

結合材種類の異なる高強度コンクリートの強度発現性状に関する研究

STRENGTH DEVELOPMENT OF HIGH-STRENGTH CONCRETE USING VARIOUS KINDS OF BINDER

河上 浩司*, 梶田 佳寛**, 西本 好克***, 蓮尾 孝一***
*Hiroshi KAWAKAMI, Yoshihiro MASUDA, Yoshikatsu NISHIMOTO
 and Kouichi HASUO*

The strength development and mechanical properties of high-strength concrete using various kinds of binder were experimentally investigated. The range of strength was from 60MPa to 150MPa. Normal portland cement, low-heat portland cement, pre-mixed silica-fume low-heat portland cement, and post-mixed silica-fume low-heat portland cement were used as the binder. As the result, the following were confirmed.

- (1) When using the low-heat portland cement as base binder, properties of fresh concrete and strength development of structural concrete were influenced seriously by the temperatures of concrete and atmosphere.
- (2) In ultra high-strength concrete upper 150MPa class, the strength development of structural concrete under high temperature curing was higher than that of standard specimen.

Keywords : Strength development, High-strength concrete, Kind of binder, Core specimen

強度発現, 高強度コンクリート, 結合材種類, コア供試体

1. はじめに

近年、高強度コンクリートの使用例が増加しており、設計基準強度 (Fc) が 60N/mm² 級の高強度コンクリートを使用することは定着しつつあるといえる。また、近年における高層 RC 建築物の更なる高層化やスパンの長大化に伴い高強度化が進行しており、設計基準強度 100N/mm² が使用されているだけでなく、現在は実強度 150N/mm² 以上におよぶ超高強度コンクリートの研究開発がなされている。しかし、このような幅広い強度域のすべてを網羅する結合材は開発されておらず、現状では Fc50N/mm² 前後までを普通ポルトランドセメント (以下、Nセメント)、約 80N/mm² までを低熱ポルトランドセメント (Lセメント)、それ以上の高強度コンクリートではポルトランドセメント単体ではなく、混和材を混合した結合材を使用している。ここで、混和材としてはシリカフューム (SF) が比較的多く使用されている。このように様々な結合材が使用されている状況下で、それぞれ検討を行った報告は多いがまとまった報告は少ない。

そこで、本論では室内試験や実機試験を実施し、結合材の種類や組成に起因する特性の相違が、フレッシュ性状や発熱性状、そして強度発現性状や力学性状に及ぼす影響について比較検討を行った。

今回、結合材種類は、NセメントとLセメント、そしてLセメントとシリカフュームを併用した結合材の3種類である。なお、シリ

カフュームの混入法として、練混ぜ時に混和材として混入したタイプ (LSF) と、工場であらかじめプレミックスしたシリカフュームセメント (SFC) の2種類について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料と組み合わせ

実験に使用した結合材の諸物性と化学組成を表-1に示す。今回、LSFは表-1中の低熱ポルトランドセメントをベースとして、シリカフュームを練混ぜ時に混合して結合材とした。また、工場でシリカフュームがプレミックスされるSFCについては、シリカフュームを混合する前のベースセメントの化学組成を示している。LSF、SFCシリーズ共に低熱ポルトランドセメントをベースとしているが、セメント中の C₃S と C₂S の割合より、LSFシリーズのベースセメントのほうがより低発熱タイプであると判断できる。シリカフュームの置換率は、LSFとSFCの両シリーズともセメント質量の10%を内割り置換している。

一連の試験で使用した材料とその物性を表-2に示す。今回の一連の試験では使用した材料は多種にわたる。しかし、室内試験の全結合材種類と、実機試験のLSFとSFCの2シリーズでは、粗骨材の岩種を硬質砂岩砕石に統一した。化学混和剤は、NセメントとLセ

* 三井住友建設機技術研究所 修士(工学)
 ** 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

*** 三井住友建設機技術研究所

Technical Research Institute, Sumitomo Mitsui Construction, Co., Ltd., M. Eng.
 Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., Faculty of Eng., Utsunomiya Univ.,
 Dr. Eng.
 Technical Research Institute, Sumitomo Mitsui Construction, Co., Ltd.

メントでは高性能AE減水剤を使用し、LSFとSFCでは製造メーカーは異なるが、それぞれ超高強度コンクリート用の高性能減水剤を使用した。この高性能減水剤は、JIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」に規定される試験方法である、単位セメント量320kg/m³という条件では使用量が少なくなり、経時変化量の規定を満足できないため、規格上は減水剤に分類される。

2.2 試験方法

コンクリートの概要と、実験の概要とを表-3に示す。試験は室内試験2カ所、実機試験2工場において実施した。

室内試験での練混ぜ方法として、室内1では100Lの強制2軸ミキサを使用して練混ぜ量を70L前後とし、室内2では60L強制2軸ミキサを使用して練混ぜ量を40Lとした。ミキサの容量は異なるが、練混ぜ量はいずれも容量の約70%である。コンクリートの練混ぜ順序は、結合材と細骨材とを空練りし、混和剤を添加した水を投入してモルタルを先練りした後、最後に粗骨材を投入した。練混ぜは、電流計を用いて練混ぜ状態を確認しながら行った。モルタル練り時間は90～210秒、粗骨材投入後の練混ぜ時間は90～180秒で結合材水比が大きくなるに伴い練混ぜ時間は長くなった。室内試験での主な確認項目は、フレッシュ性状と標準養生強度、そして小型試験体の温度履歴とコア強度発現である。

室内試験で製作した小型試験体は、500×500×400mmの無筋コンクリートの周囲6面を厚さ100mm断熱材で2重に覆った試験体で、最高温度は1000mm角程度の実柱の中心部とほぼ同程度まで上昇するが、温度低下は実柱より緩やかになる。コンクリート温度履歴は、コア採取位置を避けて試験体中心に近い位置に熱電対を配置し測定を行った。

