

# 論文 溶融スラグを骨材として用いたコンクリートの耐久性に関する研究

戸田 勝哉<sup>\*1</sup>・池谷 真也<sup>\*2</sup>・田原 賢一<sup>\*3</sup>・岩田 英樹<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本論文は, ごみ焼却灰を溶融させた溶融スラグをコンクリート用骨材として利用することを目的に, 溶融スラグ骨材の性状およびコンクリートに用いた場合の物性等について検討を行ったものである。試験項目は, 骨材特性, 溶融スラグを細骨材および粗骨材として用いた時のフレッシュ性状, 長期強度, 耐久性についてである。本研究で使用した溶融スラグは焼却灰主成分, 生成温度の違いにより生ずる, ガラス質スラグ骨材 (以下ガラス質) と結晶質スラグ骨材 (以下結晶質) の2種類である。その結果, 結晶質の場合は細骨材および粗骨材の両方で使用できる可能性が高く, またガラス質の場合は細骨材として利用できることが明らかとなった。

**キーワード:** ごみ焼却灰, 溶融スラグ, 骨材, ガラス質, 結晶質, 耐久性

## 1. はじめに

焼却灰を溶融してできる溶融スラグはごみを1/1000以下に減容する事が可能であり, 廃棄物処理場の延命化には非常に有効である。さらに溶融化する過程において, 有害とされているダイオキシンを分解するなどの優れた効果がある<sup>1)</sup>。しかし, 生産される溶融スラグの有効利用率は40%以下であるためその利用方法についての検討が必要とされている<sup>2)</sup>。一方, 環境問題などから良質な天然骨材の確保も難しくなっている。溶融スラグをコンクリート用骨材として再利用することは, これら2つの問題を解決する手段として有効であるため, 近年多くの研究機関において研究がされてきている<sup>3)</sup>。ま

た, 2002年にはコンクリート用溶融スラグ細骨材(案)<sup>4)</sup>のTRも制定され, 今後工場製品の材料として利用されることが期待されるが, コンクリート用骨材として利用するためには強度や耐久性を天然骨材程度にすることが要求される。本研究は, 同一のプラントから製造された塩基度(CaO/SiO<sub>2</sub>比)の異なる2種類の溶融スラグ(ガラス質, 結晶質)をコンクリート細骨材および粗骨材として用いたときのコンクリートの諸物性を明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 溶融スラグの化学組成

今回使用した溶融スラグの化学組成および天

表-1 今回用いた骨材の化学組成 (wt%)

|        | MgO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | CaO   | TiO <sub>2</sub> | MnO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | 塩基度  |
|--------|-------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|-------|------------------|-------|--------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|------|
| ガラス質   | 3.63  | 12.43                          | 42.39            | 1.21                          | 33.56 | 0.34             | 0.09  | 0.68                           | 1.95              | 0.66            | 0.40             | 0.79 |
| 結晶質    | 3.50  | 12.17                          | 37.39            | 1.52                          | 39.63 | 0.25             | 0.08  | 1.19                           | 1.66              | 0.67            | 0.25             | 1.06 |
| 富士川産川砂 | 1.37  | 12.86                          | 73.47            | 0.112                         | 1.67  | 0.136            | 0.082 | 3.09                           | 1.85              | 0.554           | 4.68             | -    |
| 愛川産碎石  | 0.994 | 9.19                           | 79.24            | 0.074                         | 1.86  | 0.076            | 0.075 | 2.7                            | 2.08              | 0.476           | 3.06             | -    |

\*1 石川島播磨重工業(株)基盤技術研究所構造研究部 工修 (正会員)

\*2 石川島播磨重工業(株)基盤技術研究所構造研究部課長代理 理修

\*3 石川島播磨重工業(株)総合センター環境化学システム開発部課長代理

\*4 石川島播磨重工業(株)エネルギープラント事業本部機器設計部課長

然骨材の化学組成を表-1 に示す。一般的に、スラグは塩基度が 1 以下では表面の凹凸が無くガラス質となっているが、1 以上では表面の光沢が消え、天然の骨材と見かけ上変わらなくなる。通常、ごみ焼却灰を溶融した場合、塩基度が高いと融液の粘性が低く結晶化し易い。

