

## 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの構造体強度補正值の標準値の検討

## Experimental Estimation of Standard Correction Value of Concrete Strength in Structure with High Volume Blast Furnace Slag Cement

依田 和久 閑田 徹志 全 振 煥  
田 中 秀 樹<sup>1)</sup>

## 要 約

建設資材のうちポルトランドセメントに起因するCO<sub>2</sub>排出量の占める割合は高く、セメントを主な使用材料とするコンクリートにおいてCO<sub>2</sub>排出量削減を果たすことの社会的意義は大きい。特に、地下部材のマスコンクリートは、コンクリートを大量使用するため対策技術次第で効果的なCO<sub>2</sub>排出量削減が期待できる。これらのことから、地下部材のマスコンクリートを対象に、高炉スラグ微粉末の含有率を65%程度まで高めたセメントを用いたコンクリート（ECMコンクリート）を開発した。本研究ではECMコンクリートのマスコンクリートとしての普及拡大を目指し、一般的な強度域（ $F_c=33\text{N/mm}^2$ まで）及び高強度域（ $F_c=33\text{N/mm}^2$ 超）の設計基準強度における構造体強度補正值（mSMn）標準値の設定を実験的に試みた。実験の結果、呼び強度40程度まで（ $F_c=36\text{N/mm}^2$ 程度）の調合においてフレッシュ性状及び強度発現性状は普通コンクリートと同等であり、構造体強度補正值（mSMn）は、JASS5-2015に示されている高炉セメントB種の標準値以下とすることができる見通しを得た。

## 目 次

- I. はじめに  
II. 構造体強度補正值の検討  
III. おわりに

## I. はじめに

地球温暖化を背景として、二酸化炭素（以下、CO<sub>2</sub>）など温室効果ガス排出量の削減が求められている。代表的な建設資材であるセメントは製造時のCO<sub>2</sub>排出量が多く、セメントを用いるコンクリートはCO<sub>2</sub>排出量削減の余地が大きい。

このような背景のもと、CO<sub>2</sub>排出量を従来から60%程度低減できる高炉スラグ高含有セメント（以下、ECMセメント）を用いたコンクリート（以下、ECMコンクリート）を開発した。

ECMセメントは、セメントの65%程度を高炉スラグ微粉末に置換（高炉セメントC種相当）し、低発熱・低収縮性を特徴とするものである。中性化し易いという性質があるため、気中への曝露面が少なく、設計上かぶり厚さを確保しやすい地下部材（基礎梁や耐圧盤）や場所打ち杭が用途として挙げられる。

コンクリートを生コン工場で発注する際の調合管理強度（呼び強度）は(1)式に示される。

$$FMm = Fq + mSMn \quad (\text{N/mm}^2) \quad \dots \dots \dots (1)$$

FMm：コンクリートの調合管理強度（呼び強度）（N/mm<sup>2</sup>）

Fq：コンクリートの品質基準強度（N/mm<sup>2</sup>）

mSMn：構造体強度補正值（N/mm<sup>2</sup>）

構造体強度補正值（以下、mSMn）はJASS 5-2015でセメントの種類ごとに標準値が示されている。しかし、ECMセメントが該当する高炉セメントC種は標準値が示されていないため、実験によってこれを定める必要がある。信頼できる実験結果を基により小さな値をmSMnとして採用できれば、調合管理強度（呼び強度）が小さくなるため水和熱を抑制でき、経済性と品質に優れたコンクリートを発注することが可能となる。これまでECMコンクリートは首都圏の限られた工場でのみ出荷が可能であり、かつ経済的なmSMnを実現するには適用強度範囲がマスコンクリートの一般的な強度域（ $F_c=33\text{N/mm}^2$ まで、以下、一般強度域）に限られるといった課題があった。本研究では、2012～2014年度に実施した20の実験をもとに、i) 一般的な強度域（ $F_c=33\text{N/mm}^2$ まで）と、ii) 高強度域（ $F_c=33\text{N/mm}^2$ 超）の2種類に区分し、mSMnの標準値について検討した結果を報告する。

1) 関西支店 Kansai Branch

**キーワード**：コンクリート、高炉スラグ微粉末、高炉セメント、CO<sub>2</sub>削減、圧縮強度、強度補正值

**Keywords**: concrete, blast furnace slag, Portland blast-furnace slag cement, low CO<sub>2</sub> emission, compressive strength, correction value

II. 構造体強度補正值の検討<sup>1, 2)</sup>

1. 実験概要

(1) 実験要因と組み合わせ

実験は一般強度域シリーズと高強度域シリーズとからなる。本研究では ECM コンクリートの出荷を計画している生コン工場にてコンクリートを製造し、mSMn に及ぼす各種要因の影響を把握した。実験要因と水準を Table 1 に、これらによる実験条件の組み合わせを Table 2 に示す。

①生コン工場は 6 工場（東京 4 工場、大阪 2 工場）とした。②季節は実験の実施時期別に 3 つに分け、標準期（夏期、冬期以外）、夏期（7～9 月）、冬期（12～2 月）とした。③水結合材比は、一般強度域は呼び強度 21～36 を想定し 55, 45, 38% とし、高強度域は呼び強度 36～45 を想定し 45, 38, 35% とした。④AE 減水剤は、一般強度域ではコンクリートの凝結時間の異なる標準形（S）、遅延形（R）、高遅延形（B）の 3 種類を季節に応じて使い分けた。高強度域では高強度形（X）1 種類を通年で使用した。この高強度形は粉体量が増加することを考慮して一般強度域用 AE 減水剤の遅延形（R）をベースに改良し、セメント粒子に対する初期分散性の向上と、フレッシュコンクリートの過剰な粘性の増加を抑える性質のポリカルボン酸塩を新たに混和したものである。

コンクリートの記号のうち、ECM セメントを用いたものは以下①～④の要因における各水準の組合せである。例えば、FN45S は①生コン工場が F、②季節が標準期（N）、③水結合材比が 45%、④AE 減水剤種類が標準形（S）を意味する。さらに末尾に数字を付加したものは①～④の水準が同一であるものの単位水量や AE 減水剤の添加量が異なる水準を意味する。また水結合材比以降 2 つ目の文字 S を付加したものは碎石に硬質砂岩を用いたものであり、他は石灰岩を用いた。その他の結合材を用いたものうち、中庸熱セメントは M、高炉セメント B 種は BB と表記した。

実験は、19 の実験を実機ミキサーによる練混ぜ（以下、実機練り）とし、Table 2 の備考欄に示した通り、30℃環境の 1 実験（対象：No.24,31～32, 37～39, 53）のみ試験室のミキサーによる練混ぜ（以下、室内練り）とした。

