

# 報告 実機ミキサによる超低収縮・超高強度コンクリートの製造およびその品質に関する検討

松田 拓<sup>\*1</sup>・松丸 真<sup>\*2</sup>・蓮尾 孝一<sup>\*3</sup>・野口 貴文<sup>\*4</sup>

**要旨:** 結合材をポルトランドセメントとシリカフェームとフライアッシュの三成分とし、細骨材にフェロニッケルスラグ細骨材を用いた超低収縮・超高強度コンクリートを実機ミキサで製造した。その結果、1) 過去に検討した超高強度コンクリートよりも、練混ぜ負荷が小さく流動性と強度が高まる一方、自己収縮は著しく少なくなり、2) フレッシュ性状と圧縮強度の安定したコンクリートの製造が可能で、部材を断熱材で被覆し養生すると 250N/mm<sup>2</sup> 級のコア強度が得られ、設計基準強度で 220N/mm<sup>2</sup> を満足すること、等を確認した。  
**キーワード:** 超高強度コンクリート、フェロニッケルスラグ細骨材、自己収縮、練混ぜ負荷

## 1. はじめに

筆者らは、結合材 (B) をポルトランドセメントとシリカフェームとフライアッシュ (FA) の三成分とし、細骨材に「空隙構造が粗大で吸水率が大きい」フェロニッケルスラグ (FNS) 細骨材を用いた超低収縮・超高強度コンクリートを開発している<sup>1)</sup>。図-1 は、既報<sup>1)</sup>で示された「結合材を前述の三成分とし、粗骨材に硬質砂岩砕石、細骨材に前述の FNS 細骨材、硬質砂岩砕砂、安山岩砕砂をそれぞれ使用したコンクリート」の、室内試験結果の一部である。FNS 細骨材を使用したコンクリート (以降、開発したコンクリート) は、単位水量 (W) を低減して細骨材率 (s/a) を増加させた条件で十分な流動性が得られ、他よりも高強度かつ自己収縮が少ない (図-1a)。図-1b) はそれらの練混ぜ時におけるトルクの測定結果 (8 秒ごとの平均値) である。練混ぜ手順は、強制二軸ミキサ (容量 100L) を使用し、水と化学混和剤以外の材料を投入⇒30 秒攪拌⇒水と化学混和剤を投入⇒15 分間練り混ぜとした (練混ぜ量は 90L)。開発したコンクリートは他よりも練上がり時のトルクが小さく、実機ミキサでの製造性においてもミキサへの負荷の観点で有利と推察される。本報告は、開発した超低収縮・超高強度コンクリートをプレキャスト製品工場の実機ミキサで製造し、その品質を確認したものである。

## 2. 使用材料と調合

使用材料と調合を表-1 と 2 に示す。結合材には低発熱系のセメントとシリカフェームをプレミックスしたセメント (SFPC) と FA、細骨材に FNS、粗骨材に硬質砂岩砕石、鋼繊維を用いた。調合は W/B=12% と 16% とし、W はそれぞれ 135kg/m<sup>3</sup> と 120kg/m<sup>3</sup>、s/a は 55% とした。

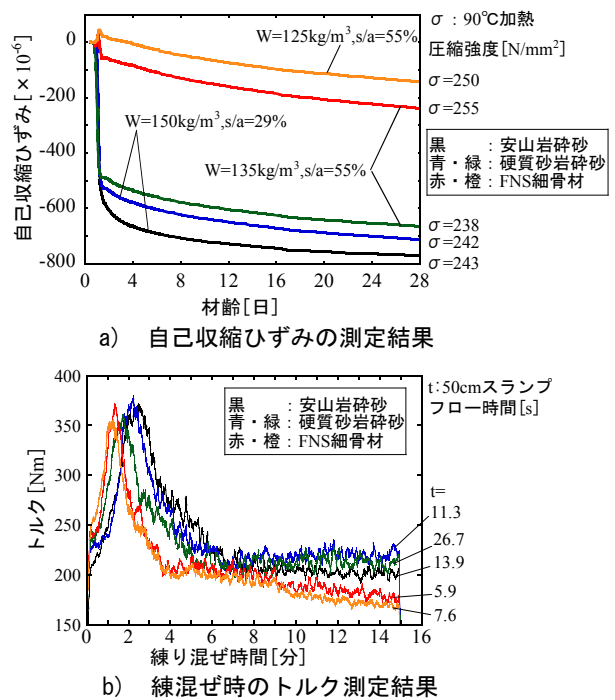


図-1 既報<sup>1)</sup>のコンクリートの性状 (W/B=12%)

