

# 論文 高炉スラグ微粉末を高置換した高強度コンクリートの強度発現に与える高温養生の影響とその評価

北野 勇一\*1・鈴木 聡\*2・秋吉 善忠\*3・大谷 俊浩\*4

**要旨:** 本研究では、早強ポルトランドセメントに対し高炉スラグ微粉末 6000 を高置換させた高強度モルタルおよび高強度コンクリートを対象に高温養生の影響を実験的に検討した。その結果、高炉スラグ微粉末を高置換させた場合、高温養生を行うことで初期強度は大きく増進すること、その効果は置換率 1%につき有効材齢 2.3%の増加に相当することを確認した。また、既往の有効材齢による強度発現式を用いて、高温養生によるスラグの強度発現への寄与を新たに組み込むことにより、高炉スラグ微粉末を高置換した高強度コンクリートの強度発現を良好に評価することを示した。

**キーワード:** プレストレストコンクリート, プレキャスト, 高炉スラグ微粉末, 高温養生, 圧縮強度

## 1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート (PC) を利用した構造物の新設・保全・更新において、生産性向上、高耐久化、副産物の有効利用による環境負荷低減の観点から、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末などの混和材を用いたプレキャスト PC 部材の活用が注目されている<sup>1)</sup>。このうち、環境負荷低減に寄与するためには、高炉スラグ微粉末を高置換することが望まれるものの、現状では置換率で 50%までの適用が大半である。これは、置換率 50%を超える範囲において、強度不足や中性化抵抗性の低下が懸念されるためと考えられる。

ところで、プレキャスト PC 部材の製造に用いる高強度コンクリートは、早強ポルトランドセメントのみを用いた場合に近い水結合材比で十分な強度発現を得るため、粉末度 6000cm<sup>2</sup>/g の高炉スラグ微粉末にセッコウを添加したもの (BF6) が一般に使用されている<sup>2)</sup>。この BF6 を用い、置換率 50%以下の高強度コンクリートを対象とした既往研究<sup>3)</sup>によると、蒸気養生温度が高いと初期の強度発現は大幅に増進し、一方、4 週強度は 65°C 以上の高温養生を行うと強度低下が生じると指摘している。このため、置換率 50%以下の高強度コンクリートでは、最高温度 40~45°C で 0~3 時間保持の蒸気養生を行うことが最も効率が良いとの報告がある<sup>4)</sup>。しかしながら、このような知見は、高炉スラグ微粉末を高置換した高強度コンクリートについて十分に明らかにされていない。

上記とは別に、細田ら<sup>5)</sup>は、蒸気養生を模擬した高温履歴を与えたとき、ペーストに比べコンクリートの強度が小さくなることを確認している。この理由は、ペーストに比べ粗骨材の熱膨張係数が小さいこと、養生直後に

急冷した場合に強度低下が大きいことから、ペーストと骨材の熱膨張係数の差がもたらす微視的温度応力に起因すると推察している。とりわけ、スラグを含有する場合にペーストと骨材の熱膨張係数の差が大きくなり、強度低下がより顕著になると指摘している。

そこで本研究では、まず、早強ポルトランドセメントに対し BF6 を 30~90%まで置換させた高強度モルタルを対象に高温養生の影響を実験的に検討した。モルタルを用いた理由は、細孔構造を詳細に検討するためである。次に、置換率 50%以下において最も効率が良いとされる高温養生 45°C の条件で、置換率 50%を超える場合の最高温度保持時間の影響についてモルタル供試体を用いて実験的に検討した。この実験では急冷の影響を併せて検討した。これらの検討結果より、プレキャスト PC 部材を製造するための高強度コンクリートの配合と養生方法を選定し、高温養生の影響を実験的に検証した。さらに、高炉スラグ微粉末を高置換した高強度コンクリートの強度発現を定量的に評価することを試みた。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験概要

表-1 にモルタルおよびコンクリートの配合を示す。実験に用いる配合は、水結合材比と置換率を変化させた 9 配合とした。基本とした配合は、前報<sup>6)</sup>に示すとおり蒸気養生を行った際に材齢 20 時間、7 日でコンクリート供試体の圧縮強度 35, 50N/mm<sup>2</sup> が得られるよう、水結合材比を早強ポルトランドセメント単味の配合 (H) で 35.6% とした。BF6 を用いた配合は水結合材比 33.5% を基本とし、置換率を 30, 50, 70, 80, 90% (B630, B650, B670,

