

震災がれき焼却主灰の有効利用技術

Effective use technology of the bottom ash caused by incineration disposal of the earthquake rubble

椎名 貴快*

Takayoshi Shiina

平野 孝行***

Takayuki Hirano

佐藤 靖彦**

Yasuhiko Sato

湊 康裕****

Yasuhiro Minato

要 約

東日本大震災の災害廃棄物処理の過程で発生した焼却主灰の有効利用技術として、固化材を添加・混合して造粒固化処理物を製造する技術がある。本報では、宮城県の亘理名取ブロック（名取処理区）の焼却主灰を用いて製造された造粒固化処理物について、土質材料への利用を目的に、物理化学的特性や強度、耐久性および安定性の結果を整理した。また、焼却主灰を細骨材に用いたセメント硬化体を試作し、製造、耐久性、安全性および施工性について得られた知見を報告した。

目 次

§ 1. はじめに

§ 2. 焼却主灰造粒固化処理物

§ 3. セメント硬化体利用技術

§ 1. はじめに

東日本大震災の災害廃棄物処理業務を行っている宮城県亘理名取ブロック（名取処理区）では、破碎選別した後の再資源化が困難な木くずや可燃物を仮設焼却炉で焼却処理し、減容化を図った。焼却後に発生した残渣の内、焼却主灰（焼却炉の炉底に残存した灰分）については、リサイクル処理として、焼却主灰に固化材を添加・混合して造粒固化処理物を製造した。しかしながら、災害廃棄物処理の過程で発生した焼却主灰やその固化処理物に関する既往データは少なく、その特性について十分な知見がなかった。そこで、名取処理区で焼却主灰造粒固化処理物の試料を採取し、物理特性、強度特性、耐久性ならびに安定性などを把握するために試験を実施し、土質材料特性を整理した。また、名取処理区で採取した焼却主灰を骨材代替に利用したセメント硬化体の製造、耐久性および施工性について実験的に検討した。

本報では、焼却主灰造粒固化処理物およびセメント硬化体利用技術について、得られた知見を整理し報告する。

§ 2. 焼却主灰造粒固化処理物

2-1 焼却主灰と固化処理方法

名取処理区ではストーカ方式の焼却施設にて可燃物を焼却処理している¹⁾。焼却後の主灰は、酸化マグネシウム系固化材を15%添加混合して造粒固化し土木資材として利用する。その工程は、図-1に示すように、前処理（金属類の除去・クリンカ破碎）、混練、養生（5日間程度）、後処理（破碎）の順にて行う。写真-1に焼却主灰固化処理物の仮置き状況を示す。

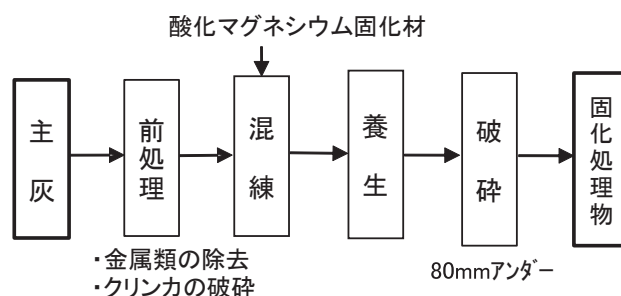


図-1 処理フロー



写真-1 焼却主灰造粒固化処理物の仮置き状況

* 技術研究所 土木技術グループ

** 技術研究所

*** 土木設計部

**** 北日本（支）名取（出）

表一 主灰造粒固化処理物の物理化学的特性

項 目		焼却主灰 (11/15)	主灰造粒固化物		
			1 回目採取 (11/8)	2 回目採取 (11/15)	3 回目採取 (12/10)
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)		2.580	2.514	2.545	2.612
含水比 w_n (%)		29.1	36.2	27.7	23.8
粒度	礫分 (%)	50.3	39.5	45.1	46.1
	砂分 (%)	42.3	37.2	32.0	35.6
	シルト・粘土分 (%)	7.4	23.3	22.9	18.3
	最大粒径 (mm)	37.5	53	53	53
	均等係数	33	157	259	172
コーン指数 q_c (kN/m ²)		4154	4473	6417	7938
化学特性	pH	10.9	11.5	11.3	11.8
	塩化物含有量 (mg/g)	5.0	4.0	4.3	2.9
	強熱減量 (%)	7.3	20.0	18.2	13.8

