

# 高強度コンクリートを用いた柱型試験体の温度履歴 及び強度発現に関する研究

加 賀 秀 治\*

## A Study on Temperature Hysteresis and Strength Development of High-Strength Concrete Cast in Full-Scale Columns

Hideharu KAGA

In this experiment, concrete with specified strength upto 480 kgf/cm<sup>2</sup> was used. It was cast into full-scale columns, and temperature-hysteresis of columns was measured. The strength of column-cores and specimens cured in different conditions was examined from 18 hours to 91 days.

In the result, it was found temperature by hydration heat increased in proportion to cement-water ratio, and the strength of column-cores was inferior to that of standard cured specimen. As for the relation of strength between column-cores and specimens, it was concluded that the curing method following the column-temperature or simple adiabatic curing method was suitable for the inspection of actual concrete strength.

### 1. はじめに

最近、設計基準強度が 360 kgf/cm<sup>2</sup> を越す高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート造高層集合住宅の建設が盛んに進められている。しかし、日本建築学会の鉄筋コンクリート工事標準仕様書 (JASS5) では、普通コンクリートを用いた高強度コンクリートの設計基準強度は 270~360 kgf/cm<sup>2</sup> と定められているため、この値を越す構造物の場合には多くの実験を行い、設計・施工上の安全性を確認することが要求されている。その一つとして、コンクリートの品質管理の問題が挙げらる。

これまでの研究から、高強度になるとセメントの水和熱が構造体強度の発現に影響を及ぼすこと

が分かり、従来の現場水中養生供試体による品質管理手法を再検討する必要性が生じた。そこで、本研究では設計基準強度 480 kgf/cm<sup>2</sup> までの高強度コンクリートを対象とし、標準季・夏季・冬季の 3 シーズンにおいて実大の柱型試験体にコンクリートを打込み、各部位の温度履歴と材齢によるコア強度の発現を調べると共に、養生方法を変えた各種の供試体強度との関係を求め、適正な強度管理の方法について検討することとした。

### 2. 実験の方法

#### 1) 使用材料・調合

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は千葉県君津産の山砂、粗骨材は高知県仁淀村産の石灰石を用いた。また、混和剤にはナフタリン系高強度型の高性能 AE 減水剤を使用した。骨材の品質は下記のごとくである。

\* 本学建築学科、教授  
1994 年 9 月 5 日受理

	絶乾比重	吸水率 (%)	粗粒率・ 最大寸法 (mm)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )
細骨材	2.56	1.55	2.68( 5)	—
粗骨材	2.69	1.68	6.61(20)	1,680

コンクリートの調合は、荷卸し時のスランプ 18 cm、空気量 4% を目標とし、単位水量は 165 kg/m<sup>3</sup> に設定して高性能 AE 減水剤の添加量でスランプを調整した。その添加量は打込み時期によってやや異なるが 1.5～2.0% となり、水セメント比が小さくなるにつれて多くなった。また、水セメント比は設計基準強度 300～480 kgf/cm<sup>2</sup> を目標にして、50～30% の範囲で 4 段階に定めた。実施したコンクリートの調合を表-1 に示す\*。

## 2) 柱型試験体の作成

試験体の作成は東鉄・大都共同企業体技術研究所の試験ヤードで行った。柱型試験体は実大柱部材 (950×950×2100 mm) 17 体と、高さを 1/2 にした半柱部材 (950×950×1050 mm) 20 体とした。このうち、実大柱部材では材齢 28～91 日までの長期強度の性状を、半柱部材では材齢 18 時間～7 日までの初期強度の発現状態を調べることを目的とした。せき板には 15 mm の合板を用い、半柱部材は端面からの熱の発散を防ぐ目的で、上下面に原さ 100 mm の発泡スチールを配置した。また、型

表-1 コンクリートの調合

調合 No	W/C (%)	s/a (%)	質量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
1	31.5 <sup>1)</sup>	34.8	165	524	572	1104
2	36.0	37.8	165	458	640	1091
3	43.0 <sup>2)</sup>	41.0	165	384	718	1072
4	52.0 <sup>3)</sup>	44.1	165	317	797	1048

- 1) 標準季実験 W/C=31% 2) 夏季実験 W/C=42.5%  
3) 夏季実験 W/C=51.5% 標準季実験 W/C=52.5%

\* コンクリートの調合は設計基準強度に不良率に対する割りましと温度補正值を加えて定めるので、設計基準強度が 480 kgf/cm<sup>2</sup> の場合、製造するコンクリートの強度は通常 600 kgf/cm<sup>2</sup> 以上の強度を目標とすることになる。

枠内部には熱電対を設置し、上昇温度を自動記録した。実大柱部材の大きさ及び温度測定点の位置を図-1 に示す。

コンクリートは JIS 表示許可の生コン工場で製造し、試験場まで運搬した。コンクリートの打込みにはコンクリートバケットを用い、1 層の打込み高さを約 50 cm とし、高周波棒状バイブレータを用いて十分に締固めながら打上げた。柱のせき板は材齢 2 日で取り外し、標準季と夏季は 7 日間散水養生し、冬季は材齢 7 日までビニールシートで被覆した。なお、半柱部材上面の発泡スチロール板はコア供試体を採取する際に一時取り外したが、その後は 7 日間置いておいた。コンクリートの打込みは標準季：平成 5 年 4 月 20 日、夏季：平成 5 年 7 月 27 日、冬季：平成 6 年 1 月 18 日に行った。

