技術開発

設計基準強度150N／㎟の「超高強度コンクリート」の開発と実用化について

西本　好克*1　　伊藤　司*2
鈴木　康範*3

1．はじめに

平成12年6月1日から施行された建築基準法で定められた告示1446号により，建築物にJIS A 5308（レディーミクストコンクリート）に規定されていないコンクリートを使用する場合には，指定性能評価機関において材料性能評価を受け，国土交通大臣の認定を取得する必要がある。これまでに大臣認定を取得した件数は1400件を超えており，当初は使用者（施工会社）と製造者（生コン工場）とが共同取得していたが，最近では製造者が単独で取得するケースも多くなってきている。しかし，60～70N／㎟を超える高強度コンクリートでは使用者と共同で取得するのが一般的である。

性能評価においては，調合決定のための強度算定式の妥当性，品質管理方法と製造安定性および構造体強度を保証する強度補正値などが審査され，数多くの実機試験データによる，実構造物を模擬した試験体から採取したコア強度と管理用供試体の強度発現との比較検討などのデータが必要とされる。このため，製造実績のない100N／㎟を超える超高強度コンクリートでは，室内試験による各種要因の影響について確認するとともに，四季での実機試験など相当の準備期間が必要となる。

そこで今回は，物件を限定することなくいつでも設計基準強度が150N／㎟までの超高強度コンクリートを使用できるようにするため，開発開始から約3年をかけて種々のデータを蓄積し[1)2)]，（財）日本建築総合試験所での性能評価を受け，平成18年2月に大臣認定を取得した。なお，本認定では使用者である三井住友建設㈱とコンクリートの製造者である東京エスオーシー㈱に加え，セメントの生産者である住友大阪セメント㈱の3社で共同して取得している。

本報では，この事例について報告する。

2．超高強度コンクリートの概要

三井住友建設㈱と東京エスオーシー㈱は共同して平成14年4月に設計基準強度33～120N／㎟の高強度コンクリートの大臣認定を取得しており[3)]，今回はさらに高強度かつ自己収縮対策を行った超高強度コンクリートの大臣認定を取得した。認定取得した超高強度コンクリートの概要は，設計基準強度が100N／㎟から150N／㎟までの範囲であり，5N／㎟刻みで取得した。また，高強度コンクリートでは自己収縮が大きくなることが知られており，過大な自己収縮は構造体内部にひび割れを発生させる懸念があることから，膨張材

筆者：※1（にしもと・よしかつ）三井住友建設㈱技術研究所
※2（いとう・つかさ）東京エスオーシー㈱芝浦工場
※3（すずき・やすのり）住友大阪セメント㈱セメント・コンクリート研究所

表－1　調合例

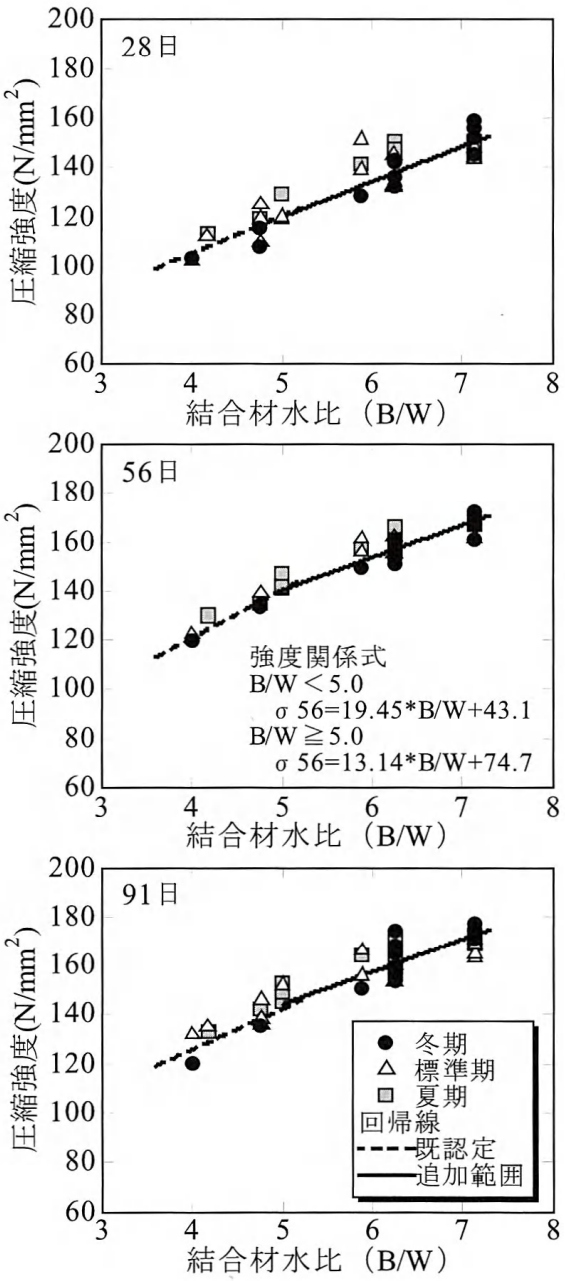
調合	目標フロー（cm）	W／B（%）	g／glim（m³／m³）	s／a（%）	空気量（%）	単位量（kg／m³）					
						W	C※	SF	S1	S2	G
LSF20	65±10	20.0	0.528	49.2	2.0	140	630	70	471	321	827
LSF16	65±10	16.0	0.528	44.0	2.0	140	787	88	382	261	827
LSF14	70±10	14.0	0.528	35.4	2.0	150	966	107	273	182	827

