

# 論文 ごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの力学特性に対する養生条件の影響

小川 由布子<sup>\*1</sup>・川村 和正<sup>\*2</sup>・半井 健一郎<sup>\*3</sup>・佐藤 良一<sup>\*4</sup>

**要旨：**一般廃棄物の再利用のひとつにごみ溶融スラグ細骨材のコンクリートへの活用がある。本研究では、都市ごみ溶融スラグ細骨材を対象に、置換率を要因として基礎物性を検討した。さらに、実構造物への使用を目指し、封かん養生 7 日後屋内気中曝露した場合の物性を検討した。この結果、ごみ溶融スラグ細骨材を混入したコンクリートは、標準養生においては普通コンクリートと同等の強度を有するが、乾燥曝露した場合、普通コンクリートより強度が低下し、養生条件の影響を大きく受けることを明らかにした。

**キーワード：**ごみ溶融スラグ細骨材、置換率、養生条件、力学特性

## 1. はじめに

都市ごみ処理は、最終処分場確保や環境保全の観点から重要な課題である。一方、非 JIS ごみ溶融スラグを用いた 2008 年の建築構造物に生じたポップアウトを契機に JIS に追補が出され、使用範囲が限定された。しかし、鋭意検討された金属アルミによる初期膨張および遊離石灰によるポップアウトに関する試験方法が JIS 化されれば、この利用範囲は再び拡大されると考えられる。

ごみ溶融スラグ骨材の有効利用を目的とした研究は、これまで多く行われており、ごみ溶融スラグ細骨材（以下、MS）自体の基礎物性や MS を置換したコンクリートの基礎力学特性が検討されている<sup>1), 2)</sup>。さらに、鉄筋コンクリート部材への使用可能性等が示されてきた<sup>3)</sup>。しかし、これらの研究の多くは、一部屋外曝露された場合の検討がある<sup>4)</sup>ものの、標準養生や湿布養生がほとんどであり実際に即した乾燥曝露の影響の検討例は少ない。

そこで、本研究は、燃焼温度が約 1,300℃のアーキ式灰溶融炉から排出されたスラグを水道水で冷却固化した MS を対象とし、MS の特性、これを置換したコンクリートの基礎力学特性、およびこの力学特性に及ぼす乾燥曝露の影響を検討する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

#### (1) ごみ溶融スラグ細骨材

本研究で用いた MS の環境安全性は、表-1 に示すとおり JIS A 5031 の規定を満たしている。また、物理的性質を表-2 に示す。物理的性質は、JIS A 5031 の基準値を満た

表-1 MS の環境安全性

|       | 溶出量 (mg/L) |           | 含有量 (mg/kg) |        |
|-------|------------|-----------|-------------|--------|
|       | JIS A 5031 | 測定値       | JIS A 5031  | 測定値    |
| カドミウム | 0.01 以下    | 0.001 未満  | 150 以下      | 5 未満   |
| 鉛     | 0.01 以下    | 0.005 以下  | 150 以下      | 68-88  |
| 六価クロム | 0.05 以下    | 0.005 未満  | 250 以下      | 2 未満   |
| ヒ素    | 0.01 以下    | 0.001 未満  | 150 以下      | 2 未満   |
| 純水銀   | 0.0005 以下  | 0.0005 未満 | 15 以下       | 0.1 未満 |
| セレン   | 0.01 以下    | 0.001 未満  | 150 以下      | 2 未満   |
| フッ素   | 0.8 以下     | 0.08 未満   | 4000 以下     | 160    |
| ホウ素   | 1.0 以下     | 0.1 未満    | 4000 以下     | 44     |

表-2 MS の物理的性質

|                           | JIS A 5031 | 測定値  |
|---------------------------|------------|------|
| 絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.5 以上     | 2.78 |
| 吸水率 (%)                   | 3.0 以下     | 0.28 |
| 安定性 (%)                   | 10 以下      | 0.9  |
| 微粒分量 (%)                  | 7.0 以下     | 2.3  |
| 粒形判定実積率 (%)               | 53 以上      | 58   |

