

# 論文 超高強度コンクリートの構造体コンクリート強度に及ぼす養生温度の影響

一瀬 賢一<sup>\*1</sup>

要旨：現場打設可能な実強度 180N/mm<sup>2</sup> クラスの超高強度コンクリートについて、打設時期およびコンクリートの水和熱を利用した養生温度の違いによる強度発現性状について試験を行い以下のことがわかった。  
 (1)養生温度を90 とした場合、中庸熱セメントよりも低熱セメントを使用した方が高い強度を得られる。  
 (2)材齢 28 日までは、標準養生よりも養生温度 60 ，更に養生温度 90 と高くした方が高い圧縮強度を得られる。(3)模擬部材の側面を断熱することにより、打設時期によらず材齢 28 日までに 180N/mm<sup>2</sup> 以上のコア強度を得ることができた。

キーワード：超高強度コンクリート，特殊骨材，構造体コンクリート強度，簡易断熱養生，温度履歴

## 1. はじめに

近年、40 層以上の高層集合住宅を中心として、設計基準強度 (Fc)100 ~ 150N/mm<sup>2</sup> の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート造 (RC 造) が設計・施工されてきている。研究レベルでは、Fc150 N/mm<sup>2</sup> を超える材料実験<sup>例えは<sup>1)</sup></sup>、構造実験<sup>2)</sup>の結果も報告されてきている。また Fc150N/mm<sup>2</sup> クラスのコンクリートは、初期に 60 ~ 90 の養生温度を与えると、材齢 91 日以内の標準養生よりも高い強度を確保できる<sup>3)</sup>。このことから、コンクリートの水和熱を利用して部材の断熱により 60 ~ 90 の養生温度を確保すれば、短期に強度を得ることが可能となる。

本研究では、打設時期によらず短期に構造体コンクリート強度を確保することを目的とし、現場打設可能な実強度 180N/mm<sup>2</sup> クラスの超高強度コンクリートを対象に、打設時期およびコンクリートの水和熱を利用した養生温度の違いによる強度発現性状について実験的に検討した。まず室内実験として、セメント、骨材および打設後の養生方法 (型枠脱型の有無、養生温度) をパラメータとして調合を選定した。次に室内実験の結果に基づき、セメント、骨材を選定し、市中の生コン工場を使って製造を行い、打設時期および水和熱を利用した養生温度の違いによる構造体コンクリート強度の発現性状について測定し、考察を加えた。

## 2. 実験の組合せ

実験は、STEP1 室内実験、STEP2 実機試験に分けて実施した。STEP1 では、使用材料 (セメント、細骨材) を組合せ、4 種類の調合を対象とした。STEP2 では、STEP1 で検討した 4 調合の内、最も高い強度を確保できる組合

せを選定し、市中の生コン工場を使って実機試験を実施した。

## 3. STEP1 の実験概要

使用材料は、表 - 1 に示すようにセメントに中庸熱ポルトランドセメント (Mセメント) と低熱ポルトランドセメント (Lセメント)、粗骨材に安山岩砕石 (GA 砕石)、細骨材に安山岩砕砂 (SA 砕砂) と特殊砕砂 (SB 砕砂：Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を主成分とする砕砂)、混和材にジルコニア起源シリカフューム<sup>4)</sup> (ZF、密度 2.30g/cm<sup>3</sup>) とした。ZF は、SiO<sub>2</sub> を主成分に、ジルコニアを 3 ~ 5% 含み、MgO や SO<sub>3</sub> をほとんど含まない。比表面積は、10m<sup>2</sup>/g 以下とシリカフュームより小さく、平均粒径は 1 μm 程度でシリカフュームと比べて大きい点に特徴を有する。骨材の品質を表 - 2 に示す。SB 砕砂は、SiO<sub>2</sub> 系骨材よりも強度発現に優れた骨材であり、文献 5) を参考に選定した。また SB 砕砂は、密度が 3.39g/cm<sup>3</sup> と大きい。しかし粗粒率は、3.91 と大きく、JIS A 5005 「コンクリート用

