

高強度マスコンクリートの強度管理法の検討

中 根 淳 川 口 徹
大 池 武 松 下 基 彦
(関電大飯建築
JV 工事々務所)

Study on the Control of Strength in Massive High-Strength Concrete Structures

Sunao Nakane Tohru Kawaguchi
Takeshi Ohike Motohiko Matsushita

Abstract

An outline of experiments carried out to investigate a method of strength control in massive high-strength concrete structures and the results obtained are reported. The basic strength-gain properties of massive concrete blocks are examined in these experiments. Concrete mix designs, required strength of concrete in standard-cured specimens, and special considerations in concrete works to assure the specified quality of concrete in structures are studied based on the results obtained. The following are found: (1) The strength-gain properties of structures differ greatly depending on the season in which placement is done. In the summertime, early-age strength is high, but there is almost no increase in strength later. Conversely, in wintertime, early-age strength is low, but subsequent strength increase is great. (2) Pre-cooling of concrete and addition of a high-range water-reducing admixture are effective for satisfying the specified quality of a massive concrete structure. (3) Regression curves to establish relationships between concrete strength in structures, strengths of standard-cured specimens, and cement-water ratios in mix designs are obtained from statistical analyses.

概 要

高強度マスコンクリートの強度管理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。実験では基本的な構造体コンクリートの強度発現性状を把握し、構造体コンクリートが所定の設計基準強度を確保するためのコンクリート調査条件、管理上の基準強度および施工上の対策などを検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 構造体コンクリートの強度は、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) 実験結果の統計解析から構造体強度標準養生強度、セメント水比の相互の関連付けができた。これらをもとに実際の工事現場の強度管理フローを提案した。

1. はじめに

最近、原子力発電所施設の建設工事では設計荷重条件が厳しくなるに従い、コンクリートの設計基準強度を高くした高強度コンクリートが利用されるようになってきている。これは、低発熱型セメントを用いたマス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週に限定しなくてもよくなったことなどが背景となっている。

しかし、強度管理材令を長期化したマス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がたいのが現状である。この報告は、設計基準強度(以後 f_c と記す) 450 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強度管理方法を

検討するために実施した実験の概要と、それに基づく検討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構造体コンクリート、および管理用シリンダーの強度発現性状を把握し、構造体コンクリートの強度が設計基準強度を確保するために必要なコンクリート調査条件、管理上の基準強度および施工上の対策などを選定するための資料を得ることである。

2.2. 実験方法

この実験では、あらかじめ試し練りなどから選定した数種類のコンクリートで実際の構造体を模擬した部材を製作し、部材から抜き取ったコア供試体の強度試験の結

設計基準強度 (kg/cm ²)	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			
		夏季	秋季	冬季	春季	水セメント比 (%)	単セメント位置 (kg/m ³)		
450	1.30	S43	F43	W43	H43	43	384		
		S41	F41	W41	H41	41	407		
		S41c* ¹	...	...	...	41	407
		S39	...	W39	...	39	431		
		S39sp* ²	...	...	...	39	407
300	1.00	S50	F50	W50	H50	50	324		
		...	...	W47	...	47	347
		...	...	W50s	...	50	324
	0.30	...	...	W47s	...	47	347
		模擬部材の数				6	3	7	3	総計	19体

*1 プレクーリング実施, *2 高性能減水剤使用

表-1 模擬部材の種類と数

果から構造体の強度発現性状を調査した。同時に、管理用シリンドーによる強度試験を行ない構造体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構造体の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った。コンクリート打設時期ごとの模擬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構造体の強度発現が十分でないことが指摘されている^{1),2)}。ここでは水セメント比の差、プレクーリングの有無、高性能減水剤使用の有無などをパラメーターとして、構造体の強度発現性状を調べた。

各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 春期：4月17日

2.3. 模擬部材の形状と構造体強度の評価方法

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、fc=450 kg/cm²用で、1.30 m, fc=300 kg/cm²用は1.00 mとした。このほか、冬季実験では壁厚0.30 mの模擬部材も製作した。この実験で製作した模擬部材の数は、総計19体である。

図-1には、模擬部材でのコア抜き取り位置および温度測定位置を示す。図-2には、抜き取ったコンクリートからのコア供試体成型位置を示す。

構造体の強度は、各模擬部材ごとに原則として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に示すとおりである。

