

# 報告 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

椎名 貴快<sup>\*1</sup>・久田 真<sup>\*2</sup>・友竹 博一<sup>\*3</sup>・岩瀬 勝洋<sup>\*4</sup>

**要旨：**東日本大震災のがれき処理過程で発生した焼却主灰と、鉄鋼副産物である製鋼スラグを骨材代替として用いたセメント硬化体の基礎物性を室内試験で確認した。製造にはポストパッキング工法（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して成形した。試験の結果、28日圧縮強度や中性化抵抗性は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、凍結融解抵抗性は劣ることがわかった。また、使用した製鋼スラグ2種類（転炉系、電気炉系）の品種の違いによる基礎物性への優位な差は確認できなかった。

**キーワード：**東日本大震災、がれき焼却主灰、製鋼スラグ、ポストパッキング工法、強度、耐久性

## 1. はじめに

東日本大震災で発生した木くずやコンクリートくず、可燃混合物などの災害廃棄物の量は膨大で、宮城県では一般廃棄物排出量の13年分に相当した。このため、埋立処分量を減量化するため、災害廃棄物の分別処理が徹底され、リサイクルが促進された。

著者らは、可燃混合物の処理過程で発生した仮設焼却炉の焼却主灰（焼却炉の炉底に残存した灰分）に着目し、原灰のままコンクリートの骨材代替に有効利用できないかモルタルで検討した<sup>1)</sup>。試験の結果、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、焼却主灰の絶対密度が2.00g/cm<sup>3</sup>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きるだけ多く利用できる技術として、ポストパッキング工法（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。

本稿では、焼却主灰と製鋼スラグを骨材代替に用いてポストパッキング工法で作製したセメント硬化体の基礎物性として、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50cmの立方体を作製して施工性や強度等も確認した。なお、製鋼スラグは品種の異なる2種類（転炉系、電気炉系）を使用し、基礎物性への影響を比較した。

## 2. 使用材料およびモルタル配合選定

### 2.1 使用材料

表-1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-1）。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15mm未満（全体の約97mass%）を原灰のまま使用した（図-1）。絶対密度は1.99g/cm<sup>3</sup>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<sub>2</sub>:54.6%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:12.9%、CaO:9.1%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: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-1 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3.04g/cm <sup>3</sup>               |
| 焼却主灰 | S  | 絶対密度1.99g/cm <sup>3</sup> 、吸水率8.7%<br>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)                                 |

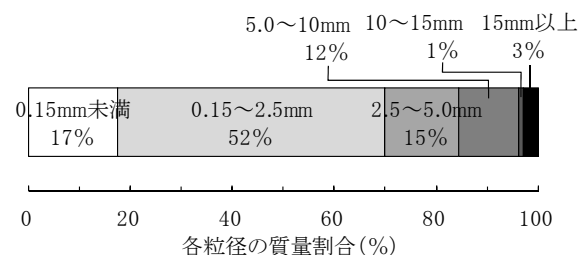


図-1 焼却主灰の粒度分布

\*1 西松建設(株) 技術研究所土木技術グループ 副課長 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 (株)C Iテクノ 工博 (正会員)

\*4 竹本油脂(株) 第三事業部営業統括部

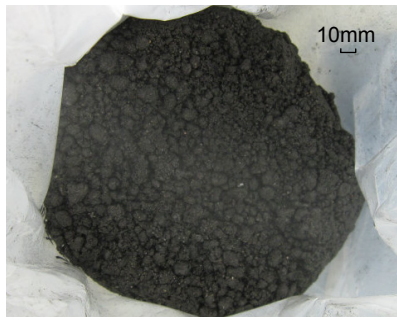


写真-1 焼却主灰

表-2 に製鋼スラグの化学成分及び物理的性質を示す。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。本検討では、転炉系予備処理スラグと電気炉酸化・還元混合スラグの2種類(写真-2)を選定し、品種の違いによる影響を確認した。転炉系予備処理スラグは、通常の転炉スラグよりも CaO 含有量が少なく、高炉スラグ微粉末やフライアッシュと混合した水和固化体<sup>2)</sup>の製造などにも利用されており、多孔質のため、粗粒ほどかさ比重が小さくなる。一方、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。両スラグとも、粒度は40~25mmで、一部60mm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。

