

論文 150N/mm² 級超高強度コンクリートに関する実験的研究

小林 利充^{*1}・梅本 宗宏^{*2}・大内 一之^{*3}・和田 高清^{*4}

要旨: 近年, 高層集合住宅の需要が拡大する中, 設計基準強度の要求も非常に高いものとなっている。本研究では, 150N/mm² 級超高強度コンクリートの実用化を目的として, 練混ぜ方法, 使用材料および調合がコンクリートの性状に及ぼす影響について検討し, さらに, 小型柱部材による構造体コンクリート強度の検討を行っている。その結果, 練混ぜ方法によっては, 低水結合材比においても流動性は改善される傾向にある。また, 結合材の影響としては, 低水結合材比において差異が見られる。さらに, 超高強度領域における強度補正值と水結合材比の関係は, 水結合材比の減少に伴って減少する傾向にある。

キーワード: 超高強度コンクリート, 結合材, フレッシュ性状, 圧縮強度, 温度性状

1. はじめに

「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」(New RC プロジェクト)¹⁾の成果が発表されて以来, 高層建築物に鉄筋コンクリート(RC)造が適用される傾向が増加している。一般に, 高層 RC 造建築物を建設する場合, 設計基準強度の要求も非常に高いものとなり, その要求を満たすため, 高強度コンクリートを適応することが必須条件となり, 近年においては, 設計基準強度 130N/mm² までの超高強度コンクリートが実用化され²⁾, 今後はさらに高強度化が進むものと考えられる。

本研究では, 150N/mm² 級超高強度コンクリートの実用化を目的として, 練混ぜ方法, 使用材料(混和剤・結合材)および調合がコンクリートの性状に及ぼす影響について検討し, さらに, 小型柱部材による構造体コンクリート強度の検討を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 概要

本実験は, 目的ごとに 4 項目のフェーズに分

類し, 各種実験を行った。各フェーズの実験概要を表-1に示す。なお, 各フェーズとも, 恒温(20℃)にて実験を行い, 小型柱部材及び簡易断熱養生供試体は, 脱型後から試験までの期間は, 恒温恒湿室(20℃, 60%RH)に静置した。又, コンクリートの練り混ぜには, 水平二軸形強制練りミキサ(100リットル)を使用した。

表-1 各フェーズの実験概要

分類	概要
フェーズ 1	練混ぜ方法の検討: 結合材の投入方法および練混ぜ時間を要因として, フレッシュ性状の検討を行った。
フェーズ 2	混和剤の検討: 4種類の高性能減水剤を用いて, 結合材および水結合材比を変えた調査について, フレッシュ性状および硬化性状について検討を行った。
フェーズ 3	結合材の検討: 4種類の結合材を選定し, さらに, 一部の結合材については, 混和材としてシリカフェーム(顆粒/半顆粒)およびフライアッシュと組み合わせ, フレッシュ性状および硬化性状について検討を行った。
フェーズ 4	小型柱部材の検討: 温度上昇に伴う構造体コンクリートへの影響を検討するため, 実大柱の4分の1スケールをモデル化した小型柱部材を作製し, 結合材の種類および水結合材比が温度性状および強度性状(コア強度)に及ぼす影響について検討を行った。また, 併せて, コア強度と簡易断熱養生強度の関係について検討を行った。

*1 西松建設(株) 技術研究所 技術研究部建築技術研究課 博(工) (正会員)

*2 戸田建設(株) 技術研究所 材料グループ 工修 (正会員)

*3 戸田建設(株) 技術研究所 材料グループ 工修 (正会員)

*4 西松建設(株) 技術研究所 技術研究部建築技術研究課

2.2 使用材料および調合条件

各フェーズで使用した材料を表-2に、調合と実験の対応を表-3に示す。ここで、結合材の選定に関しては、混和材をあらかじめセメント工場でプレミックスしたタイプと、結合材と混和材をコンクリート製造時にミックスするタイプを考慮して選定した。なお、フェーズ3およびフェーズ4で使用した混和剤は、結合材SC、HCおよびLCではBを、結合材VCではAとした。

