

初期材令コンクリートのクリープに関する研究 (I)

月 岡 存

Studies on the Creep of Concrete at Early Ages (I)

Susumu TSUKIOKA

I. まえがき

ダムなどのマッシブなコンクリートにおいては、セメントの水和熱発生に伴う温度応力によるひびわれがしばしば問題となる。この温度応力を推定するためには、初期材令におけるコンクリートの力学的性質が明確でなければならないが、筆者らはすでに材令1日から7日のコンクリートを対象とした実験を行い圧縮強度、引張強度および弾性係数と材令との関係についての報告¹⁾をした。しかしながら、よりの確に温度応力を算定しコンクリートのひびわれについての評価をするためには、初期材令コンクリートのクリープ特性を明らかにしなければならない。また、初期材令のクリープ特性は、乾燥収縮に伴う硬化後のコンクリートの収縮応力の算定にも応用できるものと考えられる。

コンクリートのクリープに関しては、プレストレスト構造物の設計、限界状態設計法の導入および構造物の巨大化などによる必要性から、長期材令のコンクリートを対象とした研究が多数行われており、その特性についての多くの結論が得られている²⁾。ところが、初期材令のコンクリートのクリープについては、温度応力に関連して近年注目されだした分野であり研究成果もきわめて少なく、いまだ一般的結論が得られていない³⁾。

本研究は、初期材令(材令2週程度まで)のコンクリートのクリープに関する研究の一環として、クリープに及

ばず配合等の影響およびクリープと力学的性質の関係について実験的に検討した結果について述べたものである。

II. 実験概要

1. 使用材料

1) セメント：C社の普通ポルトランドセメントを使用した。その物理的性質の試験結果を表-1に示す。

2) 細骨材：三重県宮川産の川砂(比重2.57, 粗粒率2.64)および三重県芸濃町産の砕砂(花こう岩系, 比重2.75, 粗粒率2.83)を使用した。

3) 粗骨材：三重県宮川産の川砂利(比重2.61, 最大寸法20mm, 粗粒率6.38)および三重県芸濃町産の碎石(花こう岩系, 比重2.77, 最大寸法20mm, 粗粒率6.78)を使用した。

4) 混和剤：N社のAE減水剤(主成分リグニンスルホン酸塩, 標準型)を使用した。

2. コンクリートの種類および配合

コンクリートの種類および配合は、骨材の種類、スランプの大きさ(マスコンクリートを考慮して4cmを基本とした)、水セメント比W/Cおよび混和剤使用の有無を要因として表-2のように決定した。ただし、M-55はモルタルである。

3. 実験方法

1) 供試体の作製および養生

コンクリートは可傾式ミキサーを使用して各配合毎に

表-1 セメントの物理的性質

比重	比表面積 cm ² /g	フロー値	凝結(時:分)		圧縮強さ(kg/cm ²)		
			始発	終結	3日	7日	28日
3.16	3160	262	2:30	3:34	142	259	421

表-2 コンクリートの種類および配合

配 合	骨材の種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
R -55	川砂・川砂利	4±0.5	1	55	43	187	340	763	1026	—
C -55	砕砂・砕石	"	1	55	47	210	382	844	961	—
M -55	川砂	フロー値 125	1	55	100	267	485	1455	—	—
RL-55	川砂・川砂利	大 16	1	55	47	210	382	789	906	—
R -70	川砂・川砂利	4±0.5	1	70	45	190	271	820	1018	—
C -70	砕砂・砕石	"	1	70	49	214	306	908	953	—
CA-55	砕砂・砕石	"	5	55	47	186	338	850	964	0.845

1 バッチ 45~60l を練り混ぜ、練り上り温度は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ とした。コンクリート供試体は圧縮強度試験用 ($\phi 10 \times 20 \text{ cm}$)、引張強度試験用 ($\phi 10 \times 15 \text{ cm}$)、クリープ試験 ($\phi 15 \times 30 \text{ cm}$) および乾燥収縮測定用 (同) であり、JIS A1132 の規定に従いそれぞれ内部振動機による締固めを行って作製した。供試体の上面仕上げは、コンクリートを詰め終ってから約6時間後にセメントペーストによるキャッピングを施した。型わくの取り外し時期はコンクリートの締固め後約24時間とし、それまでの間、供試体上面をガラス板で覆っていた。

供試体の養生は、締固め後各種試験 (材令2日, 7日, 14日) までの間、温度 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、湿度約80%の恒温室内で行った。

