

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

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

(3K143001)

平成 26 年度～平成 28 年度

Development of New Technology for Environmentally Safe and Sturdy Final Disposal Site
to Withstand Great Earthquake

平成 29 年 5 月

九州大学 島岡 隆行

目 次

I. 成果の概要	.....	i
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発の方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた主な成果		
6. 研究成果の主な発表状況		
7. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
要旨	.....	1
1. はじめに	.....	1
2. 研究目的	.....	2
3. 研究方法	.....	3
3.1 焼却灰及び飛灰の性状	.....	3
(1) 物理化学的性状	.....	3
(2) 有害物質溶出特性	.....	3
3.2 配合設計の決定手法	.....	3
(1) 粉体配合、水粉体比	.....	3
(2) ワーカビリティ判定指標	.....	5
(3) 焼却灰、飛灰及びそれらの混合物の液性限界及び塑性限界	.....	7
3.3 焼却灰・飛灰固化体の性状	.....	7
(1) 強度特性	.....	7
(2) 減容効果	.....	7
(3) 有害物質溶出特性及び透水性	.....	8
(4) 吸湿・潮解による影響	.....	8
(5) 未燃焼分腐敗の影響	.....	14
3.4 焼却灰・飛灰固化体の耐久性	.....	16
(1) 日常的な風・日射・降雨などの影響（屋外曝露試験）	.....	16
(2) 冬季の氷点下の温度変化による凍結の影響（凍結融解試験）	.....	16
(3) 降雨、日射による湿潤・乾燥が繰返された場合の影響（乾湿繰返し試験）	.....	18

3.5 固化式処分場の施工性・耐久性評価	20
(1) 固化式処分場の施工方法	20
(2) 固化式処分場の地震時挙動	21
4. 結果及び考察	24
4.1 焼却灰及び飛灰の物理化学的性状	24
4.2 配合設計の決定手法	27
(1) 粉体配合、水粉体比	27
(2) ワーカビリティ判定指標	27
(3) 焼却灰、飛灰及びそれらの混合物の液性限界及び塑性限界	30
4.3 焼却灰・飛灰固化体の性状	31
(1) 強度特性	31
(2) 減容効果	32
(3) 有害物質の溶出特性及び透水性	34
(4) 吸湿、潮解性の影響	36
(5) 未燃焼分の腐敗及びガス発生が固化体に及ぼす影響	56
4.4 焼却灰・飛灰固化体の耐久性	57
(1) 日常的な風・日射・降雨などの影響（屋外曝露試験）	57
(2) 冬季の氷点下の温度変化による凍結の影響（凍結融解試験）	58
(3) 降雨、日射による湿潤・乾燥が繰返された場合の影響（乾湿繰返し試験）	59
(4) 凍結融解試験、乾湿繰返し試験後の試験体の劣化度確認	60
4.5 固化式処分場の施工性・耐久性評価	61
(1) 固化式処分場の施工方法	61
(2) 固化式処分場の地震時挙動	63
5. 本研究により得られた成果	66
5.1 科学的意義	66
5.2 環境政策への貢献	66
6. 国際共同研究等の状況	66
7. 研究成果の発表状況	66
8. 引用文献	68
研究概要図	69
英文概要	70

補助事業名 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（平成26年度～平成28年度）

所管 環境省

研究課題名 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

課題番号 3K143001

研究代表者 島岡 隆行（九州大学）

国庫補助金 76,071,000 円（うち平成28年度：26,497,000 円）

研究期間 平成26年5月30日～平成29年3月31日

本研究のキーワード 一般廃棄物焼却残渣、固化式処分、超流体力工法、示方配合、一軸圧縮強度、飽和透水係数、有害物質溶出抑制、減容効果、劣化促進試験、吸湿・潮解性、地震時挙動

研究分担者 中山 裕文（九州大学）
小宮 哲平（九州大学）
弘末 文紀（株式会社安藤・間）
笠 博義（株式会社安藤・間）
三反畑 勇（株式会社安藤・間）
秋田 宏行（株式会社安藤・間）

研究概要

1. はじめに

我が国では、巨大地震への備えとして社会インフラの強靱化や最終処分場の埋立容量の確保が求められている。また、管理型処分場に関しては、環境汚染リスクの低減、維持管理費用の低減、跡地利用の迅速化が求められている。近年、管理型処分場に処分される廃棄物の大半は焼却残渣となっており、管理型処分場は「灰捨て場」の様相を呈している。本研究は、焼却残渣を特殊工法でセメント固化しながら処分する「廃棄物固化式処分システム」の構築を目指し、固化体の(1)配合、(2)性状、(3)耐久性、(4)施工性、及び固化地盤の(5)耐震性を明らかにするものである。当処分システムは、埋立容量の確保、処分場の耐震性向上、有害物質の溶出抑制、非常時の土地利用、跡地の早期利用や高度利用を図るものであり、廃棄物行政への大きな貢献が期待される。

2. 研究目的

本研究は、焼却残渣（焼却灰及び飛灰）を特殊工法でセメント固化しながら埋立処分する新しい処分システムの構築を目的とした。具体的には、焼却残渣にセメント等を添加して高周波振動を用いる石炭灰固化技術（超流体力工法）で固化盤を形成していくことにより、①埋立地盤の耐震性を向上させ、②埋立容量の消費を抑制し、③雨水浸透を排除し、④有害物質の溶出量を低減させ、その結果として⑤供用中の埋立地の延命化、または新設埋立地の規模縮小化を図るとともに、⑥閉鎖から廃止までの期間の短縮により、維持管理費用を低減させ、⑦跡地を早期にかつ高度に利用でき、かつ⑧災害時の土地利用もできる、新しい処分システム「廃棄物固化式処分システム」を構築するために、固化体の(1)材料配合、(2)性状、(3)耐久性、(4)施工性、及び固化地盤の(5)耐震性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究方法

3.1 配合設計の決定手法

(1) 粉体配合、水粉体比

石炭灰の固化技術として開発された超流体工法（非常に少ない水量で練り混ぜたセメント混合粉体を外部振動によって締固めて硬化させる工法）を焼却灰及び飛灰の固化に応用するために、粉体配合、水粉体比などの配合条件を設定して試験練りを行った。また、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が、焼却灰及び飛灰の固化にはテーブルフロー試験自体が適用困難なため、焼却灰及び飛灰への添加水量を変化させて試験練りを行い、目視、触感により練上がりを確認することで最適水粉体比を設定して、配合設計を行った。

(2) ワーカビリティ判定指標

焼却灰及び飛灰は、焼却対象となる廃棄物の種類及びキレート剤の影響により、内部に含まれる物理的・化学的成分の性質が大きく異なり、コンクリート材料の性能判定に用いられるワーカビリティの指標であるスランプフロー値などの適用が難しい。そこで、灰混合物練り試験時のミキサーから得られる、羽根部分のトルク抵抗値を間接的に示す電流値を計測することで、灰混合物施工時のワーカビリティ状況を判定する手法を検討した。

3.2 焼却灰・飛灰固化体の性状

(1) 強度特性、減容効果、有害物質溶出特性及び透水性

固化体の強度特性として、一軸圧縮強度及び細孔分布を測定した。また、固化による埋立廃棄物層の減容効果を明らかにすることを目的に、現行の処分方法で埋立処分された焼却残渣層の乾燥単位体積質量を求めた。さらに、固化体に含まれる重金属の溶出特性及び透水性を把握するため、含有量試験（平成 15 年環境省告示第 19 号）及び溶出試験（JIS K 0058-1（利用有姿及び粗砕試料））を行った。透水係数は JIS A 1218 に準拠し測定した。

(2) 吸湿・潮解による影響

焼却残渣固化体中の焼却灰及び飛灰中には潮解性を有する NaCl や KCl 等の潮解性を有する塩類が多量に含まれるため、固化体の吸湿・潮解に伴い、固化体中の可溶成分が流出することが予想される。これにより、固化体中の孔隙が増加し、固化体の透水性及び強度に悪影響を及ぼすことが懸念される。また、潮解水の発生に伴い、浸出水の水質に悪影響を及ぼすことが懸念される。潮解性物質を含んだ水溶液の蒸発を考えると、溶解した物質は水溶液とともに固化体の表面近傍、または表面まで移動し、析出すると考えられ、固化体の表層は緻密な構造へと変化することが考えられる。そこで、焼却残渣固化体を高湿度環境下に曝露し、固化体の吸湿・潮解を促進させる吸湿・潮解促進試験を行い、固化体の吸湿・潮解に伴う物質移動、潮解水の環境安全性、吸湿・潮解促進させた固化体の強度特性、固化体の孔隙構造の変化を X 線 CT 法により把握した。試験は 2 回行い、1 回目では長期間（90 日間）に亘り封緘養生した供試体を用いて 293 日間、2 回目では短期間（7 日間）封緘養生した供試体を用いて 53 日間試験を行った。

(3) 未燃焼分腐敗の影響

廃棄物固化式処分システムの構築を目指す上で、システム層内において嫌氣的雰囲気形成された場合、固化体中に存在する有機成分が腐敗することにより、メタン等の腐敗性ガスが発生することが考えられる。層内は密閉状態にあり、微生物反応により発生したガスが外気中に拡散し難いため、ガスの生成により固化体中の内部圧力が上昇する。それに伴い体積膨張によるひび割れや空隙の拡大が発生する可能性があり、固化体強度の減少や透水性の増加による雨水浸透が起こることも考えられる。そこで、温度をメタン菌の至適温度である 35°C に制御した密閉容器内に固化体（粉碎、2mm 以下）と純水を液固比 5 で混合したものを入れ、腐敗をさせた。容器内のガス及び溶存ガスを窒素で置換した上で、メタン菌の植種を目的に微量の下水処理場の消化汚泥を添加し、攪拌し、溶液の水質（pH、TOC、D0、有機酸（酢酸、プロピオン酸及び酪酸））、発生ガス量及び発生ガス組成の変化を把握した。

3.3 焼却灰・飛灰固化体の耐久性

固化式処分場の施工中は、降雨による湿潤、風や日照による乾燥、冬季の凍結など様々な気象条件が、焼却灰・飛灰固化体に影響を与えることが想定される。そこで、下記の3つの気象条件を想定し、固化体の性状変化を把握することを目的とした耐久性試験を行った。

(1) 日常的な風・日射・降雨などの影響（屋外曝露試験）

所定の配合で製作した試験体を28日間養生した後、屋外環境に曝露し、固化体の経時変化を目視し、剥離やクラックが生じた場合には発生要因を確認することとした。

(2) 冬季の氷点下の温度変化による凍結の影響（凍結融解試験）

処分場の埋立完了までには長期間を要し、その過程で何シーズンも冬季を経るため、積雪や氷点下の温度変化により、焼却灰・飛灰固化体が凍結することが想定される。そこで、焼却灰・飛灰固化体の凍結及び融解の影響を把握することを目的に凍結融解試験を実施した。凍結融解試験は試験体の温度を $5^{\circ}\text{C}\sim-18^{\circ}\text{C}$ の範囲で温度サイクルを繰り返す。設定温度の最低及び最高温度は $5\pm 2^{\circ}\text{C}\sim-18\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内となるように管理した。さらに、凍結融解試験実施後の劣化度の確認を目的に、試験体の角柱の一部を切断し、透水試験及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結果及び溶出試験結果と比較し、凍結融解が透水性及び重金属類の溶出に与える影響を確認した。

(3) 降雨、日射による湿潤・乾燥が繰返された場合の影響（乾湿繰返し試験）

乾湿繰返し試験は、試験体製作後に気中養生を28日間実施した試験体を用いて、ポーラスコンクリートの乾湿繰返し試験方法(案)(JCI規準集)を参考に行った。試験サイクルは、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2サイクルとした。このサイクルは7日間で2日間降雨がある状況を模擬した条件となる。乾湿繰返し試験後の劣化度の確認を目的に、試験体の角柱の一部を切断し、透水試験及び溶出試験を行った。気中養生している28日試験体の透水試験結果、溶出試験結果と比較し、透水性の変化及び重金属類の溶出状況を確認した。

3.4 固化式処分場の施工性・耐久性評価

(1) 固化式処分場の施工方法

従来型処分場（準好気性方式）と比較し、固化式処分場においては、様々な付帯施設の必要性が異なる。ここでは、従来型処分場と固化式処分場の違いを整理するとともに、固化式処分場における施工段階の留意点について机上の検討を行った。

(2) 固化式処分場の地震時挙動

固化式処分場の地震時挙動を明らかにするために、従来型処分場（準好気性方式）及び固化式処分場の部分模型の小型振動台実験を行い、両者の実験結果を比較して、固化に伴う耐震性の向上及び地震時に遮水シート及びガス抜き管に生じるひずみや応力等について考察した。なお、実験模型の仕様は、実大処分場モデルを対象とした動的FEM解析を事前に実施し、地震動による応力集中や比較的大きな変形の発生が想定される箇所に着目して設定した。小型振動台に搭載したせん断土層（長さ4.6m、幅0.4m、高さ1.5m）の中に処分場の部分模型（従来型処分場または固化式処分場）を設置し、100、300、500及び800galの正弦波（4Hz、20秒程度）を作用させた。実験ケースは、ケース1（従来型（焼却灰）、材齢21日）、ケース2（固化式、材齢28日）、ケース3（従来型（焼却灰）、材齢1日）の3ケースとした。

4. 結果及び考察

4.1 配合設計の決定手法

(1) 粉体配合、水粉体比

焼却灰・飛灰混合物の水粉体比による練り上り状況を、練り試験時における経験則に基づいて、目視及び灰混合物の触感で確認したところ、水粉体比27%の条件で最も灰混合物の仕上がりが良くなった。この結果から、最適水粉体比の判定が配合決定手法における検討要素の1つである事が示唆された。

(2) ワークビリティ判定指標

目視、触感とは異なる配合決定手法の検討のため、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。その結果、水粉体比が 32～33%では水分過多であり、練り上げ時間とともに電流値が微減傾向を示し、水粉体比が 27～28%では水分不足であり、約 350 秒経過後に電流値が急上昇する傾向を示し、水粉体比が 29～31%では水分適当であり、約 350 秒まで電流値が微上昇したが、その後急上昇はなかった。以上の結果から、セメントミキサーのトルク電流値を配合決定時の指標に用いることで、目視／触感など経験則的な知見に基づく配合決定手法ではなく、自動判定／標準化などより汎用的な形で、灰固化物の配合設計手法が確立できる可能性が見出された。また、サイズが異なる同型及び別型のミキサーを使用した場合においても、最適水粉体比 (30%) 条件にて、練り試験終了前の時点では、値のバラツキの低下及び電流値の下降傾向が見られ、灰混合時の練り上り指標としてミキサー利用時の電流値による評価法の適用可能性が示された。

4.2 焼却灰・飛灰固化体の性状

(1) 強度特性

圧縮強度はセメント添加率に応じて線形的な増加を示し、飛灰のみでなく、焼却灰及び混和材も配合した固化体のほうが圧縮強度は高く、その値は 3～17N/mm²を示した。また、固化体の圧縮強度は養生日数に応じて高くなり、混和材である石炭灰フライアッシュを配合するほど圧縮強度は増加し、長期強度の大幅な増加が確認された。固化体の細孔分布を測定した結果、総細孔容積は 0.14～0.22 cm³/g 程度の値を示した。総細孔容積と配合の間に関係性を見出すことはできなかった。一方、細孔直径別の細孔容積分布を見ると、細孔容積のピークを示す最頻細孔直径が、混和材の割合が大きくなるにつれて小さくなる傾向が見られた。最頻細孔直径は固化体内の孔隙の大きさを示す代表値であると考えられ、混和材の配合により固化体が密実になることが示唆された。

(2) 減容効果

固化体の見かけ密度を測定するとともに、本研究で用いた焼却残渣と同じ清掃工場から排出された焼却残渣の最終処分場にて現行の処分方法で埋立てられた焼却残渣層の見かけ密度を水置換法 (JGS 1612) により実測し、従来式処分場の見かけ密度、固化体の見かけ密度及び示方配合により算出した固化体中の焼却残渣質量割合から、従来式処分における焼却残渣単位質量あたりの埋立容量消費量、及び固化式処分の焼却残渣単位質量あたりの埋立容量消費量を算出した。なお、従来式の処分場では埋立容量の 20%が覆土で消費されることも考慮した。その結果、固化体の単位体積質量は 1.71～1.94g/cm³の値を示し、固化式処分における焼却残渣単位質量あたりの埋立容量消費量は 0.74～1.10m³/t と算出された。固化式処分は従来式処分と比べて最大約 24%の減容効果を有し、約 1.3 倍の供用期間の延命化が可能であることが示唆された。

(3) 有害物質溶出特性及び透水性

焼却灰、飛灰及び固化体の Pb、Cd、Hg、As、Se 及び Cr⁶⁺の含有量を測定した結果、Pb 以外については土壤汚染対策法の含有量基準を満たしたことから、Pb に注目することにした。固化体の Pb 溶出濃度は 0.001～0.4mg/L の値を示し、その平均値 0.04mg/L は下水排水基準 (0.1mg/L) を満たした。固化体の Pb の含有量に対する溶出量の割合は、焼却灰では 1000～1900ppm であるのに対し、5～150ppm であり、固化による Pb の溶出抑制効果が確認された。

固化体の透水係数は $1 \times 10^{-8} \sim 10^{-9}$ cm/s のオーダーであり、固化地盤は実質不透水であることから、雨水が固化地盤内に浸透することは考えにくく、固化式処分場において浸出水は表流水のみとなるため、有害物質の溶出はほぼ起こらないと考えられた。

(4) 吸湿・潮解による影響

潮解水は試験開始直後から激しく発生し、その後緩やかな増加を示した。試験終了までに発生した潮解水量は固化体の初期乾燥質量の 20～33%に達した。潮解水量は潮解性塩類を多量に含む焼却残渣の配合割合に依存する傾向が見られた。潮解水の主成分は Cl、Na、K 及び Ca であり、有害重金属元素の中で最も濃度が高かったのは Pb であった。これらの濃度は全元素とも試験開始直後に最大値を示し、その後減少傾向を示した。養生 7 日

間の固化体の潮解水の Pb 濃度は、養生 90 日間の固化体に比べて高い値を示した。これは、養生日数が少ないために固化による溶出抑制効果が十分に得られていないためと考えられた。

潮解水とともに固化体から流出した Cl、Na、K 及び Ca の質量の固化体の初期質量に対する割合は、それぞれ 2.4~4.3、0.8~1.4、0.3~1.2、0.2~0.3% であり、潮解水とともに固化体の初期質量の約 4~7% に相当する質量の潮解性成分 (Cl、Na、K 及び Ca) が固化体から溶出した。一方、吸湿・潮解に伴う固化体の質量減少率は 0.3~1.7% であった。潮解性成分の溶出量と固化体の質量減少量の差は、吸湿により固化体中に取り込まれた水分が水和反応により固化体に固定されたものと考えられた。

吸湿・潮解促進試験後の固化体の一軸圧縮強度は 3~23N/mm² であった。圧縮強度のばらつきは混和材の添加率によるものであり、混和材の添加率が高いほど一軸圧縮強度は高かった。養生 90 日間の固化体の一軸圧縮強度は、吸湿・潮解に伴う強度低下を示さなかった。養生 7 日間の固化体の圧縮強度は、吸湿・潮解に伴い強度の大幅な増加を示した。これは、焼却残渣固化体の一軸圧縮強度は養生 0~90 日までは増加し、それ以降は安定するという性質によるものと考えられた。吸湿・潮解に伴う固化体の強度低下は認められなかった。

固化体のマクロ孔隙 (孔隙径 53 μ m 以上) 構造を解析した結果、マクロ孔隙率は 4.2% であった。マクロ孔隙率は高さ方向で 2~8% とばらつきを示し、マクロ孔隙は不均質に分布していた。孔隙径 0.2~0.3 mm 及び 1.0~2.0mm の孔隙が多く見られ、孔隙径 0.2~0.3mm の孔隙が最も多く存在していた。吸湿・潮解促進試験に伴い、試験 0 から 52 日目にかけて 0.2~0.3mm 以下の孔隙数の減少、0.4~0.5mm 以上の孔隙数の増加が見られた。孔隙の減少は水和反応によるもの、増加は可溶成分の流出によるものと考えられた。0 から 52 日目にかけて、累積マクロ孔隙容積は約 0.05cm³ 増加し、マクロ孔隙率は約 0.06% 増加した。試験 52 から 220 日目にかけては、全孔隙径において孔隙数の減少が見られ、累積孔隙容積は約 1.0cm³ 減少し、マクロ孔隙率は約 1.3% 減少した。吸湿・潮解に伴う強度低下や透水性の上昇をもたらすと考えられるマクロ孔隙の発達及び連結による水みちの発生は、認められなかった。

(5) 未燃焼分腐敗の影響

固化体を試料としたケースの pH は 11.7 前後、焼却灰を試料としたケースの pH は 12.0 前後であり、固化体の方が pH は低かった。D0 は両ケースとも試験開始から 50 日目までに 4.0~5.0 mg/L の値を示し、嫌気的条件下に至らなかった。TOC 濃度は両ケースで増加傾向を示し、TOC 濃度は試験開始から 50 日目までに固化体で 60 から 90 mg/L、焼却灰で 90 から 110 mg/L に増加した。有機酸濃度は試験開始から 50 日目までに定量下限値以下を示し続けた。ガスの発生は見られなかった。メタン菌の至適 pH は 6.8~7.2 であることから、メタン菌の活性が低いものと考えられた。メタン菌は嫌気性菌であることから、D0 が当実験よりも低い条件での実験による再検討が必要である。

4.3 焼却灰・飛灰固化体の耐久性

(1) 日常的な風・日射・降雨などの影響 (屋外曝露試験)

屋外曝露試験の結果、飛灰のみをセメント固化したケースでは供試体表面全体に亀甲状のひび割れ及びはく離の進行が見られた。焼却灰及び飛灰をセメント固化したケースでは、表層の浮き上がりが見られたが、ポップアウトするほどの劣化の進行は認められなかった。一方、焼却灰、飛灰及び混和材をセメント固化したケースでは、長さ 5cm 程度のクラックが生じた。また、前記とは異なる焼却灰及び飛灰を用いて固化したケースでは、混和材の配合の有無に依らず、2~3 箇所のクラックもしくはポップアウトが発生した。ポップアウト箇所には炭酸カルシウムの結晶状の塊が観察された。実際の固化式処分場では本試験の供試体 (角柱型: 10cm \times 10cm \times 40cm) のように 6 面が曝露されることはなく、本試験は実際の最終処分場よりも相当に厳しい条件下で実施された試験である。今後は、実規模の固化体で屋外曝露試験を行い、同様の現象が発生するか検証が必要となる。

(2) 冬季の氷点下の温度変化による凍結の影響 (凍結融解試験)

凍結融解の繰返しに伴い、スケーリング (コンクリートの表面がフレーク状に剥がれる凍害劣化) による試験体サイズの縮小が見られた。飛灰のみを固化したケースでは試験開始直後から劣化が進行したのに対し、焼却灰及び飛灰を固化したケース及び焼却灰及び飛灰に混和材を配合したケースでは 5~8 サイクル目から動弾性係数が急激に低下し、劣化が進行した。前記とは異なる焼却灰及び飛灰を固化したケースでは、混和材を添加

することで、質量減少及び超音波伝搬速度の低下が抑制され、混和材の添加により凍結融解の影響を受け難いことが確認された。なお、実際の処分場では本試験のような急激な温度変化に曝されることはなく、本結果は固化式処分において固化地盤が急速に劣化することを示唆するものでない。今後、実大規模の固化体で屋外長期曝露試験を行い、冬季間の氷点下以下の温度環境下での影響を確認することが必要である。

(3) 降雨、日射による湿潤・乾燥が繰返された場合の影響（乾湿繰返し試験）

乾湿繰返しに伴い、固化体の質量は2~4サイクル目まで減少を示したが、その後増加または漸減傾向を示した。超音波伝播速度についても、2~4サイクル目まで低下を示したが、その後増加傾向を示した。質量変化率、超音波伝播速度変化率の何れも、凍結融解試験とは異なる傾向を示した。これは、乾湿繰返し状態が高温湿潤状態での養生に似た作用をなし、水和反応が促進したためと考えられる。

(4) 凍結融解試験及び乾湿繰返し試験後の試験体の劣化度確認

凍結融解試験及び乾湿繰返し試験実施後の試験体の透水係数及び溶出試験の結果、透水係数は何れのケースにおいても 1×10^{-8} cm/s オーダー以下であり、長期間風雨に曝されたり、温度環境が変化したとしても、固化体は実質不透水（ 1×10^{-7} cm/s オーダー以下）を保持することが確認された。また、溶出試験については、何れのケースにおいてもPbの溶出濃度は一般廃棄物最終処分場の放流水排水基準及びF市下水排水基準を満足し、焼却灰及び飛灰に混和材も配合したケースでは鉛溶出濃度は土壌溶出量基準をも満足した。凍結融解及び乾湿繰返しによる促進劣化を受けても、固化による鉛の溶出抑制効果は保持され、安全性が確保されることが確認された。

4.4 固化式処分場の施工性・耐久性評価

(1) 固化式処分場の施工方法

焼却灰及び飛灰の固化によりガスの発生は限定的であるとし、従来式のようなガス抜き管を設置する必要はないと考えられる。遮水工、保護材、底部の集排水設備については処分場外への漏水防止を目的として従来型処分場と同等の構造が必要と考えられる。固化埋立においては、焼却灰及び飛灰にセメント、石炭灰、水を混合した混練物を処分場内などに設置したプラントなどで製造し、ダンプトラックなどで埋立地に運搬し、振動装置を装着した重機により、混練物を振動固化する。法面近傍には、表流水の排水及び振動装置による遮水シートの破損防止を目的に、保護材及び砕石層を設置する。埋立期間の雨水は、表層面まで配置した表流水排水管及び法面の砕石層を通して処分場底部の集排水管へ集め、水処理施設でpH、SSなどを処理することになると考えられる。表流水排水管は、埋立高さが上がると同時に埋立層表面の高さに合うように設置する。埋立完了後、埋立層の表面はアスファルト舗装などにより雨水を浸透させない仕上げとし、表流水排水管は閉塞し、焼却灰及び飛灰固化体の内部に雨水が浸透しないようにする必要があると考えられる。

(2) 固化式処分場の地震時挙動

埋立層表面の加速度及び変位については、加振加速度が300galより小さい場合にはケース間で大きな差は見られなかったが、加振加速度が500galより大きな場合ではケース2（固化式）が最も小さく、巨大地震時の固化式処分場の優位性が示唆された。ガス抜き管では下端の集排水管との接合部で最も大きなひずみが生じ、ひずみはケース1（従来型）で最も小さく、ケース2（固化式）とケース3（従来型）では同程度のひずみが発生した。また、ケース2（固化式）では固化体による拘束が原因と考えられる残留ひずみが発生した。しかし、これらのひずみは、ガス抜き管に損傷が生じるような応力レベルではなかった。遮水シートのひずみは、ケース3（従来型）で最も大きな値を示し、その最大ひずみは1000 μ 程度であった。しかし、遮水シートに発生したひずみについても、遮水シートに損傷が生じるような応力レベルではなかった。実験終了後に遮水シートを掘り出して目視確認を行ったが、破断等の損傷は見られなかった。固化式処分を適用した処分場において、巨大地震時にガス抜き管や遮水シートの破損リスクが大きく高まることはないことが確認された。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

石炭灰固化技術（超流体力工法）の応用により、一般廃棄物焼却灰及び飛灰の固化が可能であることを明らかにするとともに、焼却灰及び飛灰の排出日、示方配合及び曝露条件の異なる数多くの焼却灰・飛灰固化体の性状（単位体積質量、強度、透水性、有害物質溶出特性等）を明らかにし、それらのデータに基づき、固化式処分環境安全性、堅牢性、有用性を明らかにした。また、焼却灰及び飛灰の現場における確実な固化のための新たな配合決定手法として、材料混練時の混練機にかかる負荷（電流）の変化に基づいて水粉体比を決定する手法の有望性を見出した。さらには、焼却灰・飛灰固化体の吸湿・潮解に伴う性状変化及び潮解水の水質、焼却灰・飛灰固化体の屋外曝露、凍結融解及び乾湿繰返しに対する耐久性や劣化後の環境安全性（透水性、有害物質溶出特性）を明らかにした。加えて、従来型処分場及び固化式処分場の地震時挙動を明らかにし、巨大地震に対する固化式処分の優位性を示した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

固化式処分場の埋立地盤は軟岩相当の強度を有する堅牢な地盤であり、固化式処分場は跡地の高度利用を早期に図ることが可能であるとともに、巨大地震発生時の災害廃棄物の仮置場や仮設焼却処理施設の建設用地としての利用等、災害時の土地利用も可能と考えられる。固化式処分の適用により埋立地盤の減容化が可能であり、埋立地の供用期間の延長を図ることが可能と考えられる。また、固化式処分場における浸出水処理の対象は主に埋立地盤の表流水となり、有害物質を高濃度に含有する浸出水が発生することはないと考えられる。固化式処分は環境安全な処分方法であるとともに、浸出水処理施設の建設費及び維持管理費の大幅な削減、処分場の維持管理期間の大幅な短縮を図ることが可能と考えられる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付論文>

- 1) 島岡隆行：都市清掃，第 69 巻，第 333 号，419-425（2016）
焼却残渣を埋め立てる固化式処分システムの開発について
- 2) 小宮哲平、村川大亮、島岡隆行、中山裕文、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均、三反畑勇：第 12 回地盤環境工学シンポジウム発表論文集，査読中（2017）
一般廃棄物焼却残渣固化式処分地盤における吸湿・潮解に伴う物質移動及び孔隙変化に関する研究
- 3) 三反畑勇、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均、島岡隆行、小宮哲平、中山裕文：第 12 回地盤環境工学シンポジウム発表論文集，査読中（2017）
一般廃棄物焼却残渣固化式処分地盤の地震時挙動に関する研究

(2) 主な口頭発表（学会等）

- 1) 村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、秋田宏行、笠博義、三反畑勇、弘末文紀：第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会（2015）
一般廃棄物焼却残渣のセメント固化による強度特性と環境安全性に関する検討
- 2) 小宮哲平、島岡隆行、中山裕文、弘末文紀、秋田宏行、笠博義、三反畑勇：第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会（2015）
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
- 3) 村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、秋田宏行、笠博義、三反畑勇、弘末文紀：平成 27 年度土木学会全国大会第 70 回年次学術講演会（2015）
一般廃棄物焼却残渣の最終処分における石炭灰固化技術の適用に関する基礎的研究

- 4) 村川大亮、西本琢也、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、秋田宏行、弘末文紀、青木貴均：平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会（2015）
一般廃棄物焼却残渣セメント固化体の吸湿・潮解に伴う性状変化に関する基礎的研究
- 5) 西本琢也、村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、秋田宏行、弘末文紀、青木貴均、椋木俊文：平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会（2016）
超流体化工法を応用した一般廃棄物焼却残渣固化体の孔隙構造に関する基礎的研究
- 6) 村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均：第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会（2016）
一般廃棄物焼却残渣セメント固化体の吸湿・潮解に伴う性状変化に関する基礎的研究
- 7) 村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均：第 38 回全国都市清掃研究・事例発表会（2017）
一般廃棄物焼却残渣セメント固化体の吸湿・潮解に伴う性状変化に関する研究
- 8) 村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均：平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会（2017）
一般廃棄物焼却残渣セメント固化体の吸湿・潮解に伴う物質挙動に関する研究
- 9) 小宮哲平、村川大亮、島岡隆行、中山裕文、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均、三反畑勇：第 52 回地盤工学研究発表会（2017）
一般廃棄物焼却残渣固化式処分地盤の吸湿・潮解性に関する基礎的研究
- 10) 浦野和彦、三反畑勇、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均、島岡隆行、小宮哲平、中山裕文：第 52 回地盤工学研究発表会（2017）
一般廃棄物焼却残渣固化式処分地盤の地震時挙動に関する研究

7. 研究者略歴

研究代表者：島岡 隆行

九州大学大学院工学研究科水工土木工学専攻博士後期課程単位取得退学、工学博士
現在、九州大学大学院工学研究院環境社会部門教授

研究分担者：

1) 中山 裕文

九州大学大学院工学研究科都市環境システム工学専攻博士後期課程修了、博士（工学）
現在、九州大学大学院工学研究院環境社会部門准教授

2) 小宮 哲平

九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻博士後期課程修了、博士（工学）
現在、九州大学大学院工学研究院環境社会部門助教

3) 弘末 文紀

京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程修了、修士（工学）
現在、株式会社安藤・間技術本部技術研究所長

4) 笠 博義

東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻博士後期課程修了、博士（工学）
現在、株式会社安藤・間技術本部技術企画部長

5) 三反畑 勇

京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程修了、修士（工学）
現在、株式会社安藤・間技術本部技術研究所土木研究部長

6) 秋田 宏行

東京工業大学工学部土木工学科卒業、学士（工学）
現在、株式会社安藤・間技術本部技術研究所先端・環境研究部担当課長

要旨

焼却灰及び飛灰の固化体は、①軟岩相当の強度を有し、②実質不透水であること、③固化により有害物質の溶出を大幅に抑制できることを明らかとした。固化体の特性は、④固化体が劣化しても保持され、⑤吸湿・潮解が固化体の強度、⑥環境安全性に及ぼす悪影響は認められなかった。様々な焼却残渣に対して、⑦最適な固化を可能とする新たな配合決定手法を見出し、⑧固化式処分の減容効果、⑨固化式処分場の地震時挙動も明らかとした。以上のように、固化式処分場は環境安全かつ堅牢であるとともに、処分場の延命化を図ることもでき、実用化が期待される。

