

[42] 蒸気養生した高強度コンクリートの薄肉PC版の乾燥収縮及びクリープ歪について

青木 聖二 (フドウ建研 (株))

正会員 ○中松 健 (フドウ建研 (株))

橋本 訓 (フドウ建研 (株))

1 はじめに

現在、一般にプレキャスト・プレストレストコンクリート製品は、高強度コンクリートを蒸気養生することにより、材令1日でプレストレスが導入されている。このような条件下で、しかも断面最小寸法が10cm足らずの薄いコンクリート版の乾燥収縮及びクリープ歪に関する報告は少ない。^{1)~3)} また、蒸気養生された高強度コンクリート薄肉PC版に、建築学会の基準値をそのまま適用を行なって良いものか、疑問である。そこで今回、版厚7cm、設計基準強度450kg/cm²、目標配合強度525kg/cm²で蒸気養生された試験体に、導入応力を変化させて、その歪、応力の推移を、材令2年まで測定した。その結果、乾燥収縮の値は建築学会基準値に比べ140%程度大きく、反面クリープ係数は50%程度小さな値を示した。

2 実験概要

2・1 使用材料

本実験に用いたコンクリートは、セメントが普通ポルトランドセメント(三菱鉱業セメント社製)、粗骨材が相模川産碎石、細骨材が相模川産川砂である。物理試験結果を、表1に示す。

表1 使用骨材の物理試験結果

種別	比重	吸水率 (%)	単位容積重量 (kg/ℓ)	粗粒率
細骨材	2.62	3.0	1.775	3.33
粗骨材	2.74	0.9	1.620	6.78

2・2 コンクリートの配合

コンクリートの配合条件は、スランブ 0~3cm 粗骨材最大寸法20mm、設計基準強度($F_c = 450 \text{ kg/cm}^2$)とした。配合表は、表2に示す。

2・3 試験体

試験体は 50×200×7cmで、クリープ用6体、乾燥収縮用3体を製作し、同時に圧縮強度、静弾性係数測定用として10φ×20cm供試体15本を製作した。試験体は、打設後、蒸気養生の後、1日で脱型し、空中養生した。試験体の形状と配筋状況は、図1に示す。試験体製作工程は、コンクリート打設後、3時間の前置き時間の後、蒸気養生を開始し、8時間で、蒸気

表2 コンクリートの配合表

粗骨材寸法 (mm)	スランブ (cm)	エリア (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位重量 (kg/m ³)				混和剤 (ℓ/m ³)
					水	セメント	細骨材	粗骨材	
20	0~3	1~2	35	42.5	147	420	776	1091	4.2

を止め自然冷却した。なほ、蒸気養生の時間および温度の関係のグラフを、図2に示す。

2・4 試験方法

クリープ試験装置としては、ポストテンション型PSコンクリートの原理を利用した圧縮クリープ試験装置とした。即、供試体の断面中心に、アンボンドPC鋼棒13φ(高周波熱練社製)をとおし、鋼棒を緊張させたアンカー板を介して、圧縮荷重を作用させる方法をとった。持続荷重の導入は、打設後1日目に行った。導入力は使用コンクリートの設計基準強度の1/3の150kg/cm²と、その1/2の75kg/cm²の2種類を、各々3体製

作した。乾燥収縮用として、3体製作した。

(図1)

2・5 導入力の管理

定着側のロードセルに貼付したストレインゲージ（共和電業 KFC-5-C 1-1 1）により、ストレインメーター（共和電業 SM-6 0-A T）で歪を測定し、センターホールジャッキ（能力50トン）により緊張した。この試験方法によると導入応力が減退するため、測定毎に導入力をチェックしておく必要があり、上記のロードセルのストレインゲージを使用して、測定日の応力をチェックし、クリープ歪の補正を行った。なほ、ストレインゲージは、長期間測定可能にするため、十分なコーティング処理を行った。