※）膨張材を用いる場合は，セメントの20kg／m³を置換

（図表中，Exで示す）を20kg／m³混入したコンクリートについても，設計基準強度が100N／mm²から145N／mm²までの範囲で5N／mm²刻みで大臣認定を取得した。5N／mm²刻みとすることで，設計での自由度が増すだけでなく，最適な設計基準強度を選択することが可能となり経済面にも貢献し，また，自己収縮対策を施すことでコンクリートの品質向上に寄与すると考えられる。検討を行った調合の例を**表－1**に示す。

使用材料は今後の展開と汎用性を考慮して，一般に流通しているJIS製品とし，結合材には低熱ポルトランドセメント(JIS R 5210)とシリカフューム(JIS A 6207)，そして一部では膨張材（JIS A 6202）を使用した。

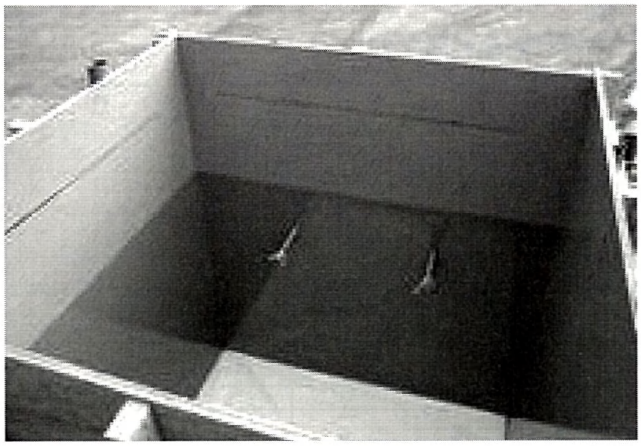
性能評価では主に構造体コンクリートの管理手法と超高強度コンクリートの製造管理方法が審査され，本件では前者を三井住友建設㈱，後者を東京エスオーシー㈱が主に担当し技術資料を作成した。住友大阪セメント㈱は共同申請者として，コンクリートの調合決定および製造検査結果の検証について施工者・生産者と共同管理を行うこととなっている。また，同社が加わることにより，セメントや膨張材の品質安定性の向上とともにシリカフュームスラリーの改良をはじめとする技術的改善がなされた。



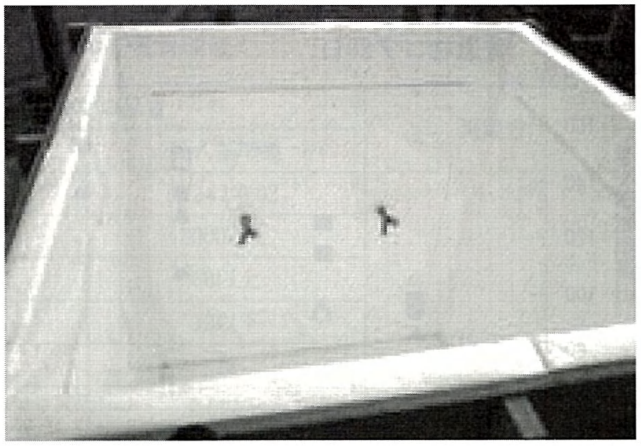
図－1　標準養生供試体強度

3．構造体コンクリートの品質管理

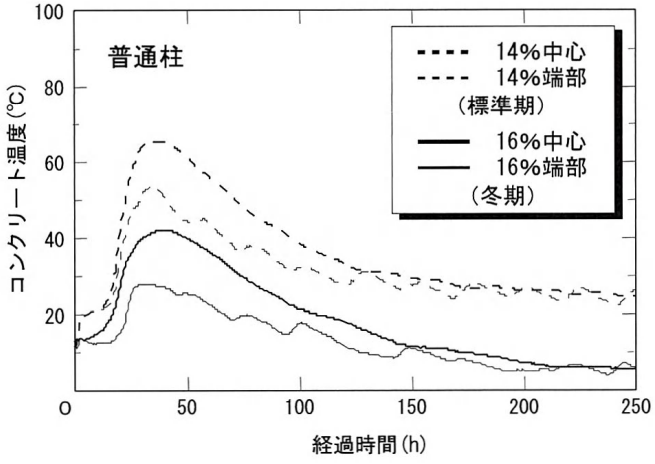
構造体コンクリートの強度は，基本的には実機試験で練混ぜを行い，実大モデルの試験体から採取したコアの試験により，各種条件下での強度発現状況を確認することが必要とされる。しかし，今回のように物件を限定しない場合には使用条件を限定するのは困難である。そこで，種々の施工条件を整理し試験室レベルでコンクリートの練り上がり温度（約10℃～40℃），

