

論文

[1151] 構造体コンクリートの強度管理に関する現場実験

櫻井 和夫 (関 西 電 力)
 正会員 竹内 賢次 (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

硬化時にセメントの水和熱による温度上昇を伴うマスコンクリートの構造体コンクリート強度 (通常はコア強度で代表するのが最も信頼性が高いとされている。ここでは部材強度あるいは構造体強度も同義とする) が標準養生シリンダー強度 (以後、標準養生強度と記す) と必ずしも等しくないことはよく知られていることである。高強度マスコンクリートの構造体強度が所定の材令までに (最長91日の範囲で) 設計基準強度を確保するための具体的な現場の品質管理の方法は必ずしも確立されていない。

本研究は、設計基準強度300kgf/cm²および450kgf/cm²の高強度マスコンクリートを対象に現場の品質管理方法を確立するための検討を行なっているものである。

前報 [1] での研究により高強度マスコンクリートの構造体強度の発現特性に関して以下のことが明らかになっている。(1).高強度マスコンクリートの構造体強度の発現性状はコンクリートの打設時期によって異なる。(2).コンクリートの打設時期にかかわらず、部材最高温度、1週間の部材平均養生温度を補助説明変数とすることによって、標準養生強度、または水セメント比から構造体強度を精度よく推定することが可能である。(3).構造体コンクリートが履歴する温度に追従させて養生したシリンダー強度 (以後、温度履歴追従養生強度と記す) と構造体強度はよく一致しており、前者から構造体強度が推定できる。

これらの成果をより広範囲にわたって具体的な現場工事のコンクリート品質管理に適用することを目的として現場実験を行なった。

実際の工事専用生コンプラントでコンクリートを製造して打設時期による標準養生強度、構造体強度の発現性状の違いを調べた。

主な検討項目は以下の通りである。

- ①. 水セメント比と標準養生強度の関係。
- ②. 壁部材の構造体強度発現性状の再現性の把握。
- ③. 基礎マット部材の構造体強度発現性状の把握。
- ④. 構造体強度発現へのブレーキング効果の確認であ

表 - 1 打設日ごとの試験内容 * : 冷却効果検討用

試験回数	コンクリート打設日	水セメント比 (%)	検討事項	想定する構造体の大きさ
1	S62. 9. 2	39 [*] , 41 [*]	冷却効果	1.3m壁 [*] , 3m7つ
2	S62. 10. 5	41, 50	練混ぜ方法	1.3m壁, 3m7つ, 1.0m壁, 2m7つ
3	S62. 10. 29. 30	37, 39, 41	使用材料	1.3m壁, 3m7つ
4	S62. 11. 24	39, 41, 50	水セメント比	1.3m壁, 3m7つ, 1.0m壁, 2m7つ
5	S62. 12. 9	39, 41, 50	〃	〃
6	S63. 1. 22	39, 41, 50	〃	〃
7	S63. 2. 17	39, 41, 50	〃	〃
8	S63. 3. 22	39, 41, 50	〃	〃
9	S63. 4. 12	39, 41, 50	〃	〃
10	S63. 5. 17	39, 41, 50	〃	〃
11	S63. 6. 17	39 [*] , 41 [*]	冷却効果	1.3m壁 [*] , 3m7つ [*]
12	S63. 7. 13	39 [*] , 50	〃	1.3m壁 [*] , 1.0m壁, 2m7つ
13	S63. 8. 2	39 [*] , 50	〃	〃
14	S63. 9. 5	39 [*] , 50	〃	〃

る。なお、この現場実験では構造体強度は温度履歴追従養生シリンダー強度で評価した。

2. 現場実験の概要

コンクリートの打設時期による強度発現性状の違いを明らかにするため原則として一か月に1回の割合で一年間にわたり実験を繰り返した。コンクリート打設日ごとの実施内容をまとめて表-1に示す。