実機試験は、実機1ではN、LそしてLSFの3シリーズの実験を行い、実機2ではSFCシリーズの実験を行った。実機1では容量6.0m³の強制2軸ミキサで練混ぜを行い、練混ぜ量は3.0m³以上を基本とした。ただし、超高強度コンクリートとなるLSFシリーズでは3.0m³に固定した。なお、実機1の特徴としてシリカフェュームはスラリー状にして添加している。実機2では容量5.0m³の強制2軸ミキサで練混ぜを行い、一回の練混ぜ量は3.0m³とした。いずれの実機試験でも超高強度コンクリートの練混ぜ順序は室内試験と同様とした。練混ぜ時間は、室内試験と同様に電流計で練混ぜ状態を確認しながら定め、モルタルが120～540秒で、粗骨材投入後の練混ぜ時間は90～180秒である。実機試験での主な確認事項は標準養生強度

表-1 結合材の種類と諸物性

結合材	諸物性		化学組成(%)※				SF置換率(%)	記号
	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	普通ポルトランドセメント	3.15	3370	50	25	9	9	N
	低熱ポルトランドセメント	3.24	3300	24	57	2	10	L
	シリカフェュームセメント	3.08	5600	32	50	3	9	10
混和剤	シリカフェューム	2.20	226000	-	-	-	-	SF

※) SFCの化学組成はベースセメントを示す

と、模擬柱試験体の温度履歴と採取したコア強度である。

実機試験で製作した模擬柱試験体は1000mm角の立方体で、放熱を防止するため上下を断熱材で覆っている。温度履歴は試験体中心部に熱電対を配置して測定した。

3. フレッシュコンクリートの性状

室内試験の結果をもとに、フレッシュコンクリートのワーカビリティについて検討する。検討対象としたコンクリートは、スランブフローが45～75cmの範囲の分離が認められないコンクリートとし、ワーカビリティが極端に悪いコンクリートは除外した。

検討対象としたコンクリートの、結合材水比(B/W)と混和剤使用量との関係を図-1に示す。また、結合材水比とスランブフロー値(以下、フロー値)との関係を図-2に、結合材水比と50cmフロー時間との関係を図-3に示す。

混和剤使用量は、結合材種類によらず結合材水比の増加に伴い直線的に増加し、また、冬期よりも夏期の使用量が多い。同一の混和剤を使用したNセメントとLセメントとを比較すると、Lセメントの使用量はNセメントより少なく、その差は夏期試験より冬期試験で大きい。また、Lセメントでは試験時期による混和剤使用量の変動が大きいことを確認できる。LSFシリーズとSFCシリーズをみても、夏期の混和剤使用量は冬期に比べ多い。標準期の混和剤使用量は、SFCでは夏期と冬期のほぼ中間であったが、LSFでは冬期とほぼ同値であった。今回の検討では、低熱ポルトランドセメントを主要な結合材とした場合、試験時期による混和剤使用量の変動がより大きくなる事が確認できた。

結合材水比とフロー値の関係をみると、フロー値に対しては、試験時期の影響は小さく結合材水比が支配的で、結合材水比の増加に伴いフロー値は直線的に増加する。図中の回帰線は、NセメントとLセメントとを併せて、そして、LSFとSFCとを併せて算出した。回帰線の勾配を比較すると、N、Lセメントの勾配に比べ、SFを添加したLSF、SFCの勾配は緩やかである。LSFやSFCでは結合材水比が大きくなるとフロー値は75cmになることもあったが、分離はせず性状は良好であった。

表-2 使用材料

材料名	産地	諸物性			記号
		表乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率	
細骨材	栃木県鬼怒川産川砂	2.61	1.55	2.58	S1
	栃木県鬼怒川産川砂	2.60	2.29	2.60	S2
	千葉県市原産山砂	2.59	2.28	2.66	S3
	千葉県君津産山砂	2.59	2.41	混合	S4
粗骨材	高知県島形山産石灰石砕砂	2.66	0.60	2.62	
	栃木県粟野産硬質砂岩砕石	2.63	0.38	6.53	G1
	栃木県葛生産硬質砂岩砕石	2.67	0.97	6.47	G2
	埼玉県秩父産硬質砂岩砕石	2.71	0.56	6.61	G3
	高知県島形山産石灰石砕石	2.70	0.41	6.67	G4
混和剤	茨城県岩瀬産硬質砂岩砕石	2.65	0.81	6.76	G5
	高性能AE減水剤		ポリカルボン酸系		SP1
	高性能減水剤		ポリカルボン酸系		SP2

表-3 コンクリートの概要と作製試験体

試験場所	シリーズ	結合材水比	単位水量(kg/m ³)	使用材料			作製試験体			試験時期		
				結合材	細骨材	粗骨材	混和剤	小型	模擬柱	夏期	標準	冬期
室内-1	N	2.5, 3.0, 3.5, 4.0	170	N	S1	G1	SP1	○	○	○	○	
	L	2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5	170	L	S1	G1	SP1	○	○	○	○	
	LSF	3.3, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 7.0	150	L+SF	S2	G2	SP2	○	○	○	○	
室内-2	SFC	3.8, 4.5, 5.6, 7.1	155, 150, 145	SFC	S3	G3	SP2		○			
	N	2.5, 3.3	170, 165	N	S4	G4	SP1	○	○	○	○	
実機-1	L	2.5, 3.3, 3.8	165, 160	L	S4	G4	SP1	○	○	○	○	
	LSF	4.2, 5.0, 6.3	140	L+SF	S4	G5	SP2	○	○	○	○	
実機-2	SFC	3.8, 4.5, 5.6, 7.1	155, 150, 145	SFC	S3	G3	SP2	○	○	○	○	