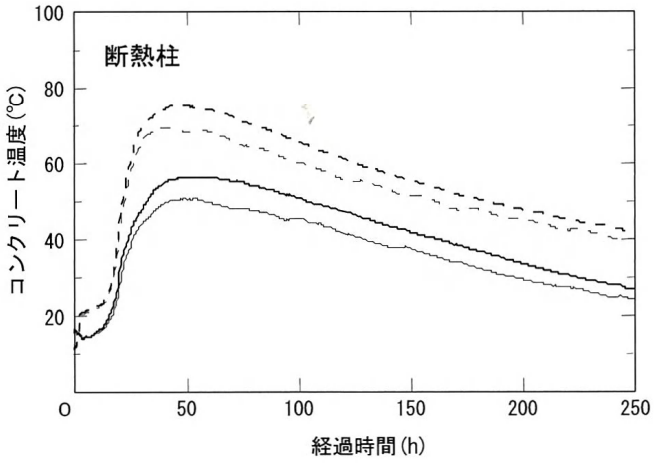


写真－1　普通柱



写真－2　断熱柱





図－2　構造体コンクリート温度履歴

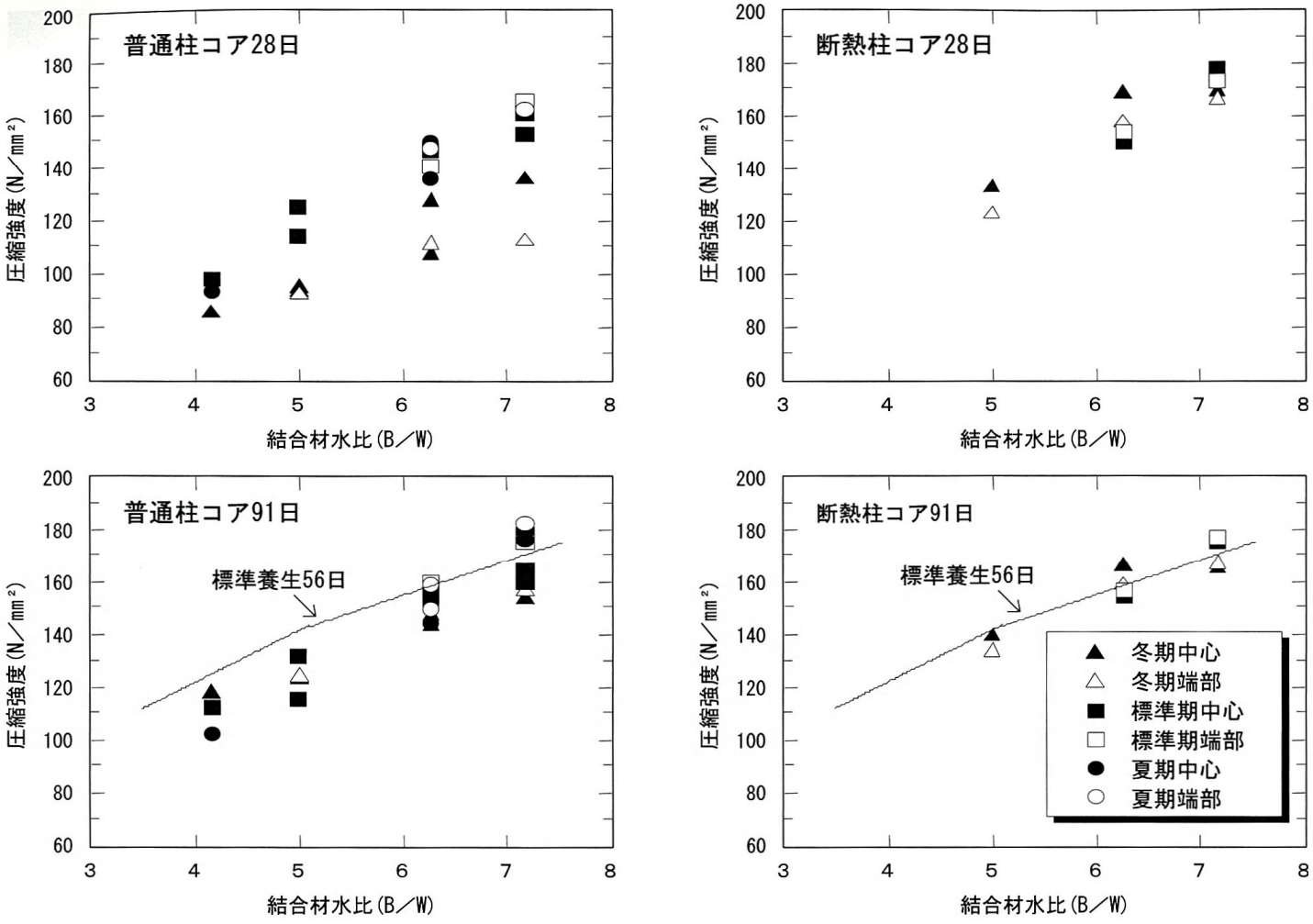
養生温度（約5℃～35℃）などが強度発現に与える影響を確認するとともに，実際の構造物とほぼ同じ温度履歴となる試験体より採取したコア供試体や，構造体を模擬した初期高温履歴を与えた供試体により強度発現を確認した。一方，実機試験は冬期，標準期，夏期にそれぞれ水結合材比を変化させ，標準養生供試体とコア強度を確認した。最終的に，実機試験により得られた結果と室内試験より得られた結果とを照合して，様々な施工条件に対応する強度発現および強度補正値（S値）を算出する手法を提案した。

実機試験より得られた結合材水比と標準養生供試体の圧縮強度の関係を**図－1**に示す。材齢28日では目立たないが，長期材齢になるに従い高結合材水比領域で圧縮強度の頭打ち傾向が顕著となる。そこで今回のコンクリート強度の管理材齢である材齢56日の関係式は，結合材水比5.0で切り替わる2直線を採用した。