表 - 1 使用材料

項目	摘要	水準数
セメント	中庸熱(密度3.22 g/cm <sup>3</sup> ) : M 低熱(密度3.22 g/cm <sup>3</sup> ) : L	2
混和材	特殊シリカ質微粉末(密度2.30 g/cm <sup>3</sup> ) : ZF	1
粗骨材	安山岩砕石 : GA	1
細骨材	安山岩砕砂 : SA 特殊砕砂 : SB	2

表 - 2 骨材の品質

種類		表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率	実積率 (%)
粗骨材	GA	2.62	2.39	6.71	60.6
	SA	2.62	2.63	2.75	—
細骨材	SB	3.39	2.60	3.91	—

\*1 (株)大林組技術研究所 建築材料研究室 構造材料グループ長 博(工)(正会員)

砕石及び砕砂」の粒度を外れる砕砂である。コンクリートの調合の概略を表 - 3 に示す。水結合材比 (W/B) は 13%, 単位水量を 150kg/m<sup>3</sup> とした。ZF は, セメントの内割り 20% 混入した。また化学混和剤 (SP) は, ポリカルボン酸系化合物を主成分とする高性能減水剤を使用した。コンクリートのフレッシュ性状は, 目標スランブフロー値を 70cm ± 10cm, 目標空気量を 2.0% ± 1.5% とした。

コンクリートは, 容量 100L の二軸強制練りミキサーを使用し, 1 バッチ 60L とした。練混ぜ方法は, モルタル先練りとし, モルタルを 2 分間練混ぜ, その後粗骨材を投入して 1.5 分間練り混ぜた。供試体は, 打設後封かん養生とし, 養生室 (温度 20 ± 2) で 24 時間養生した。その後脱型予定の供試体 (D 供試体) は脱型し, 脱型しない供試体 (N 供試体) は封かん養生のまま水溫制御式の温度履歴追隨養生水槽に入れ, 各養生温度 (60, 90) まで 15 /hr で昇温させ, 24 時間養生温度を保持した。降温時も 15 /hr で冷却した。降温後は, 供試体を温度履歴追隨養生水槽から取り出し, 標準養生 (水溫 20 ± 3) とし所定材齡まで養生した。C20-D 供試体は, 脱型後標準養生とした。供試体の養生条件を表 - 4 に示す。また使用材料と養生方法の組合せを表 - 5 に示す。

表 - 3 コンクリートの調合の概略

No.	調合名	W/B (%)	S/a (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (C×%)
1	SAM	13	35.0	150	1.3
2	SAL	13	35.0	150	1.25
3	SBM	13	35.0	150	1.3
4	SBL	13	35.0	150	1.25

表 - 4 供試体の養生条件

項目	摘要	水準数
型枠脱型	有り (D), 無し (N)	2
養生温度	20°C (C20), 60°C (C60), 90°C (C90)	3
養生時間	24 時間 (T24)	1

表 - 5 実験の組合せ

No.	調合	供試体記号	材料組合せ		養生温度 (°C)	脱型有無		
			細骨材	セメント				
1	SAM	SAM-C20-D	SA	M	20	D		
		SAM-C60-N			60	N		
		SAM-C90-N			90	N		
		SAM-C90-D			90	D		
2	SAL	SAL-C20-D			SA	L	20	D
		SAL-C60-N					60	N
		SAL-C90-N					90	N
		SAL-C90-D					90	D
3	SBM	SBM-C20-D	SB	M			20	D
		SBM-C60-N					60	N
		SBM-C90-N					90	N
		SBM-C90-D					90	D
4	SBL	SBL-C20-D			SB	L	20	D
		SBL-C60-N					60	N
		SBL-C90-N					90	N
		SBL-C90-D					90	D

測定項目は, フレッシュ性状 (スランブフロー, 空気量, 50cm フロー時間, 単位容積質量, コンクリート温度), 圧縮強度とした。圧縮強度用供試体は, 100 × 200mm とし, 各養生条件に対し 2 材齡 (材齡 7 日, 28 日), 各 3 本採取した。

