

超高強度コンクリートの実用化に関する研究

Study on Practical Application of High-strength Concrete

蓮尾 孝一 KOICHI HASUO
 西本 好克 YOSHIKATSU NISHIMOTO
 松田 拓 TAKU MATSUDA
 建築技術部 小川 学 MANABU OGAWA
 建築技術部 米倉 宏行 HIROYUKI YOMEKURA

Fc60～120N/mm²の超高強度コンクリートを対象とした実プラントによる実機試験および施工実験を行い、施工条件がフレッシュ性状や強度発現に与える影響に関して検討した。その結果、結合材水比 5.56 以上の領域では圧縮強度の増加が鈍くなること、コア強度 120N/mm²または積算温度(M0)1500D・D 以上では、コア強度が標準養生強度を上回ることを把握した。

キーワード：高強度コンクリート、構造体コンクリート強度、施工性、シリカフェーム

The authors conducted experiments on construction using Ready-Mixed Concrete, and discussed the effects of execution condition on workability and development of compressive strength for ultra-high-strength concrete. The main results are as follows:

- (1) In high binder-water ratio, development of compressive strength are decreased.
- (2) In some case, the strength concrete in structures is higher than the strength in standard curing.

Key Words: High-strength concrete, Strength of concrete in structures, Workability, Silica fume

1. はじめに

建物の高層化や結合材、混和材料に関する新しい材料の開発により、鉄筋コンクリートや鋼管コンクリート構造の建物を主として設計基準強度 (Fc) が 60N/mm² 級の高強度コンクリートが適用されている。これらの高強度コンクリートは JIS A 5308 「レディーミクストコンクリート」規格外に相当するため、国土交通大臣の材料認定を取得し使用されている。これまで Fc70N/mm² 級までの高強度コンクリートについて、構造体コンクリート強度の調査設計手法を確立し、材料認定を取得して実施工を重ねてきた。

一方最近では、40階を越えるような高層 RC 建築が実用化されコンクリート強度も Fc100N/mm² やそれ以上の超高強度コンクリートへの要求が増している。これらの背景から、本論では Fc60～120N/mm² の超高強度コンクリートを対象とした実プラントによる実機試験および施工実験を行い、使用材料、調合、施工時期がフレッシュコンクリートの性状や強度発現に与える影響に関して検討した。

2. 実機練り試験

(1) 目的

高強度コンクリートでは、構造体コンクリート強度と標準養生強度との差を強度補正值 (S 値) として調査設計に考慮している¹⁾。この強度差は高強度コンクリートでは単位結合材量が多く、水和発熱により部材が高温履歴を経験するため生じると考えられている。S 値は、結合材の種類や水結合材比、部材寸法、施工時期等によって異なるため、簡易断熱供試体や実際の部材を想定したモデル試験体からのコア供試体により構造体強度を確認する必要がある。既報²⁾では普通ポルトランドセメントおよび高ビーライト系セメントを用いた Fc70N/mm² までの高強度コンクリートについて、部材コンクリート最高温度を推定し、これから強度補正值を求める方法を示した。一方 Fc100N/mm² やそれ以上の超高強度コンクリートでは、水和発熱の抑制や施工性の面からシリカフェームを添加したセメントが有効である。本論では、プレミックスタイプのシリカフェームセメントおよび高ビーライト系セメントを用いたコンクリートをレディミクス

表-1 使用材料

| 材料 | 種類 | 仕様 | 産地,他 |
|-----|------------------------|---|---------------|
| 細骨材 | 山砂 | 表乾密度:2.59(g/cm ³) 吸水率:2.28% 粗粒率:2.60 | 千葉県市川市 万田野 |
| 粗骨材 | 硬質砂岩 碎石2005 | 表乾密度:2.71(g/cm ³) 吸水率:0.56% 粗粒率:6.61 | 埼玉県秩父郡 両神 |
| 混和剤 | 高性能AE減水剤(H) | ポリカルボン酸系 | JIS A 6204 |
| | 高性能AE減水剤 (TH1, TH2) | ポリカルボン酸系 | New RC基準 |

表-2 結合材の品質

| 結合材 | 物性 | | 化学組成(%) | | | | |
|------|----------------------------|------------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|---|
| | 密度 (g/cm ³) | 比表面積 (cm ² /g) | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF | |
| セメント | 高ビーライト系セメント(HF) | 3.20 | 4100 | 34 | 47 | 3 | 8 |
| | シリカフェュームセメント(SFC)* | 3.22 | 3500 | 32 | 48 | 4 | 9 |
| 混和材 | シリカフェューム | 2.23 | 160000 | - | - | - | - |