### 2.2 使用した溶融スラグの特性

今回使用した溶融スラグの原料は家庭などから排出される一般ごみである。そのごみを固形燃料化し、燃焼後 1450℃で溶融したものを空冷で固化させて生成した。一般廃棄物として処理されるためには環境庁告示第 46 号（以下、環告第 46 号）の基準を満足しなければならない。今回使用した溶融スラグの溶出試験結果を表-2 に示す。いずれの値も基準値を満足している。

図-1 に BS812 規格に基づいて行った各種骨材の破碎試験を行った。天然骨材である 2005 碎石に比べて、溶融スラグ骨材の破碎値は大きく、ガラス質の方が結晶質よりも大きい結果となった。結晶質について「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）」（JIS A 1146）に基づいた試験結果を図-2 に示す。材齢がまだ 3

表-2 溶融スラグ溶出試験結果

| 項目    | 単位   | 数値        |
|-------|------|-----------|
| カドミウム | mg/l | 0.001 未満  |
| 鉛     |      | 0.001 未満  |
| 六価クロム |      | 0.01 未満   |
| ヒ素    |      | 0.001 未満  |
| 全水銀   |      | 0.0001 未満 |
| セレン   |      | 0.001 未満  |

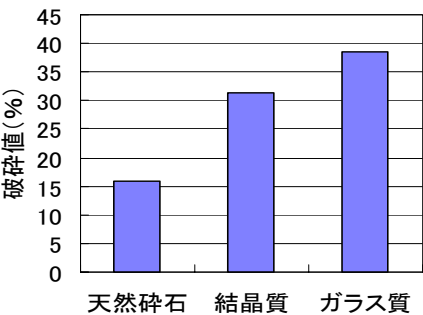


図-1 各種骨材の破碎値

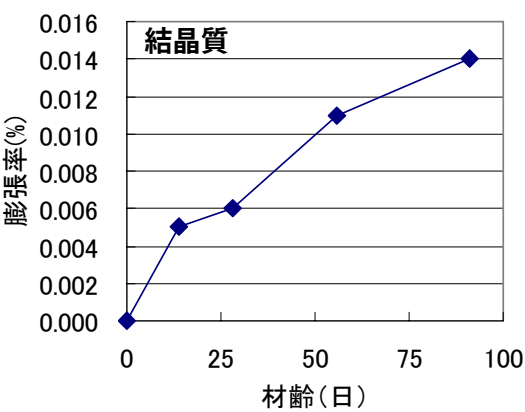


図-2 アルカリ骨材反応性試験結果

ヶ月であるが膨張率は 0.014%程度であり材齢 6 ヶ月でも膨張率が 0.1%を上回ることとは無いと推測される。

### 2.3 使用材料

今回コンクリートに使用した材料の物性値を表-3 に示す。溶融スラグに関しては、ジョークラッシャーで粗粉碎した後、粒径 5～20mm は粗骨材として利用した。細骨材の場合は、粒径 1.2mm 以下と 1.2～5mm が質量比 7：3 になるよ

表-3 使用材料物性値

|       |              |                                         |
|-------|--------------|-----------------------------------------|
| セメント  | 普通ポルトランドセメント | 密度：3.16g/cm <sup>3</sup>                |
| 細骨材   | 富士川産川砂       | 密度：2.65g/cm <sup>3</sup> ,<br>吸水率：2.08% |
|       | ガラス質         | 密度：2.58g/cm <sup>3</sup> ,<br>吸水率：0.25% |
|       | 結晶質          | 密度：2.70g/cm <sup>3</sup> ,<br>吸水率：0.58% |
| 粗骨材   | 愛川産碎石        | 密度：2.69g/cm <sup>3</sup> ,<br>吸水率：1.15% |
|       | ガラス質         | 密度：2.69g/cm <sup>3</sup> ,<br>吸水率：0.28% |
|       | 結晶質          | 密度：2.82g/cm <sup>3</sup> ,<br>吸水率：0.58% |
| 混和剤 1 | AE 減水剤       | リグニンスルホン酸化合物系                           |
| 混和剤 2 | 空気量調整剤       | 変性アルキルカルボン酸化合物系                         |

