

令和4年1月7日版

この報告は、日本応用地質学会の廃棄物処分・利用における地質環境に関する研究小委員会の活動の成果の一部として作成したもので、内容については同委員会での議論を重ね取りまとめたものである。また今後の活動により、さらに内容を充実させることもあるため中間報告としての位置づけで公表する。

埋立処分される廃棄物等の室内試験結果報告

一般社団法人日本応用地質学会
廃棄物処分・利用における地質環境に関する研究小委員会
第1ワーキンググループ
大野博之・山内一志・陳友晴・磯部有作・山中稔・
大山隆弘・打木弘一・宮原哲也・登坂博行

<報告の背景>

人工地盤である最終処分場埋立地の災害を防止するためには、既存の応用地質学的な調査・解析手法を取り入れるとともに、設計段階で埋立てる廃棄物の物性評価が重要である。

廃棄物層の力学特性（単位体積重量（密度）、内部摩擦角、粘着力など）や透水特性（透水係数、間隙率など）は、最終処分場の適正な設計や維持管理において、重要な要素となり、最終処分場埋立地の力学的安定性や生化学的安定化に大きく影響することが知られている。

これまで、その一般的な物性は、最終処分場整備要領¹⁾に示される土質定数事例（全国都市清掃会議，1989）や焼却灰の土質試験結果例（1989～1999の論文等報告）などが用いられてきている。また、（公財）産業廃棄物処理事業振興財団²⁾が、産業廃棄物不法投棄等現場における2010年～2012年度の試験結果（密度、含水比、内部摩擦角、粘着力など）を示し、不法投棄等現場や不適正な最終処分場においては、重要な物性情報となっており、その値が用いられることもある。

しかし、2006年の環境省通知（環産産発第060601001号）で石膏ボードが安定型最終処分場に埋立処分できなくなって以降、管理型の廃棄物として石膏類が破碎不燃ごみとして埋立処分されるようになった。一方、有効利用を目的として廃棄物を熔融したスラグ（エコスラグ）も、一部は埋立処分されている。最近の廃棄物は、このように最終処分場整備要領の廃棄物種類とは異なるものも埋め立てられており、その物性を改めて把握しておくことが重要と考える。

また、東日本大震災などでも明らかとなってきたように、大規模盛土住宅地においては、締固め度が小さく、地震の繰返しせん断力を受けた盛土などで、過剰間隙水圧が発生し、せん断抵抗力が大きく低下することで、盛土のり面の地すべり的な変形が問題となった事例も

あった³⁾。こうした過剰間隙水圧は、液状化強度比の低い盛土材で発生しやすいが、廃棄物については宅地と同様な盛土工となる場合があるもののその値は把握されてこなかった。

最終処分場整備要領で示されている埋立地の規模は、宇佐見他⁴⁾などにも示されるように、埋立廃棄物層厚は10～20mである。すなわち、これまでの最終処分場はあまり大きな埋立地（高盛土の廃棄物埋立）を想定していないので、大規模盛土住宅地で生じたような現象を考える必要はなかった。しかし、埋立廃棄物の種類が過剰間隙水圧の発生しやすいものであった場合には、埋立廃棄物の盛土高が数十mを超えるような陸上最終処分場でも大規模盛土住宅地と同様な現象が生じる可能性も指摘されている⁵⁾。

さらに、陸上最終処分場の場合、通常の土質材料の盛土と同様に、盛土管理を行い適切な力学物性を確保する必要もあると考えられる。道路盛土などのような“品質規定方式による締固め管理”について、最終処分場整備要領には特に規定はなく、これまでの実績である工法規定方式（転圧回数による規定、通常5～6往復）で埋立廃棄物に対する締固めが示されているのみである。これまで、これらの廃棄物盛土は災害による被害もなく、安全なものであったが、盛土高は20m以下と比較的低いものが多かった⁶⁾。しかし、埋立廃棄物による盛土が大規模化していけば、大規模盛土住宅地のように大規模地震で崩壊することも懸念される。