*:SFCの化学組成はHFセメントのものを示す。

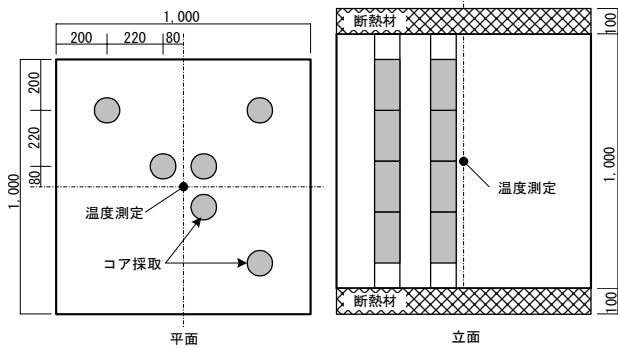


図-1 模擬柱部材

トコンクリートプラント実機で製造し、フレッシュコンクリート性状とその経時変化、標準養生強度および構造体コンクリート強度と構造体の温度履歴を把握した。

(2) 実験概要

本実験に使用した材料を表-1に、また結合材の品質を表-2に示す。シリカフェュームセメント(SFC)は、製造工場ですべて低熱ポルトランドセメントにシリカフェューム(JIS A 6207適合品)を内割りで10%(質量比)混合したものである。また JIS R 5210 中の中庸熱ポルトランドセメント規格に適合する高ビーライト系セメント(HF)も用いた。化学混和剤は JIS A 6204 に適合する高性能 AE 減水剤(H)、および New RC 基準「高強度コンクリート用高性能 AE 減水剤の品質基準(案)」に適合する減水剤(TH-1,TH-2)を用いた。

コンクリートの調査を表-3に示す。HF シリーズは Fc60~80N/mm²を想定して W/B=24~32%(B/W=4.17~3.13)、単位水量165kg/m³で3種類、SFCシリーズでは Fc80~120N/mm²を想定して W/B=14~26%(B/W=7.14~3.85)、単位水量145~155kg/m³で4種類の計7種類のコンクリートを製造した。目標スランブフローは、HF28,32が60cm、その他のコンクリートは65cm、目標空気量は2.0%である。

実験は季節要因を考慮して、夏期(8月)、標準期(10月)および冬期(1月)の3回実施した。練混ぜは、強制二軸練りミキサ(容量5m³)を用いて、HF24,SFC18は2m³/バッチ×2=4m³、その他は3m³/バッチ×1=3m³製造した。練混ぜ時間(モルタル+コンクリート)はHF28,32で60+90秒、HF26,SFC26で90+120秒、

表-3 コンクリートの調査

| No. | 結合材 | W/B (%) | B/W | S/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | 混和剤 | |
|-------|-----|---------|------|---------|-------------------------|------|-----|-----|-----|----------|
| | | | | | 水 | 結合材 | 細骨材 | 粗骨材 | 種類 | 添加率(C×%) |
| HF24 | HF | 24 | 4.17 | 45.0 | 165 | 688 | 699 | 891 | TH1 | 1.2~1.7 |
| HF28 | HF | 28 | 3.57 | 47.7 | 165 | 589 | 780 | 891 | H | 1.1~1.5 |
| HF32 | HF | 32 | 3.13 | 48.7 | 165 | 516 | 811 | 891 | H | 1.1~1.4 |
| SFC14 | SFC | 14 | 7.14 | 35.0 | 145 | 1036 | 453 | 875 | TH2 | 2.2~2.75 |
| SFC18 | SFC | 18 | 5.56 | 43.5 | 145 | 806 | 645 | 875 | TH2 | 1.8~2.4 |
| SFC22 | SFC | 22 | 4.55 | 46.8 | 150 | 682 | 738 | 875 | TH1 | 1.7~2.2 |
| SFC26 | SFC | 26 | 3.85 | 48.7 | 155 | 596 | 795 | 875 | TH1 | 1.6~1.9 |

