

[87] 膨張コンクリートの引張クリープに関する基礎的研究

正会員 藤井 学 (神戸大学工学部)

正会員 ○宮本文穂 (神戸大学工学部)

寺尾 豊 (大阪市役所)

角矢佳浩 ((株) 鴻池組)

1. ま え が き

膨張セメントコンクリートは収縮補償コンクリートあるいはケミカルプレストレストコンクリートとして各種のコンクリート製品やコンクリート構造物に応用されるようになってきている。ケミカルプレストレスをさらに有効かつ広く利用していくためには、膨張、収縮特性はもとより、クリープ特性の研究が必要であるが、引張応力下での挙動に関する研究報告はきわめて少ない。本研究は載荷材令と導入応力をパラメータとした引張クリープ実験を行い、膨張セメントコンクリートの引張クリープの基本性状について検討、考察を加えたものである。

2. 実 験 概 要

1) 供試体 供試体は図-1に示すようにφ150×600mmの円柱供試体とし、コンクリートに所定の引張力を伝達させるため、端板にD16異形鉄筋を4本溶接した。またひずみ測定のために埋込型ゲージを供試体長手方向中央位置、シースと側型枠間の中央に配置した。

2) 配合 コンクリートの示方配合を表-1に示す。膨張性混和材はカルシウムサルフォアルミネート系のものを使用し、セメント量 380 kg/m^3 に対して 60 kg/m^3 混入した。

3) 実験方法 供試体は拘束状態で所定の載荷材令まで散水養生を行い、載荷材令において拘束鉄筋を取り除き、プレストレスを開放した後、図-2に示すクリープ試験装置により所定の引張力を導入した。本研究では載荷材令および導入応力をパラメータにとり実験を行った。表-2に各試験シリーズの略称とともに供試体の種類を示す。

4) 測定項目 ひずみの測定は埋込

型ゲージにより行った。また本研究では載荷材令において拘束を開放したままのコントロール供試体のひずみ測定および拘束膨張ひずみ、自由膨張ひずみの測定も合わせて行った。なおこれらの供試体は全て図-1に示すクリープ試験用供試体と同様のものを使用した。

3. 実 験 結 果 お よ び 考 察

1) 拘束および自由膨張ひずみ 両ひずみの測定結果を図-3に示す。両ひずみとも打設後10時間で伸びを示し始め、以後拘束膨張ひずみは材令7日程度までに急速な立ち上がりを示すが7日を過ぎると殆ど伸びを示さなくなり定常状態となっている。一方自由膨

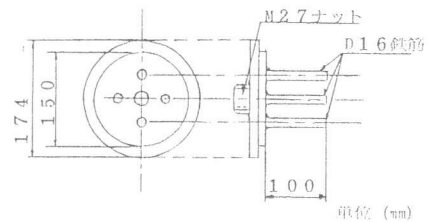
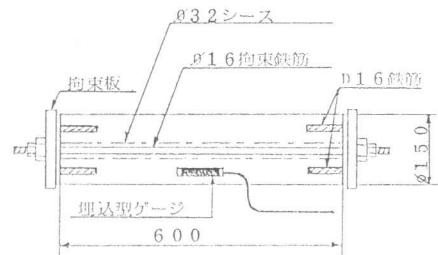


図-1 供試体寸法

表-1 コンクリートの示方配合表

Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³ or l/m ³)						
					W	C	S	G	CSA	5L	302A
20	14±2	4±1	49	37	172	380	583	1118	60	3.6	0.72

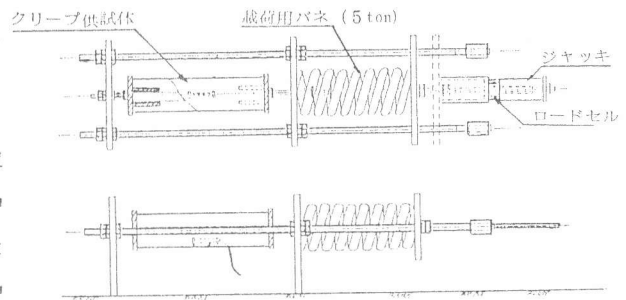


図-2 クリープ試験装置

張ひずみも7日程度までは拘束膨張ひずみと同様の立ち上がりを示すが、それ以降においても、わずかではあるが伸び続けている。

2) 引張クリープ 引張クリープの算定方法は次式のように行った。

$$(\text{引張クリープ}) = (\text{クリープ試験用供試体の載荷後の測定ひずみ}) - (\text{コントロール供試体の開放後の測定ひずみ})$$

