

焼却残渣を埋立処分する廃棄物固化式処分システムの 実用化に向けた基礎的検討

青木貴均^{*1}・秋田宏行^{*2}・弘末文紀^{*3}・島岡隆行^{*4}・中山裕文^{*4}・小宮哲平^{*4}

近年、防災・減災の一環として国土強靱化の取組が進んでおり、特に廃棄物分野では巨大地震時に大量発生する災害廃棄物対策が求められている。そこで、焼却残渣にセメント等を添加して高周波振動を与えて固化する超流体工法を適用した新しい固化式処分システムを開発した。これにより耐震性の向上、埋立容量の縮減ならびに廃棄物への雨水浸透抑制により有害物質溶出濃度の低減に加え、災害時に埋立面をそのまま仮置き場等に利用できることになる。本研究では、こうした固化システムにおける廃棄物の基本的な性情を把握するために、焼却残渣セメント固化体（以下、固化体）の各種試験を行った。その結果、所定の配合により材齢 28 日時に圧縮強度 5N/mm² 以上を確保し、鉛など有害物質の溶出も抑制され、透水係数 1×10⁻⁷cm/s 以下の廃棄物の固化が可能であることが確認された。

キーワード： 廃棄物処分場、焼却残渣、セメント固化、振動締め、重金属不溶化

1. はじめに

我が国では、年間約 2 千万トンの廃棄物が最終処分場に搬入されており、最終処分場の確保が大きな問題となっている。また、管理型最終処分場は準好気式構造が採用されており、処分場が閉鎖された後も浸出水の水質が廃止基準に至るまで、長期間の処理を継続する必要があるのが実態である。一方、東日本大震災を契機と

して、巨大地震等の大規模災害時において大量に発生する災害廃棄物対策など、廃棄物処理においてもレジリエンスを有する社会インフラの整備が求められている。

そこで、焼却残渣にセメント等を添加して高周波振動を与えて固化する石炭灰固化技術（超流体工法）¹⁾ を利用して固化する新しい廃棄物固化処分システムの実現に向けた検討を行った。この方法により処分場の耐震性の向上、埋立容量の縮減ならびに廃棄物への雨水浸透抑制による有害物質の溶出濃度の低減が可能となる（図-1）。

さらに、本方式による埋立地は短期間に固化することから、災害時には埋立てた廃棄物の仮置き場や、仮設焼却施設の設置場所としても活用できる。こうしたシステム開発において本研究は、固化体の①配合設計、②材料特性、③長期耐久性に関する評価試験を行った。

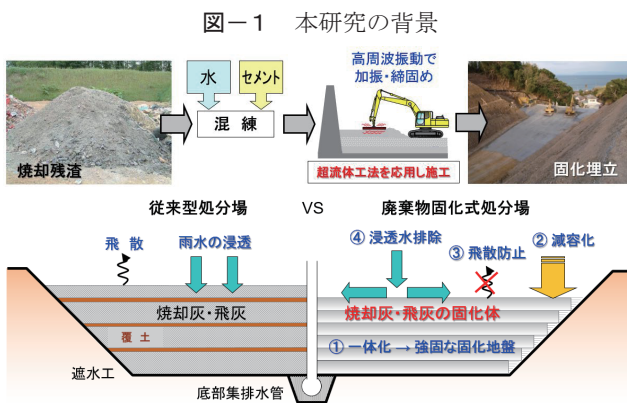
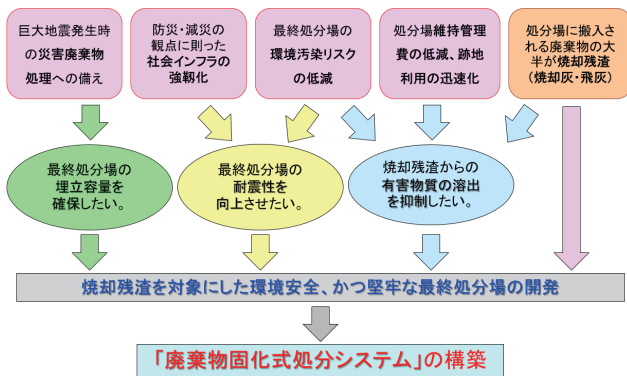
本技術は、廃棄物をブルドーザー等の転圧で処分場内にそのまま埋め立てる従来型の処分法と異なり、石炭灰廃棄物にセメント系固化材と必要最小限の水を添加し、高周波振動で流体化させながら締め固める新しい固化技術（超流体工法）を応用し、一般廃棄物焼却残渣の処理に用いるものである。

従来と本設計の埋立技術の比較を図-2 に示す。なお、超流体工法は石炭火力発電所から排出される石炭灰に対して適用されているリサイクル技術である。（図-1、図-2 参照）

2. 試験方法

2.1 配合条件

焼却灰・水・セメントの配合条件を表-1 に示す。また、各材料の配合割合の一例を図-3 に示す。セメント添加



*1 先端・環境研究部 *2 技術管理部 *3 技術研究所 *4 九州大学大学院

率は灰乾燥重量の外割として、水粉体比は灰乾燥重量とセメントを加えた重さの外割として計算している。

超流体工法における石炭灰固化では、テーブルフロー値により最適水粉体比を求める²⁾が、焼却残渣の場合テーブルフロー試験自体が適用困難であったため、添加水量を変化させて試験練りを行い、目視および固化体に触れた際の感触など経験則的に練上りを確認することで、水粉体比を設定した。

また、ケースA(A-4, A-5, A-6), ケースB(B-4, B-5, B-6), ケースC・D・Eでは焼却施設から排出される焼却灰と飛灰の割合を確認の上, その配合割合を3:1としている。

2.2 トルク電流値測定

超流体工法は、少量の水とセメントで練り混ぜた石炭灰等に高周波の外部振動を加えることによる締固めを行い、粉体からプリン状に変化させる（この混合物は、練り混ぜ直後は柔軟性のある固化体だが、一定期間養生後に硬固となる）。その結果、灰の密実化および容積の低減、余剰水の発生を抑制する等の利点を有することとなる。本研究ではこの技術を焼却残渣の埋立処分に適用し、新たな廃棄物処理システムとして確立することを目指しているが、現場適用の際は、練り混ぜ時の配合設計がワーカビリティ上の品質を確保しているかについて、事前に判定を行う必要がある。

ここで、骨材にセメントを添加したフレッシュコンクリートのワーカビリティ判定では、スランプ・フロー試験が用いられるが、焼却残渣にセメントを添加する場合、材料成分に微量の重金属や未燃分等が含まれるため、物理的・化学的性質がコンクリート材料と大きく異なり、流動性が低くても材料間の結合力が弱く、直ちに分離してしまうなどの現象が発生するため、この方法は適用が困難である。

