

論文 災害がれき焼却灰を細骨材としたモルタルの諸物性

椎名 貴快*1・久田 真*2・羽原 俊祐*3・緑川 猛彦*4

要旨: 東日本大震災によるがれきの焼却灰をコンクリート用骨材に原灰のまま利用できないか検討するため、仮設焼却施設で採取した主灰を細骨材の一部又は全量に用いたモルタルを作製し諸物性を確認した。その結果、本実験の範囲内において、主灰は吸水率が高く微粒分量が多い傾向にあり、表面水の影響で主灰混入量の増加に伴い流動性は向上したものの、モルタル強度の低下や収縮ひずみ量の増加が確認された。また主灰に由来してモルタル中に混入した鉛などの重金属類や放射性セシウムの含有・溶出特性についても報告した。

キーワード: 震災がれき, 仮設焼却炉, 焼却灰, 骨材, モルタル

1. はじめに

東日本大震災で発生した災害廃棄物の量は、岩手・宮城両県だけで約1,595万トン(2012.9.19現在)に達すると推計され、各県の一般廃棄物処理量の9~15年分¹⁾²⁾に相当する(写真-1)。この内、木くずや廃プラスチック等の可燃物は、再資源化できるものを除いて、減容化のため焼却処理施設で中間処理(焼却)され、発生した焼却灰は最終処分場に埋立処分される。



写真-1 震災廃棄物の集積状況

しかし、がれきの処理量が膨大で既存施設(一般廃棄物焼却施設, セメント工場等)のみでは処理が追いつかないため、仮設の焼却施設が多数建設され処理が進められている。この結果、今後、焼却施設から震災がれきの焼却灰が大量に発生すると見込まれるが、埋立に必要な最終処分場を十分に確保できていない自治体もあり、焼却灰を有効活用する方法の検討が急務となっている。そこで、焼却灰をコンクリート用骨材として建設資材に利用できないかモルタル試験により検討を試みた。

表-1 焼却灰を採取した焼却施設

主灰	焼却施設	炉形式・燃焼温度他
A	仮設焼却炉 A	ロータリーキルン式炉 燃焼温度 800℃以上 処理能力 300t/日
B	仮設焼却炉 B	ロータリーキルン式炉 燃焼温度 850℃以上 処理能力 90t/日
C	仮設焼却炉 C	ストーカ式炉 燃焼温度 800℃以上 処理能力 95t/日

本稿では、3箇所の仮設焼却施設で採取した焼却灰(主灰: 焼却炉の炉底に残存した灰)について、密度や吸水率などの物性値及び化学成分などについて比較検討をおこなった。また、主灰を細骨材として用いたモルタルの諸物性(フレッシュ性状, 強度特性, 収縮ひずみ, 重金属類・放射性セシウムの含有・溶出特性)を実験で確認し、主灰置換率の違いによる影響や、主灰を用いた再生材としての安全性についての知見を整理した。

却施設3箇所で試料を採取した。焼却炉の形式はロータリーキルン式炉とストーカ式炉の2種類で、燃焼温度はダイオキシンの発生を防止するため800℃以上の高温燃焼が基本である。焼却物は3箇所ともがれき分別後の木くずや廃プラスチックといった可燃物であるが、焼却時の混合比は各々で異なる。なお、主灰には焼却前に分別除去できなかった不燃物(金属片, 瓦片等)が一部混在している場合もあり、実験前にふるい目15mmで分級し、通過した灰全量を有効利用の観点から細骨材とした。

2. 仮設焼却炉の焼却灰

焼却灰には主灰と飛灰の2種類がある。前者は焼却炉の炉底に残存した灰分、後者は排ガス中に浮遊する灰分等を集じん装置で捕集して薬剤処理したものである。本稿では主灰を対象とし、表-1に示した被災地の仮設焼

*1 西松建設(株) 技術研究所土木技術グループ 工修 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

*3 岩手大学 工学部社会環境工学科教授 工博 (正会員)

*4 福島工業高等専門学校 建設環境工学科教授 工博 (正会員)