① 載荷材令 導入応力の等しい供試体C-7-50, C-14-42, C-28-38 における引張クリープの経時変化を図-4に示す。いずれの場合も載荷後初期におけるクリープ速度が非常に大きく、以後、早期のうちに定常状態に達するという引張クリープ特有の性状¹⁾を示している。次に載荷材令の影響については普通コンクリートと同様に、載荷材令が大きくなるほど、引張クリープは小さくなっているが、Whitneyの法則の適用は難しいようである。これら載荷材令による引張クリープの差は載荷後初期のクリープ速度の差が殆んどであり、それ以後の材令におけるクリープ速度は非常に類似したものになっている。

② 応力レベル 載荷材令28日における4種類の供試体における引張クリープの経時変化を図-5に、また引張クリープと応力/強度比の関係を図-6に示す。図-5を見ると、応力/強度比が50%以下のものについては載荷後材令40日程度までにはほぼ定常状態を示すようになっているが、60%のものは定常状態を示す傾向は見られず、常に増加を続けている。次に図-6を見ると、応力/強度比30~50%間では引張クリープと応力/強度比は非常によい直線性を示しているが50%を超えるとその関係は認められなくなっている。しかし応力/強度比30~50%間での直線は原点を通るものとはなっておらず、普通コンクリートのようクリープが載荷応力に比例するというDavis-Granvilleの法則は成立しないようである。すなわち、この法則の適用範囲は普通コンクリートよりも狭いものと考えられる。

③ 引張クリープ限度 普通コンクリートの圧縮クリープ限度は静的強度の75~90%の範囲にあるとされているが、引張クリープに関しては80~85%と多少低いとされている²⁾。しかし、膨張セメントコンクリートについては、圧縮、引張の両方ともクリープ限度に関する明確な推定は行われていない。載荷時の弾性ひずみとクリープの和と応力/強度比との関係を図-7に示す。応力/強度比30~50%の間ではひずみの伸びは載荷後材令40日程度で終了しているが、60%のものはそれ以後も伸び続けており、80日を経過しても定常状態を示す傾向はなく、このことから考えて、引張クリープ限度は応力/強度比60~70%程度の範囲に存在する可能性が強いと考えられる。

表-2 供試体の種類

略称	載荷時材令 (日)	直接引張強度 (kg/cm ²)	応力/強度 (%)	導入応力 (kg/cm ²)	供試体数 (体)
C-7-50	7	23.0	50	11.50	2
C-14-42	14	27.4	42	11.50	2
C-28-30	28	30.3	30	9.10	2
C-28-38			38	11.50	2
C-28-50			50	15.17	2
C-28-60			60	18.21	2

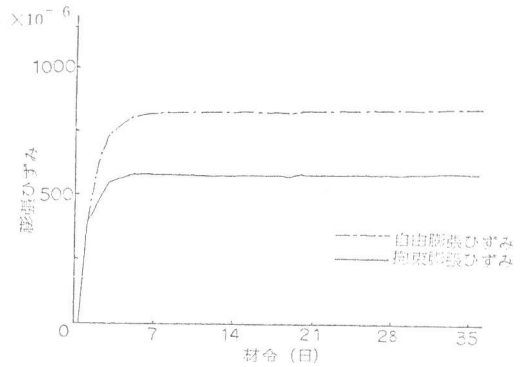


図-3 拘束および自由膨張ひずみと材令の関係

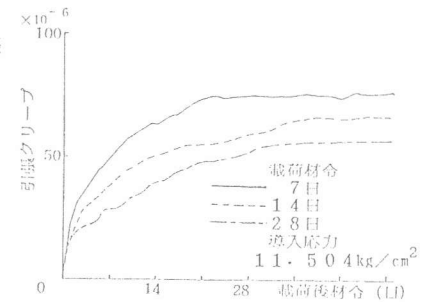


図-4 引張クリープの経時変化(その1)

