

放射性セシウムを含む高含水比粘土の脱水固化処理による再利用

りんかい日産建設株式会社 正会員 ○山田 浩司

りんかい日産建設株式会社 関口 啓次

1. はじめに

浚渫工事などで発生する海成粘土由来の高含水比粘性土は、高圧フィルタープレス機に特殊な「ろ盤」と「ろ布」を使用し、脱水助剤にセメントを用いることにより、一定の強度が確保された脱水固化処理土になることも知られており、この脱水固化処理土を盛土材（路体および路床材）、裏込材、SCP 材などの材料として利用するための試験も進められている^{1) 2)}。

一方、福島県内の除染土壌等の分級洗浄では、放射性セシウムが細粒分（シルト・粘土）に吸着しやすいという特性を踏まえ、細粒分（シルト・粘土）と砂・レキに分級することにより、分級洗浄後の浄化物（砂・レキ）の放射性セシウム濃度を低減できると考えられている³⁾。また、今回採取した福島県内の畑地の土壌は強熱減量が高く、さらにアロフェンやフミン酸が多く含まれており、これらを含む土壌の固化処理に普通ポルトランドセメントや高炉セメントなどを用いた場合、セメント強度の発現に影響を及ぼすことが知られている⁴⁾。本実験では、この畑地の土壌の分級洗浄で発生した高含水比粘性土にセメントを添加し、高圧フィルタープレス機（4MPa）で脱水することにより、形状寸法が一定となる脱水固化処理土（以下、脱水固化碎石という）を製作した（写真－1）。本稿では、この脱水固化碎石の強度特性と放射性セシウムの溶出特性について報告する。



写真－1 脱水固化碎石⁵⁾

2. 試験の概要

(1) 試験の目的

試験の目的は、福島県内の畑地の高含水比粘性土から製作された脱水固化碎石の強度特性と放射性セシウムの溶出特性を把握することである。強度特性は、石材に準じる再生材としての活用を考慮し、「建設汚泥リサイクル製品評価のための自主基準（社団法人全国産業廃棄物連合会、平成 18 年 11 月）」のドレーン材の試験項目に準じて、表－1 に示す土質試験を実施した。放射性セシウムの溶出特性は、製作した脱水固化碎石とろ水に対して表－2 に示す試験を実施して確認した。

表－1 土質試験

試験名	試験方法
一軸圧縮強度	JIS A 1216
土の粒度試験	JIS A 1204
透水試験（定水位）	JIS A 1218
スレーキング率試験	JHS 110
一面せん断試験	JGS 0561

(2) 使用材料

供試泥は放射性セシウムを 2,000Bq/kg 程度含む福島県内の畑土を湿式分級し、0.075mm 以下にふるい分けさ

表－2 環境影響評価に関する試験

試験名	試験方法
放射性セシウム濃度試験	環境省：放射能濃度等測定方法ガイドラインH25.3
放射性セシウム溶出量試験	環告46号

れたものを使用した。供試泥の含水比は、ふるい分け後 300%に調整した。なお、含水比調整等の水は水道水を使用した。セメントは、高含水比粘性土との強度発現を確認するため、普通ポルトランドセメント、高炉セメント、高有機質土用セメント系固化材を選定した。

キーワード アロフェン、フミン酸、高圧フィルタープレス、脱水固化碎石、利用用途、放射性セシウム

連絡先 〒105-0014 東京都港区芝 2－3－8 りんかい日産建設株式会社 TEL03-5476-1721

(3) 脱水固化碎石の製作および試験

脱水固化碎石の製作フローを図-1 に示す。

脱水固化碎石は、供試泥に乾土重量当たりのセメント重量が 20%、40%、60%となるようにセメントスラリー（セメント：水＝1：1）を混合し、写真-2 に示す高圧フィルタープレス試験機（30L 型）で脱水処理し製作した。なお、高圧フィルタープレス試験機のろ過圧力は、6.4m³ 型の実機と同様の 4MPa である。