#### 4. STEP1 の実験結果および考察

##### 4.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験結果を表 - 6 に示す。各調合のコンクリートは, 概ね目標値を満足することができた。混和剤は, セメントごとに一定量としたが, SB 砕砂を用いた場合は, SA 砕砂を用いた場合よりも, スランブフローが若干大きく, 空気量が 0.8 ~ 1.0% 低くなった。これは, SB 砕砂の粗粒率が影響したものと考えられる。

##### 4.2 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を図 - 1, 図 - 2 に示す。また各調合の標準養生供試体 (C20-D 供試体) の材齡 28 日強

表 - 6 フレッシュ性状試験結果

調合名	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	50cm フロー時間 (秒)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	コンクリート温度 (°C)
SAM	67 × 66	1.6	16.1	2439	16.1
SAL	73 × 72	1.7	16.7	2452	17.1
SBM	73 × 74	0.8	6.0	2551	18.0
SBL	77 × 76	0.7	8.1	2557	17.6

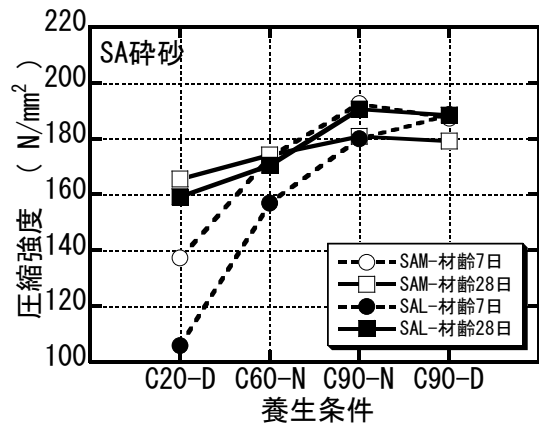


図 - 1 圧縮強度 (SA 砕砂)

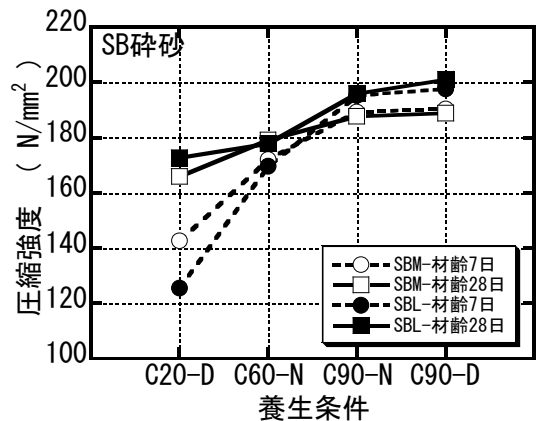


図 - 2 圧縮強度 (SB 砕砂)

度に対する各養生条件における圧縮強度率(以下圧縮強度率と称す)を図-3に示す。

(1)セメントの影響

標準養生の場合,材齢7日ではMセメントを使用した調合の強度発現がよい。しかし材齢28日になると,セメントの違いによる強度差は小さく,遜色ないことがわかる。一方養生温度を与えた場合,60 養生(C60)では,Mセメントを使用した場合の強度が幾らか高く,90 養生(C90)では,MセメントよりもLセメントを使用した調合の強度が8.3~12.2N/mm<sup>2</sup>高い値を示した。またC20-D供試体と比較すると,9~20%高い値を示した。

(2)砕砂の影響

SA砕砂とSB砕砂では,SB砕砂を使用した場合の圧縮強度が若干高くなった。この強度差は,SB砕砂を用いた調合のフレッシュ時の空気量の違いによる影響が砕砂の違いによる影響が判断できない。

(3)型枠脱型有無の影響

SAM調合,SAL調合ではC90-N供試体,SBM調合,SBL調合ではC90-D供試体の強度が高くなり,脱型の有無による強度発現の差は,養生温度90 では認められなかった。これは,強度発現が進む時期に水分の供給を一時阻害しても,強度発現に大きな影響を与えないものと推察される。

(4)養生温度の影響

圧縮強度は,C20-D < C60-N < C90-NおよびC90-Dと養生温度が高いほど高い強度を得た。しかし,養生温度90 とした場合,Mセメントを使用したSAMやSBMでは,材齢7日に較べて材齢28日強度が低下している。このような強度低下は,養生温度60 では確認されないもので,90 から20 への降温時に供試体に影響を与えたものと推察する。

