

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

Study on Manufacturing and Quality of Ultra-Low Shrinkage and Ultra-High Strength Concrete Mixed with Actual Full- Scale Mixer

松田 拓 TAKU MATSUDA
蓮尾 孝一 KOICHI HASUO
峯 竜一郎 RYUICHIRO MINE

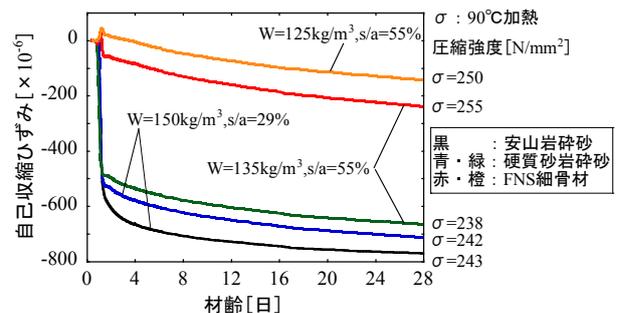
結合材をポルトランドセメントとシリカフェームとフライアッシュの三成分とし、細骨材にフェロニッケルスラグ細骨材を用いた超低収縮・超高強度コンクリートを実機ミキサで製造した。その結果、1) 過去に検討した超高強度コンクリートよりも練混ぜ負荷が小さく、流動性と強度が高まる一方、自己収縮は著しく少なくなり、2) フレッシュ性状と圧縮強度の安定したコンクリートの製造が可能で、3) 部材を断熱材で被覆し養生すると 250N/mm² 級のコア強度が得られ、設計基準強度で 220N/mm² を満足すること等を確認した。
キーワード：超高強度コンクリート、フェロニッケルスラグ細骨材、自己収縮、練混ぜ負荷

Ultra-Low shrinkage and Ultra-High strength Concrete using 3-ingredients binder such as portland cement, silica fume, fly-ash and using ferro-nickel slag fine aggregate was manufactured by actual machine mixer. As the result, the followings are verified 1) In comparison with conventional concrete, mixer load is lower, fluidity and strength development are superior, and autogenous shrinkage decreased remarkably, 2) Concrete with stable fresh property and strength can be obtained, 3) Covered with insulation material at curing, strength reaches to 250MPa and satisfies design strength of 220MPa.

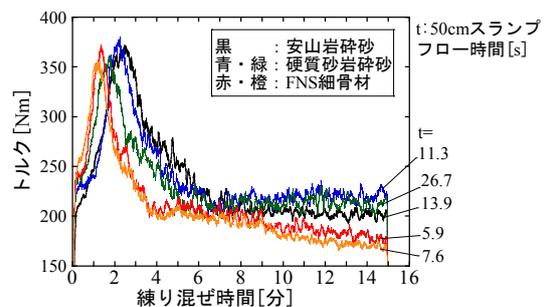
Key Words: Ultra-high Strength Concrete, Ferro-nickel Slag Fine Aggregate, Autogenous Shrinkage, Mixer Load

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¹⁾。図-1は、既報¹⁾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



a) 自己収縮ひずみの測定結果



b) 練混ぜ時のトルク測定結果

図-1 既報¹⁾のコンクリートの性状 (W/B=12%)

投入⇒15分間練り混ぜとした（練混ぜ量は90L）。これを見ると、開発したコンクリートは他より練上がり時のトルクが小さく流動性に優れることに加え、実機ミキサでの製造に際し、練混ぜ負荷に対するミキサの耐久性においても有利と推察される。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, 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，粗骨材に硬質砂岩碎石，鋼繊維を用いた。調合はW/B = 12%と16%とし，Wはそれぞれ135kg/m³と120kg/m³，saは55%とした。

3. 実機ミキサでのコンクリート製造

(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1.67m³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

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 ² /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	碎石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 I種相当品)	密度：2.40 比表面積：5300 cm ² /g	FA
化学混和剤	高性能減水剤（I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

表-2 調合

W/B	S/a	単位量 [kg/m ³]								目標 空気量[%]	スラン プフロー 値 [cm]
		SP	結合材			FNS	G	sf ^{※※}	W		
[%]	[%]	[B×%]	W	SF PC	FA	FNS	G	sf ^{※※}	W		
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