表-4 フレッシュコンクリート

| 時期 | No | 時間 (min) | スランブフロー (cm) | 70-時間(sec) | | 空気量 (%) | コンクリート 温度 |
|-------|-------|-------------|-----------------|------------|-------|------------|--------------|
| | | | | 50cm | 停止 | | |
| 夏期 | HF24 | 0 | 46.0 × 43.5 | - | 31.7 | 1.6 | 33.0 |
| | | 30 | 74.0 × 73.5 | 8.7 | 92.3 | 1.3 | 33.0 |
| | | 60 | 73.5 × 74.0 | 8.7 | 82.3 | 1.3 | 34.0 |
| | | 90 | 66.5 × 67.0 | 11.1 | 102.4 | 1.2 | 34.0 |
| | | 120 | 62.5 × 62.0 | 12.6 | 90.1 | 1.5 | 34.0 |
| | HF28 | 0 | 59.0 × 53.0 | 8.2 | 37.7 | 0.9 | 30.0 |
| | | 30 | 68.5 × 66.0 | 8.1 | 58.0 | 1.3 | 32.0 |
| | | 60 | 51.5 × 50.5 | 5.7 | 22.4 | 1.4 | 31.0 |
| | HF32 | 0 | 67.5 × 67.0 | 6.0 | 42.1 | 1.2 | 33.0 |
| | | 30 | 61.0 × 60.0 | 22.0 | 116.6 | 3.4 | 34.0 |
| | SFC14 | 0 | 65.0 × 62.5 | 19.7 | 114.9 | 3.3 | 34.0 |
| | | 30 | 73.0 × 73.5 | 10.1 | 144.5 | 2.5 | 32.0 |
| 60 | | 73.5 × 70.5 | 8.3 | 87.7 | 3.0 | 34.0 | |
| SFC18 | 0 | 72.0 × 73.5 | 10.4 | 129.1 | 2.8 | 34.0 | |
| | 30 | 73.0 × 71.5 | 10.8 | 137.7 | 2.7 | 34.0 | |
| | 60 | 58.5 × 58.0 | 15.4 | 63.9 | 1.6 | 33.0 | |
| SFC22 | 0 | 65.0 × 63.5 | 13.7 | 97.4 | 2.8 | 33.0 | |
| | 30 | 55.5 × 54.0 | 13.4 | 41.2 | 2.8 | 32.5 | |
| SFC26 | 0 | 58.5 × 57.5 | 14.8 | 72.1 | 2.8 | 32.5 | |
| | 30 | 53.0 × 52.0 | 10.3 | 26.9 | 2.0 | 28.0 | |
| 標準期 | HF24 | 0 | 69.0 × 67.0 | 6.5 | 62.3 | 2.3 | 28.0 |
| | | 30 | 67.5 × 67.0 | 7.2 | 72.3 | 2.3 | 28.5 |
| | | 60 | 62.0 × 59.5 | 9.5 | 54.9 | 2.2 | 28.0 |
| | | 90 | 49.0 × 45.0 | - | 21.7 | 2.3 | 28.5 |
| | | 120 | 63.0 × 61.0 | 5.9 | 29.7 | 1.3 | 26.0 |
| | HF28 | 0 | 70.0 × 68.0 | 5.5 | 51.1 | 1.3 | 27.0 |
| | | 30 | 73.0 × 68.5 | 4.8 | 65.7 | 1.6 | 27.0 |
| | | 60 | 64.0 × 63.0 | 5.5 | 38.9 | 1.5 | 26.0 |
| | HF32 | 0 | 58.0 × 57.5 | 5.3 | 22.8 | 0.8 | 26.0 |
| | | 30 | 64.5 × 60.0 | 5.9 | 55.6 | 1.2 | 26.0 |
| | | 60 | 63.0 × 60.5 | 5.6 | 44.1 | 1.1 | 26.0 |
| | SFC14 | 0 | 65.0 × 63.5 | 14.5 | 87.5 | 1.6 | 30.0 |
| 30 | | 65.5 × 65.0 | 13.6 | 144.1 | 2.0 | 30.0 | |
| 60 | | 70.0 × 68.0 | 6.1 | 84.6 | 1.5 | 27.0 | |
| SFC18 | 0 | 70.0 × 69.0 | 7.0 | 109.3 | 1.7 | 28.0 | |
| | 30 | 70.5 × 70.5 | 10.2 | 94.8 | 1.6 | 28.5 | |
| | 60 | 69.0 × 70.0 | 6.7 | 127.3 | 1.2 | 28.0 | |
| SFC22 | 0 | 66.0 × 66.5 | 5.0 | 52.5 | 2.8 | 28.0 | |
| | 30 | 67.0 × 64.5 | 6.2 | 75.2 | 3.2 | 27.0 | |
| SFC26 | 0 | 58.5 × 58.5 | 4.6 | 26.0 | 3.4 | 26.0 | |
| | 30 | 62.5 × 59.5 | 3.7 | 33.0 | 2.5 | 26.5 | |
| 冬期 | HF24 | 0 | 72.0 × 70.5 | 5.3 | 49.0 | 1.6 | 13.0 |
| | | 30 | 70.5 × 68.5 | 5.2 | 72.6 | 1.6 | 13.0 |
| | | 60 | 67.0 × 66.5 | 6.5 | 46.5 | 1.7 | 14.0 |
| | | 90 | 65.0 × 63.0 | 7.0 | 43.1 | 1.6 | 14.0 |
| | | 120 | 56.5 × 56.0 | 8.6 | 38.2 | 1.8 | 15.0 |
| | HF28 | 0 | 60.0 × 58.0 | 5.8 | 28.0 | 1.6 | 12.0 |
| | | 30 | 56.0 × 55.0 | 7.8 | 30.7 | 2.0 | 13.0 |
| | | 60 | 66.0 × 66.0 | 4.3 | 34.3 | 1.2 | 11.5 |
| | HF32 | 0 | 63.0 × 61.5 | 5.6 | 35.2 | 2.0 | 12.0 |
| | | 30 | 66.0 × 65.0 | 16.3 | 82.4 | 1.8 | 18.0 |
| | | 60 | 71.0 × 71.5 | 12.5 | 170.2 | 1.7 | 17.0 |
| | SFC14 | 0 | 70.0 × 68.0 | 11.3 | 178.2 | 2.0 | 18.0 |
| 30 | | 68.5 × 67.5 | 15.0 | 170.6 | 1.9 | 18.0 | |
| 60 | | 70.5 × 70.0 | 13.7 | 160.2 | 2.1 | 16.0 | |
| 120 | | 71.0 × 70.0 | 7.4 | 64.7 | 1.6 | 14.0 | |
| SFC18 | 0 | 72.0 × 73.0 | 7.5 | 80.2 | 2.1 | 15.0 | |
| | 30 | 73.0 × 74.0 | 5.4 | 84.3 | 1.8 | 14.5 | |
| | 60 | 77.5 × 75.5 | 7.1 | 110.4 | 1.7 | 15.0 | |
| | 120 | 78.0 × 77.0 | 6.0 | 175.4 | 1.8 | 15.0 | |
| SFC22 | 0 | 64.0 × 62.0 | 7.8 | 58.2 | 1.7 | 13.0 | |
| | 30 | 66.0 × 66.0 | 8.2 | 71.3 | 1.9 | 15.0 | |
| SFC26 | 0 | 66.0 × 65.0 | 3.6 | 36.1 | 2.7 | 12.0 | |
| | 30 | 69.5 × 69.0 | 4.3 | 43.9 | 1.9 | 14.0 | |