1. はじめに

我が国では、巨大地震への備えとして社会インフラの強靱化や最終処分場の埋立容量の確保が求められている。また、管理型処分場に関しては、環境汚染リスクの低減、維持管理費用の低減、跡地利用の迅速化が求められている。近年、管理型処分場に処分される廃棄物の大半は焼却残渣となっており、管理型処分場は「灰捨て場」の様相を呈している。本研究は、焼却残渣を特殊工法でセメント固化しながら処分する「廃棄物固化式処分システム」の構築を目指し、固化体の(1)配合、(2)性状、(3)耐久性、(4)施工性、及び固化地盤の(5)耐震性を明らかにするものである。当処分システムは、埋立容量の確保、処分場の耐震性向上、有害物質の溶出抑制、非常時の土地利用、跡地の早期利用や高度利用を図るものであり、廃棄物行政への大きな貢献が期待される。

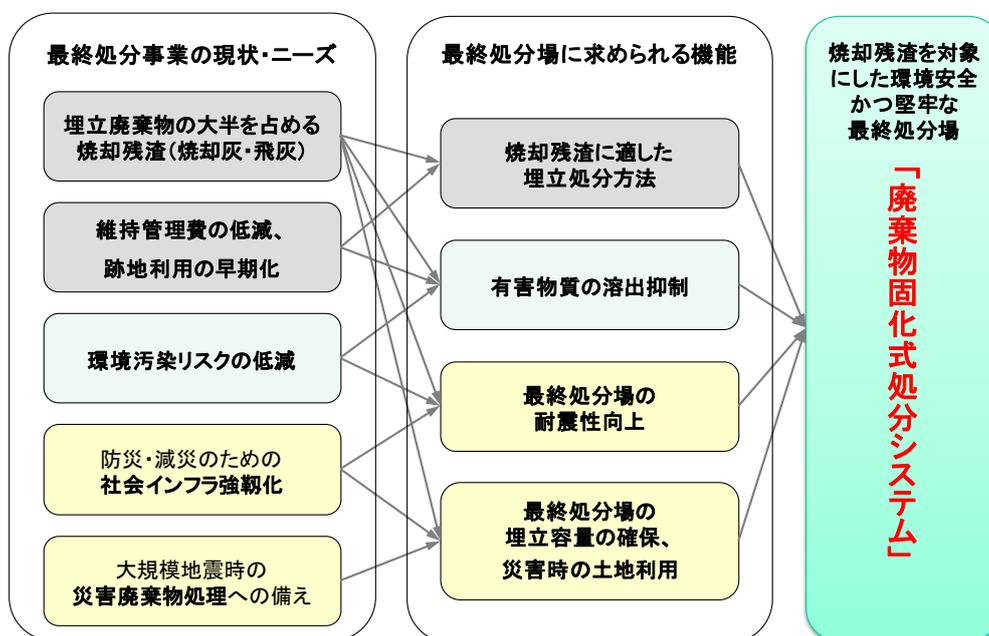


図 1-1 研究の背景

2. 研究目的

本研究は、焼却残渣（焼却灰及び飛灰）を特殊工法でセメント固化しながら埋立処分する新しい処分システムの構築を目的とした。具体的には、焼却残渣にセメント等を添加して高周波振動を用いる石炭灰固化技術（超流体工法）で固化盤を形成していくことにより、①埋立地盤の耐震性を向上させ、②埋立容量の消費を抑制し、③雨水浸透を排除し、④有害物質の溶出量を低減させ、その結果として⑤供用中の埋立地の延命化、または新設埋立地の規模縮小化を図るとともに、⑥閉鎖から廃止までの期間の短縮により、維持管理費用を低減させ、⑦跡地を早期にかつ高度に利用でき、かつ⑧災害時の土地利用もできる、新しい処分システム「廃棄物固化式処分システム」を構築するために、固化体の(1)材料配合、(2)性状、(3)耐久性、(4)施工性及び固化地盤の(5)耐震性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究方法

3.1 焼却灰及び飛灰の性状

(1) 物理化学的性状

焼却灰及び飛灰の物理化学的性状として、真密度、含水率、熱しゃく減量、化学組成及び鉍物組成の分析を行った。真密度は JIS R 5201、熱しゃく減量は 440℃、2 時間で測定した。化学組成については蛍光 X 線分析 (XRF)、鉍物組成については X 線回折分析 (XRD) を行った。

(2) 有害物質溶出特性

焼却灰及び飛灰に含まれる重金属の含有量及び溶出量を把握するために、含有量試験（平成 15 年環境省告示第 19 号、平成 24 年環水大発第 120725002 号）及び溶出試験（JIS K 0058-1）を行った。対象とする化学物質は、鉛、カドミウム、水銀、ヒ素、セレン、六価クロム、フッ素、ホウ素、シアンの 9 項目とした。

3.2 配合設計の決定手法

(1) 粉体配合、水粉体比

a. 粉体配合

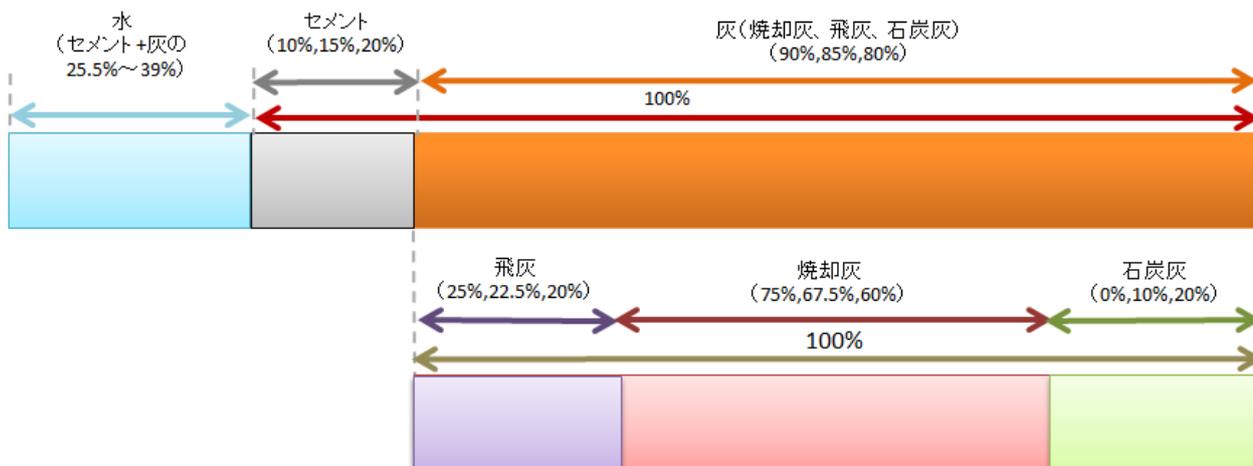
石炭灰の固化技術として開発された超流体工法（非常に少ない水量で練り混ぜたセメント混合粉体を外部振動によって締め固めて硬化させる工法）を焼却灰及び飛灰の固化に応用するために、以下のサンプリング試料に対して粉体配合、水粉体比などの配合条件を設定して試験練りを行った。

表 3-2-1 焼却灰、飛灰のサンプリング条件

Case	採取場所	採取年月	搬入量 (kg) ※概数		用途
			焼却灰	飛灰	
A	A 工場	2014 年 10 月	150	120	物理化学的性状試験 圧縮強度試験
B		2014 年 10 月	100	90	
C	B 工場	2014 年 11 月	150	120	溶出試験 他
D	A 工場	2015 年 5 月	290	100	事前試験練り
E		2015 年 6 月	500	190	耐候性試験 他
F		2015 年 9 月	160	55	
G		2016 年 7 月	360	120	配合指標試験
H		2016 年 10 月	1050	150	振動台試験

表 3-2-2 各試験及び材料混合条件

試験 Case			粉体				水	試験 Case			粉体				水		
			飛灰	焼却灰	混和材(FA)	セメント					飛灰	焼却灰	混和材(FA)	セメント			
A	固化体	A-1	100	-	-	10	39.0	D	-	CaseEのための試験練り							
		A-2				15	39.0										
		A-3				20	39.0										
		A-4	25	75	-	10	27.0			E	固化体	E-1	25	75	0	10	28.0
		A-5				15	27.0					E-2	25	75	0	15	27.0
		A-6				20	27.0					E-3	22.5	67.5	10	10	26.5
		A-7				20	60					20	15	23.0	E-4	22.5	67.5	10	15	26.5
B	固化体	B-1	100	-	-	10	33.0	F	固化体			F-1	25	75	0	10	27.0
		B-2				15	33.0					F-3	22.5	67.5	10	10	27.0
		B-3				20	33.0			F-5	20	60	20	10	27.0		
		B-4	25	75	-	10	27.0	G	粉体	G-1	25	75	0	0	30.0		
		B-5				15	27.0	H	固化体	H-1	25	75	0	10	30.0		
		B-6				20	27.0			H-3	22.5	67.5	10	10	30.0		
		B-7				20	60			20	15	26.0	H-5	20	60	20	10
C	固化体	C-1	100	-	-	10	29.0										
		C-2				15	29.0										
		C-3				20	29.0										
		C-4	25	75	-	10	33.0										
		C-5				15	33.0										
		C-6				20	33.0										
		C-7				20	60	20	15	31.0							



b. 水粉体比

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が、焼却灰及び飛灰の固化にはテーブルフロー試験自体が適用困難 (図 3-2-1 参照) なため、テーブルフロー値に基づく配合設計ができない。そこで、焼却灰及び飛灰への添加水量を変化させて試験練りし、目視、触感により練上りを確認することで最適水粉体比を設定して、配合設計を行った。



フライアッシュ+セメントペースト
(フロー値を計測できる)



焼却灰・飛灰+セメントペースト
(拡がりを見せない)

図 3-2-1 テーブルフロー試験の適用状況

(2) ワーカビリティ判定指標

焼却灰及び飛灰は、焼却対象となる廃棄物の種類及びキレート剤の影響により、内部に含まれる物理的・化学的成分の性質が大きく異なり、コンクリート材料の性能判定に用いられるワーカビリティの指標であるスランプフロー値などの適用が難しい。そこで、灰混合物練り試験時のミキサーから得られる、羽根部分のトルク抵抗値を間接的に示す電流値を計測することで、灰混合物施工時のワーカビリティ状況を判定する手法を検討するため、以下の測定を行った。

a. 電流値測定 (その1)

小型ホバート型ミキサー (モルタルミキサー) による計測 (図 3-2-2) i. ミキサー電流値計測機器

- ・計測器 : MR8870 Memory Hycorder (日置電機 株式会社)

ii. 計測条件

- ・水粉体比 (W/Pw) : 7 ケース (27、28、29、30、31、32、33%)
- ・粉体配合 : F-1
- ・ミキサー : 小型ホバートミキサー (AM-20、㈱愛好舎製作所)
- ・600 秒間の練り試験を実施し (図 3-2-3)、電流値を連続計測し、そのデータ履歴を比較



図 3-2-2 電流値計測器及びミキサー設置状況



図 3-2-3 灰混合物練り上がり状況

b. 電流値測定（その 2）

ミキサーの汎用性の確認

i. 計測条件

- ・粉体配合：G-1
- ・空練り 30 秒 → 中速 2 分として、中速 2 分間のみの結果をグラフ化し、測定結果を比較

ii. ミキサーの種類

- ・小型ホバート型ミキサー（5L 練り試験）（図 3-2-2） 【空練り時：160rpm、中速練り時：330rpm】
（品番：AM-20、㈱愛好舎製作所（a. で用いたものと同じ））
- ・中型ホバート型ミキサー（30L 練り試験）（図 3-2-4） 【空練り時：93rpm、中速練り時：200rpm】
（品番：マイティ 20、㈱愛好舎製作所）
- ・パン型ミキサー（25L 練り試験）（図 3-2-5） 【空練り時：46rpm、中速練り時：76rpm】
（品番：TM-55、太平洋機構㈱）



図 3-2-4 中型ホバート型ミキサー
（30L 練り試験）



図 3-2-5 パン型ミキサー
（25L 練り試験）

(3) 焼却灰、飛灰及びそれらの混合物の液性限界及び塑性限界

焼却灰及び飛灰は、細粒土と同様に、含水量の多少によりドロドロした液状体、ネバネバした塑性体状、ボロボロとした半固体状を示す。それら状態の変化する境界の含水比をそれぞれ液性限界、塑性限界と呼ぶ。超流体工法の応用による焼却灰及び飛灰の固化に適した焼却灰及び飛灰の含水比は、焼却灰及び飛灰が液体状と塑性体状の中間の状態を示すもの（液性限界）または塑性体状を示すもの（液性限界と塑性限界の間）と考えられる。そこで、JIS A 1205 に準拠し、焼却灰（Case G）、飛灰（Case F）及び両者を湿潤質量比 3:1 で混合したものの 3 者について液性限界試験及び塑性限界試験（JIS A 1205）を行った。

3.3 焼却灰・飛灰固化体の性状

(1) 強度特性

固化体の強度特性として、一軸圧縮強度及び細孔分布を測定した。圧縮強度は JIS A 1108 に準拠し測定した。細孔分布は水銀圧入式細孔分布測定法により測定した。細孔分布の測定では、供試体を 5mm 角に切断したものを測定に供した。

(2) 減容効果

固化による埋立廃棄物層の減容効果を明らかにすることを目的に、現行の処分方法で埋立処分された焼却残渣層の乾燥単位体積質量を求めた。測定の様子を図 3-3-1 に示す。バックホーを用いて、覆土（約 20cm）を除去して埋立焼却灰層を露出させ、地表面が水平になるよう整地した。その後、図 3-3-1 の地点 1、地点 2 及び地点 3 においてバックホーで試験孔を掘削し、掘削された焼却残渣の質量を測定した。次に、試験孔に農業用ビニールフィルム（厚さ 0.75mm）を敷設し、試験孔内が満水になるまで水（現場地下水）を注入し、注入水量から試験孔の体積を測定した。掘削された焼却灰の質量、試験孔の体積及び掘削した焼却残渣の含水率より、式 3.1 及び式 3.2 を用いて、従来式処分場の単位体積質量は $1.28\text{t}/\text{m}^3$ と算出された。



図 3-3-1 水置換法による従来式処分場の単位体積質量測定の様子

$$\begin{aligned} & \text{湿潤単位体積質量 (t/m}^3\text{)} \\ & = \text{掘削された埋立廃棄物の質量 (kg) / 試験孔へ注入した水量 (L)} \\ & \times 1000 \text{ (L/m}^3\text{)} / 1000 \text{ (kg/t)} \quad \dots (3.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{乾燥単位体積質量 (t/m}^3\text{)} \\ & = \text{湿潤単位体積質量 (t/m}^3\text{)} \times (100 - \text{含水率 (\%)}) / 100 \quad \dots (3.2) \end{aligned}$$

従来式処分場の単位体積質量 m_0 、固化体の単位体積質量 m_s 及び示方配合により算出した固化体中の焼却残渣質量割合 a による従来式処分場の焼却残渣単位質量あたりの埋め立て容量消費量 v_0 及び固化式処分の焼却残渣単位質量あたりの埋立容量消費量 v_s を式 3.3 及び式 3.4 により算出した。

$$v_0 = \frac{1}{m_0} \quad \dots (3.3)$$

$$v_s = \frac{1}{m_s \times a} \quad \dots (3.4)$$

(3) 有害物質溶出特性及び透水性

固化体に含まれる重金属の溶出特性及び透水性を把握するため、含有量試験(平成15年環境省告示第19号)及び溶出試験(JIS K 0058-1(利用有姿及び粗砕試料))を行った。対象とする化学物質は、埋立基準が設けられている重金属及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、フッ素、ホウ素及びシアンの9項目とした。透水係数はJIS A 1218に準拠し測定した。

(4) 吸湿・潮解による影響

a) 潮解性について

大気中の水分(水蒸気)を吸収する現象は吸湿である。それに対して、潮解は物質が大気中の水分を取り込んで自発的に水溶液となる現象のことである。

潮解性を示す代表的な物質は、シリカゲル($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)、塩化ナトリウム(NaCl)、塩化カリウム(KCl)、塩化カルシウム(CaCl_2)、酸化カルシウム(CaO)、炭酸カリウム(K_2CO_3)、塩化マグネシウム(MgCl_2)、水酸化ナトリウム(NaOH , solid)、十酸化四リン(P_4O_{10})、クエン酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)等が挙げられる。

焼却灰及び飛灰中には、潮解性を示す物質を多く含んでいることから大気中の水分を吸湿、溶解して水溶液となる。この現象は、潮解性物質が溶けてなくなるまで進行すると考えられる。

b) 本試験の目的

焼却残渣固化体中の焼却灰及び飛灰中には NaCl や KCl 等の潮解性を有する塩類が多量に含まれるため、固化体の吸湿・潮解に伴い、固化体中の可溶成分が流出することが予想される。

これにより、固化体中の孔隙が増加し、固化体の透水性及び強度に悪影響を及ぼすことが懸念される。また、潮解水の発生に伴い、浸出水の水質に悪影響を及ぼすことが懸念される。また、潮解性物質を含んだ水溶液の蒸発を考えると、溶解した物質は水溶液とともに固化体の表面近傍、または表面まで移動し、析出すると考えられ、固化体表層は緻密な構造へと変化することが考えられる。

そこで、本試験では、焼却残渣固化体を高湿度環境下に曝露し、固化体の吸湿・潮解を促進させる吸湿・潮解促進試験を行い、固化体の吸湿・潮解に伴う物質移動、潮解水の環境安全性、吸湿・潮解促進させた固化体の強度特性、固化体の孔隙構造の変化をマイクロ X 線 CT 法により把握した。

c) 吸湿・潮解促進試験の方法

固化体の吸湿・潮解性を把握することを目的として、固化体をフィルムで封かん養生した試験体と高湿度環境下に曝露した試験体を比較する吸湿・潮解促進試験を行った。図 3-3-2 及び図 3-3-3 に吸湿・潮解促進試験の実験模式図及び吸湿・潮解促進試験の状況を示す。

長期曝露試験は、固化体作成後に 90 日間フィルムで外気から隔離させる封かん養生をした後に、高湿度環境下に 293 日曝露した（ケース F）。また、短期曝露試験は、固化体作成後に 7 日間フィルムで封かん養生した後に、高湿度環境下に 53 日曝露した（ケース H）。

高湿度曝露は、恒温恒湿室内（室温 20℃、相対湿度 70%）に設置した密閉性の高いアクリル性のデシケータ（容量：117.5L）内に固化体を納めて試験を行った。

具体的には、デシケータ内に炭酸ガスを除去した高湿度な空気を給気するため、ソーダライム及び純水の入ったガス洗浄ビンを用意し、固化体の乾燥を防ぐためにデシケータ内の底面に水を張ったバットを設置した。デシケータ内の上下 2 段の棚に固化体、ブランクとして水を入れたプラスチック容器を 8 個、湿度・温度計（データログ付）を 2 個、空気攪拌用ファンを 1 個設置した。各固化体はグレーチング材（幅 487mm、高さ 430mm、開孔率 22%）に載せたプラスチック製受皿内に塩ビ管を切断して作製された土台（直径 20mm、高さ 5mm）を設置しその上に配置した。

固化体表面に付着していた水分及び受皿に溜まった水分を定期的に回収し、その累加量を固化体の潮解水量とした。また、水分を回収した後に固化体及び受け皿全体の質量を測定し、実験開始時からの質量変化量を吸湿水量とした。

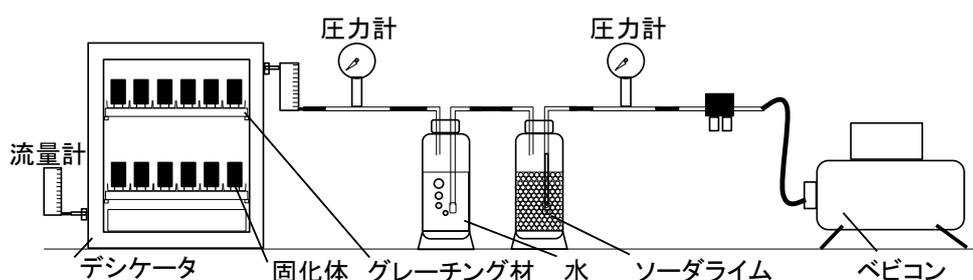


図 3-3-2 吸湿・潮解促進試験の実験模式図



図 3-3-3 吸湿・潮解促進試験の状況

d) 吸湿・潮解促進に伴う固化体中の物質移動の評価方法

焼却残渣固化体の吸湿・潮解に伴い固化体中の吸湿・潮解物質が潮解し、固化体の質量変化及び潮解水の発生が起きる。本試験では、吸湿・潮解現象に伴う固化体の質量変化及び潮解水量を定量的に把握した。

固化体表面の潮解水の拭取り及び受皿の潮解水の回収前の固化体及び受皿の質量を m_{before} 、潮解水の拭取り及び回収後の同質量を m_{after} 、試験開始からの経過日数を d としたとき、試験開始からの固化体の質量変化 m_1 、試験開始からの潮解水量（累加発生量） m_2 はそれぞれ式 3.5 及び式 3.6 で表される。

$$m_1 = m_{after}(d) - m_{after}(0) \quad \dots (3.5)$$

$$m_2 = \sum_0^d (m_{before}(d) - m_{after}(d)) \quad \dots (3.6)$$

質量変化率、潮解水量、潮解水中の物質濃度、固化体の元素組成及び鉍物組成を用いて、固化体中の物質移動を定量的、または定性的に把握した。

また、焼却残渣固化体の吸湿・潮解に伴う可溶成分の流出により、溶けだした物質が固化体表層部まで移動し析出すると考えられ、固化体断面の元素の分布の変化が予想された。電子線マイクロアナライザ（EPMA）により、固化体の吸湿・潮解に伴う固化体断面の各元素の分布の変化を定量的及び定性的に把握した。測定方法は WDS（波長分散型－蛍光 X 線分析法）法により Cl 及び Ca について、EDS（エネルギー分散型－蛍光 X 線分析法）により Na 及び K について測定した。表 3-3-1 に EPMA の測定条件を示す。

表 3-3-1 EPMA の測定条件

項目	条件
試料寸法	φ 50mm
装置	JXA-8230(日本電子)
加速電圧	15.0kV
照射電流	1.00e-7A
プローブ圧	20μ m
ピクセル数	700 × 700

e) 潮解水の環境安全性の評価方法

焼却残渣固化体の吸湿・潮解に伴う潮解成分の流出により、潮解成分のみならず、有害重金属元素が溶出してしまうことが懸念される。そこで、固化体の吸湿・潮解に伴う潮解水中の pH 及び有害重金属元素の濃度を調査することで、浸出水の環境安全性を評価した。

f) 固化体の強度特性の評価方法

焼却残渣固化体の吸湿・潮解に伴う可溶成分の流出に伴い、固化体中の孔隙が増加し、固化体の強度に悪影響を及ぼす可能性が懸念される。そこで、吸湿・潮解させた固化体を対象に一軸圧縮強度試験（JIS A 0076）及び水銀圧入法による細孔分布測定を行い、固化体の圧縮強度及び細孔分布の変化を定量的に把握した。また、供試体の表面近傍及び内部の強度変化を確認するため、針貫入試験による一軸圧縮強度（以下、換算一軸圧縮強度とする）の測定を行った。測定箇所を図 3-3-4 に、供試体の測定条件及び養生条件をそれぞれ表 3-3-2 及び図 3-3-5 に示す。

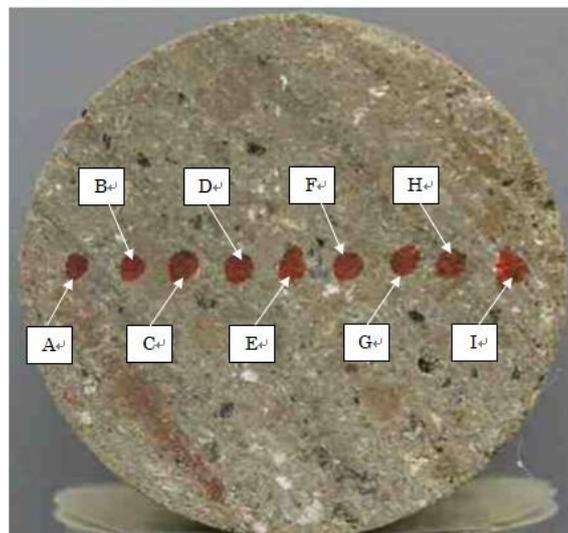


図 3-3-4 換算一軸圧縮強度 測定箇所

表 3-3-2 換算一軸圧縮強度 供試体測定条件

ケース番号	試験内容	養生日数
F-1-A	長期曝露試験	封かん養生 28 日
F-1-B		封かん養生 383 日
F-1-C		封かん養生 90 日＋潮解促進養生 293 日
F-2-A		封かん養生 28 日
F-2-B		封かん養生 383 日
F-2-C		封かん養生 90 日＋潮解促進養生 293 日
F-3-A		封かん養生 28 日
F-3-B		封かん養生 383 日
F-3-C		封かん養生 90 日＋潮解促進養生 293 日
H-1-A	短期曝露試験	封かん養生 60 日
H-1-B		封かん養生 7 日＋潮解促進養生 53 日
H-3-A		封かん養生 60 日
H-3-B		封かん養生 7 日＋潮解促進養生 53 日
H-5-A		封かん養生 60 日
H-5-B		封かん養生 7 日＋潮解促進養生 53 日

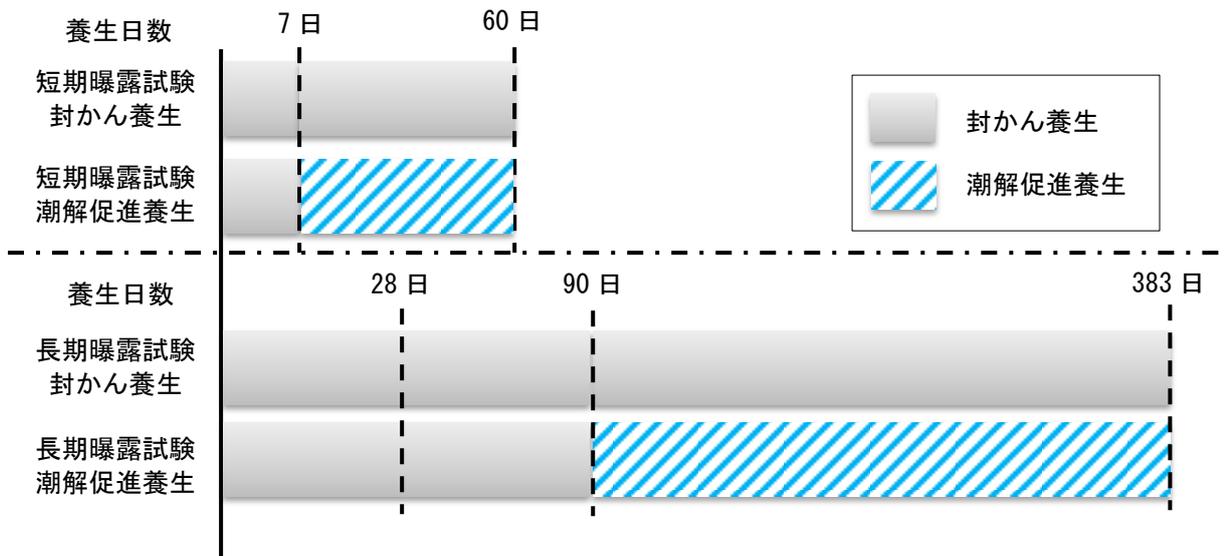


図 3-3-5 換算一軸圧縮強度 供試体養生条件

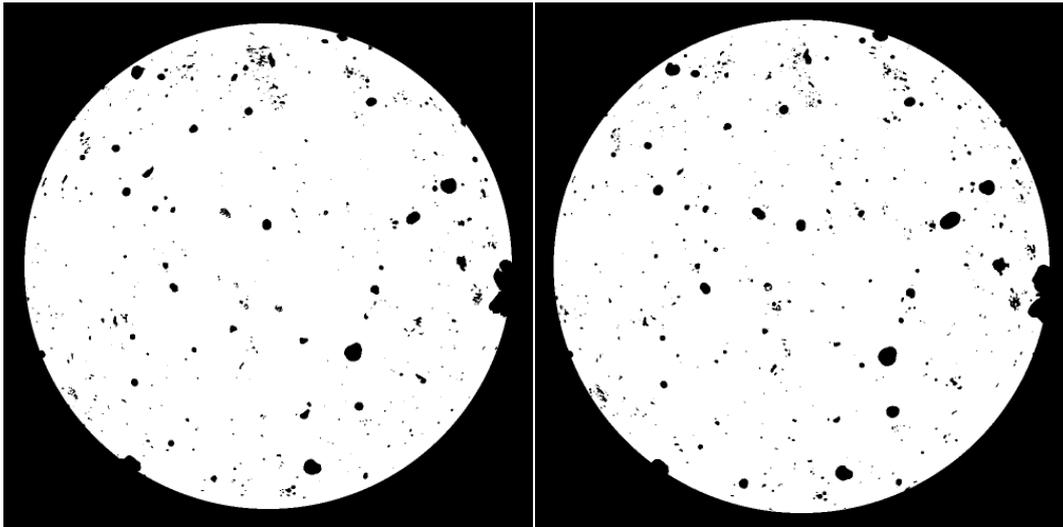
g) マイクロ X 線 CT 法による固化体の孔隙構造の解析方法

マイクロ X 線 CT 法は被検体内部における X 線の吸収率から照射断面を画像化する手法である。X 線吸収率は物体の密度に比例することが知られており、X 線 CT 画像は照射断面の密度分布を示すものと考えられる。X 線 CT 画像は X 線照射厚分の厚みの情報を持つ画像であり、その画素には厚みを持つ画素であるボクセル内に存在する物質の X 線吸収率から定義される CT 値が格納されている。

マイクロフォーカス X 線 CT スキャナーを用いて、固化体底面から高さ 30~70mm の範囲を対象とし、高さ 0.053mm 間隔で供試体断面の X 線 CT 画像を得た。撮影条件は、管電圧 140kV、管電流 200 μ A、X 線照射厚 0.053mm、撮影領域 55.0mm、画素数 1024 \times 1024 とした。

得られた断面画像に偽像除去処理を施した上で、二値化処理により孔隙（気相）の抽出を行った。また、二値化処理後の断面画像を積重ねて立体化し、孔隙構造の解析を行った。なお、抽出可能な孔隙のサイズはボクセルのサイズ 53 μ m 以上であり、抽出された孔隙をマクロ孔隙と称した。

促進試験前後の二値画像を図 3-3-6 に示す。これらを視覚的に比較することにより、断面内のマクロ孔隙の形状変化を把握することができる。また得られた画像中のマクロ孔隙を表示している箇所（画像中の黒色の箇所）の割合を求めマクロ孔隙率を算出することができる。これにより促進試験前後の鉛直方向及び断面方向の孔隙率の変化を把握した。

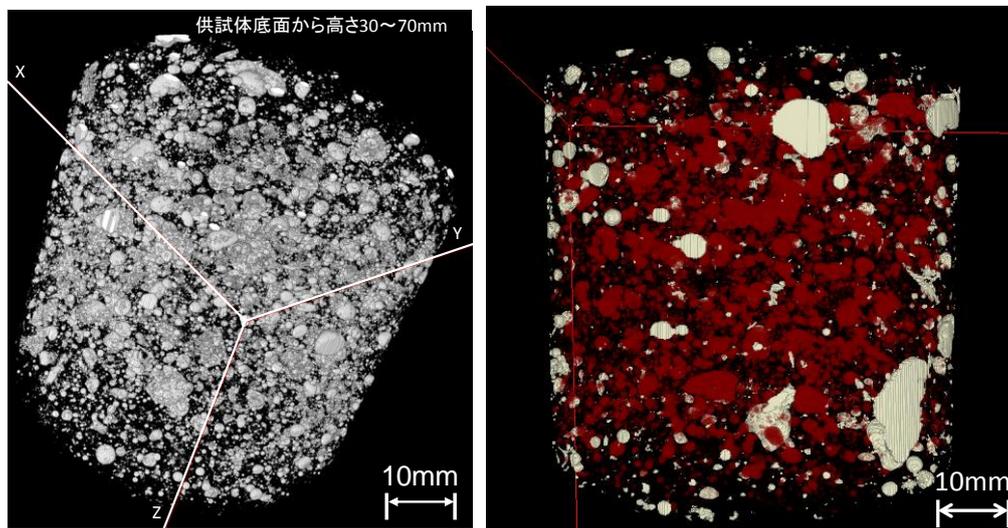


(a) 促進試験前二値画像

(b) 促進試験後二値画像

図 3-3-6 促進試験前後のマクロ孔隙表示画像

二値化処理後の断面画像を積み重ねて立体化した、マクロ孔隙の立体画像を図 3-3-7(a)で示す。実際の固化式処分場を想定した際に、雨水は水みちを通り浸透し、有害物質の漏出が懸念される。本研究では、マクロ孔隙を固化体の外部とつながっている連続マクロ孔隙とそうでない独立マクロ孔隙に分類し、その立体画像を図 3-3-7(b)に示す。連続マクロ孔隙を白色で、独立マクロ孔隙を赤色で表す。水みちを固化体の外部とつながっている連続マクロ孔隙と仮定し、マクロ孔隙に対する連続マクロ孔隙の割合を求めた。



