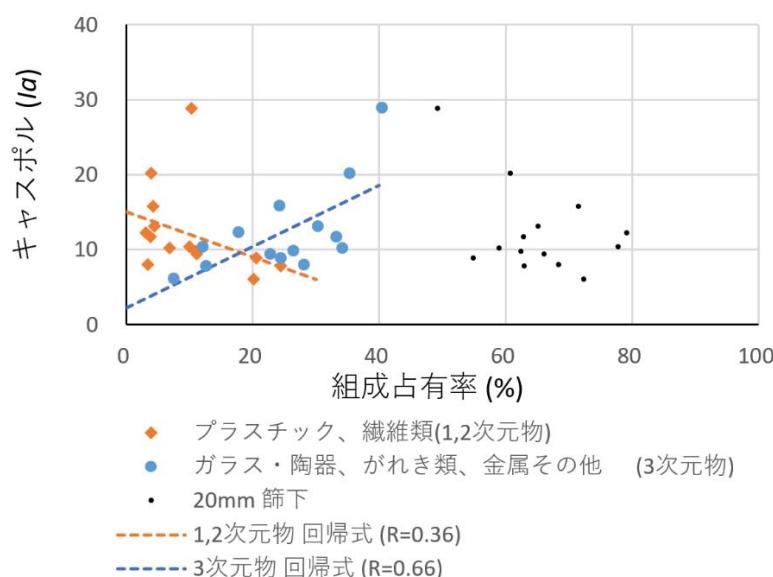


図36 廃棄物組成とキャスボル (I_a 値) の関係 (関東①処分場内 14箇所での試験結果)

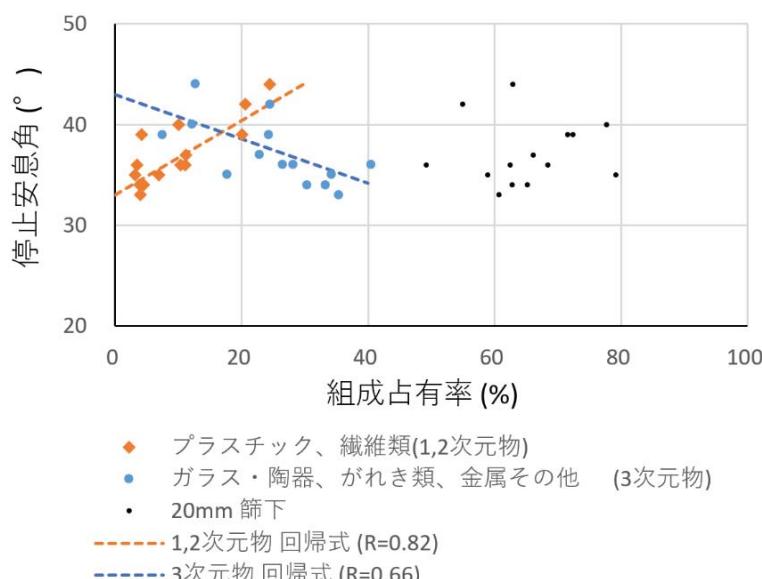


図37 廃棄物組成と停止安息角の関係

これら廃棄物組成と各種物性との関係、及び前述した動的FEM解析を用いた感度分析結果を勘案し、特に廃棄物処分場の斜面部近傍（土えん堤を含む）における埋め立て方法や施工上の留意点を図38及び表6にとりまとめた。表6中に記したように、廃棄物斜面の地震時安定性を確保するためには、下記に関して十分に留意する必要がある。

- ① 土えん堤背面のある一定領域内の混合埋立（土砂系と纖維状物）
- ② 土えん堤の材料選定と施工法（土えん堤の剛性確保と接合部の入念な施工）
- ③ 廃棄物層の排水構造（4. (3) 浸透水集排水施設に詳述）

