

# 超高強度プレキャストコンクリートの実用化に関する実験的研究

技術研究所 材工研グループ 中瀬博一  
技術研究所 材工研グループ 鈴木雅博  
技術研究所 藤井和俊

**概要** 超高強度プレキャストコンクリート部材の実用化を目指し、シリカヒューム混入セメントを用い、水セメント比 16~12%のコンクリートについて、フレッシュ性状および硬化性状の検討を行った。その結果、水セメント比 14%、12%のコンクリートは良好な流動性を有し、材齢 56 日で 180N/mm<sup>2</sup>、材齢 365 日で 200N/mm<sup>2</sup> の部材強度を発現した。このことから、良質な骨材を用いることにより、プレキャスト工場既存の設備で  $F_c=150\text{N/mm}^2$  級の高強度コンクリート部材の製造が可能であることが明らかとなった。

**Key Words**: 超高強度コンクリート, プレキャストコンクリート部材, シリカヒューム混入セメント, 実大模擬柱

## 1. 実験目的

昨今、都市部では土地の有効活用の観点から建物の超高層化が進んでおり、使用される現場打ちコンクリートの強度レベルは  $F_c130\text{N/mm}^2$  までが実用化されている<sup>1)</sup>。今後、強度レベルはさらに高まり、 $F_c150\text{N/mm}^2$  級を超えることも予想される。この場合、コンクリートの施工性の確保や品質管理の安定化を考慮すると、部材のプレキャスト化が有効であると考えられる。

そこで本研究では、 $F_c150\text{N/mm}^2$  級の超高強度プレキャストコンクリート部材の実用化を目的とし、室内試験レベルで強度発現性に及ぼす骨材の影響を把握した後、実機レベルで水セメント比(以下、W/C と称す)16%~12%のフレッシュおよび硬化性状に加え実大模擬柱の強度発現性について検討を行った。

## 2. 骨材選定試験

### 2.1 試験概要

使用材料を表-1に示す。セメントは、該強度領域の水セメント比でも良好な流動性が得られるよう開発されたシリカヒューム混入セメント(以下、SFCS と称す)を用い<sup>2)</sup>、骨材は 130N/mm<sup>2</sup> クラスとして実績がある甲州産の安山岩<sup>3)</sup>および、実機プラント周辺で良質なものとして江刺産安山岩および盛岡産閃緑岩を取り上げた。なお、B.S.812-1975「骨材の破碎試験」による各粗骨材の破碎値は、甲州産や江刺産に比べて盛岡産のものが小さい傾向にあった。高性能減水剤は SFCS に対して高い分散性を有し、かつ凝結遅延を損なわないよう改良を施したポリカルボン酸系のものを用いた。爆裂防止繊維はポリプロピレン製のものを用いた。

調合条件を表-2に示す。W/C=12%とし、骨材以外はすべて同一材料を用いて、フレッシュ性状および強度発現性を比較した。

コンクリートの練混ぜは、容量 100 リットルの強制二軸式ミキサ(1 バッチ当たり 55 リットルを練り)を用



中瀬博一



鈴木雅博



藤井和俊

い、空練り(セメントと細骨材を投入)を 30 秒、モルタル練り(水と混和剤を投入)を 270 秒、コンクリート練り(粗骨材を投入)を 90 秒とした。さらに繊維投入後 90 秒間練り混ぜて、各試験に供した。測定項目は、スランプフロー、50cm フロー到達時間、空気量および圧縮強度(材齢 7, 28, 56, 91 日)とした。圧縮強度用供試体は標準養生の他に、図-1 に示す断熱養生箱に材齢 7 日まで養生し、その後は各材齢まで 20℃の封かん養生とした簡易断熱養生を設けた。簡易断熱養生では供試体温度を材齢 7 日まで測定した。

表-1 使用材料

種類	材料	物性
セメント	シリカフェーム混入セメント (SFCS)	密度 3.01g/cm <sup>3</sup> , プレーン比表面積 6550cm <sup>2</sup> /g
細骨材	甲州産安山岩砕砂	表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.50%, 実積率 54.4%, F.M. 2.53
	江刺産安山岩砕砂	表乾密度 2.83g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.97%, 実積率 66.9%, F.M. 3.01
粗骨材	甲州産安山岩砕石	表乾密度 2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.21%, 実積率 60.1%, F.M. 6.64, 破砕値 10.4%
	江刺産安山岩砕石	表乾密度 2.90g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.33%, 実積率 58.2%, F.M. 6.79, 破砕値 10.9%
	盛岡産閃緑岩砕石	表乾密度 2.96g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.38%, 実積率 59.9%, F.M. 6.19, 破砕値 6.8%
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系
繊維	ポリプロピレン	繊維径 18μm, 繊維長 10mm, 密度 0.9g/cm <sup>3</sup> , 含水率 30%

表-2 調合条件

記号	目標		W/C (%)	粗骨材かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	高性能減水剤 (Cx%)	繊維 (Vol.%)	骨材の種類	
	スランプフロー (cm)	空気量 (%)						細骨材	粗骨材
甲-甲	65	2.0	12	0.53	155	2.5	0.25	甲州	甲州
江-甲								江刺	甲州
江-盛								江刺	盛岡
江-江								江刺	江刺