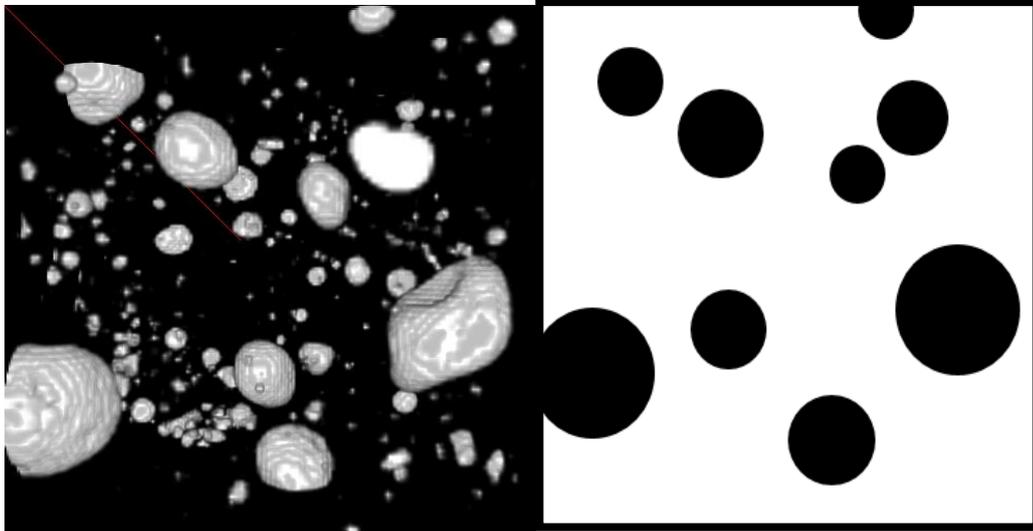
(a) マクロ孔隙の立体構造

(b) 連続及び独立マクロ孔隙の抽出

図 3-3-7 マクロ孔隙の立体画像

画像処理ソフト ImageJ の「3D Objects counter」の機能を利用して、二値化された画像断面を積み重ねて立体化した立体画像にある対象物を数え、体積を測定することが可能である。すなわち、二値化画像の対象物

の一つ一つの塊を一つ一つの孔隙の塊とみなし、その対象物の孔隙の個数や全孔隙体積、平均孔隙体積などを求めることができる。本研究では、各マクロ孔隙が完全な球体であると仮定し、孔隙の体積から球体の直径と頻度を粒径分布として表す。「3D Objects counter」のイメージを図 3-3-8 に示す。



(a) 各孔隙の境界を求める。

(b) 各孔隙を球体と仮定し、
各孔隙体積より直径を求める。

図 3-3-8 マクロ孔隙径の求め方

(5) 未燃焼分腐敗の影響

a) 腐敗について

本試験における腐敗とは、嫌気性状態において F 市下水処理場消化槽からの消化液 10%を添加し、嫌気性微生物を植種した上で、固化体中の固形有機物が加水分解、または溶解し、溶存有機物が嫌気性微生物によってメタン発酵を受ける現象のことをいう。

b) 本試験の目的

廃棄物固化式処分システムの構築を目指す上で、システム層内において嫌気的雰囲気形成された場合、固化体中に存在する有機成分が腐敗することにより、メタン等の腐敗性ガスが発生することが考えられる。層内は密閉状態にあり、微生物反応により発生したガスが外気中に拡散しないため、ガスの生成により固化体中に存在する微細気泡の圧力が上昇する。それに伴い体積膨張によるひび割れや空隙の拡大が発生する可能性があり、固化体強度の減少や透水性の増加による雨水浸透が起こることも考えられる。そこで、固化体に嫌気性微生物を植種し攪拌することで一般廃棄物焼却残渣に含まれる未燃分が腐敗した際に廃棄物固化式処分システムに及ぼす影響を確認することを目的とした。

c) 焼却残渣固化体の未燃分腐敗・ガス発生の影響試験の方法

図 3-3-9 に実験模式図を示す。空気が入り込まないように密閉し、攪拌槽内を微生物の至適温度である 30-40℃になるようにした。分析項目及び方法については表 3-3-3 に示す。微生物の分解過程は非常に複雑で

あるが、大筋としては炭水化物や蛋白質等のような高分子化合物が次第に低分子化され糖類や有機酸、アルコールなどの中間生成物を経て最終的に水やガス体、無機塩類になり減容・安定化する過程と考えられる。また、メタン発酵が順調に進んでいる場合、生成した有機酸は速やかにメタン発酵菌に利用されるため、有機酸の濃度が低く、検出されるものはほとんど酢酸、プロピオン酸及び酪酸の揮発性脂肪酸であるため、フラスコ内溶液の分析項目を表 3-3-3 のように決定した。固化体中の未燃焼分（有機物）の腐敗を検討するため、温度をメタン菌の至適温度である 35℃に制御した密閉容器内に固化体（粉碎、2mm 以下）と純水を液固比 5 で混合したものを入れ、容器内のガス及び溶存ガスを窒素で置換した上で、メタン菌の植種を目的に微量の下水処理場の消化汚泥を添加し、攪拌し、溶液の水質（pH、TOC、DO、有機酸（酢酸、プロピオン酸及び酪酸））、発生ガス量及び発生ガス組成の変化を把握した。

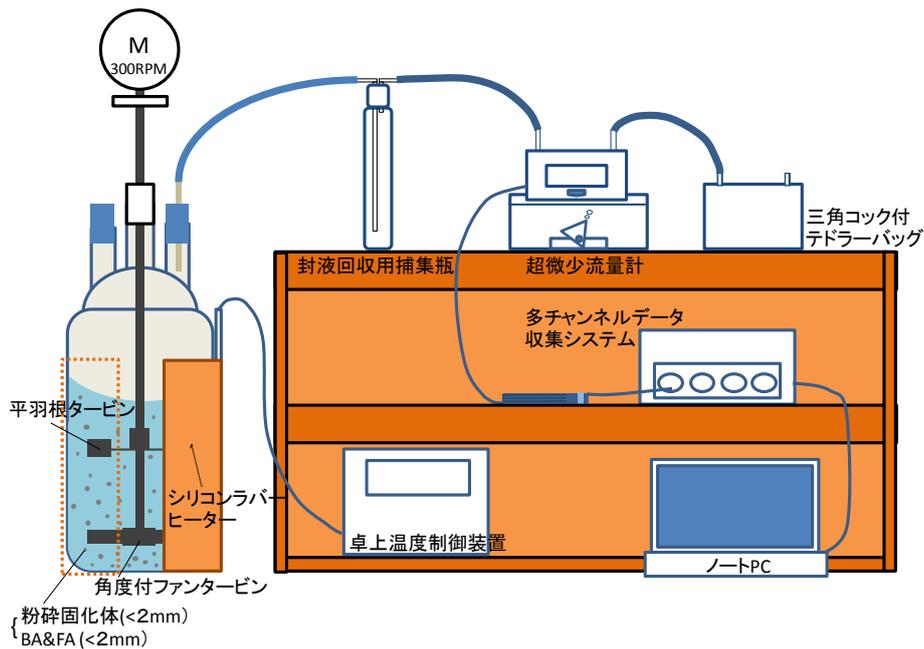


図 3-3-9 未燃分腐敗・ガス発生の影響試験実験模式図

表 3-3-3 分析項目及びサンプリング方法

検体	分析項目	分析装置	採取量 (mL)	採取頻度
フラスコ内溶液	pH, EC, ORP	pH計, EC計, ORP計	20	3回/月
	TOC, T-N	TOC-TN同時分析装置	5	
	有機酸（酢酸、プロピオン酸、酪酸）	HPLC	5	
テドラーバッグ内ガス	H ₂	ガスクロ (GC-8A)	3	3回/月
	CH ₄ , CO ₂ , N ₂ , O ₂	ガスクロ (GC-2014)	3	

3.4 焼却灰・飛灰固化体の耐久性

固化式処分場の施工中は、降雨による湿潤、風や日照による乾燥、冬季の凍結など様々な気象条件が、焼却灰・飛灰固化体に影響を与えることが想定される。そこで、下記の3つの気象条件を想定し、固化体の性状変化を把握することを目的とした耐久性試験を行った。

なお、固化式処分場の埋め立て完了後は、表層をアスファルトなどで覆うことにより、風雨など気象の影響を受けないものと想定した。

固化体に影響を与えることが想定される3つの気象条件

- ・ 日常的な風・降雨・日射などの影響
- ・ 冬季の氷点下の温度変化による凍結の影響
- ・ 降雨、日射による湿潤・乾燥が繰返された場合の影響

(1) 日常的な風・日射・降雨などの影響（屋外曝露試験）

所定の配合で製作した試験体を28日間養生した後、屋外環境に曝露し、固化体の経時変化を目視し、剥離やクラックが生じた場合には発生要因を確認することとした。試験は、ケースA（A-2、5、7）及びE（E-1、3、5）の6種類について、試験体（角柱10cm×10cm×40cm）を各々3本製作して行った。



図 3-4-1 屋外曝露試験状況

(2) 冬季の氷点下の温度変化による凍結の影響（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、積雪や氷点下の温度変化により、焼却灰・飛灰固化体が凍結することが想定される。そこで、焼却灰・飛灰固化体の凍結及び融解の影響を把握することを目的に凍結融解試験を実施した。

試験は、ケースA（A-2、5、7）及びE（E-1、3、5）の6種類について、試験体（角柱10cm×10cm×40cm）を各々3本製作して行った。試験体の打設後14日後以降に脱型を行い、その後、水中養生（2週間）により試験体を十分給水状態にしてから凍結融解試験を開始した。

なお、JIS 凍結融解試験では打設後すぐに水中養生（4 週間）を行うが、本試験では打設直後に脱型することで試験体の一部が剥離することを避けるため 14 日以上の中養生を実施後、水中養生を 14 日間実施し、凍結融解試験を開始した。

凍結融解試験は試験体の温度を 5°C ～ -18°C の範囲で温度サイクルを繰り返す。設定温度の最低及び最高温度は $5\pm 2^{\circ}\text{C}$ ～ $-18\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内となるように管理した。なお、JIS 凍結融解試験では連続して凍結融解を行うが、本試験では焼却灰・飛灰固化体がコンクリートよりも劣化促進が速いと想定し、1 日 1 サイクルで実施した。1 サイクルに要する時間は 3 時間以上、4 時間以内とした。試験結果の測定について、試験開始前、試験開始後 1 サイクルごとに JIS A 1127 による一次共鳴振動数 $f_0, f_1, f_2, \dots, f_n$ 及び供試体質量を測定した。一次共鳴振動数が計測不可となるまでサイクルを繰り返す。なお、劣化度が進行し、一次共鳴振動数が計測できない試験体については、超音波速度を測定した。

さらに、凍結融解試験実施後の劣化度を確認することを目的に、試験体の角柱の一部を切断し、透水試験及び有害物質溶出試験を行った。試験結果は、中養生の試験体の透水試験結果、溶出試験結果と比較し、凍結融解が透水性及び重金属類の溶出に与える影響を確認した。

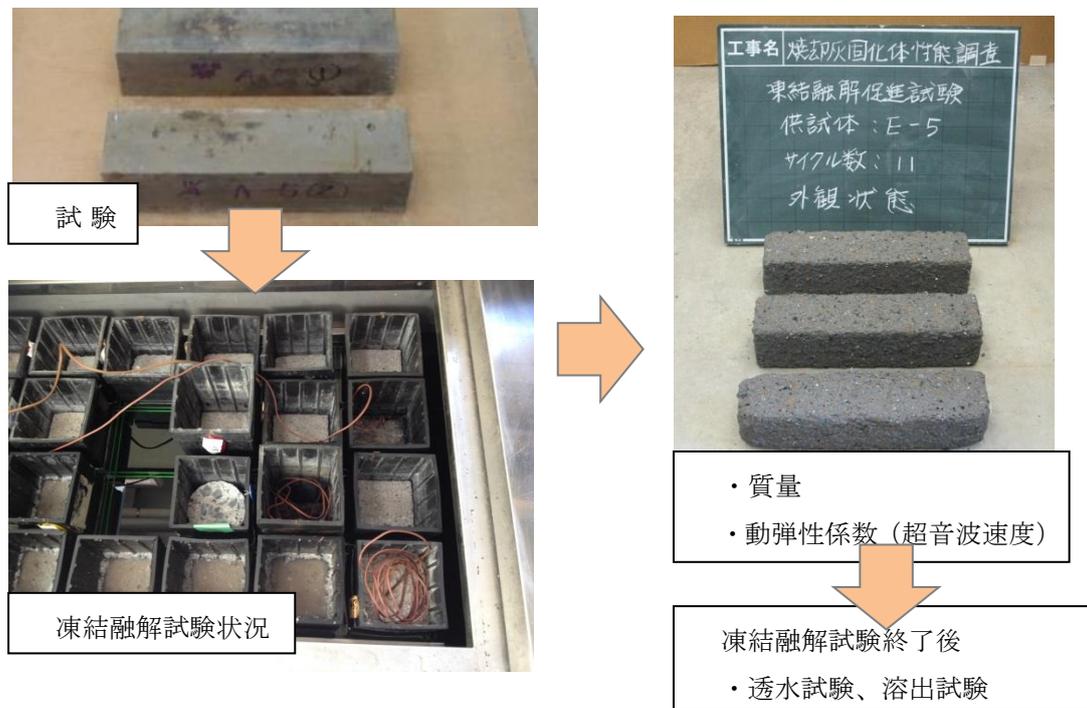


図 3-4-2 凍結融解試験

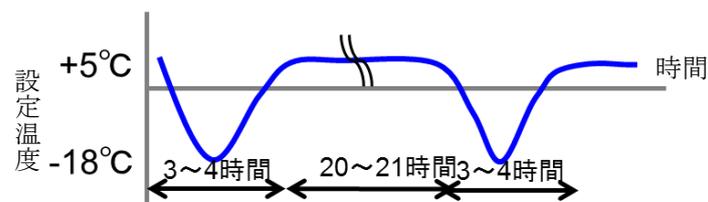


図 3-4-3 凍結融解試験の温度変化サイクル

(3) 降雨、日射による湿潤・乾燥が繰返された場合の影響（乾湿繰返し試験）

乾湿繰返し試験は、試験体製作後に気中養生を 28 日間実施した試験体を用いて、ポーラスコンクリートの乾湿繰返し試験方法(案)（JCI 規準集）を参考に行った。試験は、ケース E（E-1、3、5）の 3 種類について、試験体（角柱 10cm×10cm×40cm）を各々 3 本製作して行った。

試験サイクルは、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 2 サイクルとした。このサイクルは 7 日間で 2 日間降雨がある状況を模擬し、F 県の降水日数を再現する条件となる。

表 3-4-1 F 県年間降水日数（データ引用：e-sat）

降雨日数				年間/週間の降雨日数割合
2000 年	2005 年	2010 年		年間：104 日/365 日=28.5%
102 日	92 日	119 日	平均：104 日	週間：2 日/7 日=28.6%

2 サイクルごとに試験開始前後の超音波速度及び質量を測定し、その変化を劣化度の指標とした。なお、JIS A 1127 では一次共鳴振動数 $f_0, f_1, f_2, \dots, f_n$ を測定するが、ここでは試験体が劣化し一次共鳴振動数計測できなかったため超音波速度を計測した。

参考：JCI 乾湿繰返し試験概要：

- ・試験装置：20±2℃の水を入れた水槽及び、40±2℃の乾燥炉を用いて、乾湿を繰り返す。
- ・供試体：角柱 10cm×10cm×40cm とする。
- ・サイクルタイム：乾燥期間 3 日、湿潤期間 1 日、乾燥期間 2 日、湿潤期間 1 日を 2 サイクルとする。試験終了は 30 サイクルとする。
- ・測定：試験開始前、試験開始後 2 サイクルごとに JIS A 1127 による一次共鳴振動数 $f_0, f_1, f_2, \dots, f_n$ 及び供試体質量を測定する。測定は湿潤工程終了後に行う。水中から取り出し後、約 1 時間、期中で内部の水抜きを行った後、表面の水を拭き取り速やかに測定する。

乾湿繰返し試験実施後の劣化度を確認することを目的に、試験体の角柱の一部を切断し、透水試験及び溶出試験を行った。気中養生している 28 日試験体の透水試験結果、溶出試験結果と比較し、透水性の変化及び重金属類の溶出状況を確認した。

【凍結融解、乾湿繰り返し試験終了後の透水試験用試験体の切り出しについて】

- ・ 埋立後の最上面（表面）から雨水が浸透することを想定して透水試験を実施する。
- ・ 凍結融解試験(乾湿繰り返し試験)終了後の試験体のセンターから $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ を目安に切り出す。（※供試体のサイズ $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ は、試験後、スケーリングによりサイズは小さくなる）
- ・ 切り出した後、劣化した4側面の内、相対する2側面については、劣化した部分をヤスリなどで削ぎ落とし、健全な面を露出させる。
- ・ 劣化した2面について、埋立て後の最上面（表面）を模して、そのまま注水面として使用する。

■供試体の切り出し方法

①試験体 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ から $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ を切り出す。

②切り出した $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ の試験体の相対する2面は劣化した面を削ぎ落とし健全な面を露出させた。
(図の「→」印の2面)

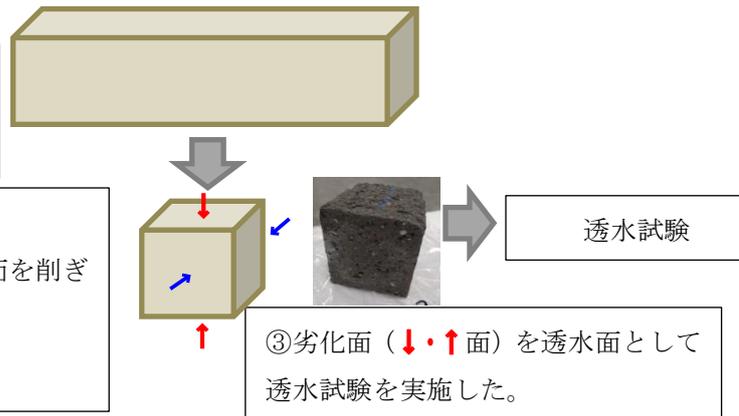


図 3-4-4 凍結融解、乾湿繰り返し試験終了後の透水試験用試験体の切り出し方法について

3.5 固化式処分場の施工性・耐久性評価

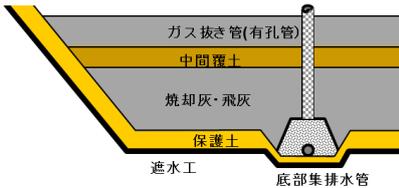
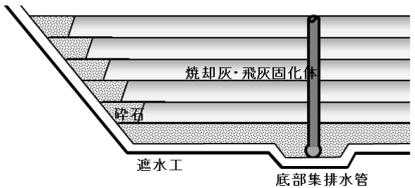
(1) 固化式処分場の施工方法

従来型処分場（準好気性方式）と比較し、固化式処分場においては、様々な付帯施設の必要性が異なる。ここでは、従来型処分場と固化式処分場の違いを整理するとともに、固化式処分場における施工段階の留意点について机上検討した。

なお、従来型処分場では、準好気性による処理の特性上、以下の付帯施設が必要となる。

- ・ 覆土（即日、中間）：埋立てた焼却灰・飛灰の飛散防止を目的として日々の作業後及び数メートル埋立てごとに1層（50cm程度）の覆土が必要となる。
- ・ ガス抜き管：有機物の腐敗により発生するガスを埋立て焼却灰・飛灰中より外気へ抜く必要がある。
- ・ 遮水工：重金属を含む雨水浸透水を処分場外へ流出させないために必要となる。
- ・ 排水処理施設：重金属を含む雨水浸透水を河川や下水に排水する前処理として必要となる。

表 3-5-1 従来型処分場と固化式処分場における付帯施設

項目	従来型処分場 (準好気性方式)	固化式処分場
概略図 (埋立時)		
覆土	焼却灰・飛灰の飛散を防止及び微生物の活性化を促す目的で即日覆土を行う。 数メートル埋立てた後、1層（約50cm）程度の中間覆土を行う。	即日固化するため焼却灰・飛灰は飛散しない。 雨水が浸透しないため中間（排水）層は不要となる。
ガス抜き管	有機物腐敗により発生するガスを空气中に排出するガス抜き管を設置する。	ガスによる影響はほぼないため、ガス抜き専用管（有孔管）は設置不要となる。
遮水工	浸出水の処分場外への漏洩を防止するため遮水シートを設置する。	従来式同様に、処分場外への地下漏洩を防止するため遮水シートは必要となる。
排水管	処分場内部に浸透し、焼却灰・飛灰の重金属を洗い出した水を、処分場底部に排水するための集排水管を設置する。	施工中の表面排水を目的に、埋立て高さに合わせて処分場底部に排水するための表面水排水管を設置する。
排水処理	廃棄物に雨水を浸透させ、重金属の洗浄排出を行う目的で、水質が基準値未満になるまで、水処理プラントで処理する必要がある。	廃棄物埋立中においては、廃棄物固化体にもふれる表層部分からの排水はpHが高くなる可能性がある。また、SSのコントロールのため、水処理プラントが必要となる。 埋立完了後は、最終表面をアスファルトコンクリートなどで覆うことにより、排水処理は不要となる。

上記の付帯施設について、固化式処分場の特徴を活かすことで施設が不要であったり、施設の性能を減じたりすることが可能となる。従来型処分場と固化式処分場において求められる各施設を表 3-5-1 に整理した。

(2) 固化式処分場の地震時挙動

固化式処分場の地震時挙動を明らかにするために、従来型処分場（準好気性方式）及び固化式処分場の部分模型の振動台実験を行い、両者の実験結果を比較して、固化に伴う耐震性の向上及び地震時に遮水シート及びガス抜き管に生じるひずみや応力等について考察した。なお、実験模型の仕様は、実大処分場モデル（図 3-5-1 参照）を対象とした動的 FEM 解析を事前に実施して、地震動による応力集中や比較的大きな変形の発生が想定される箇所に着目して設定した。

図 3-5-2 及び図 3-5-3 に動的 FEM 解析モデル図（集排水管横断方向、集排水管縦断方向）を、表 3-5-2 に解析に用いた地盤物性値を示す。なお、FEM 解析では遮水シートはモデル化していない。

図 3-5-2 に模型実験の選定箇所を示し、図 3-5-5 に振動台実験模型の概要を示す。

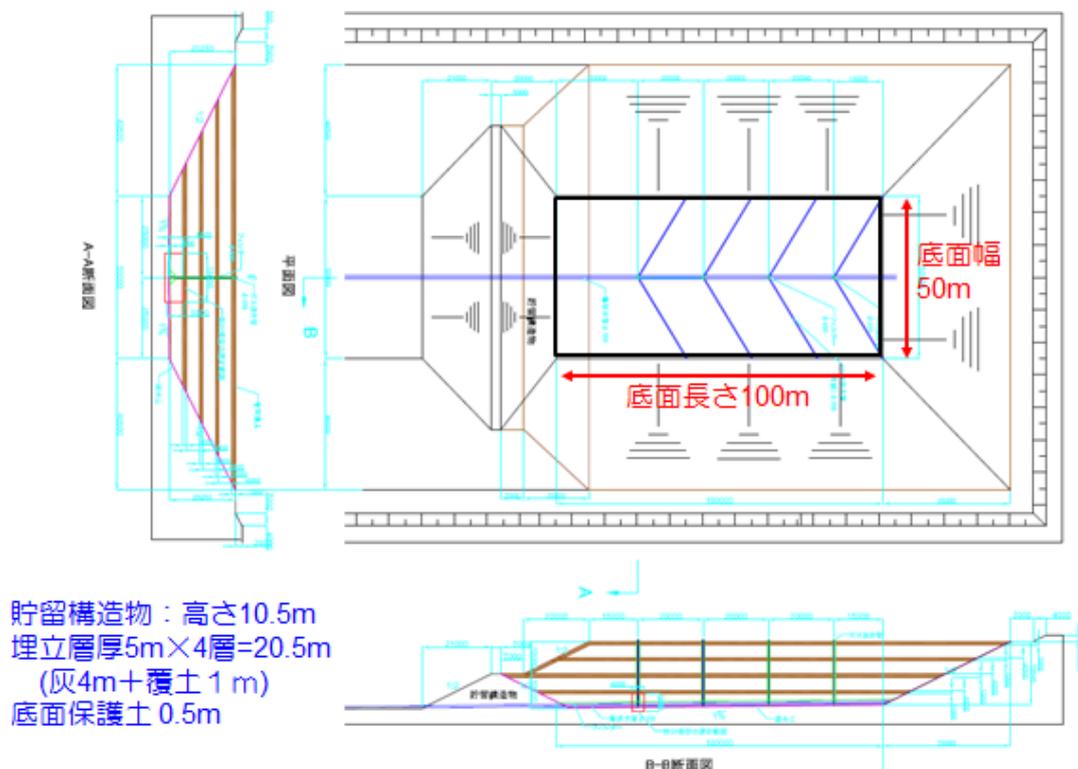


図 3-5-1 実験仕様検討のために想定した管理型処分場モデルの概要

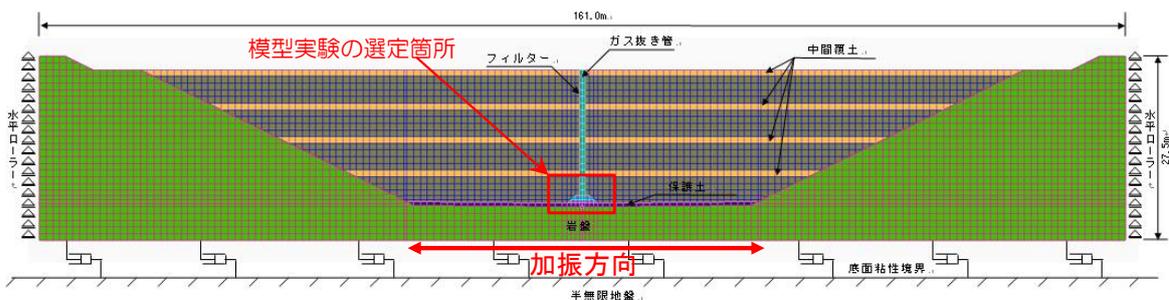


図 3-5-2 動的 FEM 解析モデル図（幅 161m×高さ 27.5m、1m×1m メッシュ）

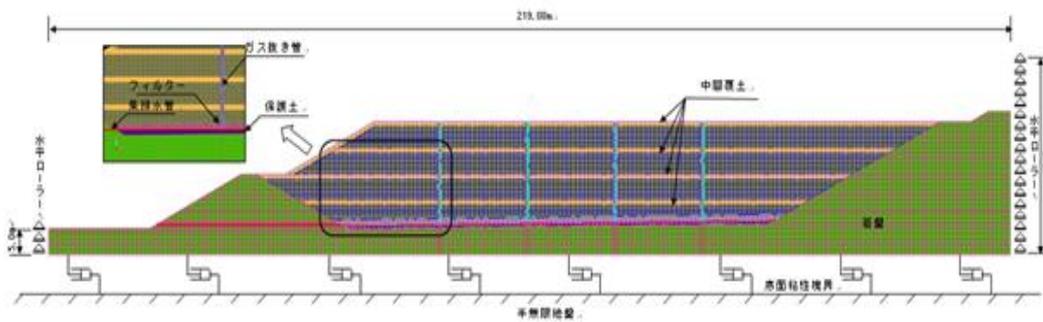


図 3-5-3 動的 FEM 解析モデル図（縦断長 219m×高さ 27.5m、1m×1m メッシュ）

表 3-5-2 地盤物性値

物性値		焼却灰	固化体	保護土	基礎地盤
単位体積重量	γ	16.0	18.2	19.0	20.0
波動伝播速度	V_s	374	1029	200	500
動ポアソン比	ν_d	0.38	0.40	0.45	0.40
動せん断弾性係数	G_d	224,000	1,930,000	76,000	500,000

振動台実験は、図 3-5-4 に示す小型振動台に搭載したせん断土層（長さ 4.6m、幅 0.4m、高さ 1.5m）の中に処分場の部分模型（従来型処分場または固化式処分場）を設置し、100gal、300gal、500gal、800gal の正弦波（4Hz、20 秒程度）を作用させた。

図 3-5-5 に実験模型の概要を示す。振動台実験は表 3-5-3 に示すように、固化体 1 ケースと焼却灰 3 ケースの計 4 ケースを実施した。

模型の縮尺は 1/10 とし、下から順に基礎地盤 5cm（硅砂 5 号締固め）、遮水工（二重シート方式）、保護土 5cm（硅砂 5 号締固め）、埋立層 40cm とした。埋立層は、焼却灰または焼却灰・飛灰固化体を概ね表 3-5-2 に示す単位体積質量になるように締め固めて作製した。なお、図 3-5-2 に示すように FEM 解析モデルでは、実験模型の埋立層よりも上にも埋立層（実大層厚＝焼却残渣 4m×3 層＋中間覆土 1m×3 層＋覆土 1m＝16m 参照）が存在するが、今回の実験ではそれらを見捨てている。また、本実験は従来式処分場と固化式処分場の比較を主目的としているため、厳密な相似則は満たしていない。

集排水管及びガス抜き管には市販の高密度ポリエチレン管（直管、内径 75mm 外径 90mm 及び内径 20mm 外径 27mm、 $E_{50}=1.0 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ ）を使用し、熱溶着にて逆 T 字型に剛接合した。これらの管の周囲に設置するフィルター材には 5～15mm の碎石を使用し、フィルターの形状寸法は一般的な最終処分場の仕様に準じて決定した。

計測項目は、図 3-5-5 に示すように、加速度（振動台、埋立層）、水平変位（振動台、埋立層、ガス抜き管上端）、ひずみ（遮水シート、集排水管、ガス抜き管）とした。

水平変位はレーザー変位計で測定した。

ひずみは遮水シート、集排水管、ガス抜き管にひずみゲージを貼って測定した。埋立層表面の沈下量は、加振前後に埋立層表面の高さをコンベックスで測定して算出した。

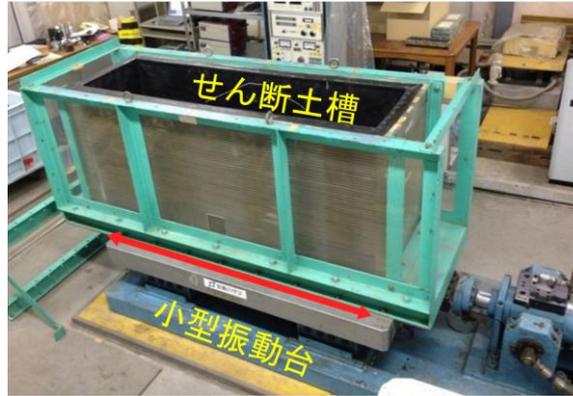


図 3-5-4 小型振動台とせん断土槽

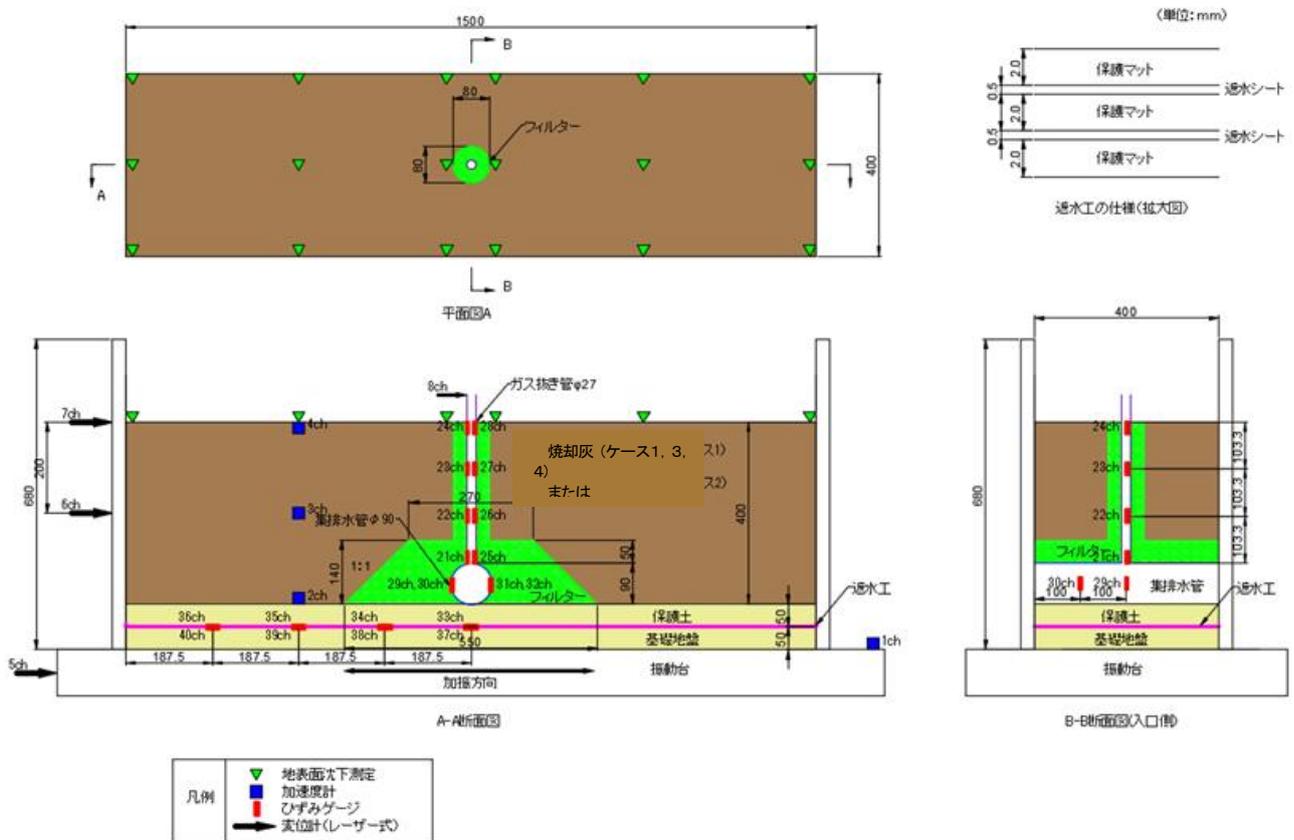


図 3-5-5 振動台実験模型

表 3-5-3 振動台実験ケース一覧

ケース	配合			水粉体比 W/P (%)	灰採取から 模型製作 までの 経過日数	試験後のシウォールサンプリング結果		
	粉体(P)の 乾燥質量比(%)					模型作製 からの 材齢(日)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)
	焼却灰	飛灰	セメント					
1 (焼却灰σ 21)	100	-	-	30	16	21	1.52	1.15
2 (固化体σ 28)	67.5	22.5	10.0	20	52	28	1.80	1.40
3 (焼却灰σ 1)	100	-	-	34	5	1	-	-
4 (焼却灰σ 21)						21	1.65	1.24