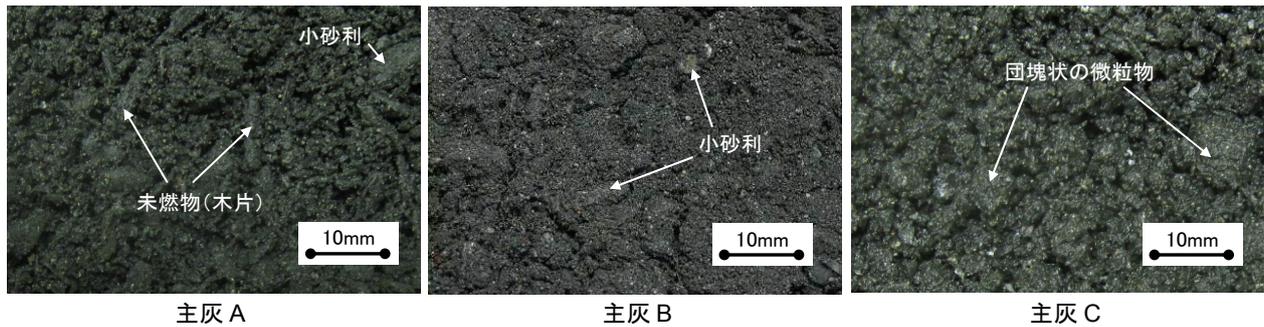


写真-2 仮設焼却炉で採取した震災がれきの焼却灰（15mmふるい分け後）

表-2 主灰の物理的特性

主灰	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率
A	1.88	9.1	43.6	3.13
B	1.59	24.2	60.1	2.04
C	1.99	8.7	59.6	2.89

写真-2 に主灰状況を示す。3 試料とも全体的に黒色を呈した湿灰であり、微粒子物質や未燃物が多く含まれていた。この原因として、焼却前のがれきに付着していた土砂や水分による燃焼ムラの影響が大きいと推定される。

2.1 物理・化学的特性

表-2 に密度試験、吸水率試験、粒径判定実積率試験による主灰の物理的特性を示す。A, B, C ともに絶乾密度 2.00g/cm³ 以下と小さく、吸水率 8.0% 以上で特に B は高い値であった。粒径判定実積率と粗粒率から、B は A, C と比較して粒度が細かいことが分かる。なお、炉型式の違いによる明確な差は確認できず、灰の品質は焼却炉ごとにばらつきを有していた。

図-1 にふるい分け試験による粒度曲線を示す。JIS に示された砂の標準粒度に対して、A と C は粗目側、B は細目側に外れる結果となった。なお、A, B, C ともに 0.15mm 以下の微粒子が 20% 程度、5mm 以上が 10~20% 程度を占めていた。

図-2 に蛍光 X 線分析による灰の化学成分を示す。なお、主灰の有機物含有量は強熱減量試験で確認し、ig.loss を含めて 100% に規格化した値で示した。分析の結果、いずれの主灰も ig.loss の値が約 10~20% と高く、有機物を多量に含んでいることがわかった。また全体の約 80% を SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO が占め、SiO₂ と Al₂O₃ の成分比は同等で、CaO/SiO₂ は A が若干大きいものの概ね等しい値であった。なお、津波の影響でがれきに付着した Cl の多くは焼却中に気化して飛灰に移行したため、主灰中の Cl 量は 1% 未満でほとんど検出されなかった。