今回，製作した模擬部材は，**写真－1**に示すような1m角ブロックの上下を断熱した模擬柱部材（以下，普通柱と称す）と，**写真－2**に示すような上下に加え型枠側面にも断熱材を施した模擬柱部材（以下，断熱柱と称す）の2種類である。模擬柱の種類ごとの測定温度履歴を**図－2**に示す。断熱柱では，普通柱に比べて最高温度が高くなり温度の降下が緩やかになることに加えて，部材中心と端部との温度差が小さくなる。

模擬試験体から採取したコア供試体の圧縮強度との関係を**図－3**に示す。なお，コア91日強度には標準養生の材齢56日強度回帰線を併せて示している。

検討の結果，コア強度は施工時期や条件の影響を大きく受け，コア91日強度が標準養生56日強度と同等以上になる水結合材比の範囲や，施工条件があることを確認した。具体的には，結合材水比が6.0程度以上で，標準期や夏期など最高温度が高くなることが条件となる。冬期に普通柱にコンクリートを打ち込んだ場合，最高温度と養生温度の低さから得られる圧縮強度が低くなることに加え，部材内での圧縮強度のばらつきも大きくなる。このような現象が確認される条件として，



図－3　結合材水比と模擬柱試験体コア強度との関係（無混入コンクリート）
※）図中の直線は標準養生56日回帰線

初期の最高温度が50℃以下であることや材齢28日までの零度を基準とした積算温度（M0）が500℃・h以下が目安となる。一方，断熱柱では強度発現性状が大きく改善された。

これらより，構造体コンクリート強度発現はその温度履歴より推定でき，構造体コンクリートにおいて得られる圧縮強度は，結合材水比と温度条件から管理することができると判断された。

4．製造管理

製造管理では，原材料の受入から貯蔵・計量・練混ぜ・出荷時検査・荷卸し検査までの全工程について見直し，超高強度コンクリートの管理基準を新たに定めた。その主な項目について以下に記述する。

4－1　使用材料の管理

今回，開発した超高強度コンクリートに使用している材料はすべてがJIS製品であり，全国で容易に入手可能であるという点が挙げられる。一般に，生産者はJISやJASSの規格値よりはるかに厳しい自主規格値を定めているのが実情である。そこで，実機試験時に入荷した各材料の品質を検査するとともに，生産者側の過去1年間の試験成績を基に材料受入基準値を定めた。その一例として，低熱ポルトランドセメントのJIS規格値と受入基準値とを**表－2**に示す。

4－2　粗骨材の選定

粗骨材を選定するにあたって，高強度領域でその影響が顕著になると言われている品質に着目し，物性値および水結合材比14%の調合の圧縮強度を確認した。なお，圧縮強度においては，粗骨材本来の強度を確認することを目的とし，標準養生とは別に80℃温水による促進養生での結果も併せて検討した。圧縮強度確認に用いた供試体は標準養生と促進養生を行い，標準養生は鋼製型枠を用いて成型24時間後に脱型して以降は20℃の水中で養生し，促進養生は簡易型枠を用いて成型24時間後から型枠のまま80℃の温水中で所定材齢まで養生を行った。粗骨材の物性値を**表－3**に，粒度分

表－2　低熱ポルトランドセメントの品質管理値

品質項目		セメントの品質		測定方法
		JIS規格値	受入基準値	
密度（g／cm³）		—	3.24±0.02	JIS R 5201
比表面積（cm²／g）		2500以上	3000以上	
凝結	始発（min）	60以上	60以上	
	終結（h）	10以下	10以下	
安定性（パット法）		良	良	
圧縮強さ（N／mm²）	7d	7.5以上	9.5以上	
	28d	22.5以上	35.0以上	
	91d	42.5以上	60.0以上	
水和熱（J／g）	7d	250以下	250以下	JIS R 5203
	28d	290以下	290以下	
酸化マグネシウム（%）		5.0以下	5.0以下	JIS R 5202
三酸化硫黄（%）		3.5以下	3.5以下	
強熱減量（%）		3.0以下	3.0以下	
全アルカリ（%）		0.75以下	0.75以下	
塩化物イオン（%）		0.02以下	0.01以下	
けい酸二カルシウム（%）		40以上	56± 3	
アルミン酸三カルシウム（%）		6 以下	6 以下	

表－3　骨材物性

試験項目		試験方法	規格値	岩瀬	八王子	甲州
				硬質砂岩	硬質砂岩	安山岩
密度（g／cm³）	絶乾	JIS A 1110	2.5以上	2.65	2.66	2.56
	表乾	JIS A 1110	2.65±0.02	2.66	2.67	2.62
吸水率（%）		JIS A 1110	2.0以下	0.45	0.50	2.26
粘土塊量（%）		JIS A 1137	—	0.04	0.03	0.00
微粒分量試験によって失われる量（%）		JIS A 1103	1.0以下	0.1	0.27	0.2
軟らかい石片（%）		JIS A 1126	5.0以下	1.3	3	1.0
安定性（%）		JIS A 1122	12以下	2.5	1.4	2.5
すりへり減量（%）		JIS A 1121	35以下	11.3	12.6	13.3
粒形判定実積率（%）		JIS A 5005	57以上	60.8	60.0	60.2
アルカリシリカ反応性の区分	化学法	JIS A 1145	無害	—	無害	無害
	モルタルバー法による6カ月後の膨張率（%）	JIS A 1146	0.100未満	0.035	—	—
粗粒率（粒度は図－4による）		JIS A 1102	6.60±0.20	6.55	6.63	6.71