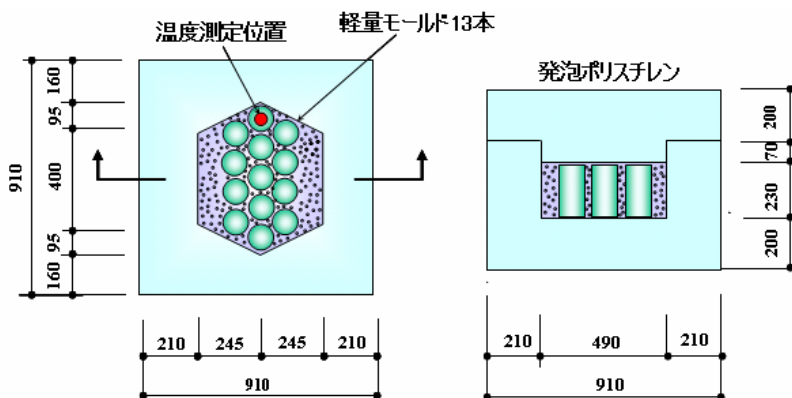


図-1 断熱養生箱

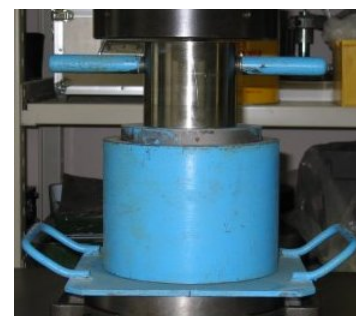


写真-1 骨材破砕試験状況

表-3 フレッシュ性状

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		骨材種別		高性能減水剤 (Cx%)	繊維	スランプフロー (cm)	50cm フロー到達時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)
	W	C	S	G						
12.0	155	1292	甲州	甲州	2.5	混入前	72.0	16.2	1.8	23.5
				甲州		混入後	61.0	34.5	2.5	23.0
			江刺	混入後		60.0	34.5	2.5	24.0	
			盛岡	混入後		61.5	28.2	2.4	23.5	
			江刺	混入後		59.0	39.3	2.5	24.0	

## 2.2 試験結果

### 2.2.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状を表-3に示す。すべての調合で目標とするフレッシュ性状が得られた。甲州産砕砂・砕石の組合せにおける繊維混入前のコンクリートのスランプフローは72cmを得たが、混入後は10cm程度低下した。また、この際50cmフロー到達時間も18秒程度長くなり、他の調合と同様に30秒程度となった。繊維混入後のスランプフローは各骨材の組合せによらず60cm程度であった。

### 2.2.2 供試体温度履歴

簡易断熱養生時の供試体温度履歴を図-2に示す。供試体温度履歴は骨材の種類には影響を受けないものと考えられ、いずれも材齢1.5日で最大温度55℃程度を得てその後漸減し、材齢7日では30℃程度となる履歴であった。

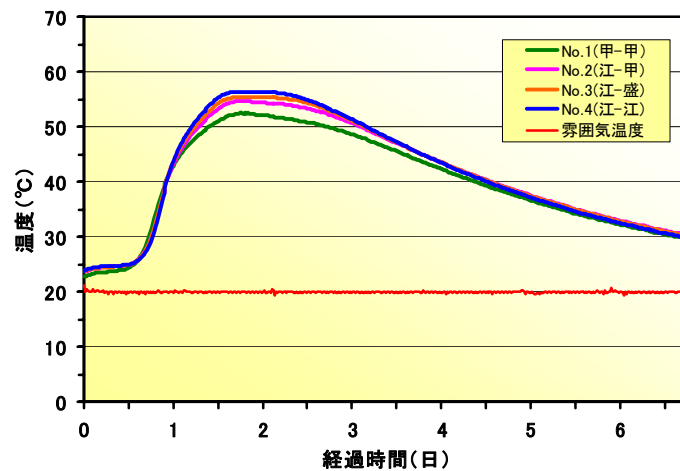


図-2 簡易断熱養生時の温度履歴

### 2.2.3 強度発現性

材齢91日までの簡易断熱養生と標準養生したコンクリートの圧縮強度試験結果を図-3に示す。簡易断熱養生の場合、いずれの骨材の組み合わせも材齢7日の時点で、材齢91日に得られた圧縮強度のほぼ90%を発現し、その後はわずかな増加にとどまった。一方、標準養生の場合、材齢56日から91日にかけても23~47 N/mm<sup>2</sup>の強度増進が認められた。これは、材齢91日に得られた圧縮強度の20%程度に相当した。

標準養生と簡易断熱養生の圧縮強度の関係を図-4に示す。材齢7日では標準養生が100 N/mm<sup>2</sup>程度に対して、簡易断熱養生は160~180 N/mm<sup>2</sup>で大きな差であったのが、材齢の経過で徐々に縮まる傾向にあった。ただし、材齢91日においても簡易断熱養生の方が6~21 N/mm<sup>2</sup>依然として上回る結果であった。この現象は、既に報告されている事例と一致するものであった<sup>3),4)</sup>。