コンクリートの設計基準強度と水セメント比の組合せは以下のように設定した。強度管理材令は91日として計画したものである。

設計基準強度 (Fc) = 450kgf/cm² …水セメント比 (w/c) = 41%あるいは39%、

設計基準強度 (Fc) = 300kgf/cm² …水セメント比 (w/c) = 50%

コンクリートの調合条件・使用材料・製造条件は表-2に、コンクリートの調合表は表-3に示すとおりである。水セメント比41%、39%の調合上の単位セメント量（フライアッシュ込み）は同一量の407kg/m³とした（水セメント比39%のコンクリートでは通常の混和剤以外に高性能減水剤を使用した）。打設時期の違いによるコンクリートの調合上の単位水量等の補正は行わず一年間を通じて同一調合比とした。なお、コンクリートの製造管理として通常の表面水率、スランプ、空気量の試験のほかに、未だ固まらないコンクリートの水セメント比の測定を行ない計画値の±2%以内であることを目標に管理した。水セメント比の測定には、比重計法を用いた。

表-2 調合条件・使用材料・製造条件

設計基準強度	450kgf/cm ² 、300kgf/cm ²
強度管理材令	91日
スランプ	製造時10cm、荷卸し時8cm、流動化後15cm
空気量	4±1%
セメント	中庸熟ポルトランドセメント
混和材	フライアッシュ（セメントの内割18.5%）
細骨材	硬質砂岩砕砂（70%）+陸砂（30%）
粗骨材	硬質砂岩砕石（最大寸法25mm）
混和剤	凝結遅延形分散剤、流動化剤
1バッチの混練り量	3m ³ （2軸強制練りミキサー）
くり返し数	3回

設計基準強度の種類ごとに想定した構造体コンクリートの大きさは以下のとおりである。

Fc=450kgf/cm²用コンクリート～厚さ1.3mの壁部材、打込み高さ3.0mの基礎マット部材

Fc=300kgf/cm²用コンクリート～厚さ1.0mの壁部材、打込み高さ2.0mの基礎マット部材

それぞれの部材ごとに構造体の温度履歴を計算によって求め[2]、コンクリート打込み後2週間以内にわたり部材平均温度による温度履歴を再現した水槽で養生したシリンダーの強度試験により構造

表-3 コンクリートの調合

設計基準強度 (kg/cm ²)	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	41	42	407	167	505	217	1026	4.07	1.26
	39	42	407	159	513	220	1036	4.07	1.26
300	50	45	324	162	569	244	1020	3.24	1.13

表-4 標準養生強度の推定式

	計画水セメント比 (テ-ラ数: 110)	実測水セメント比 (テ-ラ数: 118)
材令13週強度	(f13)=309.89 (c/w) -189.27±E (30.67) (50%—431kgf/cm ²) (41%—567kgf/cm ²) (39%—605kgf/cm ²)	(f13) ₀ =356.47 (c/w) -290.51±E (30.21) (50%—422kgf/cm ²) (41%—579kgf/cm ²) (39%—624kgf/cm ²)
材令4週強度	(f4)=275.37 (c/w) -260.24±E (27.47) (50%—291kgf/cm ²) (41%—411kgf/cm ²) (39%—446kgf/cm ²)	(f4) ₀ =307.62 (c/w) -330.03±E (27.03) (50%—285kgf/cm ²) (41%—420kgf/cm ²) (39%—459kgf/cm ²)
材令1週強度	(f1)=210.49 (c/w) -269.40±E (21.95) (50%—152kgf/cm ²) (41%—244kgf/cm ²) (39%—270kgf/cm ²)	(f1) ₀ =234.16 (c/w) -320.40±E (22.00) (50%—148kgf/cm ²) (41%—251kgf/cm ²) (39%—280kgf/cm ²)

ここに、f : 標準養生強度の推定値 (kgf/cm²) E : 誤差の標準偏差 (kgf/cm²)
c/w : セメント水比 * カッコ内は該当する水セメント比から推定される標準養生強度