表-4 基準となるコンクリートの配合

| 目標スランプ値 | 目標空気量   | Gmax | 水セメント比 | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |      |        |        |
|---------|---------|------|--------|--------------------------|------|-----|------|--------|--------|
| (cm)    | (%)     | (mm) | (%)    | 水                        | セメント | 細骨材 | 粗骨材  | AE 減水剤 | 空気量調整剤 |
| 12±2.5  | 4.5±1.5 | 20   | 50     | 160                      | 320  | 778 | 1090 | 0.64   | 0.8    |

うに粒度調整を行った。その結果、粗骨材、細骨材は「骨材のふるい分け試験方法」(JIS A 1102)に従うような粒度分布となった。

#### 2.4 試験条件

試験に用いたコンクリートの条件は、骨材が全て天然骨材(細骨材：富士川産川砂、粗骨材：愛川産碎石)の基準配合に溶融スラグ骨材を置換する形とした。スラグ混入率は細骨材で5種類(置換率0, 25, 50, 75, 100%, 以下S置換率の記号で表す)、粗骨材で3種類(置換率0, 50, 100%, 以下G置換率の記号で表す)とし、配合の種類は合計15種類である。基準となる骨材が全て天然骨材(記号：S0G0)に関しては、**表-4**に示す目標スランプ値および目標空気量の範囲に収まるようAE減水剤、空気量調整剤により調節した。なお、溶融スラグを置換した試験体についても、水セメント比は全て50%に統一してある。

#### 2.5 試験項目

今回行った試験項目および試験方法の一覧表を**表-5**に示す。なお、結晶質を用いたコンクリート試験体の長期材齢での圧縮強度試験および

表-5 試験項目および試験方法

| 試験項目    | 試験方法            | 備考                             |
|---------|-----------------|--------------------------------|
| スランプ    | JIS A 1101      | フレッシュ性状                        |
| 空気量     | JIS A 1128      |                                |
| ブリーディング | JIS A 1123      |                                |
| 圧縮強度    | JIS A 1108      | 7,28,91,6ヶ月,1年(6ヶ月,1年の結晶質は養生中) |
| 促進中性化   | 高耐久性コンクリート造設計指針 | S0G0,S50G0,S50G50              |
| 透水性     | インプット法          | S0G0,S50G0,S50G50              |
| 凍結融解    | JSCE-G501       | S0G0,S50G0,S50G50              |
| 溶出      | 環告第46号          | S100G100                       |