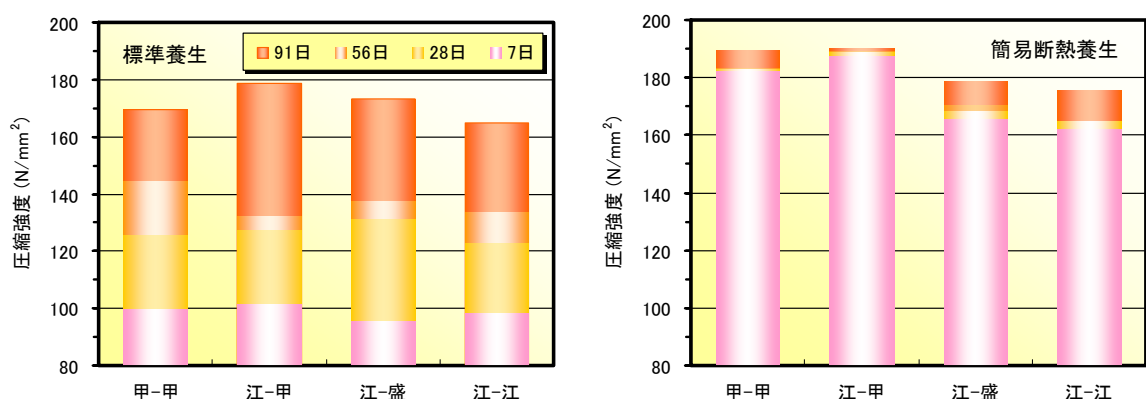


図-3 圧縮強度試験結果

材齢 91 日までの圧縮強度は、いずれの養生方法においても江刺産の細骨材と甲州産の粗骨材の組み合わせが最も高く、標準養生で約 180 N/mm<sup>2</sup>、簡易断熱養生で約 190 N/mm<sup>2</sup>を得た。細骨材を江刺産のものに固定した場合の、各粗骨材の破砕値と圧縮強度の関係を図-5 に示す。粗骨材の破砕値は盛岡産のものが最も小さい（硬度が高い）が、簡易断熱養生および標準養生の材齢 91 日の圧縮強度は、甲州産のものが最も高かったため、両者に相関は認められなかった。本検討で取り上げた粗骨材の破砕値の範疇ではコンクリートの圧縮強度に影響を及ぼしにくく、むしろ粗骨材界面等の影響の方が大きかったものと推察される。

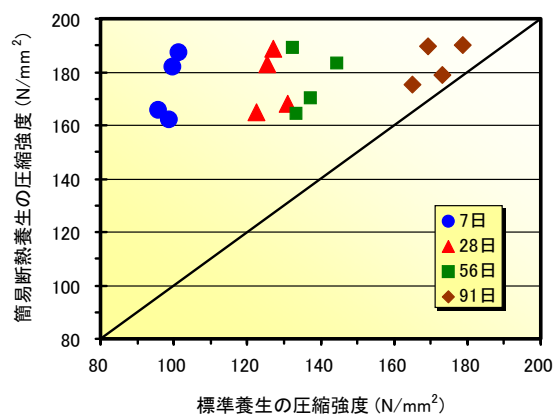


図-4 標準養生と簡易断熱養生との圧縮強度の関係

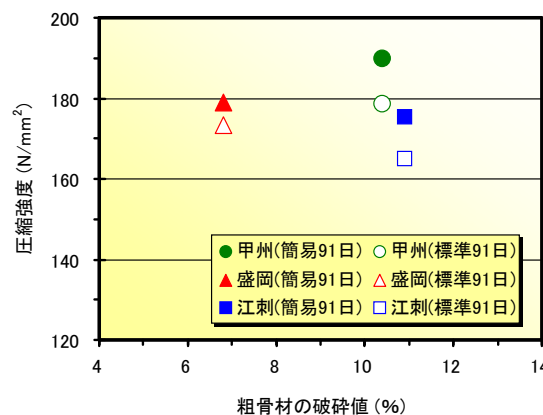


図-5 粗骨材の破砕値とコンクリートの圧縮強度の関係

### 3. 実機による実大模擬部材製造実験

#### 3.1 実験概要

シリカフェーム混入セメントと骨材選定試験で選定した骨材を用いて、150N/mm<sup>2</sup>級の高強度プレキャストコンクリート実大柱部材の実機製造実験を行い、フレッシュコンクリートの性状、および硬化コンクリートの性状について検討を行った。

##### 3.1.1 使用材料

使用材料を表-4 に示す。セメントはシリカフェームを 15%以上添加したシリカフェーム混入セメントを使用し、骨材は江刺産安山岩砕砂と甲州産安山岩砕石を使用した。混和剤はポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用し、爆裂防止用にポリプロピレン繊維（以下 PP 繊維）を所定量添加した。