写真-2 高圧フィルタープレス試験機

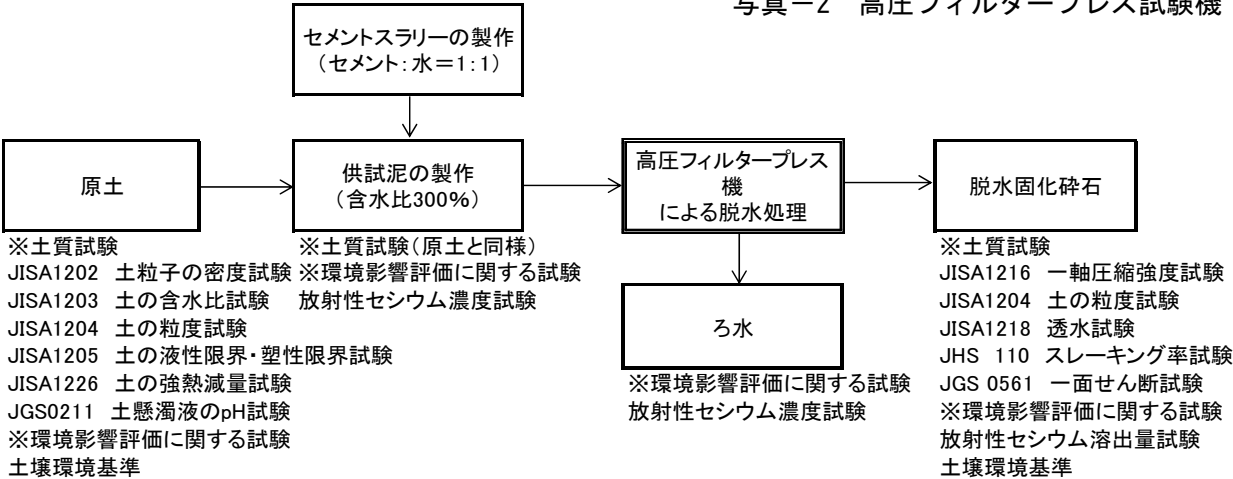


図-1 脱水固化碎石の製作フロー

3. 品質試験結果

(1) 原土および供試泥の土質試験とセメントの適合性試験

本試験は、原土およびふるい分け後の供試泥の物性を確認するために実施した。表-3 に原土の土質試験、表-4 に供試泥の土質試験、表-5 および表-6 に酸・アルカリ交互融解法によるアロフェン含有量試験および腐植含有量試験の結果を示す。試験の結果から原土は、アロフェン含有量および腐植含有量が 1.0%を超えており、脱水固化碎石の強度発現が低くなると予想された^{4) 6)}。表-7 に示すように、セメント種類の適合性試験でも高有機質土用セメント系固化材（以下、セメント系固化材という）の強度発現が最も優れていた。

表-3 原土の土質試験⁵⁾

土粒子の密度試験	JISA1202	2.625 (g/cm ³)	
土の含水比試験	JISA1203	33.3 (%)	
土の粒度試験	JISA1204	礫分 (2~75mm)	11.6 (%)
		砂分 (0.075~2mm)	32.4 (%)
		シルト分 (0.005~0.075mm)	26.7 (%)
		粘土分 (0.005mm未満)	29.3 (%)
		塑性指数	25.4
土の強熱減量試験	JISA1226	9.3 (%)	
土懸濁液のpH試験	JGS0211	6.0	

表-4 供試泥の土質試験⁵⁾

土粒子の密度試験	JISA1202	2.630 (g/cm ³)	
土の含水比試験	JISA1203	255.0 (%)	
土の粒度試験	JISA1204	礫分 (2~75mm)	0.0 (%)
		砂分 (0.075~2mm)	0.0 (%)
		シルト分 (0.005~0.075mm)	48.0 (%)
		粘土分 (0.005mm未満)	52.0 (%)
		塑性指数	24.6
土の強熱減量試験	JISA1226	13.3 (%)	
土懸濁液のpH試験	JGS0211	5.9	