表-3 MS の化学成分

| 化学成分                                           | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO    | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO     | MgO  | MnO  | SO <sub>3</sub> <sup>注2)</sup> | 全S量    | 塩基度    |
|------------------------------------------------|------------------|--------------------------------|--------|--------------------------------|---------|------|------|--------------------------------|--------|--------|
| 呉市溶融スラグ                                        | 36.31            | (20.00) <sup>注1)</sup>         | —      | 5.74                           | 28.84   | 2.72 | 0.27 | 0.02                           | 0.43   | 1.42   |
| JIS A 5011-1<br>「コンクリート用スラグ骨材<br>—第1部：高炉スラグ骨材」 | —                | —                              | 3.0 以下 | —                              | 45.0 以下 | —    | —    | 0.5 以下                         | 2.0 以下 | —      |
| 高炉セメントの原材料としての<br>高炉スラゲー例 <sup>5)</sup>        | 32.1             | 16.7                           | 1.2    | —                              | 42.2    | 3.4  | 1.3  | 0.7                            | 1.2    | 1.94   |
| JIS R 5211「高炉セメント」の<br>原材料としての高炉スラグ            | —                | —                              | —      | —                              | —       | —    | —    | —                              | —      | 1.6 以上 |

注1) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は、検量線外のため、参考値とする。 注2) SO<sub>3</sub>は、セメントの化学分析方法 (JIS R 5202) によって測定している。

\*1 広島大学 大学院工学研究院社会環境空間部門助教 博士（工学）（正会員）

\*2 呉市 環境部（正会員）

\*3 広島大学 大学院工学研究院社会環境空間部門准教授 博士（工学）（正会員）

\*4 広島大学 大学院工学研究院特任教授 工博（正会員）

足している。表-3 に蛍光 X 線分析により試験した MS の化学成分，高炉スラグ細骨材の JIS 規格値（JIS A 5011-1），化学成分が比較的近い高炉スラグの一例<sup>5)</sup>および高炉セメントの原材料としての高炉水砕スラグの JIS 規格値（JIS R 5211）を示す。

JIS A 5031 の附属書 1 に従った膨張率試験結果を図-1 に示す。供試体間の誤差を考慮して，6 供試体作製し試験した。図-1 に示すとおり，24 時間後の膨張率は 6 体中 5 体は 0%であったが，No.3 供試体は 0.62%であった。JIS A 5031 は膨張率 2%以下であれば合格としているが，建材試験センターは，表面に発泡が出る場合があるとして基準値 0%を提案しており<sup>6)</sup>，不合格となる。しかし，本研究で作製した供試体は，表面に発泡は見られなかった。

(2) 使用材料

使用材料の一覧を表-4 に示す。セメントは，普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材および粗骨材は，呉市広町産の石英粗面岩の砕砂および碎石を使用した。

(3)配合

コンクリートの配合は，表-5 に示すとおり，水セメント比を 0.50，単位水量を 165kg/m<sup>3</sup>と一定とした。スランプおよび空気量はそれぞれ 8±2cmおよび 4.5±1.5%を目標とし，高機能タイプ AE 減水剤を用いて調整した。

MS は，細骨材容積に対して，0%，15%，30%および 45%とした。なお，配合名は，表-5 に示すとおり，それぞれ NC，NC-MS15，NC-MS30 および NC-MS45 とし，数字は MS 容積置換率を意味する。

2.2 養生方法

全てのコンクリートは，基礎特性を把握するため，20℃の水中養生（標準養生）とした。また，本研究では，養生条件の影響を検討するため，NC および NC-MS30 の供試体については，標準養生に加え，材齢 7 日まで封かん

