

マスコンクリートの若材令クリープ性状

川口 徹 中根 淳

Creep Characteristics of Mass Concrete at Early Ages

Tohru Kawaguchi Sunao Nakane

Abstract

This paper describes the results of creep tests carried out for obtaining data on creep characteristics of mass concrete at early ages. The test parameters were as follows: testing temperatures, 20 and 40°C, constant, respectively; loading ages, 0.5, 1, 2, 3, 7 and 28 days. As results: ① equations using effective age were obtained concerning development of compressive strength and elastic strain per unit stress of concrete, ② values of creep measured at early ages were considerably larger than those calculated using creep prediction according to the CEB-FIP Recommendation, and ③ at early ages, creep values at the higher temperature were lower than at room temperature.

概 要

本報は、マスコンクリートの若材令時クリープ性状に関するデータを得るために行なった持続載荷試験の結果について述べるものである。試験に用いたパラメーターは、試験温度：20°Cおよび40°Cそれぞれ一定の2段階、および載荷材令：0.5, 1, 2, 3, 7, 28日の6段階とした。試験の結果、以下のことが明らかになった。① コンクリート強度、単位弾性歪の発現に関して、有効材令をパラメーターとして、より実情に近い計算式を得た。② 若材令時のクリープは、CEB-FIPのクリープ算定式よりかなり大きい。③ 若材令の場合、高温下のクリープは常温下より小さい。

1. はじめに

マスコンクリートの水和熱に伴う温度ひびわれ対策に関する研究は、数多く報告されてきている。定性的な対策についてはかなり解明が進んできているが、個々の対策の定量化については問題の複雑さからなかなか研究の進展はみられない。

マスコンクリートの施工計画上のひびわれ対策の定量的検討を行なうためには、温度応力解析が必要とされている。この解析のためには、対象構造物の外部拘束度の合理的評価と共に、コンクリートの初期強度、変形特性に関する信頼性の高いデータが必要である。特に、この中で若材令時のクリープ特性についてはデータが不足している。^{1),2)}しかもマスコンクリートでは水和熱による初期高温履歴の影響を適切に評価する必要がある。

本報告は、マスコンクリートを対象とした若材令クリープ特性に関するデータを得るため、コンクリートの乾燥収縮を防止した条件で、試験温度と載荷材令を変えて

実施した持続載荷試験の結果について述べるものである。同時に、強度発現性状、弾性歪の経時変化についてもデータを収集した。

2. 試験の概要

試験条件は表—1に示す通りである。

クリープ試験は一軸圧縮応力状態で行なった。試験温度は、20°C一定と40°C一定の2段階で実施した。載荷材令は、ごく初期材令から、通常よく試験が行なわれている材令4週間までの間で1, 2, 3, 7, 28日の5段階（試験温度40°Cでは載荷材令0.5日を加え6段階）で試験した。なお、クリープ試験と並行して試験温度ごとに各載荷材令時の圧縮強度（弾性係数を含む）、単位弾性歪の計測も行なった。

コンクリートは、マスコンクリートであることを前提にフライアッシュセメントB種を使用し、硬質砂岩碎石・砕砂（砂は一部陸砂で粒度補正した）を用いた。コンクリートの調合は表—2、練り上がり時のコンクリート

コンクリートの種類	1種類($F_c=240\text{kg/cm}^2$, フライアッシュセメントB種)
試験温度	20, 40°C
載荷材令	.5, *1, 2, 3, 7, 28日
除荷材令	材令56日
クリープ回復測定期間	材令86日まで

* : 試験温度40°Cのみ実施

表一 試験条件

コンクリートの調合 (m ³)						
W/C	s/a	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
(%)	(%)	(t)	(kg)	(kg)	(kg)	(g)
55	43	164	298	780	1042	745

表二 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				材令4週時	
スランブ	空気量	単重	コンクリート温度	圧縮強度	弾性係数
(cm)	(%)	(kg/m ³)	(°C)	(kg/cm ²)	(10 ⁵ × kg/cm ²)
10	3.8	2302	20.9	308	3.12