表-5 アロフェン含有量試験⁵⁾

試料名	アロフェン含有量 (%)
原土	23.7

(2) 一軸圧縮強度試験結果

本試験は、原土に対するセメント系固化材の添加率と一軸圧縮強度の関係を確認するために実施した。

表-6 腐植含有量試験⁵⁾

試料名	腐植含有量 (%)		
	ビチューメン	腐植酸(フミン酸)	フルボ酸
原土	< 0.1	2.3	11.4

表-8 および図-2 にセメント系固化材の添加率と一軸圧縮強度の関係を示す（表-7 と表-8 ではロットの異なる土壌を使用，表-8 は図-2 の平均値）。

セメント系固化材の添加率を 60%/ds（乾土重量に対するセメントの重量割合）とした場合，脱水固化砕石は準硬石相当の強度（9.8MN/m²以上）となることが分かった。

(3) 土の粒度試験

本試験は，製作した脱水固化砕石の粒度分布を確認するために実施した。今回の試験で製作した脱水固化砕石は，現場における実機での製作条件と同じになるように，高压フィルタープレス機からの脱粋，仮置場への積込運搬，現場への積込運搬の衝撃を想定し，脱水固化砕石を高さ 3m から 4 回模擬的に落下させた。図-3 に粒度調整後のふるい分け試験結果を示す。特殊な型枠により形成された脱水固化砕石は上記落下負荷を与えた後でもすべてのセメント添加率において細粒分の発生が少なく，「建設汚泥リサイクル製品評価のための自主基準（社団法人 全国廃棄物連合会，平成 18 年 11 月）」におけるドレーン材としての粒度分布（0.075mm 以下の細粒分が 5%以下）を満たすことが分かった。

(4) 透水試験

本試験は，製作した脱水固化砕石が排水層のドレーン材として利用可能か否かを確認するために実施した。脱水固化砕石を排水層のドレーン材として利用する場合，品質基準については明確に定められたものがないため，今回の実験では土被り相当の上載荷重を加えながら透水試験を行い，その圧縮応力と透水係数の関係で評価を実施した。図-4 に圧縮応力と透水係数の関係を示す。セメント添加率 40%以上であれば，圧縮応力 400kN/m²（土被り 20m 相当）の土被り条件下で透水性が良いとされている透水係数 1.0×10^{-2} (cm/sec) を満たすことが分かった。

(5) スレーキング率試験

本試験は，製作した脱水固化砕石が降雨などによる乾湿繰り返しにより形態を変化させた場合に土砂化するか否かを確認するために実施した。表-9

表-7 セメント種類の適合性試験⁵⁾

セメントの種類	添加率 (%/ds)	σ_7 (MN/m ²)	σ_{28} (MN/m ²)
高有機質土用セメント系固化材	40	7.15	8.57
高炉B	40	1.55	1.51
普通ポルトランド	40	1.40	1.44

表-8 セメント系固化材の添加率と一軸圧縮強度⁵⁾

セメント系固化材 添加率 (% / ds)	一軸圧縮強度(MN/m ²)		
	σ_7	σ_{28}	σ_{91}
20	1.45	1.57	1.87
40	5.62	6.65	7.58
60	9.88	12.71	14.95