こうした状況を鑑み、安定した人工地盤である盛土を廃棄物で形成する場合の締固めの方法についても示す必要がある。さらには、盛土材料が廃棄物であるとはいえ、「盛土が水で飽和あるいは完全に乾燥していないこと⁷⁾」が、豪雨・地震に強い盛土にとっての必要条件であることには変わりはない。このため、適切な締固めと共に、埋立廃棄物盛土内の地下水（保有水等）を適切に排除すること⁸⁾が、最終処分場の力学的安定性の確保につながる。これにより、最終処分場の安定的な貯留機能の確保が可能となる。

以上のことから、管理型最終処分場を想定して、いくつかの廃棄物等を収集し、各種の室内土質試験を行ったので、その結果を図表で示す。

なお、本室内試験結果は、表-1に示すように、廃棄物等の数がまだ少なく、今後の研究成果も逐次追加していく予定である。

<謝辞>

エコスラグの試料の提供にあたっては、九州大学の島岡隆行教授、中山裕文准教授、小宮哲平助教より多大なご協力を頂いた上、試験結果についてのご助言もいただいた。ここに深謝の意を表す。

また、室内試験については、石川昭技術部長をはじめとした株式会社田中土質基礎研究所の方々にご協力を頂いたうえ、試験結果についての解釈に際してもご助言を頂いた。ここに謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 全国都市清掃会議編(2010)：廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領-2010 改訂版，Ⅱ編 設計要領，pp.172-458.
- 2) 公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団編(2013)：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，180p.
- 3) 門田浩一・本橋あずさ・佐藤真吾・三嶋昭二(2015)：滑動崩落被害を受けた仙台市造成宅地の再現解析及び被害予測の課題，地盤工学会誌，第 63 巻，第 10 号，pp.32-35.
- 4) 宇佐見貞彦・今泉繁良・葛巻賢二(2002)：最終処分場に敷設された遮水シートの許容局所沈下量，土木学会論文集，No.722/Ⅲ-61，pp.37-48.
- 5) 大野博之・磯部有作・山内一志・山中稔・稲垣秀輝(2019)：最終処分場における大規模盛土状廃棄物の地震応答，第 54 回地盤工学会研究発表会講演論文集
- 6) 大野博之，大山隆弘，磯部有作，打木弘一，大久保拓郎，宮原哲也，山内一志，和田卓也，山中稔，登坂博行(2020)：最終処分場における設計水平震度の設定－地震後の状況調査から，応用地質，第 61 巻，第 5 号，pp.262-271.
- 7) 澁谷啓(2008)：盛土崩壊メカニズムと対策工，ジオシンセティック論文集，第 23 巻(2008.12)，pp.1-14.
- 8) 大野博之・山内一生・山中稔・稲垣秀輝(2017)：埋立終了後の最終処分場の力学的安定性における集排水設備の重要性，平成 29 年度日本応用地質学会研究発表会論文集，No.19.

今回、室内試験に用いた廃棄物等は、表-1 の通り。また、それぞれの廃棄物等を写真-1 に示す。

表-1 室内試験に利用した廃棄物等

種類 (記号番号)	廃棄物の種類	混合物	備考
破碎不燃ごみ (A2019-1)	廃プラスチック類、ゴムくず、金属くず、ガラスくず・コンクリートくず及び陶磁器くず、がれき類、紙くず、木くず、繊維くず		ガラスくず・コンクリートくず及び陶磁器くずとして石膏ボード含む
破碎不燃ごみ (A2019-2) (マサ土混合)	A2019-1 に同じ	廃棄物：マサ土 =6：1 (体積)	ガラスくず・コンクリートくず及び陶磁器くずとして石膏ボード含む
焼却灰 (主灰) (T2019-1)	燃え殻 (下記の産業廃棄物の焼却主灰)： 廃油、廃プラスチック類、木くず、繊維くず、ゴムくず、金属くず、ガラスくず・コンクリートくず及び陶磁器くず、汚泥、紙くず、動植物性残渣、感染性産業廃棄物、引火性廃油		
埋立一般廃棄物 (L2019-1)	燃え殻 (炭化施設の飛灰・残渣、し尿処理汚泥の焼却灰)、不燃ごみ	即日覆土材	土砂・灰等約 7 割、可燃分約 2 割、不燃物約 1 割
埋立安定型廃棄物 (L2019-2)	廃プラスチック類、ガラスくず・コンクリートくず及び陶磁器くず、土砂、がれき類、金属くず、ゴムくず	即日覆土材	
エコスラグ (廃棄物由来の溶融スラグ (水砕)) (S2019-1)	家庭ごみ、焼却灰、破碎不燃物、し尿汚泥を、シャフト炉式ガス化溶融炉で生成		再生資材であり、埋立廃棄物としては通常扱わない
エコスラグ + 15% 粘土 (S2019-2)	S2019-1 に同じ	重量比 15% で粘土含有	再生資材であり、埋立廃棄物としては通常扱わない