## 2.2 モルタル配合選定

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。表-3 にモルタルの目標性能を示す。モルタル充てん性と製鋼スラグとの一体性の確保のため、フローは250±50mmを目標とした。ただし、落下衝撃を加えず、コーンを引き上げた時の自重広がり直径で評価した。セメント硬化体中の空気量を4.5~6.0%とするため、モルタルの空気量は8.0~12.0%を目標とした。また、ブリーディング率の目標は3%以下とした。なお、焼却主灰は、現場での処理過程で飛散防止や冷却を目的に水が散布されており、表面水率が20%超の高含水状態となる場合がある。このため、モルタルのS/Cが大きくなり、W/Cが小さい配合では表面水の配合補正ができなくなるため、S/Cは1.75以下、W/Cは60%を基準として検討した。

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。

図-2 にモルタルフローとS/Cの関係を示す。フロー

表-2 製鋼スラグの化学成分及び物理的性質

| 項目                       | 転炉系予備処理スラグ                     | 電気炉酸化・還元混合スラグ |      |
|--------------------------|--------------------------------|---------------|------|
| 製造場所                     | 千葉県, 茨城県                       | 宮城県           |      |
| 化学成分 (mass%)             | CaO                            | 31.2          | 20.7 |
|                          | SiO <sub>2</sub>               | 28.9          | 8.6  |
|                          | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.8           | 14.2 |
|                          | T-Fe                           | 14.8          | 26.7 |
|                          | MgO                            | 2.5           | 8.2  |
|                          | MnO                            | 6.5           | 5.8  |
|                          | S                              | 0.1           | 0.4  |
|                          | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 2.4           | 0.2  |
| 塩基度 CaO/SiO <sub>2</sub> | 1.1                            | 2.4           |      |
| 絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 2.7                            | 3.2           |      |
| 吸水率(%)                   | 7.0                            | 2.5           |      |
| 単位容積質量(kg/L)             | 1.35                           | 1.85          |      |
| 実積率(%)                   | 49.8                           | 57.7          |      |
| 粒度範囲(mm)                 | 40(60)~25 相当                   | 40(60)~25 相当  |      |



転炉系予備処理スラグ



電気炉酸化・還元混合スラグ

写真-2 製鋼スラグ

表-3 モルタルの目標性能

| 試験項目                    | 目標値       |
|-------------------------|-----------|
| フロー(落下衝撃なし)(JIS R 5201) | 250±50mm  |
| 空気量(JIS A 1128)         | 8.0~12.0% |
| ブリーディング率(JSCE-F 522)    | 3%以下      |

は、S/Cが小さいほど、またW/Cが大きいほど、大きくなり流動性が向上した。ただし、W/C=60%でS/Cを1.16まで小さくした場合、材料分離が発生し、一方でS/Cを1.75まで大きくした場合、粘性が高くなり、配合上の性状限界に達した。W/C=57%では、S/Cが1.24の時、材料

分離もなく、フロー235mm×234mm で良好な性状を示した。図-3に空気量とS/Cの関係を示す。空気量は、S/Cが大きいくほど空気連行性が低下し、通常の普通砂を用いた場合とは正反対の傾向が現れた。これは、焼却主灰中に含まれている微粒状の未燃カーボン分により、AE 剤成分が吸着された影響と推定される。なお、AE 助剤には、カーボン吸着による影響を考慮し、フライアッシュ用製品を使用した。標準的な添加率よりも使用量が多い傾向となった。ここでの結果から、モルタル配合はW/C=57%、S/C=1.24 を選定した。次に、選定した配合について、ブリーディング試験を JSCE-F 522 のポリエチレン袋方法に準じて実施し、ブリーディング率を確認した。試験の結果、3時間及び20時間でのブリーディング率は0%であり、目標性能をクリアした。

以上より、表-4 にモルタル配合選定試験の決定配合を示す。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。

### 3. 実験

#### 3.1 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前章で決定した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: φ15cm×H30cm, 直方体:15cm×15cm×53cm)を使用し、セメント硬化体の基礎物性として、モルタルのフレッシュ性状、充てん性、強度、耐久性(長さ変化率、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性)及び重金属類の溶出特性を評価した。なお、製鋼スラグは2種類を使用し、品種の違いによる基礎物性への影響もあわせて確認した。次に、一辺50cmの立方体を作製し、施工性、コア供試体による強度及び充てん性の確認を行った。

#### 3.2 実験結果

##### (1) モルタルのフレッシュ性状試験結果

表-5 にモルタルのフレッシュ性状試験結果を示す。本実験で使用した焼却主灰は、前章のモルタル配合選定時に用いた灰とはロットが異なり、表面水率27.3%で前回(25.8%)より高いが、モルタルのフロー、空気量及びブリーディング率は所定の目標性能を得られた。

