

# 論文 150N/mm<sup>2</sup> 級高強度コンクリートの強度発現に関する実験研究

河上 浩司<sup>\*1</sup>・松田 拓<sup>\*1</sup>・西本 好克<sup>\*2</sup>・小出 貴夫<sup>\*3</sup>

要旨：試験練りミキサと実機ミキサで、設計基準強度 150N/mm<sup>2</sup> 級までの高強度コンクリートを練り混ぜ、標準養生や高温養生を行った円柱供試体の強度発現と、模擬試験体の温度履歴と強度発現を確認した。その結果、結合材水比や初期温度履歴の条件によりコンクリートの強度発現性状は異なり、一部では長期材齢においても標準養生と同等以上の強度が得られることを確認した。また、温度履歴や圧縮強度試験結果を基に、施工時期や温度履歴と構造体コンクリート強度補正值の関係について検討し、補正值の例を示した。

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

## 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、初期の強度発現が顕著になるが長期の強度発現は阻害され、最終的には標準養生や 20 封かん養生より低強度となる。そこで、日本建築学会では高強度コンクリートの調合を行う場合、高温履歴をうける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、調合する様に規定している<sup>1)</sup>。現在、強度補正值の標準値は、設計基準強度(以下、 $F_c$ ) 60N/mm<sup>2</sup> までが示され<sup>2)</sup>、 $F_c$ 80N/mm<sup>2</sup> までも提案されているが<sup>3)</sup>、 $F_c$ 100N/mm<sup>2</sup> 以上はまだ提案されていない。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ュームを混合した結合材を用いて製造することが多いが、この場合、強度発現性状はセメント単独のコンクリートとは異なり、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<sup>4),5)</sup>。

今回、 $F_c$ 150N/mm<sup>2</sup> 級までの高強度コンクリートを試験練りミキサと、レディー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、実機試験は東京都心部の生コン工場 1 工場で実施した。円柱供試体は 100×200mm で、その養生は標準養生の他、初期高温履歴養生として簡易断熱養生と加熱養生<sup>6)</sup>とした。なお、初期高温履歴養生は封かん状態とし、温度はダミーの供試体に熱電対を配置して測定した。

本実験で製作した模擬試験体は 3 種類である。実機試験では、図-1 に示す 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 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

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	硬質砂岩碎石(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	
供試体の養生	3	標準,簡易断熱,加熱養生(40,60)	
模擬試験体	3	模擬柱試験体(普通柱,断熱柱),小型試験体	

\*1 三井住友建設(株) 技術研究所 修士(工学) (正会員)

\*2 三井住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

\*3 住友大阪セメント(株) セメントコンクリート研究所 (正会員)

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。室内試験では、図-2 に示す内寸 500×500×400mm で、周囲6面を発泡スチロールで断熱した小型試験体(小型)を製作した。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、材料の組合せと調合を表-3 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。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. 試験結果

#### 3.1 フレッシュ性状

スランプフロー値と50cmフロー時間を、結合

材水比で整理した結果を図-3 に示す。スランプフロー値は概ね60~85cmの範囲にあるが、50cmフロー時間の最大値は、結合材水比の増加に伴い遅くなる。空気量はほとんど目標の2.0%程度であり、最大でも3.5%であった。

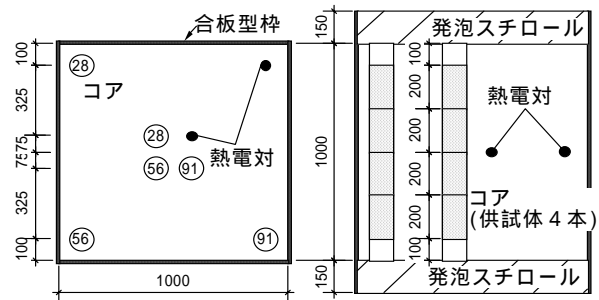


図-1 普通柱試験体  
(断熱柱では側面に50mmの断熱材を設置)

