

# マスコンクリートにおける温度履歴と強度発現に関する実験結果

長尾 覚 博      大池 武  
中 根 淳

## Results of Examinations on Temperature History and Strength Gain in Mass Concrete

Kakuhiro Nagao      Takeshi Ohike  
Sunao Nakane

### Abstract

This report describes examinations made for the purpose of obtaining data for strength control of mass concrete in the cold season.

The examination in outline consisted of analyses of temperatures of mass concrete (corresponding to member thickness of 1 m) and comparisons with standard-cured specimens of various concrete specimens cured in sealed condition.

As a result, it was found that mass concrete placed in the cold season, if strength is controlled based on 28-day age, is seen to require a strength correction factor, but in case of long-term age, the correlation between cumulative temperature and strength gain is indistinct and it is necessary for further studies to be made with full-sized members.

### 概 要

この報告は、マスコンクリートの寒冷期における強度管理を合理的に行なうための基礎的資料に供する目的で、実施した室内実験の結果をまとめたものである。

実験の概要は、マスコンクリート（部材厚1 m相当）の打込後の温度履歴をシュミットの方法により求め、この温度履歴によって、各種コンクリート供試体を封かん状態で養生し、その強度発現性状を、従来の管理用として用いている標準養生供試体強度との比較により検討した。

実験の結果、寒冷期に施工されるマスコンクリートは、材令28日に強度管理を行なうとすれば、温度補正の必要が認められるが、長期材令の場合には、積算温度と強度発現との対応関係が明確ではなく、今後実大構造物レベルでさらに調査する必要のあることが判明した。

## 1. はじめに

断面寸法の小さい一般建築構造物と異なり、マスコンクリートでは初期の水和熱による温度上昇が顕著に表われ、通常の建築構造物とは温度履歴と強度との関係の様相が異なってくることが予想される。

この研究は、マスコンクリートの水和熱に伴う温度履歴を解析により推定し、この温度履歴を各種セメントを用いたコンクリート供試体に与えた場合の圧縮強度の発現性状を実験的に調査し、寒冷期におけるマスコンクリートの強度管理に関する基礎的資料を得る目的で実施したものである。

## 2. 実験の概要

実験の概要は以下に示すとおりである。

- (a) マスコンクリートのコンクリート打込後の温度履歴をシュミットの方法により解析し、水和熱による温度上昇を考慮した温度履歴を求める。
- (b) (a)項より求めた温度履歴を養生温度とする各種コンクリートの強度発現性状を調べ、従来の管理用として用いられている標準養生供試体と比較して、その発現性状の違いを検討する。

上記(a), (b)よりマスコンクリートの強度発現についてその基礎性状を考察し、さらに日本建築学会鉄筋コンク

リート標準仕様書（JASS 5）に示されている寒冷期における温度補正值との対応関係についても検討する。

2.1. マスコンクリートを想定した養生温度履歴

コンクリート部材の温度履歴の予測解析にはシュミットの方法を用いた。

解析時に仮定した事項は下記のとおりである。

- (a) 放熱は相対する二表面からのみ生ずる。
- (b) 表面の熱伝達を考慮して実際の表面より 0.2 m 外側を仮想表面とする。
- (c) コンクリートの熱拡散係数を 0.08 m<sup>2</sup>/day とする。
- (d) セメント：フライアッシュ B 種セメント，単位セメント量：340 kg/m<sup>3</sup>
- (e) 外気温および練り温度：20, 12.5, 5°C
- (f) 部材厚：1 m を想定

また，解析では部材の中心部の温度履歴を求めた。

その結果は図-1 の I シリーズに示すとおりである。

またマスコン養生供試体との比較に用いるため，初期の水和熱の影響のない条件で標準養生を基本とする養生条件を管理用として設定した（II シリーズ）。

図-1 の温度パターン中シリーズ I の a-2, a-3, b-3, シリーズ II の a-2, a-3, b-3 は練り上がり温度よりも外気温が低い場合に対応させ，シリーズ II の c-2 は逆に外気温が高くなる場合に対応させるために設定し，寒冷期における養生温度の範囲を網羅できるようにした。