2・6 試験体の測定

2・6・1 収縮歪の測定機器

カールソン型歪計（共和電業 CS 1 0 F）

カールソン型歪計（共和電業 CM-4 F）

2・6・2 導入力管理（ロードセルの歪）のための測定機器

ストレインゲージ（共和電業 KFC-5-C-1 1）

ストレインメーター（共和電業 SM 6 0 A T）

スイッチボックス（共和電業 KFC 5 C 1 1）

PC版の収縮歪の測定は、試験体センターに埋め込まれたカールソン型歪計で、 10^{-6} まで測定。

2・6・3 測定日

コンクリート打設時より、蒸気養生中も含め応力導入後まで、1時間ごとに歪測定を行った。

脱型後、一週間毎日、1ヶ月毎週2回、3ヶ月間毎週一回、6ヶ月間月に2度、後月1回測定。

3 予備試験及び付加試験

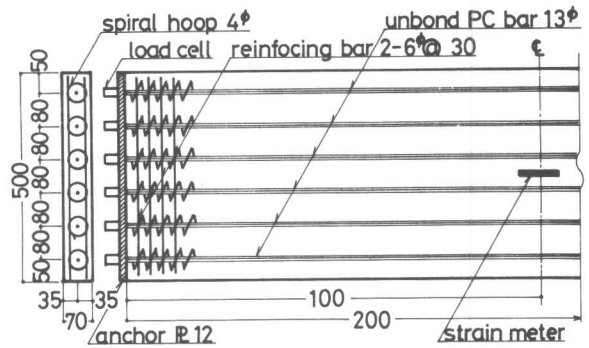
3・1 ロードセルのキャリブレーション

ゲージ4枚のアクティブ・ダミー法により測定体とダミーを近接させ、ホイートストンブリッジの相寄る辺に入れ、温度変化を補償した。尚キャリブレーションは、36個全て実施した。

3・2 圧縮強度試験・弾性係数試験

圧縮強度試験用供試体（ $\phi 10 \times 20$ cm）を15体採取した。（表3参照）

圧縮強度試験と平行して、コンプレッソメータにより弾性係数を測定した。（表3参照）



◎ 乾燥収縮測定用版は、形状、寸法、歪計位置の等しい無配筋版とした。

図1 配筋図（上図）

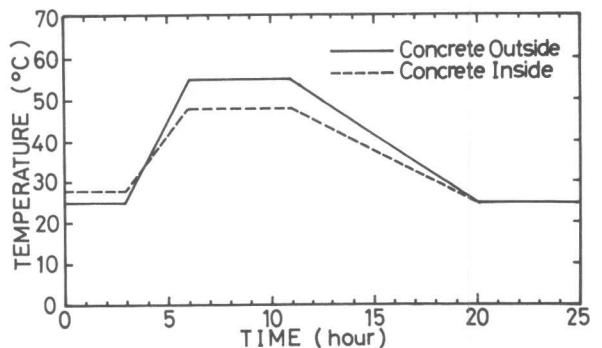


図2 蒸気養生 温度推移グラフ（上図）

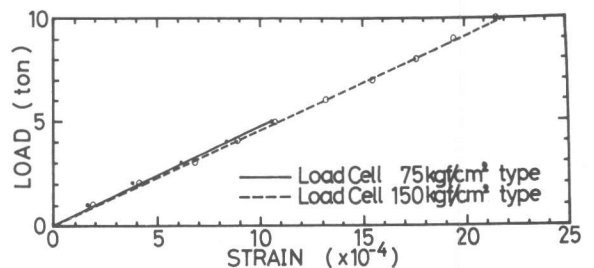


図3 ロードセルキャリブレーション（上図）

表3 圧縮強度試験、弾性係数測定結果（平均値）

材令 (日)	単位容積重量 (kg/ℓ)	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 ($\times 10^5$)	建築学会規準書 による計算値
1	2.43	431	2.96	3.35
3	2.41	461	3.11	3.43
7	2.43	538	3.52	3.75
14	2.41	616	3.75	3.95
28	2.15	611	3.40	3.32

4 試験結果と考察

4・1 解析方法

本実験では、試験装置の関係から変化応力を受けるコンクリートのクリープ試験となっている。そこで、応力減退を考慮した軸方向総歪量 ϵ_t (材令 t)は、下記の式となる。⁴⁾

$$\epsilon_t = \frac{P - \Delta Pt}{E_c A_c} + \frac{P}{E_c A_c} \varphi_t - \frac{1}{E_c A_c} \int_0^t \Delta Pt \frac{d\varphi_t}{dt} dt + S_t \quad \dots\dots\dots (1)$$

ϵ_t (軸方向総歪量), E_c (コンクリートの弾性係数), A_c (コンクリートの断面積), P (導入応力), ΔPt (時間 t までの導入応力減退量), S_t (材令 t 時の乾燥収縮歪量), φ_t (コンクリートのクリープ係数)
 ここで、 $d(\Delta P) / \Delta Pt = d\varphi / \varphi_t$, $P / E_c A_c = \epsilon_e$, $\epsilon_e \varphi_t = \epsilon_{ct}$, $P - \Delta Pt = P_t$, $E_c = E_{28}$ として(1)式を変形すると、

$$\epsilon_{ct} = (\epsilon_t - S_t - \epsilon_e + \frac{P - P_t}{E_{28}}) \times (\frac{2P}{P + P_t}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 ϵ_e (導入時弾性歪), ϵ_{ct} (クリープ歪)、 E_{28} (28日時弾性係数)
 $\varphi_t = \epsilon_{ct} / \epsilon_e \quad \dots\dots\dots (3)$