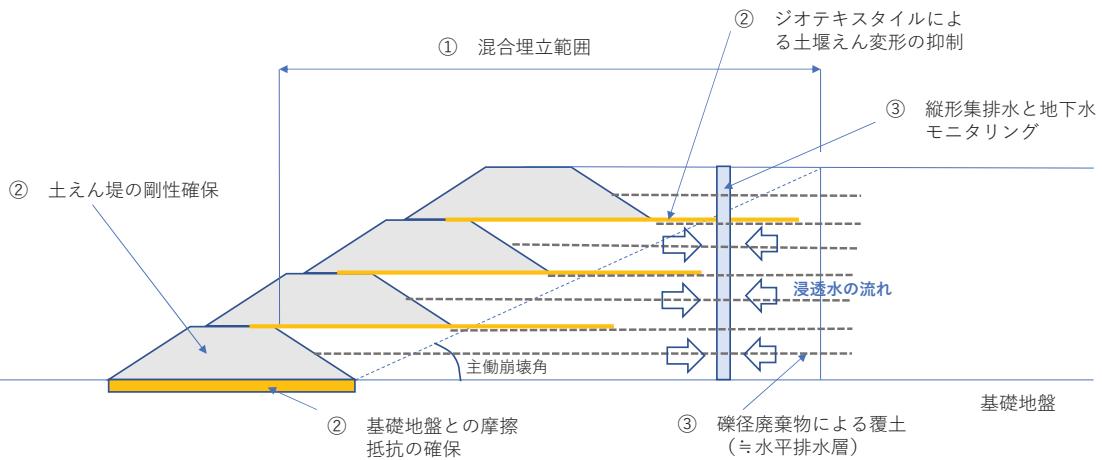


図38 処分場斜面（土えん堤背部）における埋立て方法および施工上の留意点

表6 埋立て方法および土えん堤背面部の設計・施工上の留意点

項目	設計・施工上の留意点	留意事項および摘要
① 土えん堤背面部での廃棄物層の埋立て方法	土砂・がれき系廃棄物とプラスチック等繊維状廃棄物の混合埋立	土えん堤背面側の廃棄物主崩壊範囲を含む領域で混合埋立を行う事が望ましい。繊維状廃棄物の混合による単位体積重量・静止土圧・動土圧の低減とせん断強度・地震時の韌性の向上により土えん堤一廃棄物層斜面の地震時安定性の向上を期待できる。混合撒き出しの上、トラッシュコンパクタ等の重機にて廃棄物の破碎や切断を行い、土砂・がれき成分と繊維状成分との噛み合いを十分に高める事が望ましい。
② 土えん堤の材料選定と造成方法	土えん堤の剛性確保	<p>【高剛性土えん堤】 土えん堤-背面廃棄物地盤の地震時安定性は①の廃棄物埋立て方法（混合埋立の有無）と②の土えん堤剛性の組合せにより変化する。混合埋立+高剛性土えん堤（セメント改良等）では土えん堤が抗土圧構造物として振る舞うため斜面の全体的な安定性を確保できるが、廃棄物層の下層から表層に向かって地震動の増幅が大となり、処分場表層付近に局所的な変状が発生する可能性があるとの実験的・解析的結果がある。表層廃棄物層の入念な締固めや最上段土えん堤の施工に留意する以外に、経済性的観点からは、地震後の早急な復旧方法等を事前に準備しておくことも一案である。また混合埋立を行わない場合、高剛性土えん堤であってもL2相当地震時に斜面の全体安定性が低下する可能性があるため留意が必要である。</p> <p>【低剛性土えん堤】 ①で混合埋立を行わず、かつ②を粘性土土えん堤など剛性の低い土えん堤の組合せとした場合、斜面勾配に関わらず地震時の斜面変形が土えん堤を含む大規模・広範囲な円弧すべりモードとなる可能性が有り、注意を要する。この意味からも、少なくとも処分場の斜面部（主崩壊角範囲内）付近においては①の混合埋立を採用する事を推奨する。混合埋立を採用した場合、低剛性土えん堤であっても斜面の全体安定性が急激に低下する危険性は低いと考えられるが、粘性土えん堤自体に大きな変状が発生し、地震後に土えん堤の大規模な修復が必要となる可能性があるので注意が必要である。</p>
		土えん堤一廃棄物斜面の全体崩壊が、主に土えん堤の解放面側への移動変形と背面廃棄物層の主崩壊に伴い生ずることから、その移動変形量を極力低減する工夫を行う事が望ましい。特に最下段土えん堤と基礎地盤の間には地震時に十分なせん断抵抗を発揮できるよう、境界部など入念な施工を心掛けるべきである。土えん堤と背面廃棄物の間を人工材料（ジオテキスタイル等）により連結し、両者の一体化を図ることも得策と考えられる。
③ 廃棄物層の排水構造	斜面部廃棄物層内の地下水位モニタリングと集排水構造	土えん堤一廃棄物斜面の安定計算では土えん堤への水圧の作用を考慮していない。混合埋立を行う場合、廃棄物層の排水性は良好と想定されるが、プラスチック等繊維状物質の堆積により水平方向に比べて鉛直方向の透水性が低くなり、盛土内水位が形成される可能性が皆無ではない。特に斜面部近傍においては廃棄物層の地下水位を定期的にモニタリングすると共に、透水性の良好な砾径廃棄物を選定して覆土としてある層厚（数十cm程度）で埋め立てておけば、水平排水層の機能を期待できる。さらに発生ガス対策の観点から通気性確保の機能を兼ねた豊型集排水構造等を採用することで、斜面の地震時安定性を確実なものとすることができる。

(3) 展開検査等による搬入管理上の留意点

安定型処分場11か所での試験結果から、埋立物に10cm超物の混入割合が多くなると、空隙率が高くなる結果が得られている（図35）。したがって、埋立量を増やす（埋立層の空隙を減らし密度を高める）ためには、埋立廃棄物のサイズを小さくする必要がある。

当然、浸透水の水質保全の面からも展開検査は重要であり、安定5品目以外の異物除去はもちろんのこと、長尺のプラスチック等がBOD等の水質に悪影響を与えることが、カラム実験で示されていることから、廃プラスチックの処分基準を満たさない15cm超のものを受け入れないことを徹底することは重要なことである。

廃プラスチックについては、廃棄物処理法施行令第6条第1項第3号（処分基準）で、「中空でないように、かつ、最大径おおむね15cm以下に破碎、切断、若しくは溶融設備を用いて溶融加工すること」が規定されている。この規定を遵守することは、水質保全の観点からも処分場の延命化の観点からも重要である。

また、令第6条第1項第3号ロの「安定型最終処分場で埋立処分を行う場合には、安定型産業廃棄物以外の廃棄物が混入し、又は付着するおそれのないように必要な措置を講ずること。」についても当然のことながら遵守しなければならない。

【参考文献】

- 1) 全国都市清掃会議、廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領、2010改訂版、2010年5月
- 2) 山脇敦、島岡隆行、勝見武、大嶺聖、川崎幹生、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（K2402）、2013年3月
- 3) Florian Koelsch : Toolkit Landfill Technology, Chapter 4.6, Static Stability of Landfills, German Geotechnical Society(DGGT), July 2009
- 4) 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
- 5) 近畿地方整備局近畿技術事務所：簡易支持力測定器(キャスボル)利用手引き、2005年6月
- 6) 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(地盤工学), Vol. 73, No. 2, pp.212-223, 2017年6月
- 7) 松倉公憲、恩田裕一：安息角 定義と測定法にまつわる諸問題、筑波大学水理実験センター報告、No.13、pp27～35、1989
- 8) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説、2004年6月
- 9) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、2009年11月
- 10) 国立天文台：平成26年理科年表、平成25年12月
- 11) 山脇敦、大嶺聖、土居洋一、川崎幹夫、坂口伸也、島岡隆行、勝見武、川井晴至：環境研究総合推進費補助金循環型社会推進研究事業総合研究報告書 プラスチック等が混入した弾性廃棄物地盤の力学及び環境特性に関する研究（3K13011）、2016年3月
- 12) 日本道路協会：道路土工 擁壁工指針、2012年4月改訂
- 13) 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年7月
- 14)日本道路協会：道路土工 盛土工指針（平成22年度版）4-3-4 地震動の作用に対する盛土の安定性の照査
- 15)東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社：設計要領第一集,土工 建設編, 1. 総則, 3-4 設計に用いる土質定数, 平成28年8月.
- 16)鉄道構造物等設計標準・同解説 設計計算例, 盛土・切土, 2017.3.
- 17)日本道路協会：道路土工—盛土工指針、平成22年度版