SFC22で150+120秒，SFC18で180+180秒，SFC14で300+180秒である。練混ぜ終了直後，および30分後にフレッシュコンクリート試験を実施した。

HF24,SFC18 は各季節共に，練混ぜ後90～120分までフレッシュコンクリートの経時変化を確認した。

構造体コンクリートの温度および圧縮強度は，図-1に示す模擬柱部材を作製し確認した。模擬柱部材には実際の柱部材の熱的条件を考慮し，部材上下面からの放熱を防ぐため断熱材（厚さ100mm）を取り付けている。部材温度は，試験体中心に設けた熱電対により測定した。圧縮試験用のコア供試体は，図-1中に示す様に材齢28,56,91日において中心側と外側から各1本ずつ採取した。

(3) 実験結果

a) フレッシュコンクリートの性状

実機試験でのフレッシュコンクリート試験結果を表-4に示す。またスランプフローの経時変化の例を図-2に示す。SFC18では各季節共にスランプフローの変化は小さくほぼ安定していた。一方HF24は冬期実験では，時間経過と共に徐々にスランプフローが小さくなった。夏期，標準期では，最初の30分で急激にスランプフローが大きくなりその後は冬期と同様に徐々にスランプフローが小さくなった。空気量に関しては図-3に示す様に，いずれのコンクリートにおいても経時変化は小さく安定していた。

b) 部材コンクリート温度

擬柱部材の中心温度を表-5に示す。最高温度の到達時間は，SFCシリーズでは打設後19～21時間（夏期），15～18時間（標準期），25～29時間（冬期）である。

HFシリーズではそれぞれ17～21時間，18～23時間，26～32時間である。また温度履歴の一例（夏期）を図-4に示す。SFC14,18,22では初期に部材温度の停滞が見られるが，これは混和剤の添加率が2.2%以上と多く水和反応が遅延した影響と考えられる。次に部材の最高温度を推定するため，図-5に模擬柱に打設したコンクリートの打設時温度と単位温度上昇率（ ΔT ）の関係を示す²⁾。 ΔT は式（1）より算定した。ただしSFCシリーズは結合材中のベースセメントの単位量で求めた。

$$\Delta T = \frac{(T_{max} - t)}{(C/100) \cdot \sqrt{A}} \quad (1)$$

- T_{max} : コンクリート最高温度 (°C)
- t : コンクリート打設温度 (°C)
- C : 単位セメント量 (kg/m³)
- A : 模擬柱断面積 (m²)

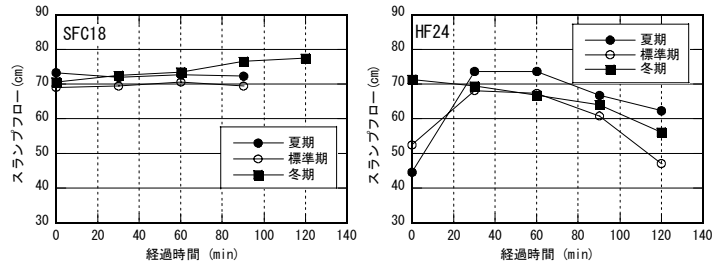


図-2 スランプフローの経時変化

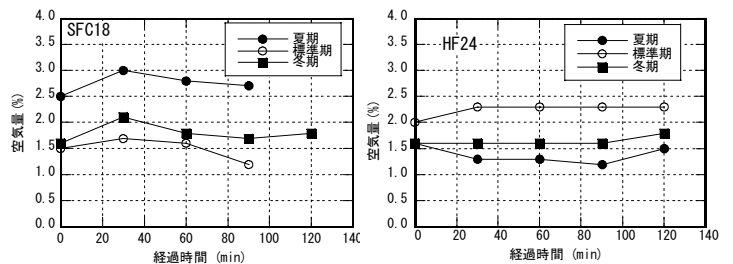


図-3 空気量の経時変化

表-5 コンクリート温度 (°C)

