

# Fc150N/mm<sup>2</sup> 級高強度コンクリートの実用化に向けての検討

## Study for Practical Application of Fc150N/mm<sup>2</sup> Class High-Strength Concrete

西本 好克 YOSHIKATSU NISHIMOTO  
河上 浩司 HIROSHI KAWAKAMI  
松田 拓 TAKU MATSUDA

試験室の小型ミキサと工場の実機ミキサで練り混ぜた高強度コンクリートのフレッシュ性状、各種養生を行った円柱供試体の強度発現、および模擬試験体の温度履歴と強度発現について検討した。その結果、市中のレディミクストコンクリート工場で安定した製造が可能であり、かつ、練混ぜ開始後 150 分までフレッシュ性状を維持できることが確認された。また、結合材水比や初期温度履歴を考慮した構造体コンクリート強度の補正事例も示している。

**キーワード：**高強度コンクリート、構造体コンクリート、圧縮強度発現、養生方法、フレッシュ性状

An investigation was conducted for a property of a high-strength concrete (Fc 150N/mm<sup>2</sup> class) mixed with two kinds of mixers, i.e., a laboratory-use mixers and an actual-use mixer operated in a mixing plant.

The investigation was carried out about the fresh properties, the strength developments under various curing conditions, and the strength developments and temperature history of the mock structures on the concretes. As a result, it was confirmed that the stable production in usual mixing plants was possible, and the freshness of properties could be maintained for 150 minutes after the commencement of the mixing.

Examples of the strength adjustment for the structural concrete considering the water-binder ratio and the temperature career at early age were shown.

**Key Words:** High-Strength Concrete, Structural Concrete, Strength Development, Curing Method, Fresh Properties

### 1. はじめに

高強度コンクリートを構造体に打ち込むと、自らの水和熱により初期高温履歴を受けることが多い。この場合、初期の強度発現は顕著となるが長期の強度発現は阻害され、最終的に構造体コンクリートで得られる強度は標準養生や20℃封かん養生を行った供試体の強度より低くなると認識されている。そこで、日本建築学会では高強度コンクリートの調合において、高温履歴をうける構造体コンクリートの強度発現性状を考慮して強度補正值を定め、調合するように規定している<sup>1)</sup>。ここで、強度補正值の標準値は設計基準強度（以下、Fc）60N/mm<sup>2</sup>まで示され<sup>2)</sup>、Fc80N/mm<sup>2</sup>までも提案されているが<sup>3)</sup>、Fc80N/mm<sup>2</sup>を超える高強度コンクリートについては提案されていない。100N/mm<sup>2</sup>級の高強度コンクリートは、低熱ポルトランドセメントとシリカフェームを混合した結合材を用いることが多いが、強度発現性状はセメント単独のコンクリートとは異なる。特に、150N/mm<sup>2</sup>級の高強度コンクリートでは、初期高温履歴を受けた場合に長期材齢まで標準養生や20℃封かん養生と同等以上の強

度が得られることが報告されつつある<sup>4),5)</sup>。

今回、Fc150N/mm<sup>2</sup>級までの高強度コンクリートを、試験室の試験練りミキサと、東京都心部のレディミクストコンクリート工場（生コン工場）の実機ミキサで練り混ぜ、各種円柱供試体の強度発現や、模擬試験体の温度履歴ならびに強度発現を確認した。その結果より養生方法、施工時期そして試験体形状と強度発現の関係を確認し、強度補正值の評価を行った。

### 2. 実験概要

実験の要因と水準を表-1に示す。室内試験は3箇所、実機試験は1工場で実施した。コンクリートの練混ぜは強制二軸練りミキサを使用し、室内試験では容量 100L のミキサ、実機試験では 6.0m<sup>3</sup> のミキサとした。

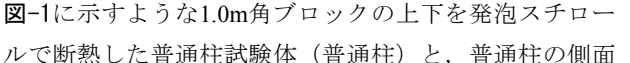
本実験では、強度管理用の円柱供試体の養生方法は標準養生とし、構造体コンクリート模擬試験体より採取したコア強度とした。模擬試験体として、実機試験では、-1に示すような1.0m角ブロックの上下を発泡スチロールで断熱した普通柱試験体（普通柱）と、普通柱の側面