## 3) 強度管理用供試体の作成

強度試験用には  $\phi 10 \times h 20$  cm の円柱供試体を用い、標準養生・現場封緘養生・現場水中養生・温度追従養生・簡易断熱養生の各種養生を行った。このうち、温度追従養生は柱試験体の温度が外気温とほぼ等しくなると推定されるまでの期間 (7 日間) とし、その後は強度試験の材齢まで現場水中養生または現場封緘養生とした。また、簡易断熱養生には供試体が 8 本入る発泡スチロール製の養生箱を用い、7 日間保存した後強度試験の材齢まで現場封緘養生または現場水中養生とした。簡易断熱養生箱の場合には、同時に採取したダミー供試体の内部温度に熱電対を挿入して温度を測定した。温度追従養生の試験装置の概念図を図-2 に、簡易断熱養生箱の概要を図-3 に示す。

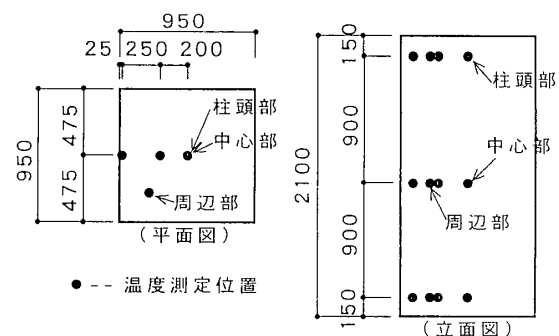


図-1

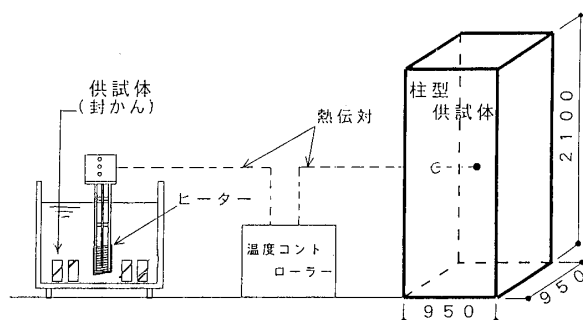


図-2

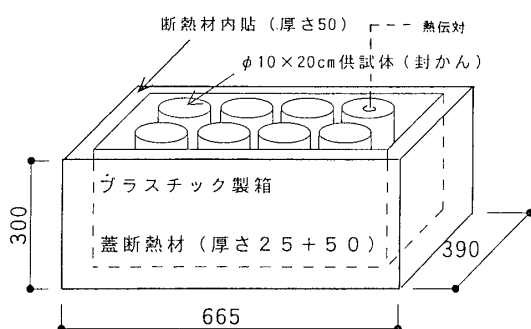


図-3

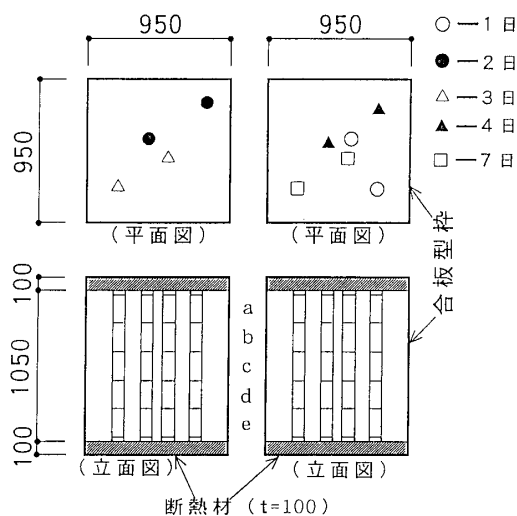


図-4

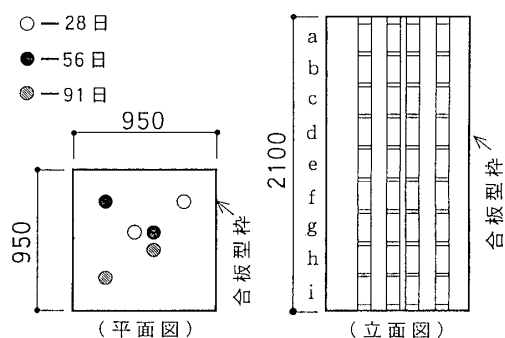


図-5

#### 4) コア供試体の採取

柱型試験体のコンクリート強度を調べるため、半柱部材からは材齢 18 時間・24 時間・3 日・7 日、また実大柱部材からは材齢 28 日・56 日・91 日に、それぞれ取る位置を変えて垂直方向にコンクリートコアを採取した。コアの大きさは  $\phi 10 \times h 20$  cm とし、実大柱部材からは 9 本、半柱部材からは 5 本のコアをそれぞれ切りだし、両面を平滑に研磨して供試体とした。半柱部材及び実大柱部材からの供試体採取位置を図-4・図-5 に示す。作成した供試体は試験材齢日ごとに 200 t 耐圧試験機を用いて圧縮強度を調べた。