結合材水比と50cmフロー時間の関係について、回帰線は結合材種類ごとに算出し、更にLSFシリーズとSFCシリーズでは、夏期試験と冬期試験とに分けて算出した。回帰線をもとにコンクリートの流動性の検討を行うと、流動性はNセメントよりLセメントのほうが優れていると判断できる。LSFシリーズとSFCシリーズとを比較すると、50cmフロー時間はSFCのほうが小さく流動性が優れていると判断できる。また、NセメントとLセメント、そしてSFCでは試験時期の影響も比較的小さい。一方、LSFでは、冬期試験に比べ夏期試験では長くなり、特に、コンクリート温度が高い場合に極端にワーカビリティが低下した。LSFとSFCではフロー値は等しくても流動性が異なる。

今回の試験結果では、ある程度の施工性を有するコンクリートとして、フロー値はNセメントやLセメントの場合は50~70cm程度、LSFとSFCでは55~75cm程度にあり、結合材水比と共に増加した。また、このようなコンクリートの50cmフロー時間は、結合材種類に関係なく5.0~10.0秒程度の範囲であった。

4 硬化コンクリートの性状

4.1 標準養生供試体による圧縮強度

標準養生供試体の結合材水比と圧縮強度との関係を図-4に示す。図中の回帰線は、Nセメント(細実線)とLセメント(細破線)とを別々に示している。LSFシリーズとSFCシリーズは、強度発現状況が大幅に異なった実機試験91日を除いて共通の回帰線を示している。また、LSFシリーズとSFCシリーズの一部では、検討結合材水比を6.0以下に限定した回帰線(太実線)と、5.5以上に限定した回帰線(太破線)を示す。

材齢7日強度は、室内、実機共にNセメントの強度発現が顕著で、続いてLSFとSFCが同等となり、Lセメントが最も低い。室内試験と実機試験とで得られた強度を比較すると、Nセメントは同等だがLセメントでは実機試験のほうが若干高く、LSFとSFCでは逆に室