| 時期 | コンクリート | HF24 | HF28 | HF32 | FSC14 | SFC18 | SFC22 | SFC26 |
|-----|--------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 夏期 | 打設時 | 34.0 | 32.0 | 33.0 | 34.0 | 34.0 | 33.0 | 32.5 |
| | 最高 | 80.3 | 73.1 | 69.7 | 83.4 | 79.0 | 75.7 | 73.7 |
| | 上昇量 | 46.3 | 41.1 | 36.7 | 49.4 | 45.0 | 42.7 | 41.2 |
| 標準期 | 打設時 | 28.5 | 26.0 | 26.0 | 30.0 | 28.0 | 27.0 | 26.5 |
| | 最高 | 73.2 | 64.6 | 59.7 | 76.3 | 70.3 | 67.4 | 65.9 |
| | 上昇量 | 44.7 | 38.6 | 33.7 | 46.3 | 42.3 | 40.4 | 39.4 |
| 冬期 | 打設時 | 15.0 | 13.0 | 12.0 | 16.0 | 15.0 | 15.0 | 14.0 |
| | 最高 | 54.8 | 46.4 | 40.5 | 61.3 | 50.8 | 45.6 | 40.7 |
| | 上昇量 | 39.8 | 33.4 | 28.5 | 45.3 | 35.8 | 30.6 | 26.7 |

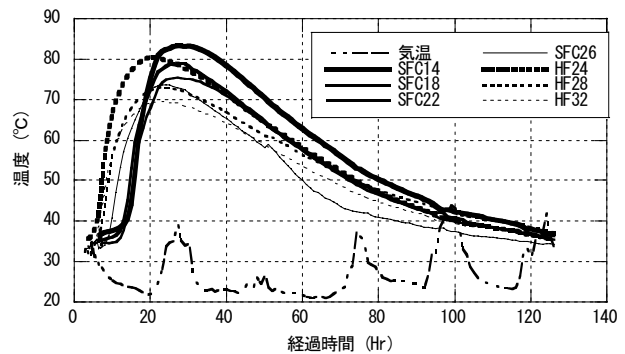


図-4 コンクリート温度履歴

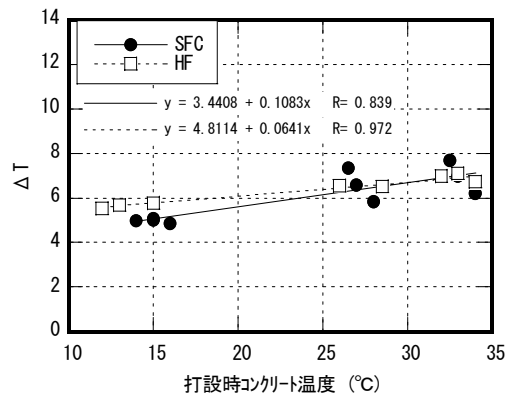


図-5 打設時温度と温度上昇の関係

この図から、打設時コンクリート温度が高くなるに従って温度上昇率もやや増加する傾向がみられる。既報²⁾では L(低熱セメント)は $\Delta T \approx 5.6$ 、HFは $\Delta T \approx 6.8$ (at20℃)であり、今回の実験では低熱セメントをベースとしているSFCは既報とほぼ同じである。一方HFでは、既報と比較して本実験での単位温度上昇率は小さい。本実験では単位結合材量が多いため、同一結合材量当りの温度上昇が小さくなったものと考えられる³⁾。

c) 強度性状, ヤング係数

標準養生供試体の圧縮強度とヤング係数、およびコア供試体の圧縮強度を表-6に示す。また図-6に結合材水比と標準養生強度の関係を示す。SFCシリーズでは結合材水比5.56までは、結合材水比と圧縮強度は直線関係にあるが、それ以上の高結合材水比の領域では、圧縮強度の増加が鈍くなる。これは練混ぜ性の低下や粗骨材強度による限界が原因と考えられるが、詳しくは今後の課題である。HFシリーズは、今回の実験範囲においては結合材水比と圧縮強度は概ね直線関係にある。また標準養生供試体の圧縮強度は図-7に示す様に、どの結合材においても練り上がり時のコンクリート温度、すなわち製造時期に関わらず同一調合ではほぼ一定であった。

次に構造体コンクリート強度について検討する。図-8に模擬柱試験体から採取した材齢91日のコア強度と式(2)で求めた圧縮強度比の関係を示す。

$${}_{28}S'_n = \frac{F_{cn}}{F_{s28}} \quad (2)$$

F_{s28} : 標準養生供試体材齢28日の圧縮強度 (N/mm²)

F_{cn} : コア供試体材齢 n 日の圧縮強度 (N/mm²)

(n=28, 56, 91)

SFCシリーズでは、コア強度が大きくなるに従い、圧縮強度比が大きくなる傾向にある。材齢91日コア強度が120N/mm²以上の範囲では、圧縮強度比(${}_{28}S'_{91}$)が1.0以上となり材齢91日コア強度が材齢28日標準養生強度を上回っている。