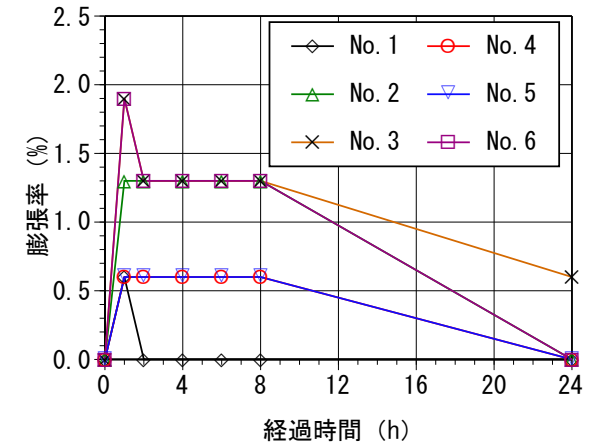


図-1 膨張率試験結果

し，その後屋内（曝露期間中平均気温 23.7℃）乾燥曝露した場合も用意した。なお，気象庁の統計によると，曝露期間の広島市の平均相対湿度は 65%であった。

2.3 試験方法

(1) ブリーディング試験

コンクリートのブリーディング試験は，JIS A 1123 に従って行った。

(2) 強度試験

コンクリートの強度試験として，圧縮強度試験，静弾性係数試験および割裂引張強度試験を行った。各試験は，JIS A 1108，JIS A 1149 および JIS A 1113 に従い，材齢 3，7，28 および 91 日に実施した。

(3) 破壊エネルギー試験

破壊エネルギー試験は，日本コンクリート工学会の「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」<sup>7)</sup>に準拠して行った。供試体は，100 x 100 x 400 mm の角柱とし，中央部に幅 4mm，深さ 50mm の切欠きを設けを用い，図-2 に示すとおり，試験体のスパンは 300mm

表-4 使用材料の物理的性質

| 使用材料 | 種類              | 記号     | (表乾) 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 吸水率<br>(%) | F. M. |
|------|-----------------|--------|---------------------------------|------------|-------|
| セメント | 普通ポルトランドセメント    | C      | 3. 16                           | —          | —     |
| 細骨材  | 石英粗面岩砕砂         | S      | 2. 62                           | 1. 76      | 2. 79 |
|      | 熔融スラグ           | MS     | 2. 79                           | 0. 28      | 2. 92 |
| 粗骨材  | 石英粗面岩碎石 (20-15) | G20-15 | 2. 65                           | 0. 56      | 6. 96 |
|      | 石英粗面岩碎石 (15-05) | G15-05 | 2. 65                           | 0. 68      | 6. 43 |
| 混和剤  | AE減水剤 (高機能タイプ)  | Ad     | 1. 11                           | —          | —     |

表-5 コンクリートの配合

| 配合名     | ごみ熔融スラグ<br>置換率 (%) | W/C   | s/a (%) | Air (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |        |        |       |
|---------|--------------------|-------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|--------|--------|-------|
|         |                    |       |         |         | W                        | C   | S   | MS  | G20-15 | G15-05 | Ad    |
| NC      | 0                  | 0. 50 | 47. 4   | 4. 5    | 165                      | 330 | 852 | 0   | 574    | 383    | 2. 97 |
| NC-MS15 | 15                 |       |         |         |                          |     | 724 | 136 |        |        |       |
| NC-MS30 | 30                 |       |         |         |                          |     | 597 | 271 |        |        |       |
| NC-MS45 | 45                 |       |         |         |                          |     | 468 | 408 |        |        |       |

けて実施した。載荷は、容量 100kN の変位制御型試験機とし、両支点はローラー支持として水平方向に可動な構造とした。計測項目は、荷重、ひび割れ開口変位 (CMOD)、載荷点の鉛直変位である。CMOD は試験体底面の切欠き部中央において、クリップゲージ (感度: 1/1000mm) により計測した。試験材齢は、水中養生の場合 28 日、7 日封かん後屋内乾燥曝露の場合、NC は 217 日、NC-MS30 は 184 日である。各条件の供試体数は 8 体とした。

破壊エネルギー ( $G_f$ ) は式(1)を用いて<sup>7)</sup>、特性長さ ( $l_{ch}$ ) は式(2)を用いて<sup>8)</sup>、それぞれ算出した。

$$G_f = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (1)$$

ここで、 $W_0$ : 試験体が破断するまでの荷重-CMOD 曲線下の面積(N・mm)、 $W_1$ : 試験体の自重および載荷治具がなす仕事(N・mm)、 $A_{lig}$ : リガメントの面積(mm<sup>2</sup>)

$$l_{ch} = \frac{E_c G_f}{f_t^2} \quad (2)$$

ここで、 $E_c$ : 静弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $f_t$ : 引張強度(N/mm<sup>2</sup>)