表-1 要因と水準

要因	水準	備考
結合材種類	1	低熱ポルトランドセメント+シリカフューム
骨材	細骨材	3 川砂, 山砂, 山砂と砕砂の混合砂
	粗骨材	2 硬質砂岩砕石(葛生産, 岩瀬産)
試験場所	4	室内3カ所, 実機1工場
実験時期	3	冬期, 標準期, 夏期
フレッシュ性状	5	スランプフロー試験, 空気量, コンクリート温度, 単位水量, 塩化物量
供試体の養生	1	標準養生
模擬試験体	3	模擬柱試験体(普通柱, 断熱柱), 小型試験体

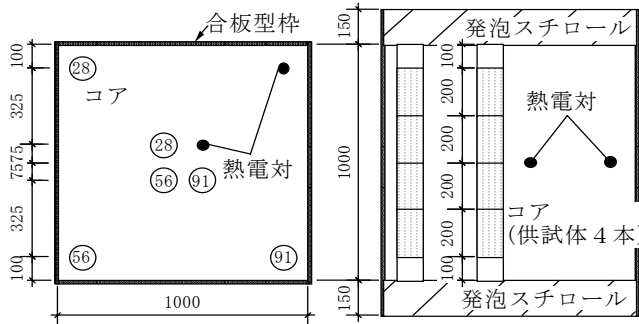


図-1 普通柱試験体の形状

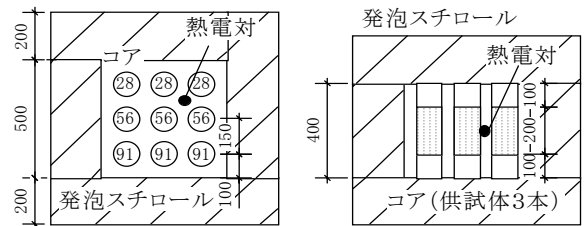


図-2 小型試験体の形状

表-2 使用材料

材料名	種類	諸物性	記号
結合材	低熱ポルトランドセメント	密度: 3.24(g/cm <sup>3</sup> ), 比表面積: 3300(cm <sup>2</sup> /g), C <sub>3</sub> S: 24%, C <sub>2</sub> S: 57%	L
	シリカフューム	密度: 2.20(g/cm <sup>3</sup> ), 比表面積: 226000(cm <sup>2</sup> /g), SiO <sub>2</sub> : 95.6% スラリーの場合 分散剤: オキシカルボン酸, 濃度: 60.0%	SF
細骨材	栃木鬼怒川産川砂	表乾密度: 2.60(g/cm <sup>3</sup> ), 吸水率: 2.29(%)	粗粒率: 2.60
	千葉万田野産山砂	表乾密度: 2.62(g/cm <sup>3</sup> ), 吸水率: 2.57(%)	
	千葉君津産山砂	表乾密度: 2.59(g/cm <sup>3</sup> ), 吸水率: 2.41(%)	粗粒率: 2.62(混合)
	高知島形山産石灰石砕砂	表乾密度: 2.66(g/cm <sup>3</sup> ), 吸水率: 0.60(%)	
粗骨材	栃木葛生産硬質砂岩砕石	表乾密度: 2.67(g/cm <sup>3</sup> ), 吸水率: 0.97(%)	G1
	茨城岩瀬産硬質砂岩砕石	表乾密度: 2.65(g/cm <sup>3</sup> ), 吸水率: 0.81(%)	G2
化学混和剤	超高強度コンクリート用高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP

4面を厚さ50mmの発泡スチロールで断熱した断熱柱試験体(断熱柱)を製作した。以下,両試験体を併せて模擬柱試験体と称す。室内試験で製作した小型試験体(小型)の形状を図-2に示す。小型試験体は,内寸を500×500×400mmとし,その周囲6面を厚さ200mmの発泡スチロールで断熱している。模擬柱試験体のコンクリート温度は,模擬柱試験体では中心部と端部の2カ所に,小型試験体では中心付近1カ所に熱電対を配置して測定を行った。コア供試体の圧縮強度は,各材齢とも模擬柱試験体では中心と端部で4本ずつ,小型試験体では3本で確認した。

使用材料とその物性の代表値を表-2に示す。セメントとシリカフュームは,それぞれ同一銘柄を使用した。細骨材は産地,種類とも多様であるが,粗骨材の岩種は硬質砂岩に統一した。化学混和剤は超高強度コンクリート用の高性能減水剤とした。

材料の組合せと調合を表-3に示す。シリカフュームは室内1と室内2では粉体で,室内3と実機試験ではスラリー状にして混合した。水結合材比の範囲は,室内試験では12.0~25.0%,実機試験では13.0~24.0%とした。

### 3. 実験結果

#### (1) フレッシュ性状

コンクリートの練り上がり温度と高性能減水剤使用量との関係の例を図-3に示す。高性能減水剤使用量は,練り上がり温度が高くても低くても練り上がり20℃と比較して増加し,特にW/B14.0%ではその傾向が顕著である。低温時には高性能減水剤の分散性が低下し,高温時はセメントの水和速度が速まりコンクリートの粘性が増大するためと考えられる。

結合材水比とスランプフロー試験結果の関係を図-4に

表-3 コンクリート調査

	記号	W/B (%)	B/W	SF置換率 (%)	s/a (%)	g/glim	空気量 (%)	使用材料記号			単位量(kg/m <sup>3</sup> )					SP量 (B×%)
								B※	S	G	W	C	SF	S	G	
室内1	A25.0	25.0	4.00	10	50.4	0.525	2.0	L+SF	S1	G1	150	540	60	824	842	1.3~1.7
	A20.0	20.0	5.00	10	46.3	0.525	2.0	L+SF	S1	G1	150	675	75	699	842	1.3~2.2
	A18.2	18.2	5.50	10	43.7	0.525	2.0	L+SF	S1	G1	150	743	83	627	842	1.7~1.8
	A16.7	16.7	6.00	10	40.8	0.525	2.0	L+SF	S1	G1	150	810	90	558	842	1.5~2.4
室内2	A14.3	14.3	7.00	10	35.7	0.525	2.0	L+SF	S1	G1	150	945	105	450	842	1.7~2.5
	B20.0	20.0	5.00	10	42.8	0.528	2.0	L+SF	S2	G2	150	675	75	658	888	1.3~2.2
	B16.0	16.0	6.25	10	36.2	0.528	2.0	L+SF	S2	G2	150	811	94	499	888	1.5~1.7
	B14.0	14.0	7.14	10	30.5	0.528	2.0	L+SF	S2	G2	150	964	107	386	888	1.8~2.0
室内3 & 実機1	B12.0	12.0	8.33	10	21.0	0.528	2.0	L+SF	S2	G2	150	1125	125	235	888	2.6~3.2
	C20.0	20.0	5.00	10	49.2	0.520	2.0	L+SF	S3	G2	140	630	70	471+321	827	1.5~1.7
	C16.0	16.0	6.25	10	44.0	0.520	2.0	L+SF	S3	G2	145	816	91	359+245	827	1.6~2.2
	C14.0	14.0	7.14	10	35.4	0.520	2.0	L+SF	S3	G2	150	966	107	273+182	827	2.2~3.2
実機2	C13.0	13.0	7.69	10	26.1	0.520	2.0	L+SF	S3	G2	160	1108	123	172+117	827	2.4~3.6
	D24.0	24.0	4.17	10	51.5	0.530	2.0	L+SF	S3	G2	140	525	58	521+356	837	1.5~1.7
	D20.0	20.0	5.00	10	48.6	0.530	2.0	L+SF	S3	G2	140	630	70	462+317	837	1.5~1.7
	D16.0	16.0	6.25	10	43.3	0.530	2.0	L+SF	S3	G2	140	788	88	374+255	837	1.6~2.2