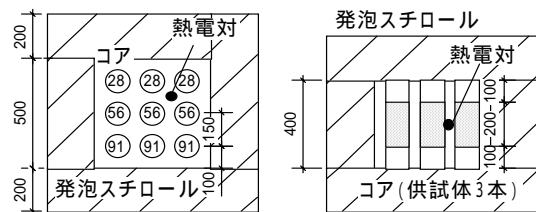


図-2 小型試験体

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	S1
	千葉万田野産山砂	表乾密度:2.62(g/cm <sup>3</sup> ), 吸水率:2.57%, 粗粒率:2.51	S2
	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)
	高知鳥形山産石灰石砕砂	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%, 粗粒率:6.47	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%, 粗粒率:6.76	G2
化学混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	SP

表-3 調合

	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

塗りはスラリーを使用

### 3.2 標準養生

標準養生における結合材水比と圧縮強度との関係を図-4 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の範囲ですらして示している。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>程度のばらつきがある。その原因として、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程度まででは、結合材水比の増加に伴い強度の増加割合は小さくなっていくが、強度自体は増加する。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。

### 3.3 初期高温履歴養生

初期高温履歴養生のうち、加熱養生の温度履歴測定結果を図-5 に示す。加熱養生は、温度の上昇や降下の経過時間と到達温度を管理した。初期高温履歴養生における結合材水比と圧縮強

度との関係を、ダミー供試体での測定最高温度（50以上と50未満）に分けて図-6 に示す。50以上では材齢28日で高い強度が得られ、強度の頭打ちもみられない。一方、50未満では材齢91日でも得られる強度は低く、水結合材比が大きいと頭打ち傾向がみられた。

### 3.4 構造体コンクリート

模擬試験体の温度履歴の例を図-7 に示す。断熱柱は普通柱に比べて、最高温度が高く温度低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差が小さくなる。小型試験体の温度履歴は断熱柱とほぼ一致している。

模擬試験体から採取したコア供試体の、結合材水比と圧縮強度との関係を図-8 に、模擬柱試験体のコア強度を時期別に示した結果を図-9 に示す。なお、図-4と同様に結合材水比を±0.1の範囲ですらして示している。全体的にコア供試体では、材齢28日から91日までの強度増加量は小さいが、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る。