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 MS 置換率の影響

##### (1)ブリーディング性状

図-3 に各配合のブリーディング量と時間の関係を、表-6 に各配合のフレッシュ性状をそれぞれ示す。表-6 に示すとおり、MS を混入したコンクリートのフレッシュ性状は、スランプ、空気量共に、NC と同様の混和剤によって制御可能であることがわかる。また、図-3 に示すとおり、MS の置換率が大きくなるにつれて、ブリーディング率が増加していることがわかる。本研究では、MS 置換率 45% の場合 (NC-MS45) に最大値 0.20cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup> を示しているが、これは、日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案) およびコンクリートポンプ工法施工指針が定める基準値 0.3cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup> を満たしている。

##### (2) 圧縮強度

図-4 に標準養生の場合の圧縮強度および圧縮強度の対 NC 比を示す。いずれの材齢においても、MS を混入したコンクリートの圧縮強度は、NC に比べ 5% から 10%

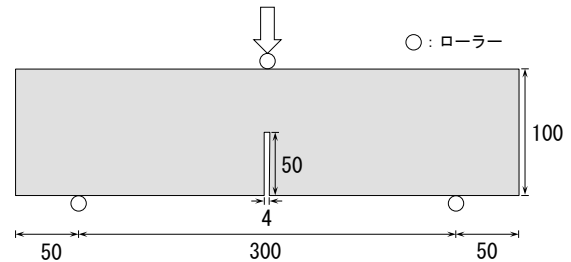


図-2 破壊エネルギー試験体概要 (単位: mm)

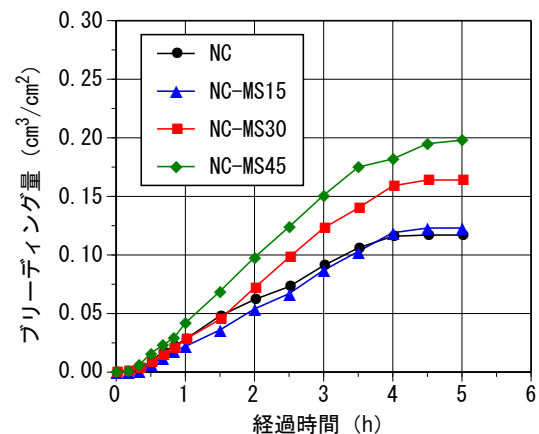


図-3 ブリーディングに対する MS 置換率の影響

大きい。これは、MS が水砕スラグであり、ガラス質であるとともに、表-3 のとおり、この化学成分は高炉スラグと類似しており、塩基度も 1.4 以上と潜在水硬性を有している可能性が考えられ、これによりセメントペーストと MS の界面の結合が強化されたためと考えられる。

##### (3) 静弾性係数

図-5 に標準養生の場合のコンクリートの静弾性係数試験結果を示す。材齢 7 日および 28 日における NC-MS45 の静弾性係数が NC よりも若干低下するが、この他の場合、NC と同等以上であり、置換率の影響は見られない。

##### (4) 割裂引張強度

図-6 に標準養生の場合のコンクリートの割裂引張強度試験結果を示す。置換率 30% を除いて、圧縮強度および静弾性係数と同様に材齢とともに増加しており、置換率の相違による影響は小さいと言える。