実験では，図-1 に示す温度履歴を養生温度としてプログラム装置付温度湿度可変養生槽を用い再現した。

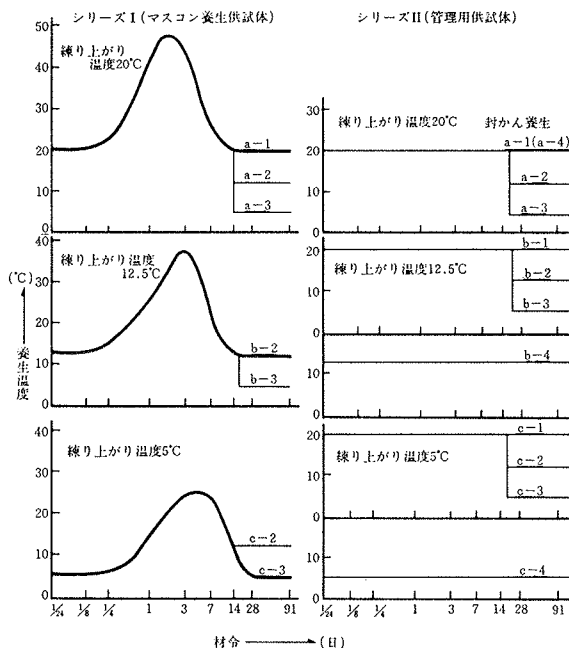


図-1 コンクリートに与えた養生温度履歴

2.2. 使用材料と調合

実験に使用したコンクリートの調合は，マスコンリートとして通常用いられる硬練りのコンクリートを対象

とし，普通ポルトランドセメント（以下普通セメントと称す），フライアッシュ B 種セメント（以下フライアッシュ B 種と称す），中庸熱ポルトランドセメント（以下中庸熱と称す），の 3 種類のセメントを用いた。使用材料および調合条件は表-1，コンクリートの調合は表-2 に示す。

項目	仕様
1) セメント	普通ポルトランドセメント - 住友セメント社製 フライアッシュ B 種セメント - 敦賀セメント社製 中庸熱ポルトランドセメント - 小野田セメント社製
2) 骨材	砕石，同砕砂 - 敦賀産 山砂 - 三園町白方産
3) 混和剤	遅延型減水剤 - ポゾリス No.8 AE 剤 - ポゾリス No.303A
4) 調合条件	W/c - 40, 50, 55% 空気量 - 4 ± 1% スランプ - 10 ± 2cm

表-1 使用材料と調合条件

記号	項目	空気量 (%)	単位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )									
			水	セメント	砕石 25mm	砕石 10mm	砕砂	山砂	ポゾリス No.8 (f)	AE 剤 No.303A (g)		
F55	フライアッシュ B 種セメント	4 ± 1	55	43	170	309	724	311	517	231	618	34.0
F50			50	43	170	310	714	268	538	231	680	37.4
F40			40	42	176	440	686	231	497	213	880	60.5
N50	普通ポルトランドセメント		50	44	170	340	701	300	550	236	680	18.7
M50	中庸熱セメント		50	44	170	340	701	300	550	236	680	18.7

表-2 コンクリートの調合

まだ固まらないコンクリートの性質は表-3 に示すとおりである。

項目	スランプ (cm)			空気量 (%)			単位容積重量 (g/ℓ)		
	20	12.5	5	20	12.5	5	20	12.5	5
F55	10.5	13.3	13.9	5.0	4.8	4.9	2,325	2,331	2,337
F50	9.5	13.1	14.7	4.7	5.0	4.3	2,322	2,328	2,349
F40	10.7	12.5	15.2	4.5	4.0	4.6	2,334	2,350	2,337
N50	9.1	12.5	14.0	4.2	4.8	4.7	2,364	2,334	2,353
M50	10.7	13.3	15.2	4.1	4.9	4.0	2,358	2,337	2,379