※:塗りつぶしはスラリーを使用

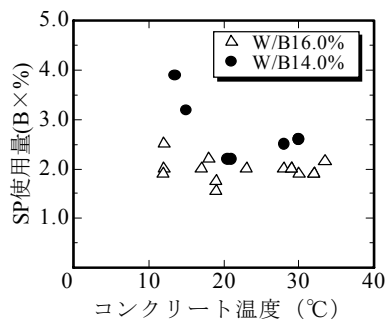


図-3 高性能減水剤の使用量

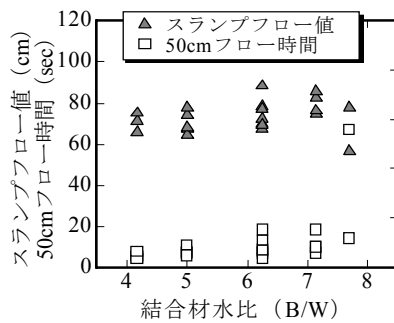


図-4 スランプフローの試験結果

示す。なお、図中では爆裂対策として 3mm の樹脂繊維 (以下、PP と称す) を混入する前の結果を示している。PP 混入前のスランプフロー値は65~ 85cm 程度の範囲にあるが、所要の性状を満たすために結合材水比の増加に伴いスランプフロー値を徐々に大きくする必要があった。一方、50cm フロー時間は結合材水比の増加に伴い遅くなる傾向がある。結合材水比が7.69になると粘性が極端に大きくなり、スランプフロー値が 60cm 以下で、50cm フロー時間が60秒に到達するデータもみられた。

フレッシュ性状の経時変化の例を図-5に示す。スランプフロー値が30分までの間に急激に低下するのは、PP を混入したことによる。その後は、スランプフロー値は緩やかに低下するが、C14.0 の夏期であっても 150 分まで目標範囲内にあることが確認できた。また、C16.0 の冬期では 120 分でのスランプフロー値が目標値を下回ったが、高性能減水剤の再添加によりスランプフロー値を回復することができた。空気量をみると、目標の 2.0% をほぼ確保できている。ここで、空気量は冬期と春期ではPP混入により若干増加し、夏期では経時とともに少しずつ増加していく傾向を示した。コンクリート温度は、

