

# シリカフェームプレミックスセメントを用いた超高強度コンクリートの基本特性

太平洋セメント (株) 正会員 ○前堀 伸平  
 太平洋セメント (株) 藤田 仁  
 太平洋セメント (株) 三谷 裕二  
 太平洋セメント (株) 谷村 充

## 1. はじめに

構造物の超高層化、軽量化・薄肉化、長スパン化が指向される中、コンクリートの高強度化技術が急速に進んでおり、最近では設計基準強度100N/mm<sup>2</sup>超級の超高強度コンクリートが実用化されている。PCの分野においても、PC技術協会より2008年10月に「高強度コンクリートを用いたPC構造物の設計施工規準」<sup>1)</sup>が発刊された。

超高強度コンクリート用のセメントに要求される性能は、長期にわたる超高強度発現性はもちろんのこと、超低水セメント比下で良好な流動性を有することなど、より高度化してきた。これまで低発熱系のポルトランドセメントが、その良好な流動性と長期強度発現性により設計基準強度80~90N/mm<sup>2</sup>程度までの高強度コンクリートに実用されてきたが、これを上回る超高強度領域では、シリカフェームの使用が効果的である。

本稿では、シリカフェームプレミックスセメント (SFPC) を用い、生コン工場で実機製造した超高強度コンクリートのフレッシュ性状、強度性状に関する性能評価試験の結果を示す。また、膨張材を超高強度コンクリートに用いた場合の自己収縮の制御効果について検討を加える。

## 2. SFPCを用いた超高強度コンクリートの基本性状

### 2.1 使用材料, 配合および練混ぜ方法

表-1に使用材料, 表-2にコンクリートの配合を示す。生コン工場での実機試験を3工場 (A, B, C社), 3シーズン (標準期, 夏期, 冬期) で実施した。また、コンクリートの練混ぜはモルタルを先行して練り混ぜる方法とした。練混ぜ時間は、目視およびミキサの負荷電流によるスランプモニターを参考にして設定した。表-3に工場ごとの練混ぜ時間を示す。

表-1 使用材料

| 工場 | 記号       | 生産者, 産地, 物理的特性等   |
|----|----------|---|
| 共通 | セメント     | C シリカフェームプレミックスセメント, 密度:3.07g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:6190cm <sup>2</sup> /g |
| A  | 細骨材      | S1 市原産山砂 (密度:2.58g/cm <sup>3</sup> )  |
|    |          | S2 鳥形産石灰砕砂 (密度:2.62g/cm <sup>3</sup> )                                      |
|    | 粗骨材      | G 大月市産安山岩砕石 (密度:2.64g/cm <sup>3</sup> )                                     |
|    | 高性能AE減水剤 | SP1 ポリカルボン酸系  |
|    | 高性能AE減水剤 | SP2 ポリカルボン酸系  |
|    | 高性能減水剤   | SP3 ポリカルボン酸系, 超高強度コンクリート用   |
| B  | 細骨材      | S 市原万田野産山砂 (密度:2.59g/cm <sup>3</sup> )                                      |
|    | 粗骨材      | G 両神産硬質砂岩 (密度:2.70g/cm <sup>3</sup> )                                       |
|    | 高性能AE減水剤 | SP1 ポリカルボン酸系  |
|    | 高性能減水剤   | SP2 ポリカルボン酸系, 超高強度コンクリート用   |
| C  | 細骨材      | S1 千葉県富津市産山砂 (密度:2.59g/cm <sup>3</sup> )                                    |
|    |          | S2 西多摩郡産石灰砕砂 (密度:2.62g/cm <sup>3</sup> )                                    |
|    | 粗骨材      | G 青梅市産砕石 (2.66g/cm <sup>3</sup> )   |
|    | 高性能減水剤   | SP3 ポリカルボン酸系, 超高強度コンクリート用   |
|    |          |   |