今回の実験における最高強度は,材齢28日のSBL-C90-D供試体であり,3本の平均として201.0N/mm<sup>2</sup>(最大201.6N/mm<sup>2</sup>)を得た。また各条件下の供試体(3本)の圧縮強度の標準偏差は,材齢7日の場合0.4~5.9N/mm<sup>2</sup>,材齢28日の場合0.5~3.4N/mm<sup>2</sup>の値を示した。以上の結果から,STEP2では,表-3に示す調合SBLを採択し,実機試験を進めることとした。

5. STEP2の実験概要

5.1 実験条件

実験条件は,表-7に示す打設時期2水準(夏期,冬期),模擬体の養生方法2水準(6面断熱養生,2面断熱養生)とした。

5.2 使用材料と調合

使用材料は,表-1に示すLセメント,GA砕石,SB砕砂および混和材にZFを使用した。また化学混和剤も

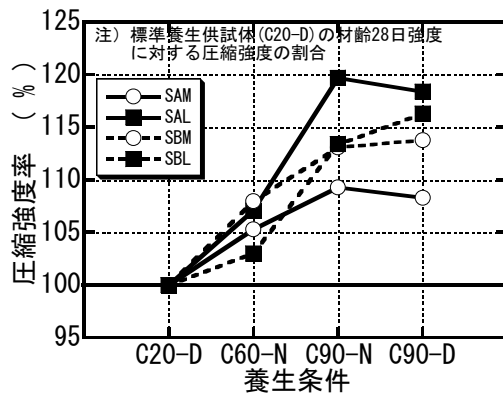


図-3 圧縮強度率

表-7 実験条件

項目	摘要	水準数
打設時期	夏期, 冬期	2
模擬部材の養生方法	6面断熱養生(6面S) 2面断熱養生(2面S)	2

表-8 コンクリートの調合

W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SP* (B×%)	
	W	結合材(B)			SB		GA
L		ZF	EX				
13	150	893	231	30	504	766	1.4 1.3

\*: 上段は夏期, 下段は冬期添加率を示す。

STEP1と同一製品を使用した。なおSTEP2では,収縮補償として石灰系膨張材(EX,密度3.19g/cm<sup>3</sup>)をセメントの内割りとして混入した。膨張材の混入は,管理用供試体では問題とならないが,実強度150N/mm<sup>2</sup>以上のコンクリートを模擬部材に打設した場合,自己収縮によるひび割れが生じやすく,コア供試体の採取が困難となる可能性が高いため採用した。調合を表-8に示す。コンクリートのフレッシュ性状は,目標スランプフロー値を70cm ± 10cm,目標空気量を2.0% ± 1.5%とした。

5.3 測定項目と測定方法

測定項目は,フレッシュ性状(スランプフロー,50cmフロー時間,空気量,単位容積質量,温度),温度履歴性状(模擬部材内部温度),管理用供試体圧縮強度(標準養生,簡易断熱養生),模擬部材供試体から採取したコア強度(中央部,外周部)とした。また冬期の供試体については,一部ヤング係数も測定した。各測定は,それぞれのJISに準じて実施した。管理用供試体は,100 × 200mmとし,5材齢(材齢7日,14日,28日,56日,91日)にて各3本ずつ採取した。簡易断熱養生は,900 × 900 × 200mmの断熱材を3段重ね,その中段中央部に封かんした供試体を入れた。模擬部材試験体は,1000 × 1000 × 高さ:1000mmとし,2面断熱養生(2面S)の場合は上下面を厚さ200mmの断熱材で覆った。また6面断熱断熱養生(6面S)の場合は,上下面の他,側面を厚さ100mmの断熱材で覆った。型枠の打設前の状態

を写真 - 1 に示す。型枠は、材齢7日で撤去した。温度測定およびコア採取位置を図 - 4 に示す。熱電対は、模擬部材試験体の高さ 1/2 の部分、側面中央部から 500mm (中心部), 250mm (中間部), 50mm (外周部) の位置に埋込んだ。コア供試体は、100 × 200mm とし、各材齢ごとに中心部と外周部から 4 本ずつ採取した。