(2) 使用材料・調合・練混ぜ方法

使用材料を Table 3 に示す。結合材の品質を Table 4 に示す。細骨材、粗骨材、水は各生コン工場が通常に用いているものとした。

Table 2 のコンクリートの調合は、生コン工場の試験室における試験練りにより決定した。マスコンクリート部材への適用を考慮し、スランブ 15cm（一部同 18 cm）、空気量 4.5% を目標に、練上り直後のスランブ、空気量は各工場で設定される運搬ロスを考慮した。練混ぜは、実機練り、室内練りとも強制二軸ミキサーにより行い、練混ぜ時間は工場毎の実績により実機練りで材料投入後 30 秒もしくは 40 秒、室内練りで 90 秒とした。

(3) 試験項目と方法

試験項目と方法を Table 5 に示す。フレッシュコンクリートの試験結果は練上り直後のものとした。実験水準の一部において強度発現性状の確認を目的に単位水量を工場標準値より増減したものはスランブの管理値を定めていない。

構造体コンクリート強度はコア供試体及び簡易断熱養生供試体の 2 つの推定方法によるものとした。これらに加え、mSMn を算出す

るため標準養生による供試体についても圧縮強度試験を実施した。コア供試体及び簡易断熱養生供試体は、それぞれ JASS5 T-605、JASS5 T-606 に基づき作製した。コア供試体は Fig.1 に示すとおり、上下断熱材で挟み込んだ 1m 角の模擬柱部材から採取した。

模擬柱部材の温度は、部材中心部、内側のコア部（コア中心部）、外側のコア部（コア端部）の中心の 3 点で計測した。簡易断熱養生供試体は Fig.2 に示すとおり断熱容器を用いて養生を行い同容器中の供試体内部温度を計測した。

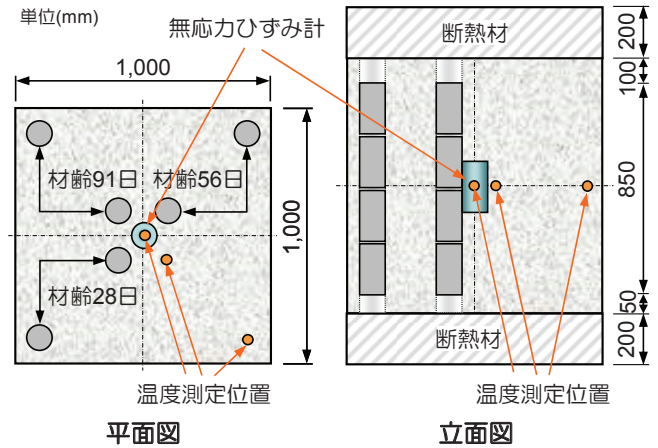


Fig.1 コア模擬試験体の詳細 (Details of Core Specimen)

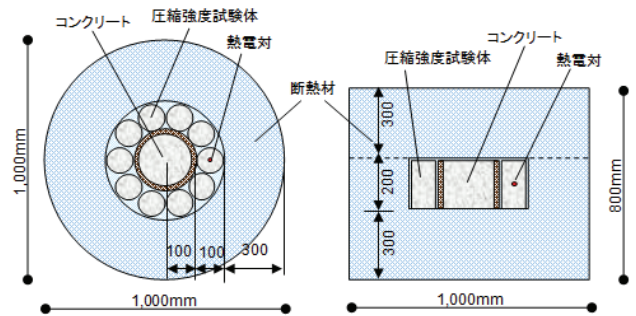


Fig.2 簡易断熱養生供試体の詳細 (Details of Heat Insulation Specimen)

Table 1 実験要因と水準

(Factors and Levels in Experiments)

| 実験シリーズ | 実験要因      | 水準1     | 水準2    | 水準3     | 水準4 | 水準5 | 水準6 |
|--------|-----------|---------|--------|---------|-----|-----|-----|
| 一般強度域  | ①生コン工場    | F       | S      | H       | T   | N   | L   |
|        | ②季節       | 標準期(N)  | 夏期(S)  | 冬期(W)   | -   | -   | -   |
|        | ③水結合材比(%) | 55      | 45     | 38      | -   | -   | -   |
|        | ④AE減水剤    | 標準形(S)  | 遅延形(R) | 高遅延形(B) | -   | -   | -   |
| 高強度域   | ①生コン工場    | H       | T      | N       | L   | -   | -   |
|        | ②季節       | 標準期(N)  | 夏期(S)  | 冬期(W)   | -   | -   | -   |
|        | ③水結合材比(%) | 45      | 38     | 35      | -   | -   | -   |
|        | ④AE減水剤    | 高強度形(X) | -      | -       | -   | -   | -   |

Table 2 実験条件の組合せとコンクリートのフレッシュ試験結果  
(Experimental Conditions and Test Results of Fresh Concrete Properties)