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/mm²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。

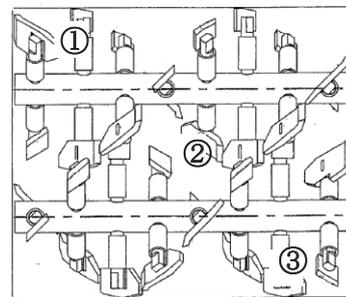


図-2 ミキサ内の試料採取箇所

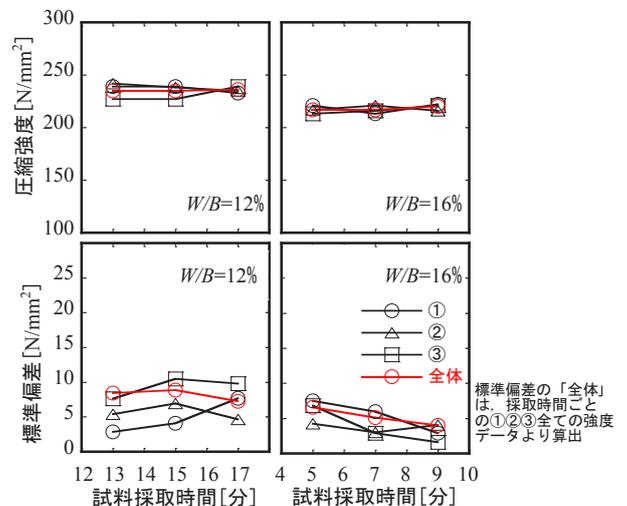


図-3 試料採取時間と圧縮強度（鋼繊維は無添加）

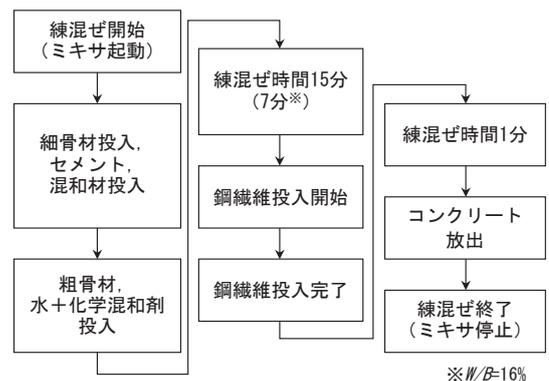


図-4 コンクリートの練混ぜ手順

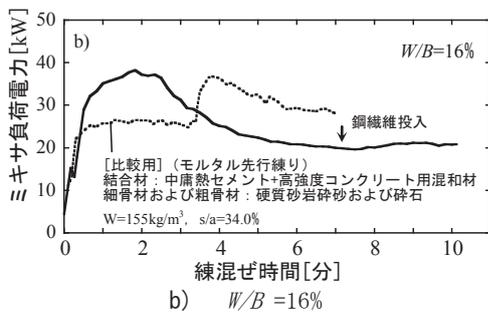
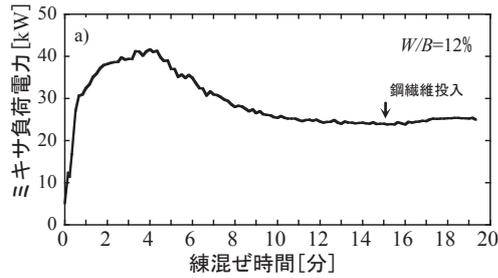


図-5 ミキサ負荷電力の測定結果

(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（0.90m³/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「結合材に中庸熟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²⁾」を同量練り混ぜた時の測定値を併記している。比較用のコンクリートは練混ぜ負荷によるミキサの損傷を懸念し、モルタルを先行練りしている。開発したコンクリートのミキサ負荷電力の測定値は、一括練り（モルタル先行練りをしない）にもかかわらず、比較用のコンクリートに比べ、ピーク時で同等かつ放出時は明らかに小さい。すなわち実機ミキサでの製造において、開発したコンクリートは比較用のコンクリートよりも練混ぜ負荷に対するミキサの耐久性に優れ、また放出時点（もしくは練上がり直後）の