表-2 使用材料

分類	種類
結合材 (B)	シリカフェーム混入セメント (SC) (密度: 3.08g/cm ³)
	3成分混合セメント (VC) (密度: 2.99g/cm ³) 構成 [N: SG: SF = 7: 2: 1 (質量比)] ※
	高ビーライト系中庸熟ポルトランドセメント (HC) (密度: 3.20g/cm ³ , C ₂ S: 46%)
	低熟ポルトランドセメント (LC) (密度: 3.22g/cm ³ , C ₂ S: 52%)
細骨材 (S)	岩瀬産砕砂 (表乾密度: 2.59g/cm ³ , FM: 2.99)
粗骨材 (G)	岩瀬産砕石 (表乾密度: 2.65g/cm ³ , FM: 6.88)
混和材	シリカフェーム粉体 (SP) (密度: 2.20g/cm ³ , 比表面積: 200,000cm ² /g)
	シリカフェーム半顆粒 (SD)
	フライアッシュ (FF) (密度: 2.40g/cm ³ , 比表面積: 5,630cm ² /g)
混和剤 (Ad)	4種類(A, B, CおよびD)のポリカルボン酸系高性能減水剤
水 (W)	上水道水

[注]N: 普通ポルトランドセメント,

SG: スラグ石膏微粉末, SF: シリカフェーム

また、調合の基本は、粗骨材かさ容積を0.51m³/m³とし、目標スランプフローを65から75cm、目標空気量を1.0から2.0%とした。さらに、混和剤の固形分量は、外割りで水量を補正した。

2.3 試験項目

フレッシュ性状および硬化性状に関する試験項目および試験方法を表-4に示す。なお、小型柱部材の概要を図-1に示す。

表-4 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランプフロー (SF)	JIS A 1150
空気量 (Air)	JIS A 1128
O ロート (O)	土木学会 JSCE-F 512
コンクリート温度 (C.T.)	棒状温度計
圧縮強度試験 (標準養生・簡易断熱養生)	JIS A 1108
圧縮強度試験 (コア)	JIS A 1107
コンクリートの温度履歴	CC 熱電対