中性化試験は現在継続中である。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 フレッシュ性状

**図-3**に結晶質を用いたときのスランプおよび

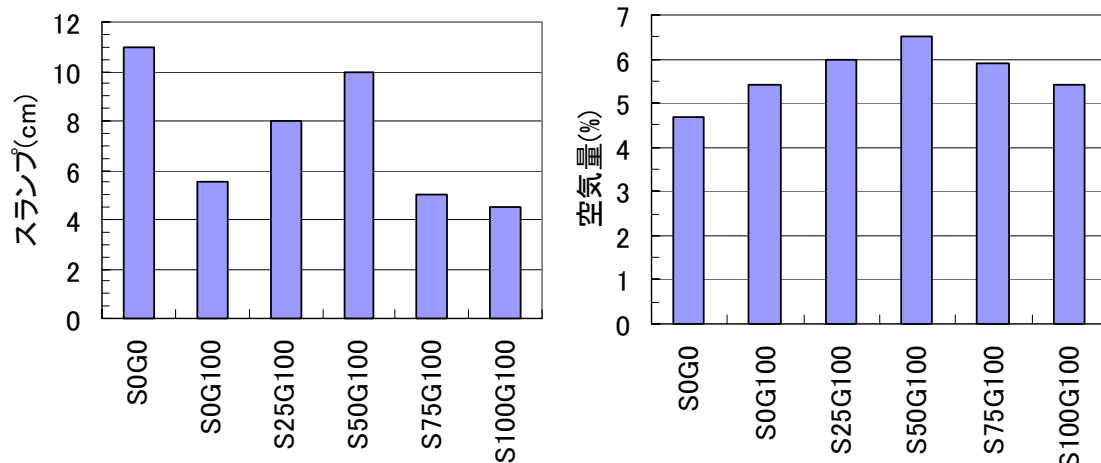


図-3 結晶質を用いたコンクリートのスランプおよび空気量

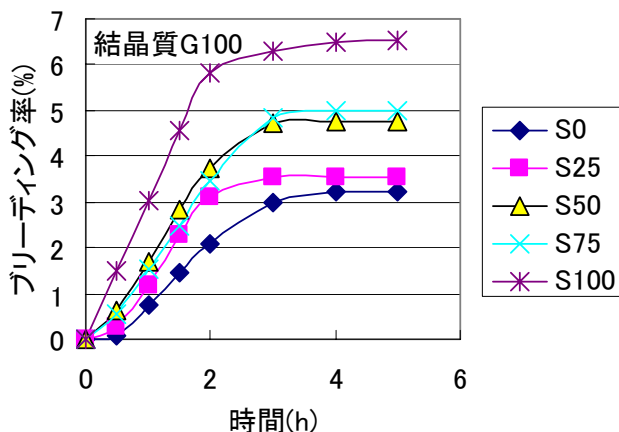


図-4 結晶質を用いたコンクリートのブリーディング試験結果

び空気量を示す。なお、ガラス質は流動性が悪くなったため、表-4 に示す目標スランプ値となるまで高性能 AE 減水剤を後から添加した。ガラス質コンクリートのフレッシュ性能の結果は省略する。天然骨材(SOG0)を用いたときはスランプが 11cm だったが結晶質で置換すると SOG100

と S75G100, S100G100 でスランプが大きく低下した。空気量は結晶質を用いると SOG0 で 4.7% だが、S50G100 では 6.5% となり最大となった。

図-4 に打設後 5 時間におけるブリーディング試験の結果を示す。多少のばらつきがあるが、ガラス質および結晶質ともに置換率が大きくなるに従ってブリーディング率が大きくなる傾向を示した。スランプが低下した原因は、スラグの形状が鋭利であったことが影響していると考えられる。ブリーディング率の増加は、スラグの吸水率が低いことが影響していると思われる。

### 3.2 圧縮強度試験

#### (1) ガラス質コンクリートの圧縮強度試験

図-5 に 2.4 で示した配合条件でのガラス質コンクリートの、材齢 28 日および材齢 1 年における圧縮強度試験結果を示す。ガラス質の置換率が大きくなるに従って、圧縮強度は低下する傾