【巻末資料】

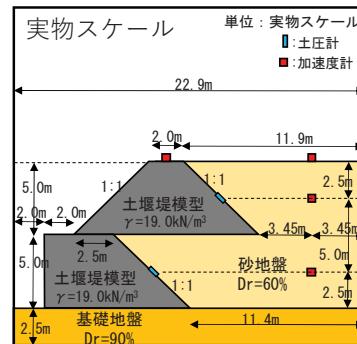
1. 動的遠心載荷実験

1) 動的遠心載荷実験による土えん堤—廃棄物層一体斜面の地震時挙動の確認

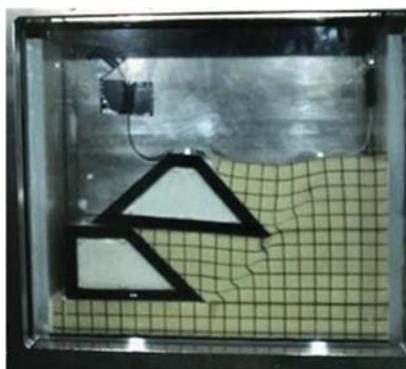
実験に用いた遠心載荷装置と土えん堤—廃棄物層一体斜面モデル（1/50）を図参1(a)(b)に示す。実験装置の制約上、モデルは高さ10m（50g遠心場）、土えん堤は2段、斜面勾配は1:1とした。土えん堤はセメント改良盛土を想定し、剛なアクリルで製作し単位体積重量を土相當に調整した。廃棄物層は7号珪砂を相対密度60%



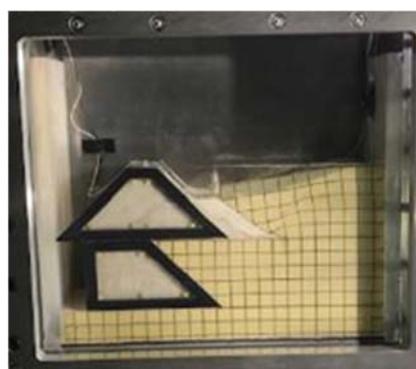
図参1(a) 動的遠心載荷実験装置



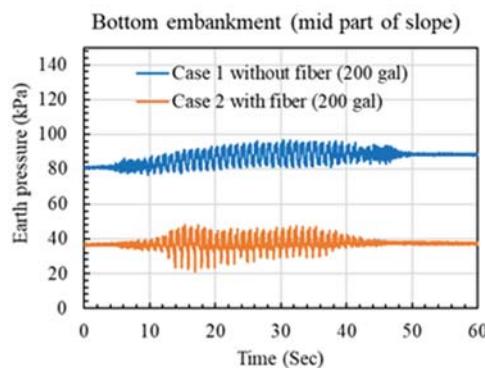
(b) 土えん堤—廃棄物層モデル（1/50）



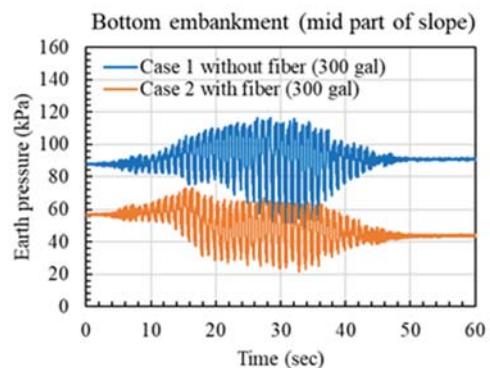
図参2(a) 繊維状物混入なし(400gal 加振後)



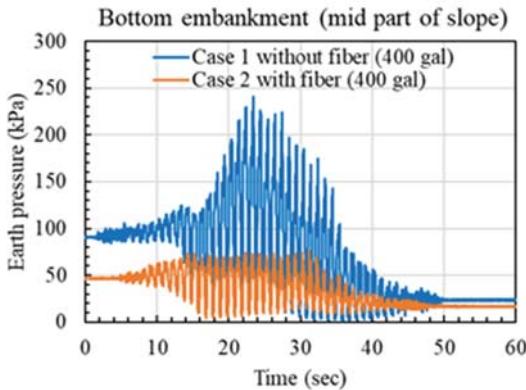
(b) 繊維状物混入有り(400gal 加振後)



図参3(a) 2段目土堰堤への作用土圧(200gal)



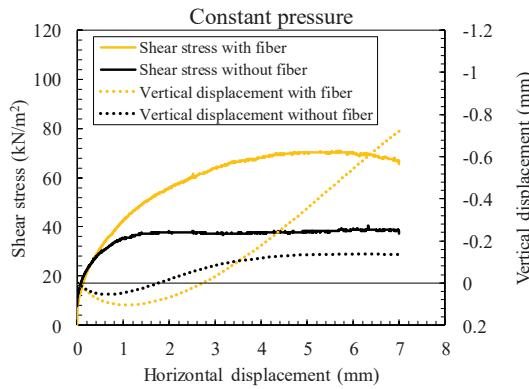
(b) 同(300gal)



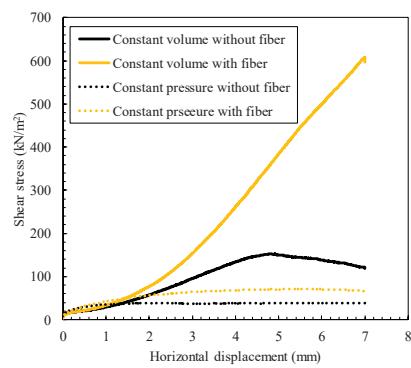
図参 3(c) 2段目土堰堤への作用土圧(400gal)