#### 5.4 コンクリートの製造

コンクリートは、容量 3.25m<sup>3</sup> の水平二軸強制練りミキサを使用し、4m<sup>3</sup> (2m<sup>3</sup> × 2 バッチ) 混練した。練混ぜ方法は、モルタル先練りとし、モルタルを 5 分間練混ぜ、その後粗骨材を投入して 3 分間練り混ぜた。総練混ぜ時間は、8 分とした。

### 6. STEP2 の実験結果

#### 6.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状を表 - 9 に示す。混和剤の添加量は、夏期 1.4% に対して冬期の方が 1.3% と少ないが、スランプフローは、冬期の方が大きくなった。しかし空気量には大きな差を認められなかった。

#### 6.2 温度履歴性状

各打設時期における模擬部材、簡易断熱および外気温の温度履歴曲線を図 - 5、図 - 6 に示す。夏期の場合、6面Sでは、中心部の最高温度が 95.8、中間部が 94.4、外周部が 90.2 となり、中心部と中間部の温度差は小さく、中心部と外周部においても 5.6 の差を示した。一方 2面Sでは、中心部が 86.5、中間部が 81.5、外周部が 69.1 となり、中心部と外周部において 17.4 の差が生じており、6面Sに較べて内外温度差が大きい。また材齢 1 日以降の温度履歴は、6面Sと 2面Sでは大きく異なり、最大 40 以上の差が生じた。冬期の場合も 2面断熱の温度履歴性状を夏期の場合と較べるとよく似ており、中心部の最高温度 56.9 に対して、外周部は 36.9 を示した。6面Sの外周部温度の測定結果が無いものの、中心部 70.3 と中央部 69.5 の測定結果から判断して、外周部も 60 以上の最高温度は確保したものと推察される。

#### 6.3 管理用供試体の圧縮強度

標準養生、簡易断熱養生した管理用供試体の圧縮強度の試験結果を図 - 7 に示す。標準養生供試体は、全体的に夏期に較べて冬期の強度発現が悪い。材齢 7 日で 12.3N/mm<sup>2</sup> の差があり、材齢 91 日でも 13.4N/mm<sup>2</sup> の差が生じた。この結果から、練り上がり温度の影響が、長期強度にも大きく影響したのと考えられる。一方簡易断熱強度は、材齢 7 日では夏期よりも冬期の強度が低いものの、材齢 14 日以降では、概ね同程度の強度を示した。また簡易断熱養生した供試体は、材齢 7 日、14 日では、標準養生供試体よりも強度発現が良いものの、材齢 28



6面断熱養生 2面断熱養生

写真 - 1 模擬部材の打設前の型枠

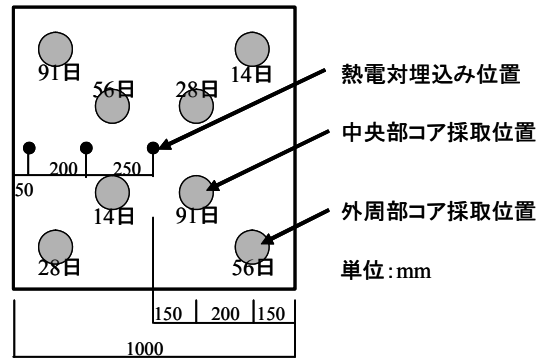


図 - 4 温度測定およびコア採取位置

表 - 9 フレッシュ性状試験結果

打設時期	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	50cm フロー時間 (秒)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	コンクリート温度 (°C)
夏期	66 × 66	1.9	7.6	2548	38.0
冬期	78 × 79	2.1	8.1	2570	17.0

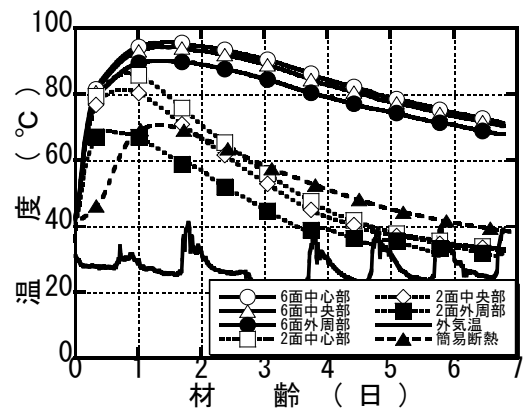


図 - 5 温度履歴曲線 (夏期)