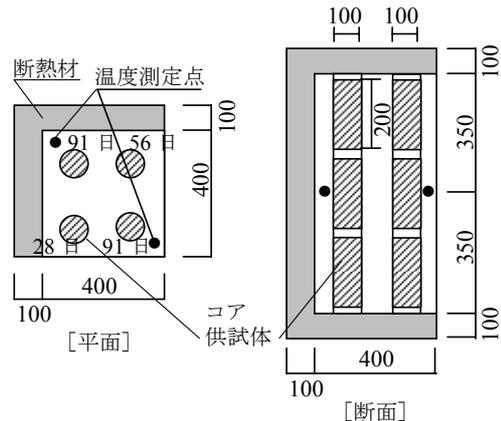


図-1 小型柱部材の概要

表-3 調合と各フェーズの対応

記号	結合材の種類	混和材の種類	混和剤の種類	W/B (%)	S/a (%)	W (kg)	B (kg)	SP (kg)	SD (kg)	FF (kg)	S (kg)	G (kg)	Ad (B×%)	フェーズ		
SC-16	SC	-	-	A B C D	16	39.8	155	969	-	-	-	536	829	1.7~2.65	2~4	
SC-14				- B - -	14	36.4	150	1072	-	-	-	464	829	2.75	1	
SC-13				A B C -	14	34.2	155	1108	-	-	-	420	829	2.75~4.0	2.4	
SC-12				A B - D	13	30.1	155	1192	-	-	-	350	829	2.54~4.25	2~4	
VC-16	VC	-	-	A B C -	16	38.7	155	969	-	-	-	513	829	1.6~3.2	2~4	
VC-14				A B C -	14	32.5	155	1108	-	-	-	391	829	2.0~5.0	2.4	
VC-13				A - - -	13	28.2	155	1192	-	-	-	319	829	6.0	3.4	
VC-12				- B C -	12	22.3	155	1292	-	-	-	233	829	4.0~5.0	2	
HC-SD-20	HC	SD	-	- B - -	20	46.2	155	698	-	78	-	697	829	1.20	3	
HC-SD-16				- B - -	16	39.6	155	872	-	97	-	531	829	1.40	3.4	
HC-SD-13				- B - -	13	29.8	155	1073	-	119	-	344	829	2.00	3.4	
HC-SP-16				- B - -	16	39.6	155	872	97	-	-	531	829	1.30	3	
HC-SP-13		- B - -	13	29.8	155	1073	119	-	-	344	829	1.70	3			
HC-SP-FF-16		SP FF	- B - -	16	38.5	155	775	97	-	97	508	829	1.15	3		
LC-SD-20		LC	SD	-	- B - -	20	46.3	155	698	-	78	-	699	829	1.10	3
LC-SD-16					- B - -	16	39.8	155	872	-	97	-	536	829	1.30	3.4
LC-SD-13	- B - -				13	30.1	155	1073	-	119	-	350	829	1.65	3	
LC-SP-16	- B - -		16	39.8	155	872	97	-	-	536	829	1.10	3			
LC-SP-13	- B - -		13	30.1	155	1073	119	-	-	350	829	1.475	3.4			
LC-SP-FF-16	SP FF		- B - -	16	38.6	155	775	97	-	97	510	829	1.10	3		

3. 実験結果および考察

3.1 練混ぜ方法の検討（フェーズ1）

表－5には、SCを用いて、水結合材比14%の調合に関して、練混ぜ方法（結合材の投入方法および練混ぜ時間）が超高強度コンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響について示す。試験結果からも分かるように、結合材の投入方法の影響として、一括投入に比べて分割投入した場合、スランプフローに2cm程度の差が見られるものの、50cmフロー到達時間からは、その差が1秒程度と、投入方法による顕著な改善効果は認められない。しかしながら、練混ぜ状況を目視で観察する限りでは、結合材を一括投入した場合には、ミキサ内でダマ状になるが、分割投入した場合には、粒状にはなるがダマ状にはならず、練上がりが早くなる傾向にある。一方、練混ぜ時間に関しては、前述した結合材の投入方法にかかわらず、モルタルの練混ぜ時間を長くすることで、50cmフロー到達時間が早くなり、特に、No.1とNo.4の比較では、スランプフローに2cm程度の差が見られるものの、練混ぜ時間を長くすることで、50cmフロー到達時間が、8秒（37%）程度早くなり、流動性の改善効果が見られた。これは、低水結合材比においても、十分な練混ぜを行うことにより、流動性が改善されることを示唆するものと考えられる。

3.2 混和剤の検討（フェーズ2）

表－6には、混和剤の種類が超高強度コンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響を示す。

ここで、スランプフローと混和剤の添加量の関係において、混和剤および結合材の種類にかかわらず、水結合材比12%においては、混和剤の添加量を4.5%以上としても、所定のスランプフローが得られなかった。

図－2には、SCを用いた場合の一例として、標準養生強度と水結合材比の関係を示す。この結果からも分かるように、同一の水結合材比における混和剤の影響は、低水結合材比ほど顕著になる。また、混和剤の種類によって、各水結合材比による強度発現性が異なり、本実験の限りでは、混和剤Aの場合は、水結合材比の減少に伴って強度は増加する傾向にある。