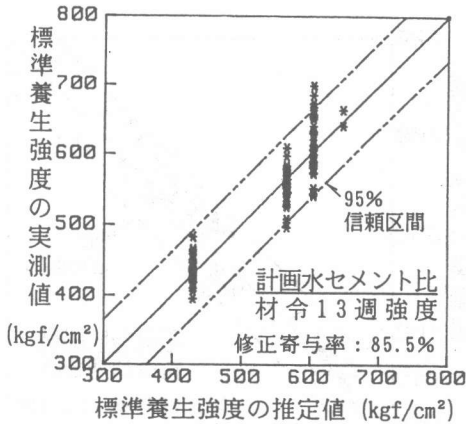


図-1 標準養生強度の実測値と推定値の関係 (計画水セメント比からの推定)

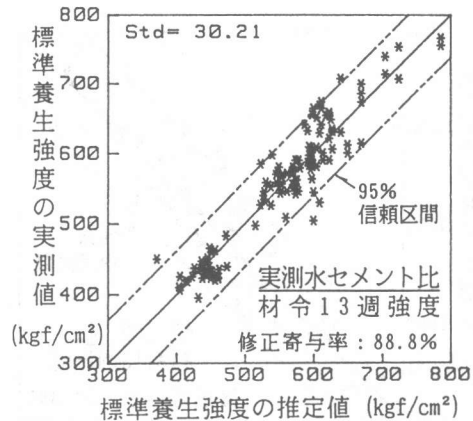


図-2 標準養生強度の実測値と推定値の関係 (実測水セメント比からの推定)

体強度を求めた。材令2週以降は試験材令まで現場水中養生した。この強度試験は材令4週、13週、26週の3回実施した。これとは別に、同じバッチのコンクリートで標準養生シリンダーの強度試験も行なった。試験材令は1週、4週、13週の3回である。

一連の実験の中で、おもに夏季の実験では構造体強度へのコンクリートプレクーリング効果(冷却効果)の検討も実施した。プレクーリングの方法は生コン車への液体窒素の直接注入方式を採用した [3]。