一方HFシリーズではコア強度と圧縮強度比との関連は見られないが、実験時期が要因と考えられる圧縮強度比の相違が確認できる。そこで、模擬柱部材の積算温度(M0)と圧縮強度比の関係求めた。その結果を図-9に示す。ここでM0とは、0℃を基準とした積算温度である⁴⁾。ややばらつきがあるものの、部材の積算温度が1500D・D以上の範囲で圧

表-6 圧縮強度・ヤング係数 (N/mm²)

| コンクリート | 材齢 | 圧縮強度 | | | | | | ヤング係数 | |
|--------|-------|------|------|-----|------|------|------|-------|-------|
| | | 標準養生 | | | コア | | | 標準養生 | |
| | | 7日 | 28日 | 56日 | 91日 | 28日 | 56日 | 91日 | 28日 |
| 夏期 | HF24 | 85.0 | 118 | 125 | 127 | 128 | 131 | 132 | 45200 |
| | HF28 | 72.3 | 107 | 117 | 123 | 111 | 118 | 120 | 42900 |
| | HF32 | 64.9 | 92.8 | 105 | 116 | 95.9 | 104 | 105 | 40700 |
| | SFC14 | 105 | 125 | 137 | 143 | 146 | 159 | 156 | 49100 |
| | SFC18 | 94.1 | 126 | 129 | 138 | 126 | 131 | 134 | 48600 |
| | SFC22 | 86.9 | 114 | 125 | 131 | 122 | 128 | 126 | 47400 |
| SFC26 | 74.0 | 103 | 111 | 121 | 90.6 | 96.0 | 99.3 | 44300 | |
| 標準期 | HF24 | 75.3 | 117 | 122 | 128 | 107 | 107 | 108 | - |
| | HF28 | 66.1 | 103 | 116 | 122 | 93.9 | 101 | 101 | - |
| | HF32 | 55.1 | 92.5 | 104 | 108 | 80.9 | 85.3 | 88.5 | - |
| | SFC14 | 106 | 136 | 140 | 145 | 152 | 151 | 155 | - |
| | SFC18 | 96.6 | 135 | 136 | 143 | 134 | 135 | 136 | - |
| | SFC22 | 75.5 | 112 | 119 | 125 | 110 | 110 | 110 | - |
| SFC26 | 65.0 | 105 | 113 | 119 | 89.8 | 92.6 | 94.4 | - | |
| 冬期 | HF24 | 76.0 | 117 | 127 | 128 | 100 | 109 | 118 | - |
| | HF28 | 62.4 | 115 | 110 | 115 | 85.8 | 95.5 | 106 | - |
| | HF32 | 54.1 | 102 | 102 | 104 | 75.1 | 83.3 | 97.9 | - |
| | SFC14 | 112 | 140 | 148 | 158 | 149 | 148 | 153 | - |
| | SFC18 | 89.7 | 125 | 142 | 144 | 125 | 116 | 138 | - |
| | SFC22 | 72.8 | 118 | 120 | 127 | 97.0 | 102 | 115 | - |
| SFC26 | 57.8 | 103 | 106 | 117 | 81.4 | 89.1 | 105 | - | |

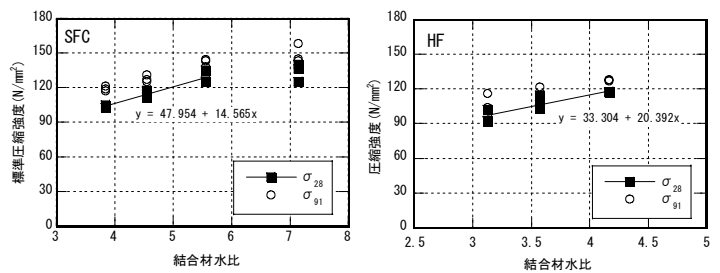


図-6 結合材水比と圧縮強度の関係

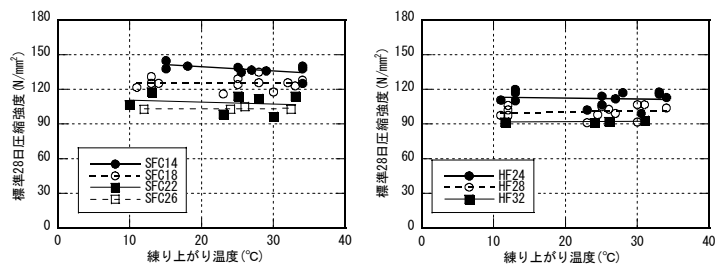


図-7 練り上がり温度と圧縮強度の関係

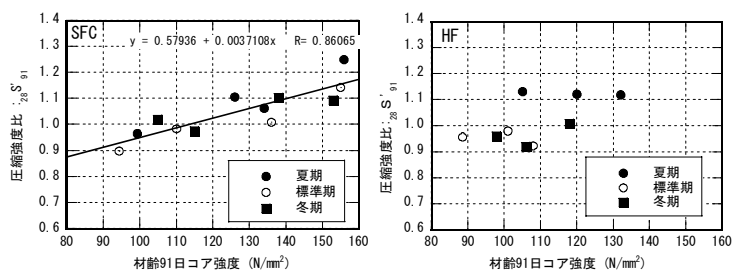


図-8 コア強度と圧縮強度比の関係

縮強度比が 1.0 以上となりコア強度が材齢28日標準養生強度を上回ることがわかる。次にコア採取位置と構造体強度の関係について検討した。図-10は、模擬柱部材の内側から採取したコアと外側から採取したコアの材齢91日強度の比較を示している。HF シリーズの 100N/mm² 以上の範囲で僅かに内側コア強度が大きい傾向が見られる。これは内側コア位置での部材温度は外側コア位置での温度より高く、積算温度が大きくなった影響と考えられる。