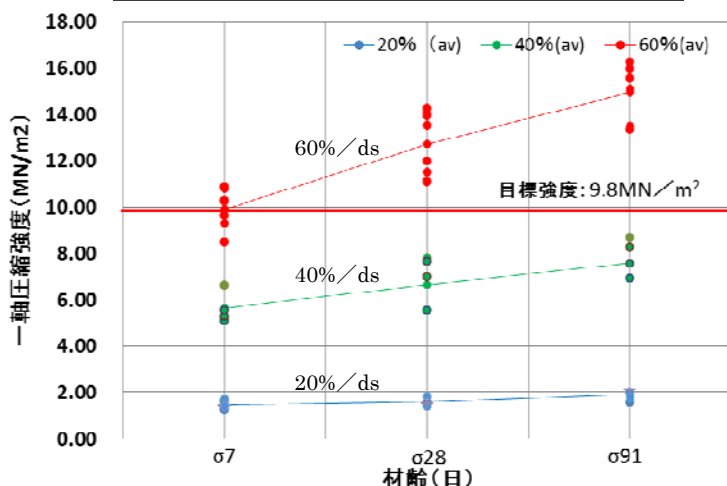


図-2 セメント系固化材の添加率と一軸圧縮強度⁵⁾

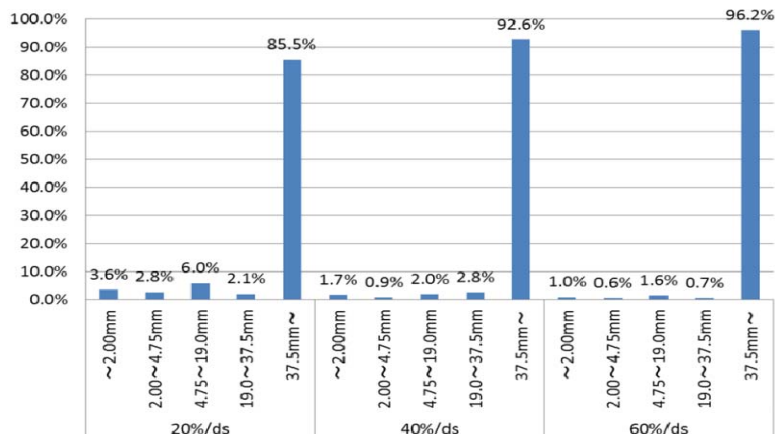


図-3 粒度調整後のふるい分け試験結果⁵⁾

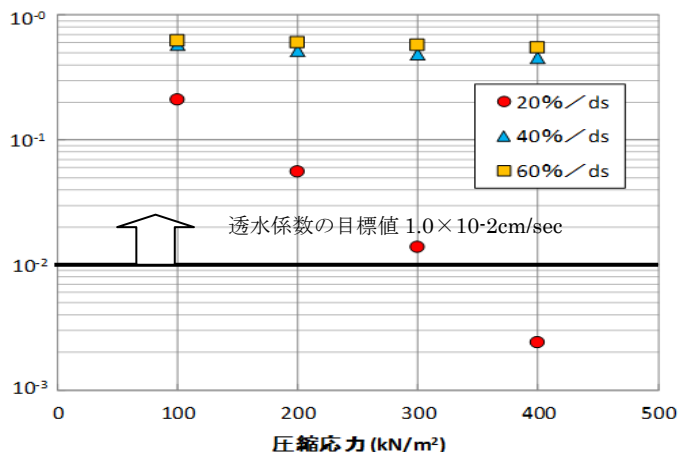


図-4 圧縮応力と透水係数の関係⁵⁾

にスレーキング率試験結果を示す。セメント添加率 40%以上であれば、スレーキング率の基準値である 1.0%以下を満たすことが分かった。

(6) 一面せん断試験

本試験は、製作した脱水固化碎石の集合体としての強度を確認するために実施した。

一面せん断試験の粒度分布は 3 章(3)節に示す粒度分布とした。表-10 に一面せん断試験結果を示す。脱水固化碎石は、すべてのセメント添加率において「建設汚泥リサイクル製品評価のための自主基準(社団法人 全国廃棄物連合会、平成 18 年 11 月)」のドレーン材の基準に示す 30°～35°以上のせん断抵抗角を満たすことが分かった。

表-9 スレーキング率試験結果⁵⁾

セメント添加率 (%/ds)	試験方法	試験結果 (%)	基準値
20	JHS 110	1.1	1.0%以下
40		0.2	
60		0.1	

表-10 一面せん断試験結果⁵⁾

セメント添加率 (%/ds)	試験方法	せん断抵抗角	基準値
20	JGS 0561 (φ 200の モールドで 実施)	32.11° (27.1kN/m ²)	30～35°以上
40		30.81° (51.5kN/m ²)	
60		38.91° (28.0kN/m ²)	