そこで、灰混合物練り試験時のミキサーから得られる、羽根部分のトルク値を間接的に示す電流値（以下、

トルク電流値）を計測する方法により、ミキサー条件（サイズ、型式）および水粉体比の増減による変化の2点について比較を行った。混練条件の比較検討ケースを表-2に示す。

表-1 各試験の配合条件一覧

ケース	粉体割合(%)				水粉体比 (W/Pw)	
	飛灰	焼却灰	混和材 (FA)	セメント		
A	A-1	100	-	-	10	
	A-2				15	
	A-3				20	
	A-4	25	75	-	10	
	A-5				15	
	A-6				20	
	A-7				15	
B	B-1	100	-	-	10	
	B-2				15	
	B-3				20	
	B-4	25	75	-	10	
	B-5				15	
	B-6				20	
	B-7				15	
C	C-1	25	75	0	10	28.0
	C-2	25	75	0	15	27.0
	C-3	22.5	67.5	10	10	26.5
	C-4	22.5	67.5	10	15	26.5
	C-5	20	60	20	10	25.5
	C-6	20	60	20	15	26.0
D	D-1	25	75	0	10	25.0
	D-3	22.5	67.5	10	10	24.5
	D-5	20	60	20	10	27.0
E	E-1	25	75	0	0	30.0

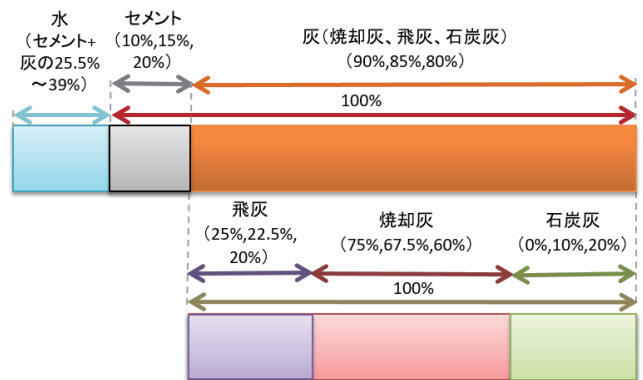


図-3 配合割合の一例

表-2 混練条件の比較検討ケース一覧（トルク電流値測定）

ケース	細分類	比較対象	水粉体比 (%)	ミキサー	バッチサイズ	材料投入量	攪拌翼形状	回転数 (空練り)	練り時間 (空練り)	回転数 (本練り)	練り時間 (本練り)	電流値測定
D	D-1	水粉体比	27	ホバート型	5L	8.6~9kg/1配合	アンカー翼	160rpm	30秒	330rpm	300~600秒	本練りの間
			28									
			29									
			30									
			31									
			32									
E	E-1	ミキサー型式	30	ホバート型	30L	52.8kg	アンカー翼	93rpm	120秒	330rpm	120秒	空練り↓ 本練りの間
				パン型	25L	44kg	プロペラ翼	46rpm				
		ミキサーサイズ		ホバート型	5L	8.8kg	アンカー翼	160rpm				
					30L	52.8kg		93rpm				

2.3 一軸圧縮強度

ケースA・BおよびケースC(C-1, C-3, C-5)について、JIS A 1108³⁾に準拠して一軸圧縮強度試験(φ5cm×10cm, N=3)を実施した。試験体は灰・セメントを添加後に空練り(160rpm)を30秒間行い、水を添加後に2分間の本練り(330rpm)を行うことで作成した。用いたミキサーはアンカー翼のホバート型(5Lサイズ, AM-20, ㈱愛好舎製作所)である。ケースA・Bの試験日は材齢28日のみ、ケースCは材齢7, 21, 28, 53日で試験を行うこととして、標準養生(20℃)で供試体を保管した。

2.4 重金属濃度(含有量・溶出濃度)

固化体に含まれる重金属の溶出特性および透水性を把握するため、ケースA・B・Cの含有量試験(平成15年環境省告示第19号⁴⁾)および溶出試験(JIS K 0058-1⁵⁾)を行った。供試体サイズはφ5cm×10cm, サンプル数はN=3とした。対象とする化学物質は、金属等を含む産業廃棄物の埋立処分に係る判定基準が設けられている重金属および石炭灰に含まれている有害物質である鉛, カドミウム, 水銀, ヒ素, セレン, 六価クロムの6項目とした。

2.5 透水系数

環境安全性評価の一環として、雨水の浸透抑制効果を把握するため、ケースA(A-2, A-5, A-7)およびケースC(C-1, C-3, C-5)について、JIS A 1218⁶⁾に準拠して、固化体(材齢28日)の透水試験(N=1)を行った。

2.6 固化体の耐久性試験

焼却残渣の固化体は、冬季における凍結, 降雨, 風や日照による乾燥など、様々な環境条件の変化が悪影響を及ぼし、ひび割れや強度低下などの原因になることが考えられる。そこで、下記の気象条件を想定し、固化体表面のポップアウトや内部に含まれる鉄分酸化による錆の発生など、性状変化の把握を目的とした以下のa), b)の影響を把握する耐久性試験を行った。

a) 冬季の凍結の影響

b) 降雨, 日射による湿潤・乾燥が繰返された場合の影響

加えて、比較的温暖な環境下を想定して、安藤ハザマ技術研究所(つくば市)において776日間(ケースA), 559日間(ケースC)の屋外曝露試験を行った。

なお、実際には固化式処分場の埋め立て完了後は、表層をアスファルトや土で覆うことにより、風雨など気象の影響を受けないものと想定しているが、この試験ではより厳しい気象環境条件下での固化体への影響を確認するものである。



図-4 凍結融解試験状況

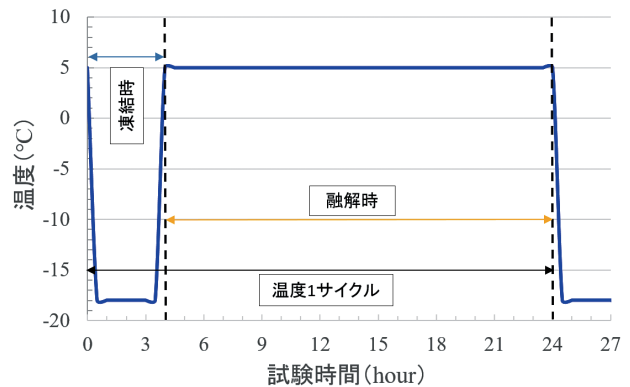


図-5 凍結融解試験の温度変化サイクル



図-6 屋外曝露試験状況

表-4 各配合ケース 試験実施項目

	1) 配合設計		2) 性状		3) 耐久性		
	トルク 電流値	一軸 圧縮強度	重金属 濃度	透水係数	屋外曝露	凍結融解	乾湿 繰返し
ケースA		○	○	○	○		
ケースB		○	○				
ケースC		○		○	○	○	○
ケースD	○						
ケースE	○						