表-1 使用材料

名称	種類	物性等	記号
セメント	シリカフェーム プレミックスセメント	密度: 3.04 比表面積: 6690cm <sup>2</sup> /g	SFPC
細骨材	フェロニッケル スラグ細骨材	密度: 2.98 粗粒率: 2.60, 吸水率: 2.91%	FNS
粗骨材	砕石2005 (硬質砂岩)	密度: 2.62 実積率: 62.1%	G
水	工業用水	-	W
混和材	フライアッシュ (JIS 1種相当品)	密度: 2.40 比表面積: 5300 cm <sup>2</sup> /g	FA
化学混和剤	高性能減水剤 (1種)	ポリカルボン酸系	SP
鋼繊維	コンクリート 補強用鋼繊維	外径: 0.2mm 長さ: 15.0mm	sf

\*1 三井住友建設 (株) 技術本部 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

\*2 SMC プレコン (株) 製造管理部 関東工場 (正会員)

\*3 三井住友建設 (株) 技術本部 技術研究所 (正会員)

\*4 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

### 3. 実機ミキサでのコンクリート製造

#### 3.1 練混ぜ時間の検討

実機製造では、コンクリートの練混ぜ完了後に鋼繊維を投入する。そこで、鋼繊維を投入する前の練混ぜ時間を検討した。使用したミキサは容量 1.67m<sup>3</sup> の強制二軸ミキサである。モルタルの先行練りは行わず、ミキサを起動後に FNS, SFPC, FA, G, W+SP の順に全材料を投入後、所定の時間でミキサを停止・再起動し、その都度ミキサの中心部と端部から円柱供試体 (φ100×h200mm) ×3 本/箇所を採取した。ミキサの停止・再起動を実施した時間 (試料採取時間) は、W/B=12% で 13, 15, 17 分、W/B=16% で 5, 7, 9 分とした。ミキサ内の試料採取箇所を図-2 に示す。試料採取時間と圧縮強度 (後述する 40℃ 加熱条件, 材齢 27 日) およびその標準偏差との関係を図-3 に示す。W/B=12% では採取箇所と採取時間によらず、強度発現は同等で、全体の標準偏差は 10N/mm<sup>2</sup> 以下と許容できるものと判断し、練混ぜ時間を 15 分と決定した。

W/B=16% では、採取箇所と採取時間によらず強度発現は同等で、標準偏差は採取時間が遅いほど小さくなったが全体として W/B=12% より小さいことに加え、製造に要する時間を考慮し、練混ぜ時間を 7 分と決定した。

#### 3.2 実機製造の概要

コンクリートの製造は夏期 (8 月), 標準期 (10 月) および冬期 (1 月) に実施した。W/B=12% は夏期, 標準期, 冬期それぞれで 4, 5, 9 バッチ製造し、W/B=16% は全ての時期に各 3 バッチ製造した。コンクリートの練混ぜ手順を図-4 に示す。コンクリートの練混ぜ完了後に連続して鋼繊維を投入し、投入完了後 1 分間の練混ぜを実施した。鋼繊維はミキサ 2 軸間の中心位置の上方部に設置した振動機付き投入ホッパーより投入した。

コンクリート製造時における実機ミキサの負荷電力 (0.90m<sup>3</sup>/バッチ) の測定例を図-5 に示す。W/B=12% の負荷電力は約 4 分でピークとなり、約 14 分で一定値に収束した。W/B=16% の負荷電力は約 2 分でピークとなり、約 7 分で一定値に収束した。鋼繊維投入に要した時間は W/B=12% で約 3 分、16% で約 2 分であり、鋼繊維投入後の電力負荷は僅かに大きくなった。図-5b) には比較用として、過去に検討した「結合材に中庸熱セメントと高強度コンクリート用混和材を使用し、細骨材と粗骨材に硬質砂岩を用いたコンクリート<sup>2)</sup>」を練り混ぜた時の測定値を併記している (ただし、モルタルを先行練りしている)。開発したコンクリートは過去に検討したコンクリートに比べ、放出時のミキサ負荷電力が明らかに小さいことが確認された。

放出後のコンクリートのフレッシュ性状を試験し、円柱供試体 (φ100×h200mm) と模擬柱試験体を作製した。円柱供試体の種類と養生方法を図-6 に、模擬柱試験体の

種類と概要およびコア採取位置を、表-3 と図-7 にそれぞれに示す。全ての模擬柱試験体には、柱軸方向の端面 2 面に厚さ 150mm の断熱材, 残り 4 側面に厚さ 50mm の

表-2 調査

W/B [%]	s/a [%]	SP [B×%]	W	結合材		FNS	G	sf***	目標 空気量[%]	スラン プフロ ー値 [cm]
				SF PC	FA					
12	55	1.90 (1.70)**	135	900	225	729	529	39.3	3.0 +1.0 , -1.5	70±10
16	55	1.70 (1.50)**	120	600	150	984	713	23.6	2.0 ±1.0	70±10