ヤング係数について実測値と、式(3)で示したNewRC式を用いた計算値と比較した結果を図-11に示す。

$$E = 33500 \times k_1 \times k_2 \times (\gamma/2.4)^2 \times (\sigma_B/60)^{1/3} \quad (3)$$

- E : ヤング係数 (N/mm²)
- k₁ : 粗骨材の種類により定まる補正係数 (硬質砂岩1.0)
- k₂ : 混和材の種類により定まる補正係数 (SFCは0.95, HFは1.0)
- γ : 単位容積質量 (ton/m³)
- σ_B : コンクリート圧縮強度 (N/mm²)

今回用いた材料では、実測値が NewRC 式の計算値と比較してSFCシリーズで約11~18%, HFシリーズで約2~6%大きい値となった。

3. 施工実験

(1) 目的および実験概要

実機試験の結果を踏まえ、120N/mm² 級の高強度コンクリートについてプラント実機での製造、現場までの輸送、および実建物と同じ柱の試験体への打設による施工実験を行った。実験は標準期(4月)に実施した。使用したコンクリートは表-3中のSFC18と同じである。また使用材料、練混ぜミキサ、練混ぜ時間も実機練り試験と同一条件である。練混ぜ量は2.25m³/バッチ×2=4.5m³である。コンクリートを製造後アジテータにより約30分輸送し、荷卸時点でフレッシュコンクリートの性状を確認した。

本コンクリートによる柱部材への施工性を把握するために、図-12に示す実柱試験体を打設した。試験体は施工予定の実建物の柱と同一形状および配筋である。打ち込みはバケット(容量4m³)を用い、打設中はバイブレーターが常時コンクリート天端より30cm程貫入した状態を保持しながら、連続的に打設した。

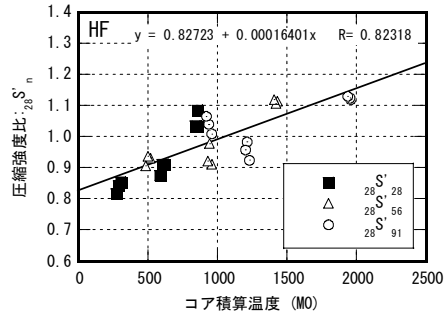


図-9 積算温度と圧縮強度比の関係

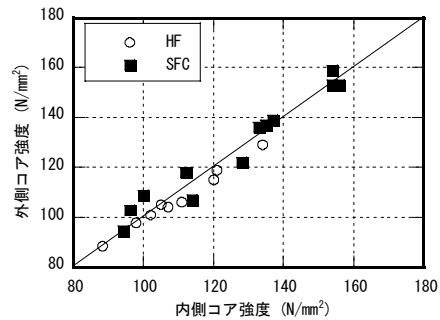


図-10 コア強度比較

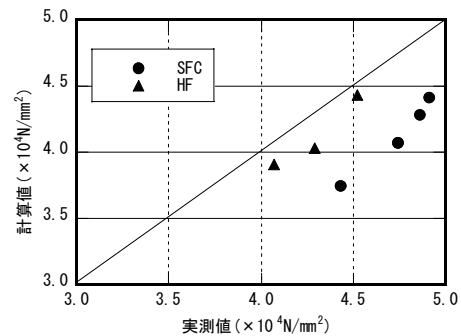


図-11 ヤング係数の比較

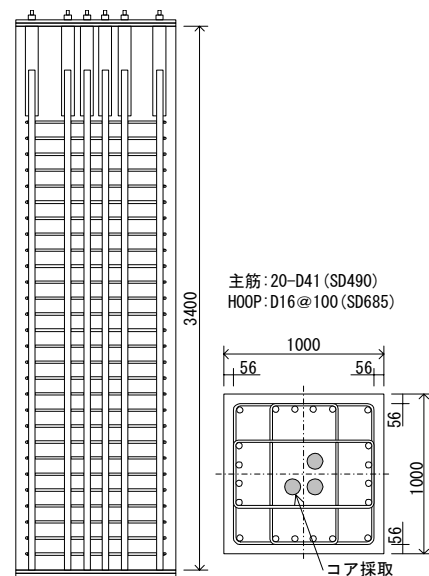


図-12 柱部材

(2) 実験結果

施工実験における練混ぜ直後、および荷卸(37分後)でのフレッシュコンクリートの試験結果を表-7に示す。荷卸ではスランプフローが5cm低下したが、コンクリートはワーカブルな状態であった。実柱試験体は脱型後の目視確認でもジャンカ等の欠陥は無く良好な状態であった。