表-3 まだ固まらないコンクリートの性質

2.3. 供試体と養生方法

供試体の形状寸法は，φ10×20 cm シリンダー供試体とした。成型を終了した供試体は，直ちにビニールで包み図-1 に示す温度履歴を与えた。また，管理用供試体は材令 1 日を経た後キャッピングし，材令 2 日目に脱型して水中養生とした。一方マスコンクリートを想定した供試体（マスコン養生供試体と称す）は速やかに脱型し，封かん用の鋼かんによってシールし，養生を継続した。

3. 実験結果と検討

3.1. 管理用供試体の強度発現性状

打込後初期の水和熱による温度上昇の影響のないシリーズ II の管理用供試体について，強度発現の水和熱による温度上昇のない場合の性状を調査した。その結果は以

下に示すとおりである。

3.1.1. 練り上がり温度の強度への影響 打込後の養生温度が20°Cの場合について練り上がり温度が圧縮強度に及ぼす影響をまとめ表-4に示す。

これによると、今回の実験で用いた小型のφ10シリンダー供試体のレベルでは、各種セメントとも練り上がり温度の違いによる強度への影響はほとんど見られないことがわかる。この結果にもとづき、以下の実験結果の検討に際しては、管理用供試体については各練り上がり温度における20°C水中養生の値を、またマスコン養生供試体においては20°C封かん養生の値を基準として比較、検討を行なうこととした。

II-a-1, II-b-1, II-c-1の温度パターン

養生温度(°C)	7			14			28			91		
	20	12.5	5	20	12.5	5	20	12.5	5	20	12.5	5
F:55	191	185	198	221	212	233	283	285	307	404	376	373
F:50	241	233	239	298	291	282	356	355	357	472	460	438
F:40	324	303	316	371	366	379	438	446	462	574	568	558
N:50	301	282	314	379	360	351	434	428	423	496	470	479
M:50	236	236	237	303	312	320	397	400	406	520	542	518

表-4 練り上がり温度が強度発現に及ぼす影響 (20°C水中養生)

3.1.2. 養生温度が強度発現に及ぼす影響 練り上がり温度と養生温度が等しい場合の強度発現性状を各セメントコンクリートのw/c=50%について図-2に示す。

これより各セメントとも養生温度が低くなる程強度発現が遅いが、材令が進むに従いその差が小さくなり、材令91日では標準水中養生を超えるものも認められる。また材令の進行に伴う強度増進の割合は低温度ほど顕著で、特に5°Cは各温度中で最も顕著な伸びを示しており、長期材令では高い養生温度が必ずしも強度発現に有利な要因ではないことを示唆している。今回の実験では、材令28日における標準水中養生との差は、12.5°Cの場合で2~36 kg/m<sup>2</sup>、5°Cの場合で32~77 kg/m<sup>2</sup>と、一定温度で養生した場合には差の最大値がJASS 5に示されている温度補正值とほぼ符合していることがわかる。ただし、長期材令になるほど養生温度による強度差の割合が小さくなり、強度管理の材令をどの時期に設定するかということが、実際には非常に重要になってくるものと思われる。

3.1.3. セメント種別による強度発現性状 普通セメントを100としたときの各セメントコンクリートの強度比を表-5に示す。これより養生温度が低くなると中庸熱は強度比が大きくなる傾向であるが、フライアッシュB種は顕著な傾向を示していない。