2) クリープ試験

図-1に示すスプリング式圧縮型クリープ試験機を用いて、各配合のコンクリート供試体に対して材令2日と7日で載荷を開始し、それぞれ5日間載荷を継続した。この場合の載荷応力は、載荷開始直前に別の供試体を用いて実施した圧縮強度の試験結果の40%とした。供試体のヒズミの測定は供試体の中心軸に対称に設置したダイヤルゲージ (1/1000 mm) 2個により行い、また、載荷荷重はスプリングの変位を同じくダイヤルゲージ (1/100 mm) により測定し、これを荷重に変換することにより求めた。

これらのクリープ試験は各測定期間中の温度変化を $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内、湿度をほぼ $80 \pm 5\%$ に保った恒温室内で実施した。

また、供試体の乾燥収縮ヒズミの測定は、無載荷の供

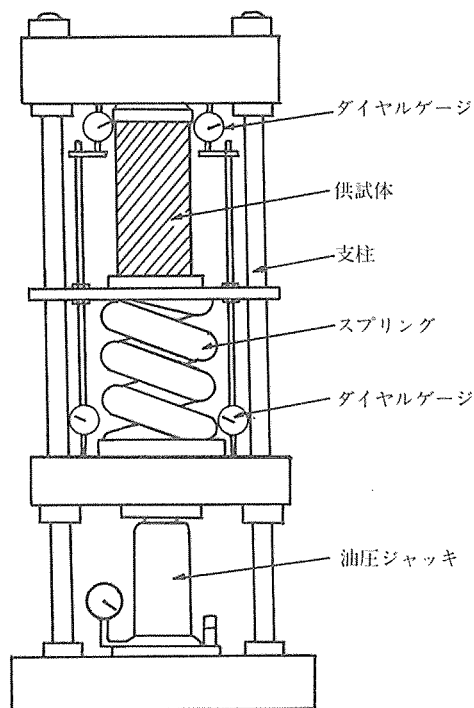


図-1 クリープ試験装置

試体に対して、クリープ試験と同環境の下で同じくダイヤルゲージ2個を使用して行った。

III. 実験結果および考察

1. コンクリートの力学的性質

コンクリートの力学的性質の測定結果を表-3に示す。表中の弾性係数は、クリープ試験において供試体に持続

表-3 コンクリートの力学的性質

配合	圧縮強度 (kg/cm ²)			引張強度 (kg/cm ²)			弾性係数 (kg/cm ²)	
	2日	7日	14日	2日	7日	14日	2日	7日
R -55	86	153	191	11.3	16.9	21.0	×10 ⁴ 5.2	×10 ⁴ 9.3
C -55	93	173	209	11.5	20.8	23.5	5.4	8.3
M -55	78	183	218	9.6	18.5	23.1	5.5	7.5
RL-55	64	138	164	8.4	15.0	20.5	4.4	8.4
R -70	36	138	129	4.3	11.4	14.3	2.4	6.0
C -70	44	100	135	5.7	13.8	16.2	2.6	6.2
CA-55	69	158	193	7.9	19.1	21.2	5.0	7.7

荷重を載荷するまでの応力ヒズミ曲線より求めた割線弾性係数である。

2. クリープヒズミ

図-2はクリープ試験における供試体の測定ヒズミから乾燥収縮ヒズミを差し引いたヒズミ、すなわち、クリープヒズミと載荷後日数の関係を示した一例である。クリープヒズミは載荷後数時間までは急激な増加、1日以後は緩やかな増加の傾向を示している。この載荷直後の急激なクリープヒズミの増加は、おもに遅延弾性変形が原因であろうと考えられる。全測定データを見ると、載荷5日後のクリープヒズミは $164 \times 10^{-6} \sim 493 \times 10^{-6}$ の範囲 (平均 300×10^{-6}) にあり、載荷後1時間、6時間、24時間におけるクリープヒズミの平均は載荷5日後のヒズミのそれぞれ27%、42%、61%であった。