#### 3. 試験結果及び考察

##### 1) 柱型試験体の温度履歴

水セメント比 (W/C) 36% のコンクリートについて、打込み季節ごとの試験体各部の温度履歴を示すと図-6 a~6 c のごとくである。その他の水セメント比についてもほぼ同様な傾向にあるので図は省略するが、コンクリートの打込み温度・最高温度・最高温度までの到達時間・上昇温度及びセメント 10 kg 当たりの上昇温度を示すと表-2 のごとくになる。

これらの図や表によると、コンクリートを打込んでからの温度履歴は季節によって差があり、最高温度に到達するまでの時間は夏季で約 24 時間であったが、冬季では約 30 時間であった。また、夏季では 4 日程度で外気温と等しくなったが、冬季では 7 日以上を要した。W/C=36% の場合、柱中心部と周辺部との温度差は標準季と冬季では約  $10^{\circ}\text{C}$ 、夏季では約  $8^{\circ}\text{C}$  の差があり、柱頭部と中心部との温度差はその倍程度の差となった。

柱型試験体中心部の最高温度は水セメント比が小さいほど、すなわちセメント使用量が多くなるほど高くなり、夏季の W/C=31.5% のコンクリートでは  $88.5^{\circ}\text{C}$  にも達した。これを標準季の温度と較べてみると、冬季では  $6^{\circ}\text{C}$  程度低かったのに対して、夏季では  $16^{\circ}\text{C}$  以上も高くなっていた。この違いは打込み時のコンクリート温度によるもので、コンクリート温度が  $30^{\circ}\text{C}$  を越すような夏季では最高温度が高く、最高温度に到達するまでの時