(a) 凍結融解試験

処分場の埋め立て完了までには長期間を要し、その過程で何シーズンか冬季を経るため、寒冷地においては積雪や氷点下の温度変化により、固化体が凍結することが想定される。そこで、固化体の凍結融解の影響を把握することを目的に、JIS A 1148⁷⁾に準拠して凍結融解試験を実施した。

ケースC(C-1, C-3, C-5)について、試験体(角柱 10cm × 10cm × 40cm)を各々3本製作し、試験体の打設後14日以降に脱型を行った後に水中養生(2週間)し、試験を開始した。試験状況を図-4に示す。試験体の温度を5℃～-18℃の範囲で温度サイクルを繰り返した。

なお、設定温度は5 ± 2℃～-18 ± 2℃の範囲内となるように管理した。なお、JISに定められた方法では連続して温度サイクルを繰り返すが、本試験では重金属や未燃焼の不純物がセメントの水和反応を抑制したり、ポップアウトを誘発させるなどの影響が表れたりするおそれがあることから、固化体がコンクリートよりも劣化促進が速くなるものと想定して、1日1サイクルで実施した。温度変化サイクルを図-5に示す。

本試験では、試験開始前/開始後1サイクルごとにJIS A 1127⁸⁾による一次共鳴振動数および供試体質量を測定した。

また、凍結融解試験後の劣化度を確認するため、試験体の角柱の一部を切断し、透水試験および有害物質溶出試験を行った。試験結果は、気中養生の試験体の透水試験および溶出試験結果と比較し、凍結融解が透水性および重金属類の溶出に与える影響を確認した。

(b) 乾湿繰り返し試験

乾湿繰り返し試験は、試験体製作後に気中養生(20℃, 28日間)した供試体を用いて、ポーラスコンクリートの乾湿繰り返し試験方法(JCI規準集⁹⁾)を参考に行った。(a)と同様に、ケースC(C-1, C-3, C-5)の試験体(角柱 10cm × 10cm × 40cm)を各々3本製作し、試験サイクルは1週間で2日間降雨がある状況を想定して、乾燥期間3日→湿潤期間1日→乾燥期間2日→湿潤期間1日の合計7日間を1サイクルとした。

試験機は塩水浸漬乾燥試験機(品番: MIT-651-3-01, 株マルイ)を用いた。乾燥時は40℃で恒温乾燥, 湿潤時は20℃で水中養生を行った。本試験では2サイクル(2週間)ごとに、試験開始前後の超音波速度および質量を測定し、その変化を劣化度の指標とした。

また、乾湿繰り返し試験実施後の試験体角柱の一部を切断し、重金属溶出試験(サイズ: φ 5cm × h10cm)および透水試験(サイズ: φ 10cm × h10cm)を行い、気中養生後の結果と比較した。

屋外曝露試験では、ケースA(A-2, A-5, A-7)およびケースC(C-1, C-3, C-5)の配合条件で試験体(角柱 10cm × 10cm × 40cm)を各々3本製作し、室温20℃で28日間養生した後、安藤ハザマ技術研究所内の屋外に設置し、559日間の曝露試験を行った。

この間、定期的を目視観察および写真撮影を行った。曝露試験状況を図-6に示す。また、各配合ケースにおける試験実施項目のまとめを表-4に示す。

3. 結果および考察

3.1 トルク電流値測定

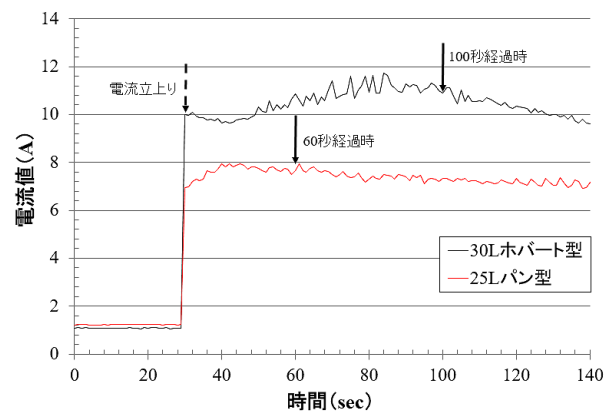
ミキサー条件を変えたケースE-1の焼却灰・飛灰練り試験時の挙動変化を確認するために、各練り試験時における電流値連続測定結果(サンプリング間隔:1秒)を図-8に示す。

30Lホバート型ミキサー(投入量52.8kg)および25Lパン型ミキサー(投入量44kg)の電流値傾向は、ホバート型が10～12(A)程度、パン型が7～8(A)程度となり、ホバート型が試験開始後100秒程度経過後、パン型は60秒程度経過後には電流値が低下し始める傾向が示された。

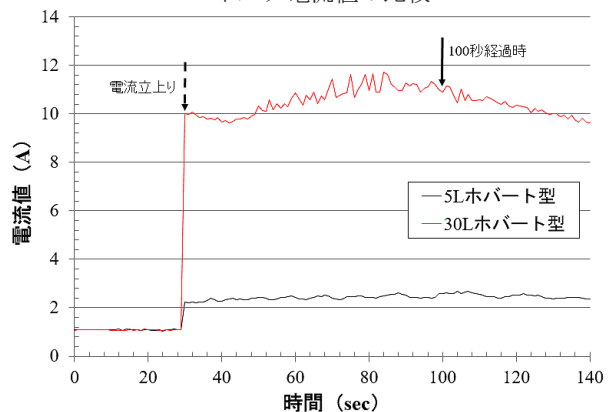
ホバートミキサーのサイズを変えた条件では、5Lサイズが2～3(A)程度となり、30Lサイズと比べて最大電流値に大きな差が見られた。また、測定中に電流値の大きな変化は見られなかった。