2.2 重金属類および放射性物質の含有

表-3 に第 2 種特定有害物質（重金属類）の含有量試験の結果を示す。試験方法は環境省告示第 19 号に準じた。

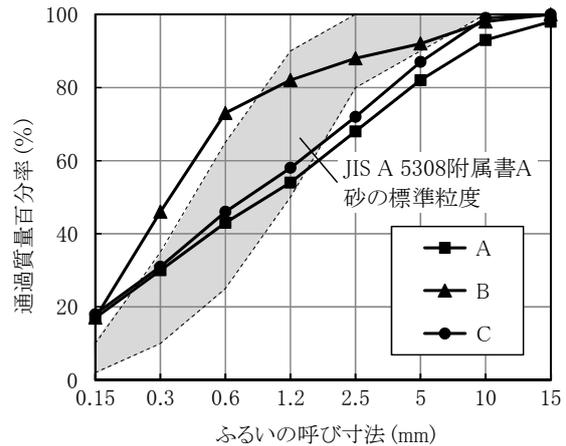


図-1 主灰の粒度曲線

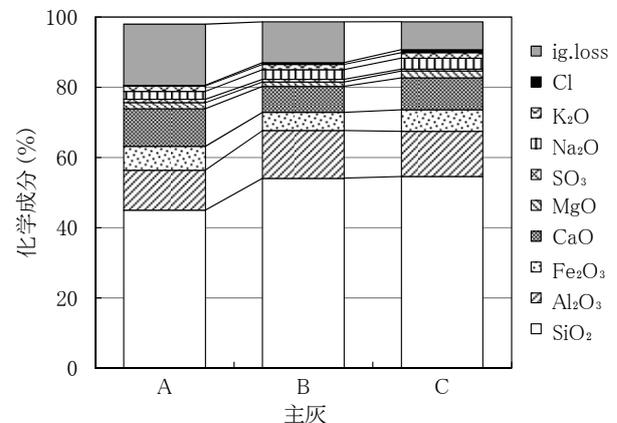


図-2 主灰の化学成分

表-3 主灰の重金属類含有量

成分 (mg/kg)	環境基準	主灰		
		A	B	C
カドミウム	≦ 150	< 10	< 10	< 10
六価クロム	≦ 250	< 10	< 10	< 10
シアン	≦ 50	< 5	< 5	< 5
水銀	≦ 15	< 1	< 1	< 1
セレン	≦ 150	< 10	< 10	< 10
鉛	≦ 150	90	170	250
砒素	≦ 150	< 10	< 10	< 10
ふっ素	≦ 4,000	< 100	< 100	110
ほう素	≦ 4,000	79	< 50	< 50

備考) 網掛部: 基準超過

いずれの主灰も鉛の含有量が多く、BとCは環境基準を超過していた。これは東北地方の太平洋沿岸地域に自然由来成分として存在していたものや漁具の錘などによるものと考えられ、地震や津波によってがれきに混入し、焼却処理で高濃度に濃縮したものと推定される。

表-4に主灰中に含まれている放射性セシウム濃度および主灰表面近傍での単位時間当たりの放射線量の測定結果を示す。なお、濃度測定は高純度ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトル法を用いた。測定の結果、放射性セシウム濃度はいずれの灰も国の放射性物質汚染対処特措法に基づく指定基準(8,000Bq/kg)以下で、Aが最も低く、Cが最も高い値であった。主灰を採取した仮設焼却炉の地理的条件はA→B→Cと南下しており、南ほど福島第一原子力発電所に近い立地となる。このため、地理的条件と灰の放射性セシウム濃度の値には関連性があると推定される。表面放射線量は、仮設焼却炉周辺や市街地の空間放射線量(0.10μSv/h未満)と同程度で十分小さい値であった。なお、表面放射線量と放射性セシウム濃度との間に明確な相関性は認められなかった。

3. モルタル実験

3.1 概要

仮設焼却炉の主灰を原灰のまま細骨材の一部又は全量に置き換えて用いたモルタルの諸物性を確認した。実験では、モルタルのフレッシュ性状の他、未燃物の混入量、強度、収縮ひずみ量を測定し、主灰置換率の違いによる影響を確認した。また、重金属類や放射性セシウムの溶出試験により、再生材としての安全性について評価した。

3.2 使用材料と配合

表-5に使用材料を示す。また表-6にモルタルの基本配合を示す。配合は、水セメント比を30%一定として、細骨材セメント比を3.0固定で、主灰を細骨材容積に対して0、30、60、80及び100%の割合で置換した。

3.3 混練手順と養生方法

セメント、砂、主灰を60秒間低速で空練り後、水を加えて180秒間高速攪拌した。主灰は見掛け上表乾状態として使用した。供試体の養生方法について、強度試験用は打設3日後に脱型して材齢28日まで湿布とビニールで覆い封緘養生した。一方、放射能測定用および溶出試験用は放射性物質の外部流出を防止するため、材齢28日まで封緘養生とし、水中養生は実施していない。