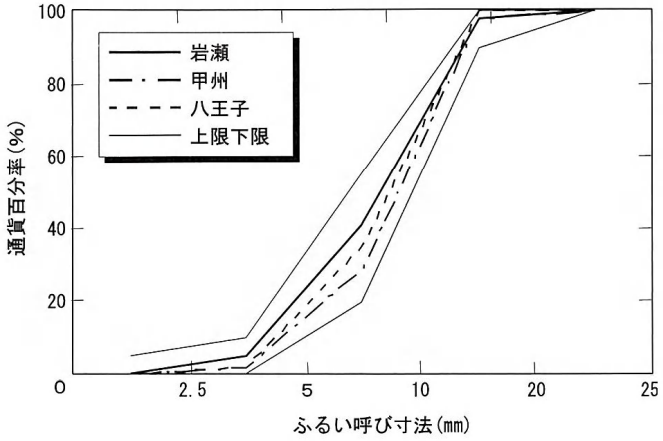
布を**図－4**に，そして圧縮強度の結果を**図－5**に示す。これらより粗骨材間に顕著な差が見られず，また，促進養生では材齢28日でいずれも170N／mm²を超える圧縮強度が得られていることから，使用実績がある茨城県岩瀬産の粗骨材を選定した。

4－3　新分散剤を使用したシリカフュームスラリー

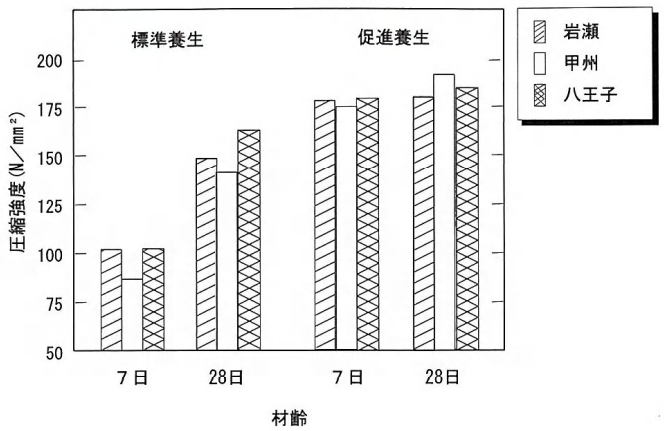
超高強度コンクリート安定製造のため，シリカフュームスラリー用の新分散剤を新たに開発した。新分散剤の特徴は，

(1)旧分散剤と比較して，シリカフュームスラリーの粘度を低減できる（**図－6**）

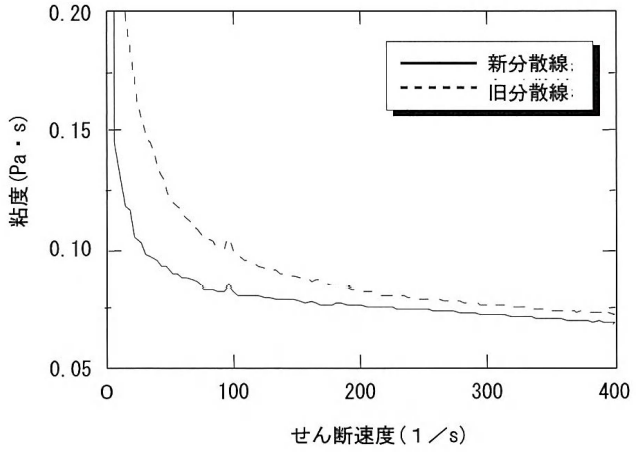
(2)ポリカル系の高性能AE減水剤（図表中，SPで示す）との相性がよく，旧分散剤と比較して少ない量で所定の超高強度コンクリートの流動性を確保