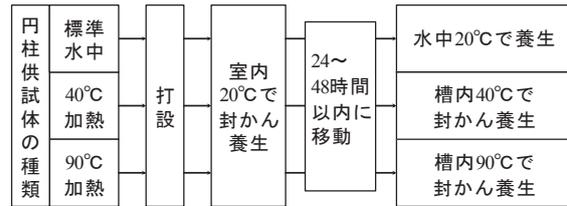
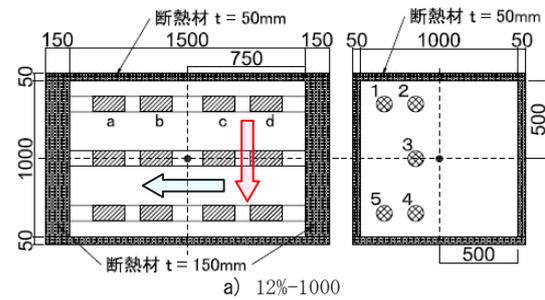


図-6 円柱供試体の種類と養生方法

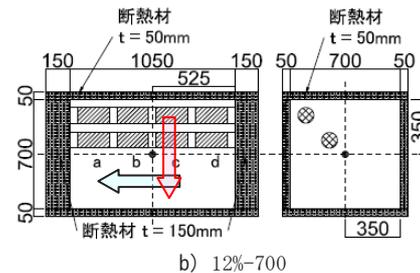
表-3 模擬柱試験体の種類

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

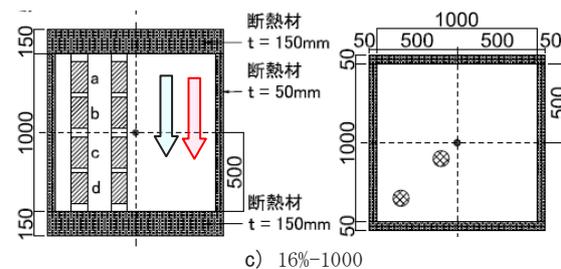
h: 柱軸方向



a) 12%-1000



b) 12%-700



c) 16%-1000

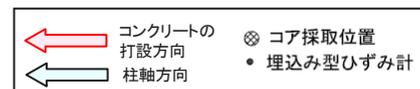


図-7 模擬柱試験体の概要およびコア採取位置

流動性が優れる（ワーカブルである）と確かめられた。

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

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



写真-1 コンクリート打込み状況 ($W/B=12\%$, 冬期)

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分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込み状況を写真-1に示す。

(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℃、22.0~27.0℃、18.0~21.5℃となり、 $W/B=16\%$ では夏期、標準期、冬期それぞれ33.0~34.0℃、24.0~25.0℃、14.0~16.0℃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℃加熱 σ_7) の結果を図-8に示す (材齢n日の圧縮強度を σ_n と表記)。空気量、スランプフロー値とも変動は少なく、目標範囲内にあった。90℃加熱 σ_7 は、 $W/B=12\%$ では夏期、標準期、冬期それぞれ257~266 N/mm^2 、254~263 N/mm^2 、265~277 N/mm^2 の範囲にあり、 $W/B=16\%$ では夏期、標準期、冬期それぞれ215~225 N/mm^2 、211~214 N/mm^2 、233~242 N/mm^2 の範囲にあった。