結果として、型式変更時およびサイズ変更時のいずれも、電流の立上り時点の変化に比べて、運転時の電流値の変動は小さかった。

ケースD-1において水粉体比を変えた条件で、小型ホバート型ミキサーのトルク電流値を計測した結果を図-7に示



a) ミキサー形式の違いによるトルク電流値の比較



b) ミキサーサイズの違いによるトルク電流値の比較

図-7 ミキサー条件の違いによる灰混合物混練時の電流値の比較

す。経験則的な目視および灰混合物の手触りの感触により判定した練り上り状況と電流値の変化を比較したところ、以下の知見が得られた。

水分不足 (28, 29%) : 約120秒経過後に電流値が2.5Aから4~4.5Aに急上昇し、その後も3~4A程度の高値を維持しながら値の変動が継続する。

水分適当 (30, 31%) : 90~180秒まで電流値が2.5Aから3.2~3.5Aに上昇したが、その後値の上昇や変動は見られず、240秒程度経過後

に値が下降し始め、約60秒経過後に2.5Aに低下する。

水分過多 (32%) : 95~180秒間の間に、3A程度に上昇する断続ピークが見られるが、その後は大きな変動は見られない。

以上の点から、セメントミキサーのトルク電流値の変動は、固化体の水粉体比により大きく影響することを確認した。

3.2 一軸圧縮強度

ケース A, B (表-1を参照) の28日強度を図-9に示す。セメント添加量の増加に伴い圧縮強度は線形的な増加を示した。また、焼却灰と飛灰の配合率を75:25にした固化体(ケースA(A-4, A-5, A-6), ケースB(B-4, B-5, B-6))の圧縮強度は5~15N/mm²程度(セメント添加率10~15%)となった。

ケースA-7・B-7において、混和材(石炭灰フライアッシュ)を20%加えたところ、セメント添加率15%の条件下では、最も圧縮強度が大きくなる結果が得られた。

これは固化体に粒状の細粒分が加わり密度が高くなった影響であると考えられる。実施工を考慮した場合、セメント添加率が小さいほど材料費が低減される。一方で、埋立材料としての利用時に求められる強度(5N/mm²以上)および重金属成分の封じ込め性能(埋立基準値以下)などの要求性能を満たすことが求められる。両者のバランスを検討した結果、焼却灰と飛灰を混合することで、いずれのケースも5N/mm²を上回っていることから、「セメント添加率10%」を配合設計の基準とした。

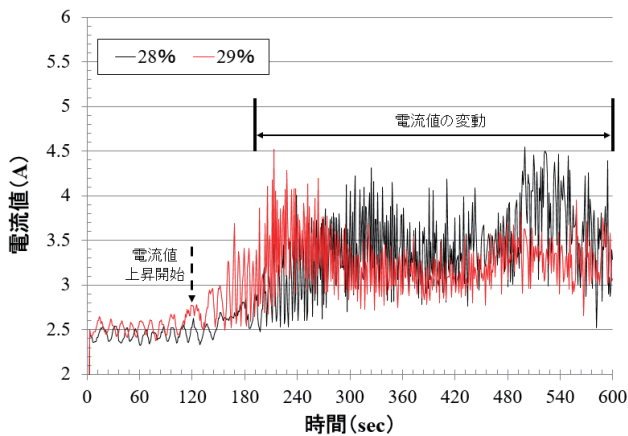
固化体の養生日数が圧縮強度に及ぼす影響について、ケースC(表-1を参照)により検討した結果を図-10に示す。

養生日数が長くなるとともに固化体の圧縮強度は増加した。特に材齢51日目における混和材0%, 10%, 20%の圧縮強度が10.6, 12.3, 15.0(N/mm²)となり、混和材(石炭灰フライアッシュ)の配合割合を高めることで、長期強度が1.4倍(配合割合0%→20%時)に上昇することが示された。この結果により、材齢28日以上での長期的な強度発現にも問題がないことが確認できた。

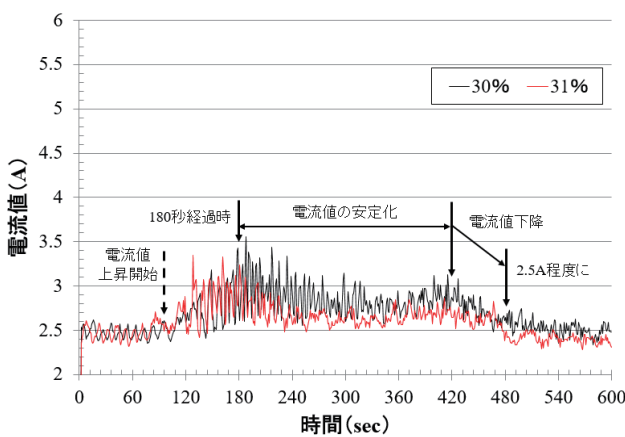
3.3 重金属濃度(含有量・溶出濃度)

焼却灰、飛灰および固化体の鉛、カドミウム、水銀、ヒ素、セレンの含有量を測定した結果、鉛以外は土壤汚染対策法の含有量基準を満たしたことから、ここでは鉛に注目することにした。ケースA(A-2, A-5, A-7), ケースB(B-2, B-5, B-7), ケースCの重金属(鉛、カドミウム、水銀、ヒ素、セレン)含有量の結果を表-5に示す。