##### (2) 製鋼スラグの実積率

円柱(φ15cm×H30cm)と直方体(15×15×53cm)の casting 型枠2種類(写真-3)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見掛けの実積率を算出し、JIS 試験法(JIS A 1104)の実積率と比較した。図-4に実積率の結果を示す。鉄鋼スラグの種類によらず、円柱及び直方

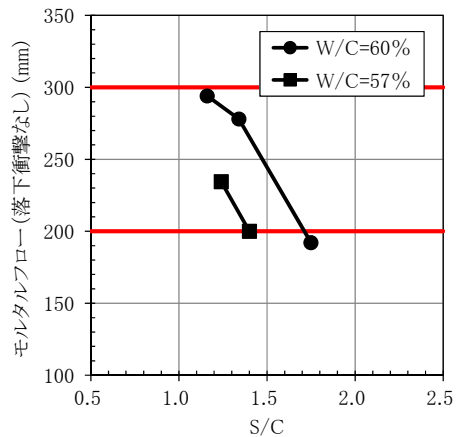


図-2 モルタルフローと S/C の関係

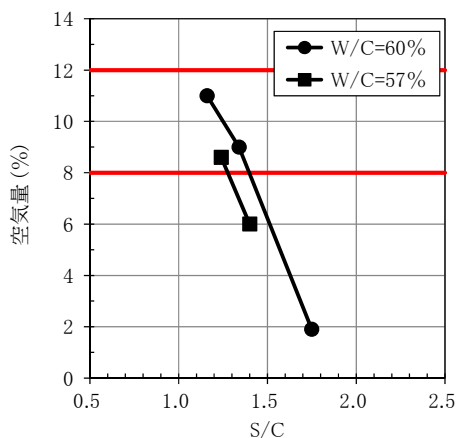


図-3 空気量と S/C の関係

表-4 モルタル決定配合

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

表-5 モルタルのフレッシュ性状試験結果

| フロー (mm) | 空気量 (%) | モルタル温度 (°C) | ブリーディング率 (%) |
|----------|---------|-------------|--------------|
| 260×257  | 8.2     | 23.0        | 0            |



円柱 φ15cm×H30cm

直方体 15cm×15cm×53cm

写真-3 製鋼スラグの単位容積質量及び実積率の確認

体ともに、1層打込みに比べて、2層打込みの方が実積率の値が小さい傾向となった。また、転炉系予備処理スラグが平均41.7%、電気炉酸化・還元混合スラグが平均47.8%で電気炉系スラグの方がわずかに大きい、JIS試験法で求めた実積率の値と比較すると、どちらもJIS試験値の80%程度で、2割程度小さい結果となった。

### (3) 外観・充てん性

円柱(φ15cm×H30cm)と直方体(15cm×15cm×53cm)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に切断した断面の目視観察の結果、充てん性に問題はなく、製鋼スラグの品種の違いによる差も確認されなかった(写真-4)。

### (4) 圧縮強度、単位容積質量

図-5に、材齢7日、28日におけるモルタル及びセメント硬化体の圧縮強度試験の結果を示す。供試体の寸法は、モルタルが円柱φ5cm×H10cm、セメント硬化体が円柱φ15cm×H30cmで、それぞれ打込み翌日に脱型した後、20℃水中養生した。セメント硬化体の圧縮強度は、材齢7日では電気炉酸化・還元混合スラグを用いた方が大きいものの、材齢28日には転炉系予備処理スラグと概ね等しい値となり、製鋼スラグの品種の違いによる影響は小さく、モルタル強度の約80%であった。なお、電気炉酸化・還元混合スラグは、実積率が転炉系予備処理スラグよりも大きいものの、28日強度で比較すると、強度に対する寄与率は小さいことが分かった。

図-6に、モルタル及びセメント硬化体の単位容積質量の結果を示す。骨材密度の大きい電気炉酸化・還元混合スラグを用いた場合のセメント硬化体の単位容積質量が2,460kg/m<sup>3</sup>で最も大きく、絶乾密度が2.00g/cm<sup>3</sup>程度の焼却主灰を細骨材代替に用いた場合でも、一般的なコンクリートと同等級以上の単位容積質量を確保できた。一方、転炉系予備処理スラグを用いた場合の単位容積質量は2,140kg/m<sup>3</sup>で、電気炉系スラグより約13%小さく、この差は、それぞれの製鋼スラグの密度差に等しい。