3. 標準養生強度と水セメント比の関係

標準養生強度と計画水セメント比、実測水セメント比の関係を回帰分析した結果を表-4、図-1、2に示した。

計画水セメント比、実測水セメント比ともに標準養生強度と高い相関があることがわかる。それぞれの水セメント比から推定される各材令ごとの圧縮強度

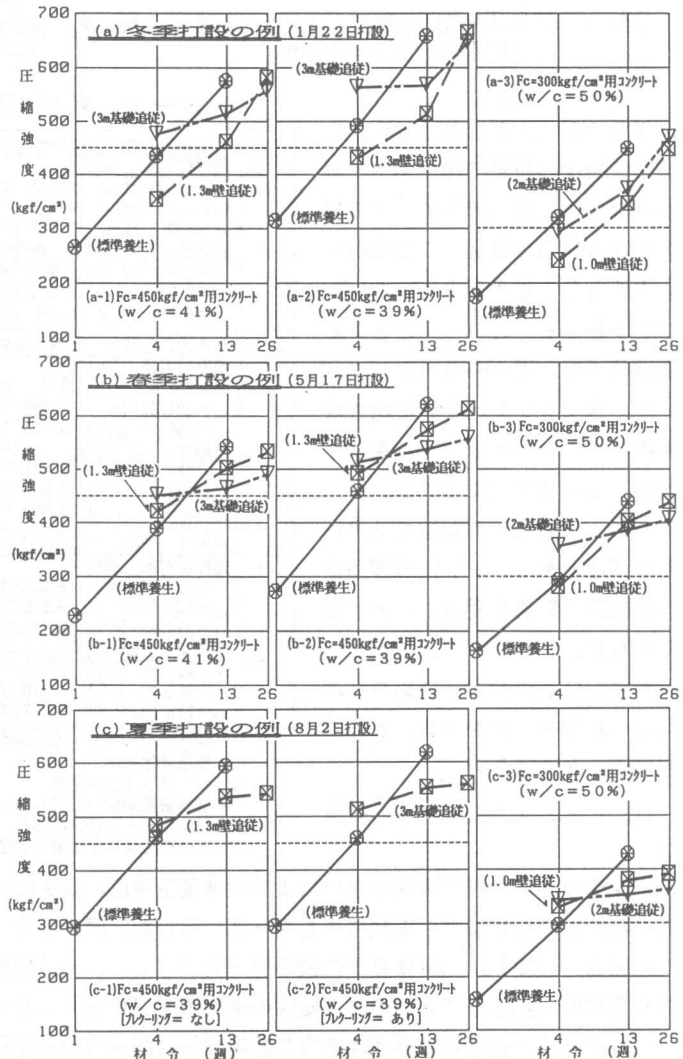


図-3 打設時期による強度発現の比較

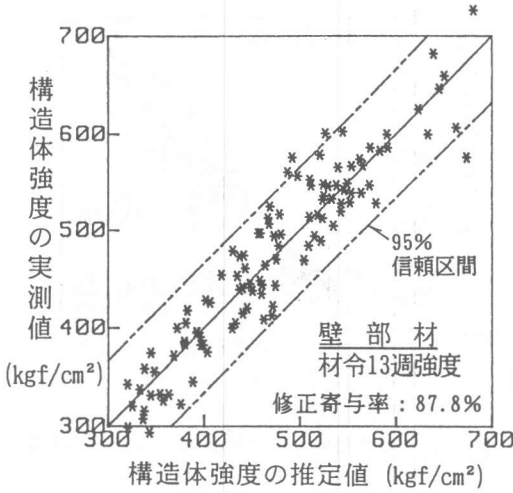


図-4 構造体強度の実測値と推定値の関係 (壁部材: 材令13週強度)

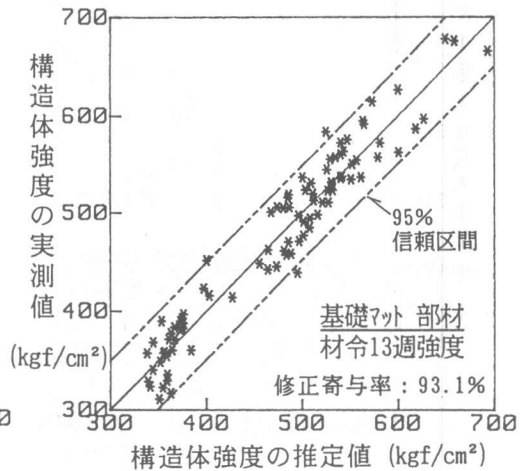


図-5 構造体強度の実測値と推定値の関係 (基礎マット部材: 材令13週強度)

表-5 構造体強度の推定式一覧

は両者の間で大きな差はない。

また、回帰の誤差の標準偏差も両者はほとんど同じである。この標準偏差は材令が経過して強度が増大するとともに大きくなっていることがわかる。これらのことから製造時の未だ固まらないコンクリートの水セメント比の測定結果は実際のコンクリートのそれをよく表わしていると考えられる。

なお、前報[1]の実験では標準養生強度と水セメント比の関係は打設時期の影響を受けることが認められた。しかし、今回の実験ではわずかにその傾向は認められるもののかなり小さかった。この原因は明らかではない。

4. コンクリートの強度発現性状

コンクリートの打設時期の違いによる標準養生強度、構造体強度の発現性状を比較するためそれぞれ代表的な季節での実験結果を図-3に示した。図-3中、(a)は冬季打設の例[打設日平均外気温 3.6℃]、(b)は春季打設の例[同17.2℃]、(c)は夏季打設の例[同27.2℃]である。これらは同一試験条件3回の試験結果の平均値をプロットしたものである。

これによると壁部材の構造体強度の発現性状(図-3中の記号 ☒ 参照)は、前報[1]に報告した実験の場合と同じように、夏季(図-3.(c)-☒参照)は初期強度の発現が高く長期の伸び