2-2 試験方法

焼却主灰造粒固化処理物の土質材料特性を確認するため、物理試験、強度特性はコーン指数、CBR、圧縮強さ試験、耐久性と安定性はスレーキング試験、締固め後の粒度試験、長期収縮膨張量試験を行った。固化処理物は、3回採取してその変動程度を確認した。試験実施の材齢は固化処理後約3週間～1.5ヶ月である。

2-3 試験結果

(1) 物理化学的特性

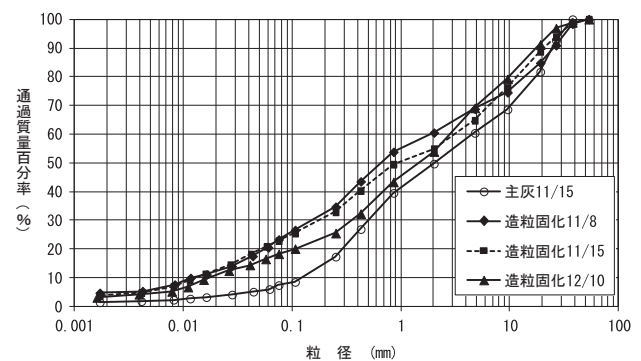
表一および図一に焼却主灰造粒固化処理物の物理化学特性および粒度分布をそれぞれ示す。試験の結果、含水比は23～36%と変動がみられた。粒度は、礫分39～46%、砂分32～37%、細粒分18～23%で、固化処理の前後で破碎工程を経ているため、焼却主灰に比べて、やや細粒になる傾向にあった。全3回採取した焼却主灰造粒固化処理物の粒度の変動幅は10%程度であった。強熱減量は主灰が7.3%に対して、固化処理物は13～20%と大きい。固化水和物の影響と考えられる。

(2) 固化塊の特性

固化処理・養生後、5～30 cm 程度の大きさの固化塊ができた（写真一）。表二に固化塊の特性試験結果を示す。硬さの確認は、点載荷試験で行った。固化塊にはスラグ等の礫が混入するため、コア供試体の採取が困難であったためである。固化塊の点載荷強さは49 kN/m²であり、一軸圧縮強さに換算すると $q_u = 788 \text{ N/m}^2$ であった。また、固化処理物の耐久性の評価を目的に、スレーキング試験 (JHS 110) を行った。スレーキング率は4.3%で、脆弱岩材料区分の30%以下の土砂化しにくく、圧縮沈下が小さい材料に該当する。

(3) 強度特性

表一、表三および図三に強度試験結果を示す。コーン指数試験以外は2回目に採取した造粒固化処理物の試料について試験を行った。モールドに突き固めた造粒固化処理物のコーン指数 (JIS A 1228) は4,473～7,938 kN/m²で、第2種建設発生土 ($q_c \geq 800 \text{ kN/m}^2$) よりも



図一 粒度試験結果



写真一 固化塊の例

表二 固化塊の特性

点載荷強さ (kN/m ²)	一軸圧縮強度 換算値 (kN/m ²)	スレーキング率 (%)
49.1	788	4.3

表三 材料強度特性

項 目		固化処理物	
締固め	締固め方法	B-c 法	E-c 法
	最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.352	1.460
	最適含水比 (%)	29.8	23.6
CBR	修正 CBR95% (%)	—	64.2
	修正 CBR90% (%)	—	34.4
三軸	粘着力 c_d (kN/m ²)	21.3	—
	内部摩擦角 ϕ_d (°)	35.9	—

十分大きく、焼却主灰よりも1.1～1.9倍程度の値を示した。CBRは、締固め度90%に対して、修正CBR=34.4%、締固め度95%に対して修正CBR=64.2%であり、再生クラッシャーラン（修正CBR30%以上）に相当する。

盛土時のせん断強さを把握するため、締固め条件B法による締固め度90%密度の試料を作製し、三軸圧縮試験（CD条件）を行った。試験の結果、造粒固化処理物の内部摩擦角 ϕ_d は35.9°で、一般の砂質土と同程度であった。

(4) 安定性

主灰造粒固化処理物の耐久性の一つとして、締固め試験後の試料について粒度試験（ふるい分け試験）を行い、固化物の礫状塊の破碎性について調査した。図一4に締固め前後の粒度分布を示す。締固め前に比べて、B法およびE法による締固め後は2～10mmの粒径において通過質量百分率が4～7%増加する傾向がみられる程度であり、粉碎するような破碎はなかった。