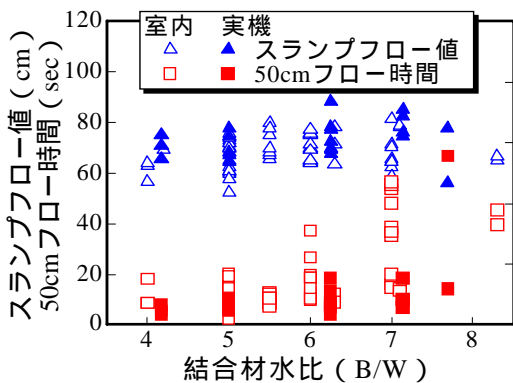


図-3 スランプフロー試験結果

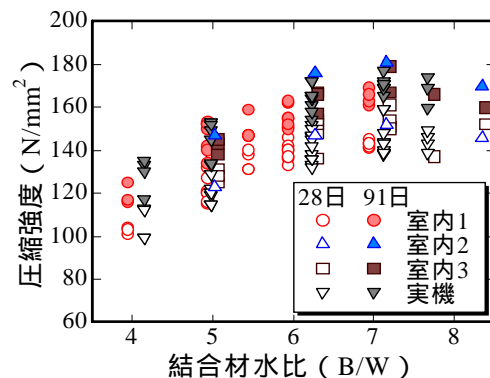


図-4 標準養生強度

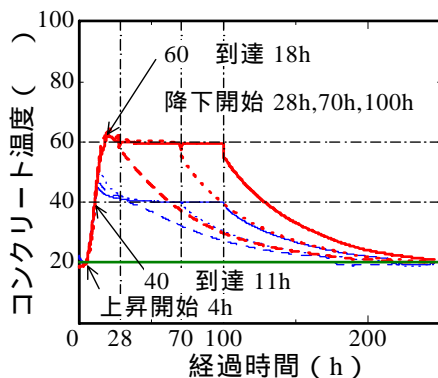


図-5 加熱養生の温度履歴

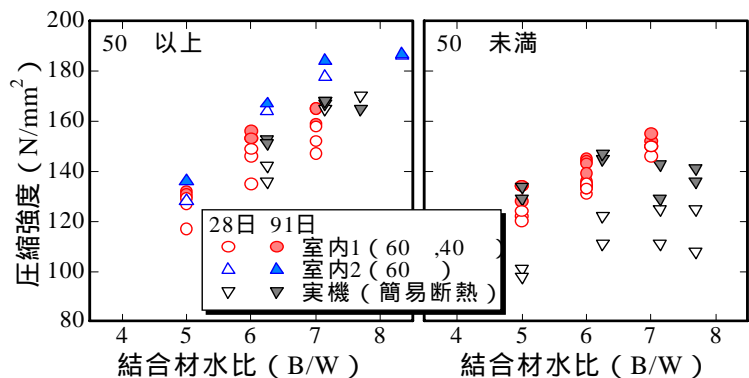


図-6 簡易断熱と加熱養生の圧縮強度

図-8 より、温度履歴と同様に小型試験体のコア強度は断熱柱のコア強度と同等であることがわかる。普通柱では材齢 28 日のコア強度が低い結果も一部みられるが、図-9 より冬期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。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には、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。

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 ( $mS_{91}$  値,  $mK_{91}$  値) を算出した。材齢 91 日コア強度で  $mS_{91}$  値を評価した結果を図-10 に、 $mK_{91}$  値を評価した結果を図-11 に示す。材齢 91 日コア強度が  $130\text{N/mm}^2$  を超えると、強度の増加に伴い  $mS_{91}$  値の最大値は小さく、 $mK_{91}$  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。

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 以下とされている<sup>2)</sup>ことから過剰補正となり、 $_{56}S_{91}$  値、 $_{91}S_{91}$  値や  $_{56}K_{91}$  値、 $_{91}K_{91}$  値による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、

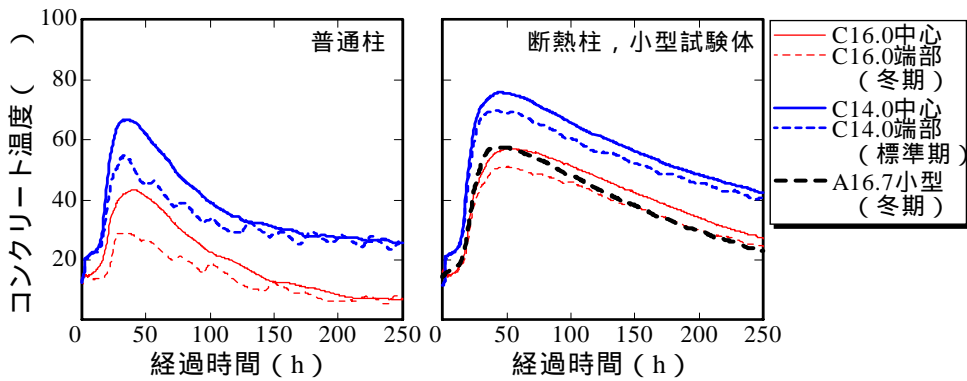
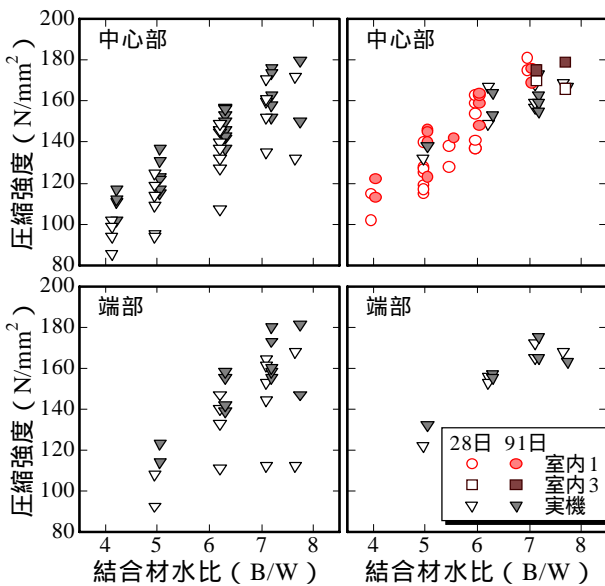
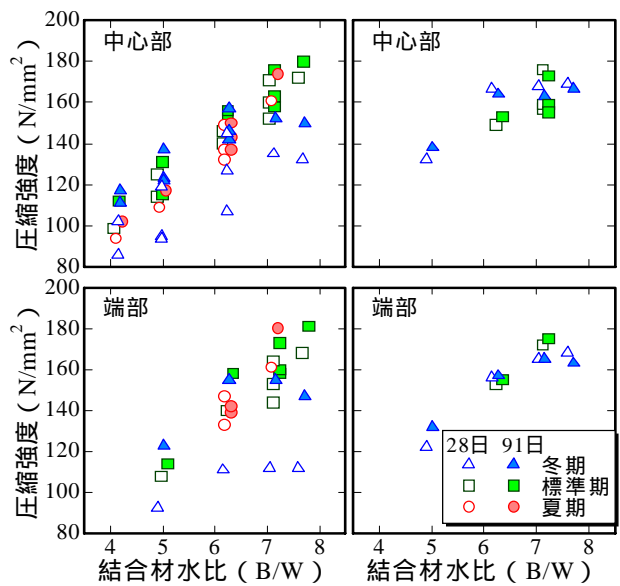