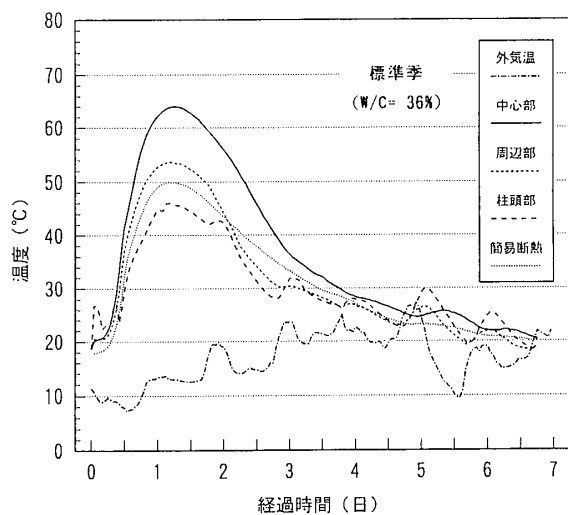


図-6 a

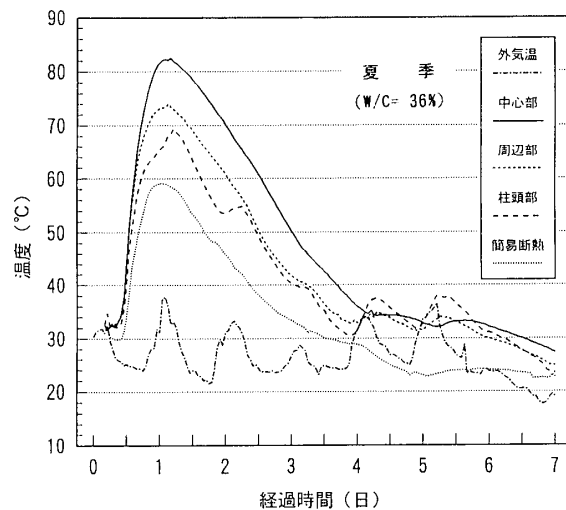


図-6 b

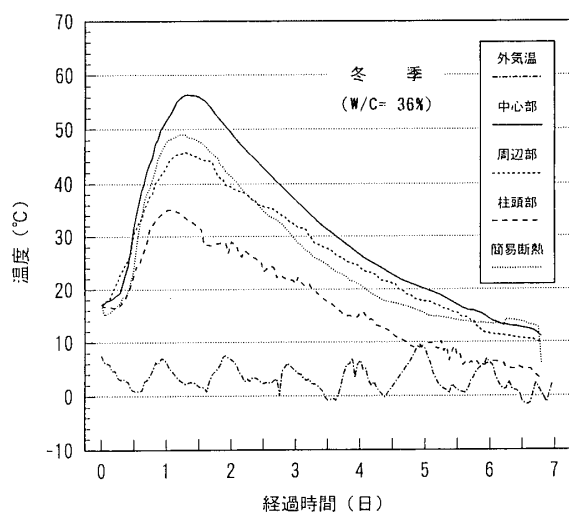


図-6 c

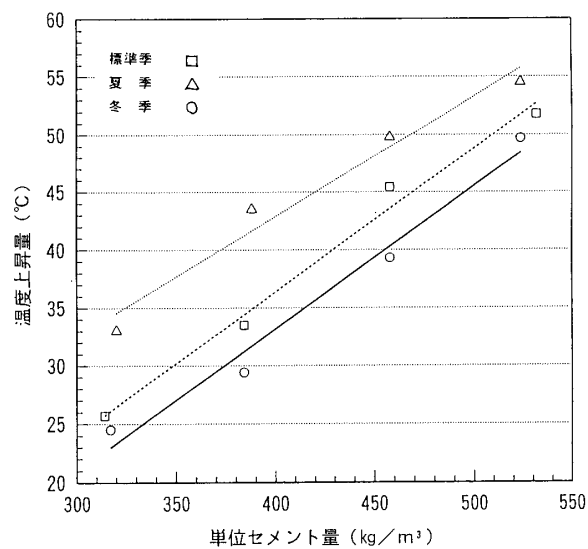


図-7

表-2 柱型試験体の温度履歴測定結果

打設時期	W/C (%)	打設コンクリート温度 (°C)	最高温度到達時間 (時間)	最高温度 (°C)	温度上昇量	
					(°C)	(°C/C=10 kg)
標準季	31.0	20.6	27.0	72.4	51.8	0.97
	36.0	18.6	29.0	64.0	45.4	0.99
	43.0	19.3	31.0	52.8	33.5	0.87
	52.5	19.5	27.0	45.2	25.7	0.82
夏季	31.5	34.0	21.0	88.5	54.5	1.04
	36.0	32.6	24.0	82.4	49.8	1.09
	42.5	31.1	23.0	74.6	43.5	1.12
	51.5	29.3	24.0	62.3	33.0	1.03
冬季	31.5	17.6	29.0	67.9	49.7	0.95
	36.0	17.1	31.0	56.4	39.3	0.86
	43.0	15.8	33.0	45.2	29.4	0.77
	52.0	15.6	28.0	40.1	24.5	0.77

間及び外気温と等しくなるまでの時間は短くなっていた。コンクリートの温度上昇はセメントの水和熱に起因するものであるから、セメント使用量と温度上昇量（最高温度と打込み時温度との差）を調べてみると図-7 のようになる。この図から、温度上昇はセメント使用量にほぼ比例するが、冬季・標準季・夏季と打込み時の気温が高くなるにつれて温度上昇量も小さくなくなることが分かる。なお、セメント 10 kg あたりの温度上昇量は約  $1^{\circ}\text{C}$  で、一般に言われているような値であった。

温度追従試験装置は、柱型試験体の中心部温度に追従するようにセットしたが、供試体の水槽温度は柱型試験体の中心部温度より  $2^{\circ}\text{C}$  程度低い値となった。しかし、温度履歴にはよく追従しており、性能としては良好であったと言える。また、簡易断熱養生槽の供試体温度を柱中心部の温度と較べてみると、冬季では  $6^{\circ}\text{C}$  程度低いだけであったが、標準季には  $16^{\circ}\text{C}$ 、夏季には  $22^{\circ}\text{C}$  も低くなっており、改善する必要があることが分かった。

この他、図には示していないが、実際の構造物と同様に配筋した RC 柱部材（主筋：16-D 41、スパイラルフープ： $\phi 13$ ）と無筋の柱部材とについて温度上昇量を比較した結果、柱中心部の温度差は 3 シーズンとも RC 柱部材のほうが  $5\sim 7^{\circ}\text{C}$  低くなっており、鉄筋からの熱放散がかなりあることが分かった。

## 2) 供試体強度とコア強度

標準季に打込んだコンクリートについて、標準養生供試体の材齢と強度との関係の水セメント比別に示すと図-8 のごとくであり、材齢 10 日を過ぎる頃から強度の伸びが低下し、その傾向は水セメント比が小さいほど顕著であった。夏季と冬季に打込んだコンクリートの強度はやや低い、ほぼ同様な傾向であった。また、材齢 28 日における圧縮強度とセメント水比との関係を季節別に調べると図-9 のごとくであり、標準季に対して夏季と冬季の強度は低くなっていた。

コア供試体の採取位置（高さ方向及び中心部と周辺部）による圧縮強度（材齢 28 日）の違いを、夏季に打込んだ実大柱部材について水セメント比別に示すと図-10 のようになった。一般にコア採