表-2 コンクリートの配合

| 工場 | W/C (%) | s/a (%) | 単位粗骨材かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) | 単体量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |     | 目標スランプフロー (cm) | 目標空気量 (%) |
|----|---------|---------|---|--------------------------|------|-----|-----|----------------|-----------|
|    |         |         |   | W                        | C    | S   | G   |                |           |
| A  | 13.0    | 28.8    | 0.52  | 155                      | 1193 | 328 | 824 | 70±7.5         | 2.0±1.5   |
|    | 16.5    | 37.7    | 0.54  |                          | 940  | 510 | 856 | 70±7.5         |           |
|    | 20.0    | 43.5    | 0.54  |                          | 775  | 650 | 856 | 65±7.5         |           |
|    | 23.5    | 47.0    | 0.54  |                          | 660  | 746 | 856 | 65±7.5         |           |
|    | 27.0    | 48.3    | 0.55  |                          | 574  | 804 | 872 | 60±7.5         |           |
| B  | 13.0    | 27.4    | 0.53  | 155                      | 1192 | 311 | 859 | 70±7.5         | 2.0±1.5   |
|    | 16.5    | 38.8    |   |                          | 939  | 523 |     | 70±7.5         |           |
|    | 20.0    | 44.5    |   |                          | 775  | 660 |     | 65±7.5         |           |
|    | 23.5    | 48.0    |   |                          | 660  | 759 |     | 60±7.5         |           |
|    | 27.0    | 50.2    |   |                          | 574  | 831 |     | 60±7.5         |           |
| C  | 13.0    | 26.7    | 0.535                                       | 155                      | 1192 | 304 | 855 | 70±10          | 2.0±1.5   |
|    | 17.0    | 39.2    |   |                          | 912  | 540 |     | 70±10          |           |
|    | 20.0    | 43.9    |   |                          | 775  | 655 |     | 65±10          |           |
|    | 25.0    | 48.5    |   |                          | 620  | 786 |     | 60±10          |           |

表-3 練混ぜ時間

| 工場                  | A         |      |      |      |      | B    |      |      |      |      | C    |      |      |      |      |
|---------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                     | W/C       | 13.0 | 16.5 | 20.0 | 23.5 | 27.0 | 13.0 | 16.5 | 20.0 | 23.5 | 27.0 | 13.0 | 17.0 | 20.0 | 25.0 |
| W/C=13%の配合について      | 練混ぜ時間 (秒) | 180  | 90   | 60   | 60   | 60   | 300  | 150  | 120  | 90   | 60   | 150  | 90   | 60   | 60   |
|                     | コンクリート    | 90   | 90   | 60   | 60   | 60   | 180  | 150  | 120  | 120  | 90   | 180  | 120  | 120  | 60   |
| *) C工場:空練り(C+S):10秒 |           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

ぜ時間の設定が異なっていたが、最長でも 300 秒間練り混ぜることにより、十分に一体化したコンクリートが得られた。

### 2.2 試験項目および試験方法

コンクリートのフレッシュ性状は、スランプフロー、50cm フロー到達時間および空気量試験を実施した。W/C=20%の配合については 120 分まで経時変化を測定した。

高強度コンクリートは結合材量が多く、断面の大きい部材に打ち込んだ場合には、水和熱に起因する初期の高温履歴を受け、構造体内のコンクリートの圧縮強度が供試体の圧縮強度より低下する場合があります<sup>2)</sup>。この影響を考慮して配合設計を行う必要がある<sup>2)</sup>。そこで強度性状については、標準水中養生供試体のほかに、構造体内の圧縮強度性状を把握する観点より、簡易断熱養生供試体および模擬柱部材から採取したコア供試体について圧縮強度試験 (JIS A 1108) を実施した<sup>3)</sup>。