注1) ケース1, 2とケース3, 4では灰の採取日が異なるが、模型作製までの期間は灰をペール缶に入れ蓋をして保管した。
 注2) 焼却灰、飛灰には自硬性があるため、模型作製直前にペール缶より取り出して十分にほぐしてから使用した。
 注3) ケース4は、ケース3(材齢1日)で加振した模型を、材齢21日で再加振した。

4. 結果及び考察

4.1 焼却灰及び飛灰の物理化学的性状

焼却残渣固化体作製に用いる試料（焼却灰、飛灰、セメント及び混和材）の基本的な性状として図 4-1-1 に真密度（ケース A～H）、図 4-1-2 に含水率（ケース A～H）、図 4-1-3 に強熱減量及び熱灼減量（ケース A～H）、表 4-1-1 に蛍光 X 線分析で得られた元素組成（ケース A～F）、図 4-1-4 に X 線回折分析で得られた鉱物組成の X 線回折パターン（ケース A）、表 4-1-2 に有害物質含有量試験結果（ケース A、B、C、D、F、JLT19 に準拠）、表 4-1-3 に有害物質溶出量試験結果（ケース A、B、C、D、JIS K 0058 に準拠）を示す。表 4-1-2 及び表 4-1-3 において、上段の値は平均値、下段の値は最小値～最大値を示す。焼却灰及び飛灰の性状にはばらつきが見られた。特に含水率は差が大きく、これは、焼却灰は焼却処理後に水冷され、灰ピットに貯留されるため、水冷直後のものを採取するか、水冷後時間が経ったものを採取するかで含水率が大きく異なったためである。

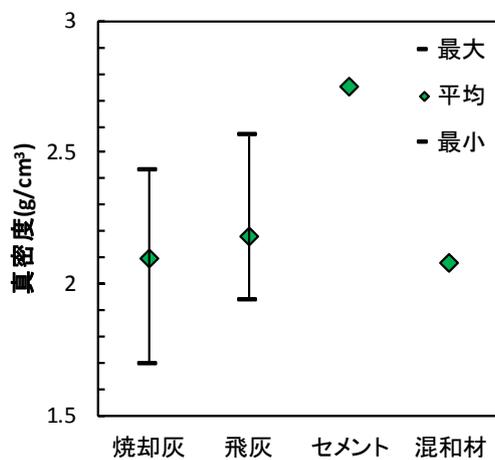


図 4-1-1 真密度

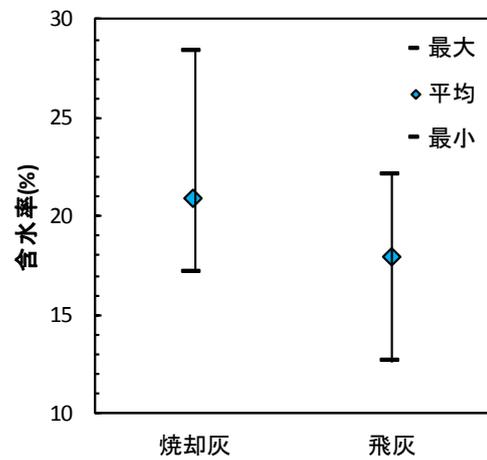


図 4-1-2 含水率

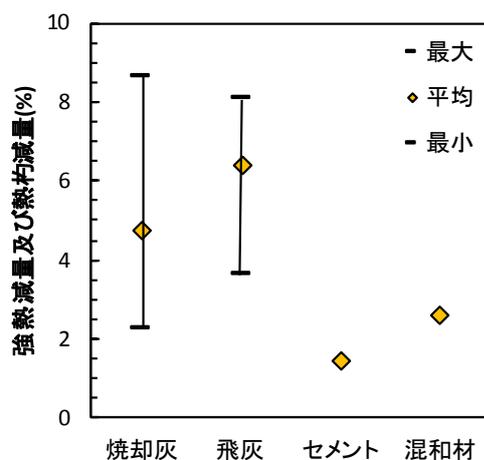
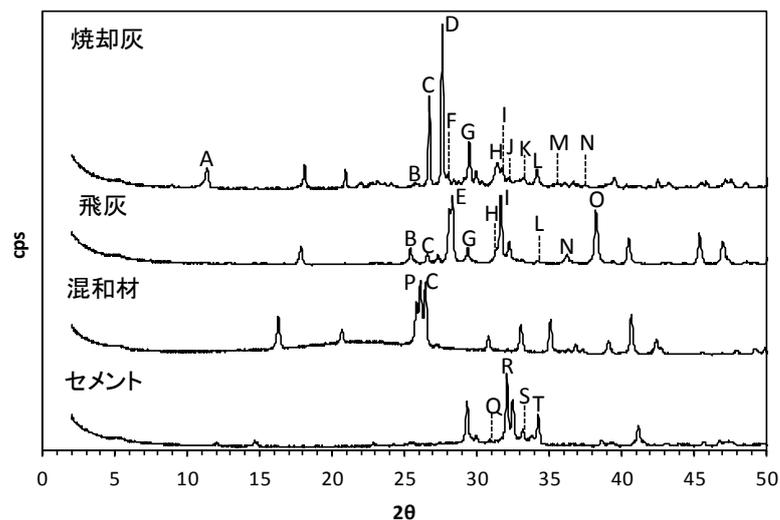


図 4-1-3 強熱減量及び熱灼減量

表 4-1-1 試料の元素組成

(単位: %)

元素	元素含有量			
	焼却灰	飛灰	セメント	混和材
SiO ₂	25.6	10.5	23.1	51.3
Al ₂ O ₃	10.9	4.3	9.3	38
Fe ₂ O ₃	5.3	0.9	2	2
TiO ₂	1.6	0.8	0.3	1.4
MnO	0.1	0.03	0.1	<0.1
P ₂ O ₅	2.7	0.9	0.2	0.7
CaO	39.1	44.4	59.1	2.1
MgO	2.4	2.5	2.8	1
Na ₂ O	1.8	4.1	0.2	0.1
K ₂ O	0.7	2.5	0.1	0.2
Cl	2.7	18.1	<0.1	<0.1
S	0.6	2.4	1	0.1
F	<0.1	0.11	<0.1	<0.1
Zn	0.46	1.36	0.03	0.01
Cu	0.15	0.07	0.02	0.01
Pb	0.09	0.28	0.01	0.01
Cr	0.04	0.02	0.01	0.01
Ni	0.01	0.00	<0.005	0.01
Ba	0.14	0.07	0.04	0.08
Sb	0.03	0.17	<0.005	<0.005
Sn	0.01	0.01	0.01	<0.005
Sr	0.04	0.02	0.04	0.2
As	<0.005	0.0025	<0.005	<0.005
V	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Cd	0.01	0.02	0.01	<0.005
Co	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005



A:Friedel's salt, B:Anhydrite, C:Quartz, D:Pseudowollastonite, E:Sylvite, F:Anorthite, G:Calcite, H:Gehlenite, I:Halite, J:Larnite, K:Hematite, L:Portlandite, M:Magnetite, N:Lime, O:Calcium chloride hydroxide, P:Mullite, Q:Dolomite, R:Tricalcium silicate, S:Tricalcium aluminate, T:Brown millerite

図 4-1-4 試料の鉱物組成の X 線回折パターン

表 4-1-2 有害物質含有量

(単位:mg/kg)

項目	鉛及び その化合物 Pb	カドミウム及び その化合物 Cd	水銀及び その化合物 Hg	砒素及び その化合物 As	セレン及び その化合物 Se	六価クロム 化合物 Cr ⁶⁺	ふっ素及び その化合物 F	ほう素及び その化合物 B	シアン化合物 CN
焼却灰	352 (310-380)	5 (2.9-8.1)	0.002 (<1.0-0.01)	0.52 (<10-2.6)	<0.1 (<1.0)	<10 (<10)	354 (160-600)	94 (38-120)	<5 (<5)
飛灰	1232 (510-1400)	45 (23-81)	0.18 (<1.0)	14.20 (<10-17)	0.10 (<1.0)	1 (<10)	2056 (880-5500)	75 (60-78)	<5 (<5)
土壌含有量基準	150以下	150以下	15以下	150以下	150以下	250以下	4000以下	4000以下	50以下

表 4-1-3 有害物質溶出量

(単位:mg/L)

項目	鉛及び その化合物 Pb	カドミウム及び その化合物 Cd	水銀及び その化合物 Hg	砒素及び その化合物 As	セレン及び その化合物 Se	六価クロム 化合物 Cr ⁶⁺	ふっ素及び その化合物 F	ほう素及び その化合物 B	全シアン CN
焼却灰	0.54 (0.31-0.71)	<0.001 (<0.001)	<0.0005 (<0.0005)	<0.001 (<0.001)	0.001 (<0.001-0.001)	0.029 (0.014-0.042)	0.49 (0.18-0.642.6)	<0.1 (<0.1)	<0.1 (<0.1)
飛灰	0.004 (<0.001-0.012)	<0.001 (<0.001)	<0.0005 (<0.0005)	0.001 (<0.001-0.004)	0.013 (0.011-0.015)	0.018 (#<0.04-0.047)	1.79 (0.64-2.6)	<0.1 (<0.1)	<0.1 (<0.1)
基準1	0.1	0.03	0.005	—	0.1	2	15	230	1
基準2	0.01	0.01	0.0005	0.01	0.01	0.05	0.8	1.0	<0.1

#共存物による測定障害のため定量下限値を変更している。

基準 1 : 一般廃棄物の最終処分場放流水排水基準 (省令) (mg/L 以下)

基準 2 : F 市下水排水基準 (mg/L 以下)

4.2 配合設計の決定手法

(1) 粉体配合、水粉体比

a. 水粉体比

焼却灰・飛灰混合物による最適水粉体比の調整状況を図 4-2-1 に示す。ケース E-3 の試験では、練り試験時における経験則に基づいて、目視及び灰混合物の触感で、各水粉体比における練り上り状況を確認したところ、水粉体比 27% の条件で最も灰混合物の仕上がりが良くなる結果となった。この結果から、最適水粉体比の判定が配合決定手法における検討要素の 1 つである事が示唆された。

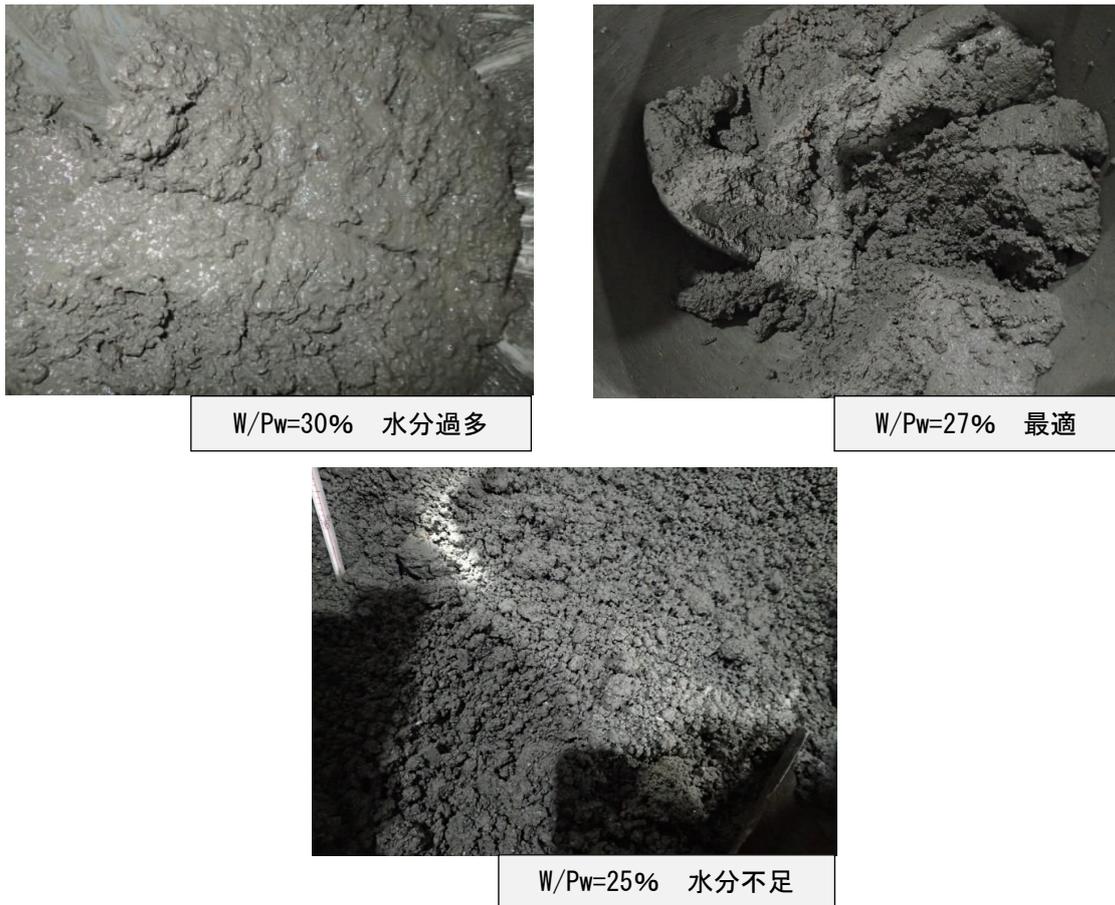


図 4-2-1 灰混合物による水粉体比の調整状況（ケース E-3）

(2) ワーカービリティ判定指標

a. 電流値測定（その 1）

目視、触感とは異なる配合決定手法の検討のため、ケース F-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。その結果を図 4-2-2 に示す。目視及び灰混合物の触感に関する知見に基づく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。

水分過多（32、33%）：練り上げ時間とともに電流値が微減傾向

水分不足（27、28%）：約 350 秒経過後に電流値が急上昇する傾向

水分適当（29～31%）：約 350 秒まで電流値が微上昇したが、その後急上昇なし

以上の結果から、セメントミキサーのトルク電流値を配合決定時の指標に用いることで、目視／触感など経験則的な知見に基づく配合決定手法では無く、自動判定／標準化などより汎用的な形で、灰固化物の配合設計手法が確立できる可能性がある。

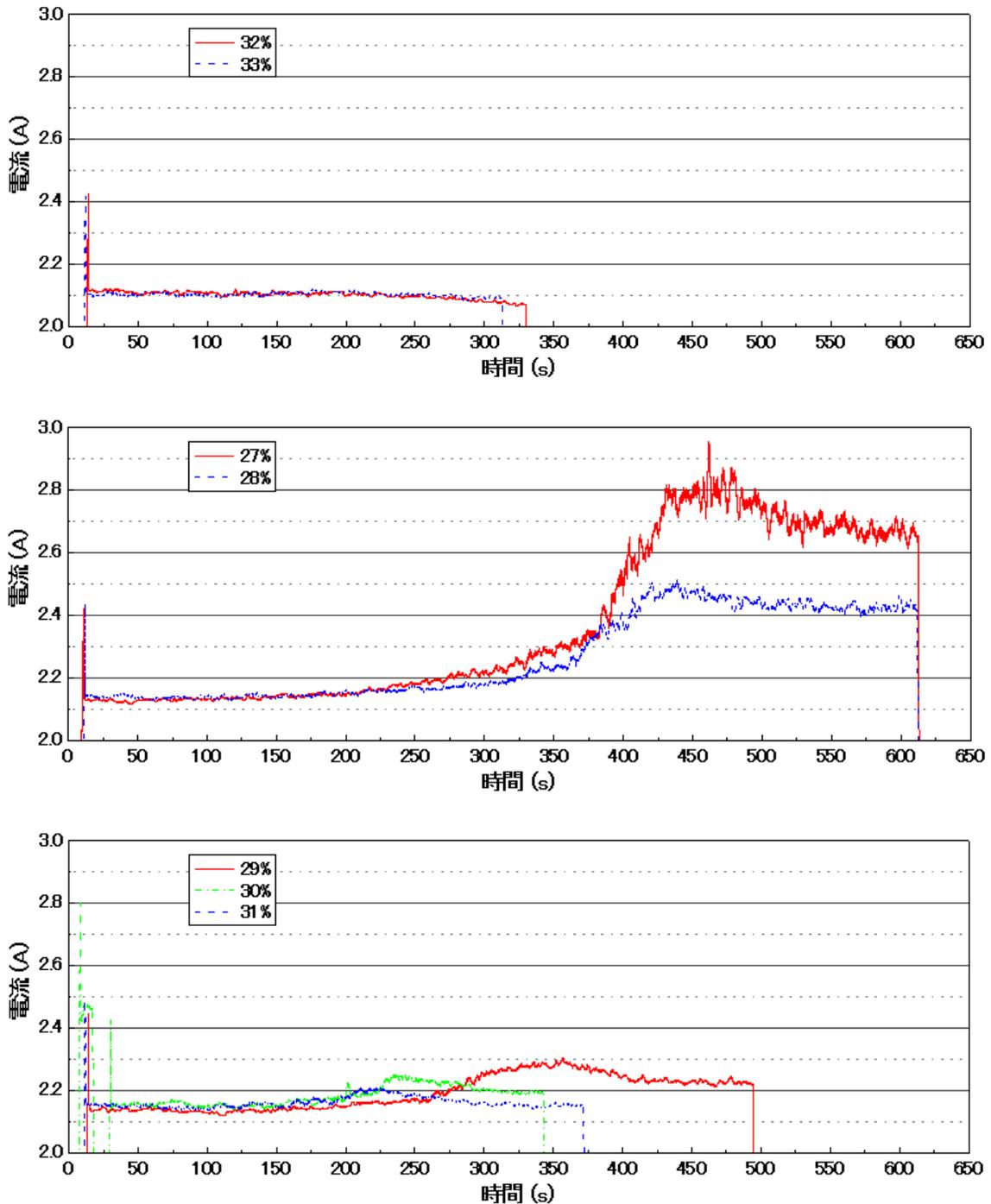


図 4-2-2 水粉体比によるモルタルミキサーの電流値の変化の相違

b. 電流値測定（その2）

ミキサー条件を変えたケース G-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の比較グラフ（1秒プロット）を示す。

ホバートミキサーのサイズ間比較による電流値傾向を図 4-2-3 に示す。運転時の電流値は 5L サイズが 2～3 (A) 程度、30L サイズが 9～12 (A) 程度となり、絶対値として大きな差が見られた。一方、試験開始後 120 秒経過時では、両者とも値のバラつきの低下及び電流値の下降傾向が見られた。また、ホバートミキサー（5L バッチ）及びパン型ミキサー（25L バッチ）の電流値傾向を図 4-2-4 に示す。運転時の電流値はホバート型（5L）が 2～3 (A) 程度、パン型（25L）が 7～8 (A) 程度となり、ホバートミキサー試験時と同様に絶対値として大きな差が見られるが、試験開始後 120 秒経過時では、両者とも値のバラつきの低下及び電流値の下降傾向が見られた。

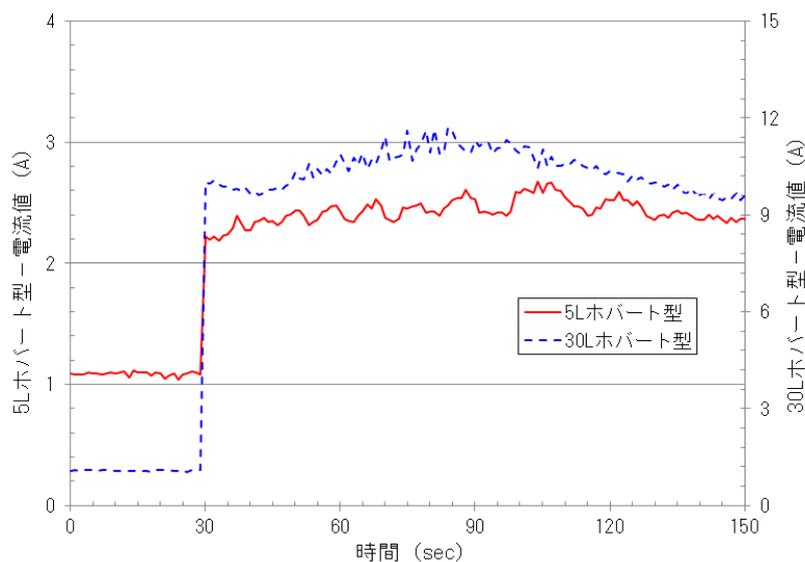


図 4-2-3 ホバート型ミキサーによる灰混合物練り試験
バッチサイズ量比較結果

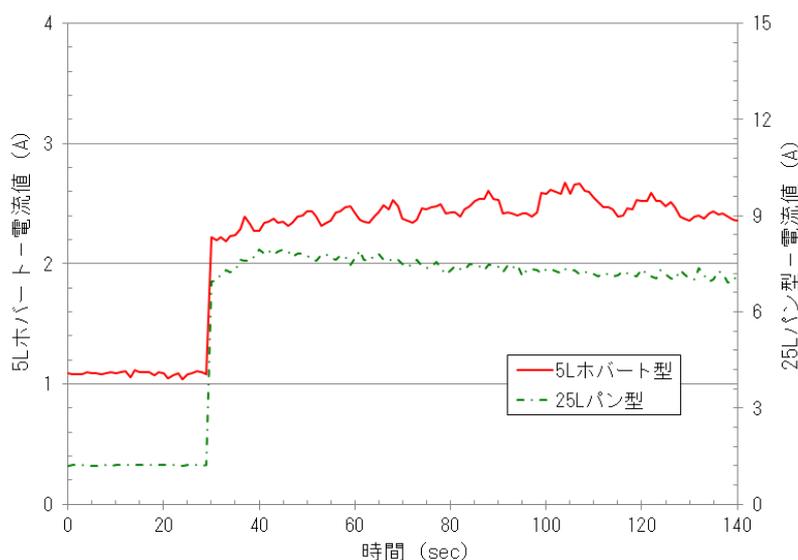


図 4-2-4 パン型・ホバート型ミキサーによる灰混合物練り試験
バッチサイズ量比較結果

以上の事から、最適水粉体比（ $W/P_w = 30\%$ ）条件にて、サイズが異なる同型及び別型のミキサーにおいても、練り試験終了前の時点では、値のバラツキの低下及び電流値の下降傾向が見られたことから、灰混合時の練り上り指標として、ミキサー利用時の電流値を測定する評価法に関する適用の可能性が示されたものと思われる。

(3) 焼却灰、飛灰及びそれらの混合物の液性限界及び塑性限界

表 4-2-1 に液性限界試験及び塑性限界試験の結果を示す。表中の塑性指数は液性限界と塑性限界の差である。液性限界を求めた際の流動曲線の決定係数は、焼却灰で 0.71、飛灰で 0.23、混合物で 0.88 であり、飛灰の液性限界の測定精度は低いと考えられた。また、塑性限界を求めた際の含水比の標準偏差は、焼却灰で 9.9%、飛灰で 4.8%、混合物で 1.6%であり、焼却灰及び飛灰についてはばらつきが大きかった。焼却灰の塑性限界及び塑性指数、飛灰の液性限界、塑性限界及び塑性指数については、実験回数を重ねた上で議論されたい。混合物の液性限界は 49.1%、塑性限界は 32.4%、塑性指数は 16.7 であった。超流体工法の応用による焼却灰及び飛灰の固化において適切な水粉体比（粉体の質量に対する水の質量の百分率。粉体とは焼却灰、飛灰、混和材及びセメントのこと。）の設定が重要である。水粉体比は一種の含水比であり、当試験の液性限界及び塑性限界と比較可能であると考えられる。本研究において焼却灰と飛灰を質量比 3:1 で混合して作製した固化体（Case C を除く）の水粉体比は 27~30%であり、この値は当試験の塑性限界（32.4%）に近い値であった。よって、固化体の作製における水粉体比の決定において、塑性限界の関連性が示唆されたが、厳密な議論は実験回数を重ねた上で議論する必要がある。

表 4-2-1 液性限界試験及び塑性限界試験の結果

項目	単位	焼却灰	飛灰	混合物
液性限界	%	48.2	57.9	49.1
塑性限界	%	41.7	56.6	32.4
塑性指数	-	6.5	1.3	16.7

4.3 焼却灰・飛灰固化体の性状

(1) 強度特性

図 4-3-1 に焼却灰・飛灰固化体の圧縮強度を示す。(a) 配合が圧縮強度に及ぼす影響（ケース A）及び(b)養生日数が圧縮強度に及ぼす影響（ケース E）についてまとめた。まず、(a) 配合が圧縮強度に及ぼす影響について、圧縮強度はセメント添加率に応じて線形的な増加を示し、飛灰のみだけでなく、焼却灰及び混和材を配合した固化体のほうが圧縮強度は高くなり 3~17N/mm² のバラ付きを示した。一方、(b) 養生日数が圧縮強度に及ぼす影響について、養生日数に応じて固化体の圧縮強度は高くなり、混和材である石炭灰フライアッシュを配合するほど圧縮強度は増加し、長期強度の大幅な増加が確認された。

図 4-3-2 に養生 28 日目の固化体の細孔分布測定結果（ケース E）を示す。累積細孔容積（図 4-3-2 (a)）の最大値である総細孔容積は 0.14~0.22 cm³/g であった。総細孔容積は、E-1 (0.22 cm³/g)、E-3 (0.14 cm³/g) 及び E-5 (0.16 cm³/g) では、混和材の配合によりさらに小さくなる傾向が見られたが、E-3 では同様の傾向は見られなかった。総細孔容積と配合の間に関係性を見出すことはできなかった。一方、細孔分布（図 4-3-2 (b)）を見ると、細孔容積のピークを示す細孔直径（最頻細孔直径）が、混和材の割合が大きくなるにつれて小さくなる傾向が見られた。最頻細孔直径は固化体内の孔隙の大きさを示す代表値であると考えられ、混和材の配合により固化体が密実になることが示唆された。

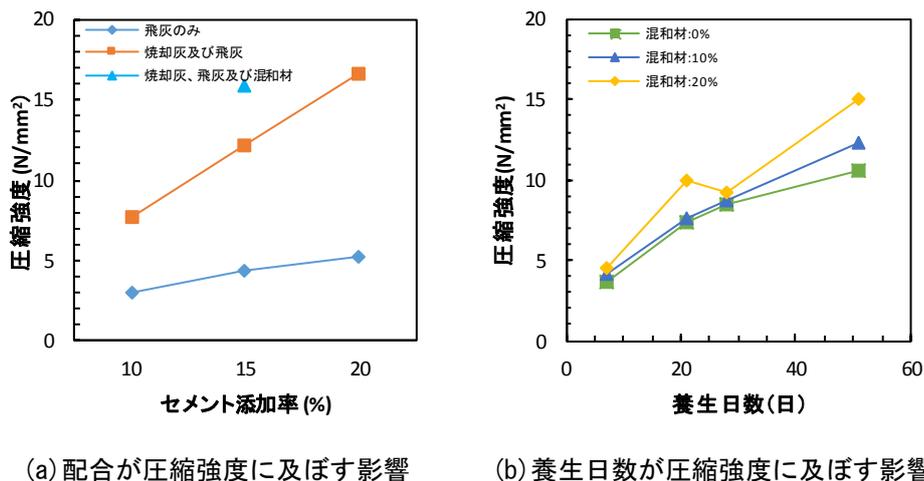


図 4-3-1 焼却灰・飛灰固化体の圧縮強度

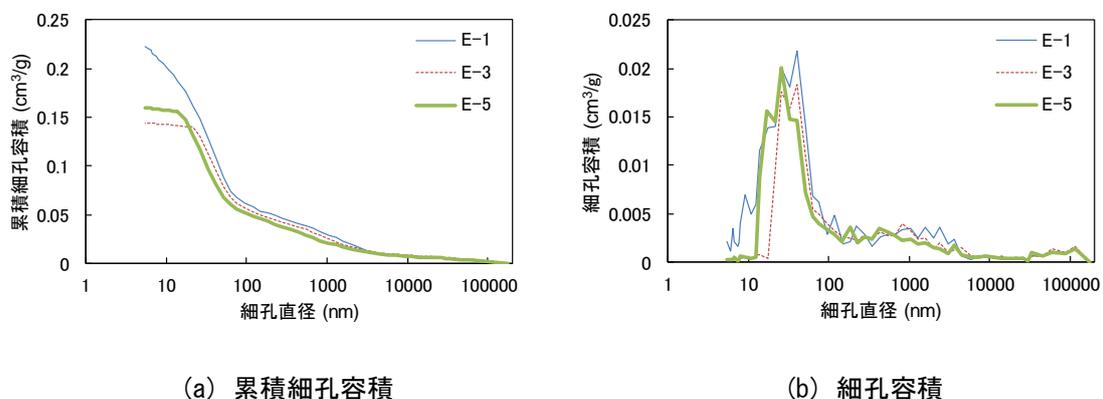


図 4-3-2 細孔分布測定結果

(2) 減容効果

表 4-3-1 に固化体の示方配合、固化体（養生 28 日）の見かけ密度及び埋立容量消費量を示す。固化体の見かけ密度を測定するとともに、本研究で用いた焼却残渣と同じ清掃工場から排出された焼却残渣の最終処分場にて現行の処分方法で埋立てられた焼却残渣層の見かけ密度を水置換法（JGS 1612）により実測し、従来式処分場の見かけ密度 m_0 、固化体の見かけ密度 m_s 及び示方配合により算出した固化体中の焼却残渣質量割合 a による従来式処分場の焼却残渣単位質量あたりの埋め立て容量消費量 v_0 及び固化式処分の焼却残渣単位質量あたりの埋立容量消費量 v_s を式 4.1 及び式 4.2 により算出した。

$$v_0 = \frac{1}{m_0} \quad \dots (4.1)$$

$$v_s = \frac{1}{m_s \times a} \quad \dots (4.2)$$

従来式の処分場における焼却残渣層の単位体積質量は水置換法による現場密度試験の結果 $1.28\text{g}/\text{cm}^3$ と算出され、埋立容量の 20% が覆土で消費されることを考慮すると、従来式処分における焼却残渣単位質量当たりの埋立容量消費量は $0.98\text{m}^3/\text{t}$ と算出された。図 4-3-3 に固化体の埋立容量消費量を示す。固化体の単位体積質量は $1.71\sim 1.94\text{g}/\text{cm}^3$ の値を示し、固化式処分における焼却残渣単位質量当たりの埋立容量消費量は $0.74\sim 1.10\text{m}^3/\text{t}$ 程度と算出された。固化式処分は従来式処分と比べて最大約 24% の減容効果を有し、約 1.3 倍の供用期間の延命化が可能であることを確認した。図 4-3-4 に、固化体の圧縮強度（養生 7 日目）、水、セメント及び混和材混合割合及び減容率の関係を示す。ここで減容率とは従来式処分場に対する固化式処分場の埋立容量消費量の割合である。減容率の増加に伴い、水、セメント及び混和材添加割合が減少するため、圧縮強度は減少する傾向が見られた。減容率を増加させるためには、高い圧縮強度を得る代わりに、水、セメント及び混和材添加割合を抑える必要がある。

表 4-3-1 配合表及び見かけ密度

固化体	焼却灰、飛灰及び混和材の混合比率(重量%)			セメント添加率(重量%)	示方配合(kg/m ³)					見かけ密度(t/m ³)	埋立容量消費量(m ³ /t)
	焼却灰	飛灰	混和材		焼却灰	飛灰	混和材	セメント	水		
A-1				10	0	1,096	0	122	475	1.72	0.90
A-2	-	100	-	15	0	1,042	0	184	478	1.72	0.95
A-3				20	0	986	0	247	481	1.71	1.02
A-4				10	968	323	0	143	387	1.83	0.77
A-5	75	25	-	15	920	307	0	217	390	1.83	0.82
A-6				20	874	291	0	291	393	1.89	0.84
A-7	60	20	20	15	783	261	261	230	353	1.85	0.98
B-1				10	0	1,186	0	132	435	1.71	0.87
B-2	-	100	-	15	0	1,125	0	199	437	1.75	0.89
B-3				20	0	1,066	0	267	440	1.75	0.95
B-4				10	887	296	0	132	355	1.86	0.76
B-5	75	25	-	15	848	283	0	200	359	1.88	0.79
B-6				20	806	269	0	269	363	1.89	0.84
B-7	60	20	20	15	747	249	249	220	381	1.85	1.00
C-1				10	0	1,254	0	139	404	-	-
C-2	-	100	-	15	0	1,193	0	210	407	1.79	0.85
C-3				20	0	1,131	0	283	410	1.79	0.90
C-4				10	890	297	0	132	435	1.77	0.84
C-5	75	25	-	15	844	281	0	199	437	1.79	0.88
C-6				20	800	267	0	267	440	1.79	0.93
C-7	60	20	20	15	696	232	232	205	423	1.75	1.10
E-1	75	25	-	10	955	318	0	141	396	1.92	0.74
E-2				15	920	307	0	217	390	1.94	0.77
E-3				10	878	293	130	145	383	1.90	0.82
E-4	67.5	22.5	10	15	836	279	124	219	386	1.91	0.87
E-5				10	792	264	264	147	374	1.88	0.93
E-6	60	20	20	15	747	249	249	220	381	1.90	0.98
F-1	75	25	-	10	996	332	0	148	396	1.82	0.77
F-3	67.5	22.5	10	10	905	302	134	149	365	1.84	0.84
F-5	60	20	20	10	774	258	258	143	387	1.83	0.96