※()は冬期実験 ※※鋼繊維は外割り添加

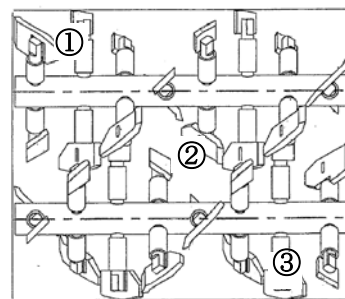


図-2 ミキサ内の試料採取箇所

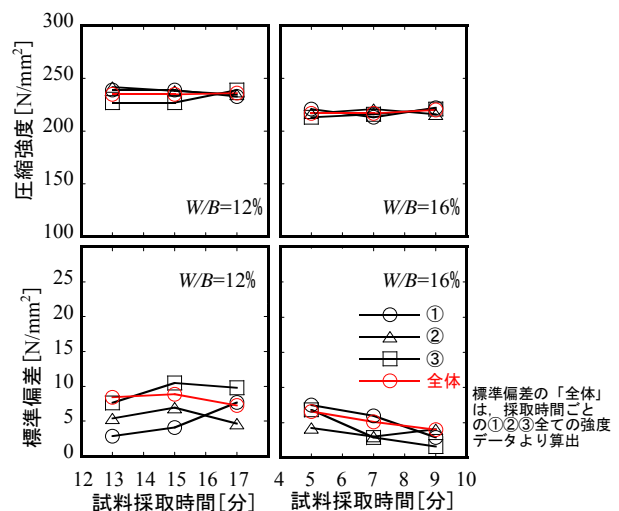


図-3 試料採取時間と圧縮強度 (鋼繊維は無添加)

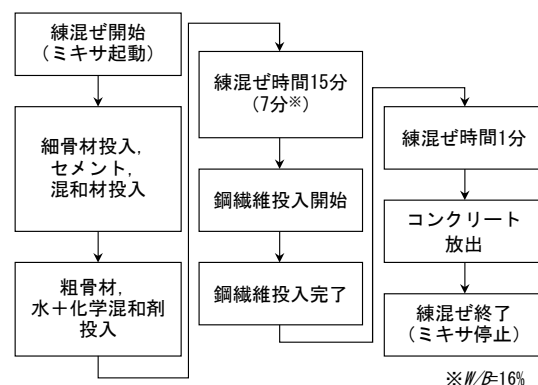
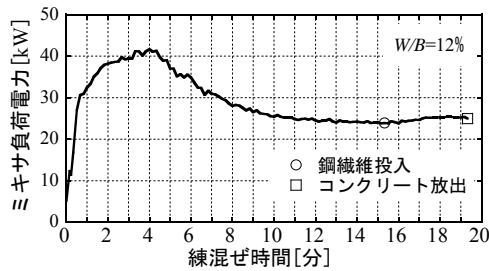
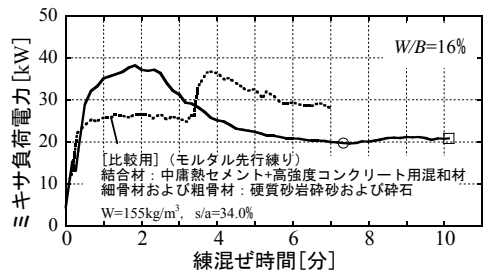


図-4 コンクリートの練混ぜ手順



a) W/B = 12%



b) W/B = 16%

図-5 ミキサ負荷電力の測定結果

断熱材を設置した。材齢 21 日まで養生後に断熱材を取り外し、以降屋外雰囲気中で静置し、材齢 28 および 91 日におけるコア強度を確認した。W/B=12%は柱軸方向に対して直角方向にコンクリートを打ち込み、W/B=16%は柱軸方向と同じ方向にコンクリートを打ち込んだ。いずれの模擬柱試験体も、コアボーリングは柱軸方向に行い、4 個/孔のコア供試体 ( $\phi 100\text{mm} \times h200\text{mm}$ ) を採取した。コアの採取は図-7 に示すように、12%-1000 は 5 本/体、12%-700 と 16%-1000 は各 2 本/体とし、部材中心部と外側部分とから実施した。全ての模擬柱試験体には中心部に熱電対内蔵型の埋込み型ひずみ計を設置し、温度とひずみを計測した。模擬柱試験体へのコンクリート打ち込み状況を写真-1 に示す。