表-8に圧縮強度を示す。標準養生強度およびコア強度は標準期の実機練り試験と同等であった。また材齢91日コア強度は135N/mm²であり、Fc120 N/mm²に対して十分安全な強度である。次に図-13, 14に柱試験体の高さ方向のコア強度および単位容積質量の分布を示す。高さによるコア強度, 単位容積質量の違いは認められない。また材齢91日コア強度の変動係数は0.26%と小さく, 部材中のコンクリートは均一な状態であった。

4. まとめ

Fc60~120N/mm²の高強度コンクリートの実機練り試験および施工実験を行い以下の知見を得た。

- ① SFC18は、ワーカビリティが安定していたが、HF24では、一部大きなスランプフローの変動があった。
- ② SFCシリーズでは結合材水比5.56までは、結合材水比と圧縮強度は直線関係にあるが、それ以上の高結合材水比の領域では、圧縮強度の増加が鈍くなる。
- ③ 標準養生供試体の圧縮強度は、製造時期に関わらず同一調合ではほぼ一定である。
- ④ SFCシリーズは、コア強度が大きくなるに従い圧縮強度比が大きくなる傾向にあり、材齢91日コア強度が120N/mm²以上の範囲では、材齢91日コア強度が材齢28日標準養生強度を上回る。HFシリーズは積算温度(M0)が1500D・D以上の範囲でコア強度が材齢28日標準養生強度を上回る。
- ⑤ 施工実験における圧縮強度は、標準期の実機練り試験の圧縮強度と同等であり、柱内部の高さによるコア強度, 単位容積質量の違いは認められない。また材齢91日コア強度の変動係数は0.26%と小さく, 柱内のコンクリートは均一な状態である。

謝辞：本研究を行うに当たり、コンクリートの製造で御協力いただきました晴海小野田レミコン(株), 花王(株)の関係諸氏に感謝の意を表します。

表-7 フレッシュコンクリート

| 時間 (min) | スランプフロー (cm) | | フロー時間 | | 空気量 (%) | コンクリート 温度(°C) |
|-------------|-----------------|--------|-------|------|------------|------------------|
| | | | 50cm | 停止 | | |
| 0 | 68.0 | × 67.0 | 10.2 | 84.8 | 1.8 | 21.0 |
| 37 | 63.0 | × 62.0 | 11.3 | 96.9 | 1.8 | 22.0 |

表-8 圧縮強度 (N/mm²)

| 養生 | 材齢 | | | |
|----|------|-----|-----|-----|
| | 7日 | 28日 | 56日 | 91日 |
| 標準 | 95.0 | 134 | 144 | 150 |
| コア | - | 129 | 133 | 135 |

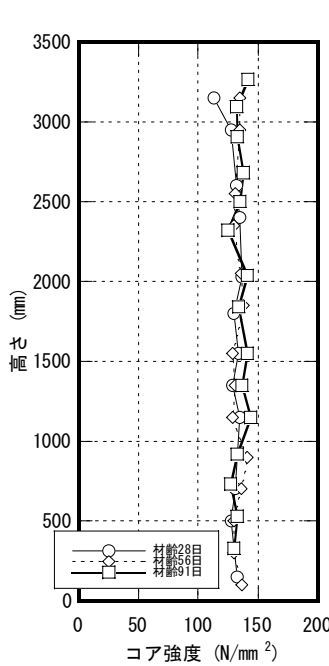


図-13 コア強度

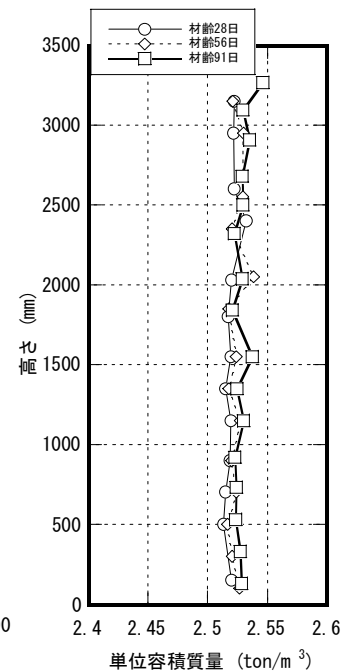


図-14 単位容積質量

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説(JASS 5 鉄筋コンクリート工事), 2003
- 2) 蓮尾孝一, 加納嘉：高強度コンクリートの強度発現に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp801-804, 1998
- 3) 渡邊聡：超高強度コンクリートの強度発現に関する研究, 松村組技術研究所年報, VOL. 9, pp51-58, 2001
- 4) 河上浩司, 菅谷泰之, 西本好克：超高強度コンクリートの強度発現に関する実験的研究(その1. 温度条件と強度発現の評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp1057-1058, 2002