| No. | 区分 | 記号     | 生コン工場 | 季節 | W/B (%) | 混和剤種類 | s/a (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |      | フレッシュ試験結果 |         |         |      | 備考  |
|-----|----|--------|-------|----|---------|-------|---------|--------------------------|-----|------|------|-----------|---------|---------|------|-----|
|     |    |        |       |    |         |       |         | 水                        | 結合材 | 細骨材  | 粗骨材  | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 温度 (°C) | 性状   |     |
|     |    |        |       |    |         |       |         | W                        | B   | S    | G    |           |         |         |      |     |
| 1   | 一般 | FN45S  | F     | N  | 45.0    | S     | 46.0    | 175                      | 389 | 782  | 948  | 19.0      | 4.3     | 20      | 良    |     |
| 2   |    | FS42R  | F     | S  | 42.0    | R     | 44.0    | 178                      | 424 | 732  | 962  | 16.5      | 4.0     | 32      | 良    |     |
| 3   |    | FS42B  |       |    | 42.0    | B     |         |                          |     |      |      | 16.0      | 4.5     | 32      | 良    |     |
| 4   |    | FS42BS |       |    | 42.0    |       |         |                          |     |      |      | 16.0      | 4.5     | 32      | 良    | 砂岩  |
| 5   |    | BB     |       |    | 43.5    | R     |         |                          |     |      |      | 42.6      | 186     | 428     | 702  | 974 |
| 6   |    | FW55S  | F     | W  | 55.0    | S     | 48.2    | 172                      | 313 | 856  | 948  | 18.5      | 4.3     | 9       | 良    |     |
| 7   |    | FW42S1 |       |    | 42.0    |       | 44.8    | 177                      | 422 | 748  | 948  | 19.5      | 4.6     | 9       | 良    |     |
| 8   |    | FW38S  |       |    | 38.0    |       | 43.3    | 179                      | 471 | 700  | 946  | 19.0      | 5.5     | 8       | 良    |     |
| 9   |    | FW42S2 |       |    | 42.0    |       | 44.8    | 177                      | 422 | 748  | 948  | 21.0      | 4.8     | 8       | 良    |     |
| 10  |    | FN55R  | F     | N  | 55.0    | R     | 49.0    | 160                      | 291 | 896  | 962  | 20.0      | 5.3     | 26      | 良    |     |
| 11  |    | FN45R  |       |    | 45.0    |       | 46.9    | 163                      | 363 | 824  | 962  | 20.5      | 5.6     | 26      | 良    |     |
| 12  |    | FN38R  |       |    | 38.0    |       | 44.5    | 167                      | 440 | 746  | 960  | 20.5      | 5.1     | 26      | 良    |     |
| 13  |    | SN55R  |       |    | 55.0    |       | 46.2    | 162                      | 295 | 834  | 1008 | 20.0      | 5.3     | 26      | 良    |     |
| 14  |    | SN45R  | S     | N  | 45.0    | S     | 42.9    | 170                      | 378 | 734  | 1015 | 20.5      | 5.6     | 26      | 良    |     |
| 15  |    | SN38R  |       |    | 38.0    |       | 39.4    | 179                      | 471 | 634  | 1010 | 20.5      | 5.1     | 28      | 良    |     |
| 16  |    | SS45B  |       |    | S       |       | S       | 45.0                     | B   | 42.9 | 170  | 378       | 734     | 1015    | 18.5 | 5.7 |
| 17  |    | M      | F     |    | 46.5    | R     | 45.4    | 176                      | 379 | 788  | 960  | 19.5      | 6.1     | 32      | 良    | M-B |
| 18  |    | HW55S  | H     | W  | 55.0    | S     | 48.5    | 170                      | 311 | 861  | 948  | 19.0      | 4.5     | 11      | 良    |     |
| 19  |    | HW45S  |       |    | 45.0    |       | 45.5    | 175                      | 389 | 770  | 265  | 18.5      | 4.4     | 12      | 良    |     |
| 20  |    | HW38S  |       |    | 38.0    |       | 41.2    | 185                      | 487 | 653  | 964  | 19.0      | 5.3     | 13      | 良    |     |
| 21  |    | TN55R  | T     | N  | 55.0    | R     | 50.1    | 165                      | 300 | 904  | 929  | 16.5      | 6.0     | 16      | 良    |     |
| 22  |    | TN45R  |       |    | 45.0    |       | 47.6    | 165                      | 367 | 831  | 943  | 19.0      | 4.8     | 16      | 良    |     |
| 23  |    | TN38R  |       |    | 38.0    |       | 42.8    | 175                      | 461 | 703  | 967  | 20.0      | 5.4     | 17      | 良    |     |
| 24  |    | TS45B  | T     | S  | 45.0    | B     | 47.0    | 175                      | 389 | 789  | 943  | 19.5      | 3.9     | 30      | 良    | 室内  |
| 25  |    | TW55S  | T     | W  | 55.0    | S     | 50.1    | 165                      | 300 | 904  | 929  | 16.5      | 5.9     | 10      | 良    |     |
| 26  |    | TW45S  |       |    | 45.0    |       | 47.0    | 170                      | 378 | 810  | 943  | 18.0      | 4.6     | 11      | 良    |     |
| 27  |    | TW38S  |       |    | 38.0    |       | 42.8    | 175                      | 462 | 703  | 967  | 19.0      | 5.8     | 11      | 良    |     |
| 28  |    | NN55R  | N     | N  | 55.0    | R     | 48.5    | 166                      | 302 | 869  | 956  | 17.5      | 5.3     | 19      | 良    |     |
| 29  |    | NN45R  |       |    | 45.0    |       | 46.1    | 170                      | 378 | 791  | 956  | 18.5      | 4.2     | 18      | 良    |     |
| 30  |    | NN38R  |       |    | 38.0    |       | 39.5    | 180                      | 474 | 634  | 1004 | 20.0      | 3.9     | 19      | 良    |     |
| 31  |    | NS55R  | N     | S  | 55.0    | R     | 48.5    | 166                      | 302 | 869  | 956  | 18.0      | 4.0     | 30      | 良    |     |
| 32  |    | NS45R  |       |    | 45.0    |       | 46.1    | 170                      | 378 | 791  | 956  | 18.0      | 4.9     | 30      | 良    | 室内  |
| 33  |    | NS38R  |       |    | 38.0    |       | 39.5    | 180                      | 474 | 634  | 1004 | 18.5      | 4.1     | 30      | 良    |     |
| 34  |    | NW55R  | N     | W  | 55.0    | R     | 48.5    | 166                      | 302 | 869  | 956  | 16.5      | 4.7     | 10      | 良    |     |
| 35  |    | NW45R  |       |    | 45.0    |       | 46.1    | 170                      | 378 | 791  | 956  | 17.0      | 4.4     | 11      | 良    |     |
| 36  |    | NW38R  |       |    | 38.0    |       | 39.5    | 180                      | 474 | 634  | 1004 | 18.0      | 3.5     | 11      | 良    |     |
| 37  |    | LS55R  | L     | S  | 55.0    | R     | 50.6    | 161                      | 293 | 917  | 899  | 16.5      | 4.9     | 29      | 良    |     |
| 38  |    | LS45R  |       |    | 45.0    |       | 48.3    | 165                      | 367 | 839  | 901  | 18.5      | 4.0     | 30      | 良    | 室内  |
| 39  |    | LS38R  |       |    | 38.0    |       | 43.3    | 176                      | 463 | 704  | 925  | 19.0      | 3.9     | 30      | 良    |     |
| 40  |    | LW55S  | L     | W  | 55.0    | S     | 48.9    | 175                      | 318 | 874  | 901  | 16.5      | 4.0     | 11      | 良    |     |
| 41  |    | LW45S1 |       |    | 45.0    |       | 46.8    | 175                      | 389 | 806  | 904  | 18.5      | 4.6     | 11      | 良    |     |
| 42  |    | LW45S2 |       |    | 45.0    |       | 47.5    | 170                      | 378 | 828  | 904  | 18.0      | 6.1     | 12      | 良    |     |
| 43  |    | LW38S  |       |    | 38.0    |       | 43.4    | 175                      | 461 | 719  | 925  | 17.5      | 5.6     | 12      | 良    |     |
| 44  |    | LS45R1 | L     | N  | 45.0    | R     | 48.3    | 165                      | 367 | 839  | 901  | 19.5      | 4.3     | 18      | 良    |     |
| 45  |    | LS45R2 |       |    | 45.0    |       | 46.8    | 175                      | 389 | 806  | 904  | 19.5      | 3.9     | 18      | 良    |     |
| 46  |    | LS45R3 |       |    | 45.0    |       | 47.5    | 170                      | 378 | 828  | 904  | 20.0      | 6.2     | 20      | 良    |     |
| 47  |    | HW45X  | H     | W  | 45.0    | X     | 45.5    | 175                      | 389 | 770  | 956  | 18.5      | 4.5     | 13      | 良    |     |
| 48  |    | HW38X  |       |    | 38.0    |       | 41.2    | 185                      | 487 | 653  | 964  | 20.5      | 4.7     | 13      | 良    |     |
| 49  |    | HW35X  |       |    | 35.0    |       | 39.7    | 185                      | 529 | 613  | 964  | 18.0      | 5.5     | 13      | 良    |     |
| 50  |    | TN45X  | T     | N  | 45.0    | X     | 46.2    | 175                      | 389 | 786  | 943  | 18.0      | 4.3     | 17      | 良    |     |
| 51  |    | TN38X  |       |    | 38.0    |       | 41.9    | 180                      | 474 | 676  | 967  | 19.0      | 4.4     | 17      | 良    |     |
| 52  |    | TN35X  |       |    | 35.0    |       | 38.9    | 185                      | 529 | 603  | 978  | 20.5      | 4.7     | 17      | 良    |     |
| 53  |    | TS38X  |       |    | T       |       | S       | 38.0                     | X   | 41.9 | 183  | 482       | 663     | 967     | 18.5 | 4.9 |
| 54  |    | TW45X  | T     | W  | 45.0    | X     | 46.2    | 175                      | 389 | 786  | 943  | 17.0      | 4.5     | 11      | 良    |     |
| 55  |    | TW38X  |       |    | 38.0    |       | 41.9    | 180                      | 474 | 676  | 967  | 18.0      | 5.4     | 12      | 良    |     |
| 56  |    | TW35X  |       |    | 35.0    |       | 38.9    | 185                      | 529 | 603  | 978  | 17.5      | 5.5     | 12      | 良    |     |
| 57  |    | NN45X  | N     | N  | 45.0    | X     | 46.1    | 170                      | 378 | 791  | 956  | 19.0      | 4.8     | 18      | 良    |     |
| 58  |    | NW45X  | N     | W  | 45.0    | X     | 46.1    | 170                      | 378 | 791  | 956  | 18.5      | 4.5     | 11      | 良    |     |
| 59  |    | LW45X  | L     | W  | 45.0    | X     | 46.8    | 175                      | 389 | 806  | 904  | 18.5      | 5.6     | 12      | 良    |     |
| 60  |    | LN45X  | L     | N  | 45.0    | X     | 47.5    | 170                      | 378 | 828  | 904  | 19.0      | 5.1     | 20      | 良    |     |