表三 コンクリートの基本性状

の基本性状は、表一3に示す通りである。

クリープ試験用供試体は15φ×45cmシリンダー、強度試験用は、10φ×20cmシリンダーを用いた。なお、弾性歪の経時変化測定用には、15φ×30cmシリンダーを使用した。一試験条件当りの供試体の数は、クリープ試験、弾性歪の経時変化測定試験では2体、強度試験は3体を一組とした。供試体は、マスコンクリートを想定し試験期間中のコンクリートの乾燥収縮を防止するため、すべて厚さ0.3mmの銅板でシールした。

40°Cの温度で試験を行なうものは、20°Cでコンクリートを練った後は、成形から試験終了まで40°C一定の条件で養生および試験をした。

クリープ試験は以下の方法で行なった。加力には油圧発生装置を4台、載荷フレームは油圧ラム径の異なるものを4段階用意し、それらを組合せることにより、載荷応力が各載荷材令時の圧縮強度のほぼ1/3になるように留意した。油圧発生装置は自動的に圧力損失を検出し、一定荷重を保持できるものである。一試験条件当りの2体の供試体は直列配置とし、一台の載荷フレームで同一応力を加力した。なお、実載荷応力およびその経時変動を検出するため、載荷フレーム一台ごとにロードセル一台を使用した。載荷後の歪、実応力の変化は一定時間間隔で自動計測した。

弾性歪の経時変化測定試験は、その時点の圧縮強度の1/3の荷重を3回くり返し載荷し、単位応力当りの弾性歪を求めた。

歪の測定には、クリープ試験および弾性歪の経時変化測定試験ではK社製抵抗線式埋め込み型歪計を用い、強度試験ではコンプレッソメーターを使用した。

3. 試験結果および検討

強度試験、弾性歪測定試験、クリープ試験の主要結果を一覧にして表一4に示す。図一1は圧縮強度一有効材令の関係を示したものである。図一2は単位弾性歪一有効材令の関係である。図一3, 4は、試験温度ごとに、載荷材令のちがいによるクリープ性状を比較するため、単位応力当りの(弾性+クリープ)歪を対数時間軸上で表わしたものである。クリープ試験での同一試験条件2体の差は、かなり小さかった。なお、結果の整理に当たり、シール用銅板の剛性は無視した。

これらの結果をもとに検討する。

3.1. 圧縮強度、弾性歪について

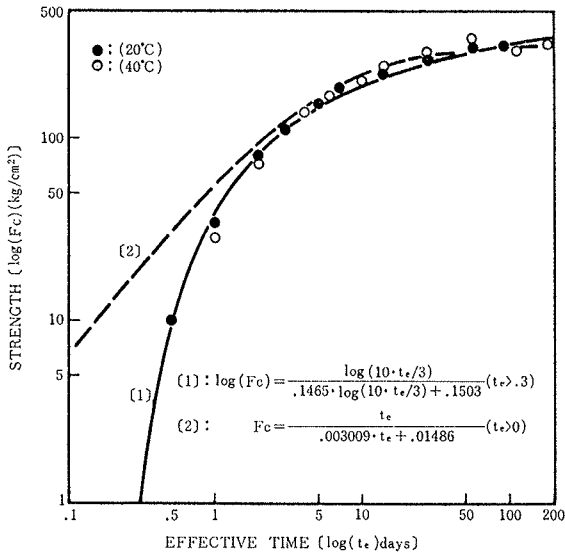
今回の試験結果の整理にあたり試験温度のちがいによる有効材令の算定は、次式を用いた。