\*1 川田建設 (株) 技術本部技術部担当部長 博士(工学) (正会員)

\*2 川田建設 (株) 技術本部技術部技術開発課課長 修士(工学) (正会員)

\*3 大分大学理工学部理工学科建築学プログラム助教 博士(工学) (正会員)

\*4 大分大学理工学部理工学科建築学プログラム教授 博士(工学) (正会員)



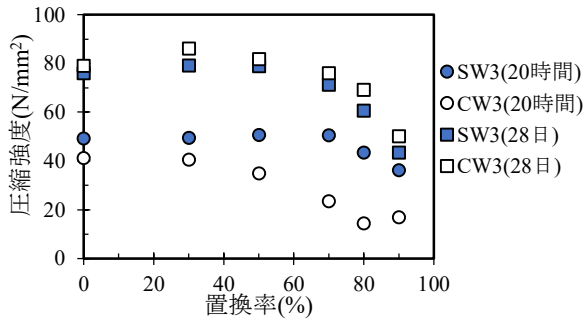
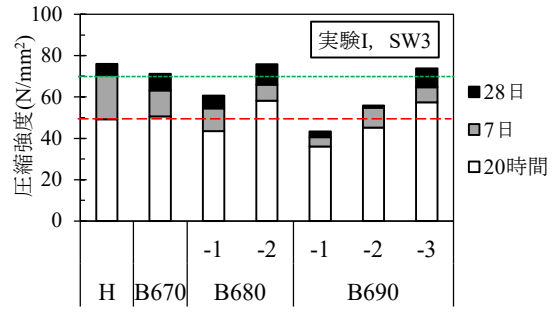


図-2 モルタル強度 (実験 I の基本配合, 水結合材比は置換率 0% の H で 35.6%, それ以外は 33.5%)



※Hを基準とした強度(赤破線:20時間, 緑点線:7日)

図-3 水結合材比とモルタル強度の関係

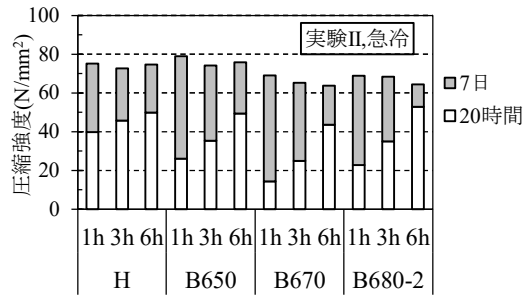
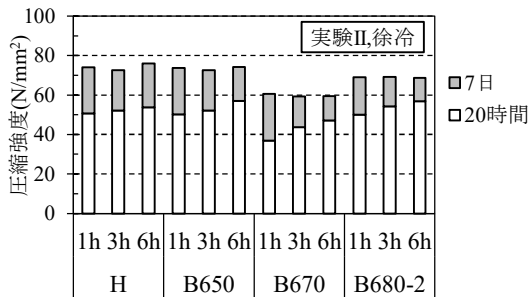