注1: AE減水剤の添加量は結合材(B)×0.8~1.5%とした。  
 注2: 記号末尾の数字は同一実験で単位水量やAE減水剤の添加量が異なる水準  
 注3: 色分けは緑が標準期(N)、橙が夏期(S)、青が冬期(W)を意味する

Table 3 使用材料  
(Materials)

| 種類         | 記号      | 種類  | 密度(kg/cm <sup>3</sup> ) | 生コン工場  |
|------------|---------|---|-------------------------|--------|
| 結合材 (B)    | ECM-B   | 高炉スラグ系(高炉スラグ置換率は高炉セメントC種相当, プレーン4000cm <sup>2</sup> /g) | 2.98                    | 共通     |
|            | BB-B    | 高炉セメントB種  | 3.04                    | F      |
|            | M-B     | 中庸熱セメント   | 3.21                    |        |
| 細骨材 (S)    | SF1     | 砕砂(石灰岩)   | 表乾2.67                  | F      |
|            | SF2     | 山砂  | 表乾2.60                  | S      |
|            | SS1     | 砕砂(石灰岩)   | 表乾2.62                  |        |
|            | SS2     | 山砂  | 表乾2.58                  |        |
|            | SH      | 混合砂   | 表乾2.61                  | H      |
|            | ST1     | 砕砂(石灰岩)   | 表乾2.67                  | T      |
|            | ST2     | 山砂  | 表乾2.60                  |        |
|            | SN      | 混合砂   | 表乾2.61                  | N      |
|            | SL1     | 砕砂(硬質砂岩)  | 表乾2.69                  | L      |
|            | SL2     | 海砂  | 表乾2.57                  |        |
|            | 粗骨材 (G) | GC  | 砕石(石灰岩)                 | 表乾2.70 |
| GS         |         | 砕石(硬質砂岩)  | 表乾2.64                  | F      |
| AE減水剤 (Ad) | S       | 標準形   | 1.08                    | 共通     |
|            | R       | 遅延形   | 1.09                    |        |
|            | B       | 高遅延形  | 1.09                    |        |
|            | X       | 高強度形  | 1.07                    |        |
| 水          | W       | 上水道水ほか  | 1                       | 共通     |

注)細骨材混合比(質量)SF1:SF2=4:6, SS1:SS2=5:5, ST1:ST2=4:6, SL1:SL2=3:7

Table 4 結合材の品質  
(Properties of Binders)

| 項目                        | ECM-B    |          | M-B   | BB-B  | BB-Bの規格値 |         |
|---------------------------|----------|----------|-------|-------|----------|---------|
|                           | 生コン工場Fほか | 生コン工場N,L |       |       |          |         |
| 密度 (g/cm <sup>3</sup> )   | 2.98     | 2.96     | 3.21  | 3.04  | -        |         |
| 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g) | 4170     | 4180     | 3170  | 3800  | ≥3300    |         |
| 凝結 (h-min)                | 始発       | 3-55     | 3-00  | 2-16  | 3-03     | 60min以上 |
|                           | 終結       | 6-10     | 4-55  | 3-24  | 4-21     | 10h以下   |
| 安定性(バット法)                 | 良        | 良        | 良     | 良     | 良        |         |
| 圧縮強さ (N/mm <sup>2</sup> ) | 材齢3日     | 18.2     | 19.3  | 21.5  | 21.6     | ≥10.0   |
|                           | 材齢7日     | 31.5     | 34.1  | 30.8  | 37.1     | ≥17.5   |
|                           | 材齢28日    | 52.0     | 53.6  | 56.1  | 64.6     | ≥42.5   |
| 酸化マグネシウム(%)               | 5.0      | 4.2      | 0.86  | 3.35  | ≤6.0     |         |
| 三酸化硫黄(%)                  | 3.57     | 3.51     | 2.25  | 2.21  | ≤4.0     |         |
| 強熱減量(%)                   | 0.3      | 0.96     | 0.66  | 1.3   | ≤5.0     |         |
| 塩化物イオン(%)                 | 0.006    | -        | 0.014 | 0.011 | -        |         |