この実験のコンクリートは、すべて流動化コンクリートとして使用した。

なお、同一水セメント比のコンクリートで練り上り温

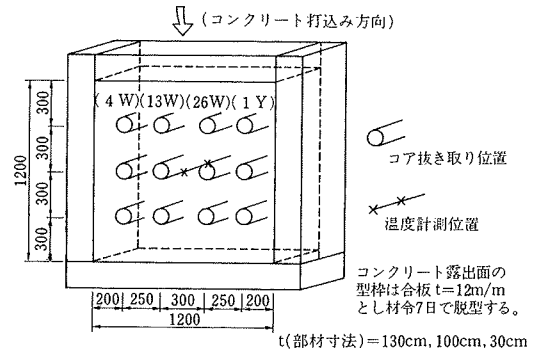


図-1 模擬部材の形状

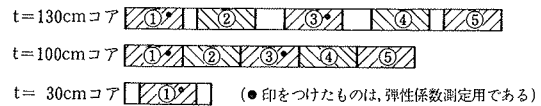


図-2 部材コア供試体成型方法

設計基準強度	450kg/cm ²	300kg/cm ²
管理材令	13週	
スランプ	製造時 10cm	荷卸時 8cm
	流動化後16cm	打込み時15cm
空気量	4 ± 1%	
セメント	中庸熱セメント+フライアッシュ (混入率は、内割18.5%)	
細骨材	硬質砂岩砕石(Gmax=25φ)	
粗骨材	硬質砂岩砕砂(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-2 調合条件と使用材料

設計基準強度	W/C (%)	S/a (%)	重 量 (kg/m ³)						
			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	165	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	45	324	162	569	244	1020	3.24	1.13
	47	44.5	347	163	554	236	1018	3.47	1.21

表-3 コンクリートの基本調合

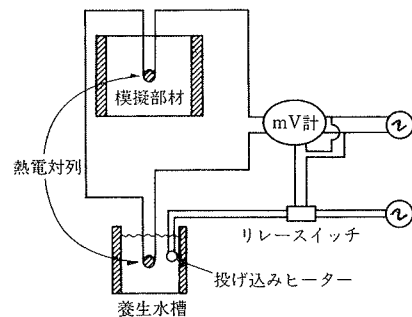


図-3 温度履歴追従養生システム概念図

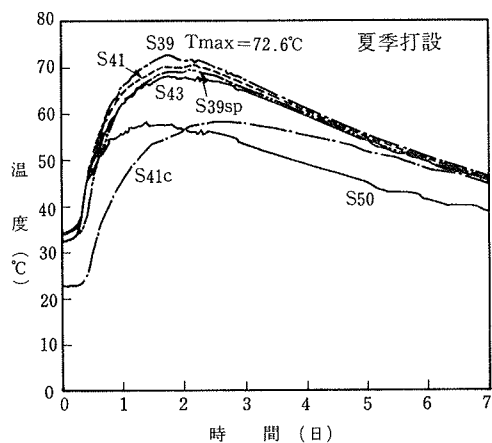


図-4 部材中心温度履歴 (夏季打設)

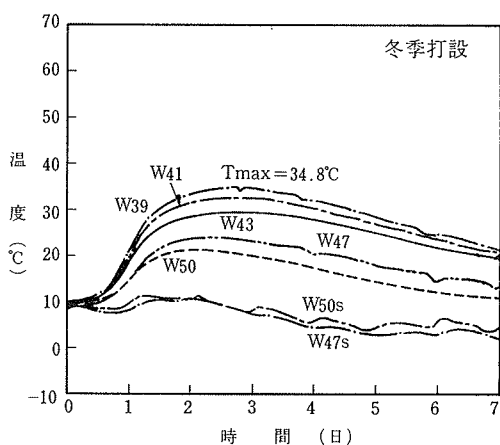


図-5 部材中心温度履歴 (冬季打設)