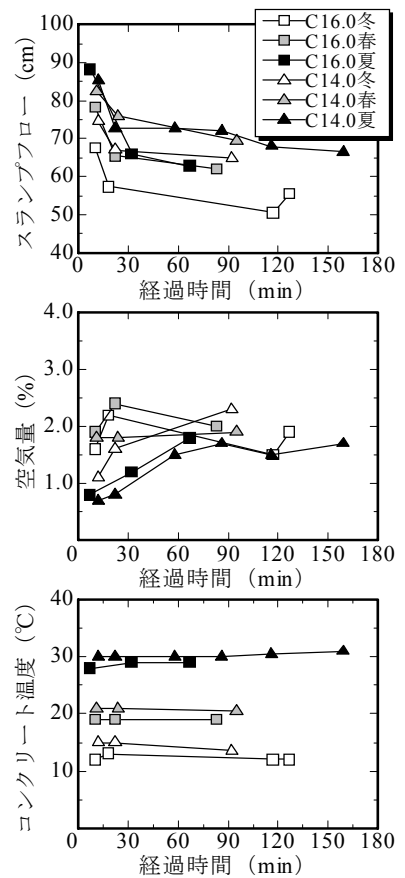


図-5 フレッシュ性状の経時変化の例

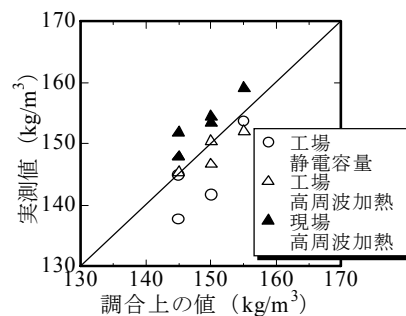


図-6 単位水量の測定結果

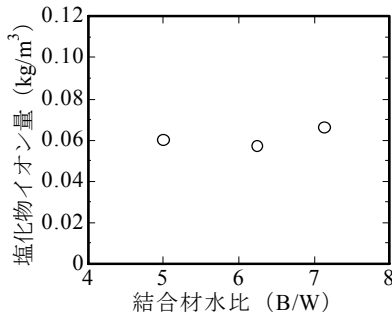


図-7 塩化物量の測定結果

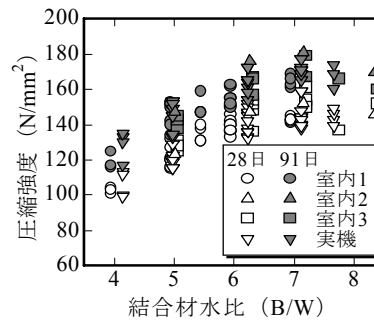


図-8 標準養生試験体の強度結果

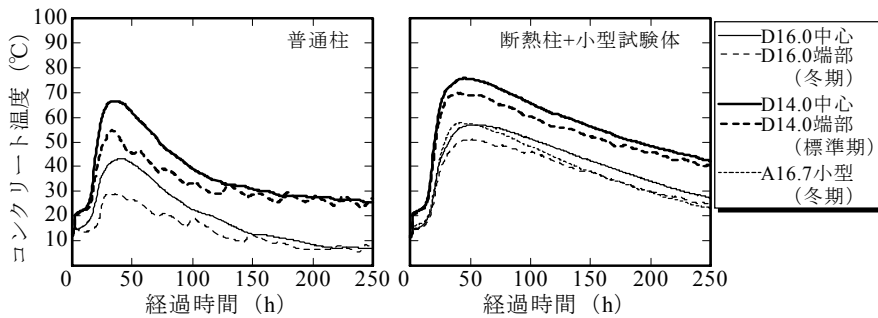


図-9 模擬試験体の温度履歴

それぞれの試験時期ごとに安定している。

調査上の単位水量と単位水量の測定結果の関係を図-6に示す。単位水量の測定は、生コン工場では静電容量法と高周波加熱乾燥法の2手法で、荷卸し現場では高周波加熱乾燥法で行った。その結果、単位水量の実測値はいずれの測定方法でも調査上の単位水量の±10kg/m<sup>3</sup>の範囲内にあった。

塩化物イオン量を測定した結果の例を図-7に示す。

Fc150N/mm<sup>2</sup>級の高強度コンクリートでは、単位結合材量が多いためセメント中の塩化物によりコンクリート中の塩化物イオン量が多くなることが懸念されたが、測定の結果、JASS5<sup>1)</sup>に定められた基準値の0.20kg/m<sup>3</sup>以下であることが確認された。これは、低熱ポルトランドセメント中の塩化物量が年平均0.0044%と、JIS R 5210<sup>6)</sup>に定められる0.02%以下に比べ低く抑えられているためと考えられる。

## (2) 標準養生圧縮強度

標準養生における結合材水比と圧縮強度との関係を図-8に示す。なお、データ数が多く判別しづらいため、図中では結合材水比を±0.1の範囲でずらして示している。圧縮強度は、材齢28日と91日ともに、各結合材水比で20N/mm<sup>2</sup>程度のばらつきがみられた。その原因として、本論では多くの実験データを示しているため、骨材種類や生産時期、結合材の生産時期やシリカフュームの混合方法、あるいは練混ぜに使用したミキサの違いな