Table 5 試験項目と方法  
(Test Items and Methods)

| 区分    | 試験項目    | 試験方法         | 養生   | 試験材齢            |
|-------|---------|--------------|------|-----------------|
| フレッシュ | スランプ    | JIS A 1101   | -    | -               |
|       | スランプフロー | JIS A 1150   | -    | -               |
|       | 空気量     | JIS A 1128   | -    | -               |
|       | 温度      | JIS A 1156   | -    | -               |
|       | 性状      | 目視           | -    | -               |
| 硬化過程  | 温度      | 熱電対による       | -    | -               |
| 強度    | 圧縮強度    | JIS A 1108   | 標準養生 | 7, 28日          |
|       |         | JASS 5 T-605 | コア   | 28, 56, 91, X日* |
|       |         | JASS 5 T-606 | 簡易断熱 | 28, 56, 91日     |

\*1.試験材齢X日は材齢126~322日の間で実施

2. 実験結果

(1) コンクリートのフレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ試験の結果を Table 2 に示す。一般強度域シリーズ, 高強度域シリーズともに, 調合上の単位水量を工場標準値としたものはスランプ, 空気量ともに練上り直後において運搬によるロスを見込んだ目標の管理範囲内の結果であった。

(2) コンクリートの温度履歴

(a) コンクリート各部の温度

コンクリート温度履歴の一例として, 一般強度域シリーズの代表的な調合である W/B45%の FN45S の模擬柱部材と簡易断熱養生供試体の温度履歴を Fig.3 に示す。模擬試験体中心部とコア内側の最高温度は 45°C程度と同等であり, これに対しコア外側は 34°Cと約 11°C低い。この温度差は部材厚で見た場合 JASS 5 に記載されている中庸熱セメント (単位セメント量 438kg/m<sup>3</sup>) の 16°C程度<sup>4)</sup>に比べ小さい。また, 簡易断熱型枠の供試体内部の最高温度は 38°Cであり, 試験体中心部よりも 7°C程度小さい。

(b) 結合材種類別温度

セメント種類別にコア中心部 (コア内と表記) とコア端部 (コア外と表記) の温度履歴を Fig.4 に示す。水結合材比は 43.5~46.5% の範囲で若干異なるが呼び強度がほぼ同一かつ一般強度域のコンクリートにおいて模擬試験体の最高温度は BB (79.4°C) > M (67.6°C) > SN45R (59.8°C) の順となった。ECMセメントを用いた SN45R は最高温度が低いことから ECMセメントはマスコンクリートの用途に向いている<sup>4)</sup>。また, 中心部とコア外側の最高温度差は BB (18.8°C) > M (13.1°C) > SN45R (11.6°C) の順となった。SN45R は BB に比べ, 最高温度が低く, 中心部と端部の温度差は小さいと言える。

(c) 各コンクリートの最高温度と最高温度到達時間

コンクリートの最高温度を Fig.5 に示す。季節別では夏期>標準期>冬期となり, 水結合材比 (W/B) 別では低いものほど最高温度が高い。季節別の温度差は 10~15°C程度であった。

コンクリートの最高温度到達時間を Fig.6 に示す。最高温度到達時間は季節別では冬期>標準期>夏期となり, 水結合材比別では高いものほど最高温度到達時間が長い。季節別の最高温度到達時間の差は 600~1000 分 (10~16.7 時間) 程度であった。

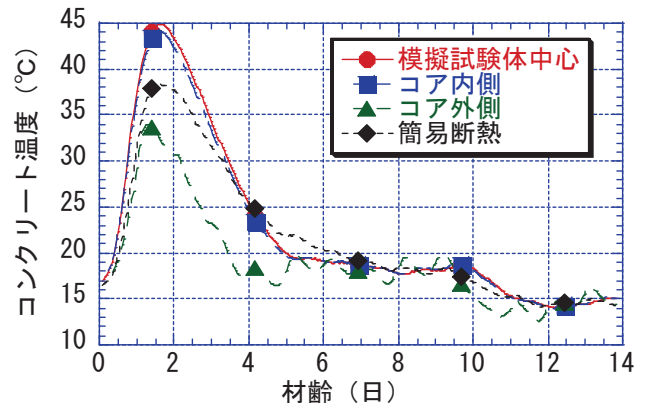


Fig.3 試験体各部の温度履歴の一例 (FN45S)

(Example of Temperature Changes in the Hardening Process of Concrete)

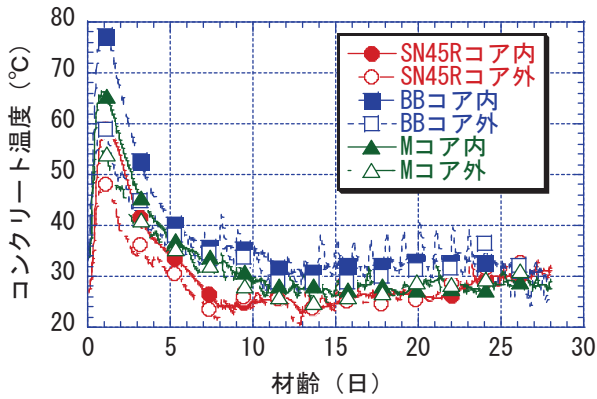


Fig.4 セメント種類別コアの温度履歴  
(Temperature on the Hardening Process Depending on Cement)

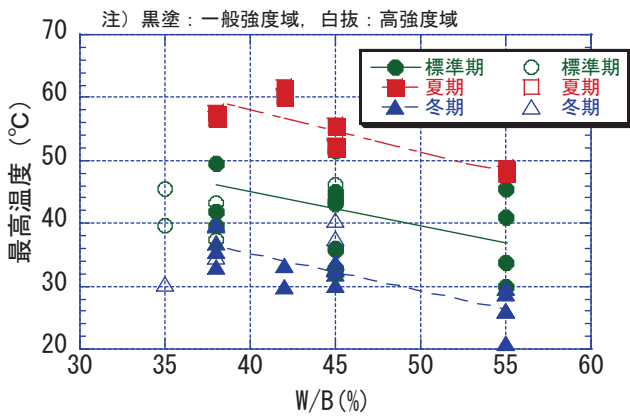


Fig.5 コンクリートの最高温度 (結合材:ECM-B)  
(Highest Temperature of Concrete)