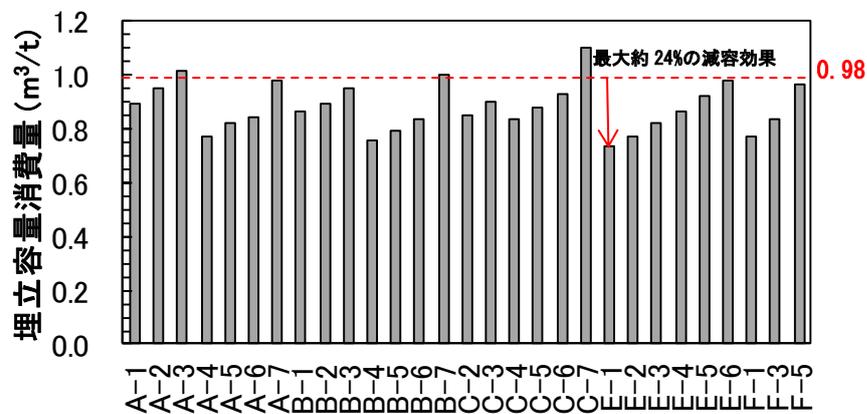


図 4-3-3 固化体の埋立容量消費量

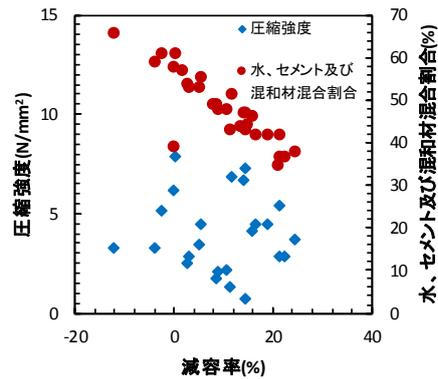


図 4-3-4 固化体の圧縮強度、水、セメント及び混和剤混合割合及び減容率の関係

(3) 有害物質の溶出特性及び透水性

焼却灰、飛灰及び固化体の Pb、Cd、Hg、As、Se 及び Cr^{6+} の含有量を測定した結果、Pb 以外については土壤汚染対策法の含有量基準を満たしたことから、Pb に注目することにした。図 4-3-5 に焼却灰、飛灰及び固化体の Pb の含有量及び溶出量を示す。固化体の Pb 溶出濃度は 0.001~0.4mg/L の値を示し、平均値 (0.04mg/L) は下水排水基準 (0.1mg/L) を満たした。固化体の Pb の含有量に対する溶出量の割合は焼却灰の 1000~1900ppm に対して、5~150ppm であり、固化による Pb の溶出抑制効果が確認された。

次に、図 4-3-6 に固化体の透水係数を示す。固化体の透水係数は 10^{-8} ~ 10^{-9} cm/s であり、固化地盤は実質不透水であることから、雨水が固化地盤内に浸透することは考えにくく、固化式処分場において浸出水は表流水のみとなるため、有害物質の溶出はほぼ起こらないと考えられた。

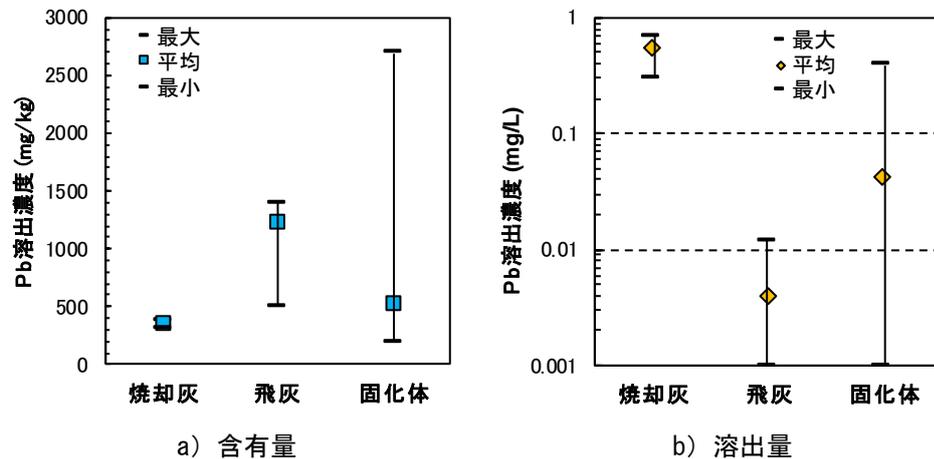


図 4-3-5 焼却残渣固化体の Pb 含有量及び溶出量

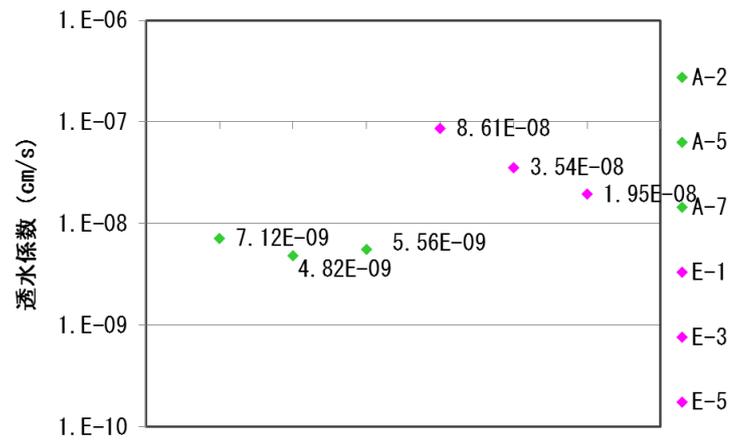


図 4-3-6 焼却残渣固化体の透水係数

(4) 吸湿、潮解性の影響

a) 固化体の吸湿・潮解に伴う物質移動

図 4-3-7 に発生した潮解水量の経時変化を示す。縦軸の L/S は固化体の初期乾燥質量に対する潮解水量の比を表す無次元量である。潮解水は試験開始直後から $L/S=0.2\sim0.3$ 程度になるまで激しく発生し、その後、緩やかな増加を示した。試験終了時の潮解水量は $L/S=0.2\sim0.33$ 程度となった。

図 4-3-8 に固化体中に含まれる焼却残渣単位質量あたりの潮解水量の比の経時変化を示す。縦軸の L/S は固化体中の焼却残渣の初期乾燥質量に対する潮解水量の比を表す無次元量である。潮解水量を、固化体中の焼却残渣の単位質量あたりの量に換算することで、3 線は漸近したことから、潮解水量は、焼却残渣の混合割合に依存する傾向があることが示唆された。

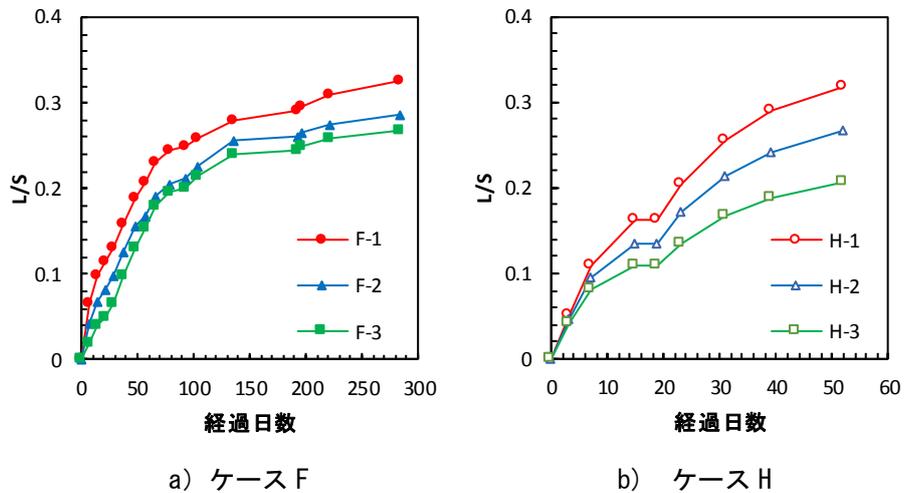


図 4-3-7 固化体の初期乾燥質量に対する潮解水量

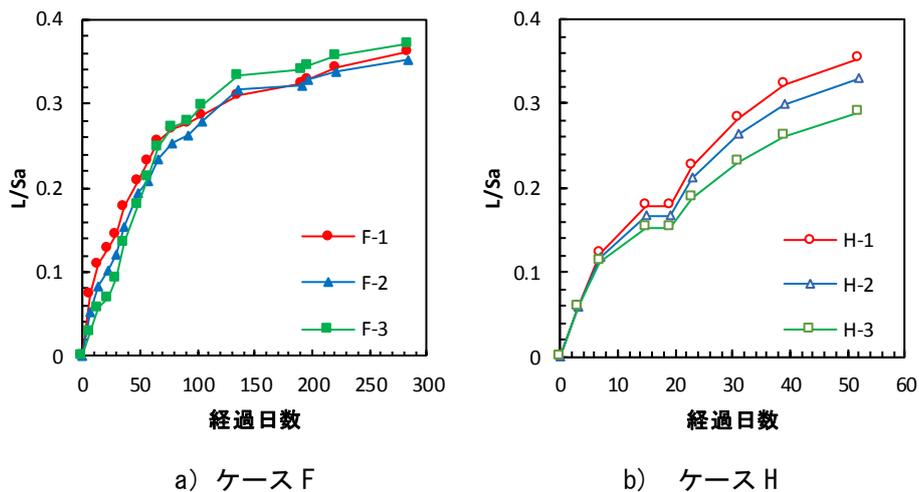


図 4-3-8 焼却残渣単位質量あたりの潮解水量

図 4-3-9 及び図 4-3-10 にケース F 及び H の潮解水中の最も濃度の高かった Cl、Na、K 及び Ca の 4 元素の濃度及び有害重金属元素 (Pb、Cd、Hg、As、Se、Cr⁶⁺) の中で最も濃度の高かった Pb 濃度の経時変化を示す。横軸の L/S は固化体の初期質量に対する潮解水量の比を表す無次元量である。全元素において濃度は試験開始直後に最大値を示し、その後、減少し続けた。ケース H の Pb 濃度 (2~9mg/L) はケース F の Pb 濃度 (0.001~0.007mg/L) に比べて非常に高いが、これは、ケース H はケース F に比べて材齢が少なく、固化による溶出抑制効果が十分に得られていないためと考えられた。

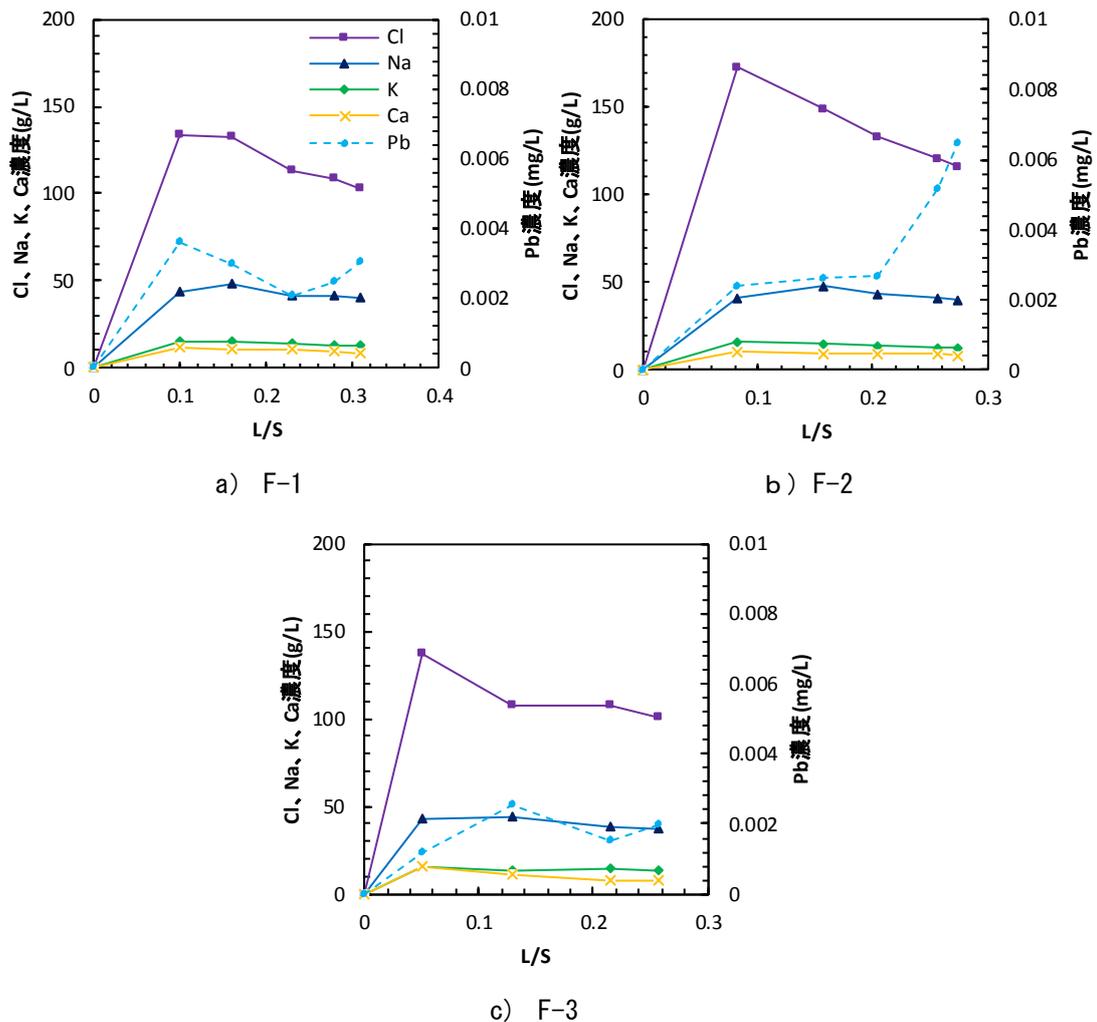


図 4-3-9 ケース F の潮解水中の Cl、Na、K、Ca 及び Pb 濃度

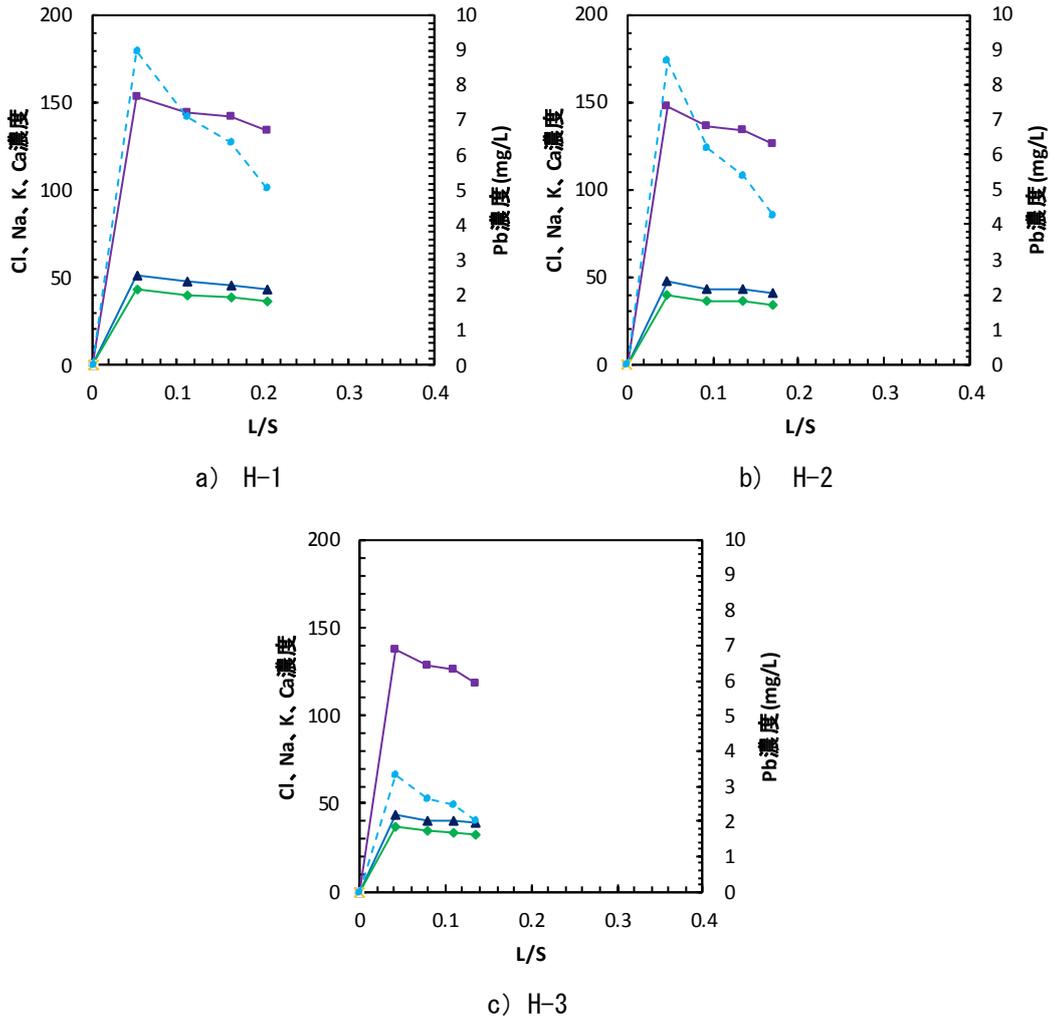


図 4-3-10 ケース H の潮解水中の Cl、Na、K、Ca 及び Pb 濃度

図 4-3-11 及び図 4-3-12 に XRF による試験前の固化体の元素含有量及び潮解水中の可溶性成分の濃度のデータから算出した主な可溶性元素である Cl、Na、K 及び Ca の固化体初期の含有量に対する流出割合の経時変化を示す。固化体から流出した Cl、Na、K 及び Ca の含有量に対する流出量の質量割合はそれぞれ 40～70、40～90、30～70、0.5～0.7%であった。吸湿・潮解に伴う元素流出は、ほとんどは Cl、Na、K が占めていることになる。

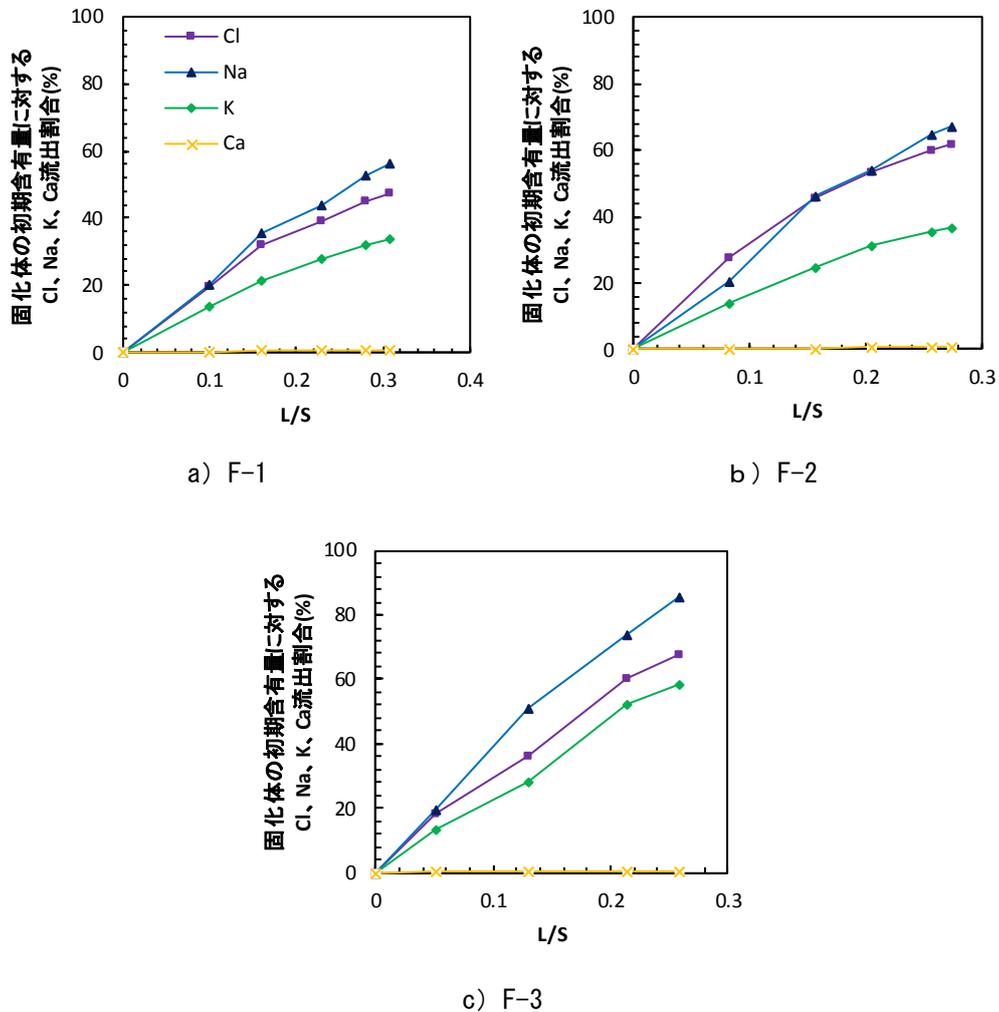


図 4-3-11 ケース F の固化体の初期含有量に対する Cl、Na、K、Ca 流出割合

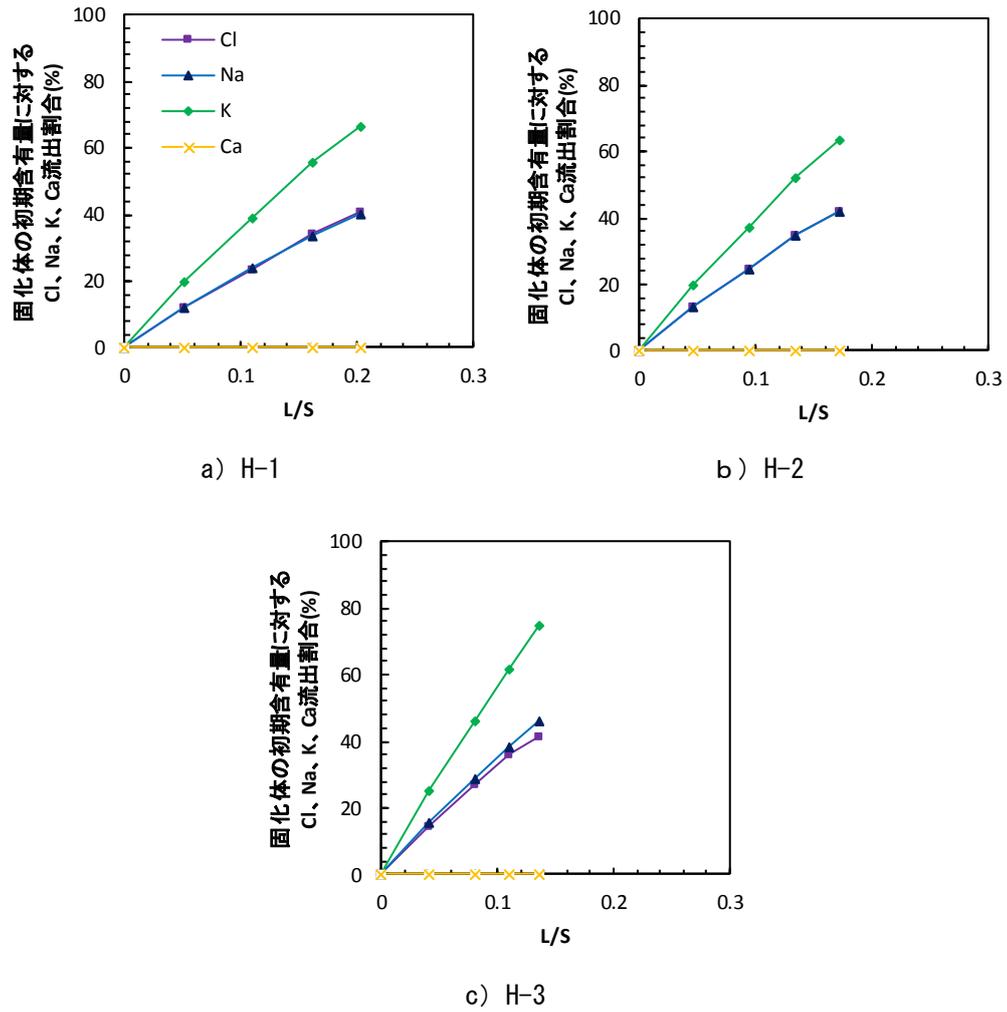


図 4-3-12 ケース H の固化体の初期含有量に対する Cl、Na、K、Ca 流出割合

図4-3-13及び図4-3-14に固化体の初期乾燥質量及び潮解水中の可溶性成分の濃度のデータから算出した主な可溶性元素であるCl、Na、K及びCaの固化体初期質量に対する流出割合の経時変化を示す。固化体から流出したCl、Na、K及びCaの質量割合はそれぞれ2.4~4.3、0.8~1.4、0.3~1.2、0.2~0.3%であった。それぞれの元素を合計すると、2~5%の可溶性成分の流出が起きたと算出された。

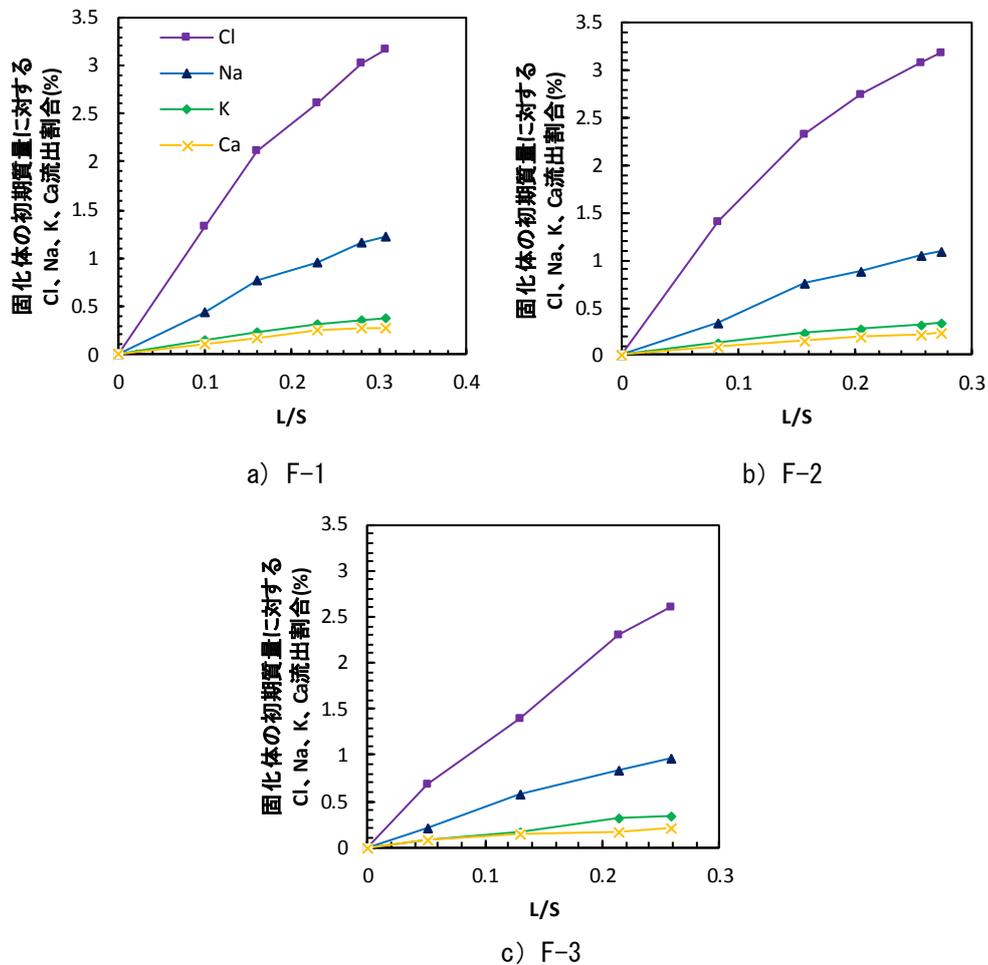


図4-3-13 ケースFの固化体の初期質量に対するCl、Na、K、Ca流出割合

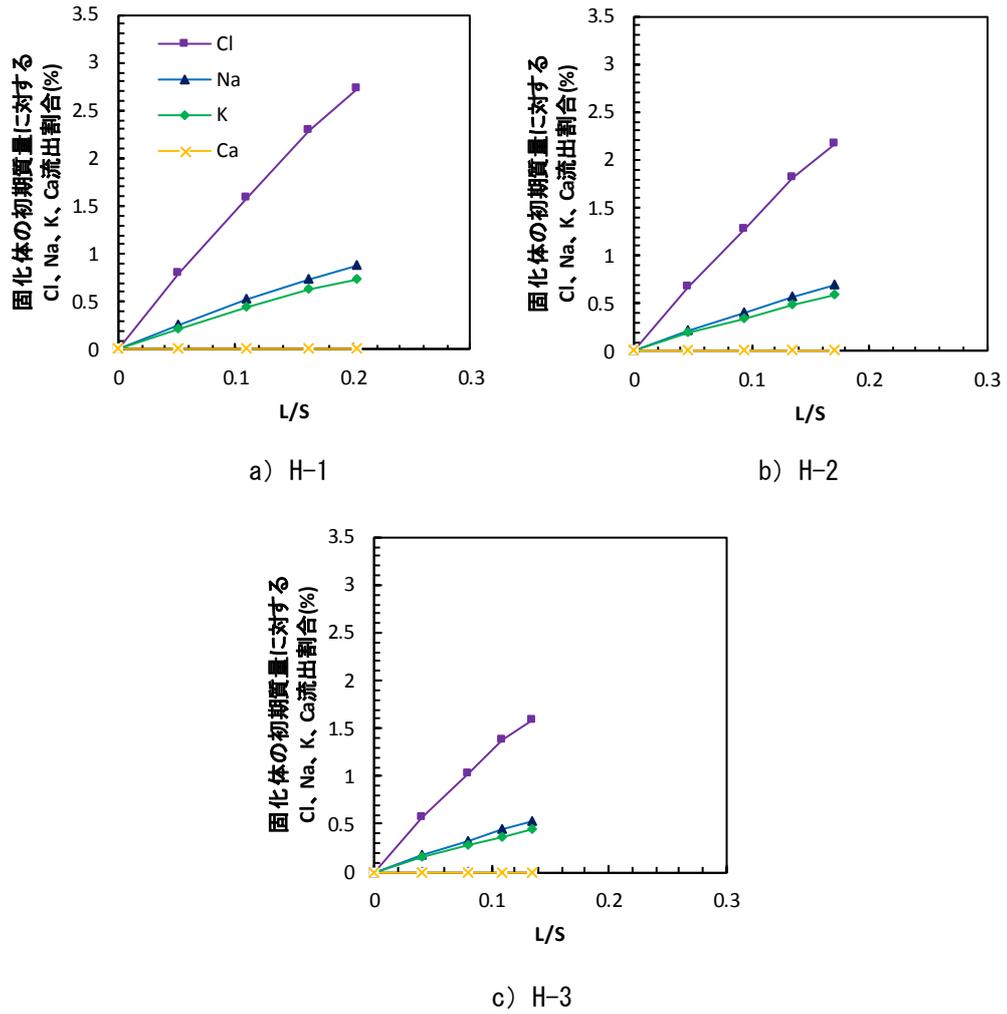


図 4-3-14 ケース H の固化体の初期質量に対する Cl、Na、K、Ca 流出割合

図 4-3-15 に固化体の質量変化を示す。固化体の質量変化の要因として 2 つ考えられ、1 つ目は吸湿に伴う質量増加であり、2 つ目は可溶性成分の流出に伴う質量減少である。質量変化において、前者が卓越している場合は増加を示し、後者が卓越している場合は減少を示していると考えられた。固化体の質量変化率は-1.7 ~ +1.0%程度であり、試験終了時の質量変化率は-1.7~-0.3%であり、全ての固化体で減少した。減少率は混和材添加率が少なく、潮解性成分及び可溶性成分を多量に含む焼却残渣の質量割合の少ない固化体ほど小さくなる傾向が見られた。可溶性成分による質量減少が吸湿による質量増加よりもより大きくなるためだと考えられた。