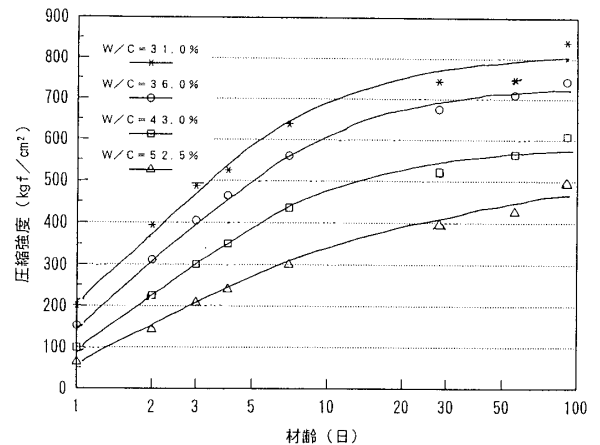


図-8

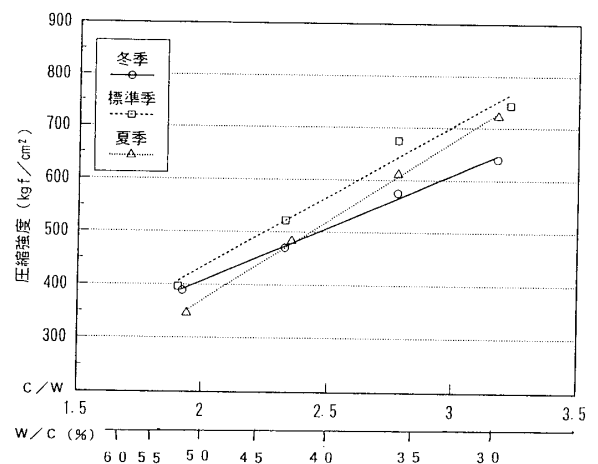


図-9

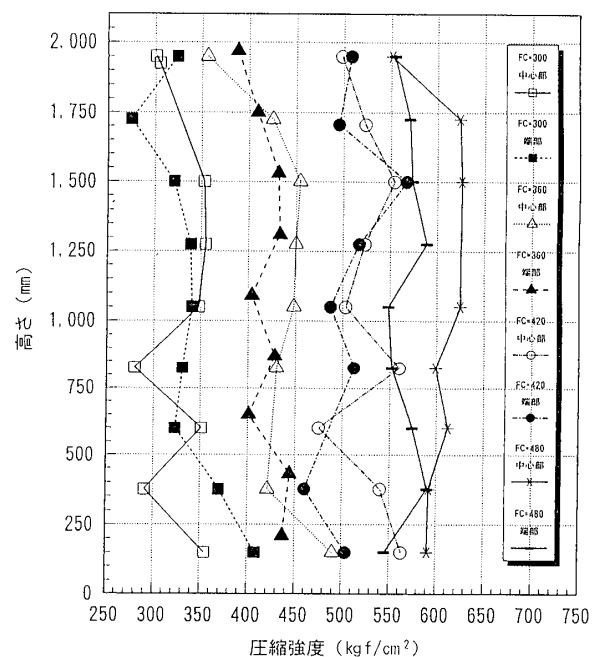


図-10

取位置による強度差は高さ方向については上部のほうが、水平方向については周辺部のほうが小さいと言われており、今回の実験でもややその傾向が見られた。しかし、個々の値で柱型試験体相互の関係を比較しにくいので、以降ではすべてのコア強度の平均値を用いて比較することとした。この場合、平均値に対する変動計数は5~7%で、強度が高くなるにつれて大きくなっていった。

材齢28日と91日において、標準養生供試体強度に対するコア強度の比 ( $P_N = N$  日コア強度/ $N$  日標準養生供試体強度) とコンクリート中心部の最高温度との関係を図-11に、また、材齢28日のコア強度に対する材齢7・56・91日のコア強度の比 ( $G_N = N$  日コア強度/28日コア強度) とコンクリート中心部の最高温度との関係を図-12に示す。図-11を見ると、 $P_N$  は1より小さく、最高温度が高くなるにつれてその値が小さくなっており、材齢28日より91日のほうが小さい。このことは、コア強度は標準養生強度より小さくなり、最高温度が高くなるにつれてその差が開くことを示している。また、図-13においては、 $G_N$  は材齢7日では0.8~0.95であり、最高温度が高くなるとやや大きくなる傾向にあるのに対して、材齢56日と91日では最高温度が40℃の時には1.2~1.35であるが、最高温度が高くなるにつれて低下し1に近い値になっている。このことは、コア強

度は材齢28日以後も伸びるが、最高温度が高くなるにつれて殆ど伸びがないことを示している。

### 3) 供試体によるコア強度の管理

#### a. 短期材齢におけるコア強度の管理

冬季に打込んだ半柱部材 (W/C=30%) において、コンクリートの打込み後18時間と24時間後に頭部コンクリートから採取したコア強度と各種養生方法による供試体強度と比較した結果を表-3に示す。この表によると、現場封緘養生ではまったく強度が出ておらず、また簡易断熱養生では強度が高くなり過ぎており、コア強度とほぼ等しい低めの値となったのは標準養生か温度追随養生である。このことから、短期材齢における管理用供試体の養生方法としては標準養生か温度追随養生が適当であると言える。

#### b. 初期材齢におけるコア強度と供試体強度

型枠の取り外し時期におけるコンクリート強度を調べるために行った試験結果から、材齢3日及び7日におけるコア強度と現場水中養生強度との関係を図-13aに、温度追随養生・簡易断熱養生強度との関係を図-13bに示す。これらの図によると、現場水中養生供試体は材齢3日ではコア強度に達していないが、材齢7日では夏季と標準季において供試体強度のほうが高くなっている。また、温度追随養生と簡易断熱養生の場合には、強度が高くなると供試体強度のほうがやや高くなってい