() 内は粘着力Cを示す

4. 環境影響評価に関する試験

(1) 放射性セシウム溶出量試験

本試験は、製作した脱水固化碎石からの放射性セシウム溶出の有無またはその溶出の程度から再生材としての有効利用の可能性を判断するためである。

まず、原土、供試泥、脱水固化碎石の放射性セシウム濃度の測定結果を表-11 に示す。また、放射性セシウム溶出量試験は、脱水固化碎石のセメント添加率と比表面積の変化により溶出量も変化することが考えられるため、セメント添加率ごとに、制作した脱水固化碎石の粒度を 2～10mm に調整したものに対して実施した。

表-11 放射性セシウム濃度測定結果⁵⁾

セメント 添加率	試料名	回	測定結果 (Bq/kg)				検出下限値 (Bq/kg)	
			Cs-134	Cs-137	Cs-合計	平均	Cs-134	Cs-137
	原土	—	300	1,700	2,000		9.0	8.1
20%	供試泥	①	167	1,026	1,193	1,250	10	10
		②	170	1,088	1,258		13	10
		③	179	1,119	1,298		14	11
	脱水固化碎石	①	357	2,236	2,593	2,620	26	26
		②	353	2,244	2,597		25	26
		③	380	2,290	2,670		30	24
40%	供試泥	①	184	1,009	1,193	1,190	12	10
		②	157	967	1,124		12	10
		③	173	1,080	1,253		11	10
	脱水固化碎石	①	307	2,122	2,429	2,308	33	28
		②	319	1,888	2,207		25	23
		③	355	1,934	2,289		34	27
60%	供試泥	①	166	1,028	1,194	1,244	13	12
		②	170	1,030	1,200		12	9
		③	188	1,150	1,338		15	11
	脱水固化碎石	①	309	1,830	2,139	2,174	27	29
		②	331	1,744	2,075		24	26
		③	314	1,993	2,307		31	26

さらに、脱水固化碎石が長期利用により、酸性雨などの低 pH 環境下に曝され、また、長期使用により劣化が促進され当初想定よりも粒度の細かいものになり、放射性セシウムが溶出しやすい条件となることを想定し、環境省告知 46 号で使用する検査液の pH を 4～12 に変化させ、2.0mm 未満の試料を使用し溶出試験を実施した。表-12～表-13 に放射性セシウム溶出量試験の結果を示す。脱水固化碎石に固定された放射性セシウムは 2,174～2,620Bq/kg の範囲であり、すべての条件においても、脱水固化碎石からの放射性セシウムの溶出は検出されなかった。

表-12 脱水固化碎石からの放射性セシウム溶出量⁵⁾

試料名	粒度 (mm)	測定結果 (Bq/L)			検出下限値 (Bq/L)	
		Cs-134	Cs-137	Cs-合計	Cs-134	Cs-137
脱水固化碎石 セメント添加率 20%/ds	2	ND	ND	—	0.78	0.85
	5	ND	ND	—	0.83	0.89
	10	ND	ND	—	0.89	0.95
脱水固化碎石 セメント添加率 40%/ds	2	ND	ND	—	0.79	0.85
	5	ND	ND	—	0.74	0.82
	10	ND	ND	—	0.65	0.70
脱水固化碎石 セメント添加率 60%/ds	2	ND	ND	—	0.69	0.77
	5	ND	ND	—	0.56	0.70
	10	ND	ND	—	0.73	0.66

(2) ろ水の放射性セシウム濃度

本試験は、高圧フィルタープレス機による脱水固化処理過程で発生するろ水に放射性セシウムが流出するかどうかを確認するために実施した。表-14 にろ水の放射性セシウム濃度の計測結果を示す。表-14 に示す③は、さらに検出限界値を下げたものであり、いずれの場合も1Bq/Lを下回っている。