破碎不燃ごみ (A2019-1)



焼却灰 (主灰) (T2019-1)



埋立一般廃棄物 (L2019-1)



埋立安定型廃棄物 (L2019-2)



エコスラグ (S2019-1) の荷積み状況(左)とエコスラグ(右)

写真-1 室内試験に利用した廃棄物等

表-2 実施した試験一覧表

試 験 名 称		規格・基準	
		日本工業規格	地盤工学会基準
物 理 試 験	土粒子の密度試験	JIS A 1202	JGS 0111
	土の含水比試験	JIS A 1203	JGS 0121
	土の粒度試験	JIS A 1204	JGS 0131
	土の液性限界・塑性限界試験	JIS A 1205	JGS 0141
	土の湿潤密度試験	JIS A 1225	JGS 0191
せん断 試験	土の三軸圧縮試験（CU）	—	JGS 0523
	土の繰返し非排水三軸試験	—	JGS-0541
安定化 試験	土の締固め試験	JIS-A-1210	JGS-0711
透水試 験	土の透水試験	JIS-A-1218	JGS-0311

表-3 廃棄物等の試験結果（基本物性）

		破砕不燃ごみ (A2019-1)	破砕不燃ごみ (A2019-2) (マサ土混合)	焼却灰 (T2019-1)	埋立 一般廃棄物 (L2019-1)	埋立 安定型廃棄物 (L2019-2)	エコスラグ (S2019-1)	エコスラグ +15%粘土 (S2019-2)
一般	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.771	2.804	2.838	2.659	3.143	2.802	2.835
	自然含水比 ω_n %	27.0	24.9	21.0	24.2	29.6	13.5	1.7
粒度	礫分(2~75mm) %	14.2	12.1	4.8	19.2	11.1	0.0	0.0
	砂分(0.075~2mm) %	39.5	42.7	47.7	50.3	42.8	92.2	86.3
	シルト分 (0.005~0.075mm) %	25.2	23.3	21.7	15.5	27.7	5.2	7.0
	粘土分(0.005mm未満)%	21.1	21.9	25.8	15.0	18.4	2.6	6.7
	最大粒径 mm	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	2.0	2.0
	均等係数 U_c	—	—	—	513.91	—	4.48	37.40
コンシ テンシ 特性	液性限界 ω_L %	57.2	52.8	41.2	NP	NP	NP	NP
	塑性限界 ω_p %	34.1	30.4	21.6	NP	NP	NP	NP
	塑性指数 I_p	23.1	22.4	19.6	—	—	—	—
分類	地盤材料の分類名	礫まじり 細粒分質砂	礫まじり 細粒分質砂	細粒分質砂	細粒分質 礫質砂	礫まじり 細粒分質砂	細粒分混り 砂	細粒分混り 砂
	分類記号	(SF-G)	(SF-G)	(SF)	(SFG)	(SF-G)	(S-F)	(S-F)
締固 め	試験方法	A-c	A-c	—	—	A-c	A-c	A-c
	最大乾燥密度 ρ_{dmax} g/cm ³	1.025	1.092	—	—	1.258	1.723	2.062
	最適含水比 ω_{opt} %	46.2	41.7	—	—	36.3	14.2	11.0