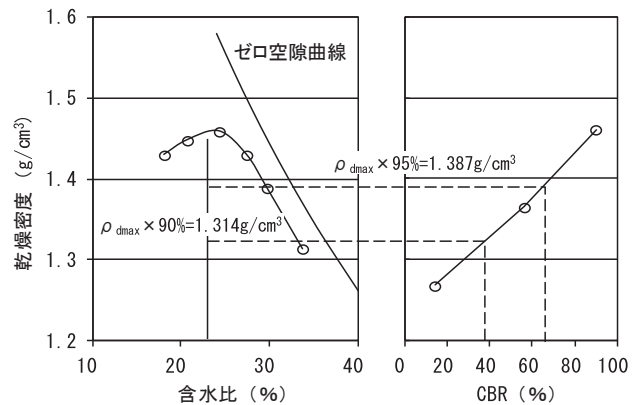
主灰造粒固化処理物を盛土利用する場合、沈下または膨張を起こさないか長期的な挙動を把握するため、CBR試験の膨張比測定を3ヶ月の期間に亘って行った。試料の締固め条件は設計CBRに準じ、ランマー4.5kgで3層67回とした。養生条件は水浸・载荷（CBR有孔板5kg）の他に気中・载荷、気中・载荷なしの3条件で行った。また、比較のために固化処理前の主灰についても水浸・载荷の条件で測定を行った。図一5に収縮膨張試験結果を示す。主灰（水浸）の場合、水浸直後に膨張比は-1%程度となり収縮沈下を生じた。これは、主灰粒子にぜい弱な部分もあり、水浸によりコラプスを生じたことが原因と推察される。これに対して、固化物の膨張比は70日間で±0.1%以内であり小さいものであった。なお、1日後以降の経時変化に着目すると水浸条件ならびに気中・载荷無の場合はわずかに膨張する傾向を示した。一方、気中・载荷の場合は、700時間（1ヶ月）までわずかな沈下傾向を示し、その後一定となった。このわずかな膨張傾向は、酸化マグネシウムおよび主灰中の物質の水和反応等の現象の影響が可能性として考えられる。以上より、主灰造粒固化処理物の安定性を確認できた。

(5) まとめ

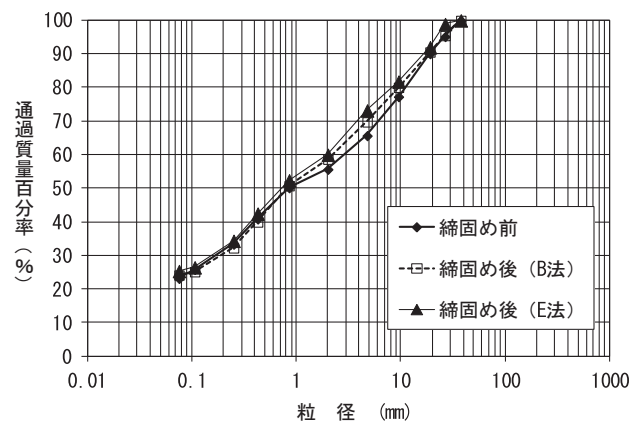
主灰造粒固化処理物の土質材料特性を評価した結果、物理特性・強度は一般の土質材料と同等以上を有しており、耐久性・安定性も遜色なく、盛土材料に利用可能な性状であった。

2-4 施工事例

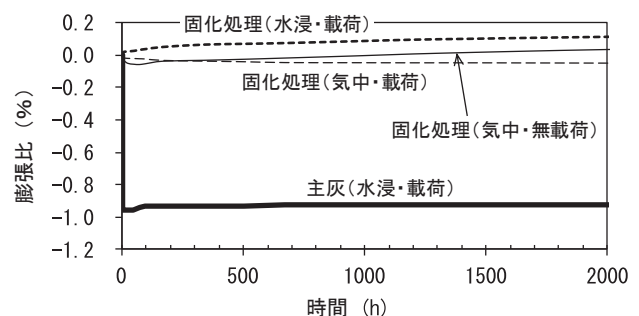
名取処理区で製造した焼却主灰造粒固化処理物は、閑上一次仮置場内の保安林解除地域である名取市サイクリングスポーツコース（写真一3）での工事において、盛土（路体）材に利用された。施工にあたり、土壤汚染対策法の基準に準拠し、日常管理の試験項目・頻度として、放射性セシウム、DXN（ダイオキシン）、第二種特定有害物質の溶出・含有を月1回、特定有害物質25項目の溶