### 3.3 フレッシュ性状と円柱供試体の強度のばらつき

フレッシュコンクリートの温度は、W/B=12%では夏期、標準期、冬期それぞれ 35.0~37.0°C、22.0~27.0°C、18.0~21.5°Cとなり、W/B=16%では夏期、標準期、冬期それぞれ 33.0~34.0°C、24.0~25.0°C、14.0~16.0°Cとなった。空気量、スランプフロー、円柱供試体の圧縮強度 (90°C 加熱  $\sigma_7$ ) の結果を図-8 に示す (材齢 n 日の圧縮強度を  $\sigma_n$  と表記)。空気量、スランプフロー値とも変動は少なく、目標範囲内であった。90°C 加熱  $\sigma_7$  は、W/B=12%では夏期、標準期、冬期それぞれ 257~266N/mm<sup>2</sup>、254~263N/mm<sup>2</sup>、265~277N/mm<sup>2</sup> の範囲にあり、W/B=16%では夏期、標準期、冬期それぞれ 215~225N/mm<sup>2</sup>、211~214N/mm<sup>2</sup>、233~242N/mm<sup>2</sup> の範囲にあった。

圧縮強度 (90°C 加熱  $\sigma_7$ ) の平均値、標準偏差、変動係数を表-4 に示す。標準偏差と変動係数には W/B の違いによる差異は認められず、W/B=12%と 16%でそれぞれ、1.81~5.23N/mm<sup>2</sup>、0.85~2.37%の範囲にあった。

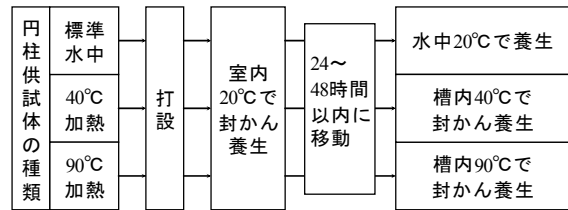
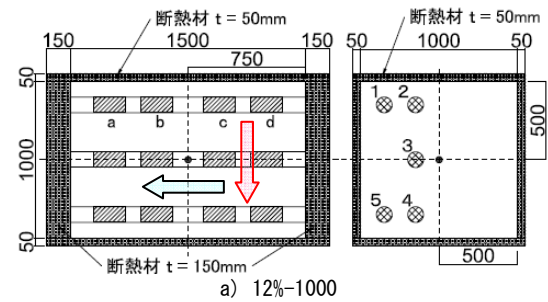


図-6 円柱供試体の種類と養生方法

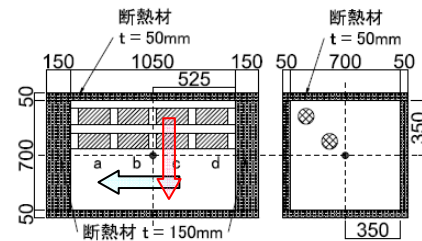
表-3 模擬柱試験体の種類

名称	12%-1000	12%-700	16%-1000
W/B [%]	12.0		16.0
寸法[mm]	1000×1000×h1500	700×700×h1050	1000×1000×h1000

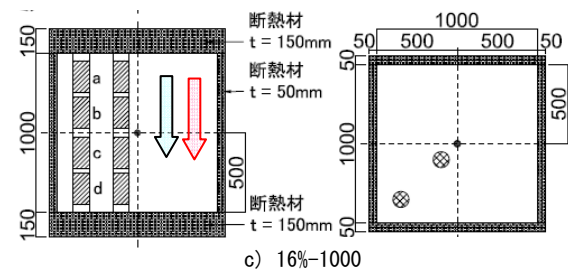
h: 柱軸方向



a) 12%-1000



b) 12%-700



c) 16%-1000

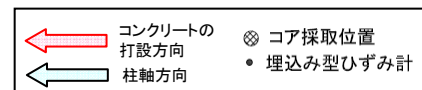


図-7 模擬柱試験体の概要およびコア採取位置



写真-1 コンクリート打ち込み状況 (W/B=12%, 冬期)

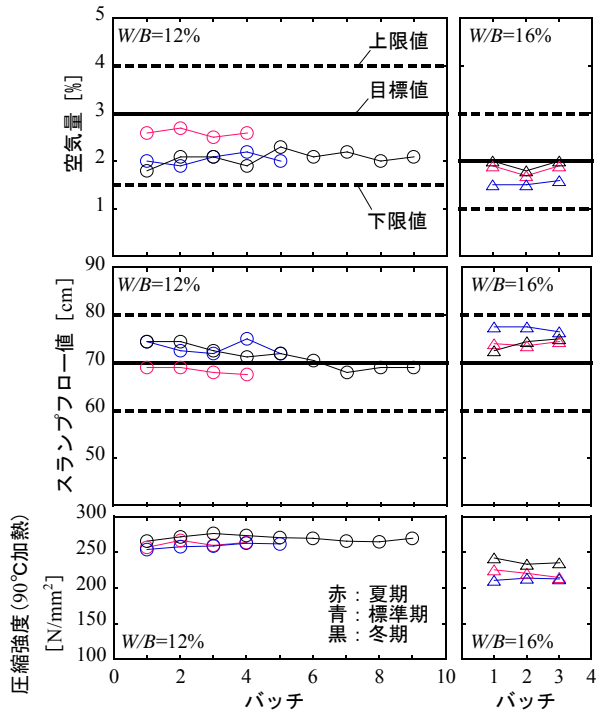


図-8 バッチごとの測定結果

表-4 バッチ間における圧縮強度（90℃加熱）の変動

W/B [%]	季節	平均値 [N/mm <sup>2</sup> ]	標準偏差 [N/mm <sup>2</sup> ]	変動係数 [%]	バッチ数
12	夏期	260	4.88	1.87	3
	標準期	259	3.53	1.36	5
	冬期	270	3.92	1.45	9
16	夏期	220	5.23	2.37	3
	標準期	212	1.81	0.85	3
	冬期	237	4.83	2.04	3