表－6 フレッシュ性状（混和剤の検討）

記号	添加量 (B ×%)	フレッシュ性状				
		SF (cm)	50cm (sec)	O (sec)	Air (%)	C.T. (°C)
SC-16-A*	2.65	63.5	11.2	39.8	1.6	23.0
SC-16-B	2.20	73.0	8.3	32.9	2.2	23.5
SC-16-C	2.10	75.5	8.7	35.6	1.8	24.0
SC-16-D	1.70	72.5	9.6	27.9	1.1	23.0
SC-14-A	4.00	64.5	17.1	57.2	1.8	24.0
SC-14-B	2.75	68.5	14.5	51.5	1.5	24.0
SC-14-C	3.50	69.5	14.9	80.7	1.9	24.0
SC-13-D	2.54	70.0	16.8	49.6	1.5	24.0
SC-12-A	4.50	63.5	22.0	73.1	2.6	24.5
SC-12-B	4.50	58.0	36.3	109.0	2.6	24.5
SC-12-C	5.50	55.5	62.5	179.6	2.6	25.5
VC-16-B	1.60	69.0	7.3	32.3	1.6	24.0
VC-16-C	1.60	71.5	9.1	30.3	1.7	24.0
VC-14-A	2.20	73.0	7.2	31.1	1.8	24.0
VC-14-B	2.00	72.0	10.8	43.2	2.0	24.5
VC-14-C	2.10	72.0	11.7	40.8	2.0	24.0
VC-12-B	4.00	64.0	21.0	78.3	2.7	25.0
VC-12-C	5.00	63.0	24.6	63.0	2.2	25.0

[注] *：混和剤の種類

表－5 フレッシュ性状（練混ぜ方法の検討）

No	練混ぜ方法	練混ぜ時間(sec)		フレッシュ性状			
		M*	C**	SF (cm)	50cm (sec)	Air (%)	C.T. (°C)
1	S+C→15→W→120→G→120（一括）	120	120	68.0	20.9	2.0	24.0
2	S+C/2→15→W→30→C/2→90→G→120（分割）	120	120	66.0	19.5	1.8	24.5
3	S+C/2→15→W→30→C/4→30→C/4→60→G→120（分割）	120	120	65.5	21.2	1.9	24.5
4	S+C→15→W→180→G→120（一括）	180	120	70.0	13.1	2.0	24.5
5	S+C/2→15→W→30→C/4→30→C/4→120→G→120（分割）	180	120	72.0	13.8	1.9	24.5

[注] *：モルタルの練混ぜ時間（空練りの時間を除く）、**：コンクリートの練混ぜ時間（G投入後）

一方、混和剤 B の場合は、水結合材比 14% で最大値になる傾向にあり、混和剤 C の場合、水結合材比の減少に伴って強度も低下する傾向にある。ここで、低水結合材比において、混和剤による強度差が生じた要因としては、空気量は同一であるが、混和剤の種類によって、スランプフローに差があり、十分な練混ぜができておらず、強度に影響した可能性があるものと考えられる。

3. 3 結合材の検討 (フェーズ 3)

図-3には、50cm フロー到達時間とスランプフローの関係を示す。ここで、流動性の検討として、スランプフローが大きい場合、それに伴って 50cm フロー到達時間も早くなると仮定すると、水結合材比 16% では、結合材による影響があまり見られないが、水結合材比 13% になると、結合材による影響が見られ、HC-SD において、流動性の低下が見られる。なお、図中の破線は水結合材比ごとの回帰式を示す。

図-4には、結合材の種類が標準養生強度 (W/B : 13 および 16%) に及ぼす影響を示す。なお、図中に示す数値は空気量を示しており、 $1.5 \pm 0.5\%$ の範囲にあるため、その影響はほぼないものと考えられる。試験結果からも分かるように、結合材の種類が標準養生強度に及ぼす影響としては、材齢 28 日の時点では、水結合材比にかかわらず、HC シリーズが高い傾向にある。しかしながら、材齢が 91 日になると、SC が最も高くなる傾向を示し、特に、水結合材比 16% においては、 196.7 N/mm^2 にも達する。また、シリカフェームのタイプ (粉体・半顆粒) が標準養生強度に及ぼす影響としては、本研究の限りでは顕著な差異は認められないが、フライアッシュの添加により強度発現が若干遅れる傾向が見られる。さらに、SC については、材齢にかかわらず、水結合材比 13% よりも 16% の方が標準養生強度は高くなる傾向にあるのに対し、それ以外の結合材については、水結合材比の減少に伴って、標準養生強度は同程度または高くなる傾向にある。