表-4 使用材料

種類	産地・性質
セメント	シリカフェーム混入セメント（密度 3.01g/cm <sup>3</sup> ）
細骨材	江刺産安山岩砕砂（密度 2.83g/cm <sup>3</sup> ,吸水率 0.97%,F.M.3.01,実積率 66.9%）
粗骨材	甲州産安山岩砕石 2005（密度 2.64g/cm <sup>3</sup> ,吸水率 2.07%,F.M.6.64,実積率 59.5%）
混和剤	高性能減水剤（ポリカルボン酸系）
繊維	ポリプロピレン繊維（径 18μm,長さ 10mm）

##### 3.1.2 調合条件および実施調合

調合条件は目標スランプフロー65cm、目標空気量 2.0%とした。表-5 に実施調合を示す。

調合は粗骨材かさ容積を 0.53m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>一定とした。また、PP 繊維は W/C 毎に変化させた所定量を添加した。

##### 3.1.3 練混ぜ方法

コンクリートの製造は 2.2m<sup>3</sup>の強制練り二軸ミキサを用い、0.70m<sup>3</sup>を 1 バッチとして 2 バッチを練混ぜてフレッシュ性状の測定、実大の模擬柱の製造および各種強度試験用供試体の作製を行った。練混ぜはモルタル先練り方式とした。練混ぜ方法および時間を図-6 に示す。

モルタルの先練り時間が W/C が小さくなるに従って長くなったのは、この種のコンクリートを練り混ぜるためのミキサの能力がやや不足していたためであると考えられる。

表-5 実施調査

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				(C×%)	Vol.%
		W	C	S	G	SP	繊維
16	36.7	155	969	522	828	1.3	1.5
14	30.3		1107	392		1.6	2.0
12	19.5		1292	219		2.5	2.5

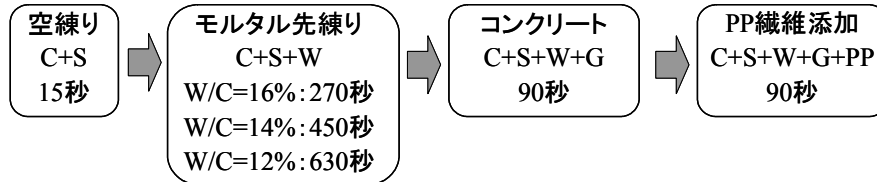


図-6 コンクリートの練混ぜ方法および練混ぜ時間

3.1.4 試験項目

試験項目を表-6に示す。また、図-7に模擬柱の温度測定およびコア採取位置を示す。模擬柱は厚さ100mmの発泡ポリスチレン板で上下を断熱する900×900×1100mmの柱型枠内に練混ぜ直後のコンクリートをコンクリートバケットを用いて打設し作製した。

なお、単位水量は電子レンジ法(UME法<sup>5)</sup>)により測定した。

表-6 試験項目

試験項目	試験方法
スランプフロー	JIS A 1150
50cm フロー到達時間	同上
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	デジタル温度計
単位水量	電子レンジ法(UME法)
温度履歴	模擬柱, 簡易断熱養生
圧縮強度	標準養生, 簡易断熱養生, 構造体コア強度: 材齢 7,28,56,91,182,365 日

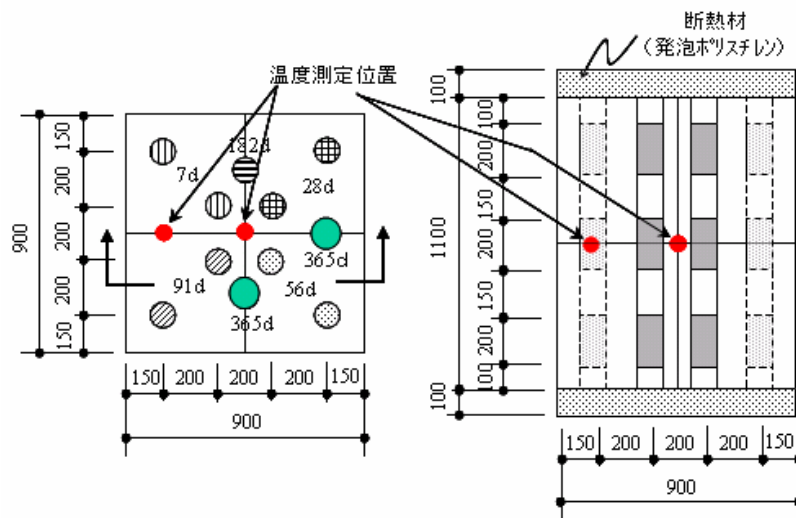


図-7 模擬柱の寸法, 温度測定位置, コア採取位置

## 3.2 実験結果

### 3.2.1 フレッシュ時の性状

フレッシュコンクリートの性状，単位水量試験結果および模擬柱，簡易断熱養生の最高温度と最高温度到達時間を表-7に示す。W/C=16%，14%の調合でのスランブフロー，空気量は目標を満足し，50cmフローの到達時間も15～20秒で，良好な流動性を有するコンクリートが製造できた。しかし，W/C=12%では高性能減水剤を2.5%添加しても，目標のスランブフローは得られず，また，50cmフローの到達時間も70秒を越えた。ただし，W/C=12%の調合では良好な流動性は得られなかったものの，コンクリートバケットによる施工は十分可能であった。