3.4 実験結果

(1) フレッシュ性状

図-3にモルタルのフロー試験及び空気量試験の測定結果、図-4にJSCE-F 522によるブリーディング試験結果を示す。主灰置換率の増加に伴って流動性は向上し、空気連行性は低下した。また、ブリーディング量は主灰

表-4 主灰の放射性セシウム濃度と表面放射線量

主灰	放射性セシウム濃度(Bq/kg)			表面放射線量(μSv/h)
	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	合計 ¹³⁴ Cs+ ¹³⁷ Cs	
A	23 (15)	60 (18)	83	0.06
B	58 (13)	110 (11)	168	0.09
C	101 (17)	177 (16)	278	0.04

表中の()内は検出限界濃度

表-5 使用材料

使用材料	記号	仕様
水	W	水道水
セメント	C	高炉セメントB種、密度3.05g/cm ³
細骨材(標準砂)	S	絶乾密度2.64g/cm ³ 、吸水率0.42% 単位容積質量1.76kg/L、実積率66.7%
主灰B	Ash	絶乾密度1.59g/cm ³ 、吸水率24.2% 放射性Cs濃度:168Bq/kg

表-6 モルタル基本配合

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)		
		W	C	S
30	3.0	170	567	1700

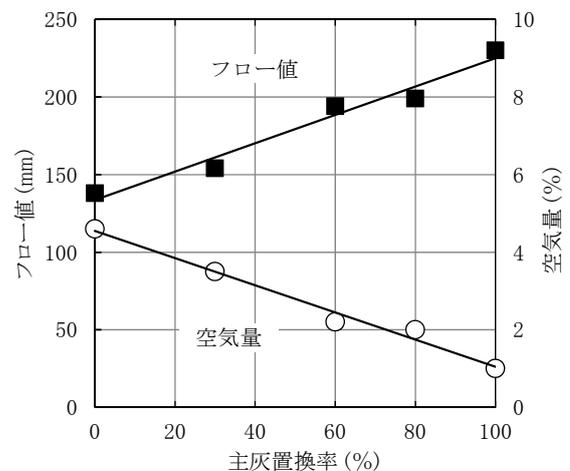


図-3 主灰置換率とフロー及び空気量の関係

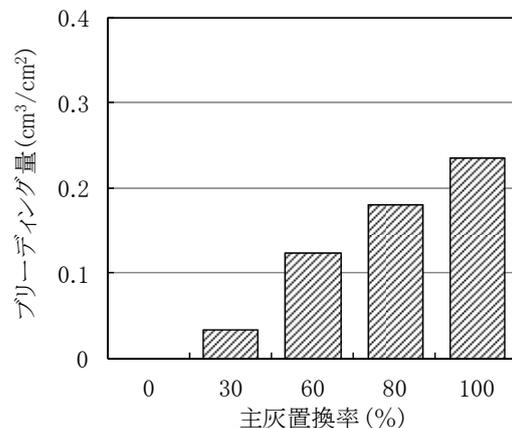


図-4 モルタルのブリーディング試験結果

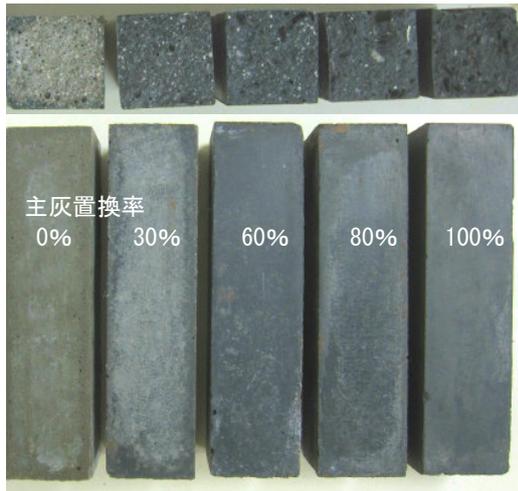