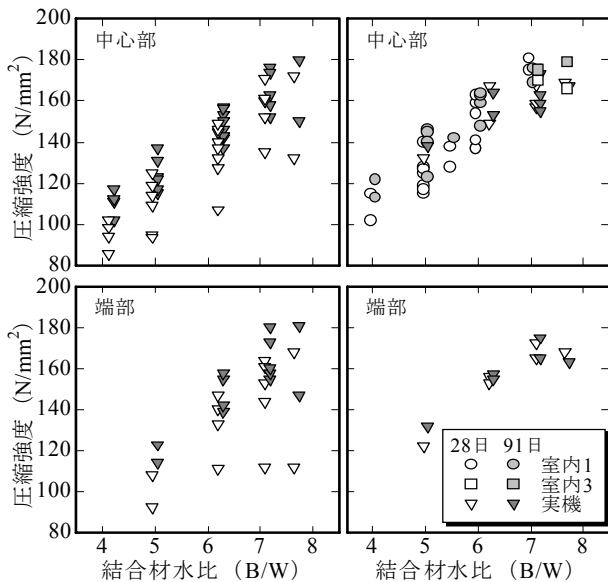
ど、多くの要因が影響したと考えられる。全体として、結合材水比7.0程度までは、結合材水比の増加に伴い強度自体は増加するが、強度の増加割合は小さくなっていく。しかし、結合材水比が7.5を超えると、得られる強度は結合材水比7.0と同等以下となり、頭打ちが顕著になった。

## (3) 構造体コンクリート

模擬試験体で測定された温度履歴の例を図-9に示す。断熱柱では普通柱に比べて、最高温度が高く温度降下速度も緩やかとなることに加え、試験体中心部と端部との温度履歴の差が小さくなる。小型試験体の温度履歴は断熱柱とはほぼ一致していることがわかる。

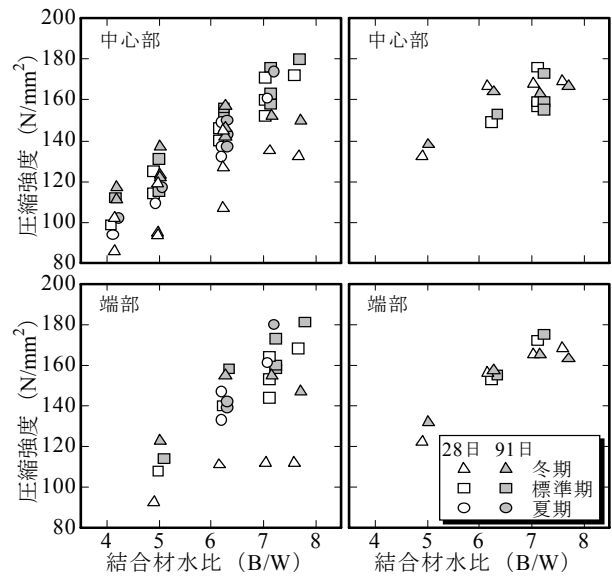
模擬試験体から採取したコア供試体について、結合材水比と圧縮強度との関係を図-10に、また、模擬柱試験体のコア強度を試験時期別にプロットした結果を図-11に示す。なお、図-8と同様に結合材水比を±0.1の範囲でずらして示している。全体的に、コア供試体では材齢28日までの強度発現が大きく、その後材齢91日までの強度増加量は小さい。また、結合材水比が大きくなって、強度の頭打ち傾向はそれほど明確でなく、標準養生とは傾向が異なっている。

図-10より、小型試験体より採取したコア供試体の強度は、断熱柱のコア強度と同等で温度履歴が類似している結果と考えられる。普通柱の結果をみると、材齢28日のコア強度が低い結果も一部確認できるが、図-11より



(a) 普通柱 (b) 断熱柱+小型

図-10 模擬試験体強度 (シリーズ別)



(a) 普通柱 (b) 断熱柱+小型

図-11 模擬試験体強度 (試験時期別)