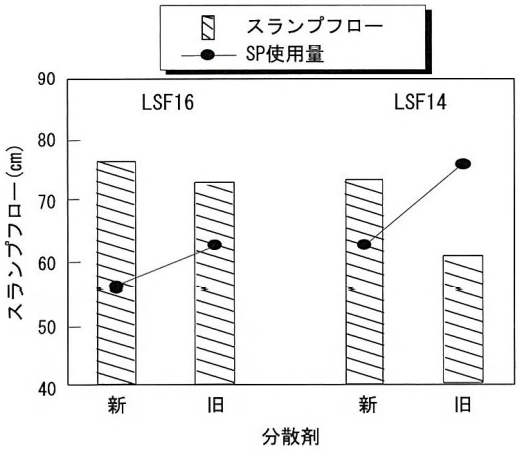
図－4　骨材の粒度分布



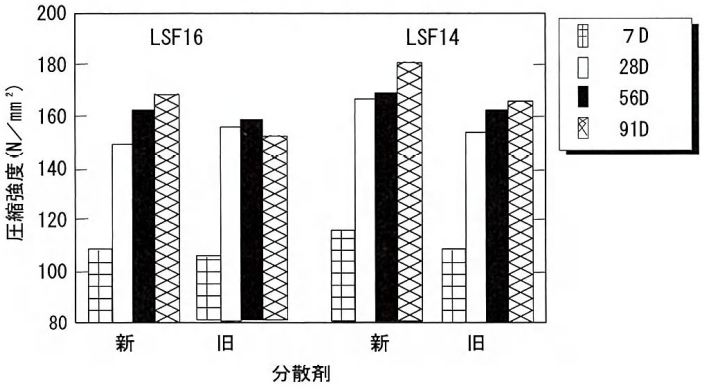
図－5　骨材強度比較



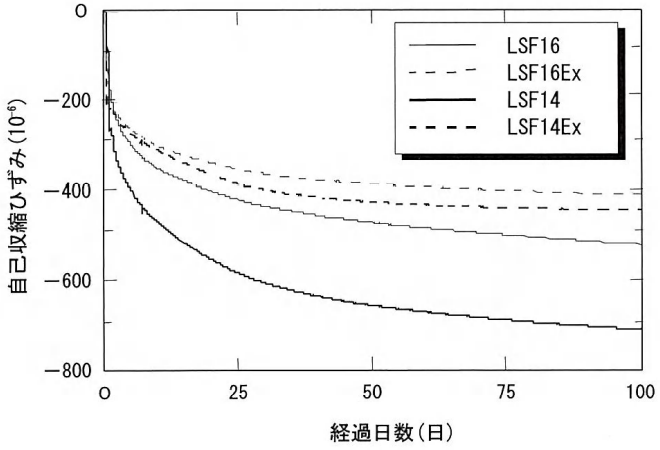
図－6　スラリー粘度の比較



図－7　高性能AE減水剤使用量の比較



図－8　圧縮強度の比較



図－9　自己収縮ひずみ量

できる（図－7）

(3)超高強度コンクリートの圧縮強度は，旧分散剤のそれと比較してもすぐれている（図－8）

(4)機械攪拌を断続的に行うことによって，シリカフュームスラリーの粘度を8週間以上一定に保持できる

などである。

4－4　膨張材による自己収縮の低減

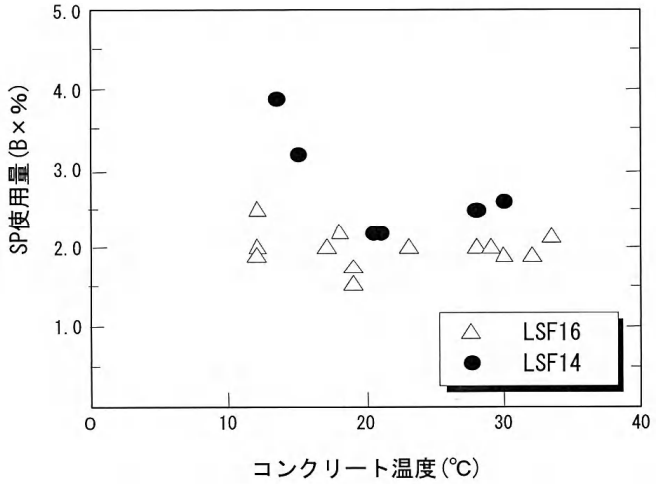
膨張材，収縮低減剤および水和熱抑制剤を単独または併用して，超高強度コンクリートの自己収縮ひずみ低減効果を，20℃一定および高温履歴下において確認した。その結果，所定の自己収縮低減効果が得られる上記の組み合わせから，流動性および圧縮強度の低下が少なく，しかも長期間における安定性を考慮して，標準使用量20kg／m³の膨張材を使用した。その結果，図－9に示すように，膨張材の使用によって無添加の

表－4　製造管理結果の例（水結合材比16%）

No.	日付	材齢28日				材齢56日			
		測定値			平均	測定値			平均
1	3月14日	140	144	138	141	161	158	155	158
2	3月14日	141	147	145	144	155	154	163	157
3	4月11日	151	147	143	147	162	161	161	161
4	6月27日	138	138	137	138	155	150	153	153
5	11月6日	143	146	140	143	158	157	158	158
6	11月6日	135	144	140	140	152	155	155	154
7	11月12日	136	134	136	135	152	148	150	150
8	11月12日	144	142	149	145	159	162	160	160
9	2月11日	146	150	147	148	156	160	156	157
10	5月14日	133	145	142	140	162	154	146	154
11	7月23日	136	142	136	138	157	153	154	155
平均値（N／mm²）					142				156
標準偏差（N／mm²）					4.02				3.37
変動係数					2.84%				2.16%

表－5　高温練り上がり時のフレッシュ性状

調　合	SP使用量（B×%）	フロー時間（sec）		スランプフロー（cm）	空気量（%）	C.T.（℃）	室温（℃）
		50cm	停止				
LSF20	1.70	8.3	89.6	73.5	1.4	37.0	38.0
LSF14	2.60	16.5	123	71.0	1.7	37.0	38.0
LSF20Ex	1.85	6.7	90.5	77.5	1.0	37.0	38.0
LSF16Ex	2.10	12.5	134	75.3	1.5	37.0	38.0
LSF14Ex	2.90	17.1	148	72.0	1.7	37.0	38.0