図-1 に模擬柱部材の形状・寸法およびコア採取位置、図-2 に簡易断熱養生の方法を示す。

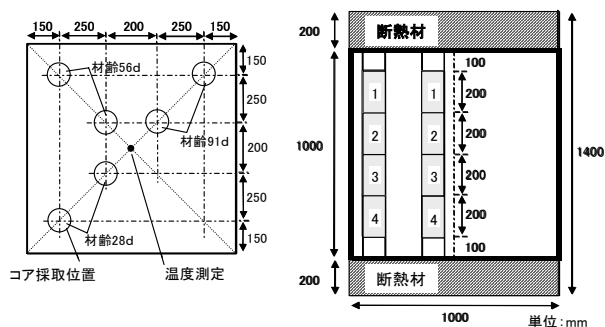


図-1 模擬柱部材の形状・寸法およびコア採取位置

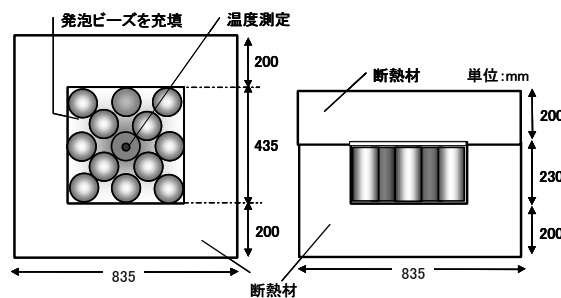


図-2 簡易断熱養生の方法

### 2.3 フレッシュコンクリートの性状

今回の実機製造では、スランプフロー、空気量はいずれも目標値を満足する結果が得られた。図-3 に各種供試体を作製した時点 (練り上がり直後から A 工場 : 45 分, B 工場 : 30 分, C 工場 : 5 分) におけるスランプフローと 50cm フロー到達時間の関係を示す。同一スランプフローにおける 50cm フロー到達時間は W/C が低くなるほどより長くなる傾向にあり、粘性を一定のレベルに保つ上において、W/C が低いほどスランプフローを大きく設定することの妥当性が確認できる。

図-4 に W/C=20% におけるスランプフローおよび 50cm フロー到達時間の経時変化特性を示す。いずれの工場も経過時間 120 分まではほぼ一定値で推移しており、良好なフレッシュコンクリートの保持特性を有している。

なお、全般的な傾向として、SFPC は汎用的な高性能 (AE) 減水剤 (SP1, SP2) によって、従来よりも W/C の低い領域まで製造できる傾向にあり、また、超高強度用の高性能減水剤を用いている配合を含め、大幅な混和剤使用量の増加を伴うことなく、良好なスランプフローを得ることができた。これは、SFPC が低発熱系のセメントと比表面積の小さいシリカフュームを基材として製造されたプレミックスセメントであるためと思われる。

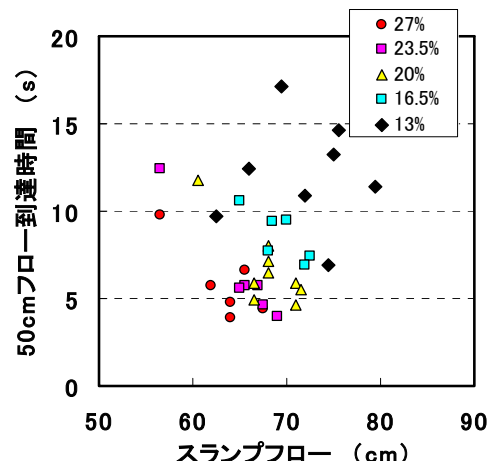


図-3 スランプフローと 50cm フロー到達時間の関係

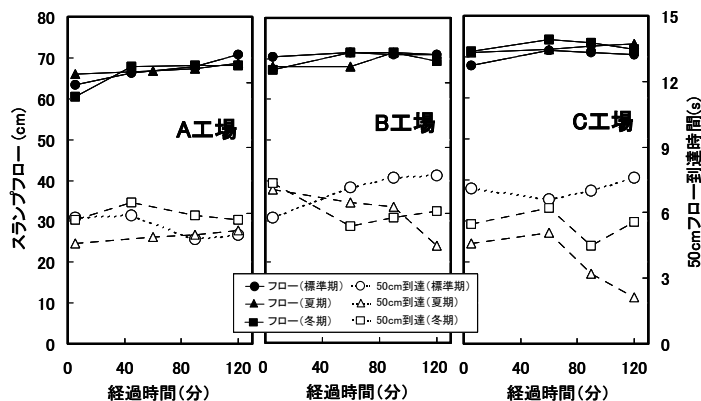


図-4 スランプフローと 50cm フロー到達時間の経時変化 (W/C=20%)