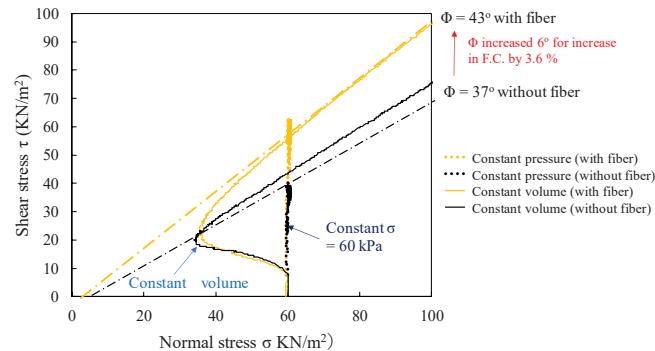
図参 4(a) 繊維状物混入材の一面せん断試料



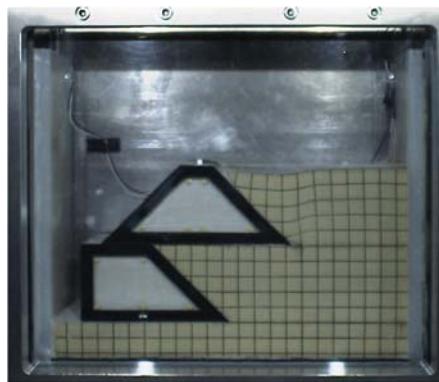
図参 4(b) 定圧一面せん断試験結果



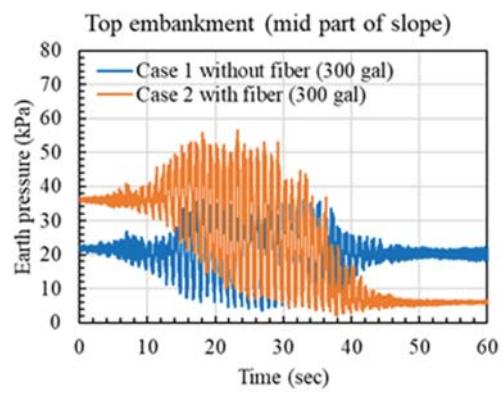
(c) 等体積一面せん断試験結果



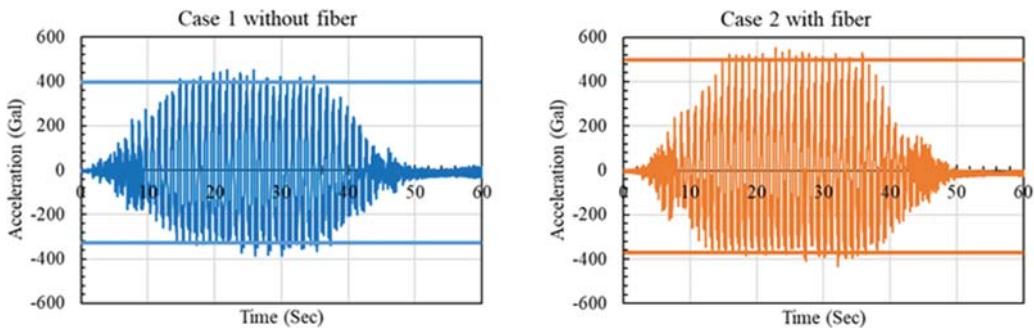
図参 4(d) 繊維状物混入によるストレスパスの変化



図参 5(a) 繊維状物混入有り (300gal 加振後)



(b) 1段目土えん堤への作用土圧 (300gal)



図参 5(c) 1層目の土中加速度(繊維無 : 300gal) (d) 1層目の土中加速度(繊維有り : 300gal)

に締固めて模擬的に再現している（基礎地盤は90%に密固め）。実験は珪砂のみ（繊維無）のケースと、これに繊維補強材を混入した繊維有の2ケースを実施した。繊維有の模型地盤では、コンクリート補強用繊維（ポリプロピレン製。直径D=0.4 mm×長さL=30 mm）を重量比1%となるよう厚さ1 cm毎に混入しながら同じ相対密度60%に締固めた。この模型地盤を50gの遠心場に置いた後、底面の振動台により100gal→400galまで連続的に加振した（f=1 Hz、20波）。加振中に土えん堤に加わる側方土圧と廃棄物層の地中加速度を計測した。

400gal 加振後のモデル地盤の状況を図参2(a) (b)に示す。(a)の繊維状物混入なしの場合、400gal 加振後には1,2段目土えん堤が解放面側（左側）に大きく滑動・回転し、その背面地盤に連續的なすべり線が明瞭に形成されている。400gal×20波という激しい加振を受けた場合、土えん堤を含む斜面全体が不安定化することを物語る。一方、繊維状物を混入した(b)では、1段目土えん堤は大きくスライドしているものの、2段目の土えん堤の変状は全く見られない（1段目の変状理由については後で詳述することとし、まずは深部の2段目土堰堤の挙動に議論を絞る）。繊維状物混入の影響は、このように特に大規模な地震動の作用下において顕著に現れる。図参3(a)～(c)には、200gal～400gal 加振における2段目土えん堤への作用側方土圧を示す。図よりまず、繊維物を混入する地盤では加振前（50g遠心場）での静止土圧の値が、混入無の場合に比べて小さな値を取ることが判る。これは、前出の図23(a)と整合しており、遠心場においても繊維状物混入により地盤のポアソン比が減少し初期土圧が低減することを確認した。200gal および300gal の加振（中規模地震動L1相当）では、繊維状物有り、無しの両ケースとも2段目土えん堤の変状や斜面崩壊は生じていない。この際の側方土圧は初期土圧に動的土圧成分が加わり、加振終了後にはほぼ初期値に戻る言わば弾性的な土圧挙動を取る。この場合、土えん堤と廃棄物は一体の挙動を示す。一方、(c)の400galでは繊維状物有り、無しで顕著な違いが現れ、繊維無しの場合、かなり大きな受働土圧が加わった後、2段目土えん堤のスライドと共にこれが主働側へ大きく低減している。この結果は、繊維状物無の斜面の不安定化が、土えん堤に加わる過大な受働土圧と土えん堤の解放面側への大変形、これに伴う背面廃棄物層の主働崩壊という、一連の非一体化の挙動を伴って生ずる事を示している。繊維状物有のケースは300galの時と大きくは変わらず、強震動に対する粘り強さ（韌性）を有する事を示している。実は、このケースでは大きくスライドした1段目土えん堤の背面を除去、廃棄物層を再構築して同一の加振履歴をもう一度加えたが、2段目の土えん堤とその背面地盤には変状は全く生じなかった。このように、繊維状物を混入した廃棄物層に十分な上載荷重が加わっている場合、繊維状物の引張抵抗と上載荷重の相乗効果により、その耐震性は繊維状物の無い場合に比べて格段に向かうことが伺える（土えん堤が3, 4段となり、さらに上載荷重が増えると、この相乗効果、韌性はさらに高まるものと考えられる）。