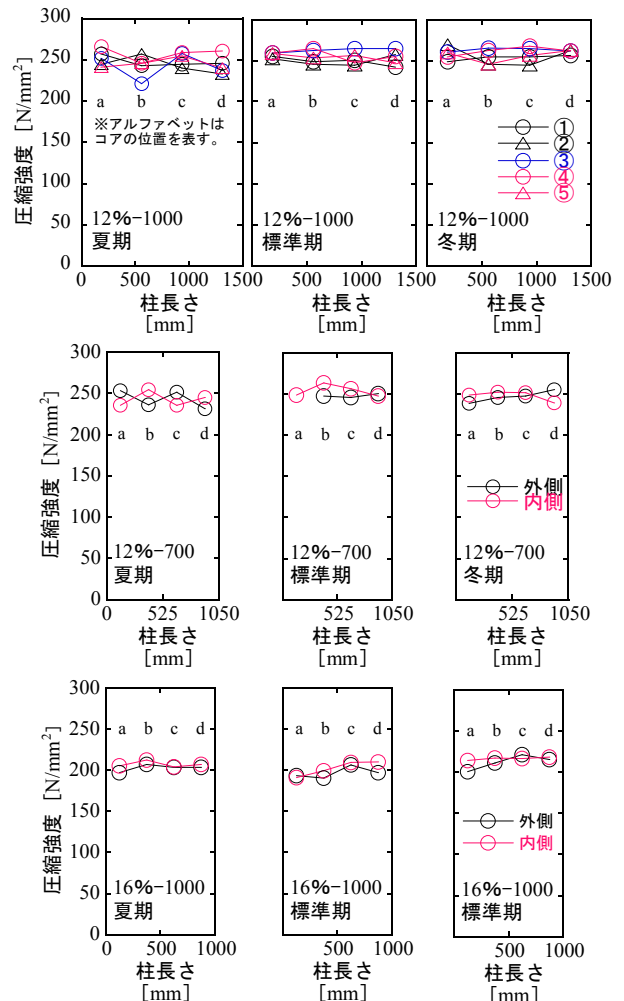


図-9 模擬柱内部の強度の分布（材齢 28 日）

### 3.4 模擬柱試験体中における強度の分布とばらつき

材齢 28 日における各模擬柱試験体内部の強度分布を図-9 に示す。いずれの模擬柱試験体も、部材内外部や打込み時の高さ方向によらず、強度の分布は同様であった。模擬柱試験体コアの強度試験結果を表-5 にまとめる。コア強度には製造時期による明確な差異は認められないが、12%-1000 の方が若干、12%-700 よりも高い結果となった。各模擬柱試験体の平均値-2σの結果を見ると、W/B=12%と16%とでそれぞれ、220N/mm<sup>2</sup>および180N/mm<sup>2</sup>を上回っている。このことから、W/B=12%と16%の構造体コンクリート強度はそれぞれ、設計基準強度 (F<sub>c</sub>) 220N/mm<sup>2</sup>および180N/mm<sup>2</sup>を十分に満足するものと推察される。

表-5 模擬柱試験体コア強度（材齢 28 日）のまとめ

	試験体	各模擬柱の平均値	W/B ごとの平均値	単位: N/mm <sup>2</sup>		
				各模擬柱の標準偏差	各模擬柱の平均値-2σ	
夏期	12%-1000	247	250	10.8	226	
	12%-700	242		9.23	224	
標準期	12%-1000	254		6.93	240	
	12%-700	251		6.46	238	
冬期	12%-1000	257		7.43	243	
	12%-700	247		6.07	235	
夏期	16%-1000	205	206	4.51	196	
	標準期	16%-1000		199	8.11	183
		16%-1000		214	6.62	201

### 3.5 円柱供試体と模擬柱試験体コアの強度の関係

円柱供試体と模擬柱試験体コアの強度試験結果を図-10 に示す。コア強度は各模擬柱試験体の平均値である。製造時期による大きな違いは認められなかった。W/B=12%の結果を見ると、円柱供試体については標準水中σ28<標準水中σ56<40℃加熱σ28<90℃加熱σ7の関係で、40℃加熱σ28がコア強度と概ね同等である。W/B=16%の結果を見ると、円柱供試体についてはW/B=12%と同様