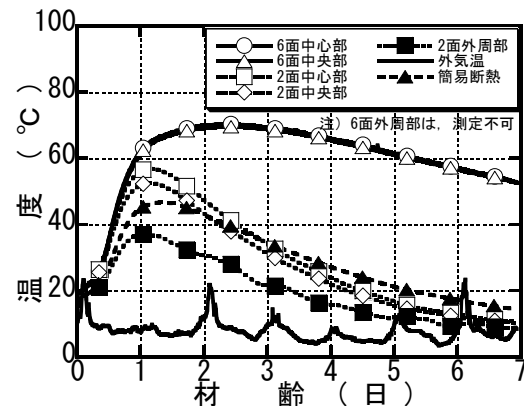


図 - 6 温度履歴曲線 (冬期)

を示した。材齢28日に対する材齢91日の強度増進は、標準養生の場合15～18%、簡易断熱養生の場合8～9.5%であった。

#### 6.4 コア供試体の強度試験結果

各打設時期のコア供試体の強度発現性状を管理用供試体強度を比較して図-8、図-9に示す。この結果から、夏期のコア強度は、6面Sでは材齢14日で平均182.9N/mm<sup>2</sup>を示し、以後の強度増進は認められなかった。また中央部と外周部の強度差も最大7.3N/mm<sup>2</sup>程度であった。2面Sの場合は、中央部では、材齢14日で177.4N/mm<sup>2</sup>を示したが、以降の強度増進が認められなかった。一方外周部のコアについては、材齢14日では147.0N/mm<sup>2</sup>であったが、材齢28日では172.5N/mm<sup>2</sup>を示し、以降の強度増進は認められなかった。またコア強度は、中央部、外周部共に、材齢14日から材齢91日まで標準養生、簡易断熱養生供試体強度よりも高い強度を示した。

冬期のコア強度は、6面Sでは、材齢14日で179.6N/mm<sup>2</sup>を示し、夏期と同様に以降の強度増加はほとんど認められなかった。また中央部と外周部の強度差も夏期と同様小さく、最大9.8N/mm<sup>2</sup>であった。2面Sの場合は、中央部のコア強度が材齢14日で155.0N/mm<sup>2</sup>を示したが、それ以降の強度増加は小さかった。一方外周部は、材齢14日で127.7N/mm<sup>2</sup>を示し、以降材齢に伴い強度が増加し、材齢91日では、148.4N/mm<sup>2</sup>に達した。しかし、中央部のコア強度には届かなかった。

以上の結果から、模擬部材の側面を断熱することにより、打設時期によらず材齢28日までに180N/mm<sup>2</sup>のコア強度を得ることができた。

#### 6.5 養生温度と強度の関係

管理用供試体およびコア供試体の受けた最高養生温度と材齢14日、材齢91日の圧縮強度の関係を図-10に示す。ここで標準養生供試体の温度を、夏期の場合は、練り上がり温度、冬期の場合は、初期養生温度の20と仮定した。また測定できなかった冬期打設の6面S外周部の温度については、60と仮定した。

この結果から、管理用供試体では、最高養生温度70以下であれば材齢14日から91日までに強度の増進が期待できる。コア強度供試体では、60以上では強度の増進がほとんど無いが、温度上昇が若干遅い夏期打設の2面Sの外周部は、最高温度69にもかかわらず強度の増進が認められた。またコア強度は、約185N/mm<sup>2</sup>で頭打ちが認められた。STEP2の模擬部材試験体でSTEP1のように200N/mm<sup>2</sup>を確保できなかった原因としては、以下の点が考えられる。