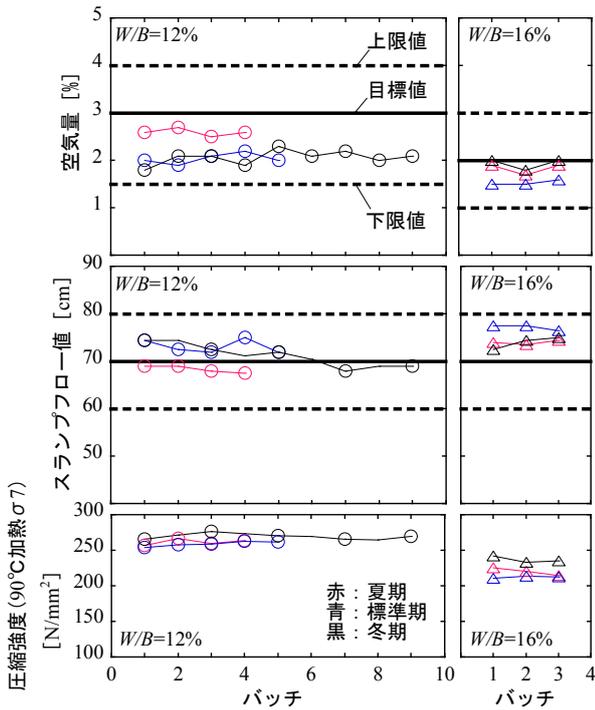


図-8 バッチごとの測定結果

表-4 バッチ間の圧縮強度 (90℃加熱 σ_7) の変動

W/B [%]	季節	平均値 [N/mm^2]	標準偏差 [N/mm^2]	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

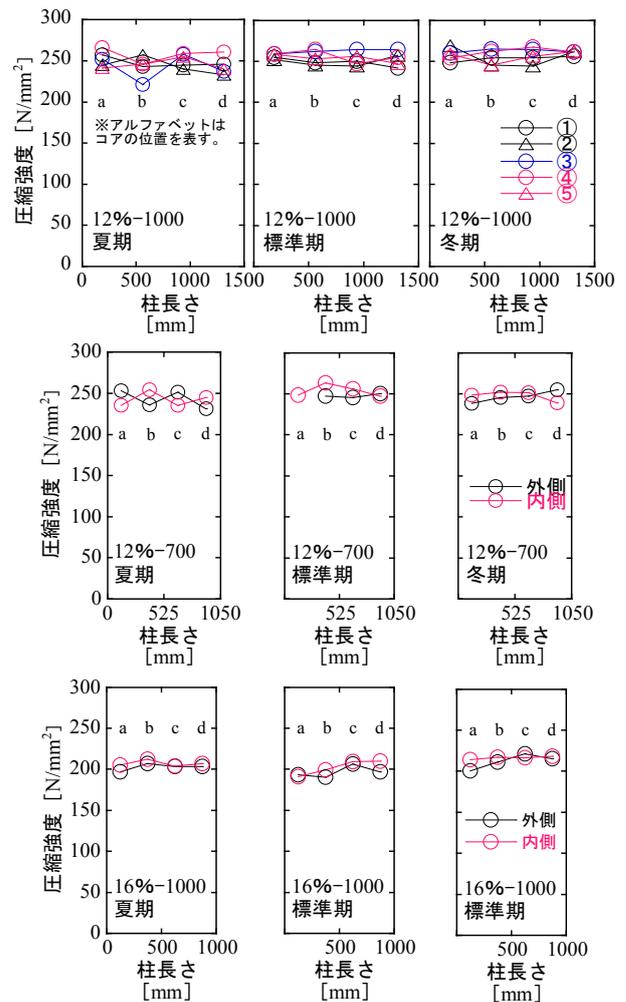


図-9 模擬柱内部の強度の分布 (材齢28日)

表-5 模擬柱試験体コア強度（材齢28日）のまとめ

単位: N/mm ²					
	試験体	各模擬柱の の平均値	W/B ごとの の平均値	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
冬期	16%-1000	214		6.62	201

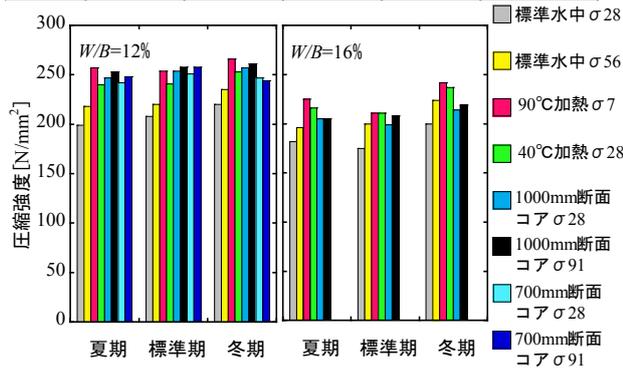


図-10 圧縮強度試験結果

圧縮強度（90℃加熱σ7）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/mm²，0.85～2.37%の範囲にあった。