初期においては、普通セメントに比べていずれのセメ

ントとも強度発現が小さく、長期においてはフライアッシュB種は小さいが、中庸熱は大きくなるのがわかる。

また、水中養生と封かん養生の違いによる影響はほとんど見られなかった。

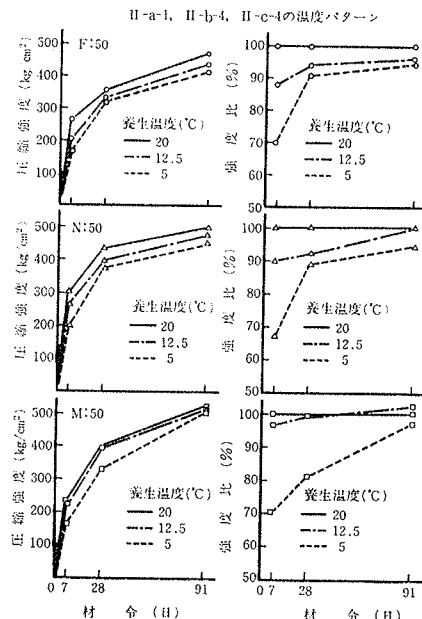


図-2 養生温度の違いによる圧縮強度および強度比

シリーズII-a-1, II-b-4, II-c-4の温度パターン

養生温度(°C)	水中養生									
	20			12.5			5			
	7	28	91	7	28	91	7	28	91	
N:50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
F:50	80	82	95	76	84	93	84	87	93	
M:50	78	91	105	83	99	108	84	88	112	

表-5 普通セメントを100としたときの各セメントを用いたコンクリートの強度比

材令28日強度を100としたときの強度比を表-6に示す。

これより材令経過による強度の伸び率は、養生温度が20, 12.5°Cについてはいずれの割合も大差なく、5°Cでは中庸熱が最も大きな伸びを示している。

シリーズII-a-1, II-b-4, II-c-4の温度パターン

養生温度(°C)	水中養生								
	20			12.5			5		
	7	28	91	7	28	91	7	28	91
F:55	67	100	143	63	100	133	50	100	133
F:50	67	100	133	61	100	132	51	100	129
F:40	74	100	131	64	100	127	60	100	132
N:50	69	100	114	67	100	120	53	100	127
M:50	59	100	131	58	100	130	51	100	154

表-6 材令28日強度を100としたときの強度比

3.1.4. ヤング係数の試験結果 ヤング係数は水セメント比に関係なく、圧縮強度によって決定され、従来、

建築学会で用いられている式で比重  $\gamma = 2.35$  とした  $E = 1.53 \times 10^4 \sqrt{F_c}$  式にほとんど近似され特異な傾向は認められなかった。

3.2. マスコン養生供試体の強度発現性状

マスコン養生供試体の試験結果と、管理用供試体の強度試験結果との比較から以下の傾向が認められる。

3.2.1. 練り上がり温度の影響 フライアッシュ B 種セメントコンクリートの練り上がり温度と材令 2 週以後の温度が等しい場合について、20°C 水中養生を 100 としたときの強度比を図-3 に示す。

これより練り上がり温度の低いものほど材令初期においては強度比が 100 % を超えているものの、練り上がり温度の差が顕著に表われていることがわかる。しかし材令の経過とともに温度履歴の違いによる影響は小さくなる傾向を示している。水セメント比は、初期材令において多少強度比に影響を与えるが、長期材令においてはあまり影響を与えていない。この傾向は普通セメント、中庸熱セメントとも同様である。

また練り上がり温度 20°C のものは長期材令になると他の低温度の練り上がり温度の場合と同程度の値を示している。これは材令初期における温度上昇の影響で、長期材令における強度発現が停滞したことによるものと考えられる。