また、載荷時材令が2日と7日のクリープヒズミの比

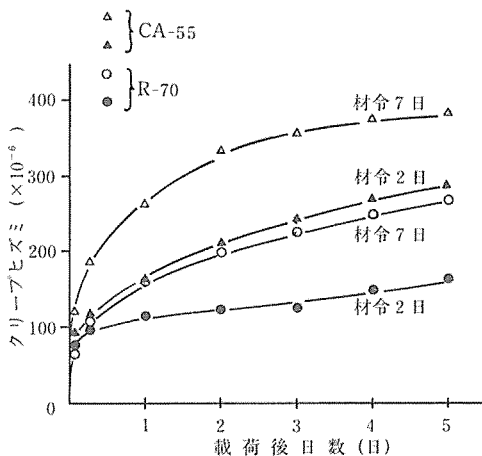


図-2 クリープヒズミの一例

較では、コンクリートの種類により異なりいずれが大きいかは断定できなかった。

3. クリープに及ぼす各種要因の影響

コンクリートのクリープに及ぼす各種要因の影響を検討するためには、載荷応力の異なるクリープヒズミよりクリープヒズミを載荷応力で除した単位クリープが適当であると考えられるため、以下の考察はすべてこの単位クリープについてのものである。なお、骨材の種類以下の図-4~図-8は、載荷時材令が2日か7日のどちらか一方について示したものであるが、他方も全く同じ傾向を示した。また、図-5~図-7において比較しているコンクリートは、配合を実用的なものとしているため、細骨材率 s/a が表-2に示したように同一ではない。

1) 載荷時材令

図-3より載荷時材令2日のコンクリートは7日のものよりクリープが大きいくことがわかる。載荷後5日の値で比較すると、載荷時材令2日のコンクリートのクリープは材令7日の1.94倍 (全平均) で両材令時におけるコ

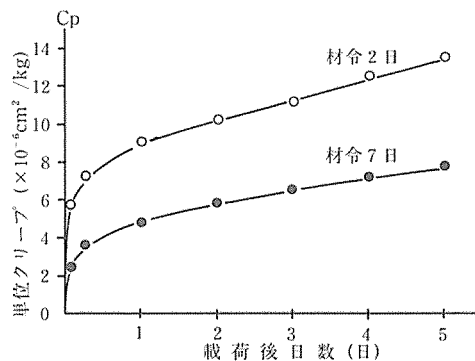


図-3 載荷時材令の影響 (C-70)

ンクリートの圧縮強度の比の逆数(全平均2.16)に近い値である。このことから、単位クリープは載荷時のコンクリートの圧縮強度と関係のあることが推定できる。

2) 骨材の種類

図-4は、骨材は異なるが配合が全く等しい C-55 と RL-55 のコンクリートを比較したものである。川砂、川砂利使用のコンクリートは砕砂、砕石のコンクリートよりクリープが大となった。この理由としては骨材の表面組織および粒形の影響が考えられる。砕砂、砕石は川砂、川砂利より表面が粗いためセメントペーストとの付着抵抗が大であり、また、角ばった粒形がセメントペーストの粘性流動に影響するために砕砂、砕石のクリープの方が小さくなったものと思われる。

図-5は水セメント比が等しく、同程度のコンシステンシーをもつコンクリートおよびモルタルについて比較したものである。川砂のみのモルタルは、川砂、川砂利ならびに砕砂、砕石使用のコンクリートよりクリープが大きいことがわかる。この原因は粗骨材自身のクリープを無視すれば明らかである。すなわち、供試体中に示め

るモルタル分の体積がコンクリートは粗骨材の分だけモルタルより少ない。よってコンクリートのクリープもモルタルのそれより小さくなったものと考えられる。また、川砂、川砂利使用のコンクリートと砕砂、砕石のコンクリートのクリープがそれほど違わないのは、前者の単位水量が後者より少ないため後述のようにクリープが小さくなり、相殺された結果であると考えられる。

3) 水セメント比 W/C

図-6より、W/C=70% のコンクリートは W/C=55% のコンクリートよりクリープが大である。これは、W/C の大きいコンクリートはセメントペースト自身の強度も小さく、セメントペーストと骨材との付着力も小さいためクリープが大きくなったものと考えられる。

4) スランプ

図-7は水セメント比が等しくスランプの異なるコンクリートを比べたものである。スランプの大きい(単位水量の大きい)コンクリートの方がクリープが大となった。この原因は次のように考えられる。スランプの大きいコンクリートは単位水量が多いためコンクリート中の

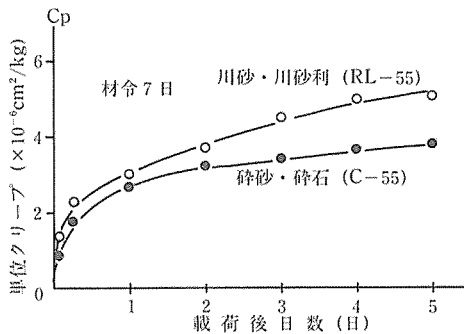


図-4 骨材の種類の影響 (同一配合)