写真-3 モルタル硬化体の外観と断面状況

置換率の増加とともに多くなった。この理由として、使用した主灰の粒度が細かく、特に全体の約20%を占める0.15mm以下の微粒分による影響や、軽くて吸水性の高い未燃物を多く含んだ主灰の表面水による影響が顕著に現れたものと推定される。なお、本実験で用いた主灰の自然含水比はおおよそ20~40%の範囲でばらつきを有しており、練り上がり性状の良否が主灰の含水状態に大きく左右されると想定できる。このため、主灰含水量の管理や主灰品質のばらつきを許容した安全側での配合設定が実務では必要であると考えられる。

(2) 外観・断面品質

写真-3 にモルタル硬化体(角柱 4×4×16cm)の外観と断面状況を示す。硬化体の表面は平滑で、型枠への付着によるはく離などの不具合は生じなかった。また、主灰中に含まれているアルミ成分に起因した異常膨張も見られなかった。ただし、主灰置換率が高いほど色は黒褐色となり、断面には未燃物片も確認できた。画像解析による断面積当たりの未燃物混入量は図-5 に示したように、主灰置換率の増加とともに増え、置換率 100%で平均 10%であった。未燃物の混入による耐久性品質への影響については十分な知見がなく、別途検討が必要である。

(3) 強度特性

図-6 に材齢 7 日及び 28 日における曲げと圧縮の強度試験結果を示す。曲げ強度及び圧縮強度ともに材齢 7 日時点で 28 日強度の 7 割程度に達した。また、主灰置換率の増加とともに強度は線形回帰に従って低下し、主灰の混入量と強度との間には高い相関性がみとめられた。これは、主灰の品質(表面水、未燃物の混入等)による影響が大きいと推定される。なお、曲げ強度は主灰置換率の違いによらず圧縮強度のおよそ 1/5 で、一般的なモルタルと同様の傾向となった。