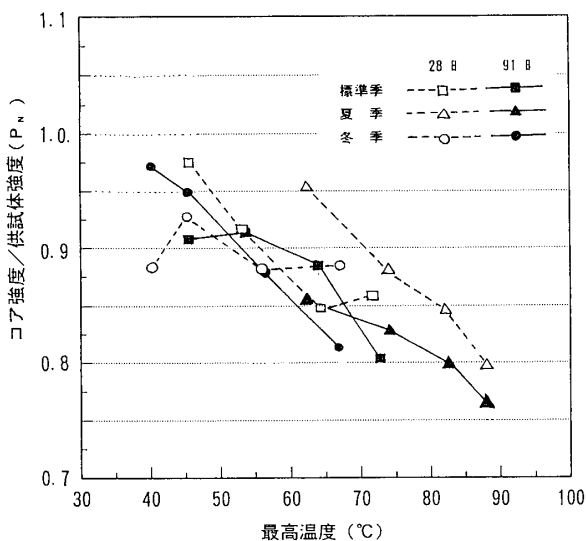


図-11

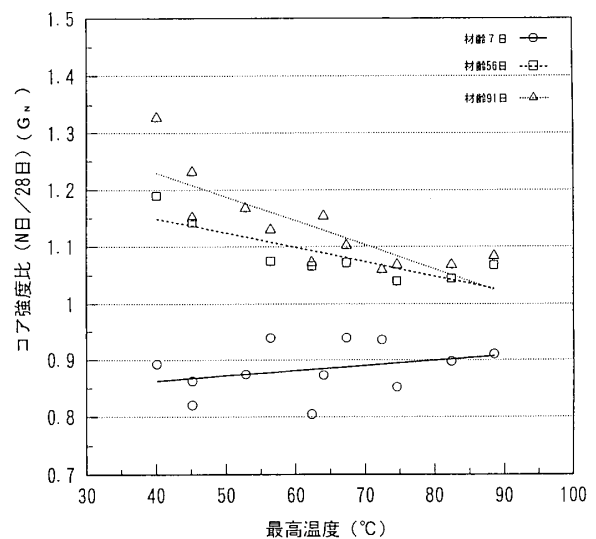


図-12

表-3 初期材齢における各種養生供試体強度の比較 (柱頭部)

試験材齢 (時間)	コア強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	標準養生強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	現場封かん 養生強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	温度追随 養生強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	簡易断熱 養生強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
18	78 (100%)	69 (89%)	2 (3%)	59 (76%)	111 (142%)
24	119 (100%)	125 (105%)	20 (17%)	113 (95%)	204 (171%)

( ) の数字は、コア強度に対する%を示す。

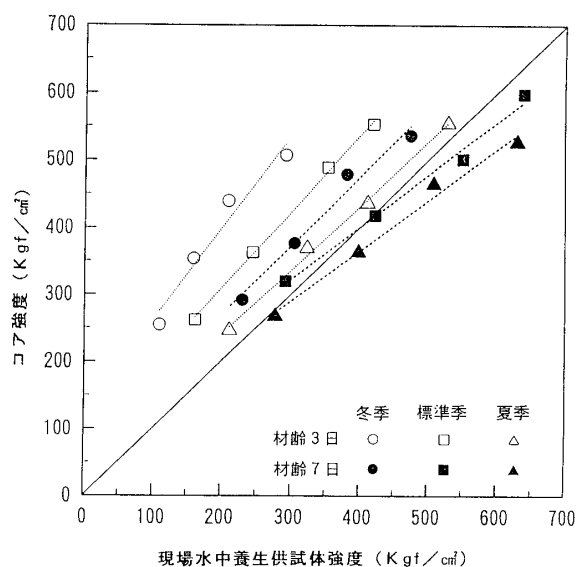


図-13 a

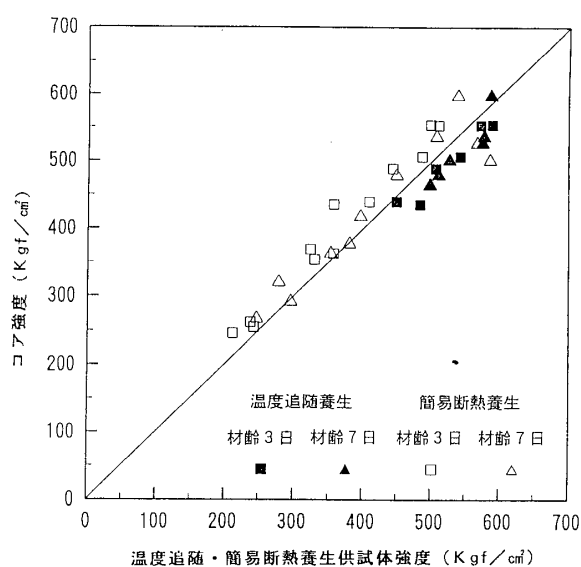


図-13 b

るが、材齢3日・7日ともコア強度とよい相関を示している。これらの結果から見ると、材齢7日までの初期においては、コア強度の管理には温度追随養生が最も適当であると言える。なお、試験結果は省略したが、標準養生供試体と現場封緘養生供試体は現場水中養生とほぼ同様な傾向であった。