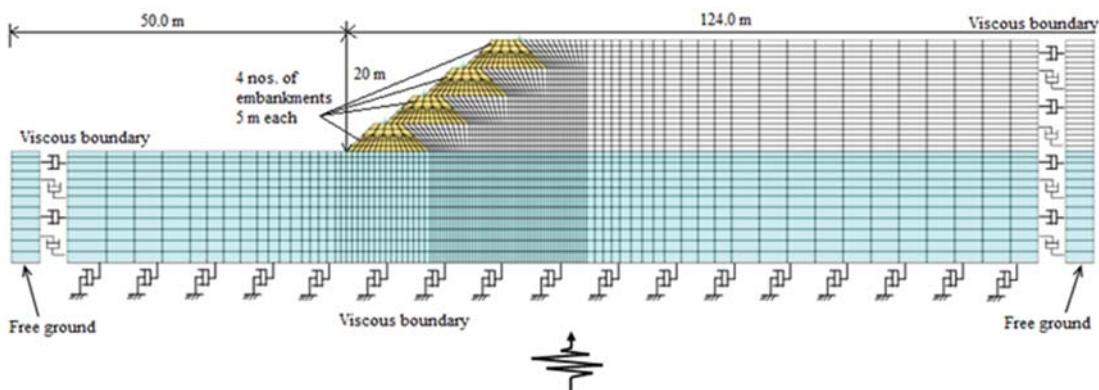
上記の纖維状物混入の効果を別手法により再確認する目的で、別途同一材料（珪砂7号）と同じ相対密度に調整した供試体を用いて一面せん断試験を実施した（上載荷重は遠心模型50g下の廃棄物層中央相当の値に設定）。図参4(a)に、纖維状物を混入させた一面せん断供試体（D=60mm×H=20mm, 供試体寸法及び作製の関係上、纖維状物の種類や混合比は遠心載荷の場合とやや異なる）の様子を示す。一面せん断試験はせん断時の体積変化を許す定圧せん断と、これを許さない等体積せん断の2種類を実施した。図参4(b)に、定圧せん断時の水平変位～せん断応力および体積変化特性を示す。纖維状物を混入したケースでは、砂単体のケースに比べてせん断強度が増加するのみならず、水平変位の増加に対してせん断応力が漸増する傾向を示し、脆性的挙動から延性的挙動に変化している。このことは遠心載荷実験における2段目土えん堤背面の廃棄物層の強震時挙動を定性的に裏付けるものと思われる。せん断中の体積変化は、その初期を除けば膨張側に推移しており、纖維状物を混入する場合ほど顕著となる。この結果は、廃棄物のせん断強度を調べた既往の研究事例（Purbashreeら¹⁾、宮本ら²⁾）と符合する。地震中の地盤のひずみ速度は比較的大きく、せん断中に体積変化が許されない可能性がある。そこで、同一試料を用いて等体積せん断を行った結果を図参4(c)に示す（定圧せん断の結果も併記）。定圧せん断時の体積膨張に対応し、等体積せん断時にはせん断後半で垂直応力が増加、定圧せん断時よりもより大きなせん断応力が発揮される。纖維状物を混入したケースでは、せん断中の垂直応力の増加が纖維状物の引張抵抗を高める相乗効果により、砂単体の場合の数倍のせん断応力を発揮するに至っている。また水平変位とせん断応力の関係はより延性的になり、ひずみ硬化タイプ（下に凸）の挙動を取るに至る。実際の加振時の地盤挙動は定圧と等体積の中間にあると考えられるが、纖維状物の混入が廃棄物層のせん断強度やひずみ依存性、韌性（粘り強さ）を大きく変える事が明白であり、これが図参3に示した強震時挙動の違いをもたらしている可能性がある。図参4(d)にせん断時のストレスパスを示すが、纖維状物の混入は内部摩擦角を6度増加させており、前出図29に示した引張抵抗を考慮した円弧すべり計算の設定条件の妥当性を裏付ける。

最後に、図参2(b)に示した纖維状物混入ケースでの1段目土えん堤の大きな滑動について注記しておく。図参5(a)は、図参2(b)400gal加振の一つ前の300gal加振後の模型斜面の状況を、(b)はこの際の1段目土えん堤に作用する側方土圧を示している。ここでは2段目とは逆に、纖維状物有りのケースで受働→主働崩壊に向かう挙動が捉えられており、纖維状物を混入するほうが早い段階で不安定化を示していることになる（初期土圧の大小が2段目土えん堤の場合と逆転している理由は不明である）。その理由は図参5(c)(d)に示されており、この際の1段目土えん堤背面地盤中の振動加速度を比較すると、纖維状物有りのほうがかなり大きな加速度応答値を示している。これは、纖維状物を混入する2段目背面地盤のせん断抵抗が纖維状物無の場合よりも大するために、基礎地盤→2層目→1層目→背面地盤表層に向かう地中加速度（振動）の增幅が大となり、この結果、纖維状物を含みながら上載荷重の小さな1段目背面地盤での振動が増幅し、1段目土えん堤の非一体的挙動を励起した結果と考えられる。本結果は、纖維状物を混入した廃棄物層では、大規模地震動においても斜面の深部を含む全体崩壊のような不安定化は生じないものの、逆に、表層付近における振動の増幅とこれによる局所的な背面地盤の変状や1段目土えん堤の変形をある程度避け得ないことを示している。ただし図参5(a)を見ると、2段目土えん堤の主働崩壊を伴わないために、図参2(a)の纖維状物を混入しない場合に比べて背面廃棄物地盤の変状は限定的（つまり修復可能）である。図参2(b)は、300gal加振により1段目土えん堤と背面地盤に変状（損傷）が発生した状態に対し、そのまま400galの強い加振を加えたため、抵抗力を喪失していた1段目の土えん堤が解放面側に向けて大変形したものである。実際には図参5(a)の状態で1層目の修復が図られることが想定されるため、図参2(b)の状況は生じないと考えられる。本文図30(b)では、このような理由から300gal加振後の状況を参考として示した。