A. 主たる説明変数: 標準養生強度	
a. 壁部材対象 (N=109)	
$Y_4 = 1.007 \cdot (f_4) - 11.419 \cdot (T_m) + 15.892 (T_1) - 76.12 \pm E [22.102]$	
$Y_{13} = 0.852 \cdot (f_{13}) - 14.476 \cdot (T_m) + 17.240 (T_1) + 16.28 \pm E [32.614]$	
$Y_{26} = 1.011 \cdot (f_{26}) - 17.122 \cdot (T_m) + 15.175 (T_1) + 167.18 \pm E [41.698]$	
b. 基礎マット部材対象 (N=91)	
$Y_4 = 0.670 \cdot (f_4) - 11.866 \cdot (T_o) + 9.247 (T_m) - 45.38 \pm E [30.750]$	
$Y_{13} = 0.659 \cdot (f_{13}) - 9.064 \cdot (T_o) + 5.064 (T_m) + 36.93 \pm E [24.142]$	
$Y_{26} = 0.831 \cdot (f_{26}) - 9.570 \cdot (T_o) + .925 (T_m) + 200.33 \pm E [30.717]$	
B. 主たる説明変数: 計画水セメント比	
a. 壁部材対象 (N=100)	
$Y_4 = 287.57 \cdot (c/w) - 15.875 (T_m) + 20.153 (T_1) - 323.55 \pm E [28.487]$	
$Y_{13} = 294.81 \cdot (c/w) - 17.849 (T_m) + 20.611 (T_1) - 190.27 \pm E [35.579]$	
$Y_{26} = 355.37 \cdot (c/w) - 23.176 (T_m) + 21.171 (T_1) - 74.12 \pm E [43.825]$	
b. 基礎マット部材対象 (N=82)	
$Y_4 = 225.13 \cdot (c/w) - 9.818 (T_o) + 7.224 (T_m) - 255.73 \pm E [34.510]$	
$Y_{13} = 243.84 \cdot (c/w) - 6.214 (T_o) + 3.006 (T_m) - 134.08 \pm E [30.780]$	
$Y_{26} = 255.39 \cdot (c/w) - 8.872 (T_o) - .126 (T_m) + 83.19 \pm E [40.385]$	
C. 主たる説明変数: 実測水セメント比	
a. 壁部材対象 (N=108)	
$Y_4 = 337.97 \cdot (c/w) - 9.218 (T_m) + 12.646 (T_1) - 454.31 \pm E [28.857]$	
$Y_{13} = 322.74 \cdot (c/w) - 9.530 (T_m) + 11.324 (T_1) - 278.71 \pm E [38.351]$	
$Y_{26} = 374.89 \cdot (c/w) - 10.872 (T_m) + 7.816 (T_1) - 167.89 \pm E [50.661]$	
b. 基礎マット部材対象 (N=90)	
$Y_4 = 218.79 \cdot (c/w) - 12.342 (T_o) + 8.851 (T_m) - 265.32 \pm E [35.280]$	
$Y_{13} = 252.02 \cdot (c/w) - 8.910 (T_o) + 4.789 (T_m) - 179.86 \pm E [31.150]$	
$Y_{26} = 323.52 \cdot (c/w) - 9.157 (T_o) + .394 (T_m) - 81.28 \pm E [38.326]$	

Y: 構造体コンクリートの強度 N: データの個数
 f: 標準養生強度 E: 回帰の誤差の標準偏差
 c/w: 水セメント比の逆数
 T_m: 部材最高温度 (21.5~61.9℃)
 T_o: コンクリート打込み温度 (12.0~28.2℃)
 T₁: 1週間の部材平均養生温度 (15.9~41.5℃)

が少なく、逆に冬季（図-3.(a)-☒参照）では初期の強度は低い長期強度が大きくなる特徴が認められる。

一方、基礎マット部材の場合（図-3中の記号▽参照）は、セメント量が多く打込み高さの大きい部材ほど養生温度が高くなり、しかもその高温状態が壁部材より継続時間が長いため、冬季（図-3.(a)-1,2-▽参照）であっても夏期の壁部材（図-3.(c)-☒参照）と同じような初期強度が高く長期の伸びが少ない傾向を示している。