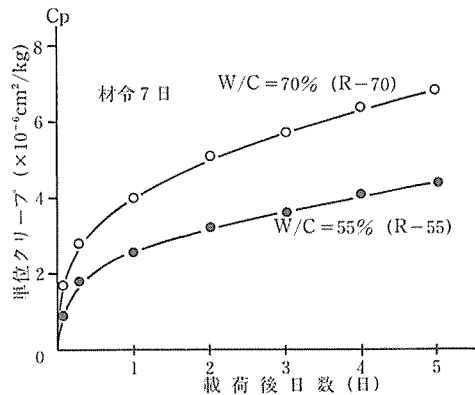


図-6 水セメント比 W/C の影響

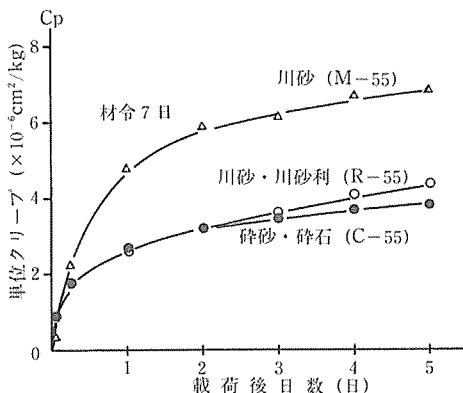


図-5 骨材の種類の影響 (同一コンシステンシー)

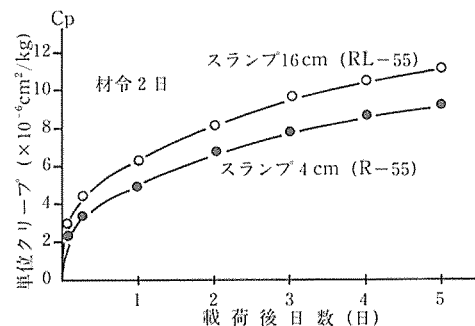


図-7 スランプの影響

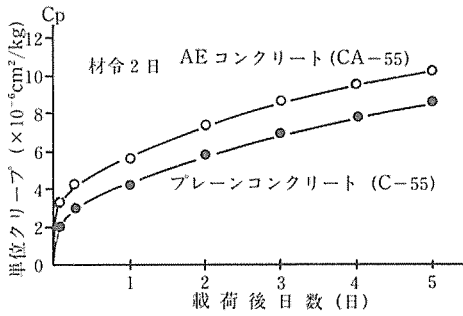


図-8 混和剤使用の有無の影響

セメントペースト量が多くなる。また、単位水量の増加のためセメントゲル内に多く存在するゲル水が、持続荷重によって圧出されることによる体積変化のために、クリープが大きくなったものと思われる。

5) 混和剤使用の有無

図-8に示すように、AE 減水剤を使用したコンクリート (AE) の方が単位水量が少ないにもかかわらず、使用しないコンクリート (プレーン) よりクリープが大きくなった。これは、AE 剤によりコンクリート中に運行されたエントレインドエア (実測値 4.7%) の影響によるものと思われる。すなわち、気泡の存在によるセメントペーストの変形抵抗の減少および骨材との付着力の減少が原因であると考えられる。

4. クリープと圧縮強度および弾性の関係

図-9は 載荷後 5 日のコンクリートの単位クリープと載荷開始時のコンクリートの圧縮強度の関係を示したものである。コンクリートの圧縮強度の小さいものは単位クリープが大きく、相関係数 r を求めた結果、 $r = -0.956$ であり、両者間には強い負の相関関係があることがわかる。