(4) 収縮ひずみ変化

図-7 に JIS A 1129 に準拠して測定した主灰置換率の

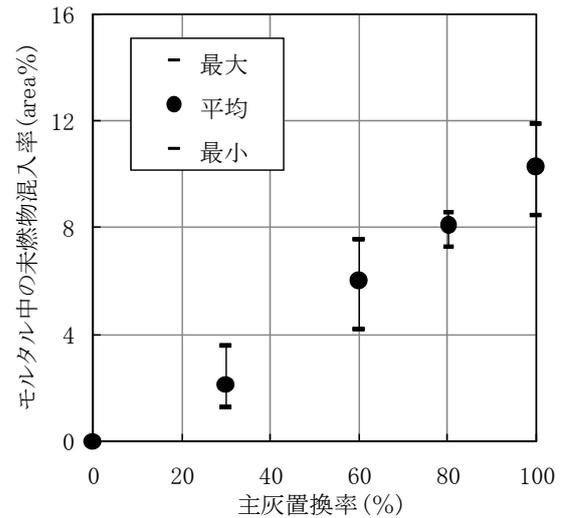


図-5 モルタル中に混入した未燃物量

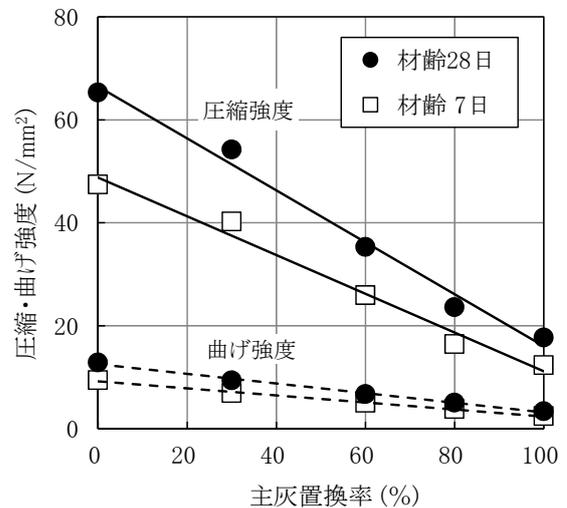


図-6 主灰置換率とモルタル強度の関係

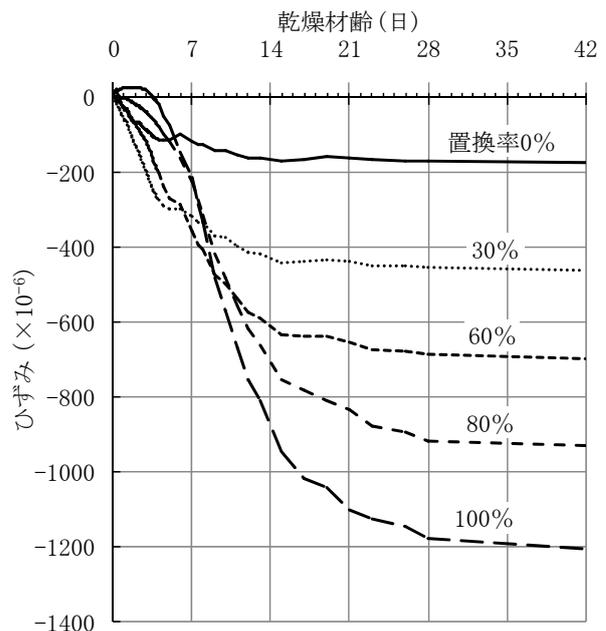


図-7 主灰置換率の違いによる収縮ひずみ変化

違いによる収縮ひずみ変化を示す。ひずみは乾燥材齢とともに主灰置換率が大きいほど大きく収縮する傾向がみられ、乾燥材齢 42 日目の時、置換率 100%での収縮ひずみが置換率 0%の約 6 倍に達していた。なお、主灰置換率 30%以下では材齢 14 日以降に、置換率 60~100%では材齢 28 日以降にひずみ変化量が小さくなり、概ね収束に至った。

(5) 重金属類の溶出特性

第 2 種特定有害物質(重金属類)の溶出試験は、土木学会規準 JSCE-G575 のタンクリーチング法により有姿状態で実施した。分析は主灰置換率 100%の試料でおこない、形状は直径 50mm×高さ 100mm の円柱供試体である。表一七 に溶出試験結果を示す。主灰には環境基準を超える多量の鉛が含まれていたが、モルタル硬化体の溶出試験結果は鉛以外の成分も含めて定量下限値未満で、環境基準を満足する結果であった。

(6) 放射性セシウムの含有・溶出特性

図一八 にモルタルに含まれる放射性セシウムの測定値と計算値との関係を示す。なお、計算値とは主灰の放射性セシウム濃度と、モルタル中における主灰の質量百分率から算出した値である。主灰置換率 80%以下では放射性セシウム濃度が 100Bq/kg 以下となり、再生材料として利用可能な濃度レベル³⁾であった。また、測定値と計算値とを比較した結果、両者の値は概ね等しい結果であったことから、灰をセメント固化してもセシウムは質量比に応じて希釈されるだけであり、封じ込め効果は期待できないことがわかった。以上より、主灰自体の放射性セシウム濃度が既知の場合、濃度の値に応じて再生材に含まれる量を 100Bq/kg 以下とするように主灰使用量を質量百分率で設定することができると考える。