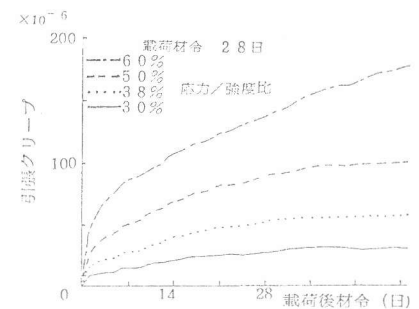


図-5 引張クリープの経時変化(その2)

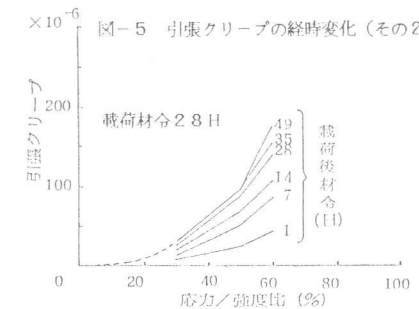


図-6 引張クリープと応力/強度比の関係

④クリープ係数 導入応力の等しい供試体C-7-50, C-14-42, C-28-38におけるクリープ係数の経時変化を図-8に、また載荷材令が同一で応力/強度比50%以下の供試体C-28-30, C-28-38, C-28-50におけるクリープ係数の経時変化を図-9に示す。図-8よりクリープ係数は載荷材令が遅い程小さくなっているが、その減少程度は小さくなっていることがわかる。図-9より応力/強度比の差異によりクリープ係数は異っており、応力/強度比が大きくなるにつれてその値も大きくなっていることがわかる。これは普通コンクリートとは異った性状である。そこでクリープ係数と応力/強度比の関係を図-10に示す。この図よりクリープ係数と応力/強度比の関係は原点を通る直線として表わすことができることがわかる。図-11はクリープ係数を導入応力で除した値(以下単位クリープ係数と称する)と載荷後材令(載荷材令28日)の関係を示したものである。これより単位クリープ係数は応力/強度比が異ってもほとんど変化しないことがわかる。このような単位クリープ係数の概念は膨張セメントコンクリートの引張クリープ特性を論じる上で、また以下に述べるようなクリープ係数の予測などにおいては非常に有効であると考えられる。

⑤クリープ係数の予測 コンクリートのクリープ係数の予測方法は、CEB/FIP国際指針等に見られる。以下に1970年の指針におけるクリープ係数の予測方法を簡単に示す。クリープ係数 $\Phi(t)$ は次式のように5つの部分的な係数の積で与えられる。

$$\Phi(t) = k_c \times k_d \times k_b \times k_e \times k_t \quad (1)$$

ここで k_c :環境条件に関するもの、 k_d :載荷時のコンクリートの硬化度に関するもの、 k_b :コンクリートの配合に関するもの、 k_e :部材の仮想厚に関するもの、 k_t :遅れ変形の時間的な進行を規定するもの

次に(1)式により本実験におけるクリープ係数を計算した。各係数は指針に従い表-3のように決定した。載荷材令14日のクリープ係数の予測値と実測値を図-12に示す。なおこの図ではCEB/FIP国際指針1978年による予測値も併示した。この図を見ると、予測値は実測値よりもかなり小さい値を示しており、グラフの形状についても予測値の方は載荷後初期の立ち上がり部分が小さいことがわかる。このことは主に遅れ変形の時間的な進行を規定する係数 k_t が圧縮ク