図-8に練混ぜ直後と30分経過後のスランブフローを示す。30分経過後のスランブフローは練混ぜ直後と同等かやや低下する程度で，30分経過後も十分な施工性を維持していた。また，空気量は0.3～0.5%減少した。

### 3.2.2 単位水量

練混ぜ直後に測定した単位水量はW/C=16%で約 $5\text{kg/m}^3$ 多かった以外は，ほぼ調合どおりの単位水量が得られた。

### 3.2.3 模擬柱および簡易断熱養生の温度履歴

図-9に模擬柱中心部最高温度と簡易断熱養生供試体最高温度の関係を示す。W/Cが小さくなるに従い模擬柱中心部最高温度は高くなった。しかし，使用したシリカフェーム混入セメントは低熱セメントベースであるため，最も高いW/C=12%のもので $60^\circ\text{C}$ 程度であった。簡易断熱養生供試体最高温度もW/Cが小さくなるに従い高くなった。また，いずれのW/Cにおいても，模擬柱中心部最高温度は簡易断熱養生供試体最高温度に比べ $10^\circ\text{C}$ 程度高くなる傾向であった。

表-7 フレッシュ時の性状および模擬柱、簡易断熱養生の温度履歴

W/C (%)	スランブフロー (cm)	50cmフロー時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 ( $^\circ\text{C}$ )	単位水量 ( $\text{kg/m}^3$ )	温度履歴					
						模擬柱中心		模擬柱外側		簡易断熱	
						温度 ( $^\circ\text{C}$ )	到達日 (日)	温度 ( $^\circ\text{C}$ )	到達日 (日)	温度 ( $^\circ\text{C}$ )	到達日 (日)
16	67.0	16.6	2.6	19.5	+5.3	55.6	1.91	46.8	1.21	47.0	1.43
14	66.0	19.3	2.7	21.0	-0.4	57.7	1.13	49.3	1.21	48.5	1.46
12	58.0	72.6	3.0	21.0	+0.2	59.2	1.46	49.2	1.38	49.7	1.50

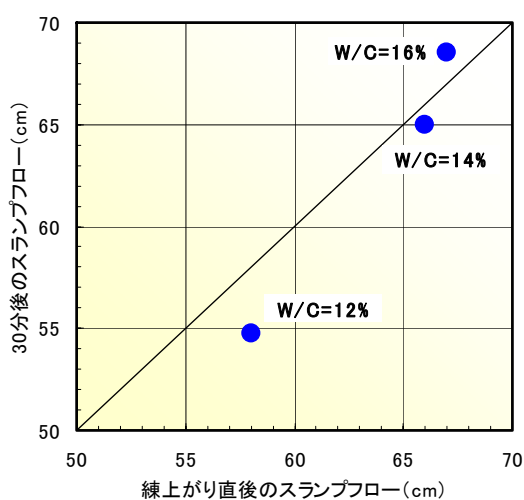


図-8 練上がり直後と30分後のスランブフローの関係

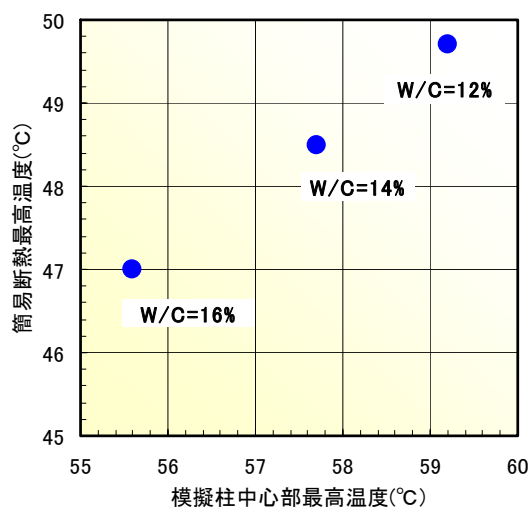


図-9 模擬柱中心部最高温度と簡易断熱養生供試体最高温度の関係

図-10に模擬柱および簡易断熱養生の温度推移を示す。W/Cが小さくなるにつれて最高温度は高くなるものの、その差はW/C=2%の差で2°C程度と僅かであった。模擬柱の中心と外側の温度の差は8~10°Cであった。また、最高温度の到達時間は1.2~1.5日で、高性能減水剤の添加量が増加することによりやや遅くなった。簡易断熱養生の最高温度は模擬柱の外側の最高温度とほぼ同等であった。また、模擬柱に比べると最高温度への到達時間も長く、温度降下も緩やかであった。

### 3.2.4 強度発現性

#### (1) 材齢と強度発現性の関係

図-11に材齢365日までの標準、簡易断熱および模擬柱コアの圧縮強度試験結果を示す。全体の傾向として、コア強度および簡易断熱養生したものは強度が高く、材齢56日にW/C=12%および14%で180N/mm<sup>2</sup>以上が得られた。コア外周部は20~30N/mm<sup>2</sup>の一定の差で中心部より低い強度で材齢91日まで推移したが、材齢の経過とともにその差は縮まる傾向にあった。標準養生は材齢7日の強度は低い、その後材齢の経過で徐々に強度が増進し、材齢91日ではいずれのW/Cにおいてもコア外周部より強度が上回った。しかし、材齢91日以後の強度の増進はほとんど認められなかった。