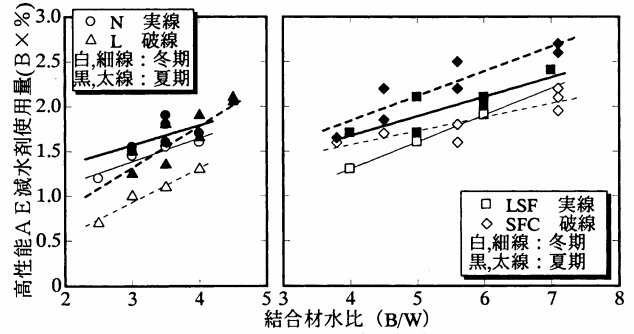


図-1 高性能A/E減水剤使用量

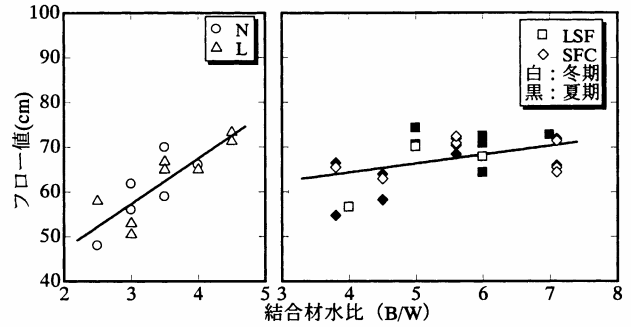


図-2 フロー値

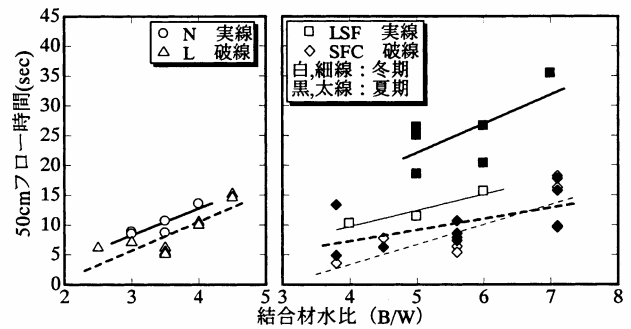


図-3 50cmフロー時間

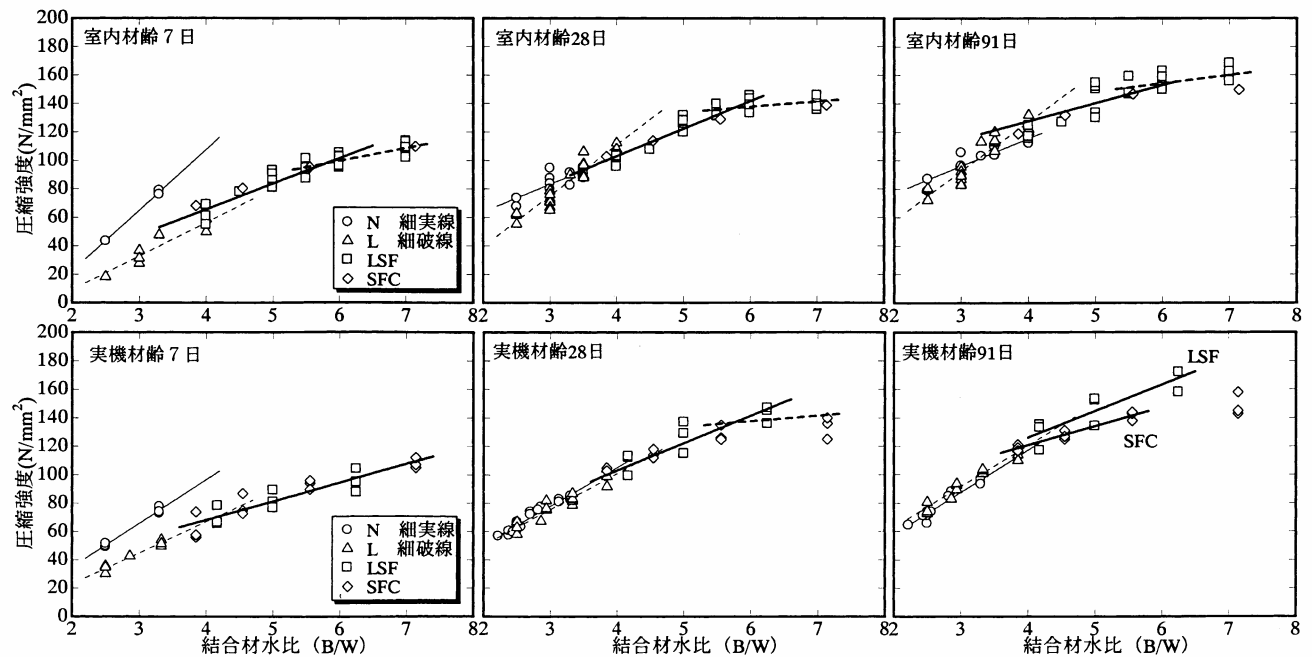


図-4 標準養生圧縮強度

内試験のほうが高い。回帰線は、NセメントやLセメントと、実機試験のLSFとSFCでは直線状であるが、室内試験では結合材水比が6.0を超えると結合材水比に伴う強度の増加が小さくなり、頭打ちの傾向が見られる。LSFとSFC、そしてLセメントとを比較すると、結合材水比が4.0で等しくてもシリカフェームを混入したほうが高強度となり、シリカフェームを混合することで初期強度発現が速やかになると考えられる。

材齢28日になると、NセメントとLセメントでは得られる強度に大きな差がみられない。回帰線の勾配を比較すると、室内試験ではLセメントの勾配が大きい、実機試験での勾配はほぼ同等である。材齢91日においても回帰線の勾配は同様であるが、Nセメントの強度増加が小さいため、得られる強度はLセメントのほうが若干大きくなる。

LSFとSFCの材齢28日強度をみると、特に、室内試験の結合材水比5.5以上の回帰線は、ほぼ横ばいとなり頭打ちが顕著になる。材齢91日の実機試験結果では、LSFとSFCとの間で強度に差がみられたので別途に回帰を行った。LSFの強度回帰線は室内試験と実機試験との間に大きな差はないが、SFCでは室内試験に比べ実機試験の結果は低下している。この強度低下の原因は明らかでないが、骨

材種類の影響や実機ミキサの能力などが考えられる。LセメントとLSF、およびSFCの材齢91日における結合材水比4.0での圧縮強度は、室内試験と実機試験共に120N/mm²程度で一致している。

材齢28日強度を基準として、材齢7日、ならびに91日の強度発現率を評価した結果を図-5に示す。図中の回帰線は、Nセメント(細線)とその他の結合材(太線)とで別に示している。材齢7日の強度発現率は、Nセメントでは90%前後だが、Lセメントでは強度発現率は40~70%、そしてLSFとSFCでは強度発現率は60~80%強でNセメントより低い。また、結合材種類に関係なく材齢28日強度が高いほど材齢7日での強度発現率は高くなる傾向がみられる。一方、材齢91日の強度発現率は、材齢7日とは逆に材齢28日強度が高いほど減少していく。結合材種類ごとの材齢91日における強度発現率は、Nセメントで材齢28日の110~120%、Lセメントでは120~140%程度となりNセメントよりも大きい。LSFとSFCでは、強度発現率で評価すると105~120%程度とNセメントとほぼ同等であった。