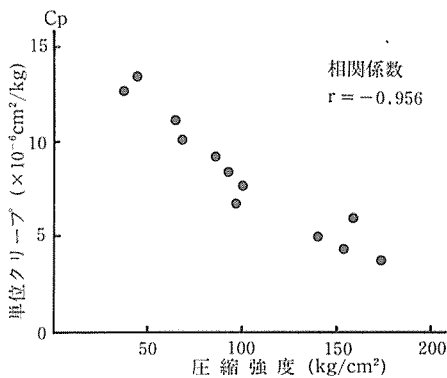


図-9 単位クリープと圧縮強度の関係

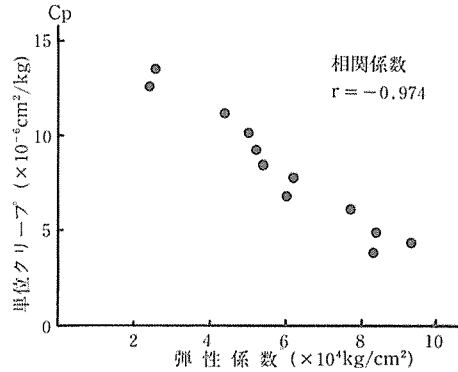


図-10 単位クリープと弾性係数の関係

図-10は、同じく載荷後 5 日のコンクリートの単位クリープと載荷開始時のコンクリートの弾性係数の関係を示したものである。圧縮強度の場合と同様に、単位クリープと弾性係数は相関係数が $r = -0.974$ で表わされ、さらに強い負の相関関係にあることがわかる。このことから、クリープの主な原因の一つとして遅延弾性による変形が妥当性のあるものであることがうかがえる。

次に、クリープヒズミと弾性ヒズミの比を表わすクリープ係数 ϕ の値を求めた結果を表-4に示す。表中の ϕ はいずれもクリープヒズミとしては載荷後 5 日の値、弾性ヒズミは載荷時の値を採用して計算したものである。 ϕ は載荷時材令 2 日方が同 7 日よりやや大きい傾向があるが、全体としては $\phi = 0.4 \sim 0.5$ 程度のもが多い。また、弾性ヒズミとして除荷時点における材令の弾性ヒズミの値を用いて計算した結果、載荷時材令 2 日の場合の ϕ は $0.71 \sim 0.91$ (平均 0.86) となった。このように、弾

表-4 クリープ係数 ϕ

配 合	載 荷 時 材 令	
	2 日	7 日
R -55	0.48	0.41
C -55	0.46	0.32
M -55	0.65	0.51
RL-55	0.49	0.41
R -70	0.39	0.41
C -70	0.35	0.48
CA-55	0.51	0.47
平 均	0.48	0.43

性係数(すなわち弾性ヒズミ)の変化の大きい初期材令コンクリートにおけるクリープ係数の算定には、弾性ヒズミとしてどの材令の値を採用するかについて注意を払わなければならない。

IV. ま と め

載荷時の材令が2日および7日のコンクリートを対象として圧縮クリープ試験を実施し、クリープに及ぼす配合等の要因の影響ならびにクリープとコンクリートの力学的性質の関係について検討した。得られた結果を要約すると以下のものである。

- 1) 載荷時材令、骨材の種類、水セメント比、スランプ(または単位水量)および混和剤使用の有無が初期材令コンクリートのクリープの大きさに影響を及ぼす。
- 2) 初期材令コンクリートの単位クリープは載荷時のコンクリートの圧縮強度および弾性係数と強い負の相関関係にある。また、クリープ係数はコンクリートの種類よりむしろ算定の基準となる弾性ヒズミの取り方(どの材令のものを採用するか)により大きく異なる。

本研究により、初期材令コンクリートのクリープに及

ぼす要因の影響および二、三のクリープ特性を明らかにすることができた。今後は載荷時の応力・強度比の異なる場合や持続載荷後のコンクリートの性質などについて実験を行う予定である。

謝 辞

本研究に対し、貴重な助言と実験への便宜を計っていただいた本学部浅井喜代治教授ならびに実験に協力を得た土木施工法研究室の専攻生諸君に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 浅井喜代治, 月岡 存, 森 博信: 若材令におけるコンクリートの力学的性質に関する研究, 農業土木学会大会講演集, 437-438, 1982
- 2) 例えば, 岡田 清: コンクリートの弾性とクリープ, 東京, 山海堂, 93-192, 1981
- 3) マスコンクリートの温度応力小委員会: マスコンクリートの温度応力推定方法に関する既往の研究とその総括, コンクリート工学, 21(8), 4-17, 1983

Summary

This paper deals with an experimental study on the creep of concrete at early ages. In the experiments, using the compressive creep test machine, the specimens of concrete with various mix proportions were loaded during 5 days.

The summary of the results is shown below.

Here C_p are creep strain per unit stress.

1. C_p of loaded concrete after 2 days, were greater than that of loaded concrete after 7 days.
2. The values of C_p of concrete were different, according to the variety of aggregates.
3. C_p of concrete with water cement ratio of 70 percent were greater than concrete with 55 percent ratio.
4. C_p of concrete with large slump (or water volume per unit volume) were greater than concrete with small slump.
5. C_p of AE concrete were greater than that of plain concrete.
6. Strong and negative correlations were observed between C_p and compressive strength of concrete, and between C_p and modulus of elasticity of concrete.