図-4 最高温度保持時間がモルタル強度に与える影響

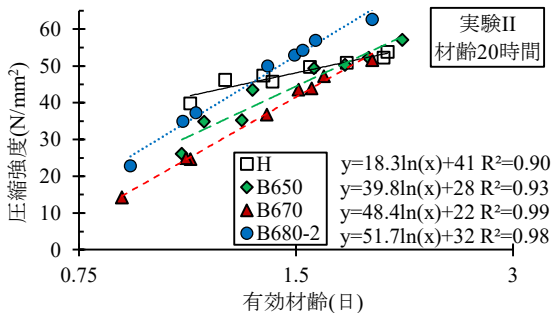


図-5 モルタル強度に及ぼす有効材齢の影響

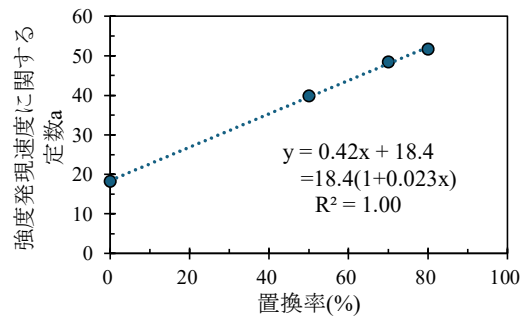


図-6 置換率が強度発現速度に与える影響

性があり, 水和反応時の高温履歴により反応率が高くなったため(例えば)と考えられる。一方, 材齢 28 日になると, CW3 の圧縮強度が SW3 を上回るとともに, 置換率 50% を超えると強度低下が認められた。

実験 I の高置換配合について, 水結合材比を変化させたときの SW3 のモルタル強度を図-3 に示す。同一の水結合材比では強度不足が確認された B680 と B690 に関し, 水結合材比をそれぞれ 28%, 25% に低減することで H と同程度の強度が得られることが確認された。

以上より, 高炉スラグ微粉末を高置換させた場合, 高温養生を行うことで初期強度は大きく増進し, 一方, 長期強度は停滞することが確認された。また, 無置換に比べ置換率 70% を超えると初期強度が低下するものの, 置換率 90% までであれば水結合材比を低減し高温養生を行うことで初期強度が改善することが認められた。

### 3.2 最高温度保持時間が強度発現に与える影響

実験 II の最高温度保持時間を 1, 3, 6 時間とした場合

の圧縮強度の推移を図-4 に示す。最高温度時間を延長することで, 徐冷, 急冷とも材齢 20 時間の強度が増進すること, 材齢 7 日の強度は最高温度保持時間によらず概ね同程度となることが確認された。

温度測定結果より算定される有効材齢 (対数表記) と材齢 20 時間強度の関係を図-5 に示す。図には急冷と徐冷の実験データを式(1)により近似した結果を示した。

$$f'_c = a \cdot \log_e(t') + b \quad (1)$$

$$t' = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + \frac{T(\Delta t_i)}{T_0}} \right] \quad (2)$$

ここに,  $f'_c$ : モルタル強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $t'$ : 有効材齢 (日),  $a$ : 強度発現速度に関する定数,  $b$ : 係数,  $T$ : 温度 (°C),  $\Delta t_i$ : 温度が  $T$ °C である期間の日数 (日),  $T_0$ : 1°C。

これより, B650 の左から 2 点目と 4 点目はデータの乖離が見られるものの, いずれの配合も有効材齢と圧縮強度に相関性が認められ, 高温養生後の急冷は強度発現に影響しないと判断される。また, それらの近似直線の勾

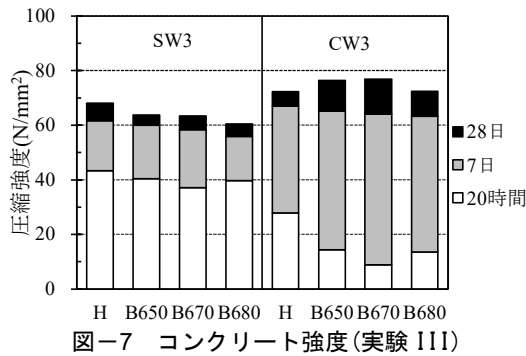


図-7 コンクリート強度(実験 III)

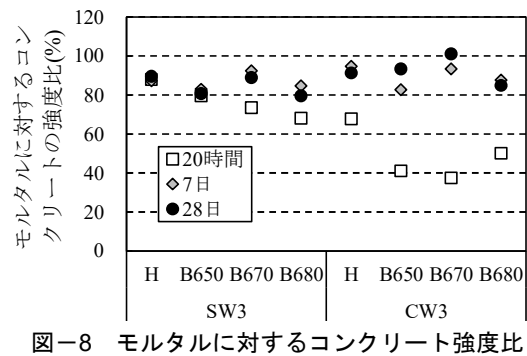


図-8 モルタルに対するコンクリート強度比

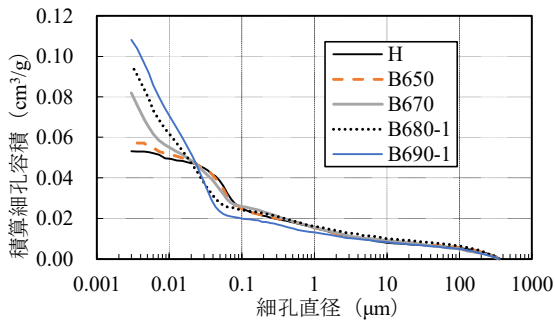


図-9 モルタル細孔径分布(実験 I, SW3)