(3) コンクリートの圧縮強度

(a) 標準養生強度

一般強度域における全6工場での結合材水比 (B/W) と材齢 28 日の標準養生圧縮強度の関係を Fig.7 に、同様に高強度域における 4 工場での結合材水比と材齢 28 日の標準養生圧縮強度の関係を Fig.8 に示す。結合材水比 2.63 (水結合材比 38%) の TS38X のみ 42.3N/mm<sup>2</sup> と他のデータに比べ小さい値になった。これは室内実験のデータであるが、再現性を含めて検討が必要である。これを除いた場合いずれの強度域においても ECM コンクリートの強度 ( $\sigma$ ) と結合材水比 (B/W) は線形関係にあることから、B/W- $\sigma$  関係式にて調合設計が可能であり、既存セメントの場合と同様である。また、生コン工場別の強度差は一般強度域で概ね 10N/mm<sup>2</sup> 程度、高強度域で概ね 5N/mm<sup>2</sup> 程度であった。

(b) 簡易断熱養生強度

一般強度域における全6工場での結合材水比 (B/W) と材齢 28 日の簡易断熱養生強度の関係を Fig.9 に、高強度域における 4 工場での結合材水比と材齢 28 日の簡易断熱養生強度の関係を Fig.10 に示す。いずれの強度域においても ECM コンクリートの結合材水比と強度は線形関係にある。また、生コン工場別の強度差は一般強

度域で概ね 15N/mm<sup>2</sup> 程度、高強度域で概ね 10N/mm<sup>2</sup> 程度であった。標準養生強度に比べ強度差が大きいのはコンクリート別の温度履歴が影響しているものと考えられる。

(c) コア強度

一般強度域の材齢とコア強度の関係を Fig.11 に示す。代表的なコアにおける中心部と端部から採取したコアの強度を材齢別で示したが、強度差は夏期では中心部<端部であり、標準期や冬期は中心部>端部の傾向にあった。これは硬化初期の履歴温度の差が影響しているものと考えられる。

材齢 91 日におけるコア中心部とコア端部の強度比較を Fig.12 に示す。中心部は端部に比べ平均すると 3~5N/mm<sup>2</sup> 圧縮強度が高い。

材齢 121~322 日におけるコア中心部とコア端部の強度比較を Fig. 13 に示す。この図において中心部と端部の強度差は解消しており、同等な結果となっている。初期の間は履歴温度が影響するが、長期材齢では潜在水硬性を含めコア端部で顕著に強度が増進するものと考えられる。

(d) 簡易断熱養生強度とコア強度の比較

簡易断熱養生とコア強度の比較を Fig.14 に示す。簡易断熱養生強度とコア強度の差はなく同等であり、既往の知見<sup>3)</sup>を再現する結果となった。

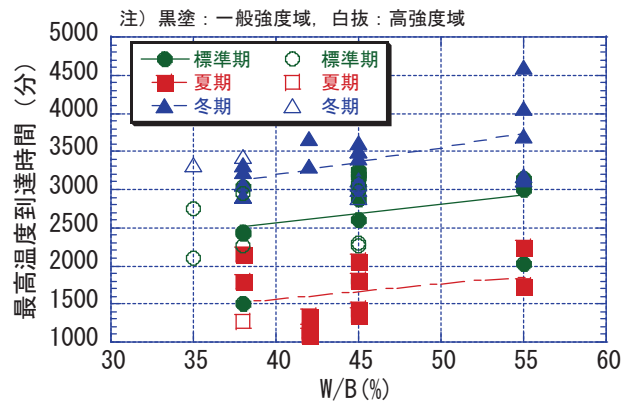


Fig.6 コンクリートの最高温度到達時間 (ECM-B)  
(Arrival Time at Highest Temperature of Concrete)

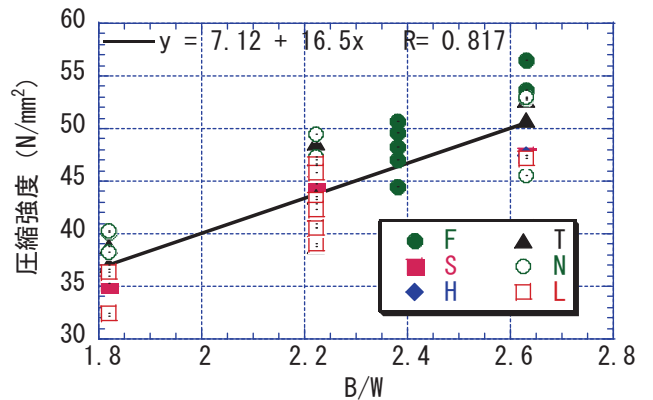


Fig.7 結合材水比と標準養生強度の関係 (一般強度域: ECM-B)  
(Relation between B/W and Strength under Standard Curing Condition: Normal Strength)

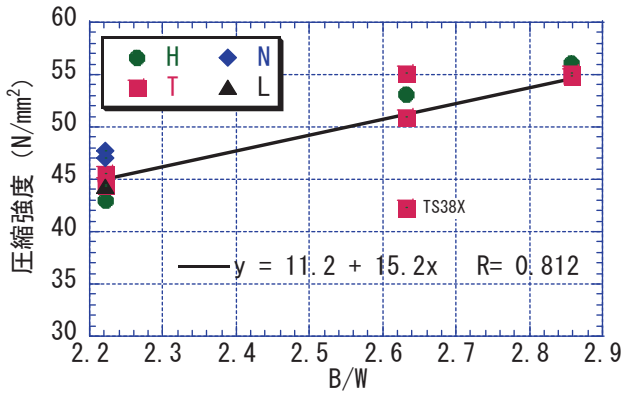


Fig.8 結合材水比と標準養生強度の関係 (高強度域: ECM-B)  
(Relation between B/W and Strength under Standard Curing Condition: High Strength)

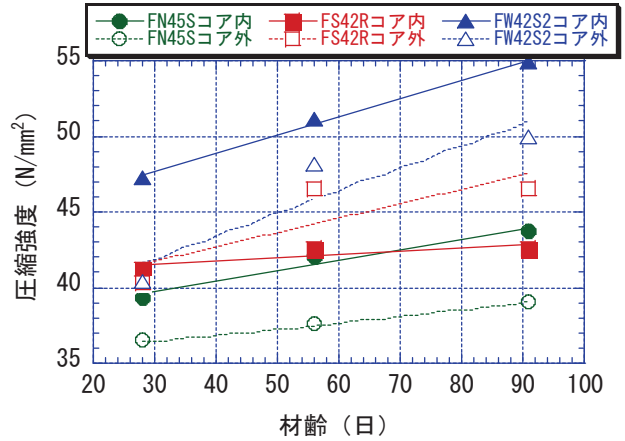


Fig.11 一般強度域の材齢とコア強度の関係: ECM-B  
(Compressive Strength of Cored Specimen)