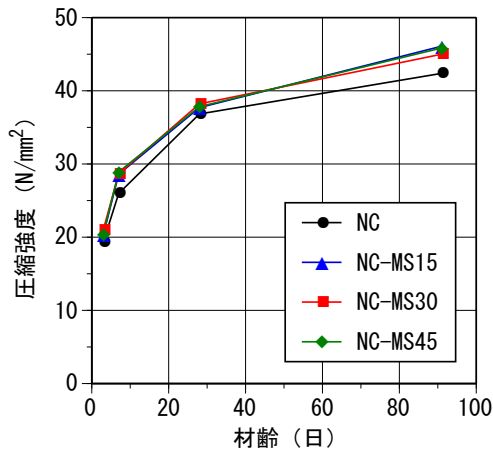
#### 3.2 養生条件の影響

##### (1) 圧縮強度

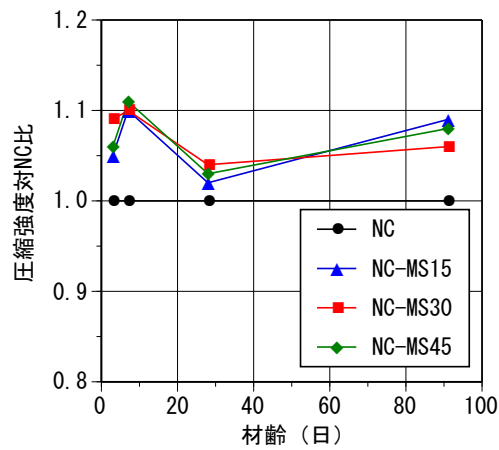
図-7 に NC および NC-MS30 の圧縮強度に対する養生

表-6 コンクリートのフレッシュ性状

|         | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 練混ぜ直後の温度 (°C) | ブリーディング率 (%) |
|---------|-----------|---------|---------------|--------------|
| NC      | 9.0       | 4.6     | 23.0          | 2.61         |
| NC-MS15 | 8.0       | 3.4     | 22.0          | 2.76         |
| NC-MS30 | 8.0       | 3.9     | 21.0          | 3.74         |
| NC-MS45 | 9.0       | 4.0     | 21.0          | 4.23         |



(a) 圧縮強度発現性状（標準養生）



(b) NCに対する圧縮強度の比（標準養生）

図-4 コンクリートの圧縮強度に対するMS置換率の影響

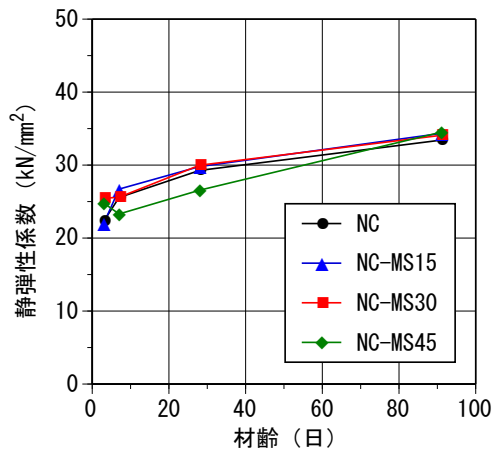


図-5 コンクリートの静弾性係数に対するMS置換率の影響（標準養生）

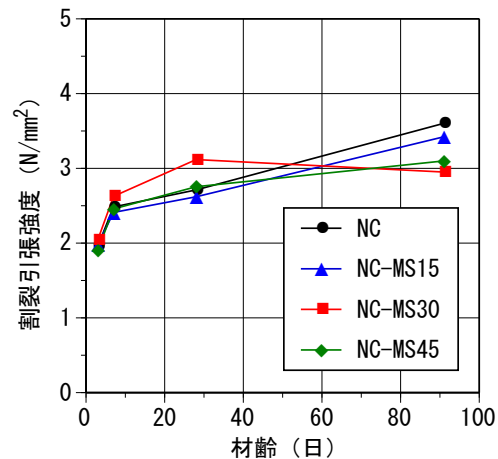


図-6 コンクリートの割裂引張強度に対するMS置換率の影響（標準養生）

条件の影響を示す。乾燥曝露した場合に、スラグの置換の有無にかかわらず、強度が低下する。この乾燥曝露による圧縮強度低下は、MSを置換した場合に大きく、材齢91日では、NCにおいて約13%の低下に対し、NC-MS30においては約30%低下している。このため、標準養生の場合、NCよりも高い強度を示した。NC-MS30は、乾燥曝露の場合した場合に、NCよりも10%程度の小さい圧縮強度を示した。これは、MSの持ちうる潜在水硬性が乾燥下において発揮されないことが原因と考えられる。

## (2) 静弾性係数

静弾性係数に対する養生条件の影響を図-8(a)に、圧縮強度との関係を図-8(b)を示す。比較のため、土木学会コンクリート標準示方書に提示されている関係<sup>9)</sup>を「JSCE」として実線で、この関係より静弾性係数が17%小さい値を示す関係を「JSCE x 83%」として破線で付記する。この破線は、7日気中曝露条件における実測値とJSCEとの差が最も小さくなる線である。静弾性係数も圧縮強度と同様に、MSの置換の有無にかかわらず、標準養生と比較して、乾燥曝露した場合に小さくなり、この低下の程度は