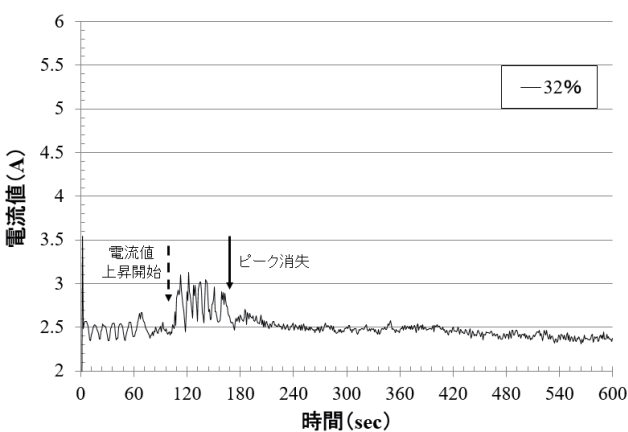
また、図-11に固化体の鉛の含有量、図-12に鉛



a) 水分不足と思われるケース

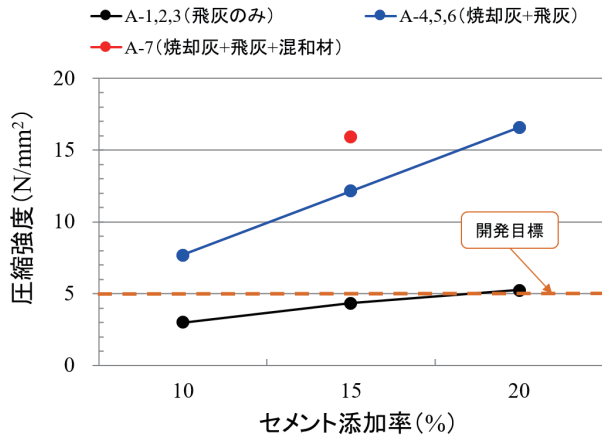


b) 水分適当と思われるケース

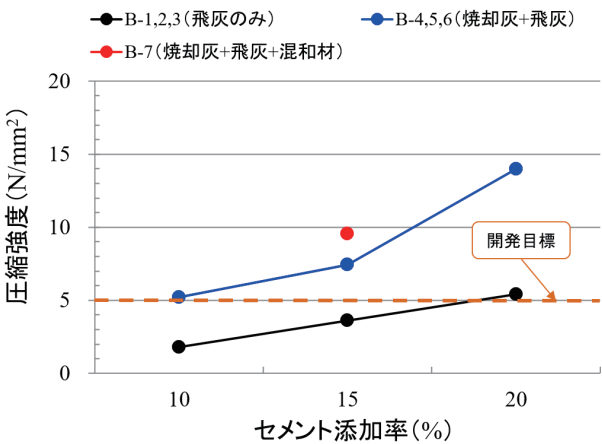


c) 水分過剰と思われるケース

図-8 灰混合物の水粉体比の違いによるホバート型ミキサー混練時の電流値の比較



a) ケース A



b) ケース B

図-9 圧縮強度試験 (養生 28 日) 【ケース A, ケース B】

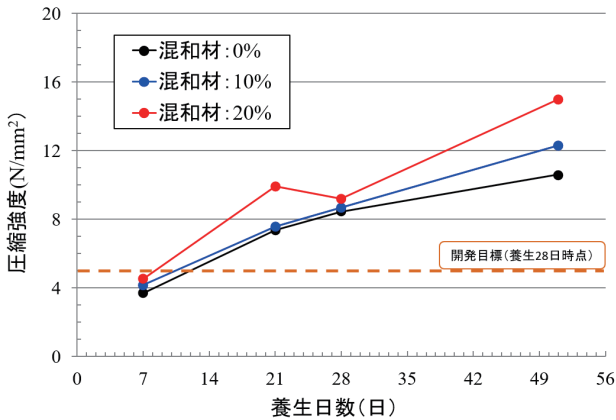


図-10 圧縮強度試験 【ケース C, 養生日数: 7 ~ 51 日】

の溶出濃度を示す。固化体からの鉛溶出濃度は 0.001 ~ 0.08mg/L (平均: 0.026mg/L) の値を示していることから、放流水質基準 (0.1mg/L) を満たした。

一方、焼却灰自体の鉛溶出濃度に対する固化体の鉛溶出濃度は、焼却灰の 0.31 ~ 0.71mg/L に対して 0 ~ 0.008mg/L であった。これは固化前における焼却灰の溶出濃度の 0 ~ 1.13% となり、セメント固化による鉛の溶出抑制効果が確認された。

表-5 固化体の重金属含有量測定結果

試料	鉛及びその化合物	カドミウム及びその化合物	水銀及びその化合物	砒素及びその化合物	セレン及びその化合物	
	Pb	Cd	Hg	As	Se	
焼却灰・飛灰固化体	A-2	340	28	N.D	10	N.D
	A-5	260	9	N.D	N.D	N.D
	A-7	190	7.6	N.D	N.D	N.D
	B-2	390	23	N.D	16	N.D
	B-5	300	14	N.D	N.D	N.D
	B-7	470	10	N.D	N.D	N.D
	C-1	330	13	N.D	N.D	N.D
	C-2	290	16	N.D	N.D	N.D
	C-3	310	12	N.D	N.D	N.D
	C-5	240	1	N.D	N.D	N.D
C-6	270	8.1	N.D	N.D	N.D	
土壌含有量基準 (mg/kg) (環告第19号)	150以下	150以下	15以下	150以下	150以下	
土壌汚染対策法						

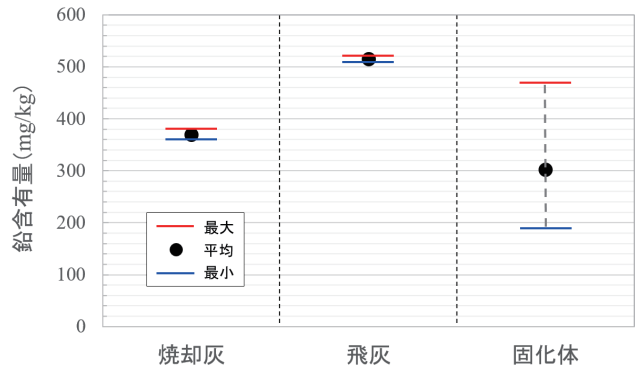


図-11 焼却灰・飛灰・固化体の鉛含有量

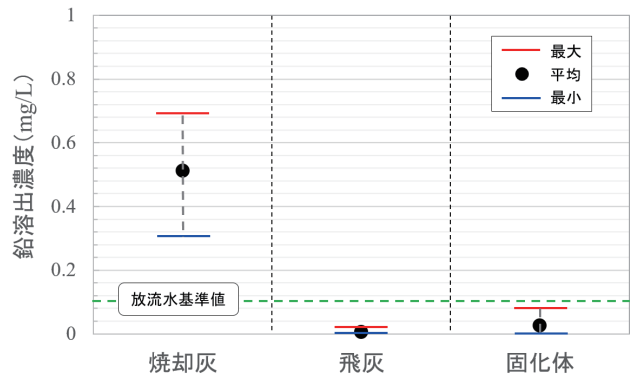


図-12 焼却灰・飛灰・固化体の鉛溶出濃度

3.4 透水係数

材齢 28 日時の固化体の透水係数 (図-13) および透水係数と圧縮強度 (図-14) を示す。全ての配合で透水係数は $1 \times 10^{-8} \sim 10^{-9} \text{cm/s}$ となった。この結果から、固化式処分場において浸出水は実質的に表流水のみとなり、雨水は焼却残渣の堆積層を通過せず、雨水への有害物質の溶出が抑制されることになる。これにより、浸出水の処理コストが大きく削減されるものと思われる。

一方、ケース A-2 において、透水係数はケース C (C-1, C-3, C-5) より小さくなるが、圧縮強度が小さくなる結果が得られた。この要因としては、セメントと飛灰