### (5) 長さ変化率

図-7及び図-8に、JISA 1129に準拠して測定したモルタル及びセメント硬化体の乾燥収縮に伴う長さ変化率及び質量変化率の試験結果をそれぞれ示す。モルタルの長さ変化率は乾燥材齢26週で2,000×10<sup>-6</sup>に達し、質量変化率は約8%になった。この理由として、焼却主灰の吸水率が高く、特に未燃木片などの有機物が多量に水を含んでおり、乾燥開始とともに表面から急激に逸散することでモルタルが収縮変形し、大きな長さ変化を生じたと推定される。

一方、製鋼スラグを用いたセメント硬化体の長さ変化率は、乾燥材齢26週で200×10<sup>-6</sup>以下と小さく、質量

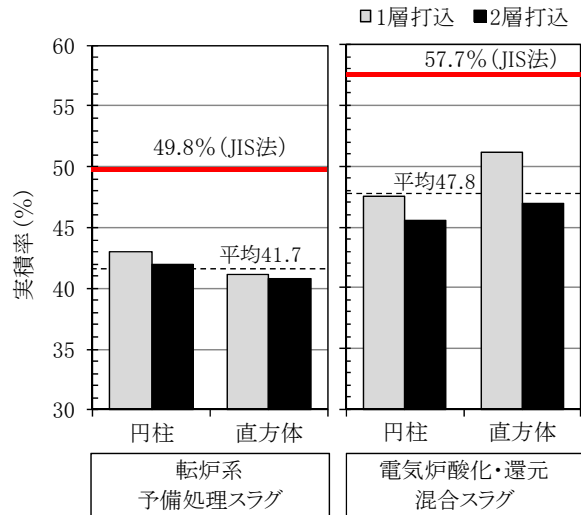


図-4 製鋼スラグの実積率試験結果

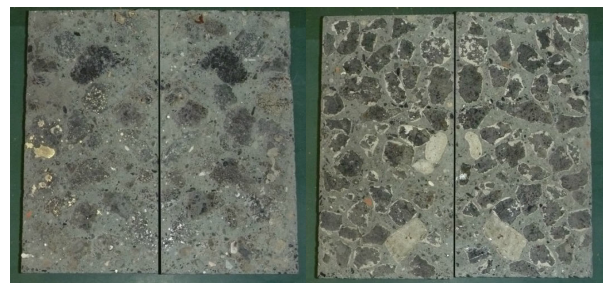


写真-4 円柱供試体φ15cm×H30cmの充てん状況

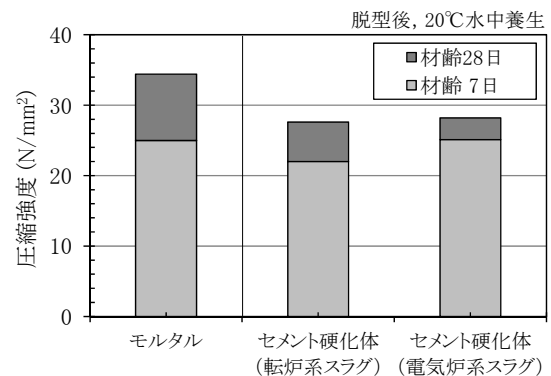


図-5 圧縮強度試験の結果

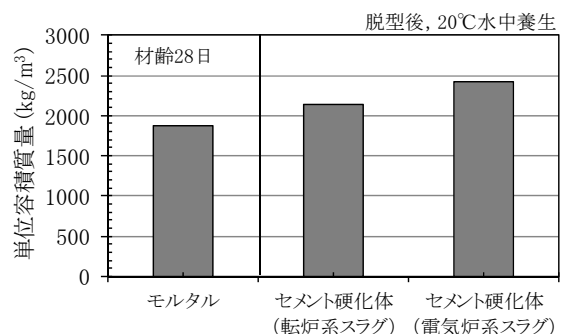


図-6 単位容積質量の試験結果

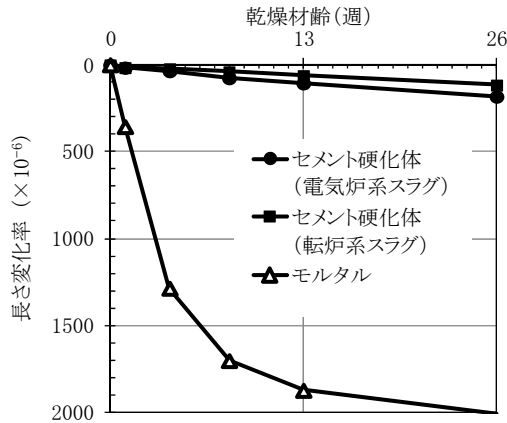


図-7 長さ変化試験の結果

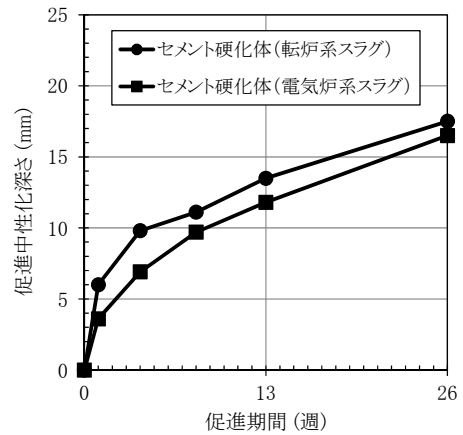


図-9 促進中性化試験の結果

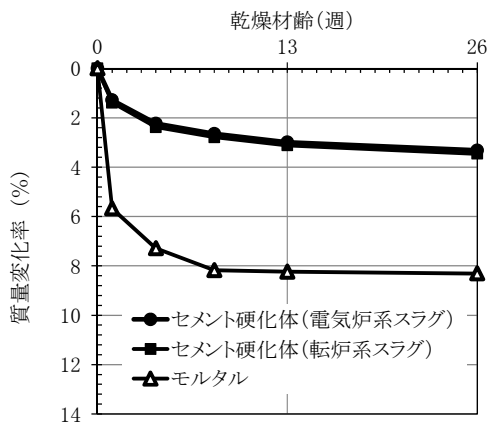


図-8 長さ変化試験における質量変化率の結果

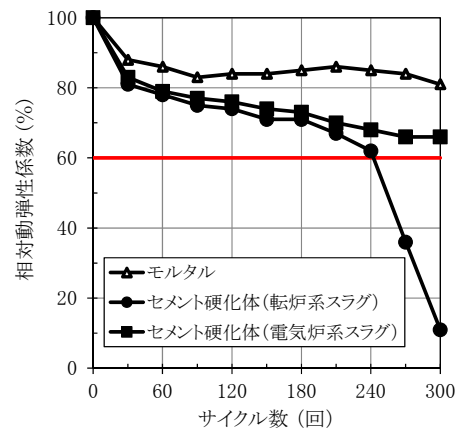


図-10 相対動弾性係数の結果