4.2 構造体コンクリートの性状

1) 温度履歴

小型試験体と模擬柱試験体の温度履歴の一例として、冬期試験の結果を図-6に示す。また、図中の凡例に結合材水比と単位結合材

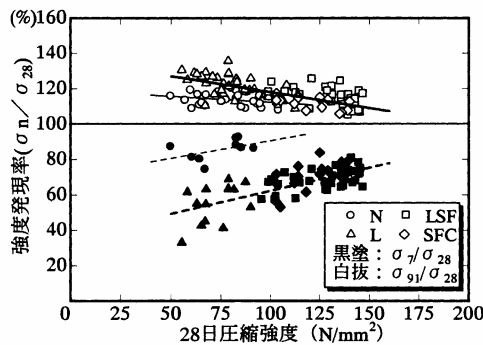


図-5 強度発現

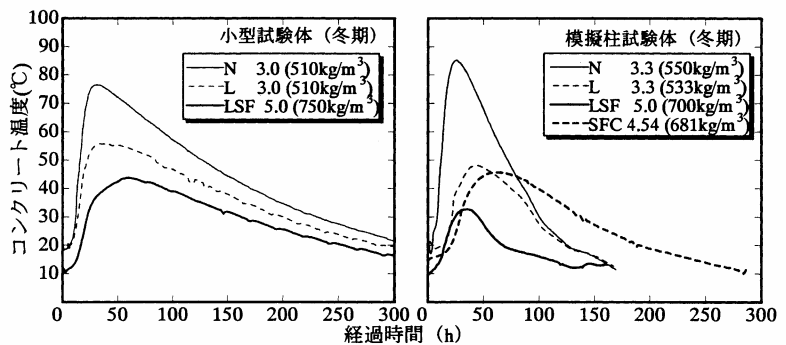


図-6 試験体温度履歴

表-4 温度特性

試験体	B/W	単位結合材量 (kg/m ³)	コンクリート温度 (°C)	最高温度 (°C)	温度上昇量 (°C)	最高温度到達時間 (h)	単位結合材あたりの温度上昇量と回帰式(°C/kg)
Nセメント 小型	2.5	425	18.7, 21.1	69.7, 72.2	51.0, 51.1	35.0 ~ 36.0	0.099 ~ 0.120 ΔT = -0.000086°C + 0.1581
	3.0	510	15.6 ~ 21.6	75.7 ~ 79.4	57.8 ~ 60.1	25.9 ~ 34.1	
	3.5	595	15.0 ~ 34.5	82.7 ~ 96.5	62.0 ~ 68.2	19.4 ~ 25.4	
	4.0	680	18.5 ~ 35.3	86.0 ~ 102.7	66.5 ~ 67.5	16.8 ~ 22.6	
Lセメント 小型	2.5	425	16.7, 18.8	43.5, 47.9	26.8, 29.1	34.6 ~ 56.4	0.063 ~ 0.082 ΔT = 0.000074°C + 0.0681
	3.0	510	18.3 ~ 32.5	18.3 ~ 32.5	18.3 ~ 32.5	34.1 ~ 66.5	
	3.5	595	12.6 ~ 29.1	59.0 ~ 76.4	39.7 ~ 50.4	33.6 ~ 57.6	
	4.0	680	18.3 ~ 32.5	18.3 ~ 32.5	45.1 ~ 47.6	31.7 ~ 36.0	
LSF 小型	3.3	500	19.0	55.0	36.0	35.5	0.046 ~ 0.072 ΔT = -0.000034°C + 0.0833
	4.0	600	8.0 ~ 29.5	43.8 ~ 66.5	35.8 ~ 42.8	35.8 ~ 57.9	
	5.0	750	8.0 ~ 30.5	51.0 ~ 75.2	41.2 ~ 46.0	39.4 ~ 53.9	
	5.5	825	22.5	68.9, 70.4	46.4, 47.9	40.6 ~ 52.3	
	6.0	900	11.5 ~ 29.5	57.6 ~ 76.5	46.1 ~ 47.5	41.0 ~ 44.6	
Nセメント 模擬柱	2.4	393, 402	13	57	44	31.0	0.107 ~ 0.118 ΔT = -0.000016°C + 0.1197
	2.5	425	20.0, 27.0	70.2, 76.0	49.0, 50.2	28.0, 30.0	
	2.7	446	15.0	66.0	51.0	28.0	
	3.1	516	16	71	55	24.3	
	3.3	561	22.0, 27.0	85.2, 89.8	62.8, 63.2	22.0, 25.0	
Lセメント 模擬柱	2.5	413, 425	16.0, 23.0	39.1, 42.1	19.1, 23.1	35.0, 38.9	0.039 ~ 0.061 ΔT = 0.000012°C + 0.044
	2.9	471	8.5 ~ 31.0	28.3 ~ 59.1	19.8 ~ 28.1	25.0 ~ 40.0	
	3.3	533, 550	8.8 ~ 31.0	30.9 ~ 63.6	22.1 ~ 32.6	27.0 ~ 48.1	
	3.8	616	9.9 ~ 30.5	33.8 ~ 67.8	23.9 ~ 37.3	26.0 ~ 43.0	
LSF 模擬柱	4.2	583	9.2 ~ 32.5	29.4 ~ 63.8	20.2 ~ 31.3	23.0 ~ 37.0	0.031 ~ 0.057 ΔT = -0.000013°C + 0.0524
	5.0	700	9.7 ~ 33.0	32.7 ~ 70.1	23.0 ~ 37.1	22.0 ~ 35.0	
	6.3	875	11.9 ~ 33.5	38.2 ~ 76.3	26.3 ~ 42.8	22.0 ~ 34.0	
SFC 模擬柱	3.9	596	14.0 ~ 32.5	40.7 ~ 73.7	26.7 ~ 41.2	18.6 ~ 30.2	0.044 ~ 0.069 ΔT = -0.000036°C + 0.0803
	4.6	682	15.0 ~ 33.0	45.6 ~ 75.7	30.6 ~ 42.7	20.0 ~ 29.0	
	5.6	806	15.0 ~ 34.0	50.8 ~ 70.3	35.8 ~ 45.0	21.7 ~ 31.5	
	7.1	1036	16.0 ~ 34.0	61.3 ~ 83.4	45.3 ~ 49.4	19.7 ~ 26.0	

量を示す。NセメントとLセメント、そしてSFCのコンクリート打ち込み温度は約20℃となったが、LSFは10℃であった。

小型試験体のコンクリート最高温度は、Nセメントでは模擬柱より低い、LセメントとLSFでは模擬柱より高い。温度降下の状況を見ると、小型試験体では断熱材により放熱が抑制されるため、模擬柱試験体よりも緩やかで、打設後300時間経過しても平均外気温まで低下せず、若材齢での平均養生温度は模擬柱試験体より高くなる。模擬柱試験体の最高温度をみると、Nセメントでは80℃を超えている。主な結合材を低熱ポルトランドセメントとするグループでは、LセメントよりLSFやSFCのほうが実セメント量が多いにもかかわらず、Lセメントの50℃が最高となり、最高温度が最も低かったLSFでは30℃程度であった。今回の試験では、製作場所が異なるSFC試験体の温度低下が比較的緩やかとなった。

温度測定を行った小型試験体と模擬柱試験体の温度特性の一覧を表-4に示す。部材の最高温度は、小型試験体と模擬柱試験体とでほぼ同等である。最高温度到達時間をみると、Nセメントでは小型試験体と模擬柱試験体との差は小さいが、LセメントとLSFでは模擬柱試験体のほうが最高温度到達時間が早い。また、温度上昇量と単位結合材量あたりの温度上昇量ともに、小型試験体のほうが高くなる傾向があり、断熱性能の違いが現れている。

全結果より得られた単位結合材量あたりの温度上昇量を図-7に示す。単位量あたりの温度上昇量は、Nセメントが0.10~0.12℃程度で最大となり、他の結合材は低熱ポルトランドセメントをベースとするため、単位量あたりの温度上昇量は0.04~0.08℃程度である。Lセメントを除いて結合材量の増加に伴い温度上昇量は減少する。低熱系3種類では、SFCに比べLセメントとLSFの温度上昇量が低く、ベースセメントの化学組成の差が現れたと考えられる。