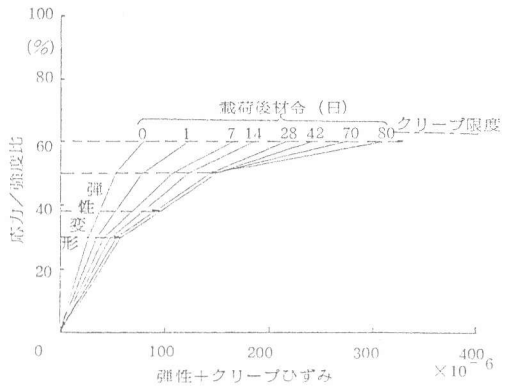


図-7 引張クリープ限度

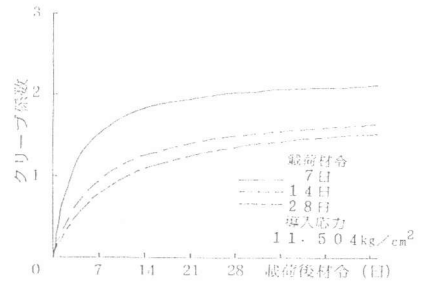


図-8 クリープ係数の経時変化(その1)

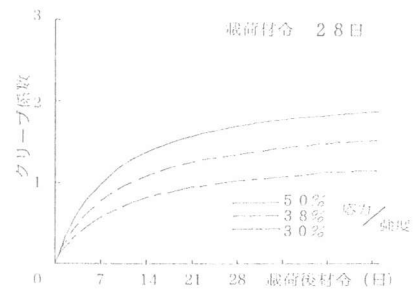


図-9 クリープ係数の経時変化(その2)

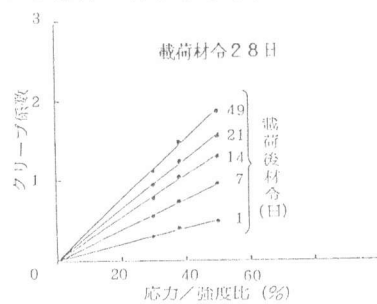


図-10 クリープ係数と応力/強度比の関係

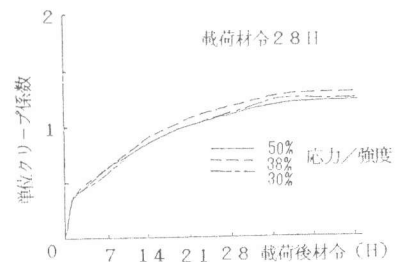


図-11 単位クリープ係数の比較

表-3 予測式における各係数の値

載荷材令 (日)	係数			
	k_c	k_d	k_b	k_e
7	1.5	1.4	1.0	1.05
14	1.5	1.2	1.0	1.05
28	1.5	1.0	1.0	1.05

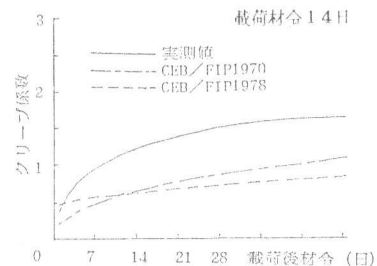


図-12 クリープ係数の予測結果(その1)

リーブと引張クリープとは異なることによると思われる、この式を引張クリープに適用するには係数 k_t を修正しなければならないと考えられる。そこで係数 k_t の値を供試体 C-28-50 のクリープ係数から逆算してみた。

ただし前述したようにクリープ係数が導入応力により変化するためクリープ係数の代りに単位クリープ係数を使用し、次式により係数 k_t を求めた： $\Phi(t) = \Phi(t) / \sigma = k_c \times k_d \times k_b \times k_e \times k_t$

$$= 1.5 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.05 \times k_t \quad (2)$$

ここで $\Phi(t)$ ：単位クリープ係数 ($1/\text{kg}/\text{cm}^2$) σ ：導入応力 (kg/cm^2)

(2) 式より求められた係数 k_t を $k_t = t / (a + b t)$ で回帰すると

$$k_t = t / (93.7 + 10.8 t) \quad (3)$$

となり、この値を使用し次式により各シリーズのクリープ係数を予測した： $\Phi(t) = k_c \times k_d \times k_b \times k_e \times k_t \times \sigma$