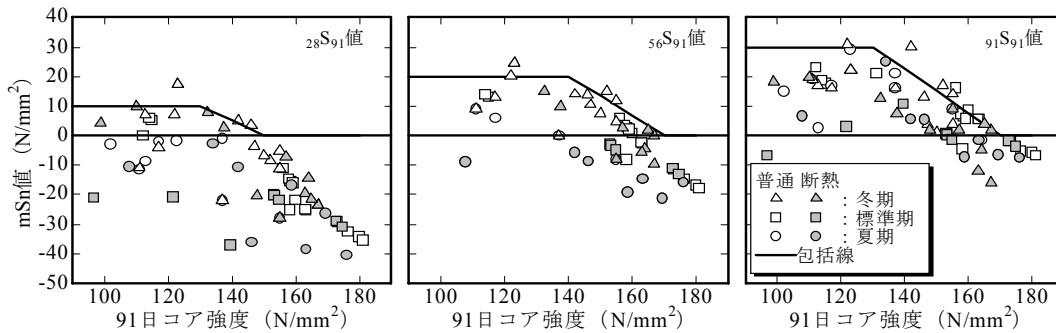


図-12 91日コア強度とmS<sub>91</sub>値との関係

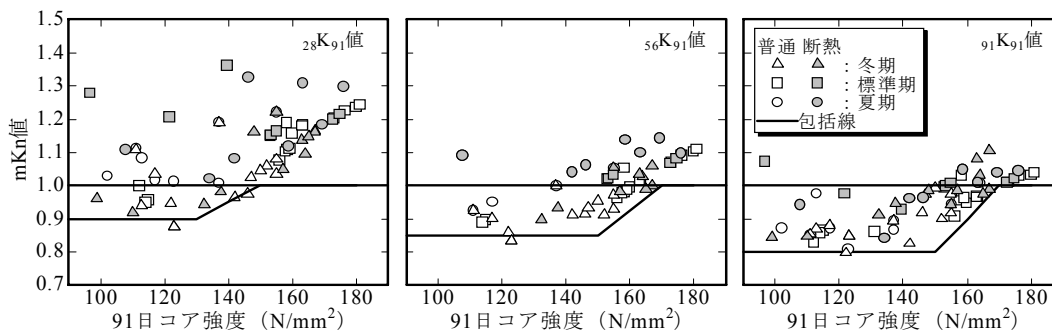


図-13 91日コア強度とmK<sub>91</sub>値との関係

これは冬期試験の結果であることがわかる。また、冬期の普通柱では、温度履歴と同様に試験体内でのコア強度の差が大きい。材齢91日では試験体内の強度差は解消する傾向にあるが、結合材水比が大きい領域では得られる強度が低い傾向に変化はない。しかし、普通柱でも標準期や夏期の場合および冬期でも断熱柱の場合は、その他の時期と同等の強度が得られ、試験体内の強度差も小さいことが確認された。最高温度や養生温度が低いことが強度発現に悪影響を与えていると推察される。

#### 4. 構造体コンクリート強度補正値の検討

標準養生強度を基準に構造体コンクリートの強度補正値 (mS<sub>91</sub>値, mK<sub>91</sub>値) を算出した。材齢91日コア強度でmS<sub>91</sub>値を評価した結果を図-12に、mK<sub>91</sub>値を評価した結果を図-13に示す。材齢91日コア強度が130N/mm<sup>2</sup>を超えると、強度の増加に伴いmS<sub>91</sub>値の最大値は小さく、mK<sub>91</sub>値の下限値は大きくなる。すなわち、強度の増加に伴い強度補正値が低減できると考えられる。

表-4 強度補正值の例

強度補正值	温度条件	設計基準強度(N/mm <sup>2</sup> )					
		~ 100	110	120	130	140	150
$_{56}S_{91}$ (N/mm <sup>2</sup> )	高温履歴なし	20	20	20	15	10	10
	高温履歴あり	15	15	15	10	5	0
$_{56}K_{91}$	高温履歴なし	0.85	0.85	0.85	0.9	0.9	0.95
	高温履歴あり	0.85	0.9	0.95	0.95	0.95	1.0