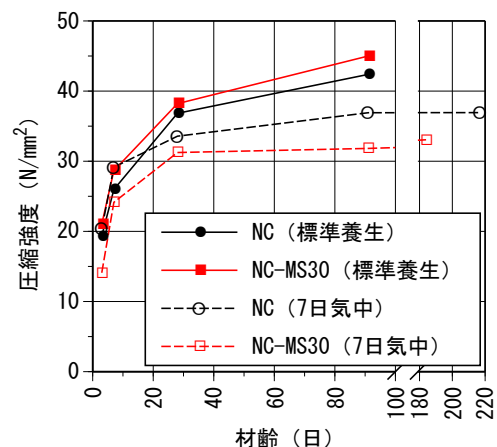
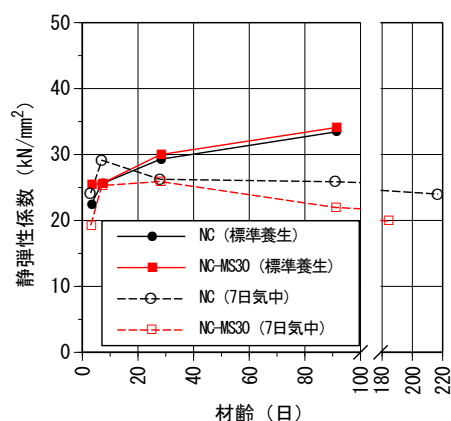
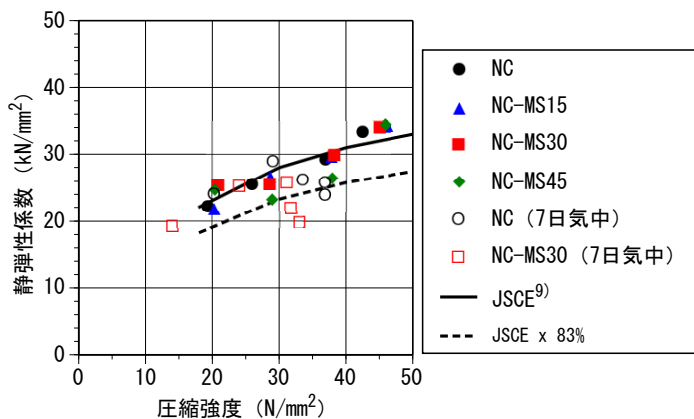


図-7 圧縮強度に対する養生条件の影響

NC-MS30の方が著しい。また、(b)に示すとおり、静弾性係数と圧縮強度の関係は、乾燥曝露の場合および標準養生の置換率45%の場合を除いて、JSCE<sup>9)</sup>とほぼ同様な関係にある。乾燥曝露した場合には、水和反応の進行が不十分でコンクリート組織が粗であるため、静弾性係数が低下することは知られており、MSを混入した場合は、