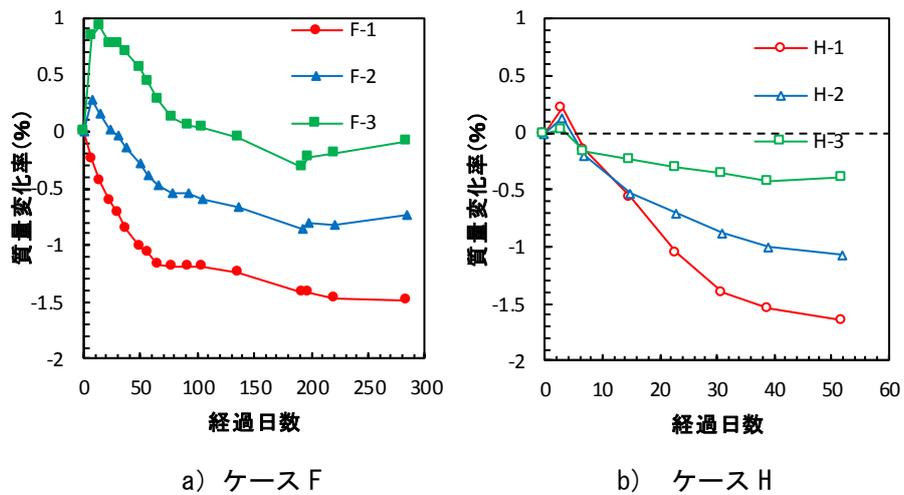


図 4-3-15 固化体の初期質量に対する質量変化率

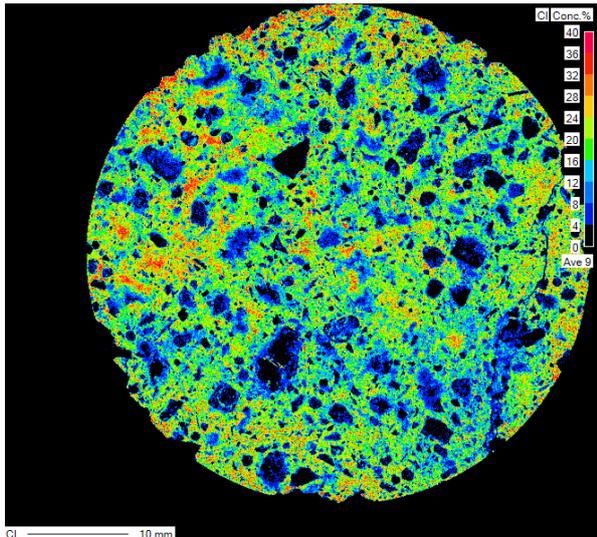
図 4-3-16、図 4-3-17、図 4-3-18 及び図 4-3-19 に、電子線マイクロアナライザ（EPMA）により分析した、固化体の吸湿・潮解に伴う固化体断面の各元素の分布の変化として、吸湿・潮解促進試験を 0 日間及び 283 日間行った固化体の分析結果を示す。WDS（波長分散型傾向 X 線分析）により分析した画像の右上の「Conc.%」は含有量であり、定量値を示し、一方、EDS（エネルギー分散型蛍光 X 線分析）法により分析した画像の右上の「Level」は、定性的な指標を示す。

C1 の分布について、WDS（波長分散型傾向 X 線分析）法により分析した。促進試験 0 日目の固化体 F-1、F-2 及び F-3 の含有量は 4～40% 程度のバラつきを示している。含有量が 0～4% の黒色部分は空隙箇所だと思われる。一方で促進試験 283 日目の固化体 F-1、F-2 及び F-3 の含有量は 16% 以下に減少し、吸湿・潮解に伴う固化体中の C1 含有量に対する流出量の割合は 40～70% 程度であったことから、色合いからも断面全体的に C1 が流出していることがはっきりと確認できたと考えられた。

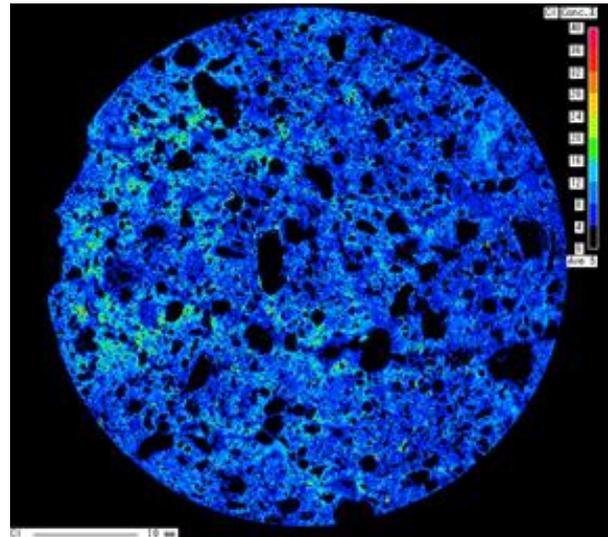
Na の分布について、EDS（エネルギー分散型蛍光 X 線分析）法により分析した。促進試験 0 日目の固化体 F-1、F-2 及び F-3 の「Level」は 20～200 程度のバラつきを示している。「Level」が 0～20 の黒色部分は空隙箇所だと思われる。一方で促進試験 283 日目の固化体 F-1、F-2 及び F-3 の「Level」は 80 以下に減少し、吸湿・潮解に伴う固化体中の Na 含有量に対する流出量の割合は 40～90% 程度であったことから、塩素色合いからも断面全体的に Na が流出していることがはっきりと確認できたと考えられた。

K の分布について、EDS（エネルギー分散型蛍光 X 線分析）法により分析した。促進試験 0 日目の固化体 F-1、F-2 及び F-3 の「Level」は 10～80 程度のバラつきを示している。「Level」が 0～10 の黒色部分は空隙箇所だと思われる。一方で促進試験 283 日目の固化体 F-1、F-2 及び F-3 の「Level」は程度以下に減少し、吸湿・潮解に伴う固化体中の K 含有量に対する流出量の割合は 30～70% であったことから、塩素色合いからも断面全体的に K が流出していることがはっきりと確認できたと考えられた。

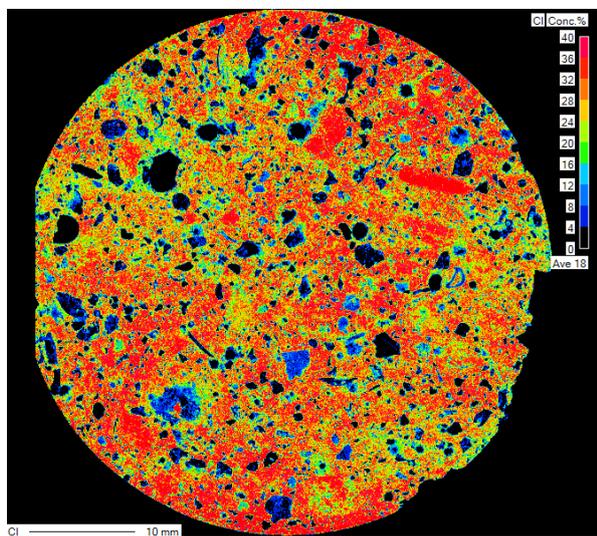
Ca の分布について、WDS（波長分散型傾向 X 線分析）法により分析した。促進試験 0 日目の固化体 F-1、F-2 及び F-3 の含有量は 3～30% のバラつきを示しており、含有量が 0～3% の黒色部分は空隙箇所だと思われる。一方で促進試験 283 日目の固化体 F-1、F-2 及び F-3 の含有量は 3～30% であり、減少傾向は見られなかった。吸湿・潮解に伴う固化体中の塩素含有量に対する流出量の割合は C1、Na 及び K に比べて 0.5～0.7% と微量であったため、分析ではその変化が確認できなかつたと考えられた。



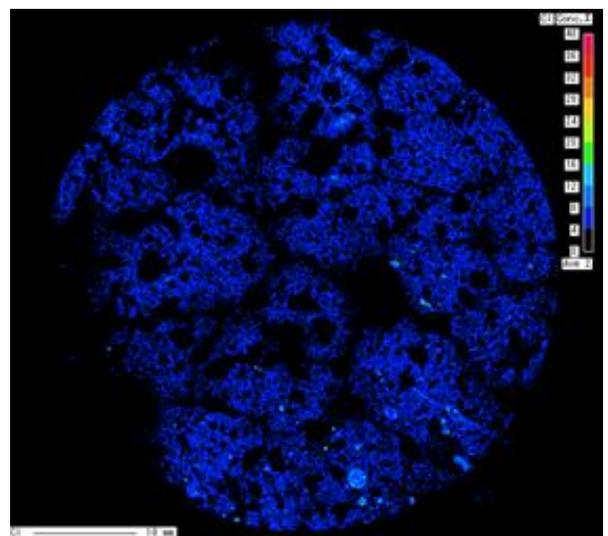
a) F-1 (促進試験 0 日目)



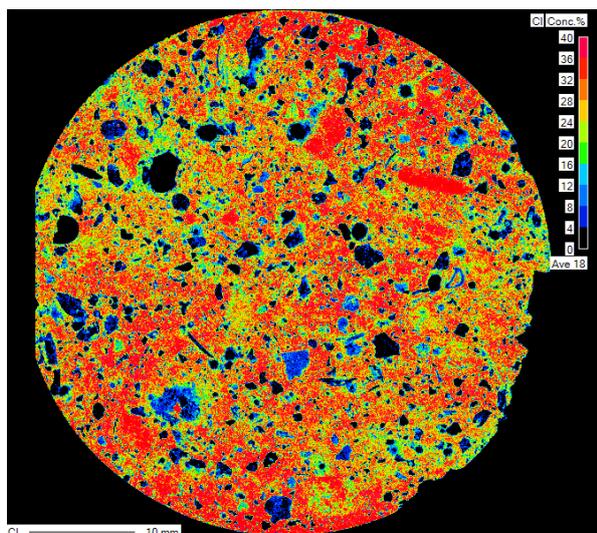
b) F-1 (促進試験 283 日目)



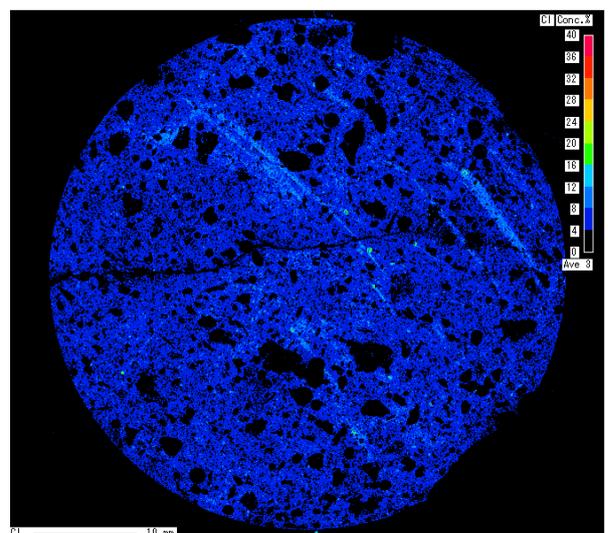
c) F-3 (促進試験 0 日目)



d) F-3 (促進試験 283 日目)

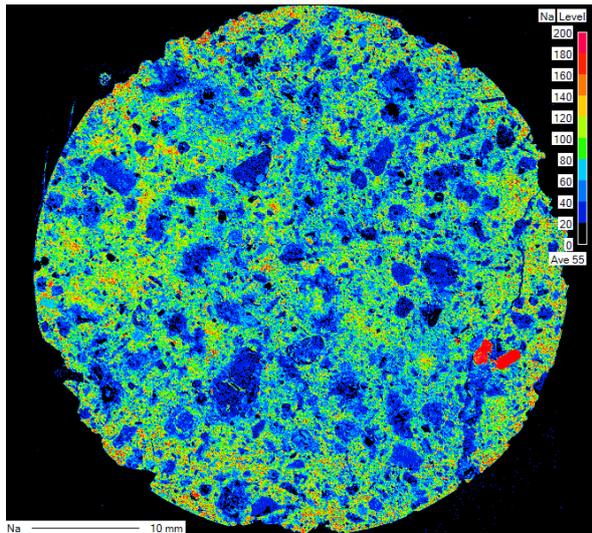


e) F-5 (促進試験 0 日目)

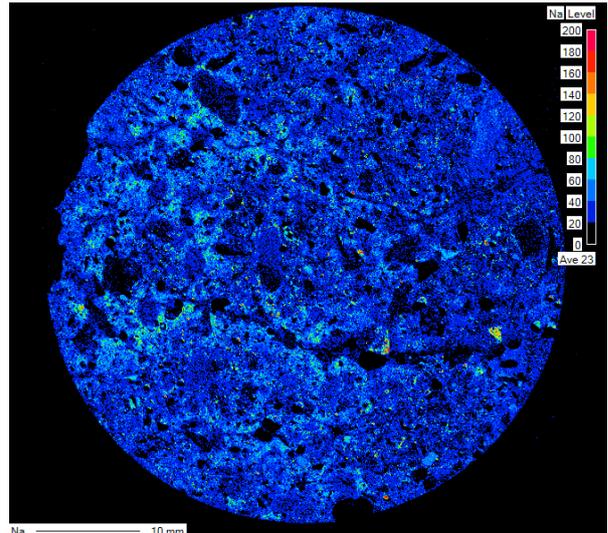


f) F-5 (促進試験 283 日目)

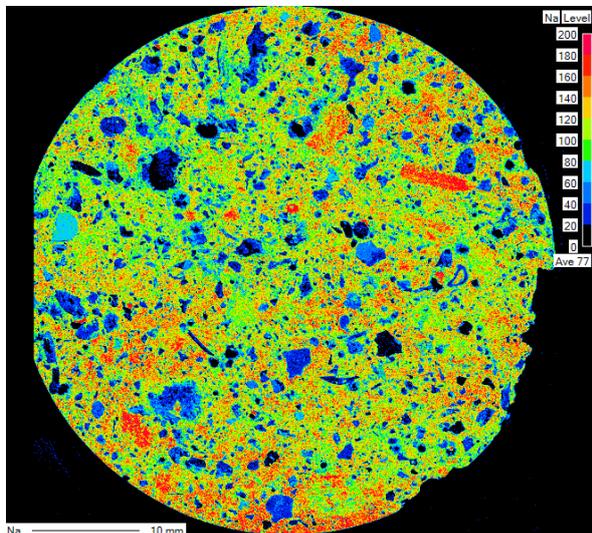
図 4-3-16 EPMA (WDS 法) による CI の固化体断面分布



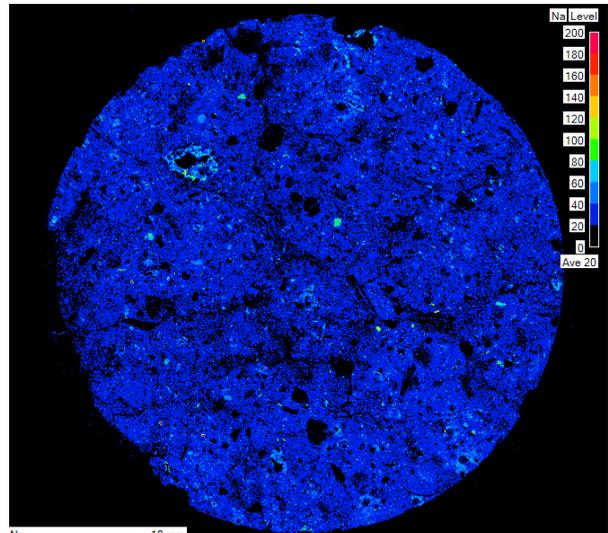
a) F-1 (促進試験 0 日目)



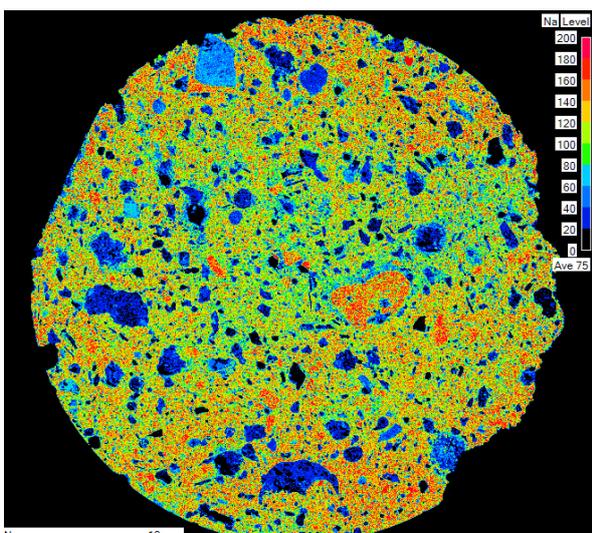
b) F-1 (促進試験 283 日目)



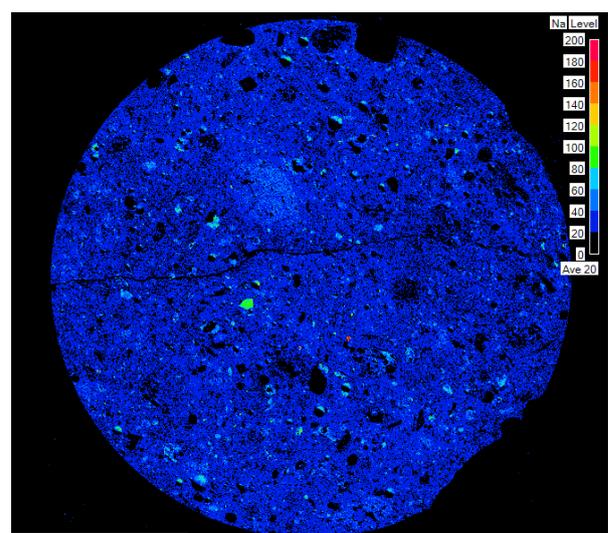
c) F-3 (促進試験 0 日目)



d) F-3 (促進試験 283 日目)

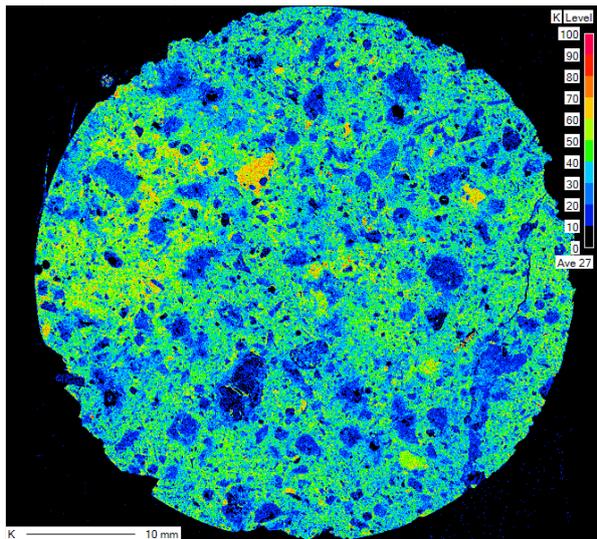


e) F-5 (促進試験 0 日目)

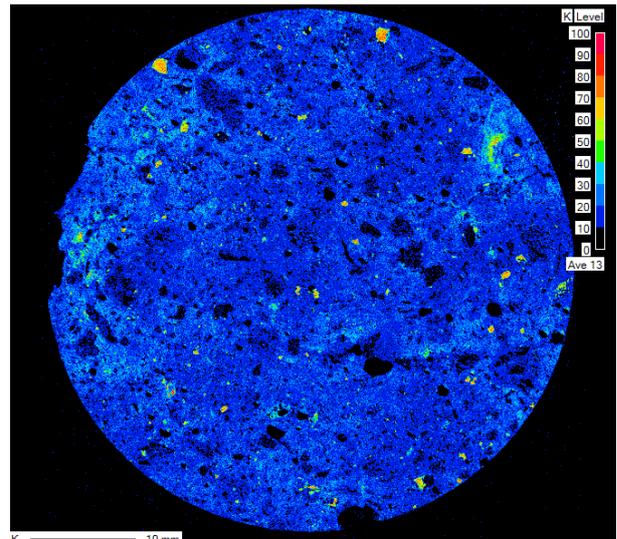


f) F-5 (促進試験 283 日目)

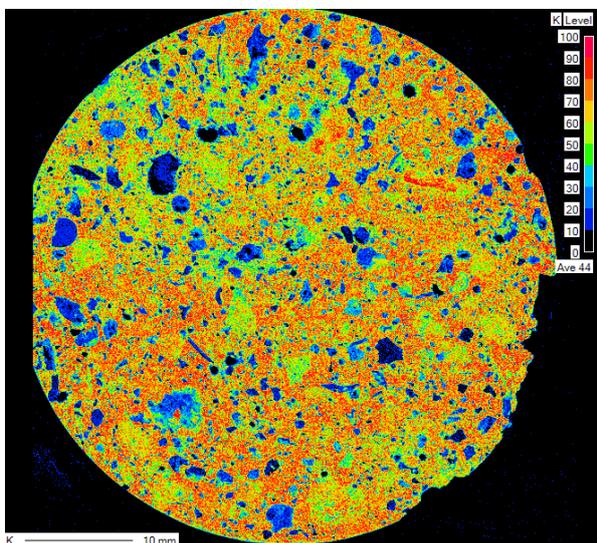
図 4-3-17 EPMA (EDS 法) による Na の固化体断面分布



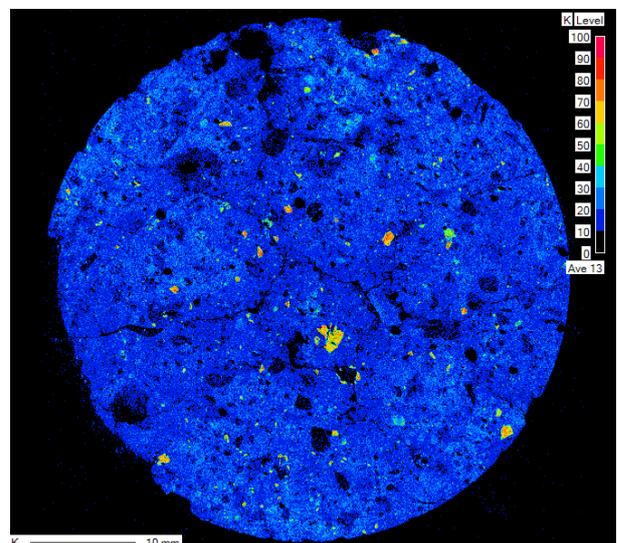
a) F-1 (促進試験 0 日目)



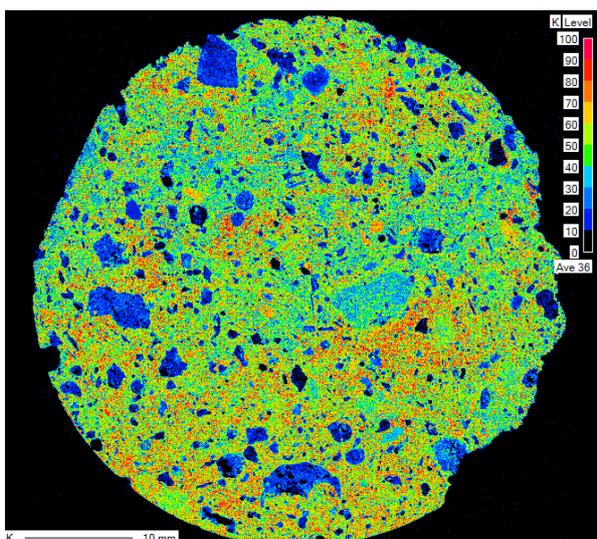
b) F-1 (促進試験 283 日目)



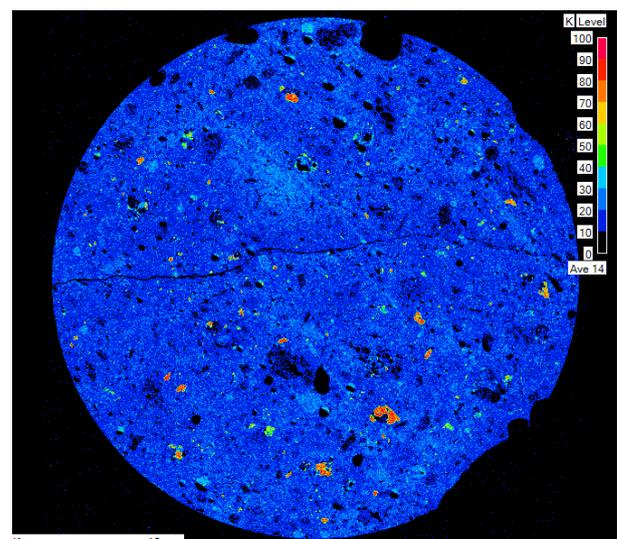
c) F-3 (促進試験 0 日目)



d) F-3 (促進試験 283 日目)

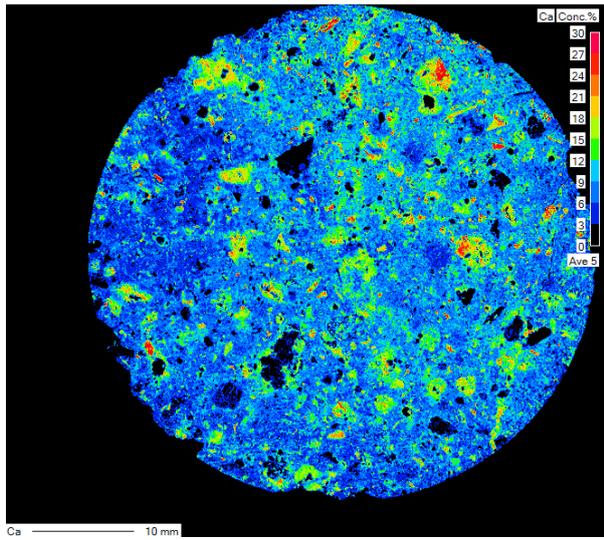


e) F-5 (促進試験 0 日目)

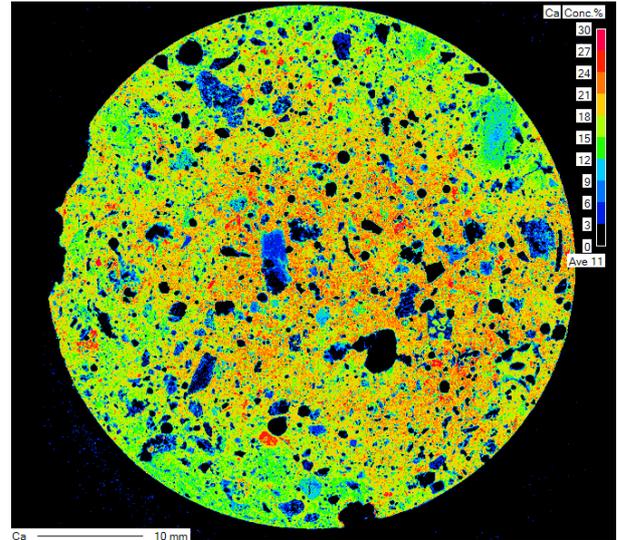


f) F-5 (促進試験 283 日目)

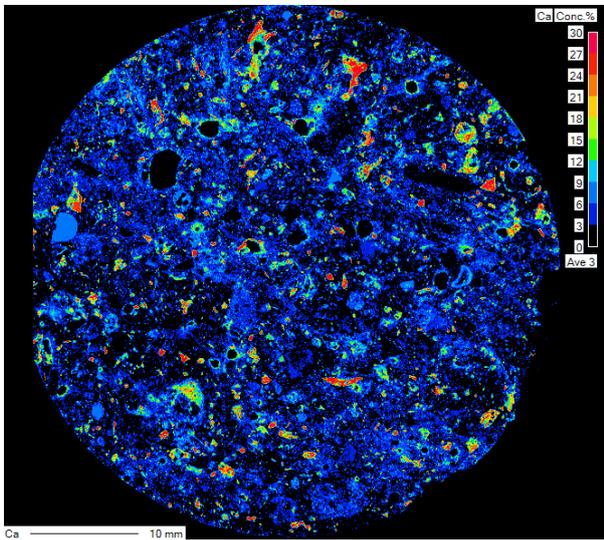
図 4-3-18 EPMA (EDS 法) による K の固化体断面分布



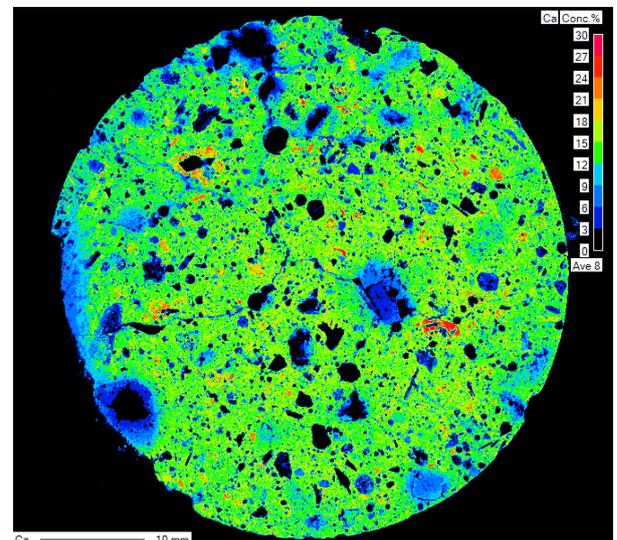
a) F-1 (促進試験 0 日目)



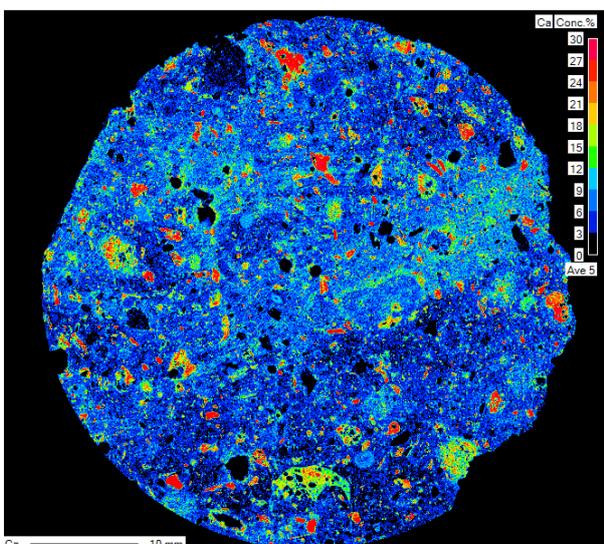
b) F-1 (促進試験 283 日目)



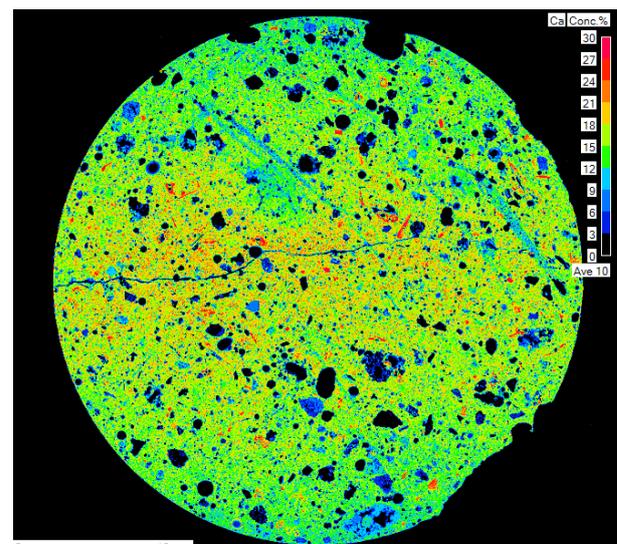
c) F-3 (促進試験 0 日目)



d) F-3 (促進試験 283 日目)



e) F-5 (促進試験 0 日目)



f) F-5 (促進試験 283 日目)

図 4-3-19 EPMA (WDS 法) による Ca の固化体断面分布

これまでに、吸湿・潮解に伴い、主な潮解性成分及び可溶性成分として、Cl、Na、K 及び Ca が固化体外へ流出していることを説明してきた。それでは一体どのような鉱物組成変化に伴い、先述した現象が起きているのかを把握するため、図 4-3-20 に吸湿・潮解に伴う固化体の鉱物組成の変化の代表として F-1 の分析結果を示す。固化体には図中に記されているような鉱物が含まれており、主な潮解性塩類として、飛灰中に含まれる Halite (NaCl) 及び Sylvite (KCl) が挙げられる。ほとんどの鉱物において、ピークの変化はあまり見られなかったが、Halite (NaCl) 及び Sylvite (KCl) については、どの固化体においても、0、52、199 日目と、日数を増す毎にピークの顕著な減少傾向が見られることから吸湿・潮解に伴い Halite (NaCl) 及び Sylvite (KCl) が流出しているのだとことが容易に考えられた。それに伴い、その他可溶性の化合物が若干溶出しているのだと考えられた。