変化率も約 3.5%で、モルタルに比べて極めて小さい値であった。この理由として、配合上、セメント硬化体中に占める製鋼スラグの割合が約 45vol% (約 60mass%) で、通常のコンクリート配合における単位粗骨材量に比べて 1.4 倍ほど多いため、収縮変形に大きく寄与するモルタル容積が小さくなったことなどが考えられる。また、製鋼スラグは表面に溶岩石のような気泡痕と凹凸が多数あり、多孔質な材料であることも影響したと推定されるが、現状では明確ではない。

#### (6) 中性化抵抗性

図-9 に、JIS A 1153 に準拠して実施したセメント硬化体の促進中性化試験の結果を示す。促進中性化深さは、転炉系予備処理スラグを用いた方がわずかに大きいものの、促進期間 26 週では 16~18mm 程度で概ね等しい値となり、促進中性化速度は同程度であると考え。著者らが過去に実施した促進中性化試験の結果から、高炉セメント B 種を用いた W/C=50%のコンクリート供試体による促進中性化進行傾向と概ね等しい結果であった。

#### (7) 凍結融解抵抗性

図-10 及び図-11 に、JIS A 1148 に準じて A 法(水中凍結融解試験方法)で実施したモルタル及びセメント硬

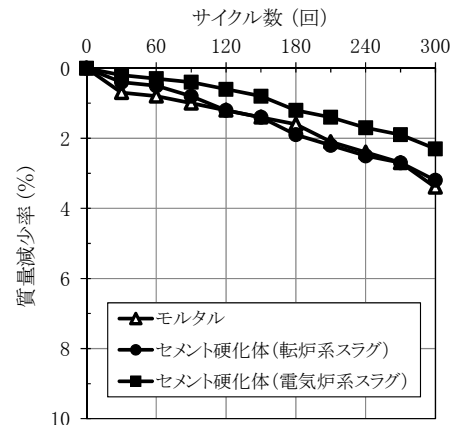


図-11 凍結融解試験における質量減少率の結果

化体の凍結融解試験による相対動弾性係数及び質量減少率の結果を示す。相対動弾性係数の値は、モルタルが 80%以上を保持したものの、転炉系スラグを用いたセメント硬化体は、240 サイクル以降、60%を下回り急激に低下した。一方、電気炉系スラグを用いた場合、所要性能を満足したものの、規定限界近くまで低下した。原因として、多孔質で吸水率の高い製鋼スラグ粗粒材を用いたことによる硬化体内部からの損傷進行が推定される。