試験結果をもとに、ベースとしたセメント種類と結合材中の純セメント量、ならびにコンクリート温度をパラメータとして回帰分析を行い、(1)式による最高温度の推定を行った。なお、小型試験体と模擬柱試験体では断熱性が異なるため、別途に解析を行った。

$$T_{max} = \alpha \cdot C + \beta \cdot CT + \gamma \quad \dots(1)$$

C: 結合材中の純セメント量

CT: コンクリート温度

α, β, γ : 実験定数

算出された係数と切片の一覧を表-5に示す。

セメントの発熱量を示す係数 α は、LセメントではNセメントの半分程度となり、セメント種類の差が顕著に現れている。試験体種

類で α 値を比較すると、Nセメントでは模擬柱試験体のほうが α 値が大きい。しかし、Lセメントではどちらの試験体種類もほぼ同値であった。一方、コンクリート温度に対する係数 β は、Nセメントに比べLセメントのほうが大きく、最高温度に与えるコンクリート温度の影響が大きい。試験体種類で β 値を比較すると、セメント種類によらず模擬柱試験体のほうが大きい。切片 γ は、断熱性の高い小型試験体のほうが模擬柱試験体よりも大きい。

小型試験体と模擬柱試験体での最高温度観測値と、(1)式に表-5の係数を入力して算出した最高温度推定値との関係を図-8に示す。推定温度に対し、測定温度は95%信頼区間で $\pm 3.5^\circ\text{C}$ の範囲に収まっている。

2) コア供試体による圧縮強度

小型試験体より採取したコア供試体の強度を図-9に示す。材齢28日では、NセメントとLセメントの強度回帰線はほぼ一致している。LSFでは、結合材水比6.0以下の範囲で算出した回帰線は、水結合材比7.0まで延長でき頭打ちはみられない。また、コア供試体で得られた最高強度は、標準養生強度よりも大きく180N/mm²に及んだ。材齢28日から91日までの強度増加量は、Lセメントでは全体的に10~15N/mm²程度の強度増加が確認できるが、NセメントとLSFでは、ほとんど強度の増加を確認できない。LSFでは結合材水比が5.0以上では、水和初期の高温履歴により若材齢で強度発現が加速されそのまま得られる最高強度に到達したと推測される。

模擬柱試験体より採取したコア供試体強度を図-10に示す。Nセ

表-5 最高温度推定式の係数・切片

ベースセメント		α	β	γ	相関係数R
N	小型試験体	0.067	0.84	27.1	0.983
	模擬柱試験体	0.095	1.17	4.8	0.994
L	小型試験体	0.034	1.04	19.8	0.936
	模擬柱試験体	0.038	1.57	-3.9	0.974

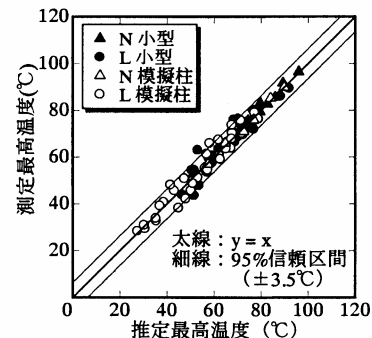


図-8 最高温度の評価

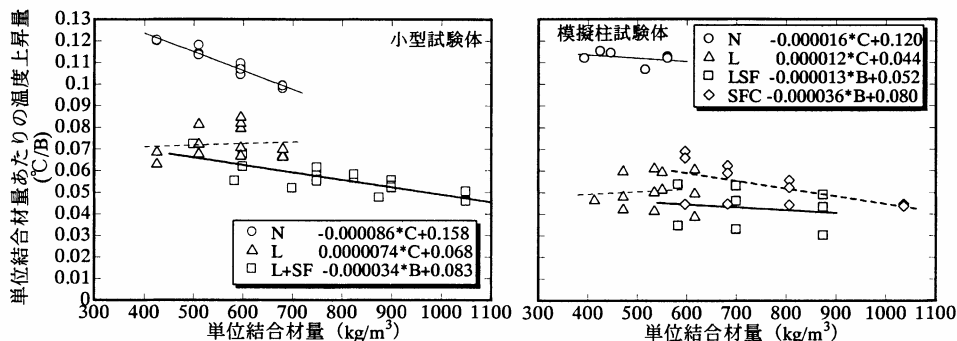


図-7 単位結合材量あたりの温度上昇量

メントでは、コア強度は標準養生強度より低く材齢28日以降の強度増加量も小さくなり、初期高温履歴の影響がみられる。Lセメントは全体的にNセメントより高強度で、材齢28日以降91日までの増加量は10N/mm²程度である。また、Lセメントでは冬期の材齢28日強度発現は他の時期に比べ遅れるが、季節変化による外気温上昇と、材齢の増加により91日では強度発現の遅れが解消される。

LSFとSFCを比較すると、材齢28日ではSFCのほうが高強度で、強度差は結合材水比に従い大きくなるため、材齢28日の強度回帰線は別途に算出した。一方、材齢91日ではほぼ同強度となるため、回帰線は併せて算出した。SFCでは、材齢に関係なく結合材水比6.5以下の回帰線の勾配と5.5以上の回帰線の勾配に差が見られ、強度増加の頭打ちが確認できる。LSFとSFCとの強度発現の違いは、ベースセメントの化学組成の差に起因する温度上昇量と、最高温度後の温度降下勾配の差によると考えられる。LSFとSFCともに試験時期により強度発現に差がみられ、特にLSFで顕著である。また、LSFでは模擬柱試験体強度は小型試験体強度より低強度となった。

全コア供試体の材齢28日強度に対する材齢91日強度の比を図-11に示す。図-5と比較すると、コア強度発現率は、低強度であれば標準養生の発現率とほぼ同等となるが、回帰線の右下がりの勾配は大きい。LセメントとLSFでは、強度発現率が極端に大きい結果が見られるが、これは冬期試験の結果である。

結合材種類別に、標準養生28日強度に対するコア28日、ならびに91日強度比を小型試験体については図-12に、模擬柱試験体については図-13に示す。NセメントとLセメントの場合、試験体種類によらずコア28日強度は標準28日強度を下回る。コア91日強度は、Nセメントでは標準28日強度とほぼ同等か若干低強度となるが、Lセメントではおおむね標準28日強度を上回る。