(3) 土壌環境基準

本試験は、採取した土壌、製作した脱水固化砕石からの特定有害物質の溶出量を把握し、再生材としての有効利用の可能性を判断するために実施した。なお、脱水固化砕石は水中環境で使用する場合を想定し、原土が土壌環境基準の含有量基準を満たしていたため、重金属のみの溶出に関する試験をセメント添加率ごとに行った。なお、脱水固化砕石は、28日経過後のものをを用いて実施した。表-15 に土壌環境基準に関する試験結果を示す。土壌環境基準を超える物質の溶出は検出されなかった。

表-13 脱水固化砕石からの放射性セシウム溶出量 (pH 変化) ⁵⁾

試料名	pH	測定結果 (Bq/L)			検出下限値 (Bq/L)	
		Cs-134	Cs-137	Cs-合計	Cs-134	Cs-137
脱水固化砕石 セメント添加率 20%/ds	4	ND	ND	—	0.73	0.81
	6	ND	ND	—	0.84	0.68
	8	ND	ND	—	0.69	0.93
	10	ND	ND	—	0.65	0.61
	12	ND	ND	—	0.73	0.66
脱水固化砕石 セメント添加率 40%/ds	4	ND	ND	—	0.77	0.87
	6	ND	ND	—	0.74	0.54
	8	ND	ND	—	0.75	0.55
	10	ND	ND	—	0.79	0.57
	12	ND	ND	—	0.84	0.68
脱水固化砕石 セメント添加率 60%/ds	4	ND	ND	—	0.55	0.70
	6	ND	ND	—	0.70	0.90
	8	ND	ND	—	0.74	0.61
	10	ND	ND	—	0.85	0.80
	12	ND	ND	—	0.82	0.77

表-14 ろ水の放射性セシウム濃度の計測結果 ⁵⁾

セメント 添加率	試料名	回	測定結果 (Bq/L)				検出下限値 (Bq/L)	
			Cs-134	Cs-137	Cs-合計	平均	Cs-134	Cs-137
20%	ろ水 (脱水直後)	①	ND	ND	—	—	0.74	0.71
		②	ND	ND	—		0.60	0.71
		③	ND	ND	0.21		0.09	0.10
40%	ろ水 (脱水直後)	①	ND	ND	—	—	0.80	0.75
		②	ND	ND	—		0.95	0.87
		③	ND	ND	0.41		0.09	0.10
60%	ろ水 (脱水直後)	①	ND	ND	—	—	0.82	0.59
		②	ND	ND	—		0.84	0.86
		③	ND	ND	0.33		0.08	0.09

表-15 土壌環境基準に関する重金属溶出試験結果 ⁵⁾

計量項目	単位	添加率 20%/ds 測定結果	添加率 40%/ds 測定結果	添加率 60%/ds 測定結果	定量 下限値	基準値
カドミウム	mg/L	0.001	0.001未満	0.001未満	0.001	0.01
全シアン	mg/L	不検出	不検出	不検出	0.1	不検出
鉛	mg/L	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001	0.01
六価クロム	mg/L	0.035	0.034	0.039	0.005	0.05
砒素	mg/L	0.006	0.004	0.004	0.001	0.01
総水銀	mg/L	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.0005	0.0005
セレン	mg/L	0.001	0.001	0.001	0.001	0.01
ふっ素	mg/L	0.56	0.33	0.28	0.08	0.8
ほう素	mg/L	0.1未満	0.1未満	0.1未満	0.1	1

5. まとめ

・脱水固化砕石は、採取した土壌にセメント固化を妨げるアロフェンやフミン酸が多く含まれていることから、普通ポルトランドセメント等と比較して高有機湿度用セメント系固化材が強度発現に有効であった。