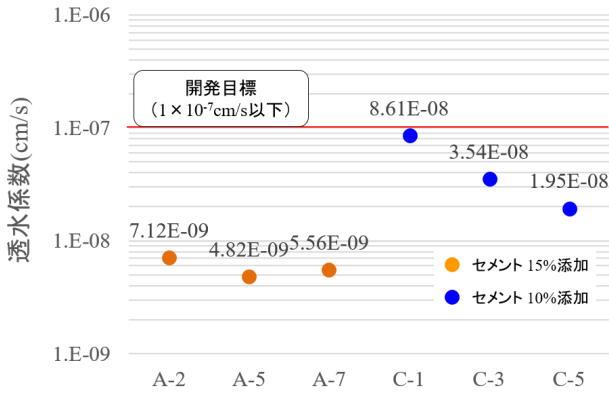


図-13 固化体の透水係数 (材齢 28 日)

のみの水和反応でも、水分を通さないフィルターに類似した膜構造が形成されるため、これが透水係数の低下に寄与した可能性が考えられる。

3.5 固化体の耐久性

ケースC(C-1, C-3, C-5)の凍結融解試験および乾湿繰り返し試験について、質量比および超音波伝播速度比の結果をそれぞれ図-15, 図-16に示す。凍結融解試験において、12サイクル目のC-1, C-3およびC-5の質量比はそれぞれ-24.1, -19.5および15.7%であったことから、混和材(石炭灰フライアッシュ)の添加率

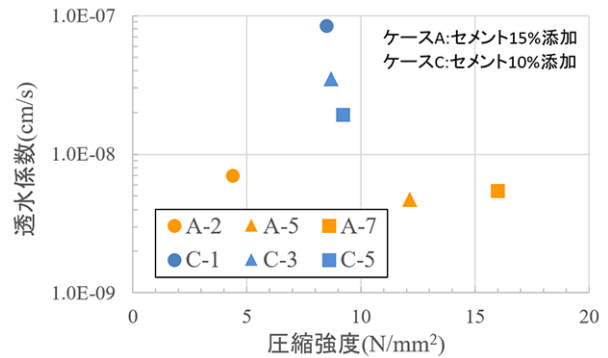


図-14 透水係数と圧縮強度 (材齢 28 日)

(C-1 : 0%, C-3 : 10%, C-5 : 20%)が高いほど、凍結融解による表面劣化が抑制されることが確認された。

超音波伝播速度は、12サイクル目のC-1, C-3およびC-5の質量変化率はそれぞれ-32.4, -25.4, -23.3%となり、こちらの結果でも混和材の混合割合が高い試験体ほど、値が低下していくことが確認された。

乾湿繰り返し試験では20サイクル目のC-1, C-3およびC-5の質量比がそれぞれ-2.4, -4.5, -2.6%, 超音波伝播速度はそれぞれ-5.5, -0.2, -1.4%となり、混和材の添加率と質量変化率の間に明確な相関が見られなかった。なお、6~8サイクル目にかけてC-1, C-3

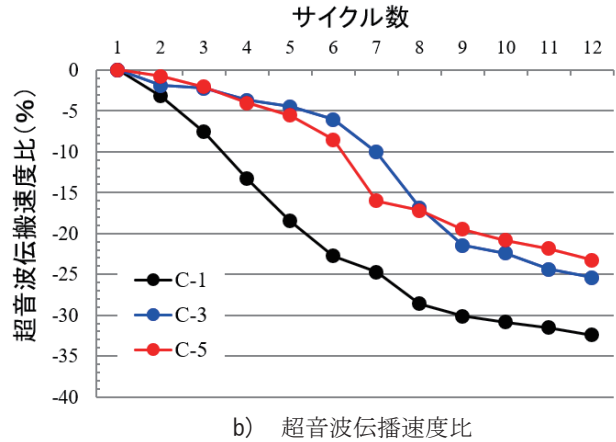
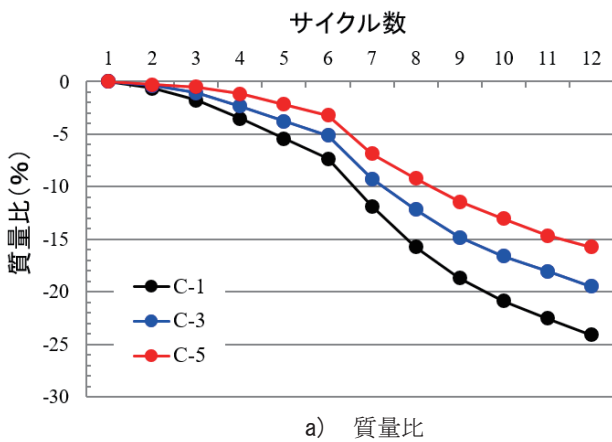


図-15 凍結融解試験結果 (ケースC)

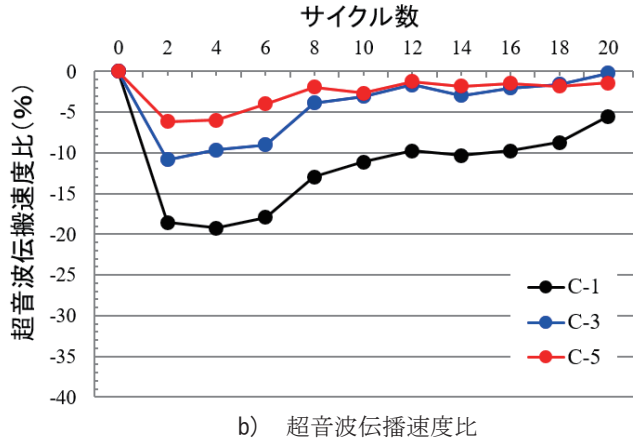
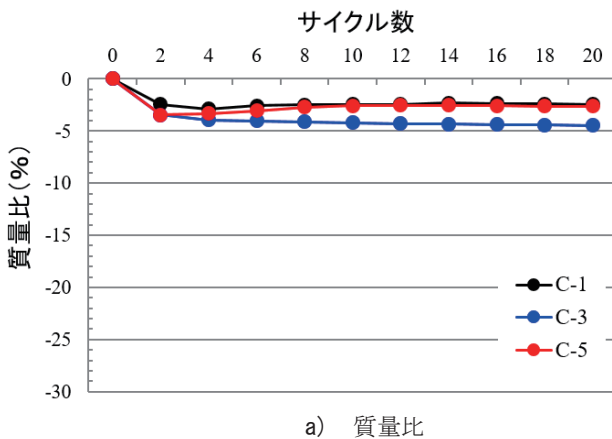