打設時期	模擬部材	期間別部材平均温度 (°C)			
		1週間	2週間	4週間	13週間
夏季	S 41	53.0	45.6	40.3	27.7
	外気温	28.8	29.1	29.4	24.4
秋季	F 41	39.1	30.0	23.8	11.0
	外気温	14.3	14.1	14.0	8.0
冬季	W 41	21.8	15.7	9.8	8.6
	外気温	1.2	1.5	1.7	6.1
春季	H 41	34.8	29.8	25.0	22.0
	外気温	15.3	15.9	16.4	19.4

表-4 期間別部材平均養生温度

度, 打設時期の違いによるコンシステンシーは, 混和剤・流動化剤の使用量を変えて調整した。

2.5. シリンダー供試体の養生方法

各模擬部材製作時に, 同じコンクリートで強度管理用シリンダー供試体を成型した。その養生方法は, 一般的な標準水中養生 (以後, 標準養生と記す) と模擬部材中心部温度履歴追従水中養生 (以後, 温度履歴養生と記す) である。

なお, 温度履歴養生とは, 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水槽の温度に再現させて

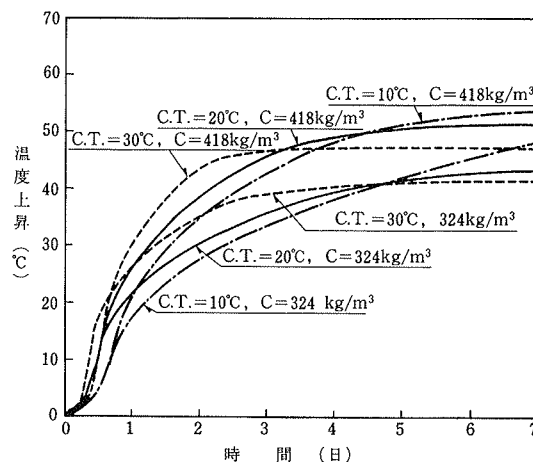


図-6 コンクリートの断熱温度上昇特性

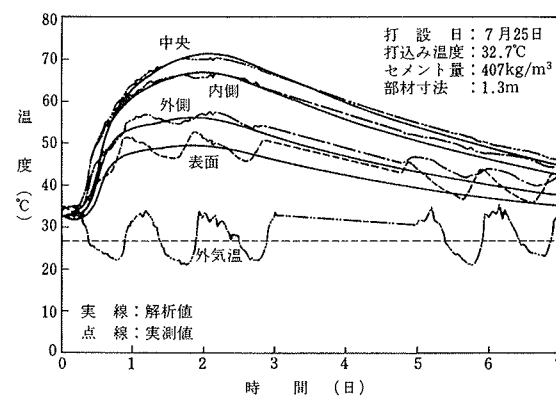


図-7 温度履歴の解析値と実測値の比較例

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。

3. 実験結果および考察

3.1. 温度測定結果

夏季実験, 冬季実験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のがわかる。

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。

同じw/c=41%のコンクリートで製作した模擬部材について, 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。

従って, 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基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。

3.2. 部材温度履歴のシミュレーション解析

マスコンクリート部材の温度履歴を解析的に予測することは強度管理のみならず温度ひびわれ制御対策の検討など品質管理上極めて重要である³⁾。事前検討で実施したコンクリートの断熱温度上昇試験の結果(図-6)を用いて一次元差分法を適用して求めた温度履歴の解析値と実測値の比較例を図-7に示す。ここで用いた温度分布解析により十分な精度でマスコンクリート部材が受ける温度履歴を予測することができるがわかる。

3.3. 夏季の構造体の強度発現性状

強度試験結果のうち、 $f_c=450 \text{ kg/cm}^2$ の夏季実験の構造体の強度発現性状を図-8, 9に示す。図-8は標準養生シリンダー強度、図-9は温度履歴養生シリンダー強度と対比して示したものである。

夏季の構造体の強度発現性状は、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、プレクーリング無しに比べ構造体の強度は高い。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構造体強度は若干大きく、プレクーリングと同等の効果が期待できそうである。

図-9より、温度履歴養生シリンダー強度は構造体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構造体の強度推定のための有力な手段になると考えられる。

3.4. 打設時期による構造体の強度発現性状

打設時期の違いによる構造体の強度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-10に示した。この図は、標準養生シリンダーの材令4週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構造体強度の発現性状は、次のように特徴付けられる。