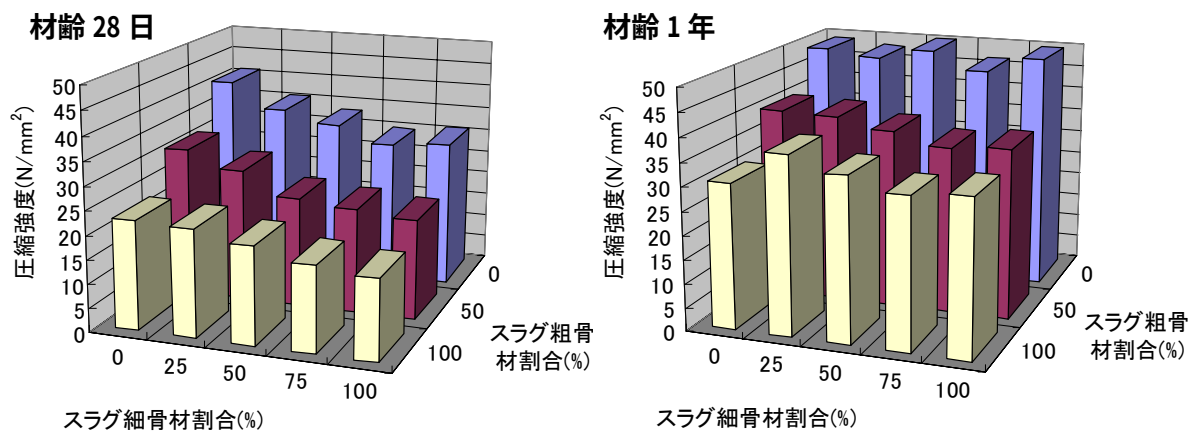


図-5 ガラス質コンクリートの圧縮強度試験結果

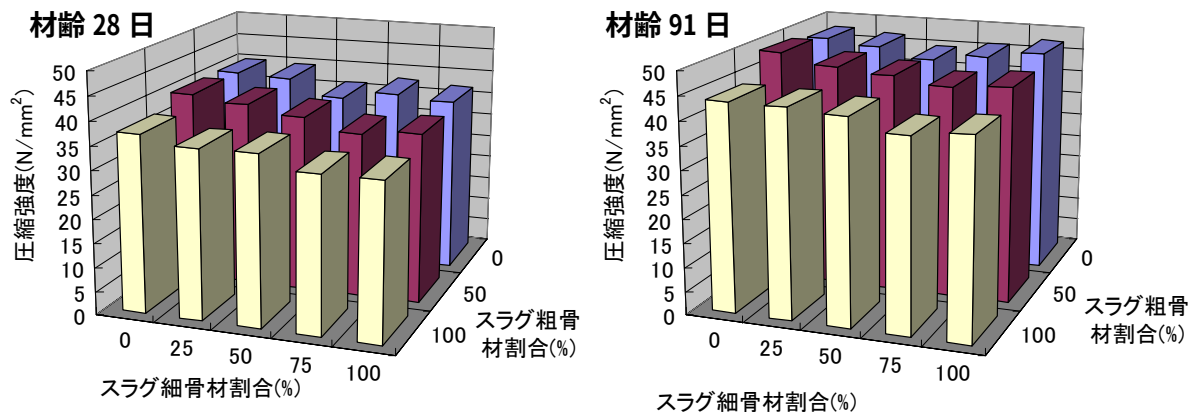


図-6 結晶質コンクリートの圧縮強度試験結果

向を示す。特に、粗骨材としてガラス質を用いる場合の強度低下は著しい。これは、ガラス質の表面は凹凸が少なくなめらかであり、セメントペーストとガラス質との付着が悪いためと考えられる<sup>5)</sup>。さらに、**図-1**に示した破碎値より、ガラス質は、骨材自身の強度が天然骨材および結晶質よりも劣るためガラス質コンクリートの強度は低い。しかし、材齢1年での圧縮強度試験の結果では、普通コンクリートとの強度の差は小さく、特に細骨材置換率が高い場合では強度増進が大きい。これは高炉スラグ骨材と同じように、スラグがアルカリ中で長期強度が増進する潜在水硬性を有するためと思われる<sup>6)</sup>。

## (2) 結晶質コンクリートの圧縮強度試験

**図-6** にガラス質と同じ配合条件での結晶質コンクリートの材齢28日および材齢91日の圧縮強度試験結果を示す。ガラス質コンクリートと異なり、粗骨材として置換した場合でも強度低下は小さい。さらに、ガラス質と同じように材齢が経つと、増加の量は天然骨材の場合よりも大きいことが分かる。ガラス質と同様に結晶質スラグの細骨材置換率が高い場合は、天然骨材の場合より強度が高いことが予想される。