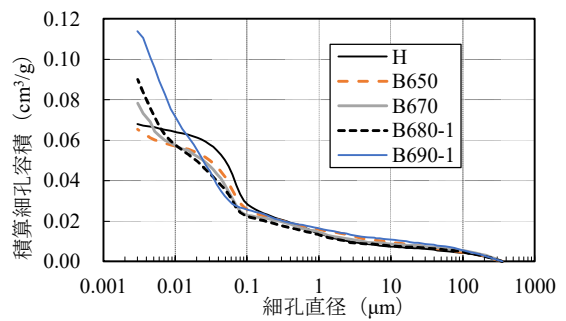


図-10 モルタル細孔径分布(実験 I, CW3)

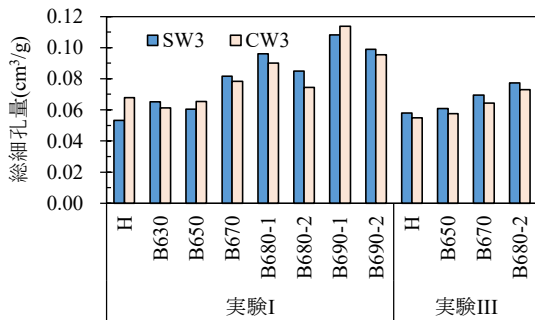


図-11 総細孔量

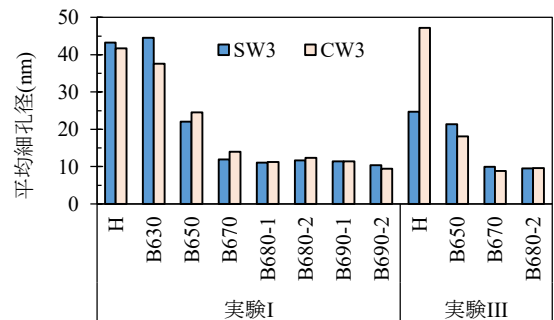


図-12 平均細孔径

配である強度発現速度に関する定数 $a$ は置換率が高いほど急であり、図-6に示すとおり、定数 $a$ と置換率の関係には強い相関性がある。つまり、高炉スラグ微粉末を高置換するほど有効材齢に対する強度増進率が高くなり、その効果は置換率1%につき有効材齢2.3%の増加に相当することが確認された。

### 3.3 粗骨材が強度発現に与える影響

実験IIIのコンクリート強度を図-7に示す。モルタル強度(図-2)に比べると、コンクリート強度は全体的に低下する傾向にある。これは、粗骨材の界面が弱点になるためであり、強度レベルのほかに、粗骨材の種類や大きさ、量によって強度低下の度合いが変化する<sup>8)</sup>。この点に関し、本研究では、上記の条件を一致させているため、粗骨材界面に起因する強度低下の割合は、配合の影響を受けない筈である。

実験Iのモルタルに対するコンクリート強度比を図-8に示す。材齢20時間に着目すると、強度比はSW3で高置換にする、あるいは、養生方法をSW3からCW3に

することで低下する傾向にある。なお、CW3に着目すると、B680-2の強度比がB650やB670より高くなるのは単位水量を $145\text{kg/m}^3$ と他より低減させたため遷移体が相対的に改善した可能性があるものの、Hと比べて強度比が低下することには変わりがなかった。つまり、高炉スラグ微粉末を高置換したコンクリートは、粗骨材界面以外の何らかの原因で初期強度が低下することが示唆された。この点は、4.にて追及する。一方、SW3とCW3の強度比の差は、材齢7日ではほぼ無くなり、材齢28日ではSW3に比べCW3の強度比が4配合とも上回っている。これはすでに示したように高温養生の影響である。