### c. 長期材齢におけるコア強度の管理

材齢28日～91日におけるコア強度と標準養生・現場水中養生・現場封緘養生・温度追随養生及び簡易断熱養生の各強度との関係をそれぞれ図-14～18に示す。これらについて見ると、標準養生または現場水中養生の供試体強度はコア強度よりやや高く、強度が大きくなるにつれてその差も大きくなり、現場封緘養生の場合にはコンクリート強度がおよそ600 kgf/cm<sup>2</sup>を越すとコア強度よ

りやや高くなる傾向を示している。一方、温度(柱中心部の温度)追随養生を行った供試体強度は、多少ばらつきはあるがコア強度と比較的よく一致している。また、簡易断熱養生の供試体もコア強度とよい相関関係を示している。これらのことから、材齢28日以後のコア強度管理用供試体としては、温度追随養生か簡易断熱養生が適していると言える。

### 5) 調合設計におけるS値の検討

最近、断面の大きい部材に用いる高強度コンクリートの場合は、発熱を考慮して構造体コンクリート強度の管理の材齢(N日)を長くし、標準養生をした材齢28日の供試体強度とN日のコア強度との差(S値)を用いて調合設計を行うことが検討されている。そこで、本実験における試験結果から管理材齢N日を28日及び91日と設定した

時のS値を求め、標準養生供試体強度との関係を図-19に示してみた。図中の直線はS値が大きくなる夏季の値を結んだものである。この図から見ると、S値は強度が高くなるにつれて大きくなり、夏季のほうが冬季より大きい。特に、管理材齢が91日の場合は打込み季節による差が大きく、標準季や冬季においては、強度が低い場合S値がマイナスとなっている。これらのことから、調合設計にS値を用いるにはまだまだ多くの研究データを必要とすると言える。

#### 4. 結 び

これまで、JASS5では構造体コンクリート強度(コア強度)は材齢が28日の場合は現場水中養生をした供試体強度で、また91日までの材齢においては現場封緘養生をした供試体で代表できるとし、管理用供試体の養生方法をそれぞれ現場水中養生及び現場封緘養生とするように定めていた。しかし、最近の実験データによると、圧縮強度が高いコンクリートは初期における高温の影響を受けて構造体コンクリート強度の伸びが低下し、管