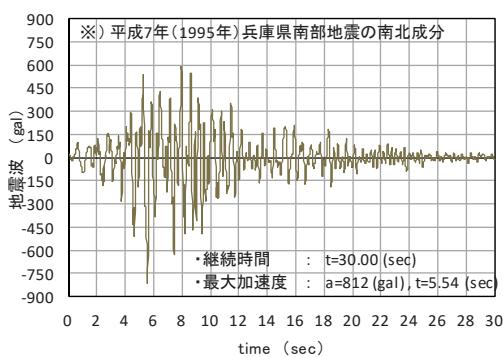
2. 非線形動的 FEM 解析の概要と廃棄物層の各種物性値

土えん堤—廃棄物層一体斜面の地震時挙動を再現し、その安定性に影響を及ぼす諸要因と寄与度を検討する目的で非線形動的 FEM 解析を実施した。実務設計者の利便性を考慮し、解析は土木設計の分野で汎用的に用いられている解析コード「Soil Plus」³⁾を用いた。本解析では基本運動方程式を直接積分法（Newmark- β 法）により時刻歴で解き、地盤内の変位と応力を求める。地盤材料（土えん堤及び廃棄物層）は地震時の非線形性を考慮するために履歴型 Ramberg-Osgood モデルにより表現している。土えん堤と廃棄物層の境界部にはジョイント要素を配置しており、Mohr-Coulomb 則に基づくせん断抵抗と剥離が表現される。廃棄物層内には水位が存在しない前提に基づき、全応力解析を行っている。

図参 6(a)に解析に用いた処分場斜面モデルを示す。標準的な安定型処分場のモデルとして、高さ H=20m、土えん堤高さ h=5m×4 段の斜面を想定した。解析ではまず、N 値 30 相当の堅硬な基礎地盤の上に、4 層毎に順次土えん堤と背面廃棄物要素を追加する静的盛り立て解析を実施した。この際の廃棄物層の変形特性は原位置試験により実測された地盤剛性を反映した非線形弾性体として表現した。得られた盛り立て完了時の地盤内各要素の初期応力状態を用いて、地震時応答解析に用いる廃棄物および土えん堤の動的変形特性（Ramberg-Osgood モデルのための微小ひずみ時のせん断剛性 G_0 、せん断剛性低減率 $G/G_0 \sim$ せん断ひずみ γ 関係、減衰定数 $h \sim \gamma$ 関係。いづれも初期拘束圧依存）を各要素毎に求めた。このモデルに対し、基礎地盤底面より図参 6(b)に示す地震動（阪神大震災における神戸記録波）を入力し、地震時の地盤内応答を求めた。図参 6(a)に示すように、モデル下面と左右境界には粘性境界を配置し、左右部に関しては自由地盤と連結した（エネルギー伝達境界）。入力地震動に関しては神戸記録波を L2 クラスと想定し、便宜的に加速度振幅をその 1/2 に低減した波形を L1 クラスとした。斜面の勾配については、前出の円弧すべり計算と同じく、土えん堤を含んだ勾配で 1:1（図参 6(a)）、1:1.5、1:2 の 3 種類の FEM モデルを作成した。



図参 6(a) 解析モデルの概要



図参 6(b) 採用した入力地震動波形

表参1 FEM解析に用いた各種物性値の一覧

	乾燥密度 γ_d (g/cm ³)		含水比 (%)	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	V_s (m/sec)	基準ひずみ $\gamma_{0.5}$	最大減衰率 h_{max}	初期せん断剛性 G_0 (kN/m ²)	G_0 拘束圧依存性係数 n	初期減衰率 h	想定N値	一軸圧縮強度 a_u (kN/m ²)	静的ヤング率 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
土壌堤	粘土	—	—	17.0	100	3.50E-03	0.10	17335	—	0.03	4	—	11200	0.333	30	20
	改良土	—	—	19.0	400	5.00E-04	0.10	309994	—	0.03	—	300	30000	0.333	150	0
廃棄物	剛廃棄物	1.4	25	17.2	175	1.25E-03	0.15	図参7(c)のVs分布より算出	0.6	0.03	—	—	図参7(b)より算出	0.365	20	35
	柔廃棄物	0.8	25	9.8	95	7.00E-03	0.11		0.8	0.03	—	—		0.234	5	45
支持地盤	—	—	19.0	291.6	4.00E-04	0.28	164735	—	0.03	30	—	84000	0.450	—	—	

解析に用いた各種物性値の一覧を表参1に示す。土えん堤と廃棄物層の両者に対して、①単位体積重量 ②盛り立て解析に用いる静的ヤング率とポアソン比 ③ Ramberg-Osgood モデルに必要な動的変形特性 (S 波速度、 $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h-\gamma$ 関係) ④ ジョイント要素に必要な強度定数 (Mohr-Coulomb 則の c, ϕ) を定める必要がある。これらは主として、本マニュアル表2中に示した既往の実廃棄物処分場での現場計測値及び廃棄物の動的変形特性を詳細に調べた Zekkos⁴⁾らの研究成果を援用して定めた。

① 廃棄物の単位体積重量 γ

図参7(a)に、表2に示した既往現場計測結果を含水比と乾燥密度（水置換法による）の関係として示した。現場の含水比と乾燥密度は大きくばらつき、Zekkos ら⁴⁾、Purbashree ら⁵⁾の分析結果によると、廃棄物層の繊維状物の混合比率の大小が、これに関わっている（繊維状物を多く混合すると地盤中の空隙が大きく、乾燥密度が小さくなる）。本解析では、Zekkos らのデータ範囲との整合性も参照し、図中に赤線で示した上下限値を採用した。上限を「剛な」（繊維状物を含まない、がれきや土砂主体の）廃棄物の、下限を「柔な」（繊維状物を多く含む）廃棄物の値とした。なお含水比については全体平均値の 25%に統一した。これにより、静的盛り立て解析および動的応答解析に入力する湿潤単位体積重量を定めた。土えん堤の γ については、ネクスコの設計指針等⁶⁾に示された盛土の代表的な物性値を参照し、前出の円弧すべり解析と同じ値を設定した。