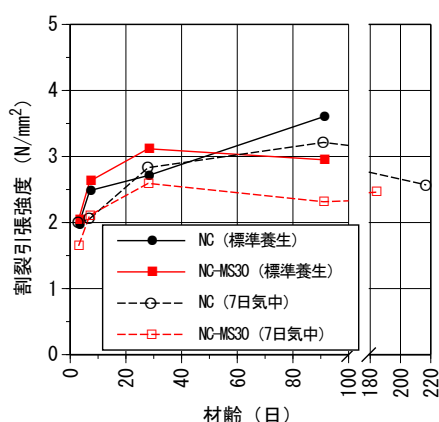


(a) 静弾性係数に対する養生の影響

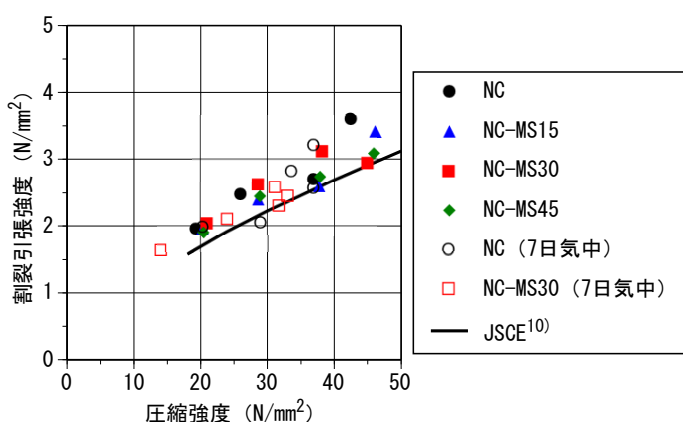


(b) 圧縮強度と静弾性係数の関係

図-8 コンクリートの静弾性係数に対する養生条件の影響



(a) 割裂引張強度に対する養生の影響



(b) 圧縮強度と割裂引張強度の関係

図-9 コンクリートの割裂引張強度に対する養生条件の影響

ブリーディングの影響によりさらに低下し、JSCE の関係より 17%程度低下したものと考えられる。

### (3) 割裂引張強度

割裂引張強度に対する養生条件の影響を図-9(a)に、圧縮強度との関係を図-9(b)に示し、比較のため、土木学会のコンクリート標準示方書に提示されている関係式<sup>10)</sup>を「JSCE」として実線で付記した。NC の割裂引張強度は、養生条件にかかわらず、増加する傾向にある。図-6 に示した標準養生において MS 置換率の影響が小さく全体として材齢経過とともに割裂引張強度が増加する傾向を考慮すると、乾燥曝露の場合の NC-MS30 の割裂引張強度は、材齢 91 日までの範囲において、NC よりも低下し、NC に対して最大 28%低下した。しかし、材齢 150 日を超えた場合（破壊エネルギー試験材齢）、NC の低下が著しく、NC-MS30 は NC と同等の割裂引張強度となった。

一方、圧縮強度と割裂引張強度の関係でみれば、置換率および養生条件の相違にかかわらず、JSCE<sup>10)</sup>とほぼ同様な関係にある。これは、ごみ熔融スラグを混入した場合であっても、従来のコンクリートと同様に、圧縮強度から引張強度を推定できることを示している。

### (4) 破壊エネルギー

図-10 に破壊エネルギーに対する MS の影響を示す。標準養生における破壊エネルギーは MS を置換したコンクリートの方が大きい傾向を示している。これは、MS の持ちうる潜在水硬性により、コンクリート中のスラグ骨材表面が緻密になったためと考えられる。一方、乾燥曝露した場合の破壊エネルギーは無置換の方が大きい。これは、乾燥により前述の潜在水硬性の効果が発揮されなかったためと考えられる。なお、無置換の場合に、乾燥曝露の場合の方が破壊エネルギーが大きい。この傾向は、載荷材齢の相違も原因のひとつであるが、他の研究においても報告されており<sup>11)</sup>、乾燥による表面エネルギーの増大が一因と考えられる<sup>12)</sup>。

図-11 に特性長さに対する MS の影響を示す。標準養生において、MS の置換率の影響が小さいことがわかる。しかし、MS を 30%置換したコンクリートを乾燥曝露した場合の特性長さが NC と比較して小さくなり、脆性的な破壊を示している。このように、MS を置換したコンクリートの特性長さは、養生条件の影響を大きく受けることがわかった。

#### 4. まとめ

本研究の範囲で得られた結論を以下に示す。

- (1)ブリーディング量は、MS の置換率の増大にともなう増加するが、置換率 45%までの範囲において日本建築学会が定める基準値を満足した。
- (2)標準養生した MS 置換コンクリートの圧縮強度は、置換率 45%までの範囲で、無置換コンクリートと同等もしくはこれ以上である。しかし、乾燥曝露した場合は、MS を置換することにより置換しない場合に比べ最大約 30% 低下する可能性がある。
- (3)標準養生した MS 置換コンクリートの静弾性係数および割裂引張強度は同程度であるが、乾燥の影響を受けると低下する。
- (4)標準養生した場合の破壊エネルギーは、MS を混入したコンクリートの方が大きく、乾燥曝露の場合は、無置換の方が大きい。
- (5)品質管理方法が JIS 化され、この規格値が満足されれば、JIS 規格外の MS であっても、コンクリート用細骨材として使用できるものと考えられる。