簡易断熱養生と模擬部材中心部の積算温度は、材齢7日で積算温度は298~315°D・Dであったのに対し、コア外周部は270~282°D・Dであったことが、強度発現性に影響を及ぼしていると考えられる。また、コア中心部、外周部のいずれも材齢56日から91日にかけて強度の伸びはきわめて小さかった。これは、本実験が寒冷地において10月初旬に行われ、材齢56日から91日では月平均気温が-0.9~2.8°Cの気温条件であったことが一因として考えられた。しかし、材齢91日以後では、雰囲気温度の上昇とともに、いずれのW/Cでも材齢91日から材齢365日までに約30N/mm<sup>2</sup>のコア強度の増進が認められ、W/C=14%および12%ではコア中心部、外周部平均で200N/mm<sup>2</sup>が得られた。

一般的に、高強度コンクリートでは、初期材齢に高温履歴を受けると、長期材齢での強度の増進が小さくなることが知られている。しかし、本実験では低熱ポルトランドセメントをベースにしたセメントを使用していることから、最高温度は模擬柱中心部で60°C以下、模擬柱外周部では50°C以下に抑えられた。このため、部材中心部の高温履歴による強度発現性への影響は小さく、積算温度が小さいコア外周部がコア中心部に比べ強度発現性が小さくなったと考えられる。このような低水セメント比の領域では、安全かつ合理的な調合を行うには、打込み時期に応じて、内外部の強度発現性の差が小さく、なおかつ過度な内部温度上昇による強度発現性への影響が生じないような、養生方法などの検討が必要であると考えられる。

#### (2) 簡易断熱養生強度とコア強度の関係

図-12に簡易断熱養生強度とコア強度の関係を示す。模擬柱中心部コア強度と簡易断熱養生強度は

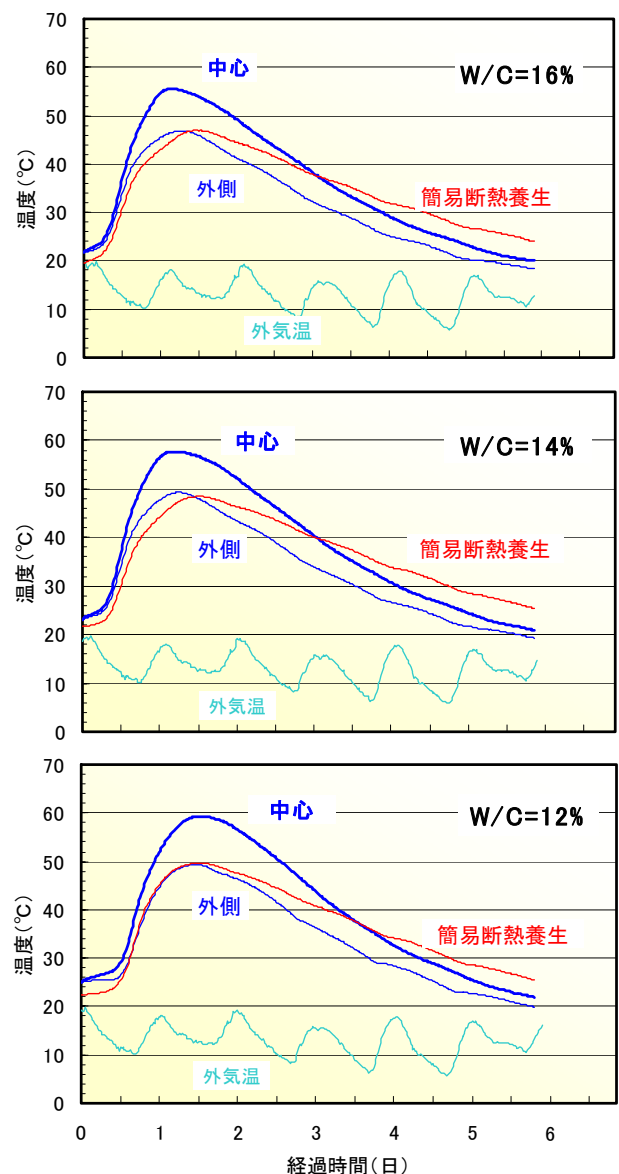


図-10 模擬柱および簡易断熱養生の温度推移

いずれの強度レベルにおいても高い相関関係にあり、簡易断熱養生を用いて部材中心部の強度を推定することが可能であると考えられた。また、中心部よりも低い温度履歴であった外周部コア強度は、いずれの強度レベルでも、簡易断熱養生強度と比べ、小さい値を示した。しかし、その相関性は高く、簡易断熱養生供試体を用いて外周部コア強度も推定できる可能性が示唆された。

(3) 標準養生強度とコア強度の関係

図-13に材齢28日標準養生強度と材齢91日コア強度の関係を示す。模擬柱中心部、外周部とも91日コア強度は標準養生28日強度を上回る結果となった。しかし、強度の増進に従いその差は小さくなる傾向にあった。