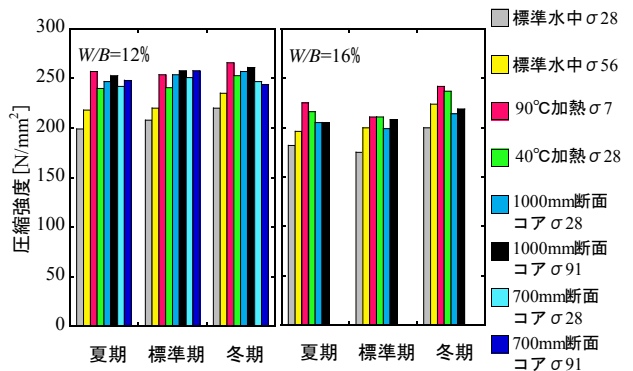


図-10 圧縮強度試験結果

に標準水中 $\sigma_{28}$  < 標準水中 $\sigma_{56}$  < 40°C加熱 $\sigma_{28}$  < 90°C加熱 $\sigma_{7}$ の関係だが、40°C加熱 $\sigma_{28}$ 以外に標準水中 $\sigma_{56}$ もコア強度と概ね同等である。また、コア強度は材齢28日から91日にかけて、若干増進する傾向が見られた。

40°C加熱 $\sigma_{28}$  および標準水中 $\sigma_{56}$  とコア強度（コア $\sigma_{91}$ ）との関係を図-11に示す。W/B=12%の場合、標準水中 $\sigma_{56}$ はコア $\sigma_{91}$ よりも明らかに低いものがありかつ220N/mm<sup>2</sup>を下回っているが、40°C加熱 $\sigma_{28}$ はコア $\sigma_{91}$ と同等かつ220N/mm<sup>2</sup>より高い。すなわち、W/B=12%のコンクリートについては40°C加熱 $\sigma_{28}$ を用いることで、構造体コンクリート強度をFc220N/mm<sup>2</sup>として管理できると考えられる。W/B=16%の場合、40°C加熱 $\sigma_{28}$ と標準水中 $\sigma_{56}$ はどちらもコア $\sigma_{91}$ と同等かつ180N/mm<sup>2</sup>より高い。すなわち、W/B=16%のコンクリートについては、40°C加熱 $\sigma_{28}$ と標準水中 $\sigma_{56}$ のどちらを用いても、構造体コンクリート強度をFc180N/mm<sup>2</sup>として管理できると考えられる。

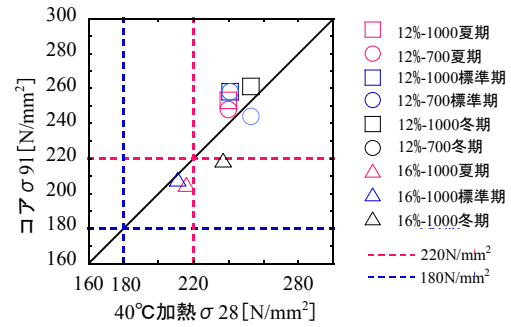
#### 4. 自己収縮の検討

##### 4.1 室内試験

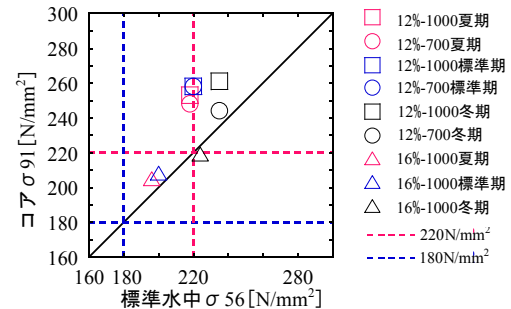
実機ミキサでの製造に先立ち、室内試験により20°C条件での自己収縮を確認した。自己収縮試験体は100×100×400mmの角柱に埋込み型ひずみ計を設置したものである。一軸拘束応力は、既報<sup>2)</sup>で示した100×100×850mmの角柱にD32の異形棒鋼を配置したものである(図-12)。測定結果を図-13に示す。調合条件は図中に示すとおりであり、単位水量を135~120kg/m<sup>3</sup>、細骨材種類をFNSと硬質砂岩とし、鋼繊維は添加していない。図中には比較用に、図-5にも示した既報のコンクリートの自己収縮試験結果<sup>2)</sup>を併記している。また、各コンクリートの50cmスランプフロー時間を示している。W/B=12%の結果から、これまでと同様に、細骨材にFNSを使用すると硬質砂岩を使用した場合に比べ、流動性が高まりかつ自己収縮が極めて小さくなった。