これらの結果から考察すると、結晶質は骨材の表面形状に凹凸があり、セメントペーストと骨材の付着力が大きくなったと考えられる。さらに、**図-1**に示した骨材強度がガラス質の場合よりも大きいため、圧縮強度がガラス質コンクリートよりも大きいと推測される。以上の結果から結晶質骨材の場合は細骨材および粗骨材として利用できる可能性がある。ガラス質を粗骨材として使用した場合のコンクリートの強度はあまり期待できない。

## 3.3 透水試験結果

コンクリートの透水性を調べるためにインプット法による試験を行った(圧力:0.49N/mm<sup>2</sup>, 浸透時間:24h)。試験結果を**図-7**に示す。図中の凡例に示すgはガラス質スラグ、cは結晶質スラグを表す。(以下の図も同じ)粗骨材置換率が高いと拡散係数が大きくなる傾向を示した。

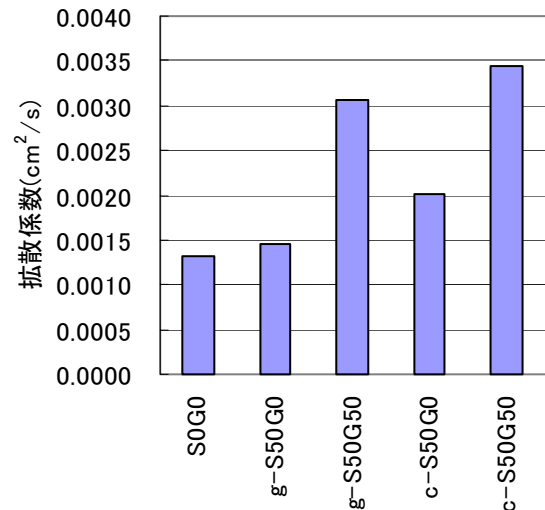


図-7 透水試験結果

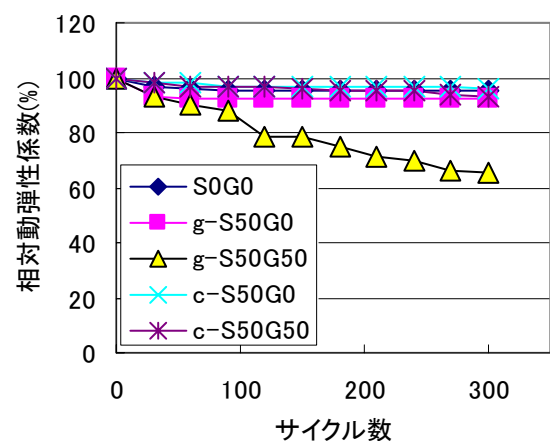


図-8 凍結融解試験結果

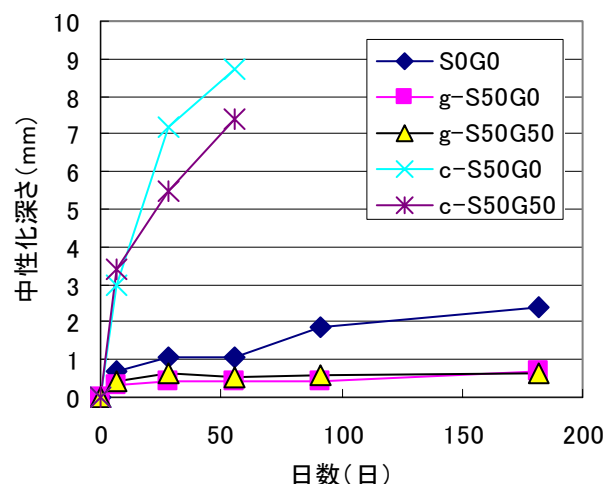


図-9 中性化促進試験結果

## 3.4 凍結融解試験結果

凍結融解抵抗性を調べるために、相対動弾性係数を測定した結果を**図-8**に示す。なお、供試

体温度は $-18\pm 2^{\circ}\text{C}\sim +5\pm 2^{\circ}\text{C}$ まで変化させ 300 サイクルで評価を行った。g-S50G50 以外の試験体は 300 サイクルを経過しても相対動弾性係数は 90%以上を維持しており、凍結融解抵抗性は高いと言える。しかし、ガラス質粗骨材を 50% 混入したコンクリートは、圧縮強度試験で述べた理由と同じく、粗骨材とセメントペーストとの付着が悪いため、凍結融解抵抗性が低下したと思われる。

### 3.5 中性化促進試験結果

図-9 に中性化促進試験結果を示す。試験条件は、 $\text{CO}_2$  濃度 5%、湿度 60%、温度  $20^{\circ}\text{C}$  である。ガラス質は中性化深さが小さくなったが、逆に結晶質コンクリートは大きくなった。

### 3.6 コンクリート中への溶出試験結果

環告第 46 号に基づき、コンクリートからの有害物質の溶出量を天然骨材の場合と、ガラス質、結晶質の場合とで調べた。いずれのケースから有害物質の溶出は基準値以下であった。よって、溶融スラグがコンクリート中で安定であることがわかった。