(4) 構造体内部温度と強度の関係

図-14, 図-15に模擬柱内部最高温度および温度上昇量と、標準養生28日強度に対する材齢91日コア強度の比の関係を示す。模擬柱中心部、外周部いずれの場合も、模擬柱内部最高温度が高くなると、標準養生28日強度に対する材齢91日コア強度の比は大きくなる傾向にあった。また、いずれの場合も1.0以上であった。

また、模擬柱内部温度上昇量が大きくなると標準養生28日強度に対する材齢91日コア強度の比は大きくなる傾向であった。

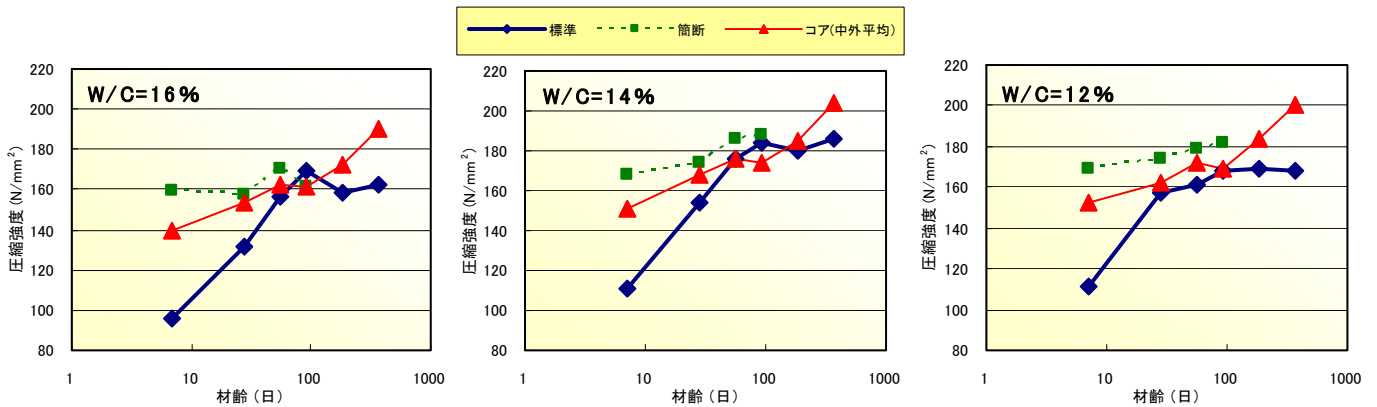


図-11 材齢と圧縮強度の関係

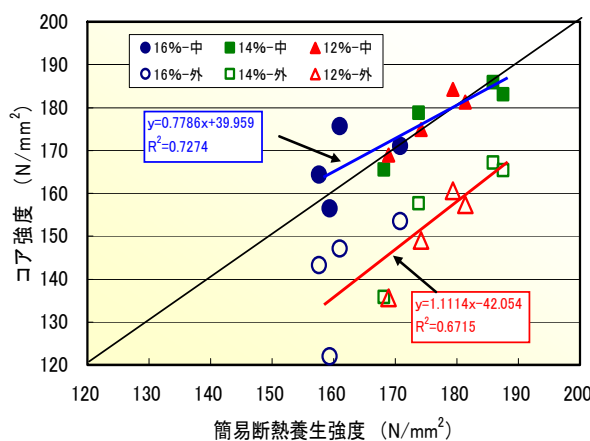


図-12 簡易断熱養生強度とコア強度との関係

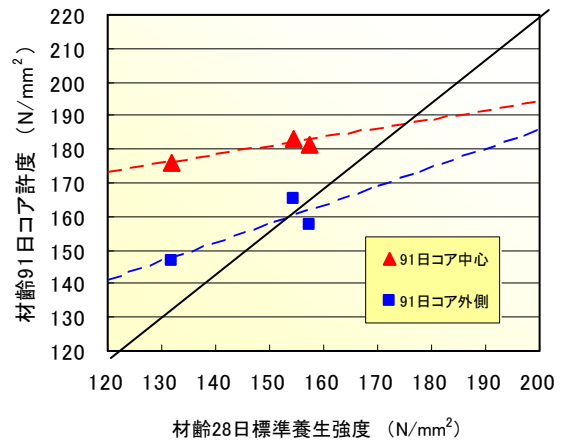


図-13 材齢28日標準養生強度と91日コア強度との関係



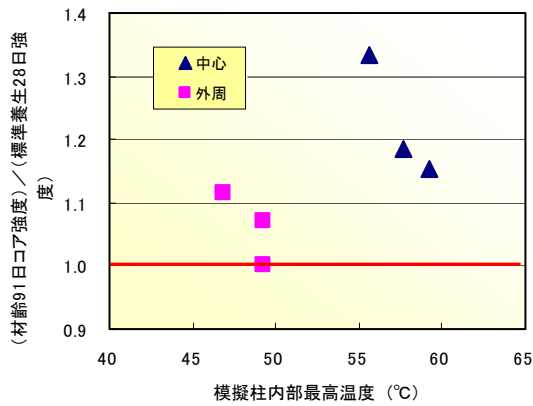


図-14 実大模擬柱内部最高温度と標準養生28日強度に対する材齢91日コア強度

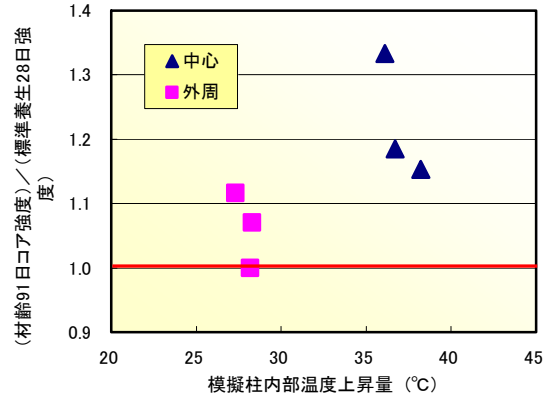


図-15 実大模擬柱内部温度上昇量と標準養生28日強度に対する材齢91日コア強度

#### (5) セメント水比と圧縮強度の関係

図-16にセメント水比と圧縮強度の関係を示す。材齢91日における中心部のコア強度はW/C=12%, 14%で180N/mm<sup>2</sup>以上であったが、外周部のコア強度は最も強度発現が認められたW/C=14%でも165N/mm<sup>2</sup>にとどまった。しかし、中心部と外周部の強度の差は、強度の増進とともに小さくなる傾向にあり、材齢365日ではW/C=14%で同等、W/C=16, 12%で10N/mm<sup>2</sup>程度となった。また、いずれの材齢・養生方法の場合でもセメント水比が7.14 (W/C=14%)で強度増加の頭打ちが認められた。これは、既往の文献<sup>6)</sup>と同様の結果であった。

本研究で扱ったセメント水比域においては、セメントに対しての絶対水量が不足しており、未水和の結合材が多く存在し、水和物の生成による水和組織の緻密化に要する時間が必要となる。このため、材齢91日においてW/C=14%で最も強度発現が認められた。材齢365日でも同様に強度の頭打ち現象が認められたためW/Cの下限がある事が推測された。

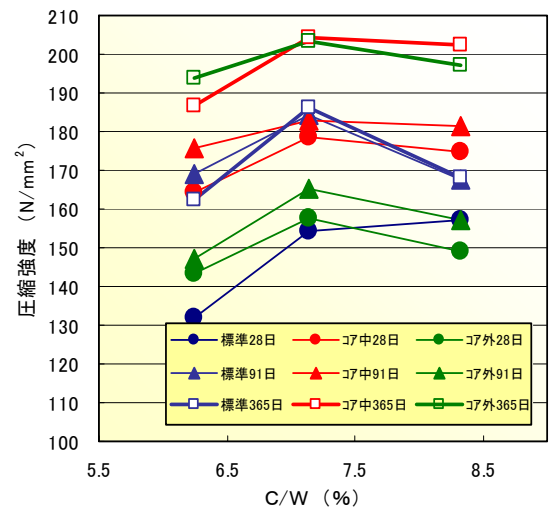


図-16 セメント水比と圧縮強度の関係