次にFNSを使用した調合を見ると、自己収縮ひずみと拘束応力ともにW/B=12, 16, 17, 18%の順で小さく、50cmスランプフロー時間はどれも約6秒と非常に流動性が高い。すなわち、開発したコンクリートはW/Bを12%から18%まで大きくすると、単位水量を135kg/m<sup>3</sup>から120kg/m<sup>3</sup>まで低減しても流動性を損なうことなく、更に自己収縮を低減可能と分かった。また、同じW/B(16%)で見ると、開発したコンクリートは既報<sup>2)</sup>のコンクリートに比べ、流動性が高く自己収縮が小さい。

開発したコンクリートについては、全ての自己収縮ひずみは初期に膨張側に挙動している。本検討の自己収縮ひずみは、線膨張係数を時間変化させずに10×10<sup>-6</sup>/°Cの一定値と仮定して全ひずみから温度ひずみを差し引き



a) 40°C加熱 $\sigma_{28}$  とコア $\sigma_{91}$  との関係



b) 標準水中 $\sigma_{56}$  とコア $\sigma_{91}$  との関係

図-11 円柱供試体の強度とコア供試体強度との関係

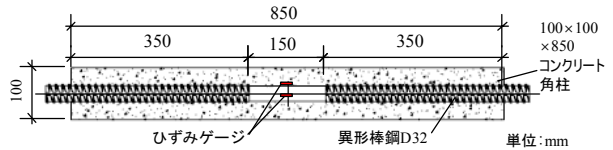
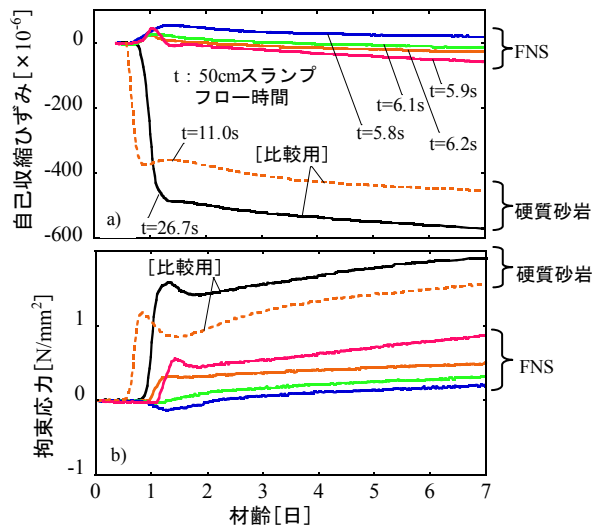


図-12 一軸拘束試験体の概要



	結合材	細骨材	W/B [%]	単位水量 [kg/m <sup>3</sup> ]	s/a [%]	備考	
凡例	—	SFPC+FA	FNS	12	135	55	開発
	—	SFPC+FA	硬質砂岩	12	135	55	比較
	—	SFPC+FA	FNS	16	120	55	開発
	—	SFPC+FA	FNS	17	120	55	開発
	—	SFPC+FA	FNS	18	120	55	開発
	—	中庸熟セメント+高強度コンクリート用混和材	硬質砂岩	16	155	34	比較 <sup>2)</sup>

図-13 自己収縮試験結果 (室内試験, 20°C条件)

求めているため、若材齢における挙動の厳密な評価は難しい。ここで拘束応力の測定結果を見ると  $W/B=18\%$  でコンクリートに圧縮応力（鋼材に引張り力）が発生している。すなわち、少なくとも  $W/B=18\%$  は初期に膨張している。他の調合は、「膨張しているものの、その時点でのペーストの骨格が拘束応力を発現させるほど強固に形成されていない」可能性が考えられる。これら一連の機構の解明は今後の課題である。

#### 4.2 模擬柱試験体の温度履歴と自己収縮

模擬柱試験体の温度と自己収縮ひずみの結果を図-14に示す。図-14a)において温度履歴を同じ製造時期で比較した場合、部材断面寸法の大きい  $1000 \times 1000\text{mm}$  断面の方が、 $700 \times 700\text{mm}$  断面よりも最高温度が多少高かつ温度降下の速度が遅い分、高い温度条件で養生されている。そのため、3.4 で前述したコア強度と同様に、自己収縮ひずみは  $12\%-1000$  の方が若干、 $12\%-700$  より大きい結果となったと推察される。

一方、製造時期で比較すると温度履歴は大きく異なり、冬期、標準期、夏期の順で高い。 $W/B=12\%$  で見ると、冬期の  $700 \times 700\text{mm}$  断面と夏期の  $1000 \times 1000\text{mm}$  断面とでは最高温度の差は  $23^\circ\text{C}$  となった。しかしながら自己収縮ひずみには 3.4 で前述したコア強度と同様に、製造時期による明確な差異は認められなかった。