$$t_e = \sum \Delta t \cdot \theta / 20 \quad \dots\dots\dots(1)$$

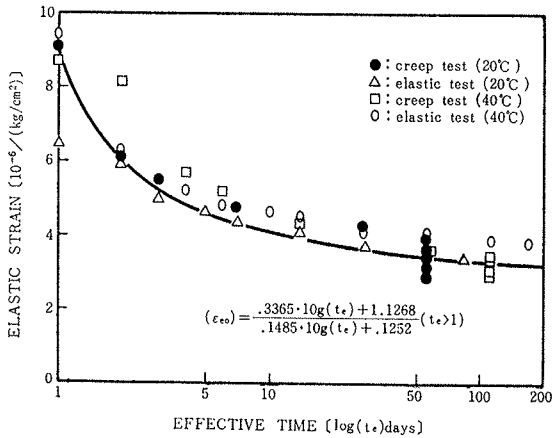
材令 (日)	試験温度 20°C									試験温度 40°C								
	強度試験		弾性歪		ク リ ー プ 試 験					強度試験		弾性歪		ク リ ー プ 試 験				
	f _c	E _c	ε _{e00}	σ _o	σ _o /f _c	ε _{e0}	ε _{T1}	ε _{e1}	ε _{Te}	f _c	E _c	ε _{e00}	σ _o	σ _o /f _c	ε _{e0}	ε _{T1}	ε _{e1}	ε _{Te}
.5	10	—	—	—	—	—	—	—	—	28	.6	9.38	9.8	34.9	8.70	20.48	2.88	17.47
1	34	.8	6.48	10.2	29.9	9.08	22.11	2.85	18.12	77	1.59	6.16	30.3	39.3	8.11	15.23	3.01	11.46
2	78	1.26	5.87	27.5	35.3	6.08	14.11	3.11	9.93	138	1.94	5.18	48.5	35.1	5.64	12.17	3.29	8.10
3	109	1.76	4.94	33.0	30.3	5.47	12.67	3.34	8.21	168	2.29	4.76	58.9	35.0	5.11	10.75	3.42	6.52
5	151	2.04	4.56	—	—	—	—	—	—	203	2.19	4.58	—	—	—	—	—	—
7	188	2.21	4.3	53.8	28.6	4.74	10.5	3.6	5.85	226	2.49	4.39	68.9	30.5	4.30	8.01	3.34	3.87
14	226	2.39	4.03	—	—	—	—	—	—	290	2.82	4.08	—	—	—	—	—	—
28	267	2.62	3.65	91.9	34.4	4.21	7.4	3.91	2.51	335	3.12	3.95	72.8	21.7	3.61	5.34	3.30	1.37
56	314	3.12	3.41	—	—	—	—	—	—	300	3.20	3.85	—	—	—	—	—	—
91	322	3.00	3.33	—	—	—	—	—	—	325	3.14	3.79	—	—	—	—	—	—

f_c : 圧縮強度 (kg/cm²) E_c : 弾性係数 (10⁵kg/cm²) ε_{e00} : 単位弾性歪 (10⁻⁶/(kg/cm²))
 σ_o : 実載荷応力 (kg/cm²) σ_o/f_c : 応力強度比 (%)
 ε_{e0} : 載荷時単位弾性歪 ε_{T1} : 除荷直前単位総歪 ε_{e1} : 除荷時単位弾性歪 ε_e : 計測終了時単位残留総歪 (10⁻⁶/(kg/cm²))

表一4 試験結果一覧



図一 圧縮強度と有効材令の関係



図二 単位弾性歪と有効材令の関係

ここに、 t_0 : 有効材令 (日)

Δt : コンクリート温度が θ である日数

θ : コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)