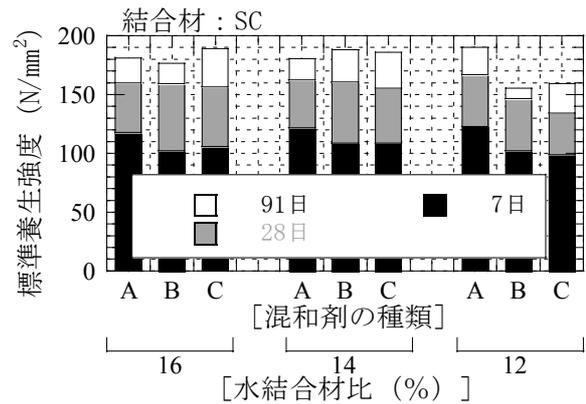


図-2 標準養生強度と水結合材比の関係

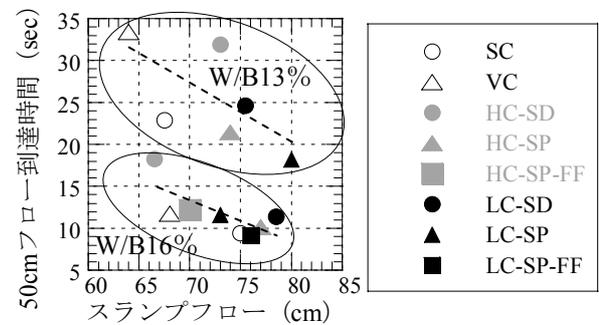
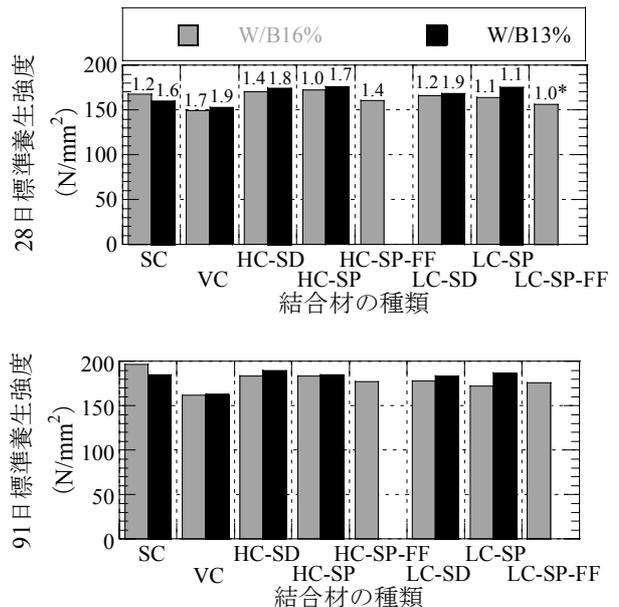


図-3 50cm フロー到達時間とスランプフローの関係



[注] * : 空気量 (%)

図-4 標準養生強度と結合材の種類の関係

3. 4 小型柱部材の検討 (フェーズ4)

図-5には、小型柱部材と簡易断熱養生供試体の最高温度の関係を示す(温度測定位置:小型柱部材内部側を採用)。試験結果からも分かるように、HCおよびLCについては、小型柱部材と簡易断熱養生供試体の最高温度がほぼ一致する結果が得られた。一方、SCおよびVCについては、小型柱部材に比べて、簡易断熱養生供試体の最高温度の方が高い傾向を示した。ここで、既往の文献³⁾によれば、柱部材の方が、簡易断熱養生供試体に比べ、高くなる傾向が予想され、本実験とは異なる傾向にある。この理由として、混和剤の添加量に着目すると、HCおよびLCシリーズは、2.0%以下であるのに対し、SCおよびVCは、それぞれ4.25および6.0%にも達する。これにより、最高温度に達する時間が遅く、小型柱部材からの放熱量が大きくなり、簡易断熱養生に比べて、小型柱部材の方が最高温度が低くなったものと推察される。