春季打設のもの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。

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

秋季打設のものでは春季打設のものとは材令13週間の平均養生温度ではかなり差があるものの、構造体強度の発現性状はほとんど同じである。

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に打設したものであり、長期的な強度増加があるのは冬季に打設したもので

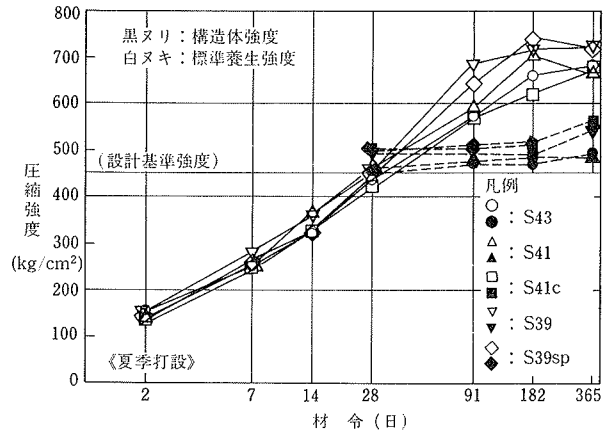


図-8 夏季の構造体強度発現性状

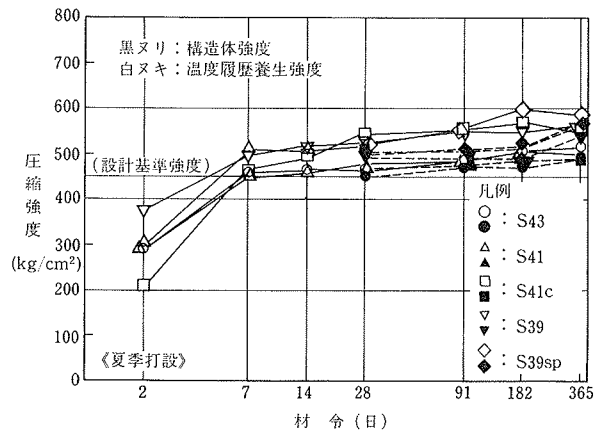


図-9 構造体強度と温度履歴養生強度の関係

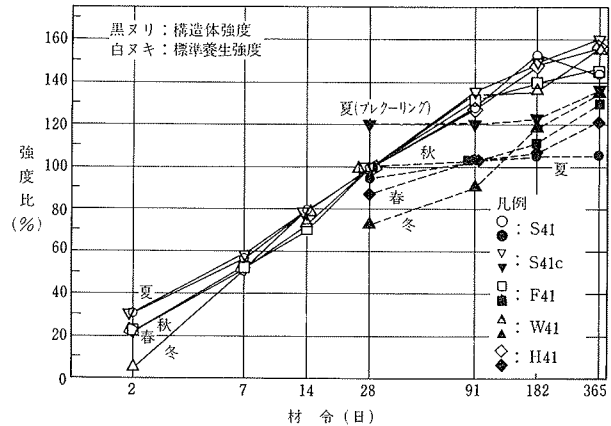


図-10 打設時期による構造体強度の発現性状

ある。これは、打設後初期の養生温度と関係付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。

4. 強度管理法の検討

4.1. 構造体強度の推定方法に関する検討

一連の実験により、打設時期、水セメント比、セメント量、プレクーリングの有無、部材寸法などを変えて合

計19体の模擬部材について構造体強度，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統計解析（重回帰分析）を試みた。構造体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3.2.に述べた温度分布解析による推定値を使用した。

実際の強度管理を考えた場合，材令13週構造体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週構造体強度を（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，同じ説明変数に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。このようにして求めた重回帰式は次のようになる。

$$(Y13) = 242.2(C/W) - 10.1(T_m) + 12.4(T_7) - 106.5 + E(13.5) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$(Y13) = 0.604(f13) - 13.7(T_m) + 16.9(T_7) + 100.3 + E(16.4) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに，

(Y13) : 材令13週構造体強度の推定値 (kg/cm²)

(C/W) : 調合上のセメント水比

(f13) : 材令13週標準養生強度 (kg/cm²)

(T_m) : 部材最高温度 (°C)

(T₇) : 材令1週間の平均養生温度 (°C)

E : 回帰による誤差(カッコ内は誤差の標準偏差)