## 4. まとめ

今回は、ガラス質と結晶質と性状の異なる溶融スラグをコンクリート用骨材として利用したときの材料の物性、強度、耐久性を調べた。結晶質の場合は細骨材と粗骨材の両方で使用できる可能性が高く、またガラス質の場合は細骨材として利用できることが明らかとなった。以下、各々のまとめを記す。

- (1) 溶融スラグ骨材の密度、吸水率は天然骨材と同様な値を示した。また、アルカリ骨材反応の恐れもないものと見られるため、通常の骨材として利用できる。
- (2) フレッシュ性状として、溶融スラグを混入したコンクリートのスランプ、空気量、ブリーディング率を測定した結果、骨材形状の影響を受けワーカビリティが低下する傾向を示した。これらの対策としては、骨材を磨砕処理するか、高性能

AE 減水剤を使用するなどの措置が考えられる。

- (3) 圧縮強度を測定した結果、結晶質は細骨材置換および粗骨材置換の両方で良好であった。ガラス質に関しても細骨材として置換した場合は良好な結果を示した。ガラス質を混入する場合では粗骨材とセメントペーストとの付着力や、骨材強度が小さいことが影響したものと考えられる。
- (4) 透水試験に関しては、溶融スラグを混入すると拡散係数が増加し、その傾向は粗骨材として利用する場合に顕著である。
- (5) 凍結融解抵抗性は、結晶質の場合細骨材および粗骨材として良好な値を示したが、ガラス質の場合は粗骨材として利用したとき耐久性が劣る結果となった。
- (6) 中性化に関しては、結晶質コンクリートがガラス質コンクリートより劣る結果となった。この点に関しては検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) スラグの有効利用マニュアル，財団法人廃棄物研究財団，pp.9-11，1999.11
- 2) 一般廃棄物の溶融固化物の取扱について，環境庁資料，1998
- 3) 戸田勝哉ほか：ごみ焼却灰溶融スラグを骨材として用いたコンクリートの基礎的性状，第 56 回土木学会年次学術講演会予稿集，V-203，pp.406-407，2001
- 4) コンクリート用溶融スラグ細骨材，TR A0016
- 5) 斉藤丈士ほか：ごみ溶融スラグの細骨材への有効利用に関する実験的検討，廃棄物のコンクリート材料への再資源化に関するシンポジウム論文集，pp.121-126，2002.9
- 6) 佐々木肇ほか：廃棄物焼却灰溶融物のコンクリート骨材への有効利用技術，コンクリート工学，Vol.40，No.6，pp.14-20，2002.6