#### 4. まとめ

以上のようにW/C=12~16%のシリカフェーム混入セメント用いた高強度コンクリート部材のコア強度は、材齢91日で180N/mm<sup>2</sup>、材齢365日で200N/mm<sup>2</sup>が得られた。よって、適切な骨材を選定し、単位水量等の管理を行うことにより、プレキャスト工場既存の設備でFc150N/mm<sup>2</sup>級の高強度コンクリート部材を、製造することが可能であることが明らかとなった。

また、シリカフェーム混入セメントを用いたプレキャストコンクリート部材は、初期の積算温度の不足により初期材齢での強度増進が小さい。しかし、材齢91日以降の強度の増進が認められたため、実際の出荷時期を考慮し、効率の良い経済的な調合設計をするため最適な養生方法についても検討を行う必要があると考えられる。

## 謝辞

本研究は宇部三菱セメント研究所との共同研究であり、実施にあたりエヌエムビー中央研究所および(株)ポゾリス物産の方々に多大なご尽力をいただきました。ここに付して深謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 黒岩秀介ほか：設計基準強度 130N/mm<sup>2</sup> の超高強度コンクリートの施工について、コンクリートテクノ、Vol.23, No.6, pp.9-13, 2004.1
- 2) 石中正人ほか：150N/mm<sup>2</sup> 級超高強度コンクリートに関する実験的研究(その1.コンクリートの各種性状)、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.539-540, 2004.8
- 3) 陣内 浩ほか：実用化を迎えた【設計基準強度】150N/mm<sup>2</sup> 級超高強度コンクリートの性能、セメント・コンクリート, No.678, pp.10-16, 2003.8
- 4) 菅俣 匠ほか：セメント-シリカフーム系結合材の水和反応と強度発現性の関係に関する一考察、コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1287-1292, 2004
- 5) 高尾ほか：高周波加熱法による迅速単位水量測定方法に関する一考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、pp.1179-1184、2004
- 6) 百瀬晴基、桜本文敏、柳田克巳、Fc150 の超高強度コンクリートの強度発現性状に関する実験的研究(その1 調査による影響)、日本建築学会大会学術講演梗概集, 2002