回帰による構造体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-11, 12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構造体強度が精度よく推定可能であることを示しており，今後現場工事の強度管理を進める上でその有効性が期待できる。

4.2. 標準養生強度の推定方法に関する検討

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）とを関係付ける回帰式を求めてみた。

ここでは，構造体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とおりである。

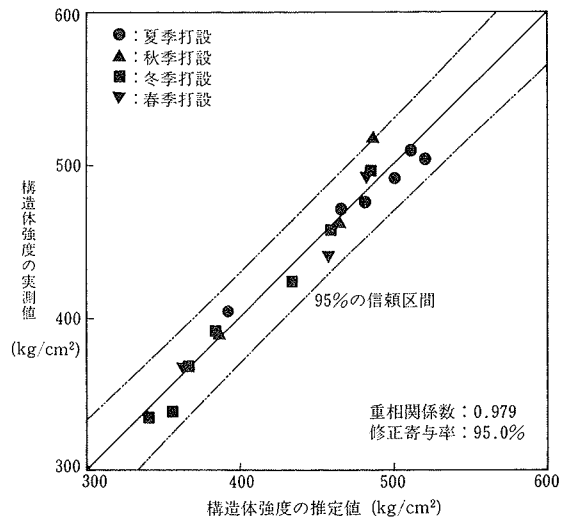


図-11 構造体強度の推定値と実測値の関係 [(1)式]

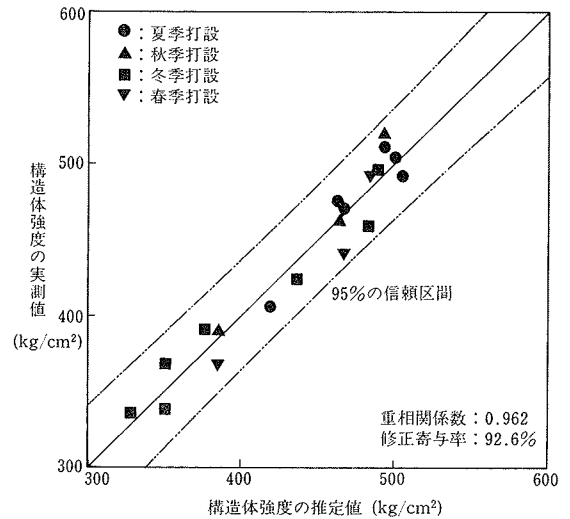


図-12 構造体強度の推定値と実測値の関係 [(2)式]

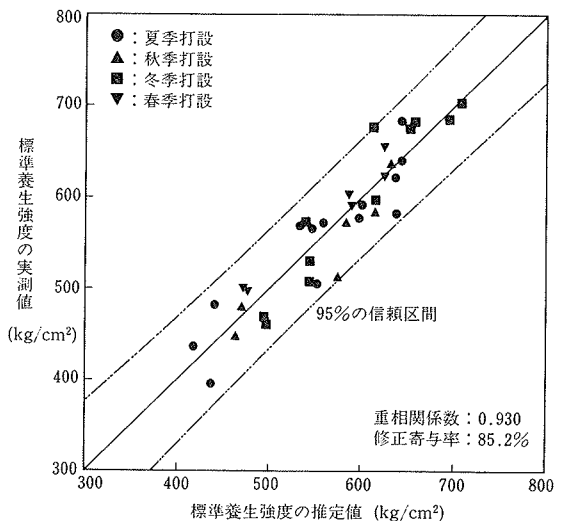


図-13 標準養生強度の推定値と実測値の関係 [(3)式]

$$(F13) = 345.1(C/W) + 5.68(T_o) - 8.27(T_{o_a}) - 204.9 + E(31.6) \dots\dots\dots(3)$$

ここに (F13)：材令13週標準養生強度の推定値
 (To)：打込み温度
 (Toa)：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-13に示した。

5. まとめ

今回の検討を通じて以下のことが明らかになった。

- (1) 構造体強度は、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) 夏季に打設する場合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) 実験結果の統計解析から、現場工事での強度管理に適用可能な構造体強度、標準養生強度、セメント水比を相互に関連付ける回帰式を得た。

