

## 論 文

## [1035] 高強度マスコンクリートの部材強度発現性状

坂本 哲郎（関西電力 建設部）

牧野 浩保（ 同 上 ）

正会員 中根 淳（大林組技術研究所）

正会員 ○川口 徹（ 同 上 ）

## 1. はじめに

最近、原子力発電所施設の建設工事でマスコンクリートの設計基準強度を高強度化して、より合理的な構造物の設計・施工を行なおうとする機運が高まっている。これは、低発熱型セメントを用いたコンクリートでは、材令4週以降の長期的な強度の伸びを示すデータが蓄積されつつあること、また、強度管理材令を必ずしも材令4週に限定しなくともよくなつたことなどが背景となつてゐる。

しかし、強度管理材令を長期化したコンクリートの品質管理の方法は、一般的に標準化されているとは言い切れないのが現状である。ここでは、設計基準強度（以後 $f_c$ と記す） $450\text{kg/cm}^2$ および $f_c = 300\text{kg/cm}^2$ を対象とした高強度マスコンクリートの品質管理方法を検討するために実施した実験の概要と得られた結果について述べる。

## 2. 実験の概要

## 2.1. 実験の目的

この実験の目的は、高強度マスコンクリートについて基本的な部材強度発現性状を把握し、構造体コンクリートとしての所要の品質を確保するためのコンクリート調合、管理上の基準強度および施工上の対策を選定するための基礎データを得ることである。

## 2.2. 実験方法

この実験では、それぞれのコンクリートごとに模擬部材を製作し、部材から抜取ったコア供試体の強度試験の結果から部材強度の発現性状を調査した。同時に、各種養生のシリンダーによる強度試験を行ない部材強度との比較を行なった。コンクリート打設時期の違いによる部材強度発現性状を明らかにするため、夏、秋、冬、春の4回にわたって実験を行なつた。コンクリート打設時期ごとの模擬

表-1 模擬部材の種類と数

部材の種類と数を表-1に示す。特に夏季に打設するコンクリートでは、既往の研究により、打込み温度およびその後の水和熱による高温履歴の影響で部材強度の発現が充分でないことが指摘されている。<sup>1), 2)</sup> その対

設計基準強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	模擬部材 最小断面寸法 (m)	コンクリート打設時期				コンクリート調合条件他		
		夏 季	秋 季	冬 季	春 季	水セメント比 (%)	単 セメント 量 (kg/m <sup>3</sup> )	備 考
450	1. 30	S 43	F 43	W 43	H 43	43	384	
		S 41	F 41	W 41	H 41	41	407	
		S 41c	----	----	----	41	407	プレクリング実施
		S 39	----	W 39	----	39	431	
		S 39sp	----	----	----	39	407	高性能減水剤使用
300	1. 00	S 50	F 50	W 50	H 50	50	324	
		----	----	W 47	----	47	347	
	0. 30	----	----	W 50s	----	50	324	
		----	----	W 47s	----	47	347	
模擬部材の数		6	3	7	3	総 計 19体		

策として、ここでは水セメント比の影響、プレクーリングの効果、高性能減水剤によるセメント量低減効果などを調査した。各実験時期のコンクリート打設日は以下のとおりである。

夏季：7月25日 秋季：10月16日

冬季：1月23日 春季：4月17日

### 2.3. 模擬部材の形状と部材コア強度

模擬部材は、図-1に示す周囲4面を断熱材で覆った壁状部材である。壁厚は、 $f_c = 450 \text{ kg/cm}^2$  用で 1.30m、 $f_c = 300 \text{ kg/cm}^2$  用は 1.00mとした。このほか、冬季実験では壁厚 .30m の模擬部材も製作した。今回の実験で模擬部材の数は、総計19体になる。

図-1にはコア抜取り位置および部材コンクリート温度測定位置を示す。

図-2には、抜取ったコアからのコア供試体成型位置をしめす。部材コア強度は、原則として1材令15本のコア供試体の平均強度で評価した。コア強度試験は、材令4週、13週、26週、1年の4材令で実施した。

### 2.4. コンクリートの調合

コンクリートの調合条件と使用材料を表-2に示す。設計基準強度ごとに水セメント比を変えて2~3種類のコンクリートを用意した。試し練りを行なって決定したコンクリートの基本調合は、表-3に示す通りである。使用