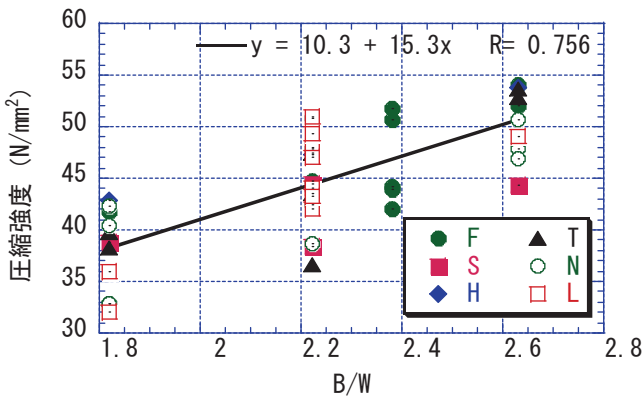


Fig.9 結合材水比と簡易断熱養生強度の関係  
(一般強度: ECM-B)

(Relation between B/W and Strength under Simple Heat Insulation Curing Condition: Normal Strength)

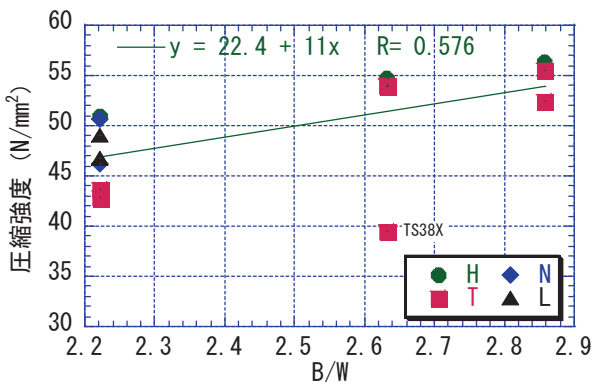


Fig.10 結合材水比と簡易断熱養生強度の関係  
(高強度域: ECM-B)

(Relation between B/W and Strength under Simple Heat Insulation Curing Condition: High Strength)

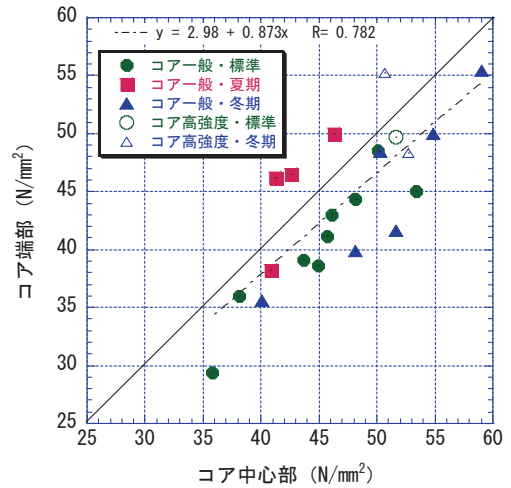


Fig.12 コア中心部と端部の強度比較 (材齢91日: ECM-B)  
(Strength Comparison of Cored Specimen from Surface and Inside of Concrete Member:91days)

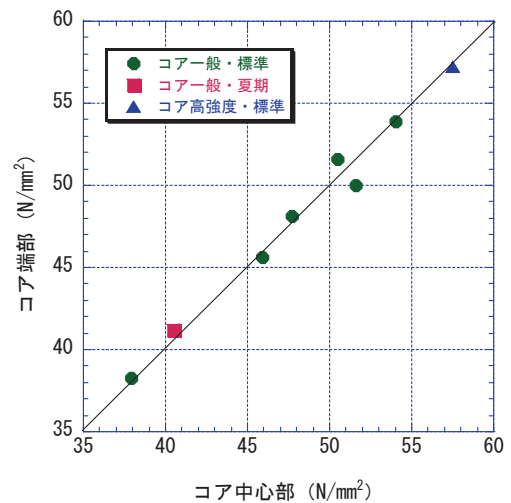


Fig.13 コア中心部と端部の強度比較 (材齢121~322日: ECM-B)  
(Strength Comparison of Cored Specimen from Surface and Inside of Concrete Member:121~322 days)

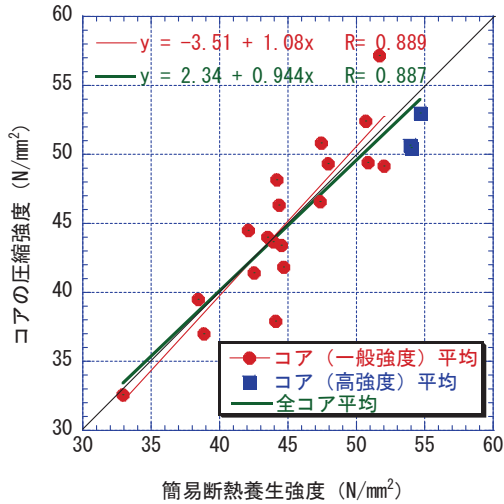


Fig.14 簡易断熱養生とコア強度の比較 (材齢 91 日: ECM-B)  
(Strength Comparison from Simple Heat Insulation Curing Condition Specimen and Cored Specimen)

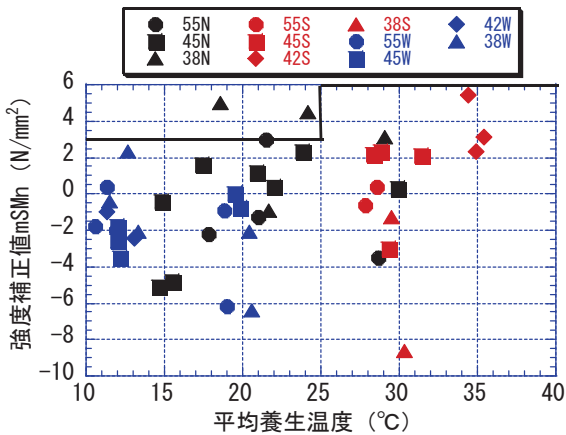


Fig.15 一般強度域の構造体強度補正値 ( $_{28}SM_{91}$ : ECM-B)  
(Standard Correction Values at Standard Strength Range)

(4) 構造体強度補正値 (mSMn) の提案

一般強度域の構造体強度補正値を Fig.15 に、高強度のものを Fig.16 に示す。一般強度域において水結合材比 38%と夏期を除き、mSMn (ここでは  $_{28}SM_{91}$ ) は 3N/mm<sup>2</sup>以下となり、38%と夏期は 6N/mm<sup>2</sup>以下となった。高強度域は概ね 3N/mm<sup>2</sup>以下となった。