図一3 CBR試験結果



図一4 固化処理物の締固め前後の粒度分布



図一5 収縮膨張試験結果



写真一3 現場施工状況

出試験を900 m³に1回、第二種特定有害物質の溶出試験（自主）を600 m³に1回実施した。

§3. セメント硬化体利用技術

3-1 概要

震災がれき焼却主灰の有効利用方法として、焼却主灰を原灰のままコンクリートの骨材代替に用いる技術について検討した。事前にモルタルで検討した結果²⁾、細骨材に対する主灰置換率の増加に伴い、強度低下や収縮ひずみ量の増加が確認されたが、細骨材代替として利用は可能とされた。但し、焼却主灰の絶乾密度が 2.00 g/cm^3 未満と小さいため、単位容積質量の確保が課題となった。そこで、粗骨材には、密度が大きく、現地調達が比較的容易な副産物を考え、鉄鋼製造工程で生成される製鋼スラグを選定した。また、セメント硬化体の製造方法として、副産物である製鋼スラグを厳密に粒度調整せずに、現状の粗粒材のままでできるだけ多く利用できる技術として、ポストパックド工法（モルタル先行注入法）を採用し、焼却主灰を用いたモルタルを型枠内に注入した後、製鋼スラグの粗粒材を投入する方法とした³⁾。

本書では、焼却主灰と製鋼スラグを骨材代替に用いてポストパックド工法で作製したセメント硬化体の基本材料特性として、モルタル性状、充てん性、強度および耐久性（長さ変化率、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性）のほか、一辺 50 cm の立方体を作製して施工性や強度等も確認した。

3-2 使用材料

表-4 にモルタルの使用材料を示す。セメントは高炉セメント B 種、焼却主灰は、宮城県名取市にある亘理名取ブロック名取処理区内の仮設焼却炉（ストーカ式炉）で採取した（写真-4）。焼却主灰に含まれる不燃物（金属片、瓦片等）を除去するため、大型振動スクリーンで分級し、粒径 15 mm 未満（全体の約 97 mass%）を原灰のまま使用した（図-6）。絶乾密度は 1.99 g/cm^3 で一般の骨材に比べて小さく、吸水率は 8.7% と高い。蛍光 X 線による化学成分分析の結果、 SiO_2 : 54.6%、 Al_2O_3 : 12.9%、 CaO : 9.1%、 Fe_2O_3 : 6.1% で、ig.loss が 8.0% と高く、Cl は 1.0% 未満で検出量は極わずかであった。

表-5 および表-6 に製鋼スラグの物理的性質および化学成分を示す。製鋼スラグは、精錬炉の種類により、転炉系と電気炉系に大別されるが、本検討では、宮城県内で調達可能な電気炉酸化・還元混合スラグ（写真-5）を選定した。電気炉酸化・還元混合スラグは、酸化スラグに微粒分の多い還元スラグが混合され、道路用路盤材などに常用生産品として出荷されており、微粒地金分がやや多いため、磁力選別の影響が少ない粗粒ほど密度が大きくなる。粒度は 40~25 mm で、一部 60 mm が混入しており、エージング処理（製鋼スラグ内に残存したカルシウム成分（未反応の生石灰）が水と反応して体積膨張するのを低減し安定化させる処理）済みである。

表-4 モルタルの使用材料

種類	記号	仕 様
水	W	上水道水
セメント	C	高炉セメント B 種、密度 3.04 g/cm^3
焼却主灰	S	仮設焼却炉（ストーカ式炉）、絶乾密度 1.99 g/cm^3 、吸水率 8.7%、実積率 59.6%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤標準形（I 種）
	AE	AE 助剤（フライアッシュ用）