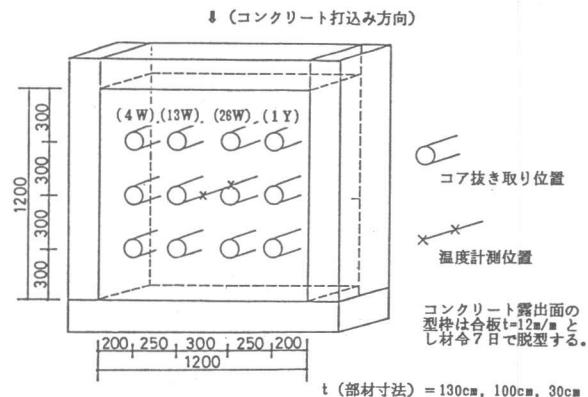


図-1 模擬部材の形状

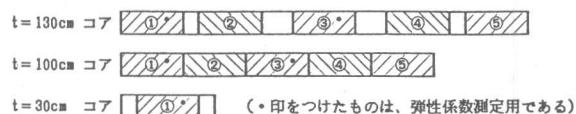


図-2 部材コア供試体成型方法

表-2 調合条件と使用材料

設計基準強度	450Kg/cm <sup>2</sup>	300Kg/cm <sup>2</sup>
管理材令	1~3週	
スランプ	製造時 10cm 流動化後15cm	荷卸時 8cm 打込み時15cm
空気量	$4 \pm 1\%$	
セメント	中庸熟セメント+フライアッシュ (混入率は、内割18.5%)	
細骨材	硬質砂岩碎石 ( $G_{max}=25 \text{ mm}$ )	
粗骨材	硬質砂岩碎砂(70%)+陸砂(30%)	
混和剤	凝結遅延型AE減水剤、補助AE剤、 流動化剤	

表-3 コンクリートの基本調合

設計基準強度	W/C (%)	S/a (%)	重量 (kg/m <sup>3</sup> )						
			セメント	水	細骨材		粗骨材	混和剤	流動化剤
					粗砂	細砂			
450	43	43	384	185	526	225	1023	3.84	1.27
	41	42	407	167	505	217	1026	4.07	1.26
	39	42	431	168	498	214	1012	4.31	1.25
	300	50	324	182	569	244	1020	3.24	1.13
	47	44.5	347	163	554	236	1018	3.47	1.21

図-3 温度追従養生システム概念図

するコンクリートは、全て流動化コンクリートとした。なお、同一水セメント比のコンクリートで練り上り温度、打設時期の違いによるコンシスティンシーは、混和剤、流動化剤の使用量をかえて調整した。今回の実験では、一般的な単位水量、単位セメント量の補正是行なわなかった。

### 2.5. シリンダー供試体の養生方法

模擬部材製作時に、同一コンクリートでシリンダー供試体を成型した。その養生方法は標準水中養生、現場水中養生、現場封かん養生、模擬部材中心部温度履歴追従水中養生および模擬部材外側10cm部温度履歴追従水中養生（以後、標水、現水、現封、中心追従および外側追従と記す）の5種類である。温度履歴追従養生とは、コンクリート打込み後キャッピング・脱型までの養生期間を含めて、できるだけ忠実に部材が履歴する温度を養生槽の温度に再現させて養生したものである。このシステムの概念図を図-3に示す。今回使用した装置は、信頼性が高くかつ安価なものであり、必要に応じ実際の工事中の強度管理にも充分適用可能なものである。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. 温度測定結果

夏季打設、冬季打設のそれぞれ各模擬部材中心部の打込み後1週間の温度履歴を図-4、5に示す。

夏季では部材中心部の最高温度は70°C程度まで上昇している。プレクーリングすると、部材最高温度を確実に下げることができることがわかる。

冬季では最高温度は30~35°Cで、夏季に比べ全般に温度上昇量は小さい。

代表的な模擬部材（w/c=41%）について、打設時期の違いによる期間別部材平均養生温度を表-4に示す。打設時期によらず、材令4週間では水和熱の影響により部材平均養生温度は、その間の平均外気温より8~10°Cほど高い。材令13週間の長期間で比較すると、その差は2~3°Cにすぎない。

したがって、強度管理材令を13週とした場合、その間の部材平均養生温度にもとづいて調合上の強度補正值を設定するとマスコンクリートとしての特殊性は小さくなると考えられる。