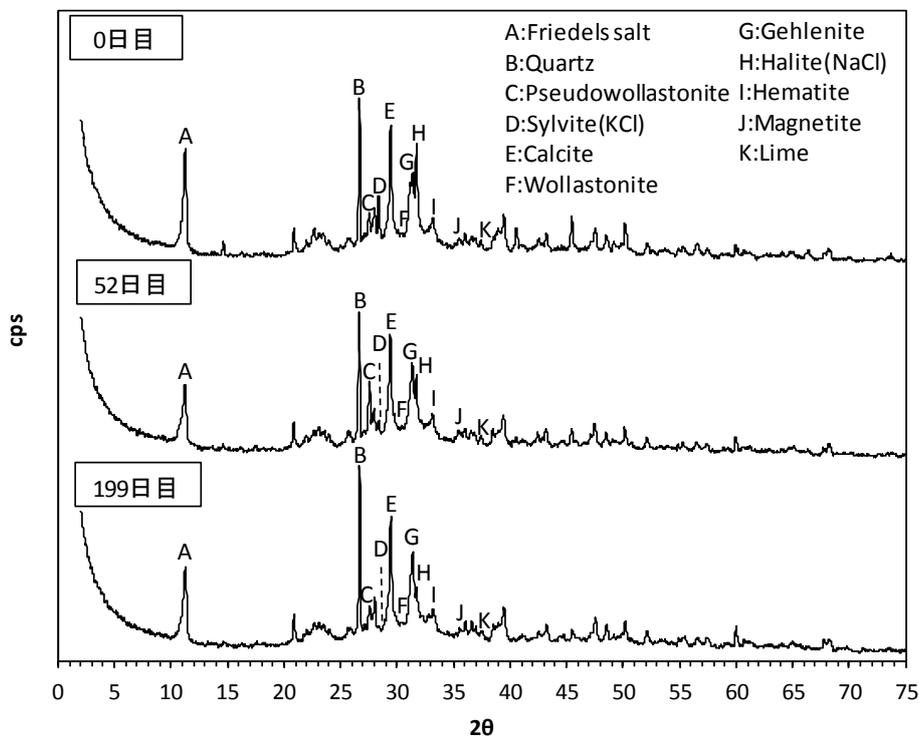


図 4-3-20 固化体 F-1 の鉱物組成

b) 潮解水の環境安全性

実際の固化式処分場を想定した場合、潮解水は浸出水となり、処分場外へ放出される。そこで、潮解水の環境安全性として、潮解水中のPb濃度及び潮解水のpHを評価した。図4-3-21に潮解水のpHを示す。潮解水のpHは6～12.5程度であり、試験経過に伴い減少傾向を示し、後に放流水質基準(5～9)を満たす結果となった。潮解水発生直後は嚴重な処理が必要となると考えられる。図4-3-22に潮解水のPb濃度を示す。ケースF(0.001～0.007mg/L)では放流水質である0.1mg/Lを下回ったが、ケースH(2～9mg/L)では大きく上回った。ケースHはケースFに比べて養生日数が非常に短いため、固化による溶出抑制効果が十分に得られていないためだと考えられた。試験経過に伴い減少傾向を示しているものの、潮解水発生直後は嚴重な処理が必要と考えられる。

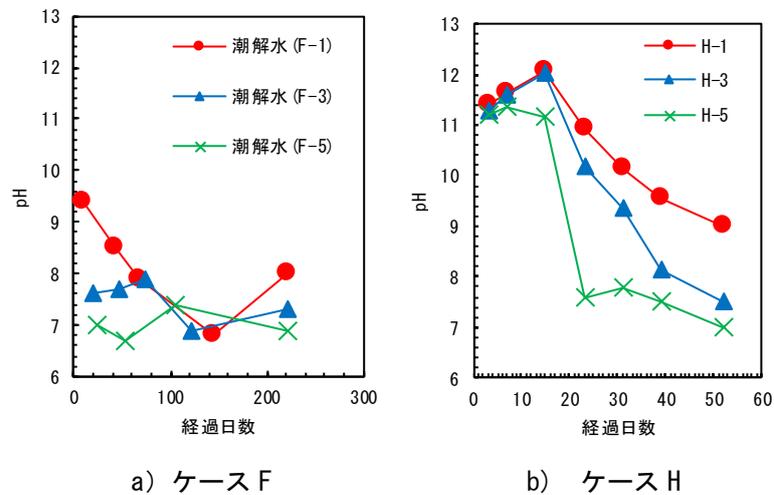


図 4-3-21 潮解水の pH の経時変化

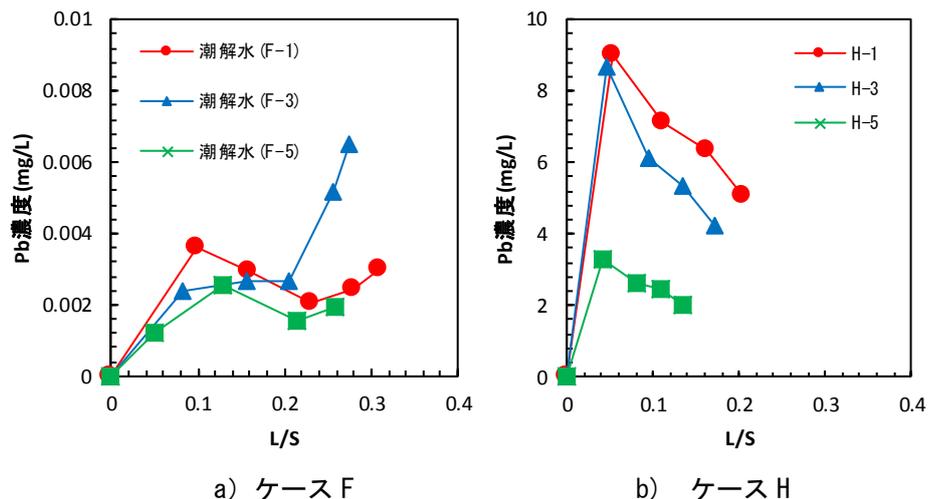


図 4-3-22 潮解水の pH の経時変化

c) 固化体の強度変化

図 4-3-23 に吸湿・潮解させた固化体及び封かん養生させた固化体の一軸圧縮強度の変化を示す。比較を行うために、吸湿潮解促進させた固化体と封かん養生させた固化体の 2 種類の固化体について把握した。ケース F の一軸圧縮強度は試験開始時の材齢がすでに 90 日と非常に大きいため、強度の大きな変化は見られず 10～23N/mm² と高く、混和材混和材添加率の違いによる差が大きかった。潮解促進試験と封かん養生させた固化体の強度の差は見られなかった。ケース H の一軸圧縮強度は試験開始時の材齢が 7 日と非常に小さいため、強度は増加傾向を示し、3～13N/mm² と低く、混和材添加率の違いによる差が見られた。潮解促進試験と封かん養生させた固化体の強度の差は見られなかった。

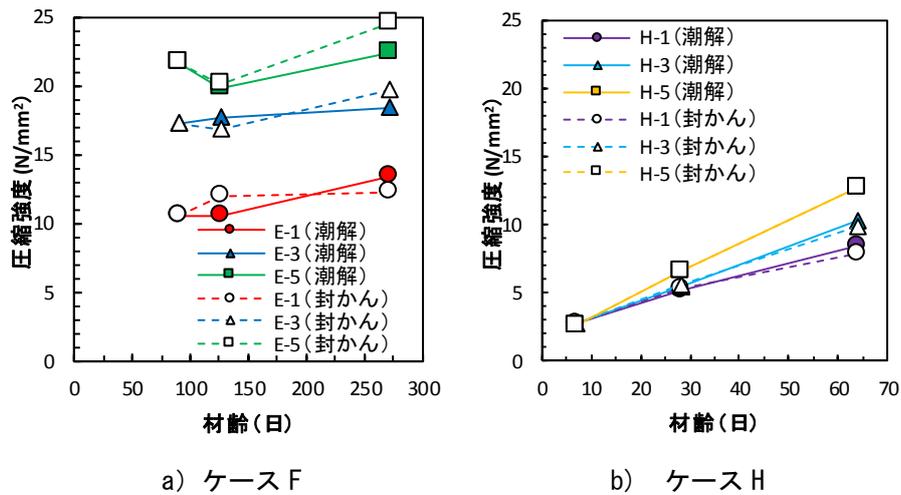


図 4-3-23 養生法の違いによる固化体の一軸圧縮強度変化

d) 針貫入試験

図 4-3-24、図 4-3-25 にそれぞれ短期曝露試験時、長期曝露試験時の換算一軸圧縮強度の測定結果を示す。全ての配合ケースにおいて局部的に強度が向上もしくは低下するなどの傾向は見られなかった。このことから、潮解効果により固化体表面のみの強度が向上し、強度の変化によるひび割れ発生などのリスクは小さいものと思われる。

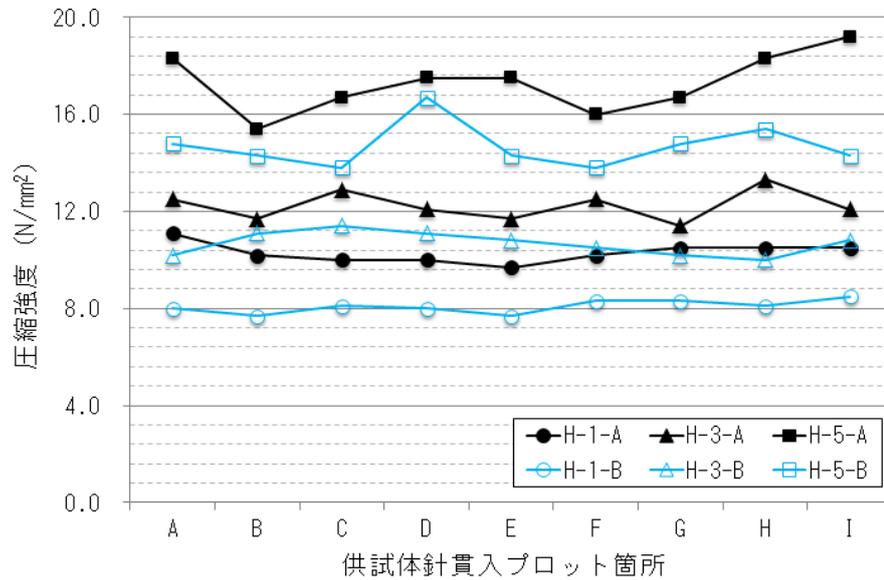


図 4-3-24 換算一軸圧縮強度（短期曝露試験）結果

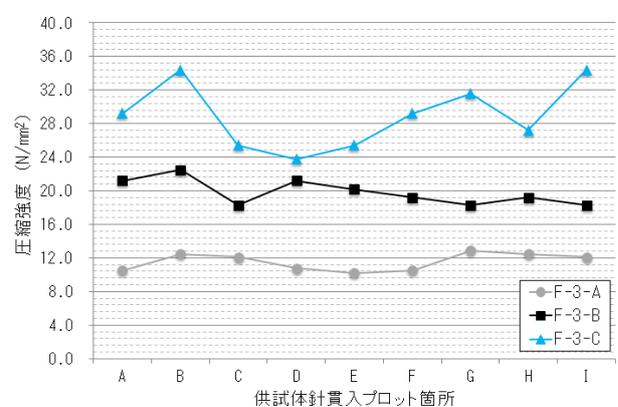
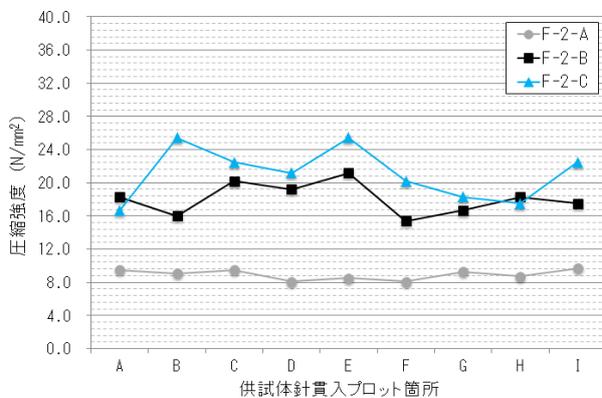
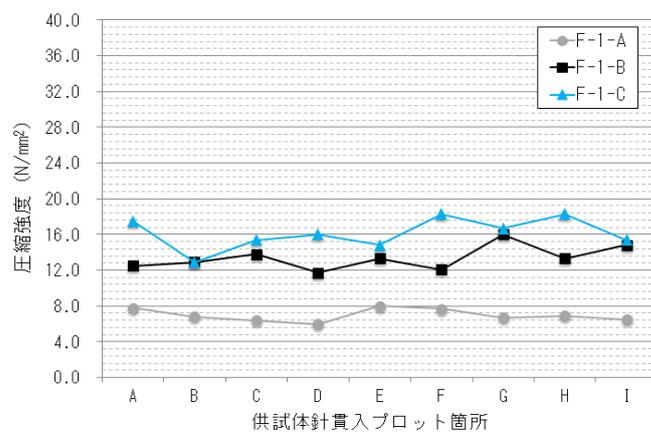


図 4-3-25 換算一軸圧縮強度（長期曝露試験）の結果

e) 固化体の孔隙構造の変化

図 4-3-26 に固化体の鉛直方向のマクロ孔隙率を示す。マクロ孔隙率は 1~8%のバラ付きを示し、吸湿・潮解促進試験に伴い一様な減少傾向を示した。これは、水分の吸湿に伴い、固化体が密実になったためと考えられた。

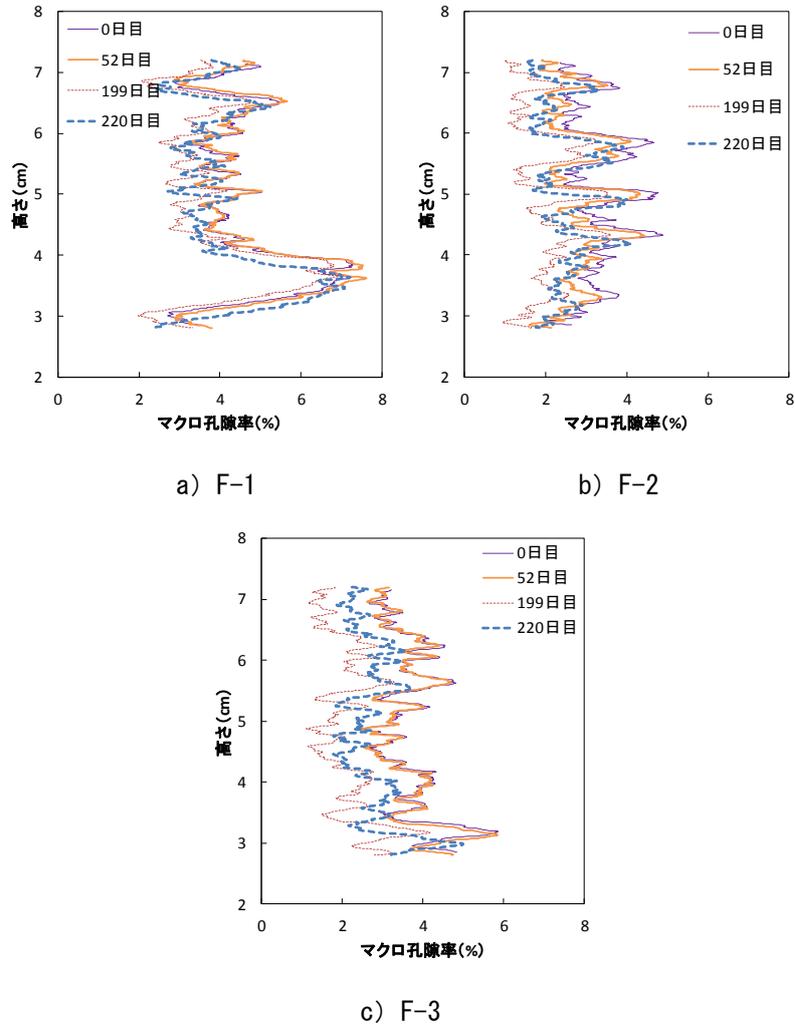


図 4-3-26 固化体の鉛直方向のマクロ孔隙率

図 4-3-27 に固化体の断面方向のマクロ孔隙率を示す。吸湿・潮解促進試験に伴い一様な減少傾向を示した。特に、固化体の表層付近である固化体の中心からの距離 2~2.5cm において、より大きな減少が見られた。

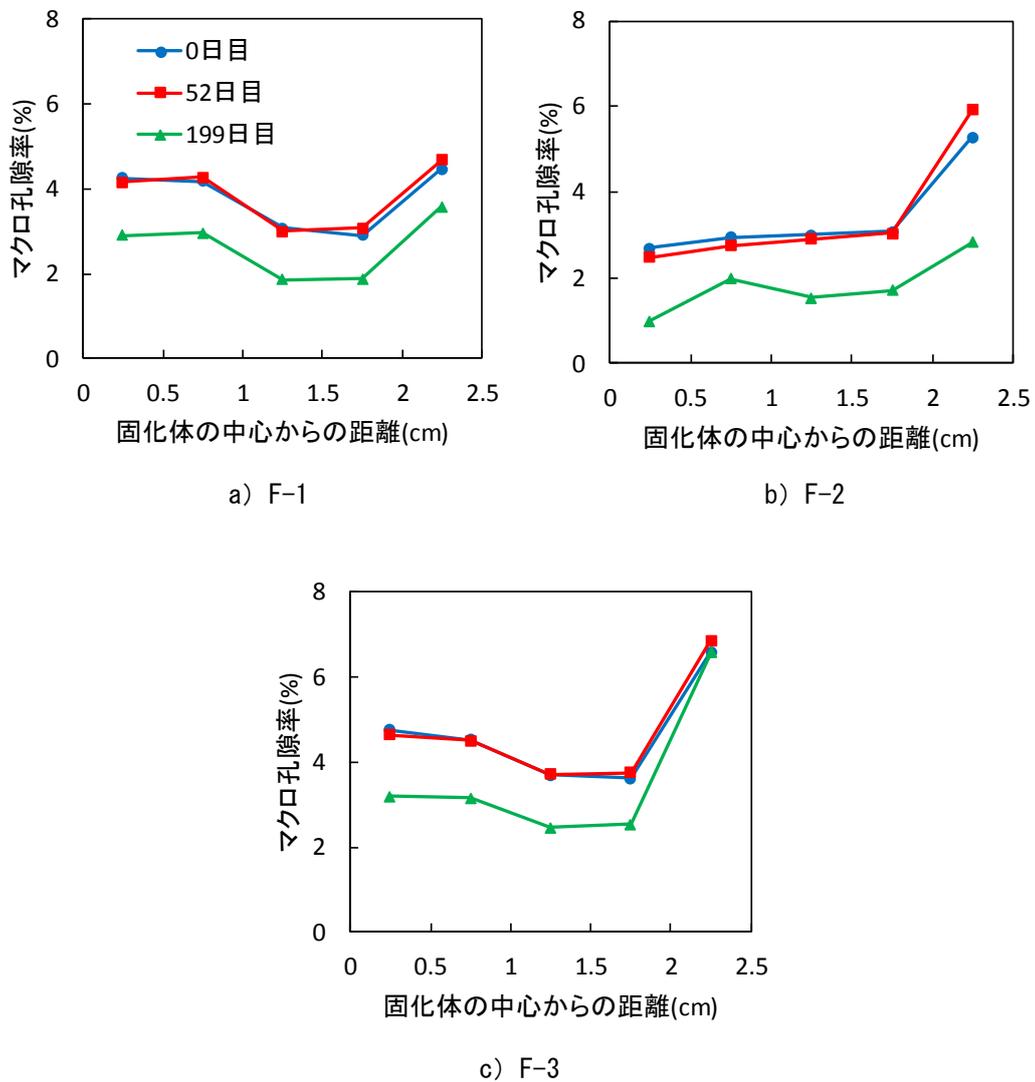


図 4-3-27 固化体の断面方向のマクロ孔隙率

図 4-3-28 に固化体の総マクロ孔隙率を示す。マクロ孔隙率は、吸湿・潮解促進に伴い 0.6~1.2%程度減少した。E-1 の 0 日目から 52 日目にかけてのみはマクロ孔隙率の増加が見られたが、その増加率は僅か 0.06%であり、孔隙の増加や連結に伴う水みちの発生は見られなかった。

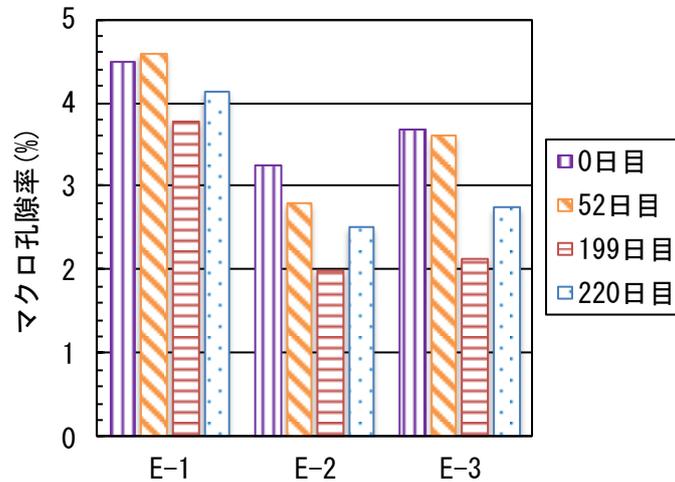


図 4-3-28 固化体の総マクロ孔隙率

図 4-3-29 に固化体 E-1 のマクロ孔隙径分布を示す。孔隙径 0.2~0.3 及び 1.0~2.0mm でピークがみられ、0.2~0.3 のマクロ孔隙が最も多く存在していた。吸湿・潮解促進試験に伴い、試験 0 から 52 日目にかけて 0.2~0.3 以下の孔隙数の減少、0.4~0.5mm 以上の孔隙数の増加が見られた。孔隙の減少は水和反応によるもの、増加は可溶成分の流出によるものと考えられた。0 から 52 日目にかけて、累積マクロ孔隙容積は約 0.05cm³増加し、マクロ孔隙率は約 0.06%増加したが、マクロ孔隙の発達及び連結による水みちの発生は見られなかった。試験 52 から 220 日目にかけては、全孔隙径において孔隙数は減少し、累積孔隙容積は約 1.0cm³減少し、マクロ孔隙率は約 1.3%減少した。

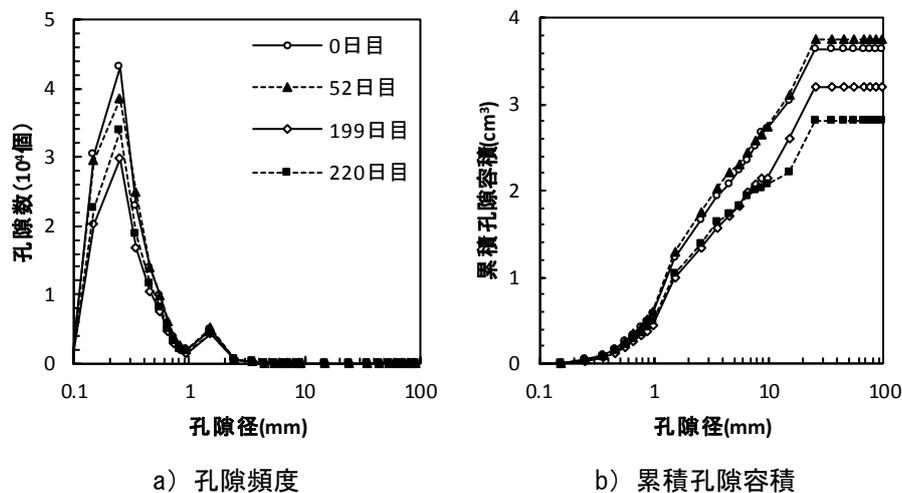


図 4-3-29 固化体のマクロ孔隙径分布

(5) 未燃焼分の腐敗及びガス発生が固化体に及ぼす影響

図 4-3-30 に試験期間中の溶液の pH、TOC 濃度及び DO 濃度の経時変化を示す。固化体を試料としたケースの pH は 11.7 前後、焼却灰を試料としたケースの pH は 12.0 前後であり、固化体の方が pH は低かった。DO は両ケースとも試験開始から 50 日目までに 4.0~5.0 mg/L の値を示し、嫌気的条件下に至らなかった。TOC 濃度は両ケースで増加傾向を示し、TOC 濃度は試験開始から 50 日目までに固化体で 60 から 90 mg/L、焼却灰で 90 から 110 mg/L に増加した。有機酸濃度は試験開始から 50 日目までに定量下限値以下を示し続けた。ガスの発生は見られなかった。メタン菌の至適 pH は 6.8~7.2 であることから、メタン菌の活性が低いものと考えられた。メタン菌は嫌気性菌であることから、DO が当実験よりも低い条件での実験による再検討が必要である。

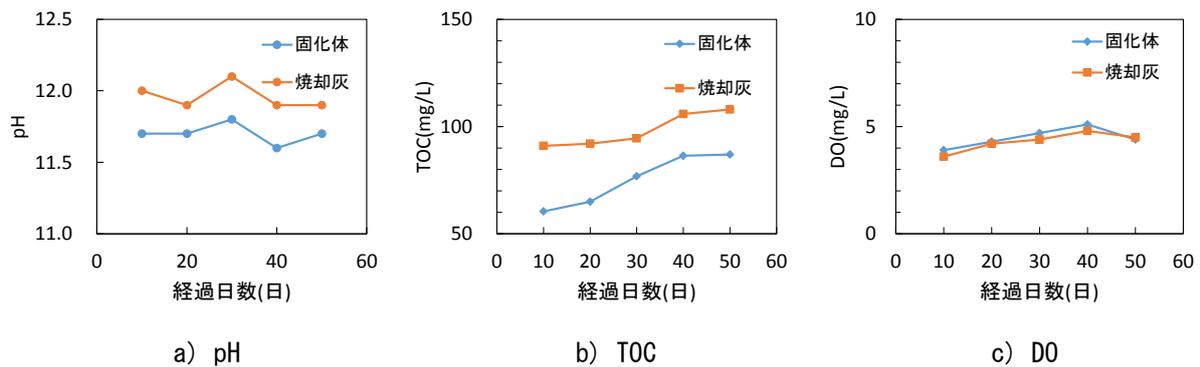


図 4-3-30 未燃焼分及びガス発生影響試験結果

4.4 焼却灰・飛灰固化体の耐久性

(1) 日常的な風・日射・降雨などの影響（屋外曝露試験）

a. ケース A-2、A-5、A-7 について

表 4-4-1 に屋外曝露試験結果を示す。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及びはく離の進行が見られた。焼却灰及び飛灰をセメント固化した A-5 においては表層の浮き上がりが見られたが、ポップアウトするほどの劣化の進行は認められなかった。一方、焼却灰、飛灰及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。

表 4-4-1 屋外曝露試験状況（ケース A）

焼却灰、飛灰、混和材、 セメントの配合	曝露日数（打設日：2014年12月2日）		
	73日	321日	776日
ケース A-2 焼却灰：飛灰：混和材 =0：100：0 セメント添加率：15%			
ケース A-5 焼却灰：飛灰：混和材 =75：25：0 セメント添加率：15%			
ケース A-7 焼却灰：飛灰：混和材 =60：20：20 セメント添加率：15%			

b. ケース E-1、E-3、E-5 について

表 4-4-2 に屋外曝露試験結果を示す。全てのケースにおいて、2、3箇所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ものも確認された。ポップアウト箇所には結晶状の塊が観察され、成分を分析すると、特に炭酸カルシウム析出の可能性が高いことが確認された。

実際の固化式処分場では本試験の供試体（角柱型：10cm×10cm×40cm）のように6面が曝露されることはなく、本試験は実際の最終処分場よりも相当に厳しい条件下で実施された試験である。今後は、実規模の固化体で屋外曝露試験を行い、同様の現象が発生するか検証が必要となる。

表 4-4-2 屋外曝露試験状況 (ケース E)

焼却灰、飛灰、混和材、 セメントの配合	曝露日数		
	28 日	148 日	559 日
ケース E-1 焼却灰：飛灰：混和材 =75：25：0 セメント添加率：10%			
ケース E-3 焼却灰：飛灰：混和材 =67.5：22.5：10.0 セメント添加率：10%			
ケース E-5 焼却灰：飛灰：混和材 =60：20：20 セメント添加率：10%			

(2) 冬季の氷点下の温度変化による凍結の影響 (凍結融解試験)

図 4-4-1 及び図 4-4-2 に凍結融解試験結果を示す。試験体の質量変化について、凍結融解サイクルを繰り返すにつれ供試体表面にスケーリング (コンクリートの表面がフレーク状に剥がれる凍害劣化) による試験体サイズ縮小化が見られ、ケース A では、飛灰のみの A-2 は凍結融解試験開始直後から劣化が進行した。また A-5, A-7 についてもそれぞれ 8 サイクル目、5 サイクル目で動弾性係数が低下し、急激に劣化が進んだことが確認された。なお、混和材 (石炭灰フライアッシュ) を添加していない A-5 よりも、混和材を添加した A-7 の劣化が促進した結果となった。

ケース E では、11 サイクル目における E-1、E-3 及び E-5 の質量変化率はそれぞれ 25、20 及び 15%であった。混和材 (石炭灰フライアッシュ) の添加率 (E-1：0%、E-3：10%、E-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。超音波伝播速度の変化率についても、混和材が配合されたものの方が超音波伝播速度の低下が起こりにくいことが確認された。特に E-1 については、1 サイクル目から超音波速度の低下率が高くなるが、E-3 及び E-5 では 5、6 サイクル目で低下率の上昇が見られた。以上の様に、混和材の添加率が高いほど、凍結融解の影響を受け難いことが確認された。

なお、実際の処分場では本試験のような急激な温度変化に曝されることはないため、固化体が急激に劣化することはないと考えられる。今後、実大規模の固化体で屋外長期曝露試験を行い、冬季間の氷点下以下の温度環境下での影響を確認することが必要である。

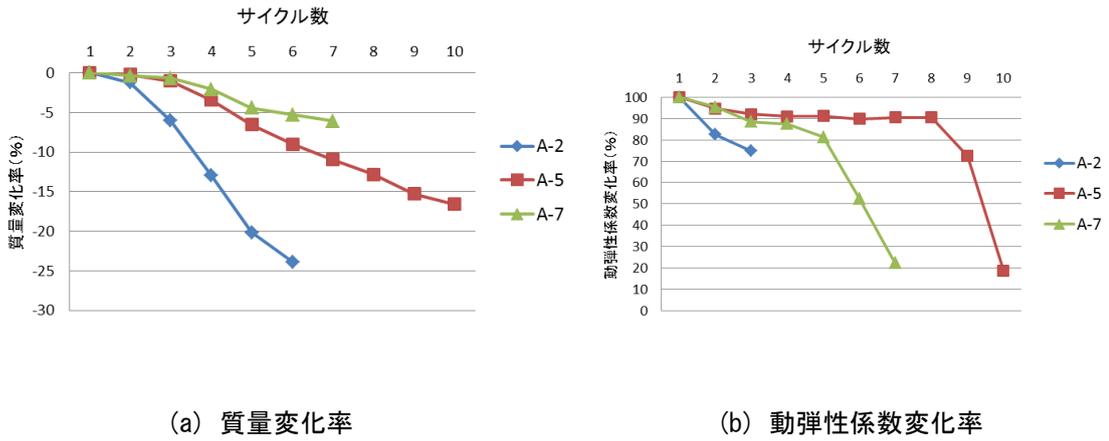


図 4-4-1 凍結融解試験結果（ケース A）

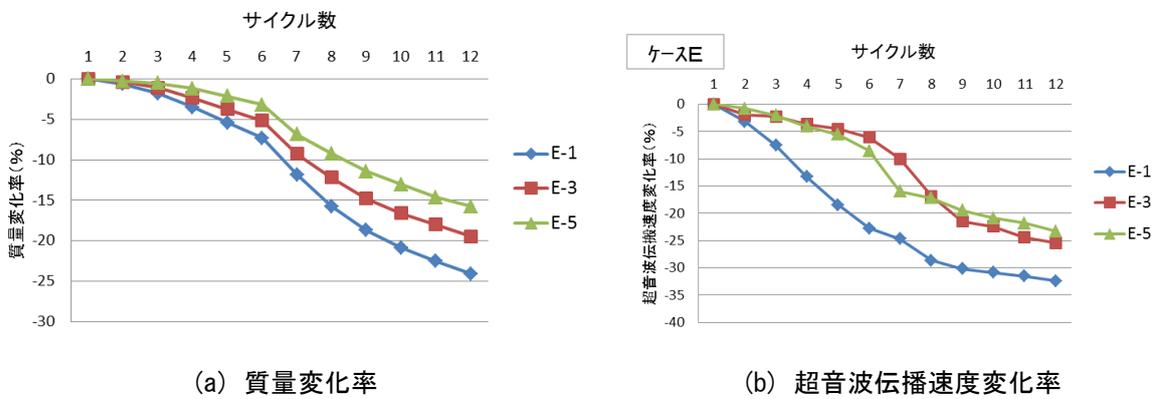


図 4-4-2 凍結融解試験結果（ケース E）

(3) 降雨、日射による湿潤・乾燥が繰返された場合の影響（乾湿繰返し試験）

図 4-4-3 に乾湿繰返し試験結果を示す。質量の変化は、2 から 4 サイクル目でケース E-1、5 がともに減少から増加傾向を示し、E-3 については減少が漸減する結果となった。また、超音波伝播速度変化率については、3 ケースともに 2 から 4 サイクル目を境に変化率が低下する傾向となり、いずれも凍結融解試験結果と異なる傾向を示した。これは、乾湿繰返し状態が高温湿潤状態での養生に似た作用を成し、水和反応が促進したためと推測される。