今回の一連の現場実験から、 $F_c = 450\text{kgf/cm}^2$ 対象基礎マットでは水セメント比39~41%、壁部材では水セメント比39%、 $F_c = 300\text{kgf/cm}^2$ 対象コンクリートでは水セメント比50%で、所定の材令までに構造体強度はそれぞれの設計基準強度を満足することが確認できた。

5. 構造体強度推定式の検討

前報[1]と同様に重回帰分析による変数増減法を適用し、構造体強度を標準養生強度、計画水セメント比、あるいは実測水セメント比から推定する際の補助説明変数の選択を行ない推定式を求めた。得られた構造体強度推定式をまとめて表-5に示す。なお、補助説明変数 T_0 、 T_m 、 T_1 の範囲はそれぞれ12.0~28.2℃、21.5~61.9℃、15.9~45.1℃である。

壁部材の構造体強度を推定する場合には、前報と同じ補助説明変数つまり部材最高温度(T_m)と一週間の部材平均温度(T_1)を用いてもよいが、基礎マットの構造体強度を推定する際には、壁部材と異なり補助説明変数として打込み温度(T_0)と部材最高温度(T_m)の組み合わせとする方が推定誤差が小さくなることが明らかになった。これは、壁部材と基礎マット部材の温度履歴パターンの違いが影響しているものと推察される。このようなことから、対象とする部材に応じて推定式を区別して用いるのが適当であると考えられる。図-4、5には材令13週構造体強度の実測値と推定値の関係の一例を示した。

図-6にはコンクリート打設日ごとの実測値と計画水セメント比から求めた推定値の対応関係を示した。図中には前報の推定式からの推定値も示した。推定式の違いによる差は少ない。

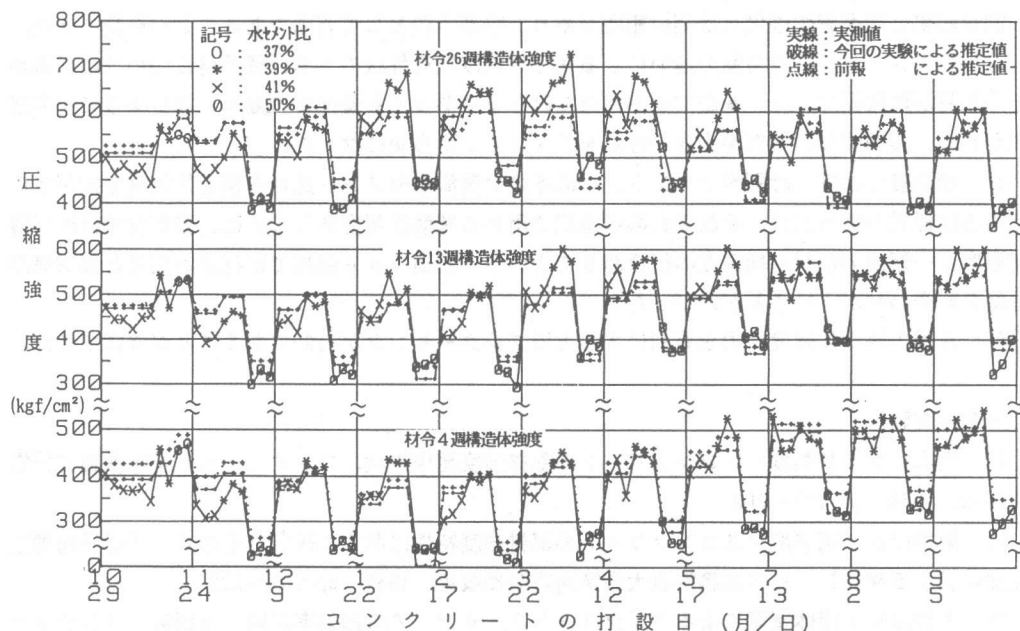


図-6 構造体強度の実測値と推定値の比較（計画水セメント比からの推定）（壁部材）

6. 強度発現
へのプレクーリ
ング効果

同一バッチの
コンクリートで
標準養生強度と
構造体強度のそ
れぞれについて、
冷却しないもの
に対する冷却し
たものの相対強
度比を冷却温度
に対してプロッ
トしたものが図