また、脱水助剤に高有機質土用セメント系固化材を用いることを条件として、以下の強度特性があることが分かった。

- ・セメント添加率を60%とすることにより準硬石相当 (9.8MN/m²以上) の一軸圧縮強度が得られる
 - ・セメント添加率を40%とすることにより、土被り20m相当の荷重条件で排水層として透水性1.0×10⁻²cm/secを確保でき、さらにスレーキング率の基準値1.0%以下を満たすことができる
 - ・すべてのセメント添加率において細粒分が5%以下の粒度分布を確保でき、さらに、一面せん断試験では、リサイクル基準である30～35°を満たすことができる
- さらに、放射性セシウム他に関しては、以下の溶出特性があることがわかった。

- ・今回実験で製作した脱水固化碎石からの放射性セシウム溶出量試験は、全て ND（検出下限値：Cs-134 0.56～0.89Bq/L 以下，Cs-137 0.66～0.95Bq/L 以下）であった。
- ・また、放射性セシウム溶出試験の溶液の pH を変化させたものに対する試験結果も全て ND（検出下限値：Cs-134 0.55～0.85Bq/L 以下，Cs-137 0.54～0.93Bq/L 以下）であった。
- ・さらに、脱水碎石製作直後の「ろ水」には放射性セシウムは含まれないことが確認できた。
- ・原土には土壤環境基準を超える物質はなかった。さらに、セメント添加した脱水固化碎石からも土壤環境基準に関する試験の内、重金属の溶出に関する試験で全て基準値未満であった。

脱水固化碎石は、上記の強度特性から、排水層のドレーン材、盛土材、裏込材などに利用できる可能性があることを確認した。放射性セシウムの溶出等については、今回の放射性セシウム濃度の範囲では、溶出等の問題は生じなかったが、濃い濃度の土壌を取り扱った場合、溶出等の評価がかわる可能性がある。併せて、長期劣化の評価など、利用にあたっては有識者の方々の意見や、評価の妥当性について考えていく必要があると思われる。

6. おわりに

以上、今回製作した脱水固化碎石の強度特性と放射性セシウムの溶出特性について述べた。脱水処理土に関しては建設発生土利用技術マニュアル⁷⁾などにより、建設発生土としての利用用途が明確化されている。しかしながら、脱水処理土と比較して準硬石相当の強度を持つ脱水固化碎石など、特に放射性セシウムを含むものについては、その利用用途が明確化されていない。このため、さらなる長期的な強度特性、長期劣化の状況などの実験を重ね、その利用用途のあり方などについて考えていきたい。

7. 謝辞

本稿の実験データや知見は、「中間貯蔵・環境安全事業株式会社（JESCO）から委託された平成 28 年度除染土壌等の減容等技術実証事業」の成果の一部である。本業務を遂行するにあたり、環境省 水・大気環境局、JESCO 中間貯蔵事業部技術課の皆様におかれましては、様々なご指導、助言を賜りました。関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中道，川原，片桐，長野：浚渫土を材料とする脱水固化処理土の製作実験とその特性，公益社団法人 土木学会 土木建設技術発表会，セッション 3，No.6，2015.
- 2) 國田，山口，久賀，山本，大丸，大石，片桐：セメントを添加した機械脱水処理土の SCP 材への適用性検討，第 60 回地盤工学シンポジウム平成 28 年度（2016 年度）論文集，pp229～304，2016.
- 3) 井出，三浦，神徳，高田：放射能汚染土壌の分級洗浄処理，大林組技術研究所報，No.76，pp1～6，2012.
- 4) 一般社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル（第 4 版），pp34～35，pp45～46，2012.
- 5) JESCO：平成 28 年度除染土壌等の減容等技術実証事業（その 7）「洗浄分級で発生する高含水比粘性土の減容化と脱水ケーキの人工碎石としての再利用」報告書，2017.
- 6) 一般社団法人セメント協会：セメント系固化材技術専門委員会，火山灰質粘性土のセメント改良体における強度発現に関する検討，セメント・コンクリート No.780，pp.3～8，Feb.2012.
- 7) 一般社団法人 土木研究所：建設発生土利用技術マニュアル（第 4 版），pp.202～204，2013.