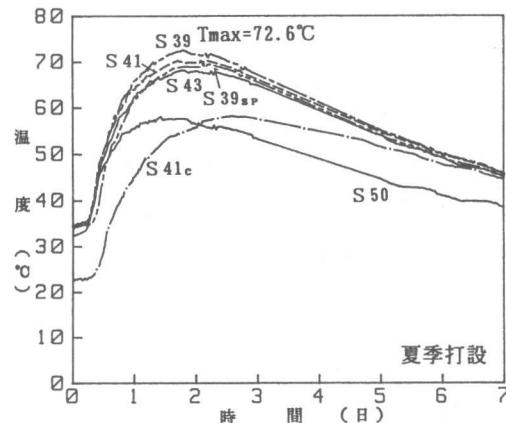


図-4 部材中心部温度履歴（夏季打設）

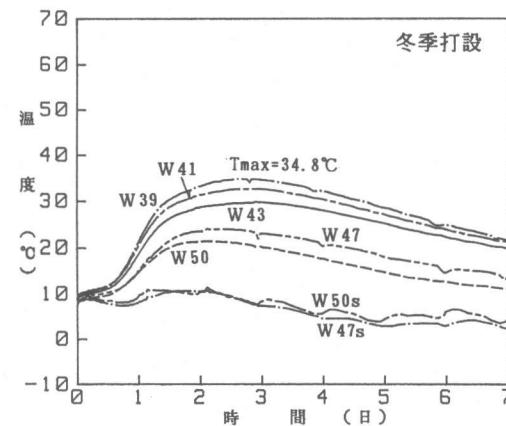


図-5 部材中心部温度履歴（冬季打設）

表-4 期間別部材平均養生温度

打設時期	模擬部材	期間別部材平均養生温度 (°C)			
		1週間	2週間	4週間	13週間
夏季	S41	53.0	45.6	40.3	27.7
	外気温	28.8	29.1	29.4	24.4
秋季	F41	39.1	30.0	23.8	11.0
	外気温	14.3	14.1	14.0	8.0
冬季	W41	21.8	15.7	9.8	8.6
	外気温	1.2	1.5	1.7	6.1
春季	H41	34.8	29.8	25.0	22.0
	外気温	15.3	15.9	16.4	19.4

### 3.2. 夏季の部材強度発現性状

実験結果のうち、 $f_c = 450 \text{ kg/cm}^2$  の夏季実験の部材強度発現性状を図-6に示す。図-6は標準養生強度と対比して示したものである。夏季の部材強度発現性状は、コンクリートの調合、プレクーリングの有無にかかわらず、初期強度の発現は著しく大きいものの長期的な強度の伸びは少ない。

しかし、強度確保対策として採用したプレクーリングを施したものは、プレクーリングなしに比べ部材強度は高い。また、高性能減水剤を用いたものは、セメント量の多いものに比べ部材強度は若干大きく、プレクーリングと同等の効果が期待できそうである。

図-7より、中心追従シリンダー強度は、部材強度と良く一致しており、現場のコンクリート品質管理で部材強度推定のための有力な手段になると考えられる。

### 3.3. 打設時期による部材強度発現性状

打設時期の違いによる部材強度の発現性状を比較するため、 $w/c = 41\%$  の模擬部材の強度発現を相対強度比として図-8に示した。この図は、標準養生強度を基準として描いたものである。