図-16 乾湿繰り返し試験結果 (ケースC)

およびC-5の超音波伝播速度がそれぞれ5.0, 5.1, 2.0%低下し、その後は試験前の状態まで値が回復する傾向が見られた。

この原因として、試験直後は高温乾燥の影響により固化体内部の水分の蒸発や水和結合の破壊により、微細な空隙が発生したことにより音波の伝達が阻害されたが、その後は高温乾燥の影響が低減し、かつ湿潤期間の水中養生により再度固化体中の水和結合が形成されたため、空隙が埋められることにより伝播速度が上昇した可能性が考えられる。

ケースC (C-1, C-3, C-5) における材齢28日目の標準養生(20℃)および凍結融解後、乾湿繰り返し試験後の供試体における、透水試験および有害物質溶出試験結果を図-17, 図-18にそれぞれ示す。なお、前述の様に鉛成分のみに着目することとした。

透水係数は、いずれのケースも 1×10^{-7} cm/s オーダー以下であり、封緘養生をした試験体と比較して、長期間風雨に曝されたり温度環境が変化したりしても、固化体の不透水性能に大きな影響が現れないことが確認され、同時に鉛溶出濃度も全てのケースで放流水基準を下回ったことから、施工後長期間経過した固化体においても重金属が溶出する可能性は低く、長期安全性が確保される可能性が高いことが示された。一方、ケースC-3のみ乾湿繰り返し試験時に、透水係数が標準養生時と比較して43.6倍ほど増加していることから、乾湿繰り返し試験を複数回繰り返すことで形成された水和結合は、2~4

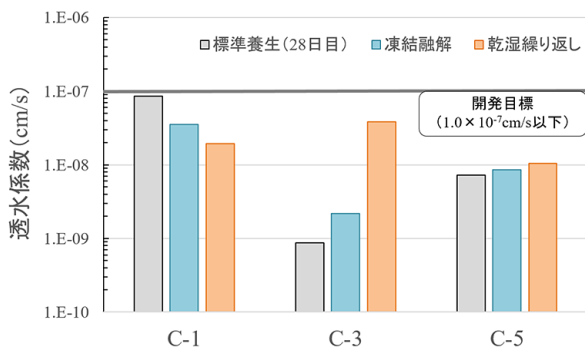


図-17 透水試験結果 (ケースC, 材齢28日)

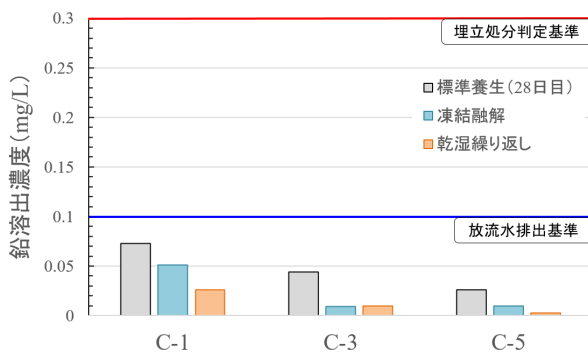
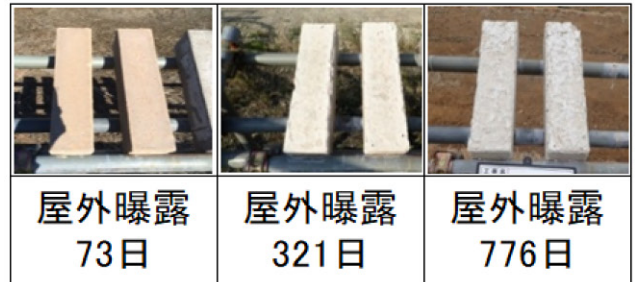


図-18 鉛溶出濃度結果 (ケースC, 材齢28日)

サイクル試験の破壊後に形成された弱い結合であることから、超音波伝播速度の回復には寄与するが、透水係数の低減には影響しない可能性が考えられる。

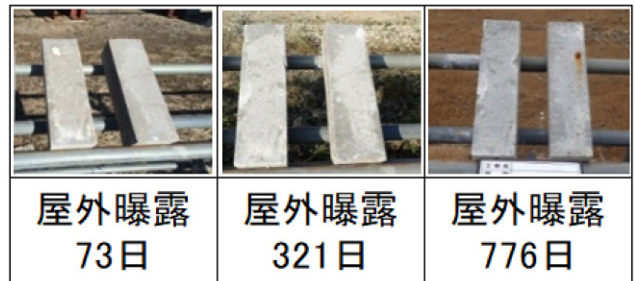
セメント添加率を15%としたケースA (A-2, A-5, A-7)の屋外曝露試験状況を図-19に示す。飛灰のみをセメント固化したA-2では、供試体表面全体に亀甲状のひび割れおよびはく離の進行が見られた。焼却灰および



a) ケースA-2 セメント添加量15% (外割)
焼却灰：飛灰：混和材 = 0：100：0



b) ケースA-5 セメント添加量15% (外割)
焼却灰：飛灰：混和材 = 25：75：0



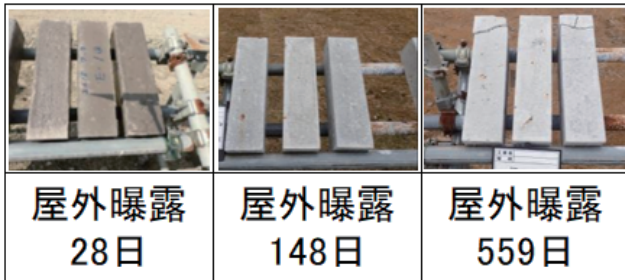
c) ケースA-7 セメント添加量15% (外割)
焼却灰：飛灰：混和材 = 25：75：0



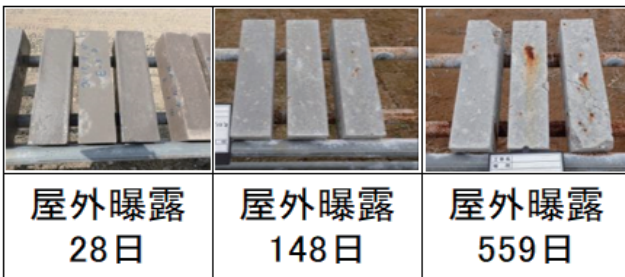
d) ケースA-2 拡大写真 (屋外曝露776日)