## 4. 細孔径分布の測定結果と考察

### 4.1 置換率と高温養生が空隙構造に与える影響

実験Iの細孔径分布を図-9と図-10に示す。細孔径分布は、SW3、CW3とも200nm以上の粗大な細孔が少なく、200nm未満の細孔が多い。これは、高強度コンクリートでは約200nm以上の粗大な空隙構造を形成する

空間が少ないことが要因と考えられる<sup>9)</sup>。また、B670、B680-1、B690-1では20nm未満の微細な細孔がHやB650と比べて顕著に増加している。これにより、置換率の高い配合ほど総細孔量は図-11に示すように増加し、平均細孔径は図-12に示すとおり小さい。この傾向は、既往研究<sup>2)</sup>と同様である。なお、実験IIIにおけるHのSW3とCW3の総細孔量は同程度であるのに対し、平均細孔径がSW3に対しCW3で約2倍になっている。これは、40℃の養生を行うことで約0.2μm以上の粗大な毛細管空隙構造の範囲に組織がより粗く多孔質になるとの既往研究と異なる結果であり、今後の課題とする。

実験Iより得られた細孔径分布とモルタル組成から算出した空隙率と材齢28日強度の関係を回帰した結果を表-2に示す。モルタルの空気量は6.2~7.0%の範囲であったため、ほぼ同等であるとみなし、細孔径の上限を355μmとし、下限のみを変化させた。決定係数は、細孔径の下限を4nmとしたときに最大となった。これは、普通強度コンクリートの圧縮強度は骨材とペースト界面の遷移体を形成する50nm~5μmの空隙量に依存するのに対し、高強度コンクリートは遷移体が形成されないことから全毛細管空隙量に相当する4nm~5μmの空隙量に依存するとの橋田の研究<sup>10)</sup>に合致する。

図-13に4nm以上の空隙率と材齢28日強度の関係を示す。図示した近似式によると、60N/mm<sup>2</sup>以上の範囲では、CW3に比べSW3の強度が10%程度低下することがわかる。また、実験IIIのプロットは、実験Iで得られた回帰式に比べ、圧縮強度で15%程度低下した。

以上より、高温養生を行うことでコンクリートの圧縮強度がモルタルの0.85倍となる原因は、4nm以上の空隙構造から骨材の界面が弱点になるためであり、置換率の影響は小さいと推定される。

#### 4.2 粗骨材が細孔径分布に与える影響

モルタルに対するコンクリートの総細孔量比を図-14に示す。まずCW3に着目すると、総細孔量比はいずれも100%未満である。これは、モルタルはコンクリートより供試体寸法が小さく、乾燥が進行し、水和反応が早期に停滞したものと推察される。また、置換率の大きい配合は総細孔量比が大きい。これは、郭らの研究<sup>11)</sup>によると、高炉スラグ微粉末の水和の結果形成される細孔構造が緻密であるため、乾燥環境でも内部に水分が残存し、水和が長期間進行するとの指摘があり、この影響を受けたものと推察される。一方、SW3の総細孔量の比は、HとB650で100%以上であるのに対し、B670とB680-2で85%と91%と小さく、CW3の傾向とは異なる。この原因は不明であるが、たとえば高炉スラグ微粉末を高置換したコンクリートでは、粗骨材混入により水和反応が阻害され、細孔構造が微細化しない可能性がある。

表-2 回帰分析結果(実験I)

細孔径の範囲		決定係数 R <sup>2</sup>		関係
下限(nm)	上限(μm)	SW3	CW3	
3	355	0.68	0.89	負
4		0.78	0.99	
6		0.78	0.88	
10		0.54	0.20	
20		0.08	0.06	