#### 謝辞

本研究の一部は、広島大学地域貢献事業の支援により実施されたものであり、関係各位に謝意を表す。また、化学分析にご協力頂いた谷村充氏、兵頭彦次氏（太平洋セメント）、貴重な情報を頂いた鈴木康範氏（住友大阪セメント）、取りまとめにご協力頂いた大西裕士氏（広島大学）に謝意を表したい。

#### 参考文献

- 1) 北辻政文，藤居宏一：ごみ焼却灰ごみ溶融スラグのコンクリート用細骨材への適用に関する基礎的研究，農業土木学会論文集，No.192，pp.1-8，1997.12
- 2) 佐川康貴ほか：都市ごみ溶融スラグのコンクリート用細骨材としての適用性に関する研究，土木学会論文集，No.802/C-69，pp.171-180，2005.11
- 3) 松家武樹，堺孝司，中村俊之，草薙悟志：産業廃棄物ごみ溶融スラグを用いた鉄筋コンクリート梁の曲げおよびせん断耐荷挙動，土木学会論文集 E，Vol.62，No.1，pp.159-173，2006.2
- 4) 川上勝弥，横室隆，宮澤祐介：コンクリート用ごみ溶融スラグ骨材を用いたコンクリートの材齢 10 年における性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.137-142，2011.7
- 5) 村田二郎，長瀧重義，菊川浩治：建設材料コンクリート，p.16，2004.2
- 6) 一般財団法人建材試験センター：コンクリート用ごみ溶融スラグ骨材の試験方法等に関する標準化調

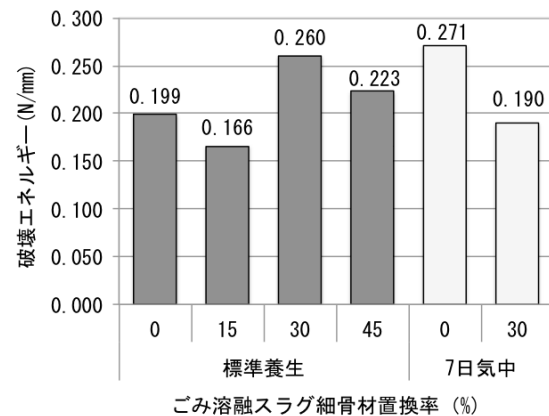


図-10 破壊エネルギーに対する MS の影響

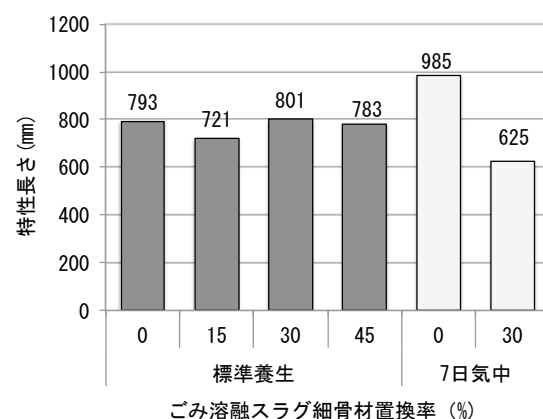


図-11 特性長さに対する MS の影響

査研究成果報告書，pp.149-155，2011.3

- 7) 社団法人日本コンクリート工学会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，pp.401-405，2001
- 8) Gustafsson, P. J. et al. : Sensitivity in Shear Strength of Longitudinally Reinforced Concrete Beams to Fracture Energy of Concrete, ACI Structural Journal, May-June, pp.286-294, 1988
- 9) 社団法人土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，p.44，2008.3
- 10) 社団法人土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，p.34，2008.3
- 11) Martin Mwangi MACHARIA，佐藤良一，重松明，大西裕士：Study of Mechanical Properties of Portland Blast Furnace Cement -Type B Concrete with Partial Replacement of Aggregate with Porous Ceramic Course Aggregate，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.113-118，2011.7
- 12) 岡島達雄：コンクリートの力学的性質と水分，セメント・コンクリート，No.464，pp.18-26，1985.