図-19 屋外曝露試験状況 (ケースA)
供試体作成：2014年12月2日

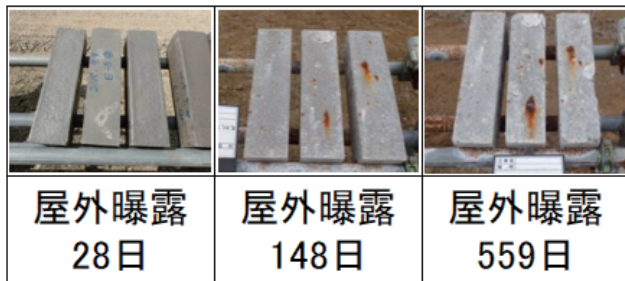
飛灰をセメント固化したA-5においては、ひび割れが進行して材料間の分離が進み、表層部材が剥離する浮き上がり現象が見られたが、表層部が円錐状に剥離する（ポップアウト）現象は認められなかった。一方、焼却灰、飛灰および混和材をセメント固化したA-7では長さ5cm程度のクラックが生じた。



a) ケースC-1 セメント添加量10%（外割）
焼却灰：飛灰：混和材 = 25：75：0



b) ケースC-3 セメント添加量10%（外割）
焼却灰：飛灰：混和材 = 22.5：67.5：10.0



c) ケースC-5 セメント添加量10%（外割）
焼却灰：飛灰：混和材 = 20：60：20



d) ケースC-5 拡大写真（屋外曝露559日）

図-20 屋外曝露試験状況（ケースC）
供試体作成：2015年7月7日

セメント添加率を10%としたケースC(C-1,C-3,C-5)の屋外曝露試験結果を図-20に示す。全てのケースにおいて、2、3箇所のクラックもしくはポップアウトが発生し、曝露日数が経過するにつれ試験体が大きく破損したのも確認された。ポップアウト箇所には結晶状の塊が観察され、X線回折（Miniflex II, Rigaku）による成分分析の結果、炭酸カルシウムの析出が確認された。本試験は、固化体の一部を切り出した（角柱10cm×10cm×40cm）ものであり、固化体の6面が曝露されるため、実際の最終処分場よりも劣化が促進する厳しい条件下にある。

なお、2017年8月より実証試験として、九州大学伊都キャンパスに埋立模型槽を設置し、固化体の表面劣化や表流水などの長期観測試験を実施しており、より実際の条件に近い環境での試験を継続している¹²⁾。

4. まとめ

焼却残渣（焼却灰・飛灰）にセメントを添加し、振動締固めを行い固化処分する「廃棄物固化式処分システム」の実現に向けて各種検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) 石炭灰固化技術（超流体工法）の応用により、一般廃棄物焼却残渣を適切に固化することが可能である。
- 2) 配合や曝露条件の異なる固化体の性状データ（強度、不透水性、有害物質溶出抑制等）に基づき、セメント10%添加時かつ材齢28日時に圧縮強度が5N/mm²以上となり、透水係数も1×10⁻⁷cm/s以下（実質不透水）を示したことから、処分場の早期跡地利用や浸出水の抑制効果など、固化式処分の有用性が示唆された。
- 3) 焼却灰および飛灰の新たな配合決定手法として、材料混練時のミキサーにかかる負荷（電流）の変化が、水粉体比の判定指標として利用できる可能性があることが示された。
- 4) 屋外曝露および促進試験の一環として凍結融解、乾湿繰り返し試験を行い、試験後の固化体の透水係数を測定した。その結果、標準養生時と同様に1×10⁻⁷cm/s以下となり、固化体が屋外環境における長期耐久性を有することが明らかとなった。

今後は本システムの社会実装および適用範囲拡大に向けて、現場内で埋立てる焼却灰・飛灰の配合決定方法と経済性および現場での施工性、埋立後の地盤特性や耐久性などの検討を進めていく予定である。

なお、本研究は環境省平成26～28年度環境研究総合推進費補助金「巨大地震に耐える環境安全で堅牢な最終処分場の新技術開発に関する研究」（3K143001, 研究代表者：島岡隆行）の助成を受けて実施されたものである。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 坂本守：アッシュクリート技術の開発と展開，安藤ハザマ研究年報，vol. 4，2016
- 2) 福留和人，他：最適含水比付近で練混ぜたフライアッシュ・セメント混合物の振動締固め特性，超固練りコンクリート技術に関するシンポジウム，1998. 6
- 3) 日本工業規格，JIS A 1108:2018，コンクリートの圧縮強度試験方法，2018
- 4) 環境省，土壌含有量調査に係る測定方法を定める件，告示19号，2003. 3
- 5) 日本工業規格，JIS K 0058-1，スラグ類の化学物質試験方法－第1部：溶出濃度試験方法，2005
- 6) 日本工業規格，JIS A 1218，土の透水試験方法，2009
- 7) 日本工業規格，JIS A 1148:2010，コンクリートの凍結融解試験方法，2010
- 8) 日本工業規格，JIS A 1127:2010，共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数，動せん断弾性係数および動ポアソン比試験方法，2010
- 9) 日本コンクリート工学協会，JCI規準集 1977-2002年度，2004. 4
- 10) 島岡隆行他：巨大地震に耐えうる環境安全で堅牢な最終処分場の新技術開発に関する研究，環境研究総合推進費補助金循環型社会形成推進研究事業総合研究報告書，3K143001，2017. 5
- 11) 島岡隆行他：巨大地震に耐えうる環境安全で堅牢な最終処分場の新技術開発に関する研究，廃棄物資源循環学会研究発表会，403-404，2015. 9
- 12) 三反畑勇他：焼却残渣固化式処分の遮水シートに及ぼす振動締固めの影響，土木学会大会第73回年次学術講演会，pp. 27-28，2018. 8

Fundamental Study for Practical Application of a Solid Waste Disposal System
for Landfill Disposal of Incineration Residue

Takahiro AOKI, Hiroyuki AKITA, Fuminori HIROSUE, Takayuki SHIMAOKA, Hirofumi NAKAYAMA and Teppei KOMIYA

A method to process disaster waste occurring at the time of a giant earthquake in large quantities easily and quickly is demanded in the field of waste. Therefore, we developed a new solidification expression disposal system that applied the super fluid method of construction to add cement in burned residue, and to provide high frequency vibration. In this way, we reduced the toxic substance elution density by earthquake-resistant improvement and increase the landfill capacity and rainwater penetration restraint for waste. We studied the basic properties of the materials of the solidification body to grasp the basic nature and impression of the waste.

As a result, the compressive strength became 5N/mm² with the prescribed composition, and the elution of harmful substances such as lead was suppressed, resulting in substantially impervious water.