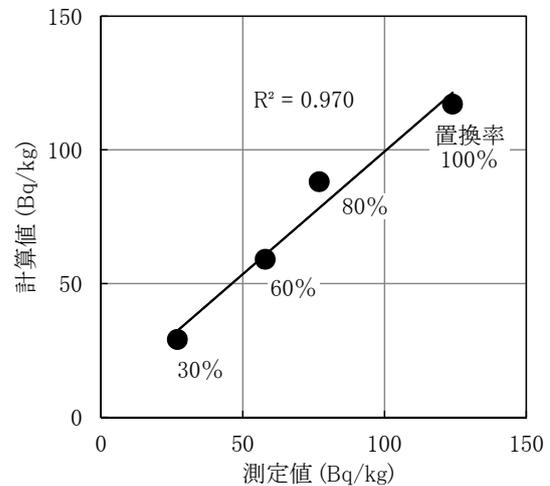
図一九 は宮城・岩手県内にある仮設焼却施設の焼却炉 23 基において、各施設で同一日に採取した主灰と飛灰の放射性セシウム濃度の公表値を収集・整理し図化したものである。一般的に、セシウムはアルカリ金属元素であるため、がれきを高温焼却処理した時に容易に蒸発し、その後、排ガスの冷却過程で塩化物イオンに結合して塩化セシウム(CsCl)として凝縮するとされる。このため、セシウムの多くが飛灰に移行し、主灰の濃度は低くなる傾向がある。公表値を整理した結果、主灰の放射性セシウム濃度は最大 800Bq/kg 程度で、その内の約 90%は 400Bq/kg 以下であった。このため、主灰を単位容積当り質量百分率 25%以下でモルタルやコンクリートに使用した場合、含有濃度は 100Bq/kg 以下として安全な利用を期待できるレベルとなる。なお、岩手県の仮設焼却炉で採取された灰は、宮城県の灰よりも濃度が大幅に低い値であったが、これは地理的条件のためである。

地下水や雨水などと接触したモルタルから放射性セシ

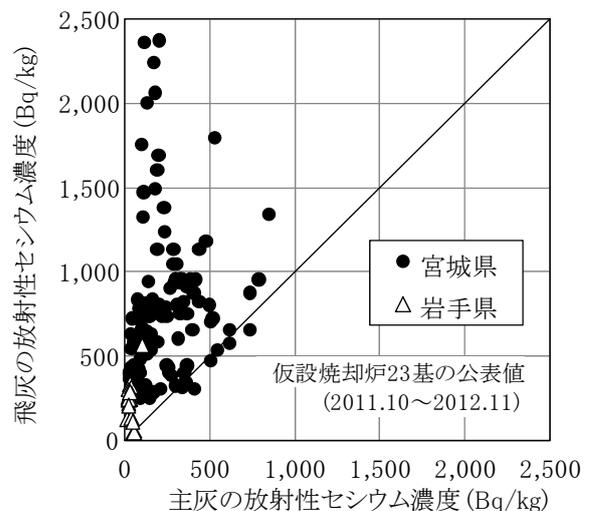
表一七 モルタルからの重金属類の溶出試験結果

成分 (mg/L)	環境基準	試験結果			
		浸漬 1 回目	浸漬 2 回目	浸漬 3 回目	浸漬 4 回目
カドミウム	≦0.01	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
六価クロム	≦0.05	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
水銀	≦0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
セレン	≦0.01	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
鉛	≦0.01	0.002	<0.001	<0.001	<0.001
砒素	≦0.01	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
ふっ素	≦0.8	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08
ほう素	≦1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

* 主灰置換率 100%の試料を使用



図一八 モルタル中の放射性セシウム含有量の測定値と計算値の比較



図一九 宮城・岩手県内で稼働中の仮設焼却炉で発生した主灰と飛灰の放射性セシウム濃度公表値

ウムが溶出した場合、副次的な環境影響を引き起こしてしまう可能性がある。このため放射性セシウムの溶出試験をおこない溶出特性を確認した。図-10 に放射性セシウム溶出試験方法の概念図を示す。また、図-11 に溶出試験結果を示す。試験試料は主灰置換率 100%と 80%の 2 種類とし、試料の形状は固塊（円柱：直径 42mm×高さ 40mm）と粉碎（粒径 10mm 以下）の 2 水準である。主灰置換率 100%と 80%の固塊試料での溶出率はそれぞれ 13%と 11%で、放射性セシウムの含有量の違いによらず 10%程度のセシウムが溶出する結果となった。また、試料を粉碎して表面積を増やした場合でも溶出率は同程度であった。なお、灰の化学組成によってセシウムの存在形態が異なり、その影響で溶出のし易さが違うとの指摘もある。また、今回の試験では試料中の含有量が 100Bq/kg 前後と少なかったため、測定時の検出精度による影響も含まれている。このため、追加試験などさらなる検証が必要であり、不溶化材を併用した溶出対策の必要性についても併せて検討すべきと考える。