2.4 強度発現特性

図-5に C/W と材齢 28 日標準養生強度および材齢 91 日コア強度の関係を示す。SFPC を用いたコンクリートは高温履歴を受ける場合も良好な長期強度発現性を有し、W/C=13%においても強度が頭打ちになる現象は認められず、150N/mm<sup>2</sup>を超える圧縮強度が得られている。

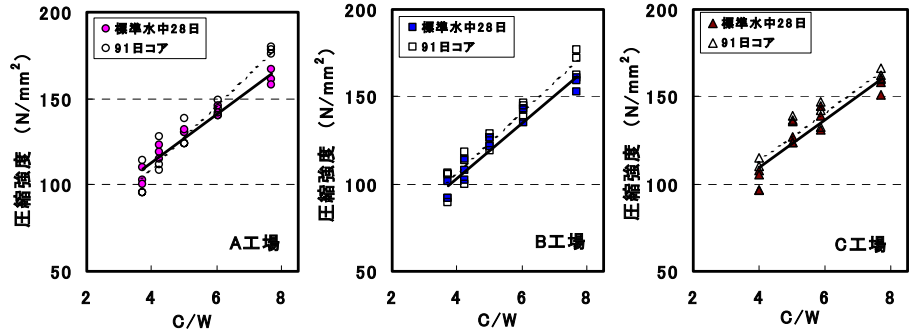


図-5 C/W と圧縮強度の関係

図-6に材齢 91 日における断熱養生強度とコア強度の関係を示す。両者の関係は概ね 1:1 の線上にあり、配合設計や強度管理において、簡易断熱養生強度を活用できる可能性がある。

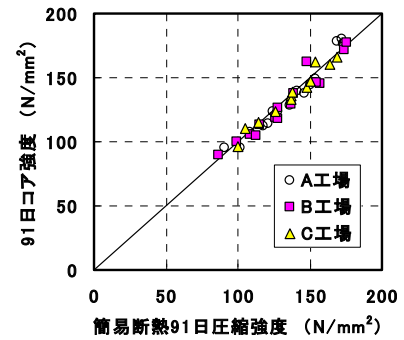


図-6 簡易断熱養生とコア強度の関係

3. 超高強度コンクリートの自己収縮制御における膨張材の適用性

3.1 試験概要

水結合材比が極端に小さいコンクリートでは自己収縮の影響が無視し得なくなるため、その制御対策を併せて検討しておく必要性が高い。膨張材が高強度コンクリートの自己収縮補償に効果的なことは既に知られているが、水結合材比が 20% よりも小さい領域の超高強度コンクリートへの適用性については、十分な知見がないのが現状である。

試験に用いた使用材料およびコンクリートの配合を表-4 および表-5 に示す。膨張材は比表面積の異なる 2 種類を用い、使用量を 20kg/m<sup>3</sup>

(普通強度コンクリートの標準使用量) ~40kg/m<sup>3</sup> に変化させた。コンクリートのフレッシュ性状は、スランプフロー：65±10cm、空気量：2% 以下とした。試験項目は、自己収縮ひずみ(寸法：100×100×400mm、測定方法：測温機能付き埋込み型ひずみ計)、および圧縮強度(φ100×200mm)とした。養生条件は 20°C 封緘養生とした。なお、自己収縮ひずみは、コンクリートの線膨張係数を 10 × 10<sup>-6</sup>/°C と仮定して温度ひずみの補正を行い求めた。