図-14 中には、既往の自己収縮測定結果<sup>2) 3)</sup> ( $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  角柱の雰囲気温度を制御)を併記している。既報<sup>3)</sup>は FNS を用いているが、 $s/a$  が  $21\%$  と小さい点で開発したコンクリート ( $s/a=55\%$ ) と異なる。模擬柱試験体のコア強度は、 $W/B=12\%$  と  $16\%$  でそれぞれ約  $250$ ,  $200\text{N/mm}^2$  である (表-5)。同じ  $W/B$  で比較すると、開発したコンクリートで製造した模擬柱試験体の品質は、既報<sup>2) 3)</sup> の超高強度コンクリートに比べ、自己収縮は少なく高い強度が得られた。なお、図-14 に示した自己収縮は図-13 の結果に比べ大きい理由は、温度条件の違い<sup>3)</sup> (前者が高温条件、後者が  $20^\circ\text{C}$  条件) と考えられる。

#### 5. まとめ

開発した超低収縮・超高強度コンクリートをプレキャスト製品工場の実機ミキサで製造し、以下の知見を得た。

- 1) 過去に検討された、 $W/B$  が同じで結合材と細骨材の異なる超高強度コンクリートよりも、練混ぜ負荷が小さく流動性と強度が高まる一方で、自己収縮は著しく少なくなる。
- 2) フレッシュ性状と圧縮強度の安定したコンクリートの製造が可能で、部材を断熱材で被覆して養生することで  $W/B=12\%$  と  $16\%$  でそれぞれ  $250\text{N/mm}^2$  級および  $200\text{N/mm}^2$  級のコア強度が得られる。
- 3)  $W/B=12\%$  は  $40^\circ\text{C}$  加熱養生の材齢 28 日で、 $W/B=16\%$

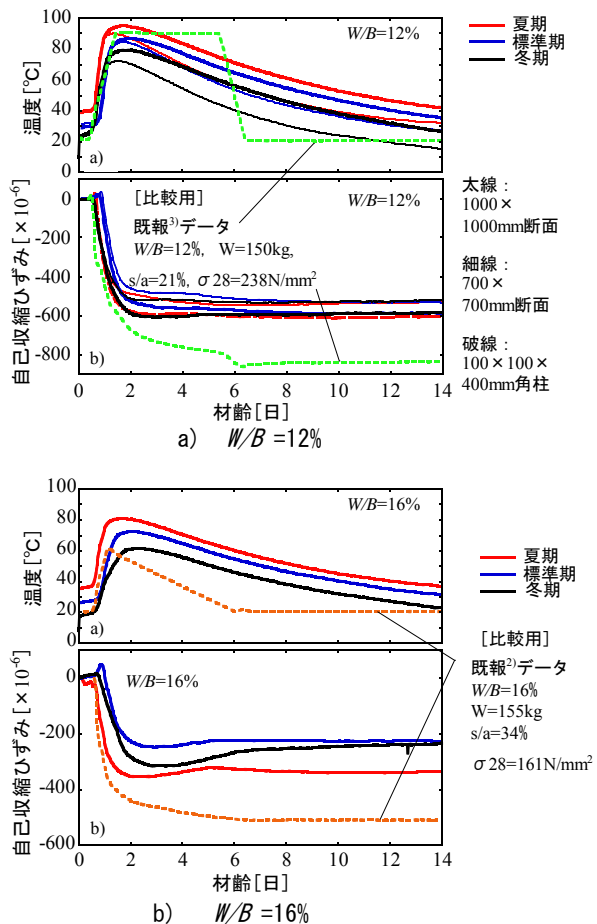


図-14 模擬柱試験体の温度と自己収縮

- は  $40^\circ\text{C}$  加熱養生の材齢 28 日と標準水中養生の材齢 56 日で、それぞれコア強度と同等の圧縮強度が得られる。
- 4) 部材中の強度分布は均一で、 $W/B=12\%$  では  $\text{Fc}220$ ,  $W/B=16\%$  では  $\text{Fc}180$  をそれぞれ満足すると考えられる。
  - 5) 管理用供試体の養生を、 $\text{Fc}220$  では  $40^\circ\text{C}$  加熱養生、 $\text{Fc}180$  では  $40^\circ\text{C}$  加熱養生もしくは標準水中養生とすることで、構造体コンクリートの合理的な管理が可能と考えられる。

謝辞 本検討にあたり、太平洋セメント(株)、(株)日本シーカ、大平洋金属(株)、東京理科大学 兼松学准教授ならびに研究室各位に協力頂きました。感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 松田拓ほか: 細骨材の違いが超高強度コンクリートの性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1117-1122, 2015
- 2) 加納嘉ほか: 超高強度コンクリートの自己収縮特性評価手法に関する検討, 日本建築学会大会梗概集 (北海道), pp.57-51, 2013
- 3) 松田拓ほか: シリカフェームとフライアッシュを併用した超高強度コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1462-1467, 2014