現在この検討で得られた成果をもとに図-14に示すフローに従い現場工事のコンクリートの強度管理を実施中である。

謝 辞

この研究は、関西電力㈱の委託により実施したものであり、研究の全体にわたって御指導を賜った関西電力㈱建設部および近畿コンクリート工業㈱開発部の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 西村, 高橋, 川口, 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, 中根, 大池, 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

3) 阪本, 古和田, 牧野, 他: 高強度マスコンクリートの部材強度特性に関する研究, (その1~7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1987), pp. 221~234

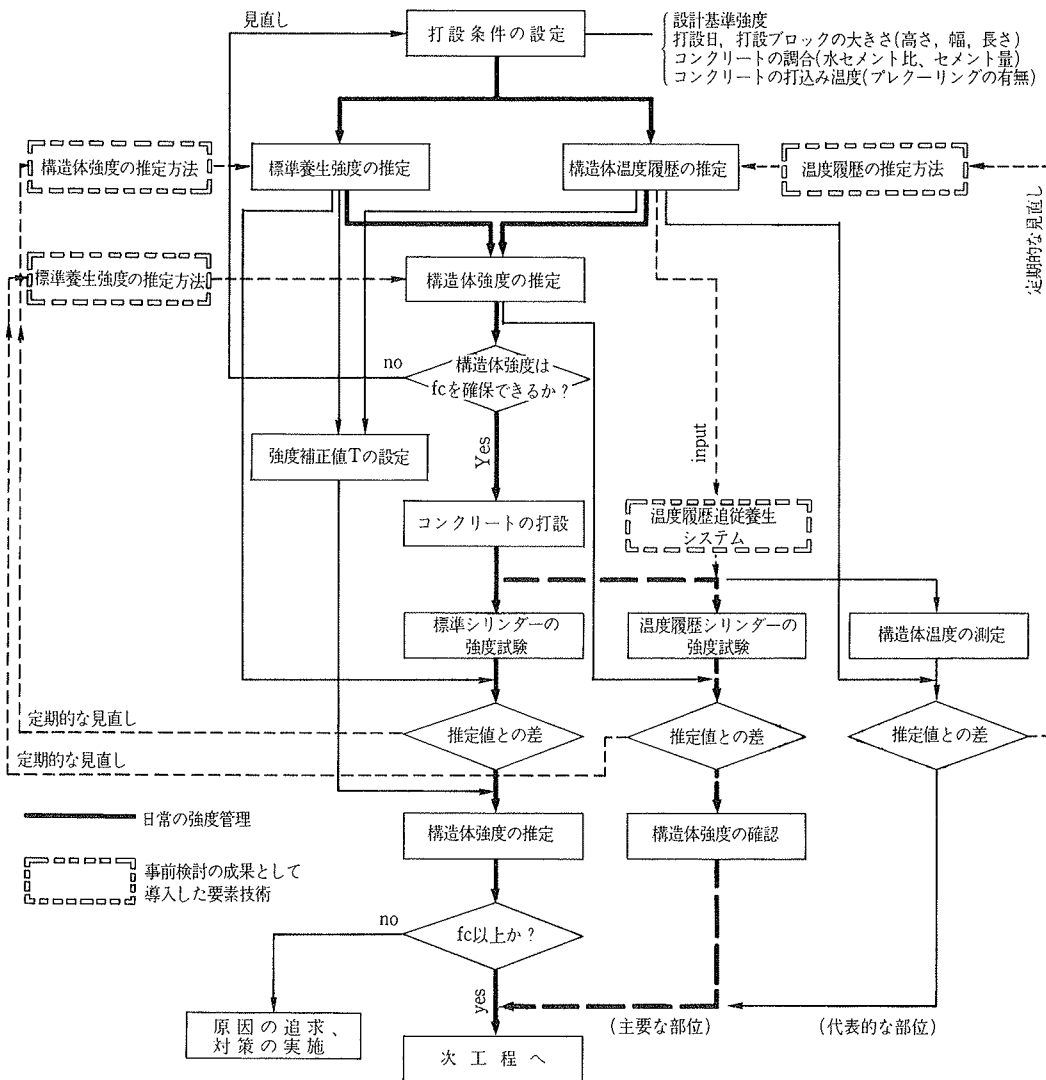


図-14 工事現場での高強度マスコンクリートの強度管理フロー