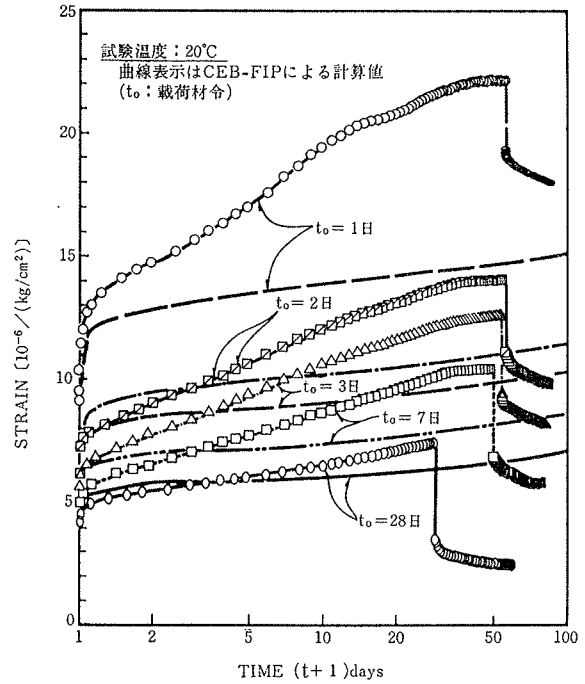
図一によると、圧縮強度の発現性状は試験温度に関わらず、ほぼ同一線上にのってることがわかる。同じように図二の弾性歪の経時変化についても圧縮強度の場合よりばらつきは大きいものの今回の算定法による有効材令ではほぼ評価できると考えられる。

有効材令の算定法については、(1)式とは別に CEB-FIP では次式を推奨している¹⁾。

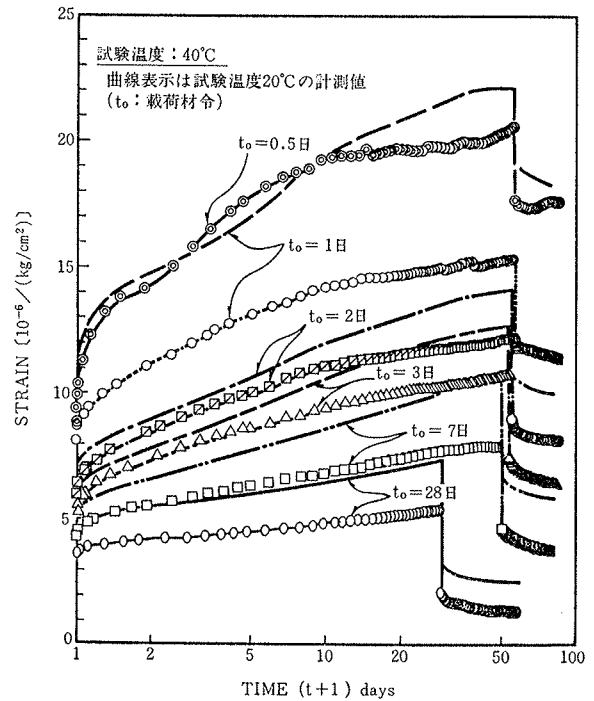
$$t_0 = \sum \Delta t (\theta + 10) / 30 \quad \dots\dots\dots(2)$$

しかし、今回得られた結果から判断すると、特にごく初期材令での強度特性を評価する場合は、(2)式より(1)式の方が適応性がよいと考えられる。

図一、二中では試験値に対して最小二乗法を適用して、圧縮強度、弾性歪それぞれを有効材令の関数としての表示を試みた結果もプロットした。図一では ACI 209³⁾で推奨している双曲線関数による表示と、それとは



図三 クリープ試験の結果 (試験温度: 20°C)



図四 クリープ試験の結果 (試験温度: 40°C)

別の対数関数による表示とを比較した。これによると、従来よく使われている双曲線関数より対数関数の方が実験結果に対する一致度が高いことがわかる。マスコンクリートの温度応力のごく初期材令からの物性変化が問題になる場合にはその関数化に注意する必要があると考える。

3.2. クリープ性状について

図三、四から試験温度によらず、載荷材令が小さい

ほどクリープ歪が大きく、除荷後の残留歪も大きいことがわかる。

図-3には今回の試験結果と CEB-FIP の方法¹⁾による計算値(計算方法は付録参照)を比較して示した。これによると、CEB-FIP の計算値では急速初期変形成分を過大に評価しているためか、載荷ごく初期は試験値に比べ計算値の方が大きい。しかし、その後の時間経過に伴う変形の進行は、試験値の方が大きく載荷材令の小さいほどその差が大きくなっている。