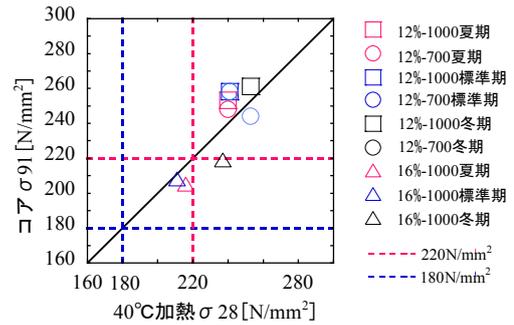
(4) 模擬柱試験体中における強度の分布とばらつき

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，強度の分布は一様であった。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/mm²および180N/mm²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（Fc）220N/mm²および180N/mm²を十分に満足するものと推察される。

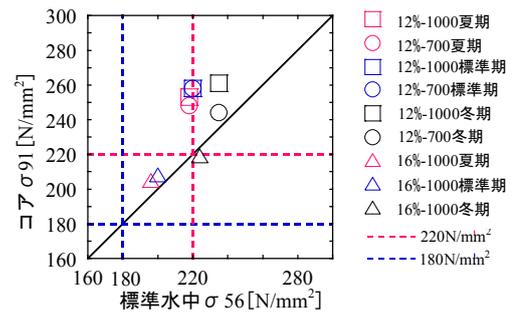
(5) 円柱供試体と模擬柱試験体コアの強度の関係

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。



a) 40℃加熱σ28とコアσ91との関係



b) 標準水中σ56とコアσ91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

W/B=16%の結果を見ると，円柱供試体についてはW/B=12%と同様に標準水中σ28<標準水中σ56<40℃加熱σ28<90℃加熱σ7の関係だが，40℃加熱σ28以外に標準水中σ56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℃加熱σ28および標準水中σ56とコア強度（コアσ91）との関係を図-11に示す。W/B=12%の場合，標準水中σ56はコアσ91よりも明らかに低いものがありかつ220N/mm²を下回っているが，40℃加熱σ28はコアσ91と同等かつ220N/mm²より高い。すなわち，W/B=12%のコンクリートについては40℃加熱σ28を用いることで，構造体コンクリート強度をFc220N/mm²として管理できると考えられる。W/B=16%の場合，40℃加熱σ28と標準水中σ56はどちらもコアσ91と同等かつ180N/mm²より高い。すなわち，W/B=16%のコンクリートについては，40℃加熱σ28と標準水中σ56のどちらを用いても，構造体コンクリート強度をFc180N/mm²として管理できると考えられる。

4. 自己収縮の検討

(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℃条件での自己収縮を確認した。自己収縮試験体は□100×

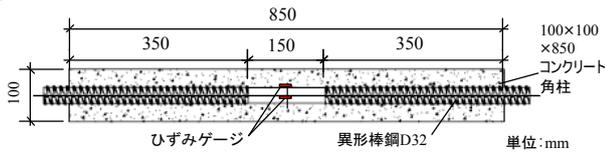


図-12 一軸拘束試験体の概要

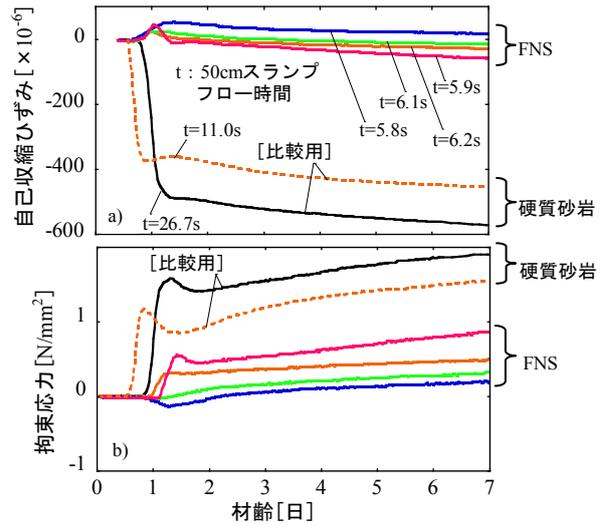
100×400mmの角柱に埋込み型ひずみ計を設置したものである。一軸拘束応力は、既報²⁾で示した□100×100×850mmの角柱にD32の異形棒鋼を配置したものである(図-12)。測定結果を図-13に示す。調合条件は図中に示すとおりであり、単位水量を135~120kg/m³、細骨材種類をFNSと硬質砂岩とし、鋼繊維は添加していない。図中には比較用に、図-5にも示した既報のコンクリートの自己収縮試験結果²⁾を併記している。また、各コンクリートの50cmスランプフロー時間を示している。