これから打設時期ごとの部材強度の発現性状は、次のように特徴づけられる。

春季では初期の強度発現は大きく、材令の経過に伴う強度の伸びが見られる。

夏季では初期の強度発現こそ大きいが、材令の経過に伴う長期的な強度の伸びは見られない。

秋季では春季とは材令13週間の平均養生温度ではかなり差があるものの、部材強度の発現性状はほとんど同じである。

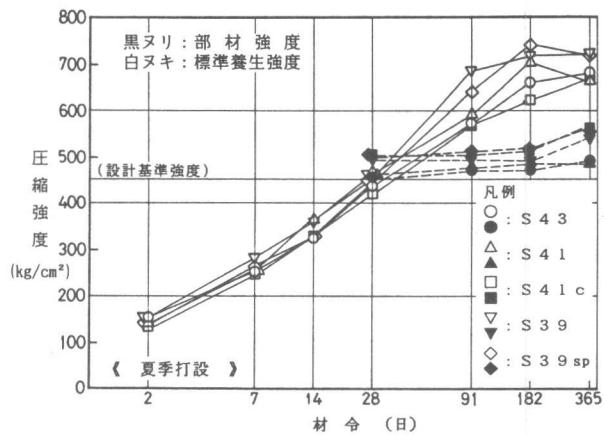


図-6 夏季の部材強度発現性状

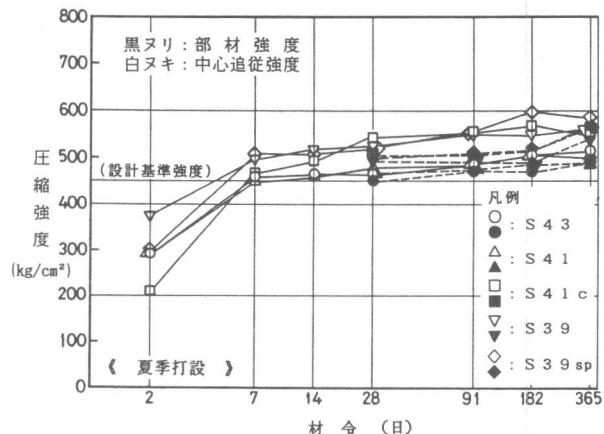


図-7 部材強度と中心追従強度の関係

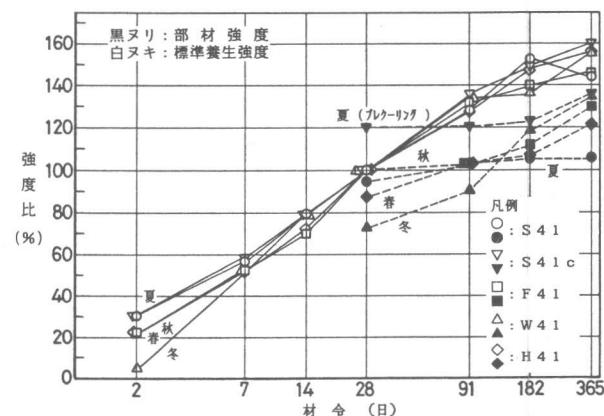


図-8 打設時期による部材強度発現性状

冬季では初期強度の発現は小さいが、材令の経過に伴い順調に強度が増大している。材令1年の相対強度比は最も大きい。

初期の強度発現が大きいのは夏季であり長期的な強度増加があるのは冬季である。これは、打設後初期の養生温度と関係づけて考えることができる。つまり、初期養生温度が高いほど初期強度が高く、長期的な伸びが少ない。逆に、初期養生温度が低いと長期強度の伸びが大きいと理解される。

### 3.4. 実験結果の重回帰分析

一連の実験により、打設時期、水セメント比、セメント量、プレカーリングの有無部材寸法などを変えて合計19体の模擬部材について部材強度、標準養生強度および部材養生温度に関するデータを得た。

これらのデータを調合管理、強度管理に反映させることを目的として重回帰分析を試みた。

部材強度を従属変数とし、セメント水比標準養生強度、打込み温度、期間別の部材平均養生温度、平均外気温などを説明変数としてとりあげた。なお、部材平均養生温度は、分析結果を現場工事に適用することを想定して、実測値ではなく温度分布解析による推定値を使用した。

実際の品質管理を考えた場合、材令13週部材強度がセメント水比あるいは材令13週標準養生強度を使って高い相関で説明できれば都合がよい。そこで変数増減法を適用し説明変数の選択を行なった。

その結果、材令13週部材強度を（セメント水比）で説明する場合、（部材最高温度）と（材令1週間の平均養生温度）を説明変数に加えることにより、修正寄与率 95.0% で説明できることがわかった。

同様に、（材令13週標準養生強度）で説明する場合にも、同じ説明変数を加えることにより修正寄与率 92.6% で説明できることが明らかになった。

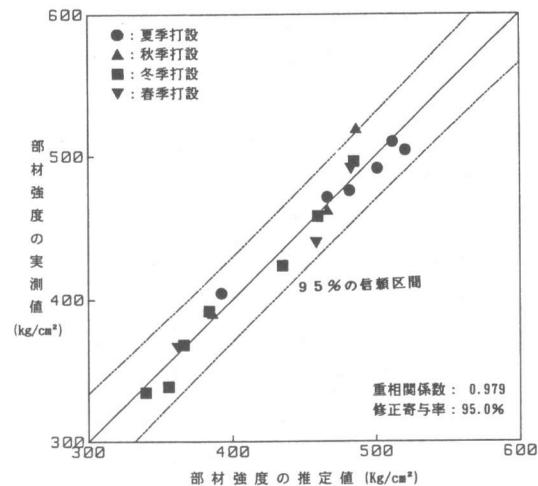


図-9 部材強度の推定値と実測値 [(1)式]