図-4では、試験温度のちがいでによる差を比較するため試験温度20℃の結果を曲線で表示した。これによるといずれの載荷材令においても試験温度40℃の変形量の方が20℃より小さくなっている。一般にコンクリートのクリープ性状は高温になるほど大きくなるといわれている⁴⁾。しかし、今回の試験のような若材令時には高温によるセメントの水和反応の促進により圧縮強度、弾性係数の発現が速いため、高温だからといって必ずしもクリープ変形が大きくなるとは理解される。

除荷後のクリープ回復は載荷材令に関係なく20℃で約 $1 \times 10^{-6}/(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 、40℃でその80%程度であった。

4. まとめ

今回の試験により次のことが明らかになった。

- (1) コンクリート強度、単位弾性歪の発現に関して有効材令をパラメーターとして、より実情に近い計算式を得た。
- (2) 若材令時のクリープは、CEB-FIP のクリープ算定式から求めたものよりかなり大きい。
- (3) 若材令の場合、高温下のクリープは常温より小さい。

今回の試験により一定温度、一定応力下の若材令コンクリートのクリープ性状に関する基礎データが得られた。今後は、これらのデータをもとに温度変化を受けるマスコンクリートの応力変化の評価方法を検討する予定である。

付録・CEB-FIPによるクリープ変形の計算方法

単位応力当りの(弾性+クリープ)歪 $\epsilon(t, t_0)$ は、次式で表わされる。

$$\epsilon(t, t_0) = 1/E_c(t_0) + \varphi(t, t_0)/E_{c28} \dots\dots\dots(\text{付-1})$$

ここに、 t : コンクリート材令

t_0 : 載荷材令

$(t-t_0)$: 載荷後の経過日数

$1/E_c(t_0)$: 載荷時の単位弾性歪

E_{c28} : 材令28日の弾性係数

$\varphi(t, t_0)$: 時間 t におけるクリープ係数

クリープ係数 $\varphi(t, t_0)$ は次式で表わされる。

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_a \beta_a(t, t_0) + \varphi_f (\beta_f(t) - \beta_f(t_0)) + \beta_a(t_0) \dots\dots\dots(\text{付-2})$$

$$\beta_a(t_0) = 0.8(1 - f_c(t_0)/f_{c\infty}) \dots\dots\dots(\text{付-3})$$

ここに、 φ_a : 基本遅れ弾性変形係数

β_a : 遅れ弾性変形の経時変化についての係数

φ_f : 基本流動係数

β_f : 流動変形の経時変化についての係数

β_a : 急速初期変形の係数

$f_c(t_0)$: 載荷時の圧縮強度

$f_{c\infty}$: 最終圧縮強度

(付-2)式の右辺第一項は遅れ弾性変形、第二項は流動変形、第三項は急速初期変形である。

なお、計算に当たり次のような仮定を設けた。

$\varphi_a = 0.4$, $\varphi_f = 1.3$, $f_{c\infty} = 400$ とし、 $1/E_c(t_0)$, $1/E_{c28}$ は実測値を用いた。 β_a , β_f はそれぞれ CEB-FIP Model Code の図中で与えられている値を使用した。なお、 β_f について数値の与えられていない $0 < t \leq 3$ の間は線形補間して値を求めた。(付-3)式の急速初期変形は載荷後0.1日の間に全変形が生じるとした。

参考文献

- 1) CEB-FIP: CEB-FIP MODEL CODE FOR CONCRETE STRUCTURES, CEB-FIP International Recommendations, 3rd Edition, (1978), p. 333
- 2) 山崎敏敏: 若令コンクリートのクリープ, 日本建築学会大会学術講演概梗集, (昭和56.9), pp. 71~72
- 3) ACI Committee 209: Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, SP-27, (1971), pp. 51~93
- 4) 川口, 他: 高強度コンクリートの長期性状に関する研究(その2) - コンクリートの高温クリープ試験の結果 -, 大林組技術研究所報, No. 23, (1981), pp. 48~53