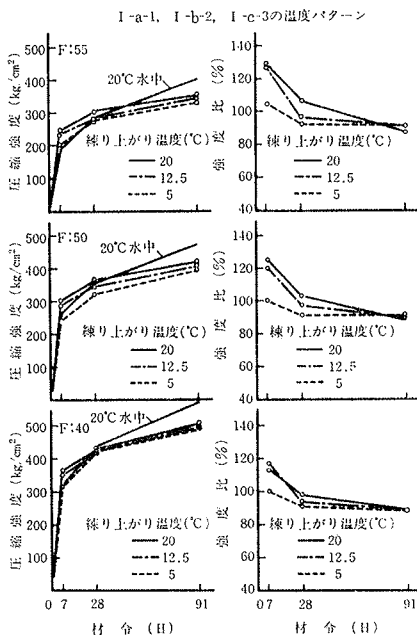


図-3 マスコン養生供試体の練り上がり温度の違いによる強度性状

3.2.2. セメント種別による強度発現性状 普通セメントを 100 としたときの各セメントを用いたコンクリートの強度比を表-7 に示す。これより材令 7 日における各セメントの強度発現は、普通セメント、フライアッシュ B 種、中庸熱の順に小さくなっている。しかもその傾向は養生温度の低いものほど顕著になっている。材令 28 日においても普通セメントに比べて他のセメントは強度が低くなっている。その割合はフライアッシュ B 種で 7~14%, 中庸熱で 5~7% 減となっている。

普通セメントに比べて他のセメントは強度が低くなっている。その割合はフライアッシュ B 種で 7~14%, 中庸熱で 5~7% 減となっている。

II-a-1, II-b-2, II-c-3の温度パターン

調合	20				12.5				5			
	7	14	28	91	7	14	28	91	7	14	28	91
N:50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
F:50	90	86	93	99	85	89	86	93	85	89	88	93
M:50	85	84	93	107	83	95	93	104	79	94	95	107

\* (注) 練り上がりおよび養生温度

表-7 普通セメントを100としたときの各セメントを用いたコンクリートの強度比

材令 91 日における強度発現は、フライアッシュ B 種は普通セメントに比べて小さいのに対して、中庸熱は逆に大きくなっている。この傾向は管理用供試体の場合と同様であった。

3.2.3. 養生温度による強度発現性状 材令 28 日強度を 100 とした時の強度比を表-8 に示す。

いずれの場合にも普通セメント、フライアッシュ B 種、中庸熱の順に材令経過による伸び率が大きくなっている。しかも養生温度が低くなるほど伸び率が大きくなっている。但し、図-3 に示すように管理用供試体に比べるとその伸び率は小さく、マスコンクリートの初期の水和熱による温度上昇が強度発現に影響しているものと思われる。

II-a-1, II-b-2, II-c-3の温度パターン

調合	20				12.5				5			
	7	14	28	91	7	14	28	91	7	14	28	91
F:55	83	91	100	117	85	92	100	125	74	92	100	125
F:50	82	90	100	114	83	89	100	122	75	90	100	123
F:40	85	94	100	118	84	93	100	119	75	93	100	117
N:50	85	97	100	107	82	86	100	111	77	90	100	116
M:50	78	87	100	124	71	87	100	122	65	89	100	131

\* (注) 練り上がりと養生の温度

表-8 材令28日強度を100としたときの強度比

3.3. ヤング係数

管理用供試体の場合と同様に、セメントの種類によるヤング係数への影響はなく、いずれも建築学会式  $E = 1.53 \times 10^4 \sqrt{F_c}$  に近似している。

3.4. 管理用供試体とマスコン養生供試体の比較

図-4 に前述の図-1 に示した養生温度履歴すべてについて、管理用供試体とマスコン養生供試体の積算温度と強度比の関係を  $w/c = 50\%$  の場合について示した。

強度比はそれぞれマスコン養生供試体においては 20°C

封かん養生における材令28日強度を、また管理用供試体においては20°C水中養生における材令28日強度を100とした時の値である。

図-4より、マスコン養生供試体においても管理用供試体と同様に積算温度と強度比の間に近似的な直線関係が成り立っている。

また、両者の回帰式を比べるとマスコン養生供試体の強度比に及ぼす積算温度の影響は、管理用供試体に比べて小さくなっている。これは、マスコン養生供試体と管理用供試体の温度履歴の打込み後初期のパターンが異なっているため、同一積算温度でも強度発現に差が生じたためと考えられる。