図-6には、材齢91日コア強度と水結合材比の関係を示す。試験結果からも分かるように、結合材の種類によって、最大強度と水結合材比の関係は異なっており、SCについては、水結合材比14%で最大(174N/mm²)となり、既往の文献⁴⁾と同様の結果が見られた。一方、VCについては、水結合材比16%で最大(155N/mm²)となるのに対し、HCについては、水結合材比13%で最大(183.5N/mm²)となっている。また、結合材の種類が材齢91日コア強度に及ぼす影響としては、HCが最も高い強度発現性を示している。

ここで、強度補正値を検討する際には、標準養生強度と柱模擬試験体によるコア強度の関係をもとに検討を行うのが一般的であるが、本実験では、柱模擬試験体と併せて、簡易断熱養生を実施した。図-7には、小型柱部材による材齢91日コア強度と簡易断熱養生供試体による材齢91日の圧縮強度の関係を示す。その結果、結合材の種類および水結合材比にかかわらず、簡易断熱養生強度は、コア強度よりも高くなる傾向を示している。なお、本論では、限られたデ

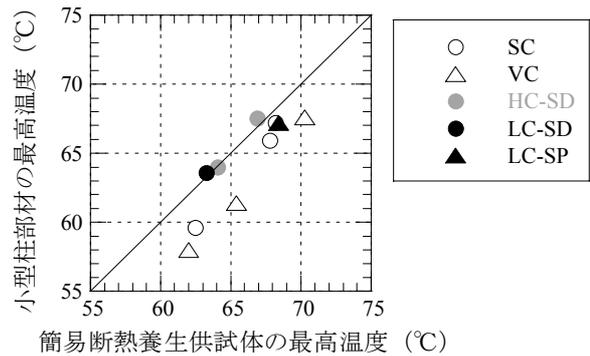


図-5 小型柱部材と簡易断熱養生供試体の最高温度の関係

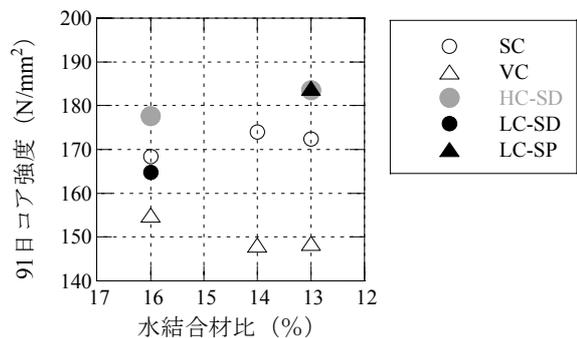


図-6 91日コア強度と水結合材比の関係

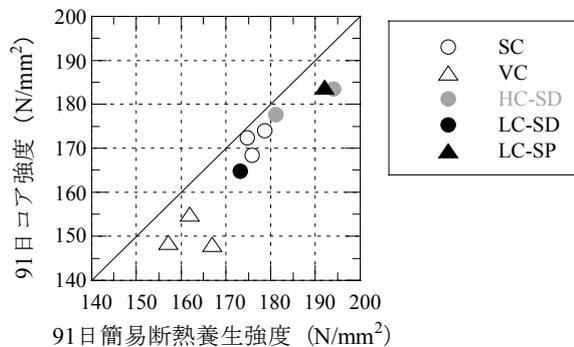


図-7 91日コア強度と91日簡易断熱養生強度の関係

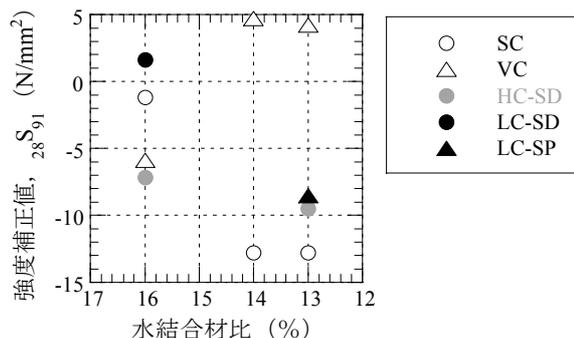


図-8 強度補正値(28S₉₁)と水結合材比の関係

一タ数で検討を行っているため、今後さらなるデータの蓄積（柱寸法による影響も含めて）を行い、その相関性について検討したい。

図-8には、強度補正值〔材齢28日標準養生強度と小型柱部材から採取した材齢91日コア強度の差（ $_{28}S_{91}$ ）〕と水結合材比の関係を示す。試験結果からも分かるように、VCを除いた結合材の強度補正值は、水結合材比の減少に伴って減少する傾向が見られ、その値は、概ね0以下となる結果が得られた。なお、VCに関して、他の結合材と異なる傾向を示した理由として、強度補正值と小型柱部材の最高温度の関係に整理すると図-9になる。この結果からも分かるように、最高温度が低い場合、強度補正值が高くなる傾向を示しており、本実験において、水結合材比が低い割合において有効な温度上昇が得られなかったため、強度補正值が大きくなったものと推察される。また逆説的な表現になるが、仮に、有効な温度上昇があれば、コア強度も高くなり、それに伴い、強度補正值が小さくなる可能性を示唆するものと考えられる。