第一にSTEP1とSTEP2の材齢28日の標準養生供試体強度の差が約30N/mm<sup>2</sup>生じたこと。これは、実機ミキサ

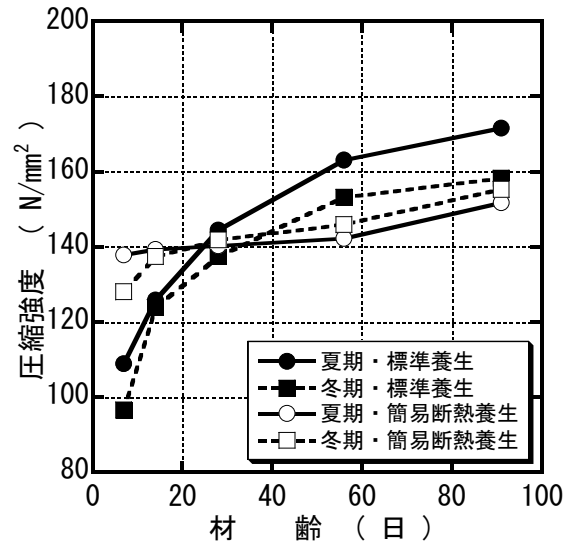


図-7 管理用供試体強度

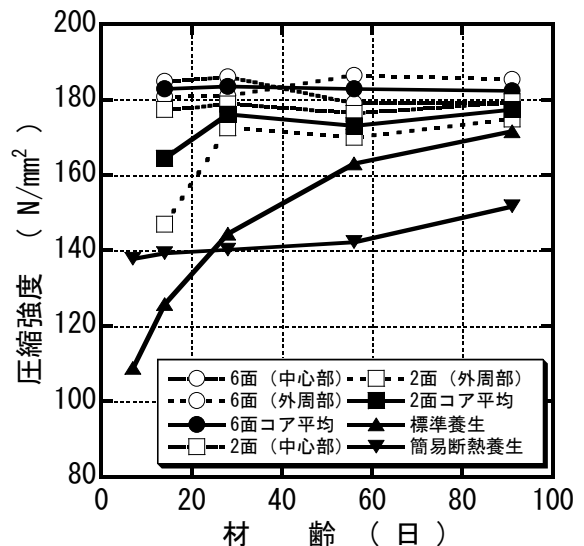


図-8 コア強度と管理用供試体強度(夏期)

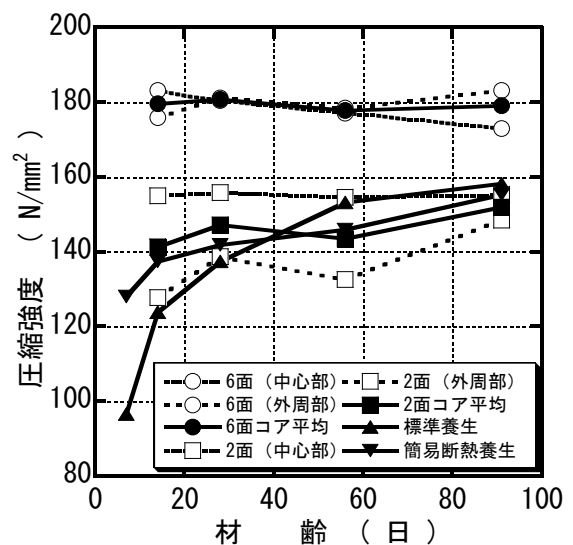


図-9 コア強度と管理用供試体強度(冬期)

の練混ぜ性能の可能性もあるが、収縮補償としてセメントの内割りに膨張材を混入したことが原因となった可能性がある。今回使用した膨張材を使用して、実強度150N/mm<sup>2</sup>程度までは、セメントの内割り混入しても強度に悪影響が生じないことを確認<sup>6)</sup>しているが、180～200N/mm<sup>2</sup>という強度では未知な部分が多く、強度低下が生じた可能性も考えられる。また第二に模擬部材は、水和熱により内部温度が高温になるまでの時間が速いことが考えられる。STEP1では、材齢24時間後から60、90で加熱しているのに対し、STEP2では模擬部材試験体の水和熱に頼っているため、材齢24時間においては、既に最高温度または最高温度に近い温度となっている。筆者の実験<sup>3)</sup>では、60～90の養生温度を与えた場合、若材齢では養生温度を与える前の時間を長く確保した方が、高い強度を得られるものの、材齢91日時点における差異は小さかった。このため、断熱養生により部材に60以上の温度を確保すれば、外部からの養生と同様の結果を得られるものと考えていた。しかし、同じ90でも自らの発熱によるものと与えられた熱とは、異なるものと推察される。