LSFの結果は試験体種類で異なる。小型試験体では、コア28日強度は結合材水比が5.0以上になると標準養生28日強度を上回り、コア91日強度は広い範囲で標準28日強度を上回る。一方、模擬柱試験体では

コア28日強度は標準28日の90%程度で、コア91日強度でも標準28日強度と同等程度であった。模擬柱試験体と小型試験体との最も大きな違いは、最高温度の後の温度降下速度であり、降下が緩やかな小型試験体のほうが高強度となった。

SFCは、模擬柱試験体のみであるが、コア28日強度では結合材水比5.5以上になると、91日強度では結合材水比4.5以上になると標準28日強度を上回る。

JASS 5の3.3「コンクリートの品質」の解説にあるように、コンクリートの調合強度は、通常のコンクリートでは標準養生28日強度で、設計基準強度60N/mm²以下の高強度コンクリートやマスコンクリートでは標準養生m日強度で表され、これをポテンシャル強度と称している。しかし、設計基準強度が100N/mm²に至るような超高強度コンクリートでは、初期の温度履歴の影響で構造体コンクリート強度がポテンシャルと称される標準養生強度を上回る場合がある。

4.3 静弾性係数の検討

NセメントとLセメント、そしてLSFの3シリーズについて、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-14に示す。図中の白抜きのプロッ