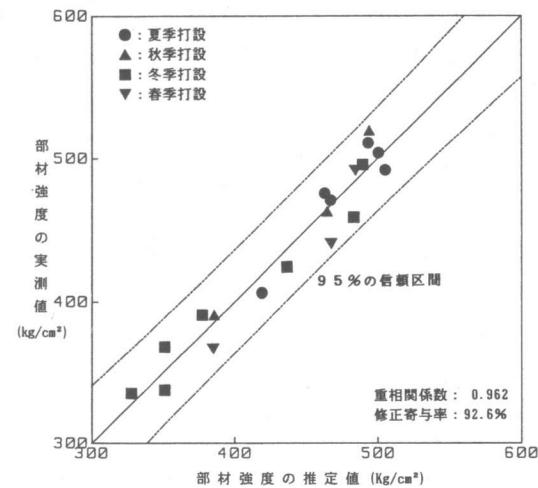


図-10 部材強度の推定値と実測値 [(2)式]

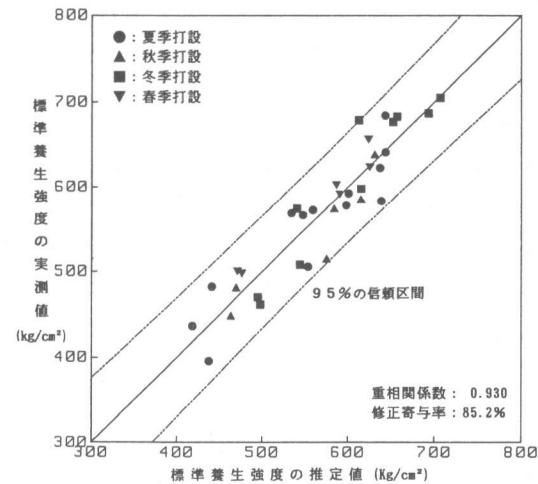


図-11 標準養生強度の推定値と実測値 [(3)式]

このようにして求めた重回帰式は次のようになる。

$$(Y_{13}) = 242.2(C/W) - 10.1(T_{max}) + 12.4(T_{0-7}) - 106.5 + E(13.5) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$(Y_{13}) = 0.604(f_{13}) - 13.7(T_{max}) + 16.9(T_{0-7}) + 100.3 + E(16.4) \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $(Y_{13})$ :材令13週部材強度の推定値( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )、 $(C/W)$ :セメント水比、

$(f_{13})$ :材令13週標準養生強度( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )、 $(T_{max})$ :部材最高温度(℃)、

$(T_{0-7})$ :材令1週間の平均養生温度(℃)、 $E$ :回帰による誤差(カッコ内は誤差の標準偏差)

回帰による部材強度の推定値と実測値の対応関係を、それぞれの回帰式ごとに図-9、10に示す。これから、打設時期が異なっても、(部材最高温度)と(1週間の平均養生温度)という簡便な説明変数を付け加えることにより部材強度がある程度精度よく推定可能であることを示しており、今後現場工事の品質管理を進める上でその有効性が期待される。

また、同様の考え方で、(材令13週標準養生強度)と(セメント水比)とを関係づける回帰式を求めてみた。ここでは、部材強度ばかりでなく標準養生強度にも打設時期の違いによる影響が認められたため、その影響を考慮するため、(打込み日の平均気温)と(コンクリート打込み温度)を説明変数に加えた。得られた回帰式は次の通りである。

$$(F_{13}) = 345.1(C/W) + 5.68(T_0) - 8.27(T_{oa}) - 204.9 + E(31.6) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $(F_{13})$ :材令13週標準養生強度の推定値( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )、 $(T_0)$ :打込み温度(℃)、

$(T_{oa})$ :打設日の平均気温(℃)

回帰式から求めた標準養生強度の推定値と実測値の関係を図-11に示した。

#### 4. まとめ

今回の実験を通じて以下のことが明らかになった。

①. 部材強度は、コンクリート打設時期によりその発現性状が異なる。夏季では初期強度は高いが長期強度の伸びはほとんどない。逆に、冬季は初期強度は低いが材令とともに強度は増大する。

②. 夏季の強度確保対策として、プレクーリングの実施や高性能減水剤の使用は、その有効性が確認できた。

③. 実験結果の重回帰分析から部材強度、標準養生強度、セメント水比を相互に関連づける回帰式を得た。

今後はこれらの成果をもとに現場工事のコンクリートの品質管理を進める計画である。

#### [参考文献]

- 1). 西村 進次、高橋 久雄、川口 徹他：マスコンクリートの品質管理上の問題点の検討、その1～4、日本建築学会大会学術講演梗概集、1979、pp. 165～172
- 2). 井上 勝弘、中根 淳、大池 武他：夏期における高強度マスコンクリートの強度発現とプレクーリング効果、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986、pp. 325～328