表-4 使用材料

| 材料                | 記号    | 種類/物性   |
|-------------------|-------|---|
| シリカフェウムプレミックスセメント | SFPC  | 密度3.07g/cm <sup>3</sup> 、比表面積6160cm <sup>2</sup> /g     |
| 膨張材               | EX I  | 石灰系、密度3.16g/cm <sup>3</sup> 、比表面積3280cm <sup>2</sup> /g |
|                   | EX II | 石灰系、密度3.19g/cm <sup>3</sup> 、比表面積4920cm <sup>2</sup> /g |
| 粗骨材               | G     | 桜川産砕石2005、密度2.64g/cm <sup>3</sup> 、吸水率0.67%、F.M.6.74    |
| 細骨材               | S     | 掛川産山砂、密度2.61g/cm <sup>3</sup> 、吸水率1.66%、F.M.2.88        |
| 混和剤               | SP    | ポリカルボン酸系高性能減水剤  |

表-5 コンクリートの配合

| 記号       | W/(SFPC+EX) (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |      |       |     | SP/(SFPC+EX) (%) |      |
|----------|-----------------|--------------------------|------|------|-------|-----|------------------|------|
|          |                 | W                        | SFPC | EX I | EX II | S   |                  | G    |
| PL       | 16.5            | 155                      | 939  | -    | -     | 524 | 840              | 0.80 |
| EX I-20  |                 |                          | 919  | 20   | -     | 525 |                  | 0.85 |
| EX I-40  |                 |                          | 899  | 40   | -     | 525 |                  | 0.90 |
| EX II-20 |                 |                          | 919  | -    | 20    | 525 |                  | 0.85 |
| EX II-30 |                 |                          | 909  | -    | 30    | 525 |                  | 0.90 |
| EX II-40 |                 |                          | 899  | -    | 40    | 526 |                  | 0.95 |

表-6 フレッシュ性状および凝結特性

| 記号       | フレッシュ性状 |      |      | 凝結(h-m) |            |
|----------|---------|------|------|---------|------------|
|          | スランプフロー | 空気量  | Temp | 始発      | 終結         |
|          | (cm)    | (%)  | (°C) |         |            |
| PL       | 69.0    | 10.6 | 1.0  | 23.0    | 9-05 11-30 |
| EX I-20  | 61.0    | 17.5 | 1.4  | 22.5    | 6-50 9-00  |
| EX I-40  | 74.0    | 12.2 | 1.1  | 22.3    | 6-40 8-55  |
| EX II-20 | 59.5    | 17.2 | 1.6  | 24.5    | 7-00 9-05  |
| EX II-30 | 66.0    | 11.7 | 1.0  | 24.5    | 6-20 8-15  |
| EX II-40 | 73.5    | 11.3 | 1.3  | 24.0    | 6-50 8-45  |

3.2 フレッシュ性状・凝結特性

表-6にフレッシュコンクリートおよび凝結時間の試験結果を示す。目標スランプフローを満足するための高性能減水剤の添加量は、膨張材の添加により若干増加する傾向にあった。凝結時間は、膨張材の種類および添加

量に関係なく、膨張材の添加により2時間程度早くなる傾向が認められた。

### 3.3 自己収縮制御に及ぼす膨張材の効果

自己収縮・膨張ひずみの測定結果を図-7に示す。PLの自己収縮は、材齢440日で約 $430 \times 10^{-6}$ に達した。一方、膨張材の使用により、 $20 \text{ kg/m}^3$ 添加：約 $30 \times 10^{-6}$ 、 $40 \text{ kg/m}^3$ 添加：約 $330 \times 10^{-6}$ の膨張を生じており、明らかな自己収縮補償効果が発揮された。材齢440日の時点では、 $20 \text{ kg/m}^3$ 添加：約 $200 \times 10^{-6}$ の自己収縮ひずみに止まり、 $40 \text{ kg/m}^3$ 添加：約 $200 \times 10^{-6}$ の膨張ひずみが残留しており、収縮に転じてからのひずみの勾配は膨張材の使用量が多いほど幾らか緩やかになる傾向が認められた。