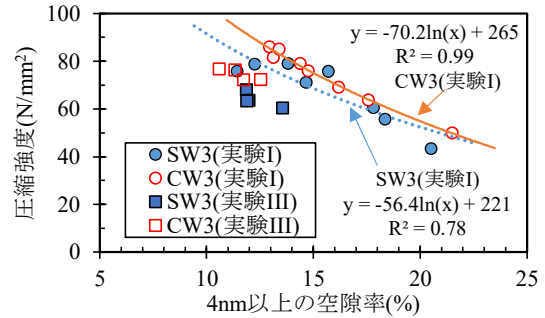


図-13 空隙率と材齢28日強度の関係

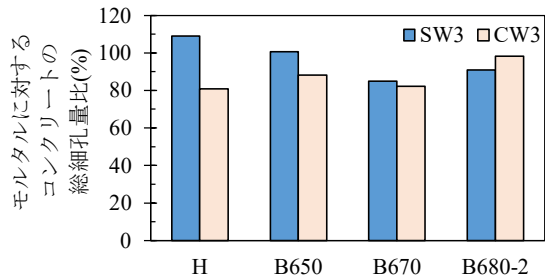


図-14 モルタルに対するコンクリートの総細孔量比

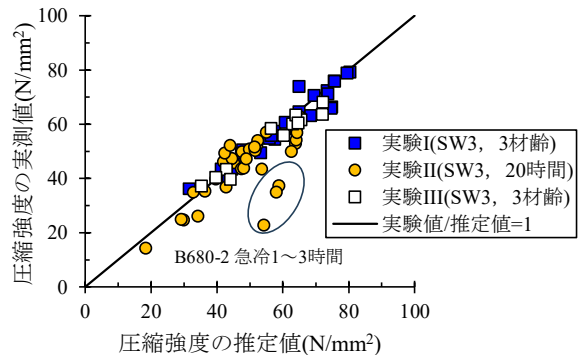


図-15 強度発現式による推定値と実験値の比較

#### 5. 圧縮強度発現の評価

前報<sup>6)</sup>では、既往の有効材齢による強度発現式を用いて、高温履歴によるスラグの強度寄与率 $k_T$ (前報は $T$ )を新たに組み込むことにより、高炉スラグ微粉末を高置換したモルタルの強度発現を評価できると報告した。この前提条件は、最高温度45℃を6時間保持した場合である。3.2にて高温養生による有効材齢への影響が初期材齢にて顕著であることから、強度発現率 $S_d$ を算出する式(2)に、式(5)として示す高温養生による有効材齢の補正係数 $\gamma_T$ を組み込むことにした。この $\gamma_T$ は、強度発現速度に関する

る定数を用い、有効材齢 1.5 日、すなわち  $\log_e(1.5)=0.41$  日で最大 1.0 となるように有効材齢を補正した。また、コンクリートは、モルタルに比べ初期強度の低下が確認されたため、 $k_T$ は粗骨材量に関する係数 $\gamma_G$ を追加した式(7)に改良した。この $\gamma_G$ を、モルタル (0L/m<sup>3</sup>) で 1.0<sup>6)</sup>、コンクリート (366L/m<sup>3</sup>) で 0.85 (4.1 による) として算出される $k_T$ と実験値を比較した。その結果を図-15 に示す。実験 II の B680-2 で急冷 1~3 時間としたデータを除き、高温養生による強度発現を良好に評価することが確認された。