これらの結果から強度補正値の標準値を Table 6 に示すとおり提案する。高強度域の夏期は 3N/mm<sup>2</sup>でも可能であるが、実績が少ないことと JASS 5-2015 と整合させて 6N/mm<sup>2</sup>とした。

また、長期材齢におけるコアの構造体強度補正値の分布を Fig.17 に示す。材齢 91 日より長期の材齢 (121~322 日) において構造体強度補正値 (mSMn) は全てマイナスとなった。マスコンクリートの大部分の用途は支保工の存置期間が関係しない基礎スラブや壁状構造物である。本コンクリートのように長期で強度が増進し、かつマスコンクリートで用いる場合は、JASS 5 で定められている構造体強度を保証する材齢 n 日は、材齢 91 日より長期、例えば 182 日のように延ばしたほうが構造体強度補正値 (mSMn) を小さくす

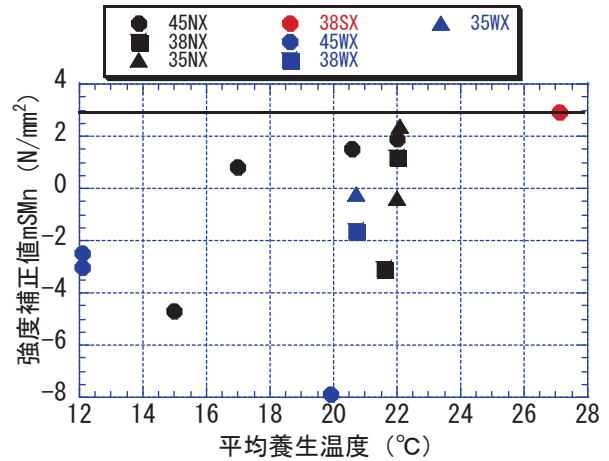


Fig.16 高強度域の構造体強度補正値 ( $_{28}SM_{91}$ : ECM-B)  
(Standard Correction Values at High Strength Range)

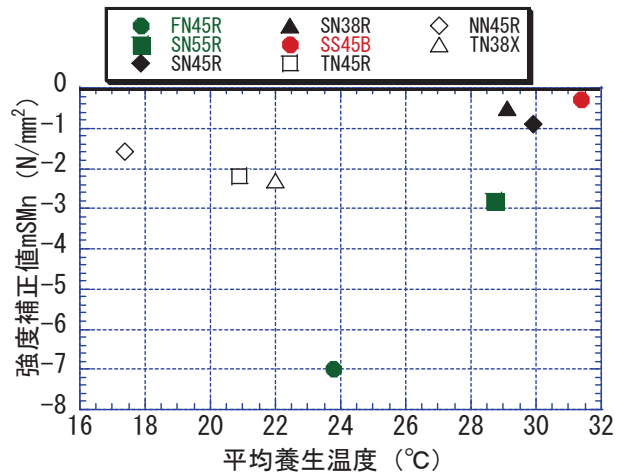


Fig.17 長期材齢の構造体強度補正値 ( $_{28}SM_{121\sim 322}$ : ECM-B)  
(Standard Correction Values of Long Aged Concrete)

ることができ合理的と言える。

Ⅲ. おわりに

本研究では高炉スラグ高含有セメント (ECM セメント) コンクリートにおいて構造体強度補正値 (mSMn) について実験的に検討し次の知見を得た。

①AE 減水剤の種類を適切に使い分けることで一般強度域及び高強度域の ECM コンクリートの構造体強度補正値 (mSMn) の標準値を、JASS 5-2015 に示される高炉セメント B 種の標準値と同等とすることができた。

②ECM コンクリートは材齢 91 日以降でも強度が増進し、長期材齢 (121~322 日) において mSMn は全てマイナスとなった。支保工の存置期間が関係しないマスコンクリートに用いるのであれば、構造体強度を保証する材齢 (n 日) を伸ばすことで mSMn の小さい合理的なコンクリートの選定が可能となる。

Table 6 構造体強度補正值 ( $_{28}SM_{91}$ : ECM-B) の標準値  
(Standard Correction Value of Concrete Strength)

| 区分        | 季節   | 調合管理強度(呼び強度) (N/mm <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |      |
|-----------|------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|
|           |      | 27                                | 30   | 33   | 36   | 39   | 40   |
| 想定W/B (%) |      | 52.5                              | 48.0 | 45.0 | 42.0 | 39.5 | 38.5 |
| 一般        | 標準・冬 | 3                                 | 3    | 3    | 3    | (3)  | —    |
|           | 夏    | 6                                 | 6    | 6    | 6    | (6)  | —    |
| 高強度       | 標準・冬 | —                                 | —    | —    | (3)  | 3    | 3    |
|           | 夏    | —                                 | —    | —    | (6)  | 6    | 6    |

注) ( ) 条件によって対応可能な範囲

## 参考文献

- 1) 閑田徹志ほか；高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの構造体強度に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，2013，pp.229-234.
- 2) 依田和久ほか；高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの構造体強度補正值の実験的検討，Vol.36，No.1，2014，pp.124-129.
- 3) 村上利憲ほか；高強度コンクリート性能評価・構造体コンクリート強度を確保するための標準的な水セメント比，GBRC，No.114，2013，pp.2-13.
- 4) 日本建築学会編；建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2015.

## 謝 辞

本研究は竹中工務店・竹本油脂との共同研究として実施した。実験を行うにあたり，各セメントメーカー及び生コン工場にお世話になりました。ここに誌面借りて謝意を表します。

## Experimental Estimation of Standard Correction Value of Concrete Strength in Structure with High Volume Blast Furnace Slag Cement

*Kazuhisa Yoda, Tetsushi Kanda, Jinhwan Jeon and Hideki Tanaka<sup>1)</sup>*

Portland cement production dominates a major part of CO<sub>2</sub> emission generated from construction materials and its reduction in terms of concrete is of particular significance. An efficient CO<sub>2</sub> reduction can be expected when mass concrete is used for underground constructions, with huge volume of concrete, by using appropriate technologies. As a technical solution, the authors have been developing an ECM concrete with a granulated blast furnace slag content as high as 65 percent for underground mass concrete constructions. In this paper, aiming at wider dissemination of massive ECM concrete, the standard correction values of concrete strength in structure (mSMn value), which is necessary for mix design, were verified for normal strength range (up to  $F_c=33\text{N/mm}^2$ ) and high strength range (larger than  $F_c=33\text{N/mm}^2$ ). In addition, it was also confirmed for a mix with a nominal strength up to 40 (approx.  $F_c=36\text{N/mm}^2$ ) that fresh properties of ECM concrete was equivalent to that of normal concrete and the correction values of concrete strength in structure mSMn was nearly equivalent to that of portland blast furnace slag cement type B specified in JASS 5.