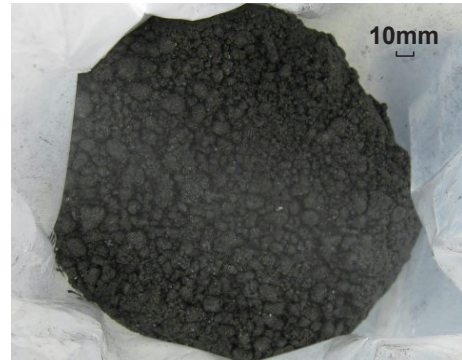


写真-4 焼却主灰

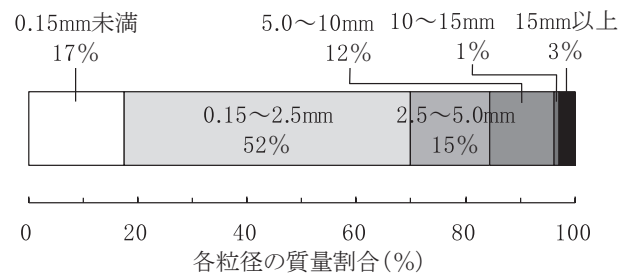


図-6 焼却主灰の粒度分布

表-5 製鋼スラグの物理的性質

製造場所	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	粒度範囲 (mm)
宮城県	3.2	2.5	1.85	57.7	40 (60) ~ 25 相当

表-6 製鋼スラグの化学成分 (mass%)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	T-Fe	MgO	MnO	S	P ₂ O ₅
20.7	8.6	14.2	26.7	8.2	5.8	0.4	0.2



写真-5 製鋼スラグ（電気炉酸化・還元混合スラグ）

3-3 モルタル配合

モルタル配合選定における実験パラメータは、細骨材セメント比 (S/C)、水セメント比 (W/C) とした。モルタルの混練手順は、水以外の材料をミキサ内に投入後 30 秒間空練りし、その後、水を投入して 1 分間練り混ぜた後で掻き落としした。その後、さらに 2 分間追い練りして完成とした。混合速度は低速で行った。

表一七および表一八に試験の結果、選定したモルタルの決定配合およびフレッシュ性状結果を示す。モルタル中に占める焼却主灰 (S) の量は、モルタル質量に対して 44% (容積比で 36%) であった。フローの目標値は、モルタル充てん性と製鋼スラグとの一体性を確保できる範囲とし、空気量は硬化体中で 4.0~6.0% 確保できる値とした。試験の結果、目標値を満足する値を得られた。

3-4 実験概要

焼却主灰を原灰のまま細骨材代替に用いたモルタルを決定配合に基づいて製造し、型枠内に注入した後、事前に 3 日間吸水養生した表乾状態の製鋼スラグを投入してセメント硬化体を作製した。型枠 2 種類 (円柱 casting: $\phi 15 \text{ cm} \times \text{H}30 \text{ cm}$, 直方体: $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 53 \text{ cm}$) を使用し、セメント硬化体の基本物性として、モルタルのフレッシュ性状、充てん性、強度、各種耐久性および重金属類の溶出特性を評価した。次に、一辺 50 cm の立方体を作製し、施工性、コア供試体による強度および充てん性の確認を行った。

3-5 実験結果

(1) 廃棄物・副産物利用率

骨材はすべて廃棄物 (焼却主灰) と副産物 (製鋼スラグ) を利用しており、セメント硬化体の全容積に占める廃棄物・副産物利用率は 67% と高く、セメント中に含まれる高炉スラグ微粉末 (副産物) も含めると、全体で 70% を超えた。

(2) 製鋼スラグの容積率

円柱 ($\phi 15 \text{ cm} \times \text{H}30 \text{ cm}$) と直方体 ($15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 53 \text{ cm}$) の casting 型枠 2 種類 (写真一三) を使用し、打込みを 1 層もしくは 2 層に分けて仕上げた供試体を作製した後、各々投入した製鋼スラグの質量や型枠の容積、製鋼スラグの表乾密度等から製鋼スラグの容積率を算出した。試験の結果、円柱および直方体ともに、1 層打込みに比べて、2 層打込みの方が容積率の値が小さい傾向となったが、平均 47.8% となり、JIS 試験法で求めた実績率の値 57.7% の約 80% で、2 割程度小さい結果となった。

(3) 外観・充てん性

円柱 ($\phi 15 \text{ cm} \times \text{H}30 \text{ cm}$) と直方体 ($15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 53 \text{ cm}$) の型枠から脱型した後の供試体の外観仕上がりは良好であり、豆板や表面気泡などの不具合箇所は見られなかった。また、円柱供試体を長手方向で半分切断した断面の目視観察の結果、充てん性に問題はなかった