$$f'_c(t') = S_d \cdot f'_c(28) \quad (3)$$

$$S_d = \frac{\gamma_T t' - S_f}{a + b(\gamma_T t' - S_f)} \quad (4)$$

$$\gamma_T = e^{0.41 - (0.41 - l_e(t'))(1 + 0.023R)} < 1.5 \quad (5)$$

$$B_s = k_{sc} \cdot C + k_{ss} \cdot k_T \cdot SCM \quad (6)$$

$$k_T = \gamma_A \cdot \gamma_R \cdot \gamma_G \quad (7)$$

ここに、 $f'_c(t')$ :有効材齢 $t'$ 日における圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $S_d$ :強度発現率、 $f'_c(28)$ :基準材齢28日における圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) で、早強ポルトランドセメントは $f'_c(28) = -14.9 + 30.9(B_s/W)$ 、 $S_f$ :硬化原点に対する有効材齢[=0.10<sup>6)</sup>] (日)、 $a$ および $b$ :セメント種類および基準材齢に応じた定数で、早強ポルトランドセメントは $a = 4.39 - 1.19(B_s/W)$ 、 $b = 0.841 + 0.0428(B_s/W)$ 、 $\gamma_T$ :高温養生による有効材齢の補正係数、 $R$ :置換率 (%),  $B_s$ :強度発現に関する混和材の寄与率を加味した単位結合材量 (kg/m<sup>3</sup>)、 $W$ :単位水量 (kg/m<sup>3</sup>)、 $K_{sc}$ :強度発現に関するセメントの寄与率[モルタル1.04<sup>6)</sup>、コンクリート1.0]、 $K_{ss}$ :強度発現に関するスラグの寄与率で、BF6 は0.63<sup>6)</sup>、 $C$ :単位セメント量 (kg/m<sup>3</sup>)、 $SCM$ :単位混和材量 (kg/m<sup>3</sup>)、 $k_T$ :高温養生によるスラグの強度寄与率<sup>6)</sup>、 $\gamma_A$ 、 $\gamma_R$ 、 $\gamma_G$ :材齢、置換率、粗骨材量に関する係数で、 $\gamma_A = 0.025(R - 65)(1 - S_d) + 1$ 、 $\gamma_R = -0.0236R + 3.06$ 。

## 6. まとめ

本研究の範囲において得られた知見を以下に示す。

- (1) 高炉スラグ微粉末を高置換させた場合、高温養生を行うことで初期強度は大きく増進し、一方、長期強度は停滞する。
- (2) 無置換に比べ置換率 70%を超えると初期強度が低下するものの、置換率 90%までであれば水結合材比を低減し高温養生を行うことで初期強度が改善する。
- (3) 高炉スラグ微粉末を高置換し最高温度 45℃を 1~6 時間保持する場合、急冷、徐冷によらず、保持時間を延長するほど初期強度の増進が見込める。
- (4) 有効材齢に対する強度増進率は、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど高く、その効果は置換率 1%につき有効材齢 2.3%の増加に相当する。

- (5) 高温養生を行うことでコンクリートの圧縮強度がモルタルの 0.85 倍となる原因は、4nm 以上の空隙構造から骨材の界面が弱点になるためであり、置換率の影響は小さいと推定される。
- (6) 既往の有効材齢による強度発現式を用いて、高温養生によるスラグの強度発現への寄与を新たに組み込むことにより、高炉スラグ微粉末を高置換した高強度コンクリートの強度発現を良好に評価する。

## 参考文献

- 1) 土木研究所、プレストレスト・コンクリート建設業協会：新設プレストレストコンクリート橋の品質・信頼性向上方法の構築に関する共同研究報告書—プレキャスト PC 部材の高耐久化に向けた混和材を用いたコンクリートの設計・製造マニュアル(案)—, 2022
- 2) 檀康弘, 近田孝夫, 永浜一考:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生特性, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.222-227, 1991
- 3) 長尾之彦, 鈴木孝治:高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの蒸気養生特性とその利用, 新日鉄住金技報第 399 号, pp.127-131, 2014
- 4) 小林崇, 牧大樹:蒸気養生を行った高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの強度発現性状, 土木学会第 63 回年次学術講演会, V-371, 2008.9
- 5) 細田暁, 藤原浩一, 青木千里:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの力学的特性に対する微視的温度応力の影響, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.4, pp.549-561, 2007.10
- 6) 水戸健介, 北野勇一, 秋吉善忠, 大谷俊浩:スラグ高置換高強度モルタルの強度と中性化抵抗性に与える高温履歴の影響, 第 33 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.381-386, 2024.10
- 7) 佐川孝広, 名和豊春:リーベルト法による高炉セメントの水和反応解析, コンクリート工学論文集, Vol.17, No.3, pp.1-11, 2006
- 8) 川上英男, 粗骨材とコンクリート強度, 材料, 第 20 巻, 第 208 号, pp.34-40, 1971.1
- 9) 渡辺暁央, 五十嵐心一, 川村満紀:養生条件の相違によるセメントペーストの細孔構造の変化と圧縮強度特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.539-544, 2003
- 10) 橋田浩:細孔空隙構造からのコンクリートの各種特性の形成機構に関する検討, 清水建設研究報告, 第 63 号, pp.1-9, 1996.4
- 11) 郭度連, 國府勝郎, 李昌洙, 李奎東:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの内部組織の形成に及ぼす置換率の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.783-788, 2004