② 静的ヤング率とポアソン比

図参7(b)に、現地処分場で実測されたキャスボルによる Ia 値と平板載荷試験により求められた地盤反力係数 K_{30} の関係を示す。繊維状物を多く含む柔な廃棄物ほど Ia や K_{30} が小さく、剛な廃棄物ほど大となる。解析では図中に記した上下限値を採用した。この地盤反力係数 K_{30} をブシネクス解に基づく換算式 ($E=0.267 \times K_{30}$) により変形係数に置き換えた。なお、この変形係数 E_0 は転圧面表層で得られた値であることから、盛立て中の上載荷重による変形係数の増大を考慮し、非線形弾性 $E=E_0 \times (\sigma_v / \sigma_{vo})^n$ にて各盛り立て段階毎に変形係数を算出して与えた。ここに σ_{vo} は E_0 (K_{30}) を求めた時の土被りとして深度 30 cm (平板載荷試験の影響深度 60 cm の 1/2 相当) の値を、また拘束圧依存性 n は後述する微小ひずみ時のせん断剛性 G_0 の依存性と同じ値を与えた。ポアソン比 ν は、弾性体における静止土圧係数 K_0 との関係式 ($K_0=\nu / (1-\nu)$) より、遠心載荷実験にて得られた実測初期土圧係数の値より逆算した値を表参1のように定めた（土えん堤は便宜的に 1/3 とした）。

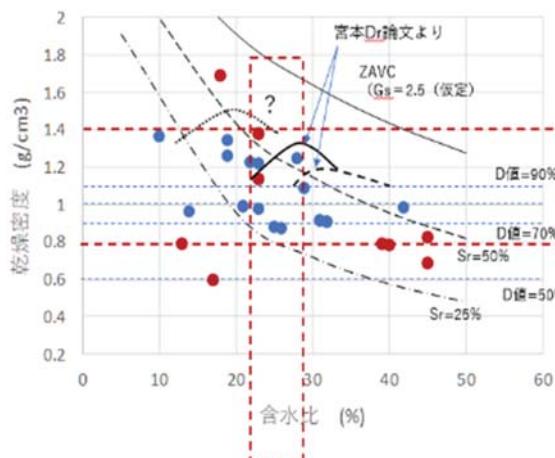
③ Ramberg-Osgood モデルに必要な動的変形特性

動的解析に用いる廃棄物層の G_0 (S 波速度 V_s)、 $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h-\gamma$ 関係は、Zekkos ら⁴⁾による廃棄物の原位置および室内試験結果を参照して定めた。図参7(c)は、Zekkos ら⁴⁾がアメリカの現地廃棄物地盤において実測した S 波速度の深度方向分布を示す。Zekkos ら⁴⁾は、廃棄物層の S 波速度が深度方向に増大し拘束圧依存性を有する事、及び剛な（繊維状物を含まない）廃棄物ほどその値が大きいことを報告している。図中の緑の矢印

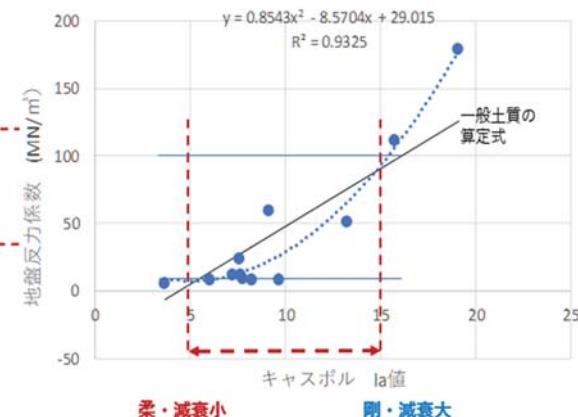
は、わが国の実処分場で計測された S 波速度の実測値をデータ範囲として併記したが、これらは Zekkos ら⁴⁾の結果と調和的である。本解析では、図中に示した 2 本の上下限ラインを廃棄物層の S 波速度として採用した。**図参 7(d)(e)**は、廃棄物層の動的変形特性 ($G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h-\gamma$ 関係) を示す。**図参 7(e)**は Zekkos ら⁴⁾が室内の大型動的三軸試験により求めた実測データを示しており、繊維状物を多く含む柔な廃棄物ではせん断ひずみの増加に伴うせん断剛性の低下率が小さく（粘り強く）、かつ減衰定数 h が小さくなる（弾性的に応答する）傾向を報告している。これらの傾向は、前述した遠心載荷実験や一面せん断試験結果とも符合するものと考えられる。本解析においては、図中に示した上下限範囲を廃棄物層の物性に振り分けた。**図参 7(d)**には、前述の S 波速度と**図(e)**を用いて設定した $G \sim \gamma$ 、 $h-\gamma$ 関係をまとめて示した。図中には粘性土とセメント改良土を想定した土えん堤材料の動的変形特性を併記した。これらについては、**表参 1** 中に記した想定 N 値や一軸圧縮強度を基に、国生⁷⁾による粘性土とセメント改良土の動的変形特性に関する既往現場・室内実験データを参照して定めた。