ここで、標準養生の管理材齢を28日とすると、 $_{28}S_{91}$  値のほとんどが  $0\text{N/mm}^2$  未満となり、 $_{28}K_{91}$  値のほとんどが 1.0 を超える。現状ではS値は  $0\text{N/mm}^2$  以上でK値は 1.0 以下の値をとるよう定められている<sup>2)</sup>ことから28日管理では過剰補正となり、標準養生の管理材齢を延長した $_{56}S_{91}$  値、 $_{91}S_{91}$  値や  $_{56}K_{91}$  値、 $_{91}K_{91}$  値を用いた管理がより適切である。ただし、標準養生の管理材齢を91日にしても、コア強度が  $140\text{N/mm}^2$  を超えると、 $mS_{91}$  値が  $0\text{N/mm}^2$  未満、あるいは  $mK_{91}$  値が 1.0 を超える結果がみられた。

試験体種類や試験時期について検討すると、冬期の普通柱では $_{56}S_{91}$  値や $_{91}S_{91}$  値はすべて  $0\text{N/mm}^2$  以上、 $_{56}K_{91}$  値や  $_{91}K_{91}$  値はすべて 1.0 以下となる。すなわち、 $_{56}S_{91}$  値では最低でも  $10\text{N/mm}^2$  の補正值、 $_{56}K_{91}$  値では最低 0.95 の低減率が必要と考えられた。

標準養生で評価した $_{56}S_{91}$  値ならびに  $_{56}K_{91}$  値の例を表-4に示す。なお、今回は強度補正值の算出を簡便にすることを目的に、最高温度や養生温度が低く得られる強度も低くなった冬期の普通柱を想定した「高温履歴なし」と、冬期以外の普通柱や冬期の養生温度不足の解消を行った断熱柱を想定した「高温履歴あり」の2通りに分類して強度補正值を示した。

## 5. まとめ

本論では、 $\text{Fc}150\text{N/mm}^2$  級までの高強度コンクリートを練り混ぜ、養生条件と強度発現との関係を検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 市中の生コンプラントで十分に製造でききることと練混ぜ開始後 150 分までに、十分なフレッシュ性状を維持できることを確認した。
- 2) 爆裂対策として樹脂繊維を混入すると、その前後でのフレッシュ性状の変化が大きい。
- 3) 今回行った2通りの測定方法では、単位水量の実測値は調査上の値に対し  $\pm 10\text{kg/m}^3$  の範囲にあった。
- 4) コンクリート中の塩化物イオン量は、 $0.02\text{kg/m}^3$  を大きく下回った。
- 5) 標準養生では結合材水比 7.0 程度で強度の頭打ち傾向がみられるが、 $50^\circ\text{C}$  を超える初期高温履歴を受けた場合、頭打ちは明確とならない。

- 6) 実強度が  $140\text{N/mm}^2$  以上のコンクリートでは、材齢 91日においても構造体コンクリート強度が、標準養生強度を上回る傾向があり、その傾向は強度が高いほど顕著となる。
- 7) 標準養生と構造体コンクリートとの強度補正值を整理し、設計基準強度ごとにその例を提案した。

本論は、限られたデータに基づいて検討を行った結果である。標準的な強度補正值の決定については、今後さらなる検討を行う所存である。

なお、本研究の成果により  $\text{Fc}150\text{N/mm}^2$  までの高強度コンクリートについて、(財)日本建築総合試験所にて材料性能評価を受け、国土交通大臣の認定を取得したことを付記する。

**謝辞：**本研究の実施にあたり、住友大阪セメント(株)、東京エスオーシー(株)の諸氏には多大なご支援をいただきました。日本シーカ(株)の諸氏にはご助力いただきました。また、宇都宮大学 榊田佳寛教授にご指導をいただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5, 2003
- 2) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針 (案)・同解説, 2005.2
- 3) 一瀬賢一：各種セメントを使用した高強度コンクリートの構造体コンクリート強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp1063-1068, 2005
- 4) 陣内 浩ほか：設計基準強度  $150\text{N/mm}^2$  クラスの高強度コンクリートによる実大RC柱の施工性と構造体強度発現性状の検討, 日本建築学会技術報告集, 第17号, pp.1-5, 2003.6
- 5) 神代泰道ほか：ジルコニア起源シリカ質微粉末混合セメントを用いた超高強度コンクリートの性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp1057-1062, 2005
- 6) 日本工業規格：ポルトランドセメント JIS R 5210-1997