#### 6.6 ヤング係数

冬期のコア供試体による圧縮強度とヤング係数の関係を図-11に示す。圧縮強度125～185N/mm<sup>2</sup>に対して、ヤング係数は、4.1～5.2×10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup>の範囲に分布しており、概ねNew RC式で推定できる値を得た。

#### 7. まとめ

実験の結果、以下のことがわかった。

- (1) 養生温度を90とした場合、中庸熱セメントよりも低熱セメントを使用した方が高い強度を得られる。
- (2) 材齢28日までは、標準養生よりも養生温度60、更に養生温度90と高くした方が高い圧縮強度を得られる。
- (3) 模擬部材の側面を断熱することにより、打設時期によらず材齢28日までに180N/mm<sup>2</sup>のコア強度を得ることができた。

#### 参考文献

- 1) 百瀬晴基ほか：Fc150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1),(その2),日本建築学会大会学術講演梗概集,A-1,pp.805-808,2002.8
- 2) 小室 努ほか:150MPa超高強度コンクリートを用いたRC柱の耐震性能,コンクリート工学年次論文集,Vol.24, No.2, pp.277-282,2002.6
- 3) 一瀬賢一ほか:超高強度コンクリートの強度発現性

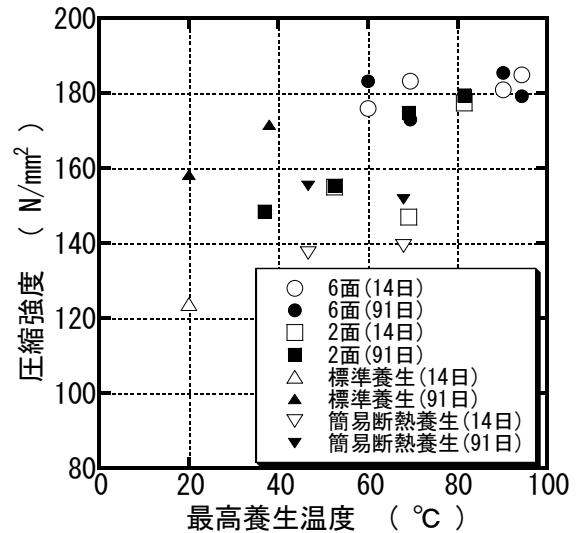


図-10 最高養生温度と圧縮強度

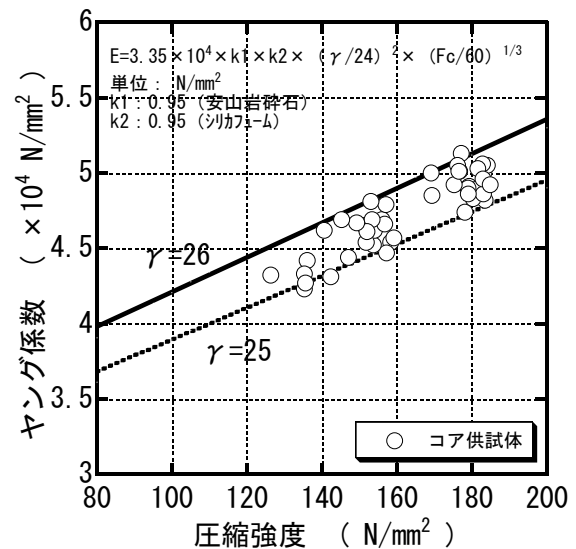


図-11 コア供試体のヤング係数

状におよぼす養生方法の検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.28, No.1, pp.1223-1228,2006.7

- 4) 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, pp.1057-1062,2005.6
- 5) 斉藤裕司ほか:RC超高層建物用コンクリートに関する研究(その5),大林組技術研究所報, No.45, pp.39-42,1992
- 6) 一瀬賢一ほか:Fc100N/mm<sup>2</sup>を超えるRC超高層建物用高強度コンクリートに関する研究(その1)~(その2),日本建築学会大会学術講演梗概集,A-1, pp.497-500,2004.8