④ ジョイント要素に必要な強度定数

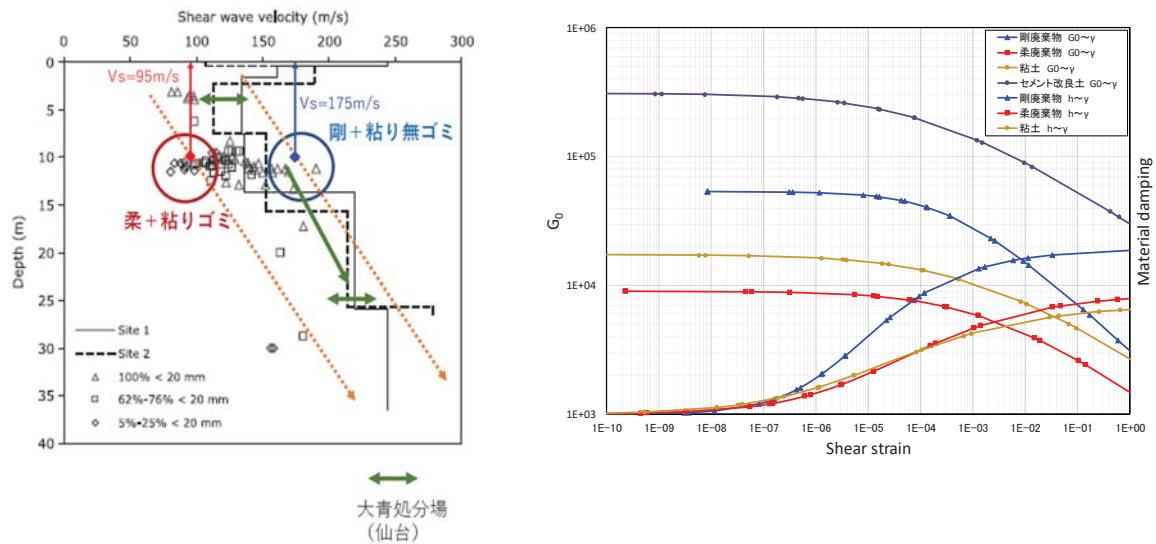
土えん堤と廃棄物層の境界部にはジョイント要素を配置した。ジョイントは剥離に対しては抵抗しないものとし、せん断方向に対しては Mohr-Coulomb 則に従うものとした。そのため廃棄物層の強度定数 c, ϕ を設定する必要がある。**図参 7(f)** は、**表 2** に示した既往実測データの中から、廃棄物層の乾燥密度と粘着力 c （原位置一面せん断試験結果）の関係、およびプラスチック混入率と停止安息角（≒内部摩擦角）の関係を示している。既述のように、繊維状物を多く含む柔な廃棄物では粘着力が小さく、停止安息角が大となる。解析では、図中に赤線で示した上下限値を廃棄物層の物性として与えた。土えん堤の強度定数（土えん堤同士の境界ジョイントに設定）については、想定した N 値からの推定及び文献⁷⁾ 中の実測値を採用した。



図参 7 (a) 廃棄物層の乾燥密度と含水比

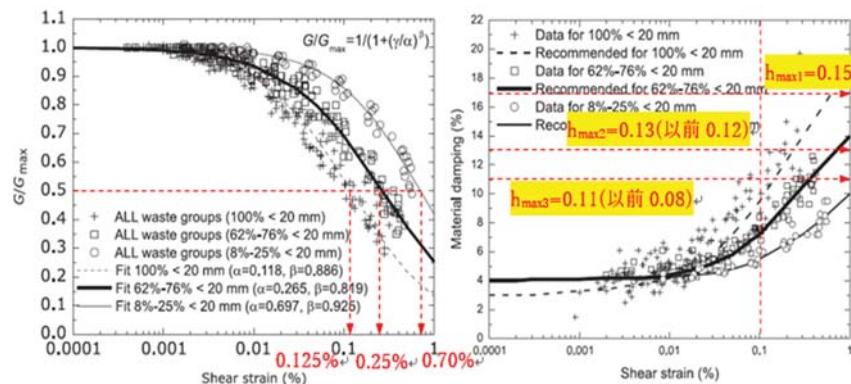


図参 7 (b) 廃棄物層の静的変形係数の設定

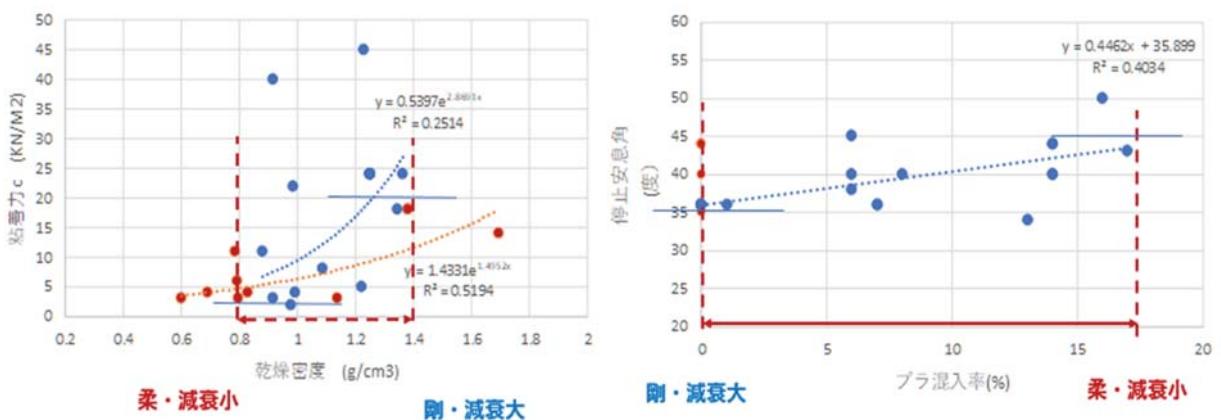


(c) S 波速度の深度方向分布

(d) 廃棄物層及び土えん堤材料の動的変形特性



(e) 廃棄物の動的変形特性の実測値 (Zekkos et. al.)



図参 7(f) 廃棄物層の強度定数 (境界ジョイント要素の物性値)

【参考文献】

- 1) Sarmah, P., Nakase, Y., Ishiguro, T., Katsumi, T., Takai, A., and Yamawaki, A.: Mechanical characterization of inert waste with different fibrous contents, 第 55 回地盤工学研究発表会, 2020.
- 2) 宮本, 安福, 大嶺, 石藏, 川井, 山脇 : 組成割合の異なる埋立廃棄物の変形・強度特性, 土木学会論文集 C (地盤工学), Vol.71, No.4, pp.278-291, 2015.
- 3) 伊藤忠テクノソリューションズ : 地盤・浸透・耐震統合解析システム SoilPlus
<http://www.engineering-eye.com/SOILPLUS/>
- 4) Zekkos, D., Kabalan, M., Syal, S. M., Hambright, M., and Sahadewa, A., 2013. Geotechnical characterization of a municipal solid waste incineration ash from a Michigan monofill. Waste Management. 33, pp.1442–1450.
- 5) Sarmah, P., Katsumi, T., Yamawaki, A., Takai, A., Omine, K., Ishiguro, T., Doi, Y., Nakase, Y., Ideguchi, S.: Physical and mechanical properties of waste ground in inert landfills, Waste Management, 投稿中.
- 6) 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社 : 設計要領第一集, 土工 建設編, 1. 総則, 3-4 設計に用いる土質定数, 平成 28 年 8 月.
- 7) 国生剛治 : 土の動的変形特徴と地盤の非線形震動応答、電力中央研究所報告, 昭和 57 年 2 月.