図-7 模擬試験体の温度履歴



(a) 普通柱 (b) 断熱柱+小型

図-8 構造体コンクリート強度



(a) 普通柱 (b) 断熱柱

図-9 柱試験体時期別強度

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  $0N/mm^2$  以上、 ${}_{56}K_{91}$  値や  ${}_{91}K_{91}$  値は 1.0 以下となる。たとえば  ${}_{66}S_{91}$  値では最低でも  $10N/mm^2$  の補正值  ${}_{66}K_{91}$  値では最低 0.95 の低減率が必要である。

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、強度低下が確認された冬期の普通柱などの到達温度が 50 未満である「高温履歴なし」と、到達温度が 50 以上になる「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. 初期高温履歴養生と模擬試験体の強度

初期高温履歴養生と模擬試験体について、養

生方法別に結合材水比と圧縮強度の回帰線を算出した結果を図-12 に示す。材齢 28 日から 91 日の間で強度増加がみられるのは、50 未満の温度履歴養生と冬期普通柱で、その他の養生や模擬試験体では、圧縮強度は材齢 28 日以降ほとんど増加しない。50 以上の高温履歴養生では、構造体コンクリート強度に比べ高い強度が得られていることから、これを基準として比較すると、断熱柱の強度回帰線はほぼ一致しており対応がよい。普通柱との関係を見ると試験時期により異なり、冬期以外では結合材水比が大きいと同等の強度となるが、冬期では結合材水比が小さいと同等の強度となる。冬期の普通柱の 91 日回帰線は、50 未満の温度履歴を受けた供試体の回帰線に近い。

加熱養生供試体の強度と構造体コンクリート

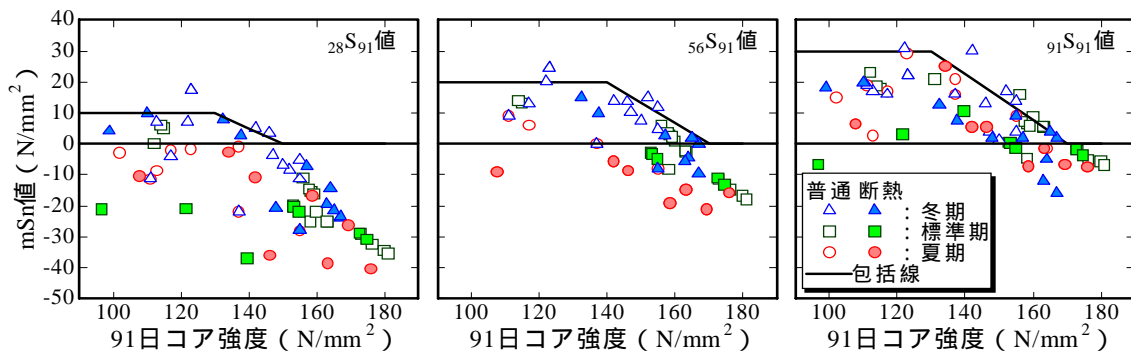


図-10 強度補正值 ( $mS_{91}$  値)