なお、PLの自己収縮ひずみは、普通セメントを用いた $W/C=30\%$ 程度の高強度コンクリート(圧縮強度 $80 \text{ N/mm}^2$ 級)と同程度の大きさであり、 $W/B=16.5\%$ の結果としては小さいレベルに止まっている。

### 3.4 膨張材の種類による影響

膨張材EX Iを用いたコンクリートの自己収縮・膨張ひずみをEX IIの場合と比較すると、EX Iの $20 \text{ kg/m}^3$ 添加は、EX II-20と同等の膨張・収縮性状を示した。その反面、EX I-40は、材齢35日頃から再び大きな膨張(以下、再膨張)を生じており、EX IIとはひずみの発現傾向が明らかに異なった。再膨張の生じる原因の究明は今後の課題であるが、超高強度コンクリートに特有の現象であることから、水和に必要な水が不足し、未水和の膨張材が残存していることが関係しているものと思われる。

封緘養生供試体の圧縮強度の試験結果を図-8に示す。EX I-40は再膨張を生じた材齢28日と91日の間で強度の低下が認められ、材齢440日では大幅な強度低下を生じた。その反面、EX IIの圧縮強度は $40 \text{ kg/m}^3$ 添加でもPLと遜色なく、今後も再膨張を生じる可能性は低いと考えられる。

## 4. まとめ

SFPCを用いた超高強度コンクリートの各種試験より、以下の知見が得られた。

- (1)  $W/C=27\sim13\%$ の範囲において、いずれも良好な流動性および経時保持性を有するコンクリートの製造が可能であった。
- (2) 設計基準強度 $100\sim120 \text{ N/mm}^2$ 級はもとより、さらに高い強度レベルの超高強度コンクリートへの適用の可能性が確認された。
- (3) 超高強度コンクリートの自己収縮制御には、比表面積を高めた膨張材の適用性が高いことが示された。

### 参考文献

- 1) PC技術協会：高強度コンクリートを用いたPC構造物の設計施工規準，2008.10
- 2) 土木学会：2007年度制定コンクリート標準示方書[施工編]，PP.278-281，2007.12
- 3) 日本建築学会：高強度コンクリートの施工指針(案)・同解説，2005

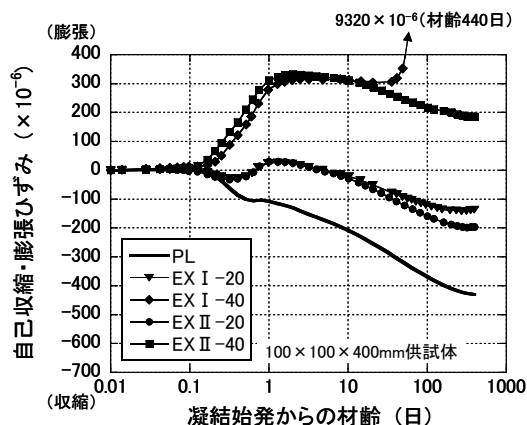


図-7 自己収縮・膨張ひずみ

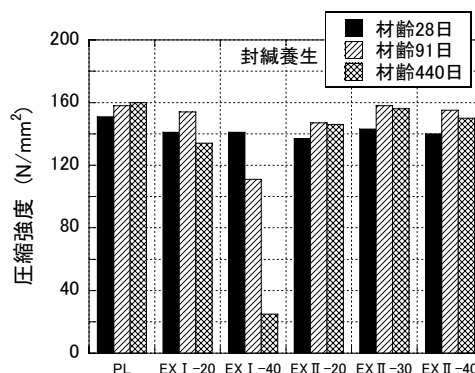


図-8 圧縮強度の試験結果