表-4 廃棄物等の三軸圧縮試験結果

			破碎不燃ごみ (A2019-1)	破碎不燃ごみ (A2019-2) (マサ土混合)	焼却灰 (T2019-1)	埋立 一般廃棄物 (L2019-1)	埋立 安定型廃棄物 (L2019-2)	エコスラグ (S2019-1)	エコスラグ +15%粘土 (S2019-2)
湿潤密度 ρ_t g/cm ³			1.363	1.469	1.470	1.442	1.485	1.885	2.075
乾燥密度 ρ_d g/cm ³			0.984	1.092	1.134	1.191	1.196	1.661	1.892
自然含水比 ω_n %			38.5	34.5	29.6	21.0	24.2	13.5	9.7
透水係数 k_{15} m/sec			1.08×10^{-7}	1.86×10^{-7}	5.88×10^{-8}	5.51×10^{-5}	1.94×10^{-4}	1.93×10^{-4}	3.48×10^{-7}
J G S	全 応力	C_{cu} kN/m ²	50.2	0.0	6.2	64.1	86.4	326.5	295.8
		ϕ_{cu} °	17.73	13.87	12.26	15.74	15.92	22.99	20.46
	有効 応力	C' kN/m ²	17.1	0.0	2.5	35.2	31.1	56.5	33.4
		ϕ' °	40.41	37.55	28.65	33.60	39.47	35.00	35.12
応力比		C_d kN/m ²	14.9	27.4	0.0	2.6	31.5	23.7	19.9
		ϕ_d °	42.10	36.78	37.51	34.54	41.11	39.32	37.05
液状化強度比 <i>RL20</i>			0.580	0.571	0.678	—	—	0.237	0.277

備考)

JGS: CUB 試験を地盤工学会基準に則って、主応力差-軸ひずみ曲線の応力最大値あるいは軸ひずみ 15%でモール円を作成し、破壊基準線を求めた場合。
 応力比: 砂質土の場合には、「河上房義(1971): 新編土質力学, 森北出版」などに示されるように、主応力比-軸ひずみ曲線で応力比ピークがみられるときにせん断破壊を引き起こすとしたまとめ方がとられている。これに則りモール円を描き破壊基準線を求めた場合。