表一七 モルタル配合

W/C (%)	S/C	S (mass%) (vol%)	単位量 (kg/m ³)			SP	AE
			W	C	S		
57.0	1.24	44 36	360	632	782	C×0.8%	C×2.0%

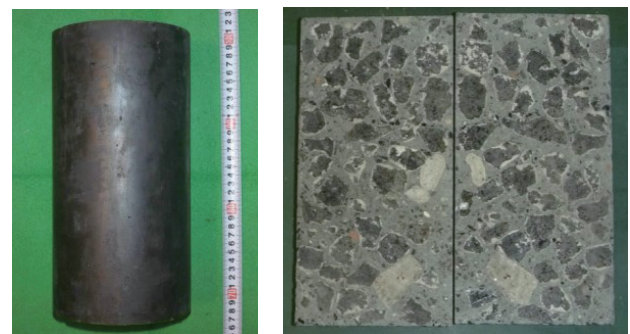
表一八 モルタルのフレッシュ性状

	フロー (mm)	空気量 (%)	ブリーディング率 (%)
試験方法	JIS R 5201 落下衝撃なし	JIS A 1128	JSCE-F 522
目標値	250 ± 50 mm	8.0~12.0%	3% 以下
試験結果	260 × 257	8.2	0

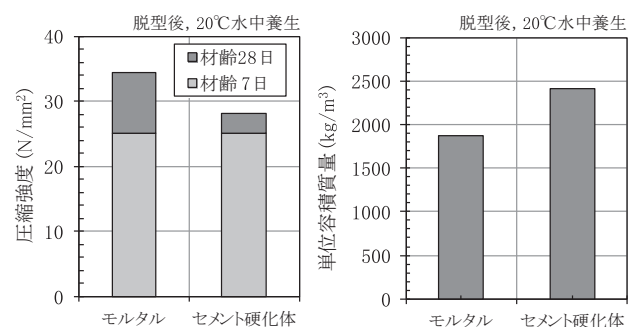


円柱 $\phi 15 \text{ cm} \times \text{H}30 \text{ cm}$ 直方体 $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 53 \text{ cm}$

写真一六 製鋼スラグの容積率の確認



写真一七 円柱供試体 $\phi 15 \text{ cm} \times \text{H}30 \text{ cm}$ の充てん状況



図一七 圧縮強度と単位容積質量の結果

(写真一七)。

(4) 圧縮強度、単位容積質量

図一七に一軸圧縮強度および単位容積質量の試験結果を示す。材齢 7 日、28 日における硬化体の圧縮強度の値は 25.1N/mm² および 28.2N/mm² で、材齢 7 日以降の強

度増進が小さいものの、 20N/mm^2 以上を確保できた。また、硬化体の単位容積質量は $2,460\text{ kg/m}^3$ で、一般的なコンクリートよりも若干大きい結果であった。

(5) 耐久性

表一9に、セメント硬化体の長さ変化試験、促進中性化試験および凍結融解試験の結果を示す。乾燥材齢26週目での長さ変化率の値は 182×10^{-6} と極めて小さく、土木学会の規定値以下であった。この理由として、硬化体中に占める粗骨材（製鋼スラグ）の容積率が約50%で、通常のコンクリートの1.5倍ほどあり、収縮変形挙動に影響するモルタル容積が小さいことなどが考えられる。促進中性化試験による中性化速度係数（促進）の値は $3.3\text{ mm}/\sqrt{\text{週}}$ で、促進材齢26週での中性化深さ16.5mmは、実材齢換算48年に相当し、十分な中性化抵抗性を有していた。一方、凍結融解試験による相対動弾性係数の値は、26サイクル目で66%まで低下した。この原因として、主灰に由来して混在した木片等の有機物が、スケーリングやポップアウト現象を誘発し、局所的な断面欠損を生じさせたためと考える。

(6) 安全性

第2種特定有害物質（重金属類）の利用有姿での溶出試験の結果、全ての成分で環境基準を満足する結果であった。また、硬化体中の放射性セシウムの含有・溶出試験を実施した結果、含有量は 100Bq/kg 未満で、放射性セシウム溶出量は検出限界濃度未満であった。