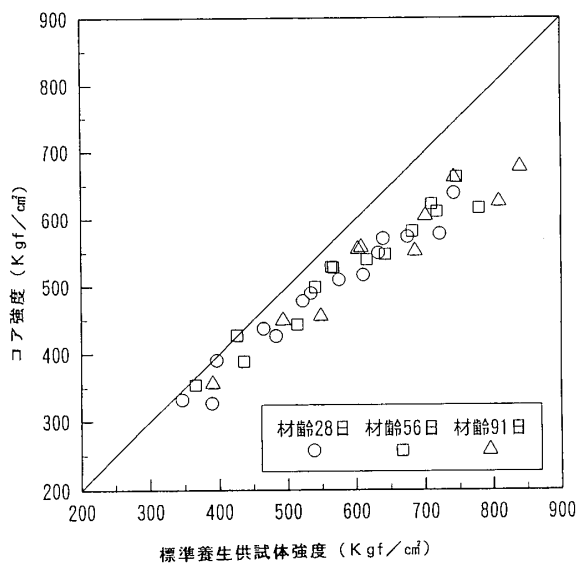


図-14

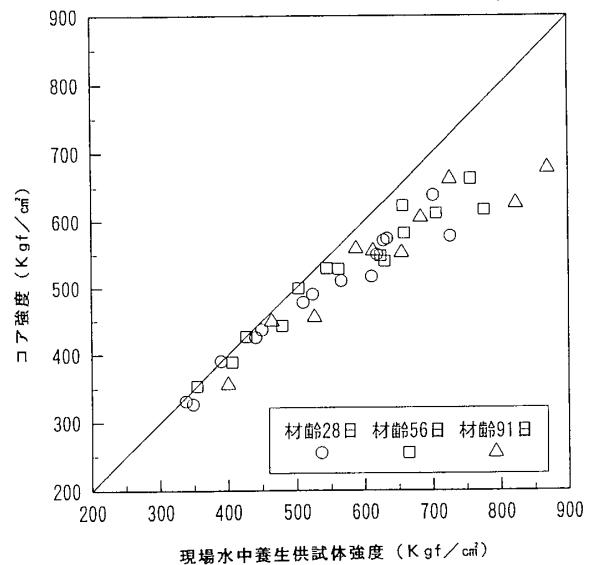


図-15

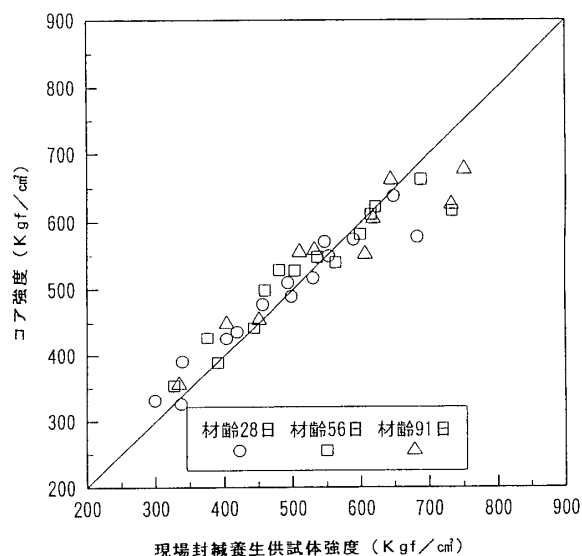


図-16

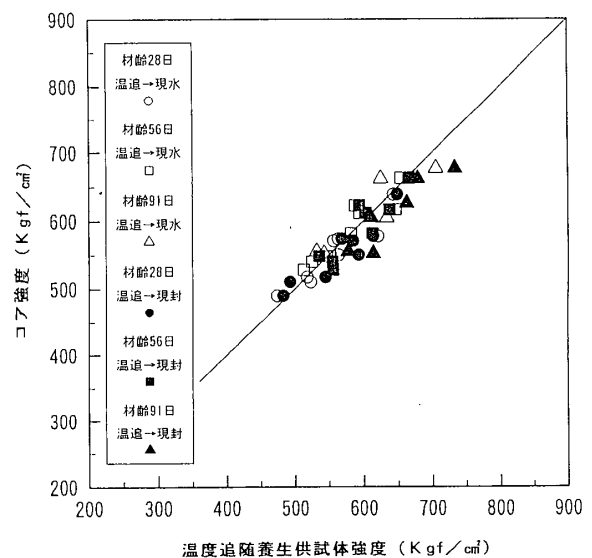


図-17



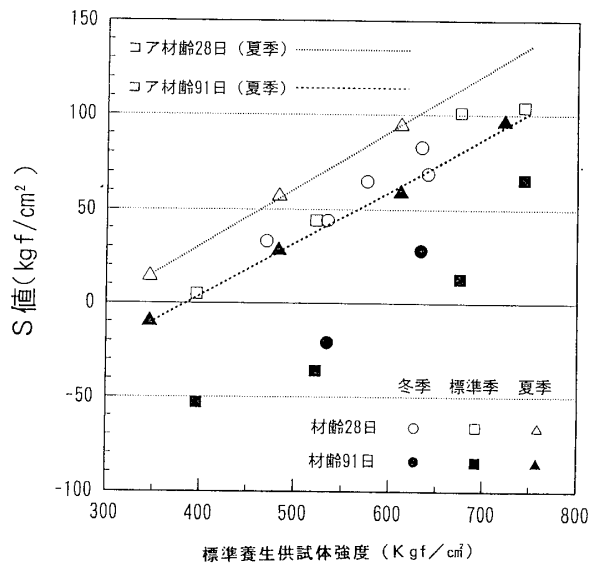


図-18

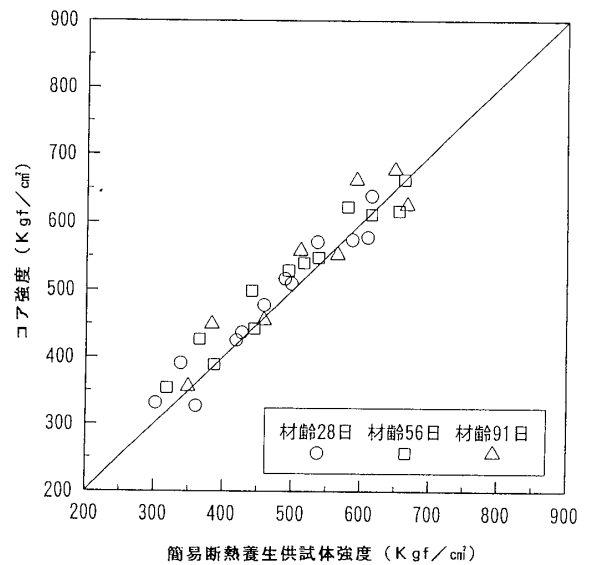


図-19

理用供試体強度のほうがコア強度を上回るようになり、結果として危除側に判定されることが分かってきた。

設計基準強度 480 kgf/cm<sup>2</sup> 程度を目標とした本実験においても、設計基準強度が高くなるにつれて（セメント使用量が多くなるにつれて）コンクリートの温度上昇が大きくなり、コア強度の伸びが低下すること、この傾向は夏季に顕著であることなどが分かった。また、各種の養生方法を行った供試体強度とコア強度との関係を調べた結果、圧縮強度が 600 kgf/cm<sup>2</sup> 程度までは現場封緘

養生の供試体で管理できるが、それを越すような強度の場合は温度追随養生が簡易断熱養生が適切であることが分かった。今後、コンクリートはますます高強度化してくると予想されるが、その場合、コンクリートの温度管理や強度管理についてより適切な方法を定める必要があると言える。

以上

（追記） 本論文は東鉄工業及び大都工業との共同研究の成果を纏めたものであり、研究に協力して頂いた両社の方々に感謝する次第である。