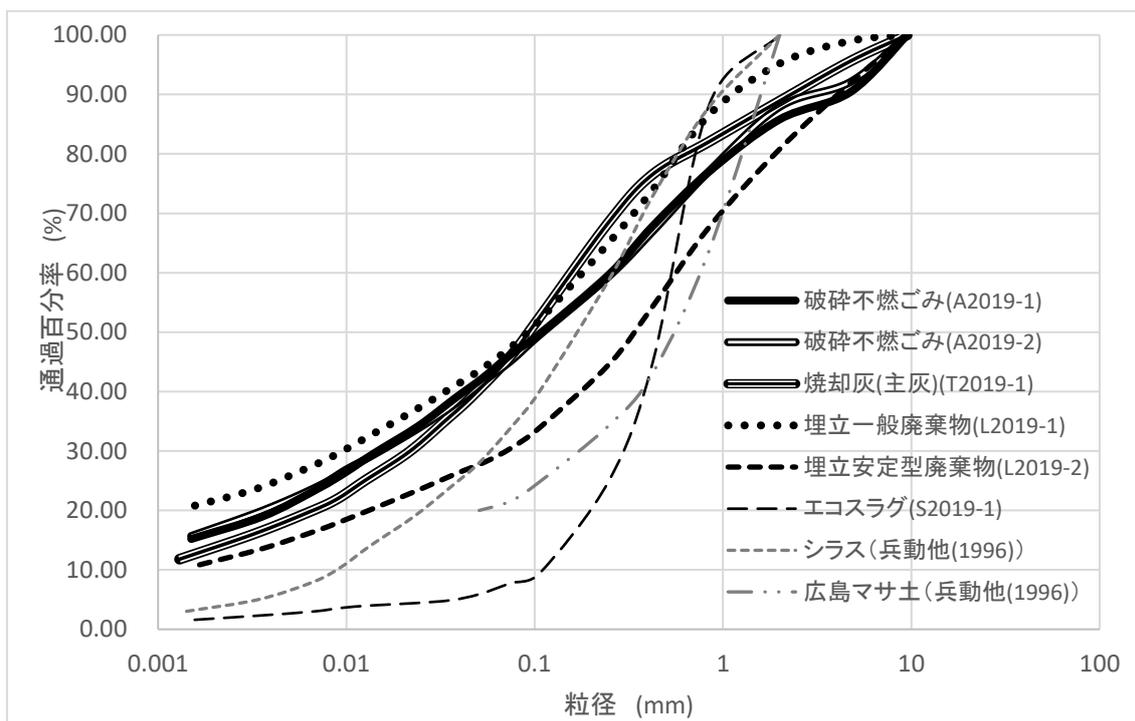


図-1 廃棄物等の粒度分布（粒径加積曲線）

廃棄物の他に、廃棄物由来の熔融スラグ（エコスラグ）、シラス、マサ土を表示

兵動他(1996)は「兵動正幸・荒牧憲隆・岡林巧・中田幸男・村田秀一(1996)：破碎性土の定常状態と液状化強度，土木学会論文集，No.554/Ⅲ-37，pp.197-209.」