強度比に及ぼす積算温度の影響は、普通セメント、フライアッシュB種、中庸熱の順に大きくなっているが、セメントの種類に関係なく積算温度と強度比の間には直線関係が成り立っている。

水セメント比別の積算温度と圧縮強度との関係を図-5に示す。これより同一積算温度における圧縮強度は水セメント比が小さくなるほど大きくなっているが、いずれの回帰式も傾きがほとんど等しいと考えられ、積算温度によって強度の予測が可能なが推察される。

図-6に材令28日までのマスコン養生供試体の平均養生温度と標準養生供試体強度との強度差を図-6の回帰式より算出して示す。これより材令28日で強度管理を行なうとすれば、図に示す程度の強度補正の必要があると思われる。ただし、材令91日における強度は標準養生供試体強度以上の強度発現が見られるなど、積算温度と強度発現との対応関係に不明確な部分が見られるので、今後の検討を待つところであるが、材令を長期にとれば少なくとも温度補正が必要なくなると推察され、今後実部材レベルで詳細に検討し実態を把握する必要があるであろう。

4. まとめ

今回の実験結果によりマスコンクリートの温度履歴と強度発現に関する基礎的な資料を得ることができた。

今後、マスコンクリートの強度管理を合理的に行なう上で、初期の水和熱による温度上昇が強度発現に及ぼす影響を定量的に把握する必要があるものと思われる。

謝 辞

この論文は、昭和58年度東京工業大学卒業論文として実施した内容を取りまとめたもので、ここに実施担当者であった岩崎 誠氏に深く感謝する次第です。

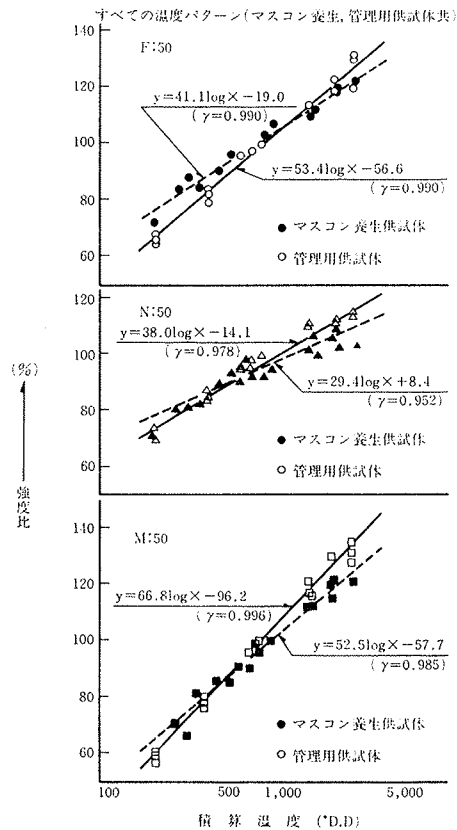


図-4 積算温度と圧縮強度

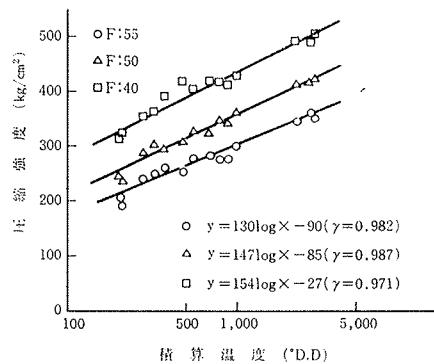


図-5 平均養生温度と強度差

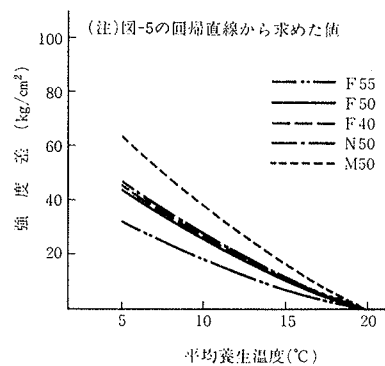


図-6 平均養生温度と強度差