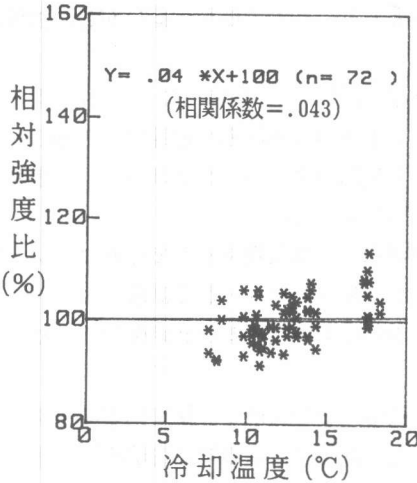


図-7 標準養生強度への冷却効果

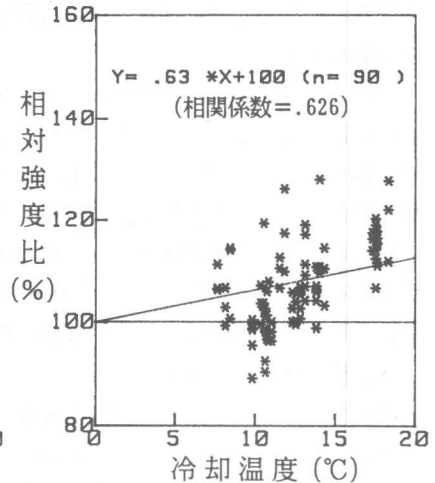


図-8 構造体強度への冷却効果

7、8である。冷却前のコンクリート温度25.0~31.5℃を13.0~22.6℃まで冷却したものである。最小二乗法を適用して冷却効果を数値化したものが図中の回帰式である。これによると構造体強度は10℃冷却することにより相対強度が6%程度増大することを示しており、標準養生強度は冷却してもほとんど変化しないことを示している。これは前報の結果とよく一致している。

7. まとめ

今回一年間を通じて実施した実験により以下のことが明らかになった。

- 1) 専用生コンプラントでの標準養生強度と水セメント比の関係式が得られた。これによると標準養生強度の発現性状へのコンクリート打設時期の影響は予想したほど大きくはなかった。
- 2) コンクリート製造管理の一環として実施した未だ固まらないコンクリートの水セメント比の測定結果と標準養生強度とは高い相関があり、管理手段として有効であることが確認できた。
- 3) コンクリート打設時期の違いによる構造体強度発現性状のうち、壁部材については従来からの知見が再確認できた。基礎マット部材では冬季であっても壁部材の夏季と同じように初期強度が高く、長期強度の伸びが少ない性状を示すことが明らかになった。
- 4) 標準養生強度、計画水セメント比、あるいは実測水セメント比から構造体強度を推定するための回帰式が得られた。それぞれの推定式に用いる補助説明変数としては、壁部材では部材最高温度と一週間の部材平均温度の組合わせでよいが、基礎マット部材では打込み温度と部材最高温度の組合わせがよいことがわかった。
- 5) 夏季の構造体強度発現を有利にする上でプレクーリングが有効であることが確認できた。

《参考文献》

- 1) 坂本ほか：高強度マスコンクリートの部材強度発現性状、コンクリート工学年次論文報告集10-2、1988、pp.197~202
- 2) 坂本ほか：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6．予想平均養生温度に関する検討）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1987、pp.231~232
- 3) 中根ほか：液体窒素によるコンクリートクーリングの冷却効率に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 9-2、1987、pp.67 ~72