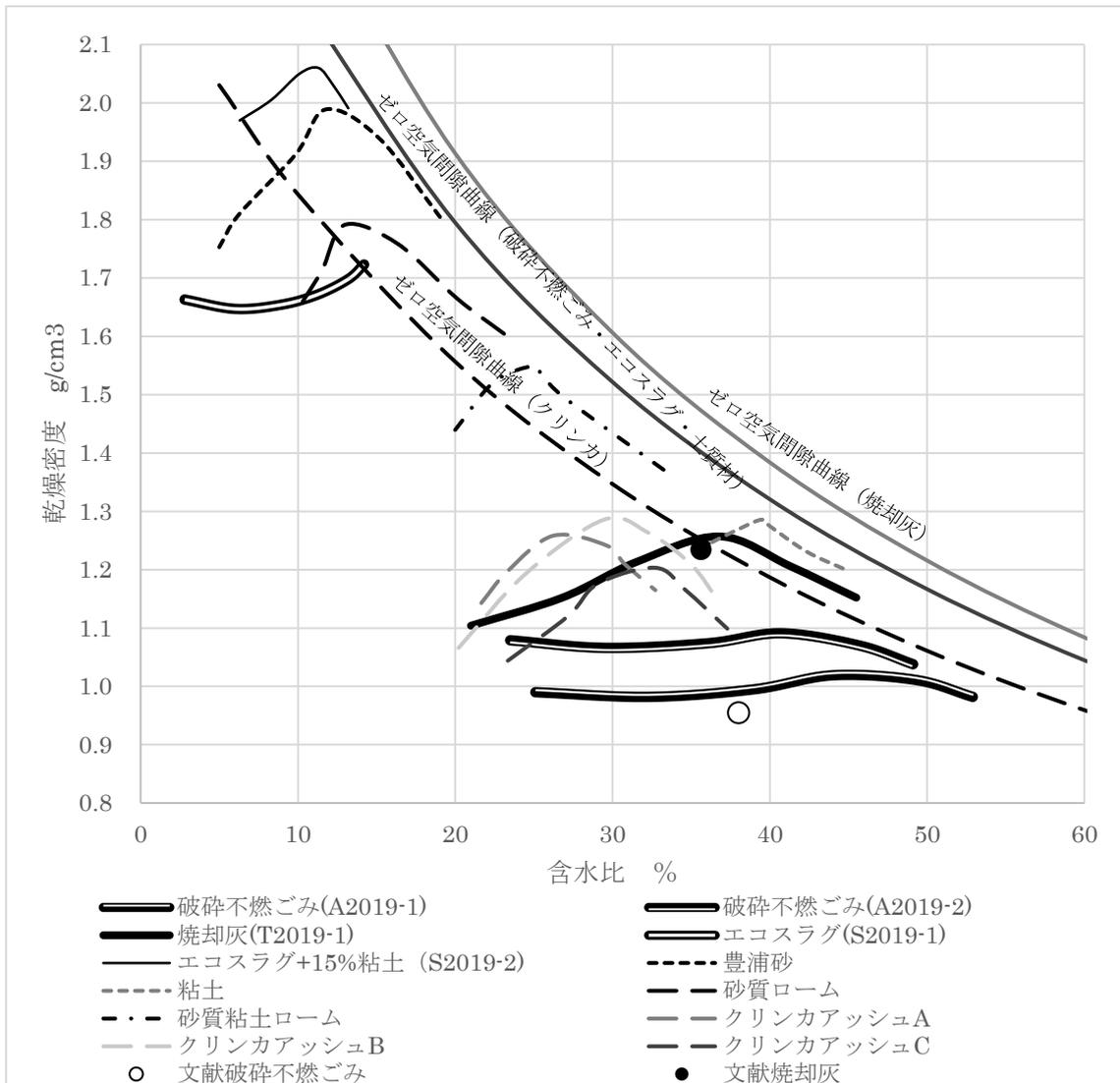


図-2 廃棄物等及び各種比較物質の含水比—乾燥密度の関係（締固め曲線）

土（豊浦砂，粘土，ローム）やクリンカアッシュのデータは、「日本フライアッシュ協会(2015): 石炭灰ハンドブック（第6版），平成27年11月，p. I-33」を用いた。

文献破碎不燃ごみ及び文献焼却灰は、「全国都市清掃会議編(2010): 廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領—2010改訂版」の最適含水比と最大乾燥密度の平均値