写真-5 凍結融解試験後の損傷状況 (転炉系スラグ)

また、焼却主灰に由来して混在した有機物(木片等)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(写真-5)。以上より、本硬化体の凍結融解抵抗性は、通常のコンクリートに比べて低く、寒冷地での使用に注意を要すると考える。

#### (8) 重金属類の溶出特性

モルタルを対象に、第2種特定有害物質(重金属類)の溶出試験を、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(表-6)。焼却主灰には環境基準を超える鉛が含まれていたが、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。

#### (9) ブロック体による施工性確認

一辺 50cm の立方体ブロックを作製し、施工性、コア供試体による強度及び充てん性の確認を行った。粗骨材に電気炉酸化・還元混合スラグを使用し、1回の打込み高さを最大 200mm 高として、3層に分けて施工した(写真-6, 写真-7)。外観観察及びコア供試体(φ 12.5cm)による充てん確認の結果、豆板等の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(打込み面側、底面側)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、それぞれバラツキが小さく、概ね等しい値であった。

#### 4. まとめ

東日本大震災のがれき処理過程で発生した焼却主灰と、鉄鋼副産物である製鋼スラグを骨材代替として用いたセメント硬化体の基礎物性について検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 焼却主灰と製鋼スラグの積極的な使用により、全容積に占めるリサイクル材率は 70%に達した。
- (2) 28 日圧縮強度や中性化抵抗性は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い傾向にあったが、凍結融解抵抗性が劣り、寒冷地での使用には注意を要することがわかった。
- (3) 焼却主灰に由来して混入が懸念された重金属類の溶出量は、環境規制値内で問題なかった。
- (4) 製鋼スラグの品種の違いによる基礎物性での優位な差はなかった。

表-6 重金属類の溶出量試験結果

| 成分<br>含有(mg/kg)<br>溶出(mg/L) | 含有量<br>焼却<br>主灰 | 溶出量試験結果  |          |             |
|-----------------------------|-----------------|----------|----------|-------------|
|                             |                 | 環境<br>基準 | モルタル     | セメント<br>硬化体 |
| カドミウム                       | < 10            | ≦0.01    | < 0.001  | < 0.001     |
| 六価クロム                       | < 10            | ≦0.05    | < 0.005  | < 0.005     |
| 水銀                          | < 1             | ≦0.0005  | < 0.0005 | < 0.0005    |
| セレン                         | < 10            | ≦0.01    | < 0.001  | < 0.001     |
| 鉛                           | 250             | ≦0.01    | < 0.001  | < 0.001     |
| 砒素                          | < 10            | ≦0.01    | < 0.001  | < 0.001     |
| ふっ素                         | 110             | ≦0.8     | < 0.08   | < 0.08      |
| ほう素                         | < 50            | ≦1       | < 0.1    | < 0.1       |



→ 簡易な締固め作業 → (3層) → 完了  
写真-6 ブロック供試体の作製状況

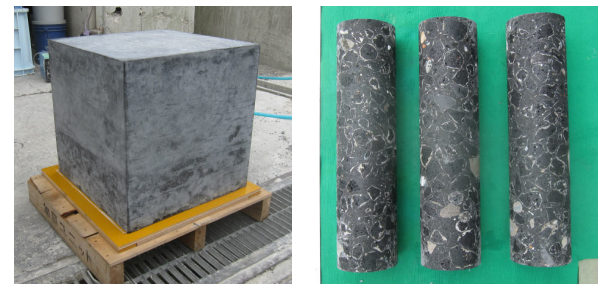


写真-7 一辺 50cm のブロック供試体とコア供試体

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での活動成果の一部であり、宮城県や亘理名取ブロック名取処理区の関係者、JFE スチール(株)の高橋克則氏、(株)太平洋コンサルタントの田中秀和氏と井坂幸俊氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 椎名貴快, 久田 真, 羽原俊祐, 緑川猛彦：災害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
- 2) 宇田川悦郎, 松永久宏：鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材「フロンティアロック™」, JFE 技報, No.19, pp.18-22, 2008