(7) ブロック試作による施工性確認

一辺50cmの矩形ブロックを試作し、施工性やコア供試体による強度および充てん性を確認した。1回の最大打込み高さは200mmとした（写真一8、写真一9）。外観観察およびコア供試体（ $\phi 12.5\text{ cm}$ ）による充てん確認の結果、充てん不良箇所や表面気泡等は確認されず、仕上がりは良好であった。また、コア供試体と現場封緘養生供試体の圧縮強度および単位容積質量は、それぞれ概ね等しい値であった。

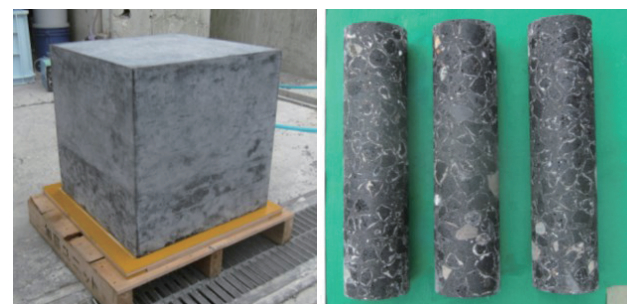
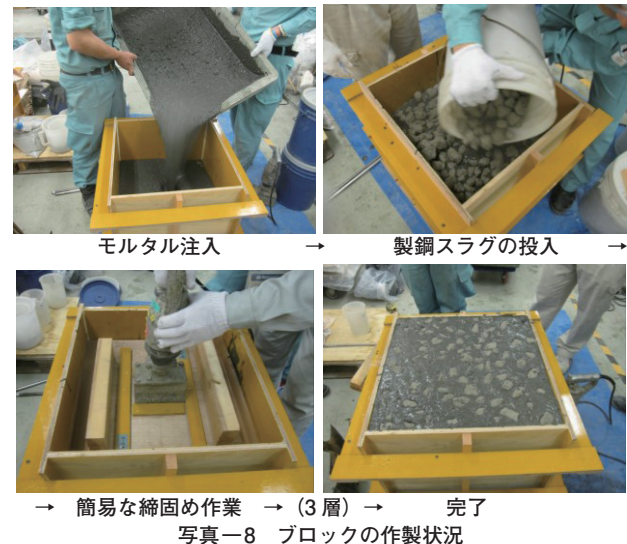
3-6 まとめ

本検討の範囲内において、焼却主灰を原灰のまま細骨材として用いたセメント硬化体は、強度や中性化抵抗性が一般的な土木コンクリートと概ね同等で、長さ変化率は極めて小さくなる傾向が確認されたが、凍結融解抵抗性は若干劣ることがわかった。また、重金属類や放射性セシウムに係わる安全性に問題はないことがわかった。

謝辞：造粒固化処理物の検討にあたり、ご協力を頂いた宮城県環境生活部ならびに関係各位に感謝致します。また、セメント固化利用技術の検討では、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）での活動成果の一部を使用しており、久田教授（東北大学大学院）にご指導を頂いた。さらに、試料の採取には、宮城県や

表一9 セメント硬化体の耐久性試験結果

試験名 試験基準	評価項目	規定値	試験結果
長さ変化試験 JIS A 1129	長さ変化率	$1,000 \times 10^{-6}$ 以下（JSCE）	182×10^{-6} （乾燥材齢26週）
促進中性化試験 JIS A 1153	促進中性化 速度係数	—	$3.3\text{ mm}/\sqrt{\text{週}}$ （促進期間26週）
凍結融解試験 JIS A 1148（A法）	相対動弾性 係数	60%以上	66% （サイクル26回）



亘理名取ブロック名取処理区の関係者の協力を得ており、ここに記して心より謝意を表する。

参考文献

- 1) 山際勝治，宮城英徳，八村幸一，佐藤靖彦，小嶋平三，大塚義一：災害廃棄物の対応の状況〈特集〉汚染土壌。廃棄物等の処理，地盤工学会誌，Vol. 61，No. 2，pp. 8-11，2013.2.
- 2) 椎名貴快，久田 真，羽原俊祐，緑川猛彦：震災がれき焼却灰を細骨材としたモルタルの諸物性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35，No. 1，pp. 1609-1614，2013.7
- 3) 椎名貴快，久田真，友竹博一，岩瀬勝洋：震災がれき焼却主灰と製鋼スラグを骨材に用いたセメント硬化体の基礎物性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 36，2014.7（投稿中）