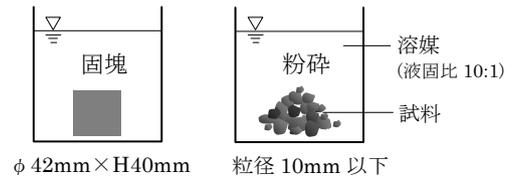


図-10 放射性セシウム溶出試験方法の概念図

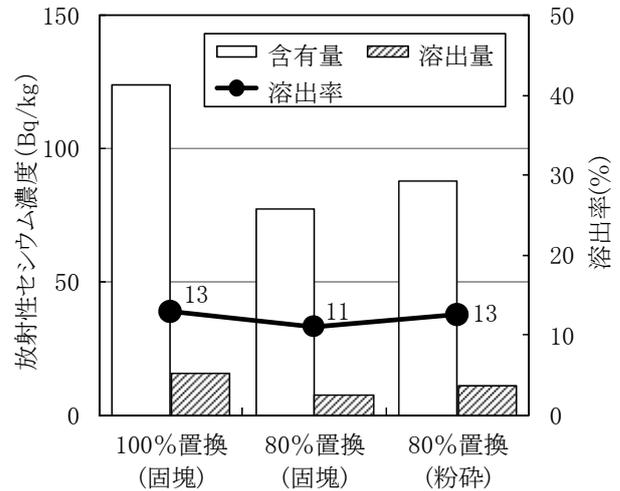


図-11 主灰置換率及び試料形状の異なるモルタルからの放射性セシウム溶出試験結果

4. 結論

本実験により得られた知見を以下に示す。

- (1) がれき処理の過程で発生した仮設焼却炉の主灰は、吸水率が高く微粒分量が多い上、有機物を多量に含んでいた。
- (2) 主灰置換率の増加に伴い、主灰の表面水によるモルタル中の水分増加により、モルタルの流動性は向上したものの、強度の低下や収縮ひずみ量の増加が確認された。
- (3) 主灰は高濃度の鉛を含有していたが、モルタルからの重金属類の溶出は環境基準を下回った。
- (4) モルタル中の放射性セシウム含有量は灰の質量百分率で概ね算出できたが、含有量の多少や試料形態によらず地下水や雨水などとの接触によって 10%程度溶出する可能性がある。

謝辞：本検討は「東日本大震災に関する東北支部学術合同調査委員会」（第 5 部門）での活動の一部として実施したものであり、試料採取や試験にご理解・ご協力を賜りました関係者の方々に心より謝意を表する。

注記：本稿では、福島第一原発事故に伴って拡散した放射性物質を含有する震災がれきの焼却灰を使用した。本試料の取扱いにあたり、作業者の健康に係わる安全確保の観点から、現行法に準拠した作業規定のもと実験に従事した。なお、関連法令には、放射性物質汚染対処特措法、原子力基本法（原子炉等規制法、放射線障害防止法）、

労働安全衛生法（電離放射線障害防止規則（電離則）、除染電離則）、医療法（施行規則）、薬事法（施行規則）などがある。

試料の採取及び実験時には、防塵マスク（レベル 3 以上）及び専用衣、防護眼鏡・手袋・靴を着用した上で、作業中は個人線量計で被ばく線量を測定し、累積被ばく線量を記録管理した。国が示した被ばく線量限度は年間 1mSv である。実験では NaI シンチレーション式サーベイメータを使用して試料の表面近傍及び周辺での空間放射線量（対象とする空間の単位時間当たりの放射線量）を適宜測定し、0.23 μ Sv/h（1mSv/年換算）未満の試料のみ対象とした。なお、試料の放射能濃度は 8,000Bq/kg 以下（指定廃棄物外）である。

参考文献

- 1) 環境省広域処理情報サイト:<http://kouikishori.env.go.jp/>
- 2) 岩手・宮城がれき処理データサイト:<http://garekikouiki-data.env.go.jp/>
- 3) 環境省告示第 76 号：東日本大震災により生じた災害廃棄物の広域処理に関する方法等，2012.6