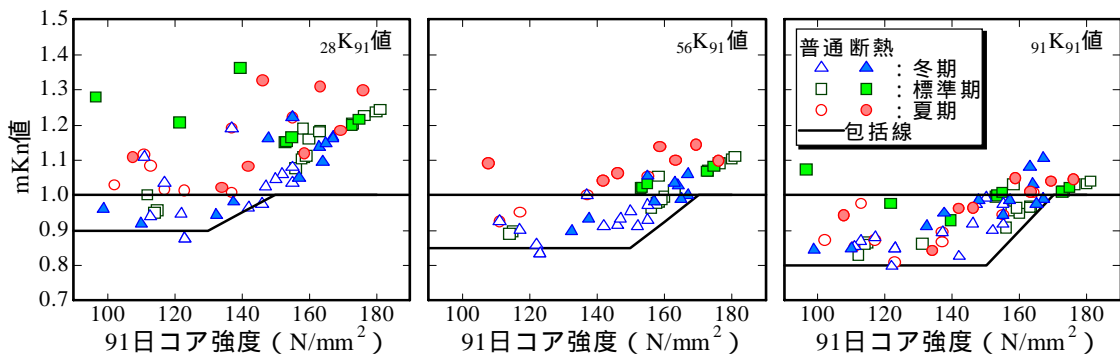


図-11 強度補正值 ( $mK_{91}$  値)

表-4 強度補正值の例

強度補正值	高温履歴の有無 (最高温度50 )	設計基準強度(N/mm <sup>2</sup> )					
		~ 100	110	120	130	140	150
${}_{56}S_{91}(N/mm^2)$	なし(冬期普通柱)	20	20	20	15	10	10
	あり(上記以外)	15	15	15	10	5	0
${}_{56}K_{91}$	なし(冬期普通柱)	0.85	0.85	0.85	0.9	0.9	0.95
	あり(上記以外)	0.85	0.9	0.95	0.95	0.95	1.0

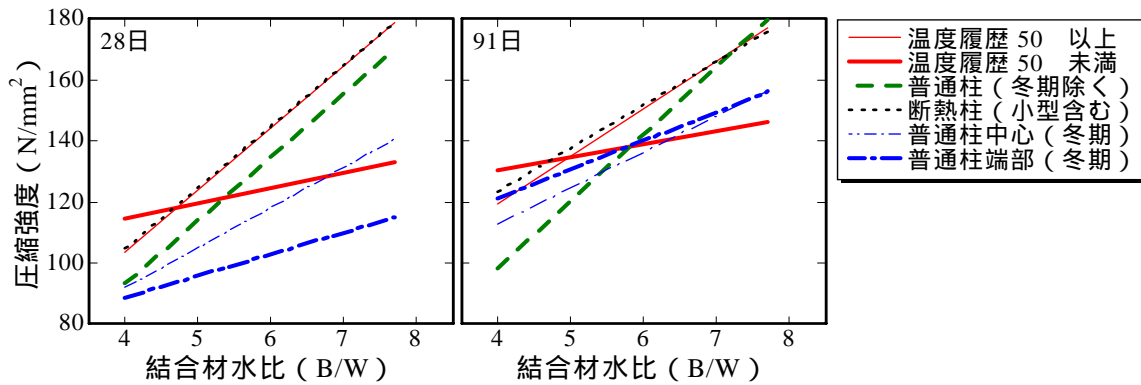


図-12 養生条件や模擬試験体種類別の強度回帰線

強度との間には、試験時期や型枠状態ごとにある程度の関連性がみられ、加熱養生供試体により構造体コンクリートの強度管理ができる可能性を示唆していると考えられる。しかし、データ数が少なく、基準とする温度履歴を含めて今後の課題としたい。

## 6. まとめ

本論では、 $F_c150N/mm^2$  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) 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 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。
- (2) 実強度が  $140N/mm^2$  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。
- (3) 標準養生と構造体コンクリートとの強度補正値を整理し、設計基準強度ごとにその例を提案した。
- (4) 加熱養生を行った供試体の強度と構造体コンクリート強度との間には、試験時期や型枠状態ごとにある程度の関連性がみられる。

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。標準的な強度補正値の決定については、養生方法と強度発現の関係を今後さらなる検討を行う所存である。

謝辞 本研究の実施にあたり、東京エスオーシー（株）と日本シーカ（株）ならびに（株）ポゾリス物産の諸氏にご助力いただきました。また、宇都宮大学 榊田佳寛教授にご助言をいただきました。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  $150N/mm^2$  クラスの高強度コンクリートによる実大 R C 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) 河上浩司ほか：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