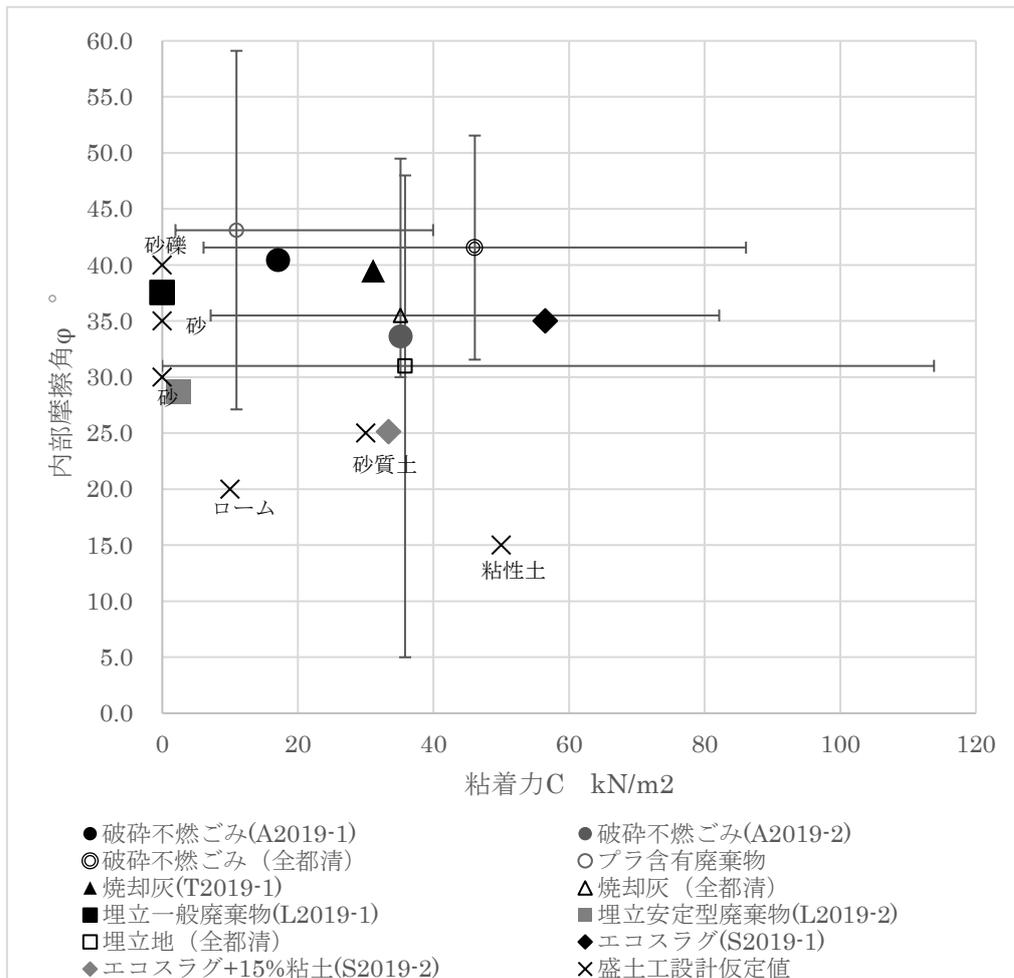


図-3 埋立終了後を想定した時の地盤定数

凡例の(全都清)は、「全国都市清掃会議編(2010):廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領-2010改訂版」の平均値をプロットし、最大・最小値の範囲を棒線表記
 プラ有廃棄物は、「山脇・土居・大嶺(2017):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.221-223」の安定型廃棄物(プラ有)の平均値をプロットし、最大・最小値の範囲を棒線表記
 盛土工設計仮定値は、「日本道路協会(2010):道路土工-盛土工指針(平成22年度版), p.101」の設計時に用いる土質定数の仮定値をプロット

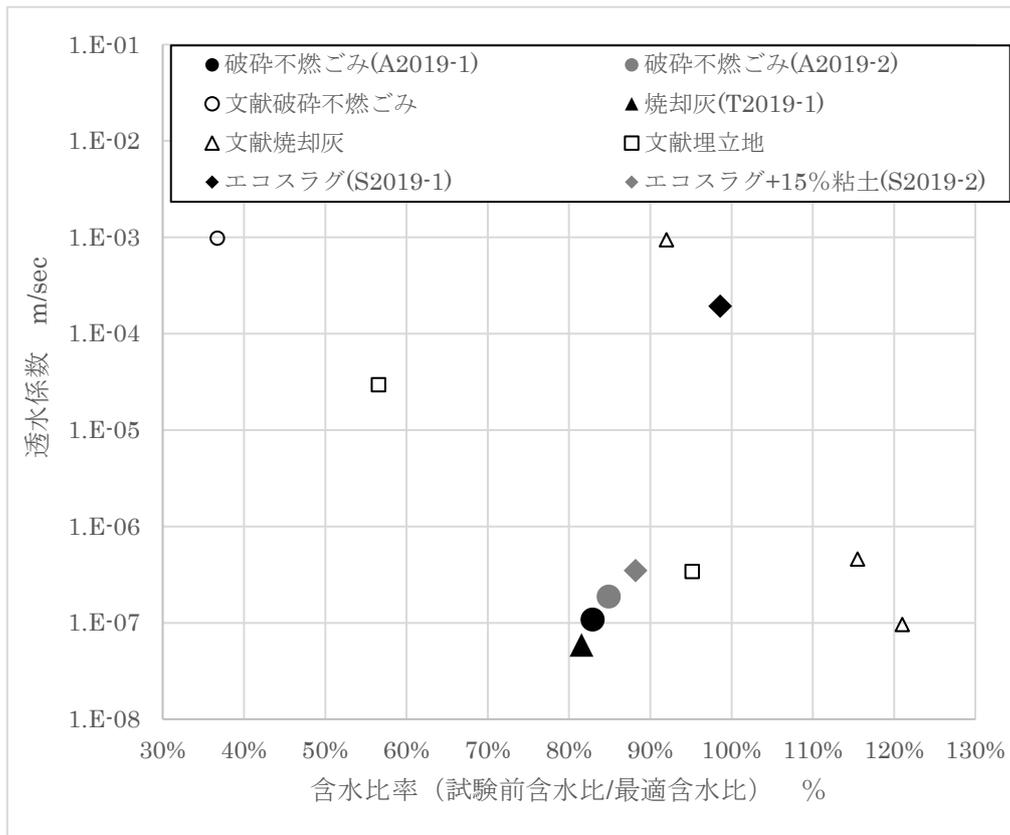


図-4 透水係数と含水比率（試験前含水比/最適含水比）との関係

文献値は「全国都市清掃会議編(2010)：廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領—2010改訂版, p.207&p.210&p.211」の含水比を試験前含水比とし、記載された最適含水比で割ったものを含水比率とした。埋立廃棄物(L2019)は最適含水比が求められていないので、図中には未記載。