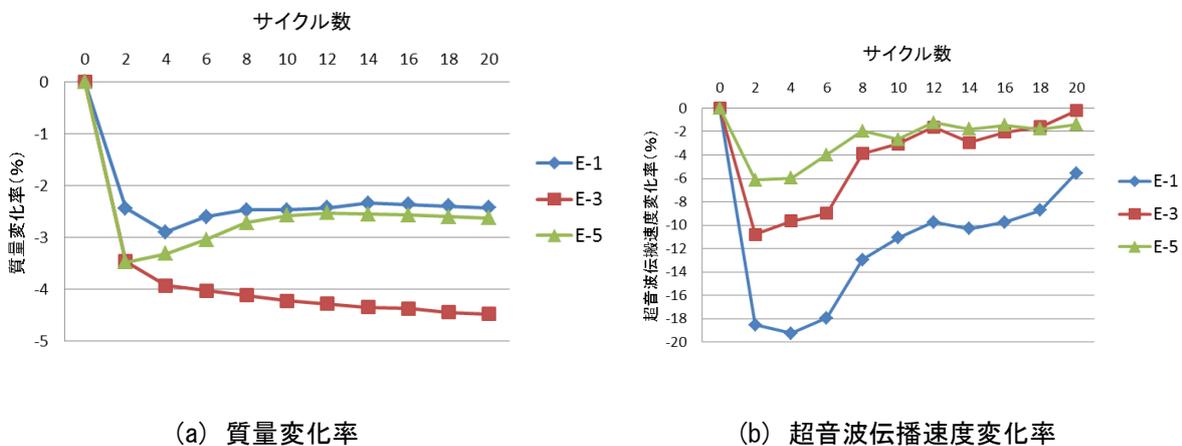


図 4-4-3 乾湿繰返し試験結果（ケース E）

(4) 凍結融解試験、乾湿繰返し試験後の試験体の劣化度確認

凍結融解試験及び乾湿繰返し試験実施後の試験体の劣化度を確認する目的で、透水試験及び有害物溶出試験を実施した。

図 4-4-4 に透水係数の結果を示す。透水係数は、いずれのケースも 1×10^{-8} 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も、長期間風雨に曝されたり、温度環境が変化したりしても、固化体が実質不透水層 (1×10^{-7} cm/s オーダー以下) であることが確認された。

また、溶出試験については表 4-4-3 に示す。3 つケースについて鉛が基準 3 を上回ったが、基準 1 及び 2 の排水基準を下回っており、安全性が確保される可能性が高いことが確認された。

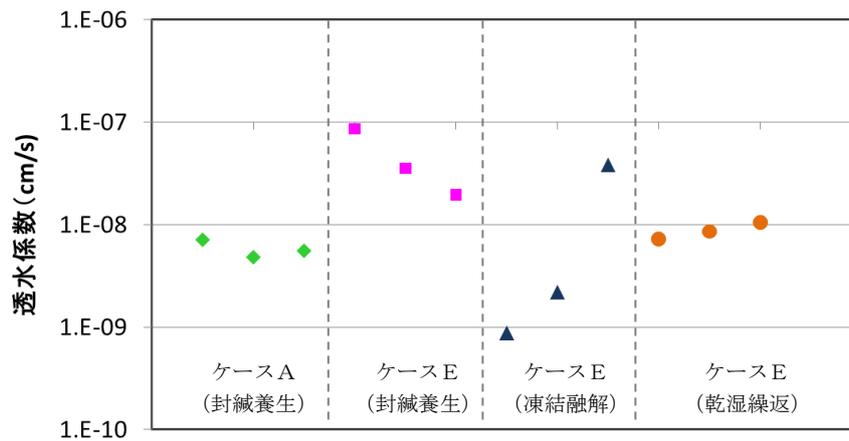


図 4-4-4 凍結融解試験及び乾湿繰返し試験後の透水試験結果

表 4-4-3 凍結融解試験及び乾湿繰返し試験後の溶出試験結果

(単位: mg/L)

項目	鉛及び その化合物 Pb	カドミウム及び その化合物 Cd	水銀及び その化合物 Hg	砒素及び その化合物 As	セレン及び その化合物 Se	六価クロム及び その化合物 Cr ⁶⁺	フッ素及び その化合物 F	ほう素及び その化合物 B	全シアン CN
E-1 (TY)	0.044	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.4	0.2	N.D
E-3 (TY)	0.009	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.4	0.1	N.D
E-5 (TY)	0.004	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.31	N.D	N.D
E-1 (KS)	0.026	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.33	N.D	N.D
E-3 (KS)	0.01	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.24	N.D	N.D
E-5 (KS)	0.003	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.2	N.D	N.D
基準1	0.1	0.03	0.005	0.1	0.1	0.5	15	50	1
基準2	0.1	0.03	0.005	0.1	0.1	0.5	8	10	1
基準3	0.01	0.01	0.0005	0.01	0.01	0.05	0.8	1.0	<0.1

基準 1 : 一般廃棄物の最終処分場放流水排水基準 (省令) (mg/L 以下)

基準 2 : F 市下水排水基準 (mg/L 以下)

基準 3 : 土壌溶出量基準 (mg/L) (環告第 18 号) (土壌汚染対策法)

4.5 固化式処分場の施工性・耐久性評価

(1) 固化式処分場の施工方法

固化式処分場の施工ステップにおける付帯設備及び留意点について検討した。

a. 固化式処分場の施工方法【Step-1：処分場基盤の構築】

固化式処分場の基盤（底部）について、焼却灰・飛灰を固化することによりガスの発生は限定的であるとし、従来式のようなガス抜き管を設置しないこととする。遮水工（遮水シート）、保護材、底部の排水施設については処分場外への漏水防止を目的として従来式処分場と同等の構造とする（図 4-5-1）。

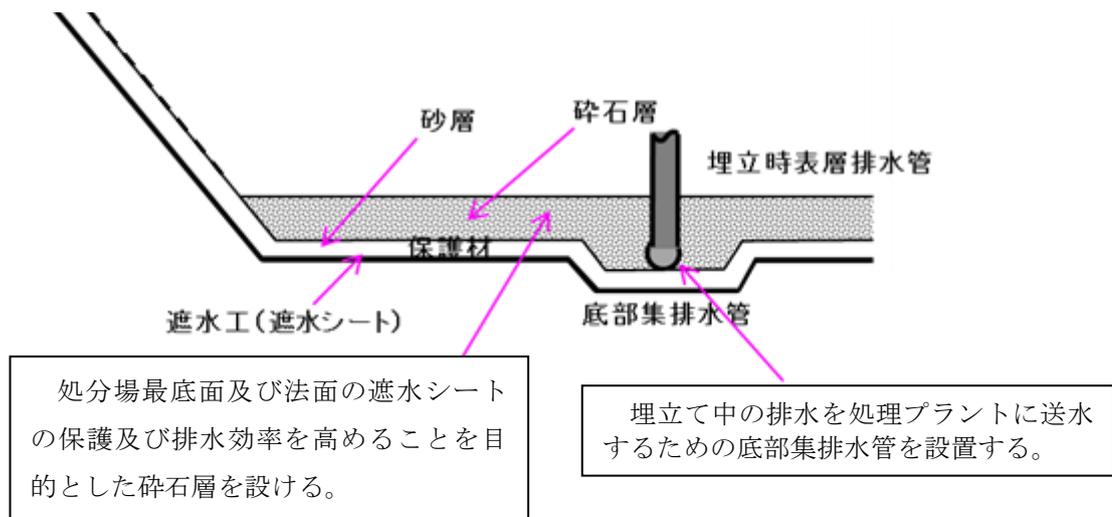


図 4-5-1 固化式処分場の施工方法
【Step-1：処分場基盤の構築】

b. 固化式処分場の施工方法【Step-2：廃棄物の埋立て（焼却灰・飛灰固化体層の構築）】

焼却灰・飛灰にセメント、石炭灰、水を混合した混練物を処分場内などに設置したプラントなどで製造し、ダンプトラックなどで所定の位置に運搬する。振動装置を装着した重機により、混練物を振動固化する。

法面近傍には、斜面排水及び振動装置により遮水シートを破損することを防止することを目的に保護材及び砕石層を設置する（図 4-5-2）。

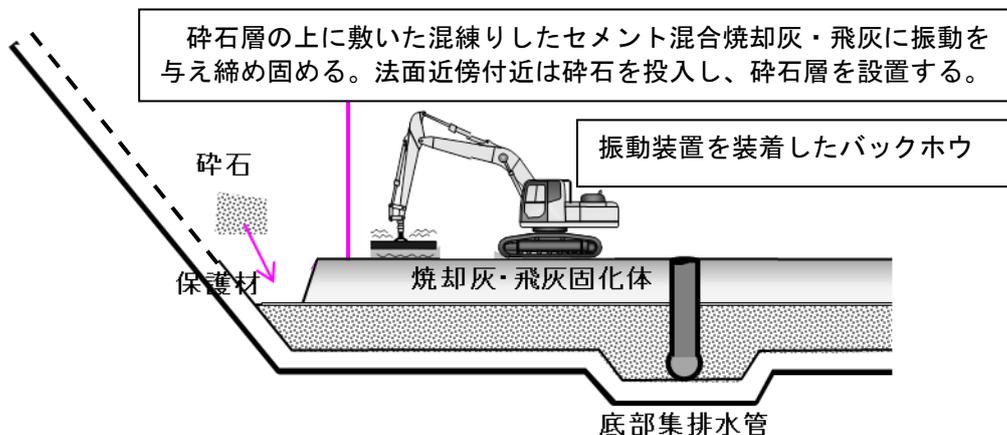


図 4-5-2 固化式処分場の施工方法
【Step-2：廃棄物の埋立て（焼却灰・飛灰固化体層の構築）】

c. 固化式処分場の施工方法【Step-3：廃棄物の埋立て（雨水処理施設の設置）】

埋立て途中の雨水は、表層面まで配置した排水管及び法面側の碎石層を通して処分場底部の集排水管へ集め、そこから流末の水処理施設へ排水し、pH、SSなどを処理する。排水管は、埋立て高さが上がると同時に埋め立て表面層高さに合うように設置する（図4-5-3）。

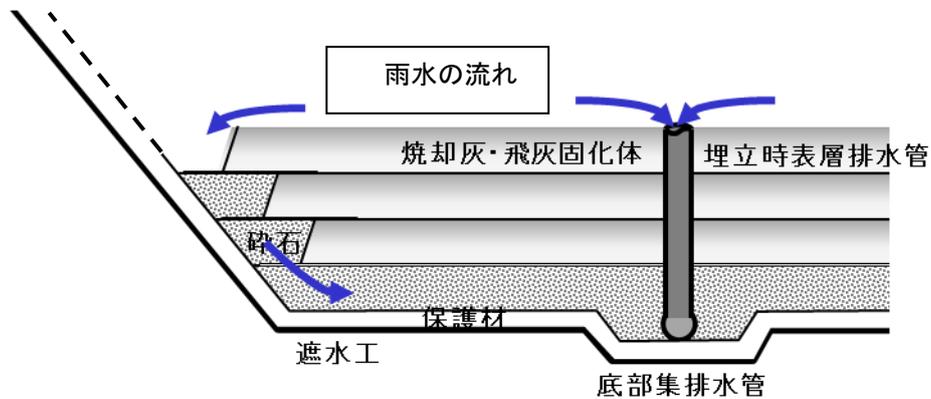


図4-5-3 固化式処分場の施工方法
【Step-3：廃棄物の埋立て（雨水処理など焼却灰・飛灰固化体層の構築）】

d. 固化式処分場の施工方法【Step-4：廃棄物の完了（雨水処理など焼却灰・飛灰固化体層の構築）】

埋立て完了後、最終埋立て表面はアスファルト舗装などにより雨水を浸透させない仕上げとする。また、埋立て時に使用した表層排水管は閉塞し、焼却灰・飛灰固化体の内部に雨水が浸透することを防止する（図4-5-4）。

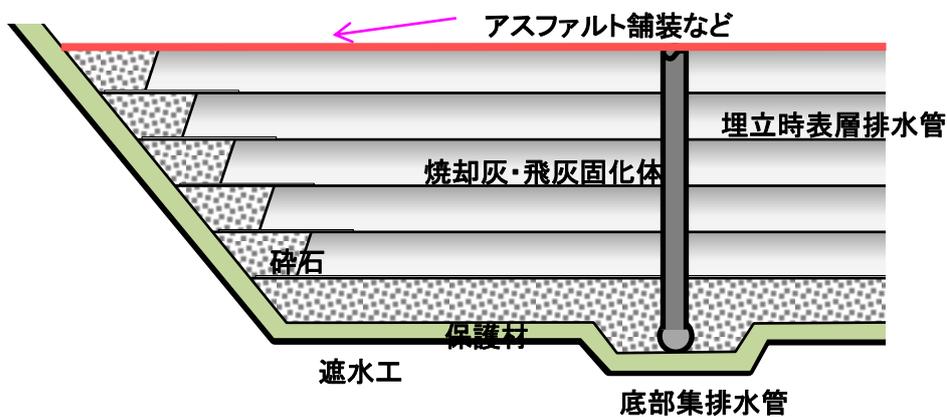


図4-5-4 固化式処分場の施工方法
【Step-4：焼却灰・飛灰固化体の埋立ての完了】

(2) 固化式処分場の地震時挙動

従来型処分場（準好気性方式）及び固化式処分場の地震時挙動について、動的 FEM 解析と部分模型の振動台実験の結果より考察した。なお、実験結果については、ケース 1（焼却灰 $\sigma 21$ ）とケース 4（焼却灰 $\sigma 21$ ）がほぼ同じ挙動を示したので、本報告書ではケース 1、ケース 2、ケース 3 を比較し考察する。

a. 全般的な地震時挙動

表 4-5-1 のように各ケースで顕著な差はなかったが、埋立層上面の加速度及び水平変位は固化式の方がやや小さい。ガス抜き管及び遮水シートに発生するひずみは損傷レベルではなかったが、遮水シートのひずみは固化式の方が全般的に小さい。なお、埋立層の残留水平変位や沈下は発生しなかった。

表 4-5-1 小型振動台実験の代表的な結果（500gal 加振時の時刻歴波形の比較）

	ケース 1（焼却灰 $\sigma 21$ ）	ケース 2（固化体 $\sigma 28$ ）	ケース 3（焼却灰 $\sigma 1$ ）
埋立層 上面の 加速度			
振動台の 変位量			
埋立層 上面の 変位量			
ガス抜き 管下端の ひずみ			
集排水 管の ひずみ			
遮水 シートの ひずみ			

b. 地盤応答

振動台実験で計測された埋立層表面の最大加速度を図 4-5-5 に、最大変位を図 4-5-6 に示す。

最大加速度は、加振加速度によらずケース 3（焼却灰 σ 1）が最も大きい。なお、加振加速度 500 gal 及び 800gal ではケース 2（固化体 σ 28）が最も小さかった。

最大変位は、加振加速度 100 gal、300gal では大きな差は見られないが、500 gal、800gal では最大加速度と同様にケース 2（固化体 σ 28）が最も小さかった。

これらの実験結果は、固化体が焼却灰に比べて強度が大きいためと考えられる。なお、焼却灰自体にも自硬性があるが、一軸圧縮強度を比較すると固化体と焼却灰では 20 倍程度の差がある（表 3-5-2 参照）。

図 4-5-7 には動的 FEM 解析の結果（入力地震動は JMA 神戸 NS 波形、最大加速度 818gal）を示すが、加速度及び変位の発生状況は、上記の実験結果と同様の傾向を示している。

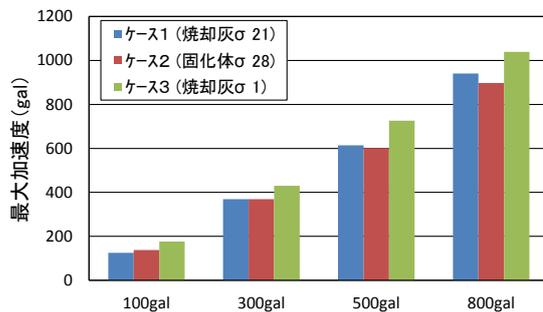


図 4-5-5 埋立層表面の最大加速度

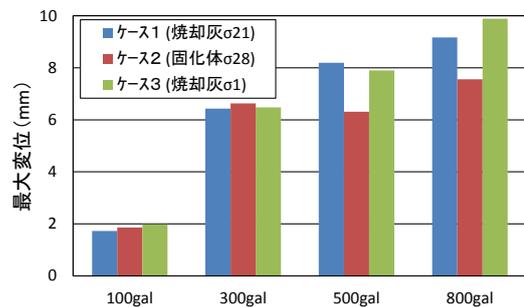


図 4-5-6 埋立層表面の最大変位

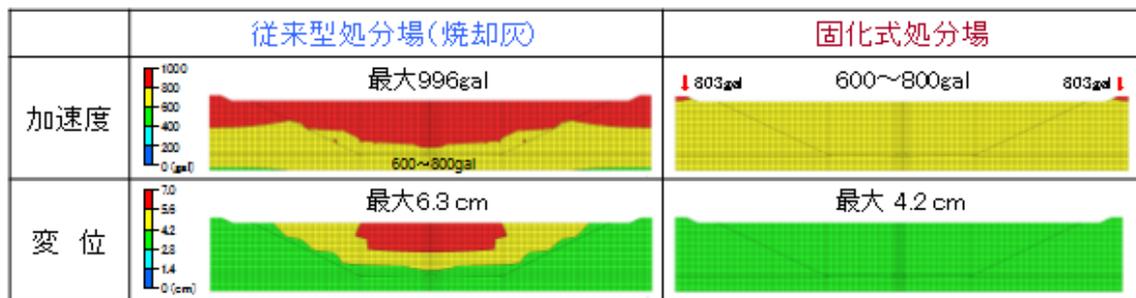


図 4-5-7 動的 FEM 解析結果

c. ガス抜き管及び集排水管の地震時挙動

ガス抜き管には、事前の動的 FEM 解析結果と同様に、下端の集排水管との接合部で最も大きいひずみが生じた。ただし、ガス抜き管に損傷を与えるほどのひずみレベルではなかった。

ガス抜き管下端のひずみを比較すると、表 4-5-1 に示すように、ケース 1（焼却灰 σ 21）が他のケースより小さく、ケース 2（固化体 σ 28）とケース 3（焼却灰 σ 1）では同程度の振幅のひずみが発生している。なお、ケース 2（固化体 σ 28）では残留ひずみが発生している。

集排水管自体が固定されておらず必ずしも再現性がある実験結果とはいえないが、材齢の異なるケース 1（焼却灰 σ 21）とケース 3（焼却灰 σ 1）を比較すると、最大ひずみは材齢 1 日のケース 3 の方が大きい。これは焼却灰 σ 1 が σ 21 に比べて強度が低いために（表 3-5-2 参照）、埋立層の変位が相対的に大きくなり、ガス抜き管に作用する力も大きくなったためと考えられる。また、残留ひずみの発生に関しては、ケース 2 の固化体の強度が焼却灰に比べて大きいために、加振終了時のガス抜き管の変位を強く拘束したためではな

いかと考えられる。なお、ガス抜き管上端の水平変位は、埋立層上面と同様に、固化式が従来型より小さく、残留変位もほとんど発生しなかった。

集排水管に発生したひずみは最大 20μ 程度とガス抜き管よりも 1 オーダー小さな値であった。なお、固化式の時刻歴波形では、ゼロ点が大きくシフトしているように見えるが、これはひずみの値が微小であるためであり、特に問題となるような動きではない。

d. 遮水シートの地震時挙動

遮水シートのひずみは、表 4-5-1 に示したように、ケース 3（焼却灰 $\sigma 1$ ）で最も大きな値を示し、最大ひずみは 1082μ であった。遮水シートのひずみは、どのケースも徐々に圧縮側か引張側に偏り、加振終了後に $100\sim 200\mu$ の残留ひずみが発生した。これは、実験ではシート端部を固定していないために、繰り返し加振によってシートに微小なたるみが生じたためと思われる。なお、実験終了後には遮水シートを掘り出して目視確認したが、破断等の損傷は見られなかった。

e. まとめ

- ① 埋立層表面の加速度及び変位は、加振加速度が 300gal より小さい場合には各ケースで大きな差はなかったが、 500gal より大きい場合にはケース 2（固化体 $\sigma 28$ ）が最も小さな値を示し、固化式処分場の大地震時の優位性が示唆された。
- ② ガス抜き管のひずみは、ケース 2（固化体 $\sigma 28$ ）が最も大きく、固化体による拘束が原因と考えられる残留ひずみが発生した。ただし、ガス抜き管に損傷が生じるような応力レベルではない。
- ③ 遮水シートのひずみは、ケース 3（焼却灰 $\sigma 1$ ）が最も大きく、最大 1000μ 程度発生した。ただし、シートに損傷が生じるような応力レベルではない。

5. 本研究により得られた成果

5.1 科学的意義

本研究の科学的意義は、以下の通りである。

- ・ 石炭灰固化技術の応用により、一般廃棄物焼却灰及び飛灰の固化が可能であることを明らかにしたこと。
- ・ 焼却灰及び飛灰の排出日、示方配合及び曝露条件の異なる数多くの焼却灰・飛灰固化体の性状（単位体積質量、強度、透水性、有害物質溶出特性等）のデータに基づき、固化式処分の環境安全性、堅牢性、有用性を示したこと。
- ・ 焼却灰及び飛灰の現場における確実な固化のための新たな配合決定手法として、材料混練時の混練機にかかる負荷（電流）の変化に基づいて水粉体比を決定する手法の有望性を見出したこと。
- ・ 焼却灰・飛灰固化体の吸湿・潮解に伴う性状変化及び潮解水の水質を明らかにしたこと。
- ・ 焼却灰・飛灰固化体の屋外曝露、凍結融解、乾湿繰返しに対する耐久性や劣化後の環境安全性（透水性、有害物質溶出特性）を明らかにしたこと。
- ・ 従来型処分場及び固化式処分場の地震時挙動を明らかにし、巨大地震に対する固化式処分の優位性を示したこと。

5.2 環境政策への貢献

本研究の環境政策への貢献は、以下の通りである。

- ・ 固化式処分場の埋立地盤は軟岩相当の強度を有する堅牢な地盤である。固化式処分場は跡地の高度利用を早期に図ることが可能であるとともに、巨大地震発生時の災害廃棄物の仮置場や仮設焼却処理施設の建設用地としての利用等、災害時の土地利用も可能と考えられる。
- ・ 固化式処分の適用により埋立地盤の減容化が可能であり、埋立地の供用期間の延長を図ることが可能と考えられる。
- ・ 固化式処分場における浸出水処理の対象は主に埋立地盤の表流水となり、有害物質を高濃度に含有する浸出水が発生することはないと考えられる。固化式処分は環境安全な処分方法であるとともに、浸出水処理施設の建設費及び維持管理費の大幅な削減、処分場の維持管理期間の大幅な短縮を図ることが可能と考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 島岡隆行：都市清掃，第69巻，第333号，419-425（2016）

「焼却残渣を埋め立てる固化式処分システムの開発について」

- 2) 小宮哲平、村川大亮、島岡隆行、中山裕文、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均、三反畑勇：第12回地盤環境工学研究フォーラム発表論文集，査読中（2017）

「一般廃棄物焼却残渣固化式処分地盤における吸湿・潮解に伴う物質移動及び孔隙変化に関する研究」

- 3) 三反畑勇、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均、島岡隆行、小宮哲平、中山裕文：第12回地盤環境工学研究フォーラム発表論文集，査読中（2017）

「一般廃棄物焼却残渣固化式処分地盤の地震時挙動に関する研究」

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行：平成27年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会（2015）
「一般廃棄物焼却残渣の最終処分における石炭灰固化技術の適用に関する基礎的研究」
- 2) 村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、秋田宏行、笠博義、三反畑勇、弘末文紀：第26回廃棄物資源循環学会研究発表会（2015）
「一般廃棄物焼却残渣のセメント固化による強度特性と環境安全性に関する検討」
- 3) 小宮哲平、島岡隆行、中山裕文、弘末文紀、秋田宏行、笠博義、三反畑勇：第26回廃棄物資源循環学会研究発表会（2015）
「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」
- 4) 村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、秋田宏行、笠博義、三反畑勇、弘末文紀：平成27年度土木学会全国大会第70回年次学術講演会（2015）
「一般廃棄物焼却残渣の最終処分における石炭灰固化技術の適用に関する基礎的研究」
- 5) 村川大亮、西本琢也、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、秋田宏行、弘末文紀、青木貴均：平成27年度土木学会西部支部研究発表会（2015）
「一般廃棄物焼却残渣セメント固化体の吸湿・潮解に伴う性状変化に関する基礎的研究」
- 6) 西本琢也、村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、秋田宏行、弘末文紀、青木貴均、椋木俊文：平成27年度土木学会西部支部研究発表会（2016）
「超流体化工法を応用した一般廃棄物焼却残渣固化体の孔隙構造に関する基礎的研究」
- 7) 松尾翼、村川大亮、小宮哲平、島岡隆行、秋田宏行、弘末文紀、青木貴均：平成27年度土木学会西部支部研究発表会（2016）
「一般廃棄物焼却残渣セメント固化体の物理化学的性状に及ぼす混和材添加率の影響」
- 8) 村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均：平成28年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会（2016）
「一般廃棄物焼却残渣セメント固化地盤の長期耐久性に関する研究」
- 9) 村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均：第27回廃棄物資源循環学会研究発表会（2016）
「一般廃棄物焼却残渣セメント固化体の吸湿・潮解に伴う性状変化に関する基礎的研究」
- 10) 村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均：第38回全国都市清掃研究・事例発表会（2017）
「一般廃棄物焼却残渣セメント固化体の吸湿・潮解に伴う性状変化に関する研究」
- 11) 村川大亮、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均：平成28年度土木学会西

部支部研究発表会（2017）

「一般廃棄物焼却残渣セメント固化体の吸湿・潮解に伴う物質挙動に関する研究」

12) 小宮哲平、村川大亮、島岡隆行、中山裕文、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均、三反畑勇：第52回地盤工学研究発表会（2017）

「一般廃棄物焼却残渣固化式処分地盤の吸湿・潮解性に関する基礎的研究」

13) 浦野和彦、三反畑勇、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均、島岡隆行、小宮哲平、中山裕文：第52回地盤工学研究発表会（2017）

「一般廃棄物焼却残渣固化式処分地盤の地震時挙動に関する研究」

14) 浦野和彦、三反畑勇、弘末文紀、秋田宏行、青木貴均、島岡隆行、小宮哲平、中山裕文：平成29年度土木学会全国大会第72回年次学術講演会（2017）

「一般廃棄物焼却残渣固化式処分地盤の地震時挙動に関する研究」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

1) 平成 27 年度循環型社会形成推進研究発表会（主催：一般財団法人日本環境衛生センター、平成 27 年 12 月 14 日、ニッショウホール、聴講者約 100 名）にて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

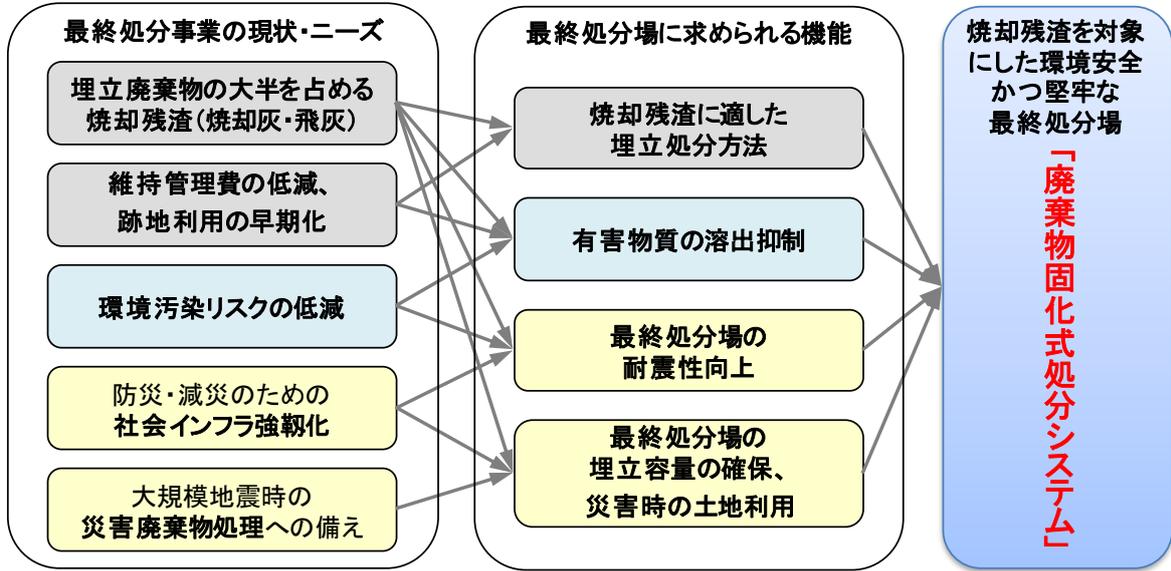
1) (株)安藤・間：超流体工法, <http://www.ad-hzm.co.jp/service/ashcrete/tech/>.

研究概要図

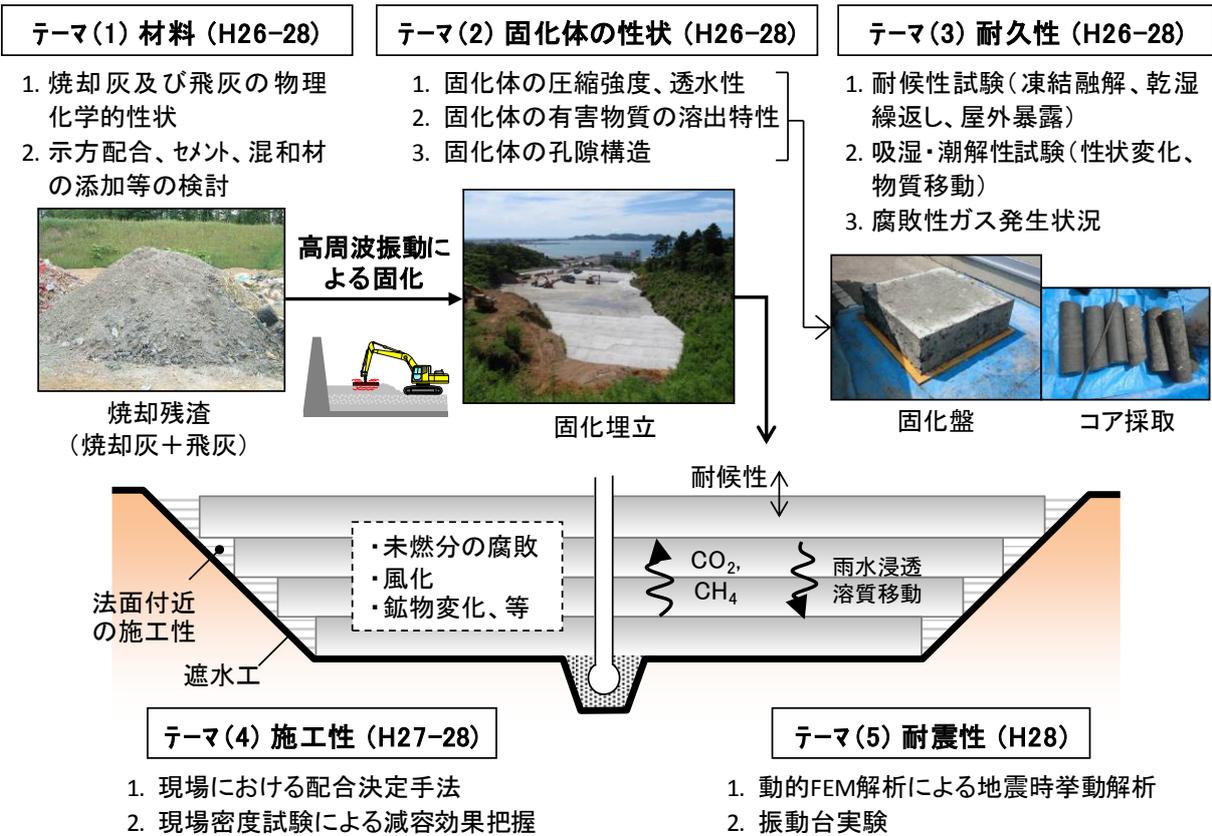
巨大地震に耐えうる環境安全で堅牢な最終処分場の新技術開発に関する研究

(3K143001)

1. 背景及び目的



2. 研究内容



英文概要

Development of New Technology for Environmentally Safe and Sturdy Final Disposal Site to Withstand Great Earthquake

Principal Investigator: Takayuki SHIMAOKA

Institution: Faculty of Engineering, Kyushu University
744 Motoooka, Nishi-Ku, Fukuoka 819-0395,
JAPAN

Tel: +81-92-802-3433 / Fax: +81-92-802-3432

E-mail: shimaoka@doc.kyushu-u.ac.jp

Cooperated by: Hazama Ando Corporation

[Abstract]

Keywords: Solid waste incineration residues, Final disposal, Cement-solidification by superfluid method

In Japan, the toughening of infrastructures is demanded for the preparation to great earthquakes. Recently, most of the solid waste landfilled in final disposal sites is incineration residues. We propose the new, environmentally safe and sturdy final disposal system for incineration residues. In the system, incineration residues are landfilled in the form of high density cement-solidified body formed by cement addition and a high frequency vibration, and (a) the rise of landfilled ground's resistance to earthquakes, (b) the restraint of landfill capacity consumption, (c) the elimination of rainwater percolation, (d) the restraint of toxic substances' elution, (e) the prolongation of landfilling period, (f) the cost reduction due to the shortening of the period after landfill closure, (g) the early use and the use in high degree of the land after landfill abandonment, and (h) the land use in disasters are expected. We are studying to clarify (1) the proper material composition, (2) the characteristics, (3) the durability of the solidified body, (4) the workability of the solidification on site, and (5) the resistance of the solidified ground to great earthquakes.