図－10　コンクリート温度と高性能AE減水剤使用量

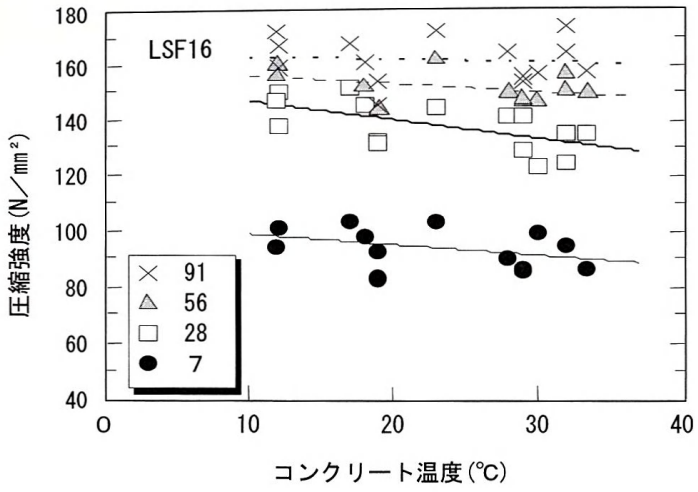
自己収縮ひずみより100～250×10⁻⁶低減できた。

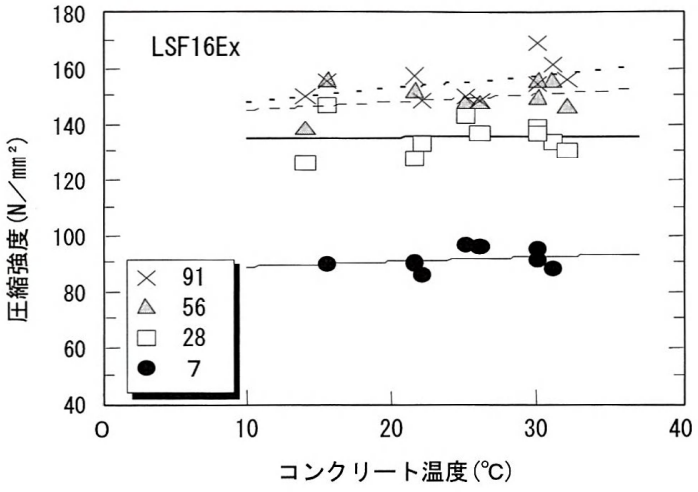
4－5　表面水率および単位水量の管理

単位水量の変動原因となる細骨材の表面水管理が重要となる。砕砂は年間を通じて2.5%程度で安定しているが，山砂は表面水率の変動が大きく，かつ6%を超えることが明らかとなった。このため，山砂をコルゲートサイロで貯蔵して水切りを行い，表面水を安定させることとした。しかし，細骨材の表面水を管理し単位水量の変動を小さくしても，練り混ぜ後に単位水量を確認することが超高強度コンクリートの製造管理では重要であることから，その手法としてマイクロ波式水分計と静電容量式水分計の2種類について検討した。その結果，静電容量式水分計の方がばらつきも小さく，あらかじめキャリブレーションを行い，試験器の読み値を補正することで単位水量を管理することとした。