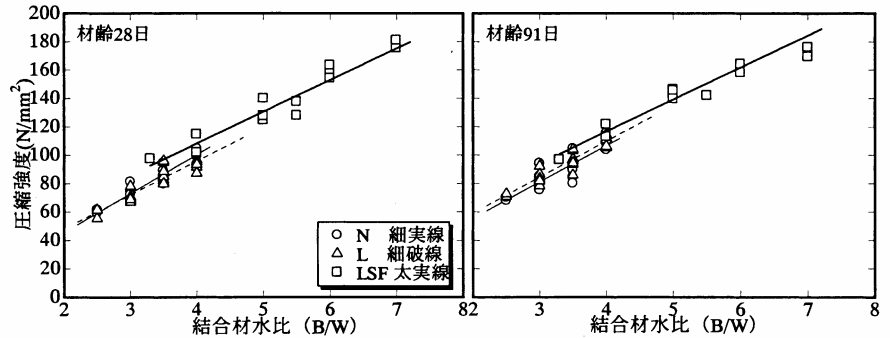


図-9 小型試験体コア強度

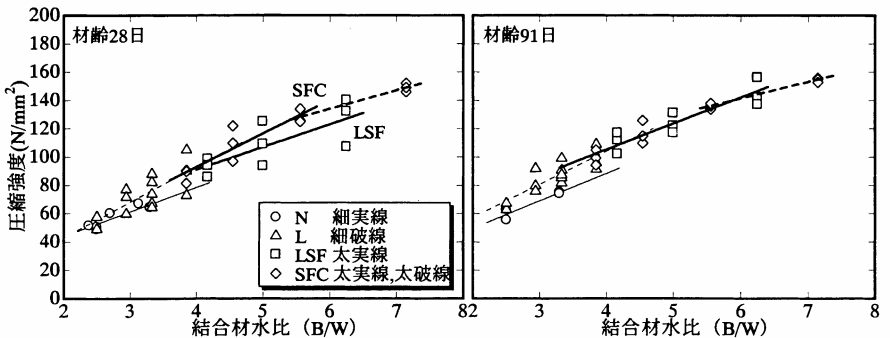


図-10 模擬柱試験体コア強度

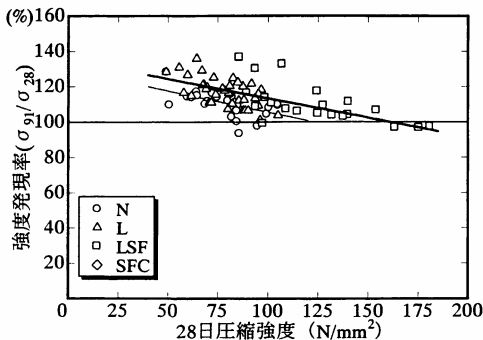


図-11 強度発現率

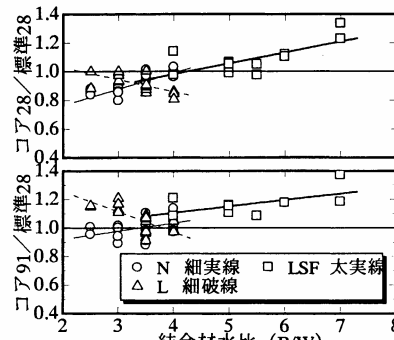


図-12 小型試験体コア強度比

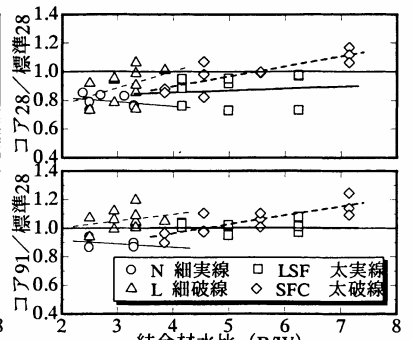


図-13 模擬柱試験体コア強度比

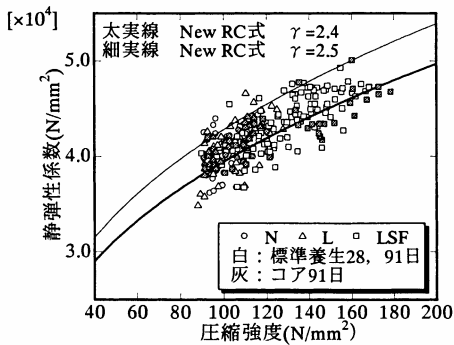


図-14 圧縮強度と静弾性係数

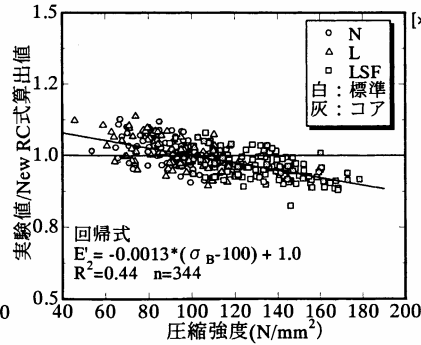


図-15 実験値と計算値の関係

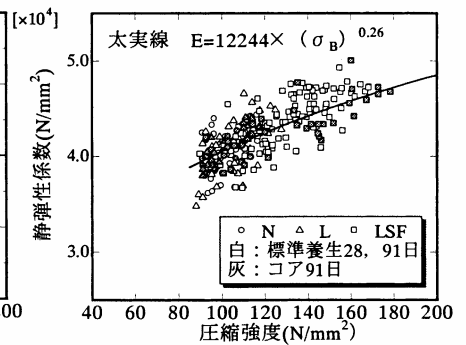


図-16 超高強度領域での回帰結果

トが標準養生で、灰塗のプロットはコア供試体の結果である。図中の曲線は、(2)式で示されるNew RC式に単位容積質量を2.4、もしくは2.5として入力した曲線であり、単位容積質量に2.4から2.5程度を入力すると、実験値を概ね評価できることがわかる。

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

E: 静弾性係数 (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

(N, L シリーズは 1.0 LSF シリーズは 0.95)

γ: 単位容積質量 (t/m³)

σ_c: 圧縮強度 (N/mm²)

次に、実験値とNew RC式に補正係数と単位容積質量の実測値、そして圧縮強度を入力して得られた算出値との比を、圧縮強度で整理した結果を図-15に示す。標準養生とコアともに右下がりの傾向を示している。標準養生とコアの結果は同等であったので全試験結果を対象に回帰すると、

$$E' = -0.0013 \times (\sigma_c - 100) + 1.0 \quad \dots(3)$$

となり、100N/mm²を超える領域での静弾性係数は、New RC式では実験値より高く評価された。以上の検討結果より、超高強度コンクリートの静弾性係数は、New RC式を適用すると若干過剰に判断される可能性があり、補正の必要性が示唆された。今回、圧縮強度が90N/mm²以上となった試験結果だけを用いて、静弾性係数を(4)式

$$E = a (\sigma_c)^b \quad \dots(4)$$

で回帰すると、図-16に示すように、

$$E = 12244 \times (\sigma_c)^{0.26} \quad \dots(5)$$

となり、圧縮強度のほぼ四乗根で回帰された。

5. 結論

本論で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ワークビリティはSFCが最もよく、続いてLSF、LセメントそしてNセメントの順に低下した。
- (2) Lセメントを主な結合材とした場合、温度条件がフレッシュ性状や構造体コンクリートの強度発現に与える影響が大きい。
- (3) 結合材中の純セメント量とコンクリート温度から1000mm角柱の最高温度の評価式の検討を行った。
- (4) LSFとSFCを結合材とした場合、標準養生は結合材水比が6.5を超えると強度限界が見られたが、コアでは結合材水比が7.0までほぼ直線関係が成立した。

- (5) LSFとSFCを結合材として結合材水比が5.0を超える場合、初期高温履歴を受けると、標準養生強度を構造体コンクリート強度が上回る場合がある。

- (6) 100N/mm²以上の超高強度コンクリートの静弾性係数について弾性係数の評価式の提案を行った。

謝辞

本研究を行うにあたり、サンプルの提供をいただきました住友大阪セメント(株)、(株)ボソリス物産、ならびに日本シーカ(株)の関係諸氏、そして、実機試験でご協力いただきました東京エスオーシー(株)芝浦工場、晴海小野田レミコン(株)の関係諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学性状との関係, 日本建築学会構造系論文集, 第472号, pp11-16, 2000.11
- 2) 榊田佳寛, 佐藤幸恵, 友澤史紀: 高強度コンクリートの構造体中での強度発現性と調査強度, 日本建築学会構造系論文集 第537号, pp.13-20, 2000.11
- 3) 河上浩司, 西本好克, 谷口秀明: 高強度コンクリートの初期発熱と強度発現性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, 2001, pp.1057-1062
- 4) 河上浩司, 西本好克: Fc100N/mm²級の超高強度コンクリートの強度発現性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.369-374, 2002
- 5) 21世紀のコンクリート, 2001年度日本建築学会大会(関東)材料施工部門, パネルディスカッション資料, 2001.9.24
- 6) 佐藤幸恵, 榊田佳寛: 高強度コンクリートの構造体中での圧縮強度の変動, 日本建築学会構造系論文集 第562号, pp.9-14, 2002.12
- 7) 陣内 浩, 榊田佳寛, 早川光敬, 並木 哲: 高強度コンクリートの構造体と標準養生供試体の強度差に及ぼす要因, 日本建築学会構造系論文集 第562号, pp.1-7, 2002.12
- 8) 陣内 浩, 黒岩秀介, 早川光敬: 初期に高温履歴を受ける高強度セメント硬化体の強度発現性状と微細構造, 日本建築学会構造系論文集 第542号, pp.39-46, 2001.4
- 9) 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(関東) A-1, pp.321-322, 1997.9
- 10) 田中敏嗣, 竹内 良, 丸岡正知, 富田二郎: 初期に高温履歴を受けた高強度コンクリートの強度発現性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.193-198, 1997
- 11) 桃谷智樹, 笹原 厚 他: 高強度コンクリートの品質および施工管理に関する実大施工実験(その1 実験概要およびコンクリート工構えの諸性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) A-1, pp.289-290, 11)1997.9
- 12) 荒金直樹, 榊田佳寛, 安田正雪, 中村成春: 低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの構造体における強度特性, セメント・コンクリート論文集 No.52, pp.910-915, 1998