予測値と実測値の比較を図-13に示す。結果は載荷材令7日のもの以外は予測値と実測値は非常に近い値となっており、また7日のものについても載荷後材令が進むにつれて一致する傾向を示している。これらの結果より、コンクリートがある程度硬化した後のクリープ係数は(4)式によりほぼ予測できるのではないかとと思われる。

⑥クリープ回復特性 クリープ試験用供試体のうち C-28-60 以外のもの5種について載荷後材令50日において応力を開放し回復クリープの測定を行った。供試体 C-7-50, C-14-42 における回復クリープの経時変化を図-14に、C-28-30, C-28-38, C-28-50 についてのものを図-15に示す。これより載荷材令が遅くなると回復クリープは小さくなるが、応力/強度比の違いによる差は殆ど見られない。また引張クリープの大きさから比べると回復クリープの割合は引張クリープに対し13~37%となっている(表-4参照)。これらのことから膨張セメントコンクリートの引張クリープは、その大部分が非回復性であり、応力/強度比の差異による引張クリープの差についてもその殆んどが非回復性であることがわかる。

4. 結 論

本研究により得られた主要な結果を以下に示す。

1) 膨張セメントコンクリートの引張クリープに対する載荷材令や導入応力の影響は、普通コンクリートのものと定性的にはほぼ同様であるが、

Davis-Granville の法則やWhitney の法則の適用範囲は普通コンクリートより小さい。

2) 引張クリープは応力/強度比が50%を超えると急激に増加し、引張クリープ限度は60~70%程度の範囲に存在すると考えられる。

3) クリープ係数は導入応力の違いにより異なるが、クリープ係数を導入応力で除した単位クリープ係数は各載荷材令で一致し、この概念を用いてクリープ係数を予測することができる。

4) 膨張セメントコンクリートの引張クリープはその大部分が非回復性であり、応力/強度比が大きくなると、非回復性のクリープが増加する。

(参考文献) 1) Illston, J. M.: The Creep of Concrete under Uniaxial Tension, Magazine of Concrete Research, Vol.17, No.51,1965 2) 清水昭之: コンクリートの引張クリープ, コンクリート工学, Vol.21, No. 6,1983年 6月

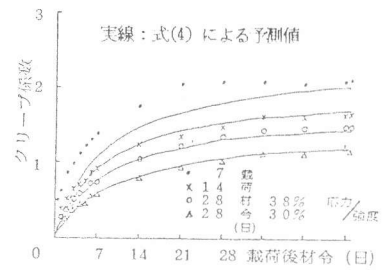


図-13 クリープ係数の予測結果(その2)

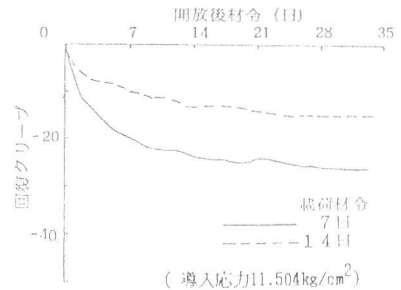


図-14 回復クリープの経時変化(その1)

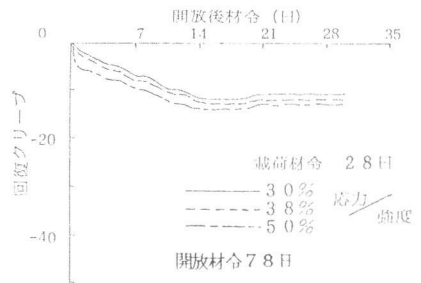


図-15 回復クリープの経時変化(その2)

表-4 回復クリープの割合

供試体記号	クリープ [*] $\epsilon_c (\times 10^{-6})$	回復クリープ ^{**} $\epsilon_r (\times 10^{-6})$	ϵ_r / ϵ_c (%)
C-7-50	7.6	2.6	34
C-14-42	6.7	1.5	22
C-28-30	3.0	1.1	37
C-28-38	5.7	1.2	21
C-28-50	9.9	1.3	13

* : 載荷後材令50日におけるクリープ

** : 開放後材令30日における回復クリープ