4. まとめ

本研究における実験結果を総括すれば、以下の通りである。

- (1) 練混ぜ方法がフレッシュ性状に及ぼす影響としては、低水結合材比においても、十分な練混ぜが行われることにより、流動性が改善される。
- (2) 結合材の種類がフレッシュ性状に及ぼす影響としては、水結合材比が小さい場合、結合材の種類による影響が見られ、HC-SDにおいて、流動性が低下する傾向にある。また、強度性状に及ぼす影響としては、養生および材齢によって異なるが、SC またはHCが、相対的に高くなる傾向にある。
- (3) 材齢91日において、最大コア強度に達する水結合材比は、結合材の種類によって異なるが、概ね13または14%程度が想定される。

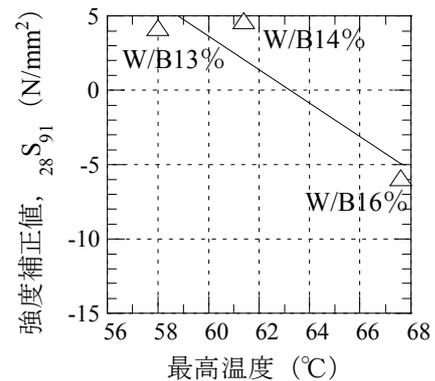


図-9 強度補正值（ $_{28}S_{91}$ ）と最高温度の関係（VCの場合）

- (4) 強度補正值（ $_{28}S_{91}$ ）と水結合材比の関係としては、一部の結合材を除いて、水結合材比の減少に伴って、強度補正值が減少する傾向にあり、その値は、概ね0以下となる結果が得られた。

参考文献

- 1) 建設省総合技術開発プロジェクト：鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発，（財）国土開発技術センター，1988～1992
- 2) 黒岩秀介ほか：実施工における F_c130N/mm^2 コンクリートの品質管理結果，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），A-1 材料施工，pp.543-544，2004.8
- 3) 金森誠治ほか：高強度コンクリートの構造体コンクリート強度評価に関する実験的研究（その2 温度計測と簡易断熱養生），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），A-1 材料施工，pp.801-802，2002.8
- 4) 桜本文敏ほか： F_c150 の超高強度コンクリートの強度性状に関する実験的研究（その2 使用材料による影響），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），A-1 材料施工，pp.807-808，2002.8