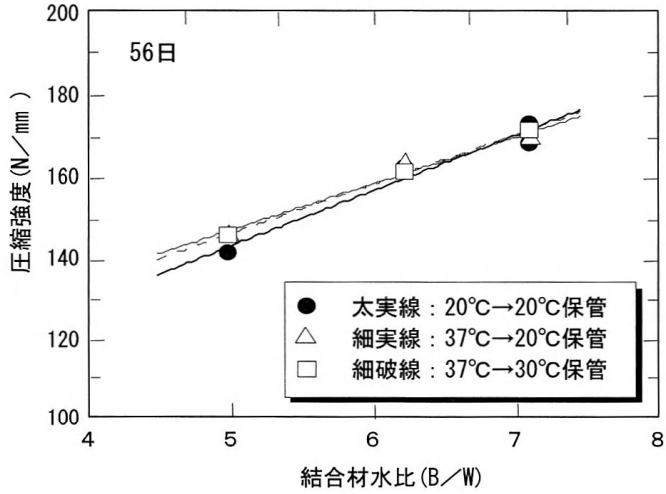
4－6　製造安定性の確認

超高強度コンクリートの品質を確保するため，様々な検討を行い製造管理基準の見直しを行ってきたが，その妥当性を検証するため，実機で練り混ぜたコンク





図－11　練り上がり温度と圧縮強度



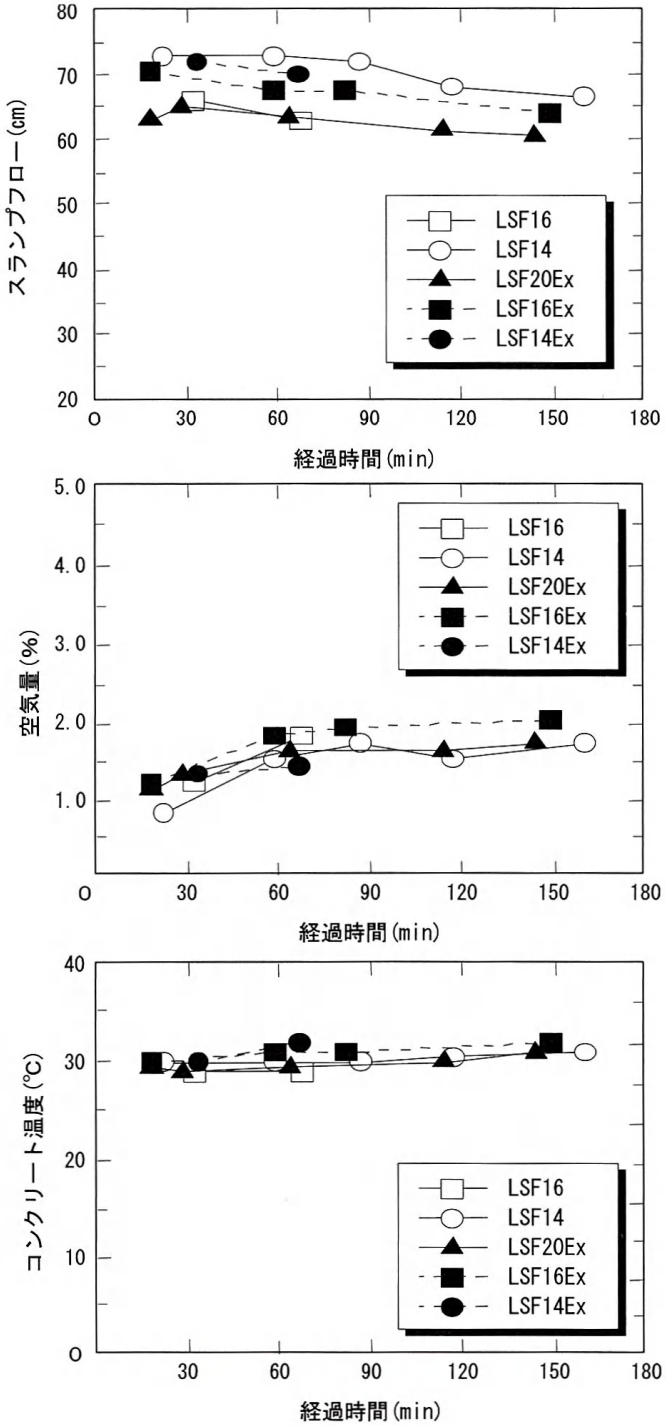
図－12　練り上がり37℃のコンクリートの圧縮強度

リートの品質変動を確認した。その例として，水結合材比16％の例を**表－4**に示す。この結果，製造時期による変動も日内の変動も小さく，圧縮強度の変動係数は4％以下で安定しており，採用した製造管理手法が適切であることが検証された。

4－7　コンクリート温度の影響

コンクリート温度が，フレッシュ性状および圧縮強度に与える影響を検討した。コンクリート温度と高性能AE減水剤使用量の例を**図－10**に示す。高性能AE減水剤の使用量は，コンクリート温度が低くても高くても増加する傾向がある。一方，コンクリート温度と圧縮強度との関係の例を**図－11**に示すとおり，コンクリート温度にかかわらずほぼ同等の圧縮強度が得られている。

夏期に製造を行う場合，天候や練混ぜ時間の条件によってコンクリートの練り上がり時の温度や荷卸し時



図－13　フレッシュ性状の経時変化

の温度が，一般に管理値として採用されている35℃を超えることが予想される。そこで，材料温度と室温を高温に保った条件下でコンクリートの練混ぜを行い，フレッシュ性状や，材齢24時間まで30℃ないし20℃で保管し，その後標準養生を行った供試体の強度発現の確認を行った。結果を**表－5**および**図－12**に示す。これによると，高性能AE減水剤の使用量は増加するものの良好なフレッシュ性状が得られ，管理材齢である材齢56日の圧縮強度は，20℃で練り上げて標準養生を行ったものと遜色のない結果が得られた。以上の結果より，荷卸し時のコンクリート温度の上限を40℃とした。

4－8　運搬時間

フレッシュ性状の経時変化の例として，夏期の結果を**図－13**に示す。この結果，スランプフローは時間とともに小さくなる傾向が見られるものの，夏期においても150分（練混ぜ時の加水後）まで許容範囲内にあり，また，空気量も許容範囲にあることが確認できた。以上より，練混ぜ開始から荷卸しまでの運搬時間の限度を150分とした。

5．今後の展望

大臣認定を取得するにあたり，構造体コンクリート強度を安定して得るために断熱材を施した型枠の検討，使用粗骨材の選別そしてシリカフュームスラリーの改良など個々の技術的検討を行った。超高強度コンクリートの製造管理手法および構造体コンクリート強度の管理手法は，従来からのそれを一新したものではないが，製造に関わる技術者一人ひとりがコンクリートの管理に対して真摯に取り組まなければならない。

今回，芝浦工場で取得した認定によって，東京都心部のほぼ全域に設計基準強度150N／㎟までの超高強度コンクリートを供給することが可能となり，高強度コンクリートの普及に寄与するものと考えられる。また，住友大阪セメント㈱グループの生コン工場は東京エスオーシー㈱の芝浦工場以外にも多数あり，今回審査された製造管理手法を水平展開し，超高強度コンクリートの普及に努めていく所存である。

【参考文献】

1)上原伸郎，鈴木康範，河上浩司，西本好克：超高強度コンクリートの自己収縮低減，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp1099-1104，2005.6

2)河上浩司，西本好克，桝田佳寛：低熱ポルトランドセメントとシリカフュームを併用した高強度コンクリートの強度発現に与える初期温度履歴の影響，日本建築学会構造系論文集，No.601,pp.15-21,2006.3

3)西本好克，伊藤　司：超高強度コンクリートの開発と大臣認定の取得，コンクリートテクノ，Vol.21，No.7，2002.7