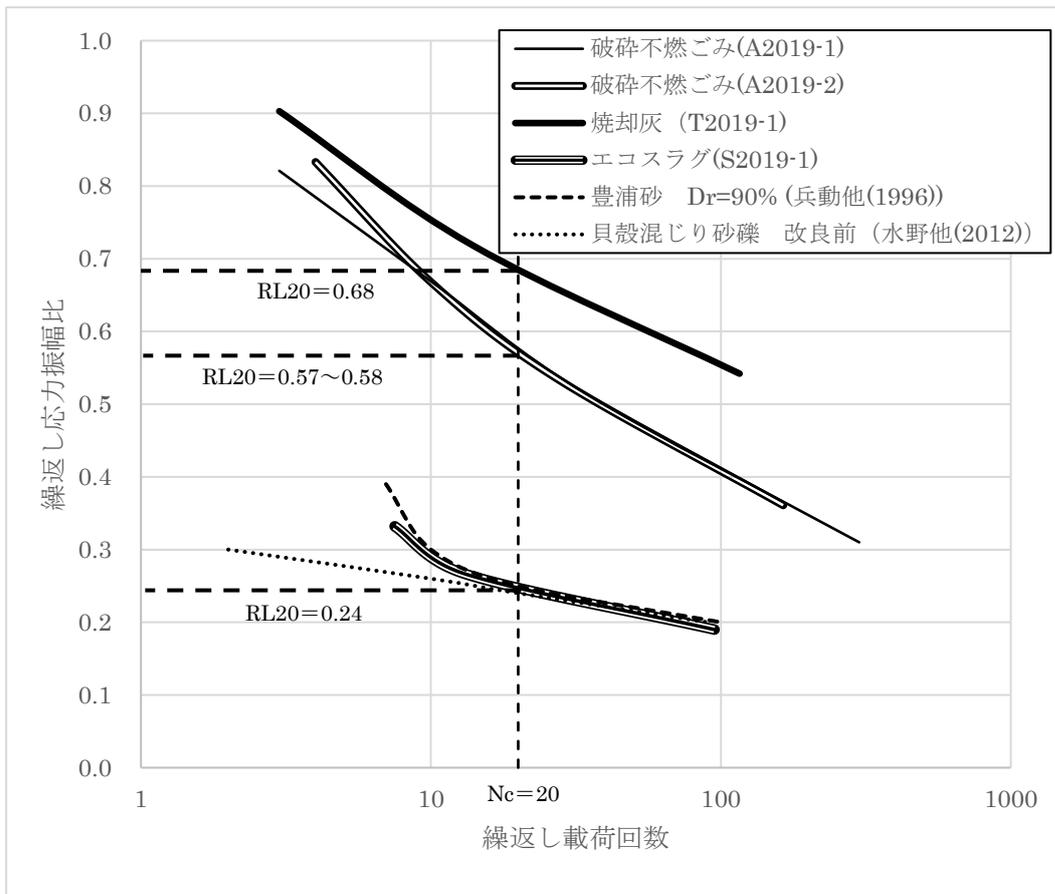


図-5 廃棄物等の液状化強度試験結果（繰返し载荷回数と繰返し応力振幅比の関係）

兵動他(1996)は「兵動正幸・荒牧憲隆・岡林巧・中田幸男・村田秀一(1996)：破碎性土の定常状態と液状化強度，土木学会論文集，No.554/III-37，pp.197-209.」

水野他(2012)は「水野健太・後藤敬一・岡田和成・松本大輔・佐々木隆光・岡村勲(2012)：薬液注入工法による貝殻混じり砂礫地盤の液状化対策，第10回地盤改良シンポジウム論文集，pp.55-62.」