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/m³から120kg/m³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²⁾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10×10⁻⁶/°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。

(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1000×1000mm断面の方が、700×700mm断面よりも最高温度が多少高く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



	結合材	細骨材	W/B [%]	単位水量 [kg/m ³]	s/a [%]	備考	
凡例	— (赤)	SFPC+FA	FNS	12	135	55	開発
	— (黒)	SFPC+FA	硬質砂岩	12	135	55	比較
	— (青)	SFPC+FA	FNS	16	120	55	開発
	— (緑)	SFPC+FA	FNS	17	120	55	開発
	— (紫)	SFPC+FA	FNS	18	120	55	開発
	— (点線)	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 ²⁾

図-13 自己収縮試験結果 (室内試験, 20°C条件)

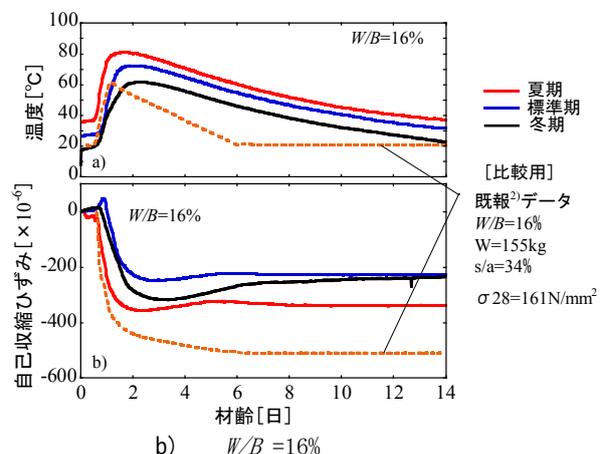
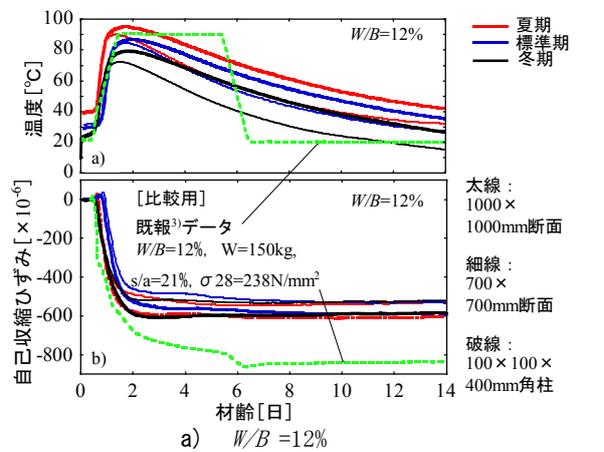


図-14 模擬柱試験体の温度と自己収縮

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700×700mm断面と夏期の1000×1000mm断面とでは最高温度の差は23℃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²⁾³⁾（□100×100×400mm角柱の雰囲気温度を制御）を併記している。既報³⁾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、200N/mm²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²⁾³⁾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³⁾（前者が高温条件、後者が20℃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、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250N/mm²級および200N/mm²級のコア強度が得られる。
- ③ $W/B=12\%$ の構造体コンクリート強度は、管理用供試体の養生を40℃加熱養生とすることで、設計基準強度220N/mm²として合理的な管理が可能と考えられる。
- ④ $W/B=16\%$ の構造体コンクリート強度は、管理用供試体の養生を40℃加熱養生もしくは標準水中養生とすることで、設計基準強度180N/mm²として合理的な管理が可能と考えられる。

謝辞 本開発にあたり、東京大学大学院工学系研究科野口貴文教授にご指導頂きました。また、一連の実験に、東京理科大学 兼松学教授ならびに研究室各位、大

平洋金属㈱、日本シーカ㈱、太平洋セメント㈱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