(2)式により求めたクリープ歪と載荷日数の関係を、一般に使用されている双曲線式(4)式を適用する。

$$\epsilon_{ct} = t / (A + B t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\epsilon_{cn} = 1 / B \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\varphi_n = \epsilon_{cn} / \epsilon_e \quad \dots\dots\dots (6)$$

最終クリープ歪(ϵ_{cn}), クリープ係数最終値(φ_n), 定数(A, B)を測定値から最小二乗法により求めた結果を表4に示す。

4・2 最終全歪

材令と全歪の関係は、クリープ歪と同様に双曲線式(7)で表現される。

$$\epsilon_t = t / (A + B t) + \epsilon_e \quad \dots\dots (7)$$

$$\epsilon_n = 1 / B + \epsilon_e \quad \dots\dots\dots (8)$$

最小二乗法により、A, Bを求め、最終全歪を求めた結果を表4に示す。

4・3 有効プレストレス力の推定

導入応力の減退量についても双曲線式(9)を使用し、有効プレストレス力最終値(P_n / A_c)を求める。

$$\Delta Pt / A_c = t / (A + B t) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$P_t / A_c = P / A_c - \Delta Pt / A_c \quad \dots\dots\dots (10)$$

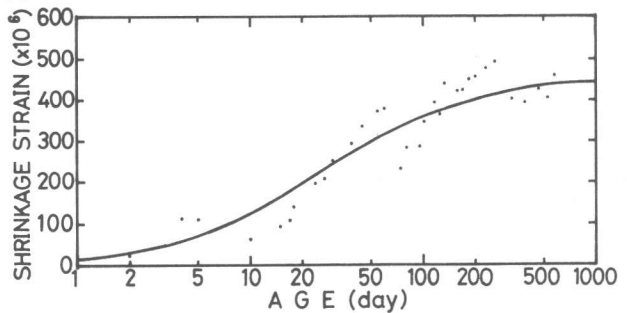


図4 乾燥収縮歪と材令の関係(上図)

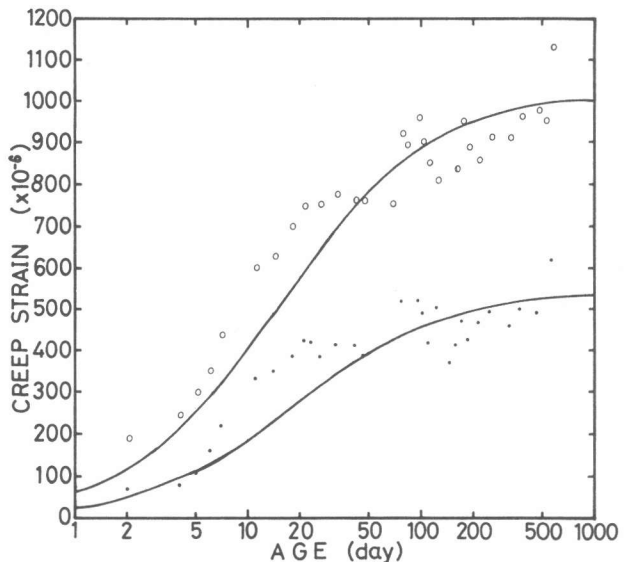


図5 クリープ歪と材令の関係(上図)

表4 実験測定値及び計算結果の最終推定値一覧表

導入プレストレス P/A_c (kg/cm^2)	有効プレストレス P_n/A_c (kg/cm^2)	初期弾性歪 $\epsilon_e (\times 10^{-6})$	最終弾性歪 $\epsilon_{en} (\times 10^{-6})$	全歪 $\epsilon_n (\times 10^{-6})$	乾燥収縮歪 $S_n (\times 10^{-6})$	クリープ歪 $\epsilon_{cn} (\times 10^{-6})$	有効率 $\eta (\%)$	クリープ係数 φ_n
75	43.7	326	234	1089	452	543	58	1.67
150	104.8	858	725	2029	452	1022	70	1.19

最小二乗法により求めた結果を表4に示す。

4・4 有効プレストレス力最終値（実験値）と理論値の比較

実験より求めたクリープ係数 φ_n を、建築学会の応力減退計算式に適用して求めた有効プレストレス力最終値と、ロードセルによって測定した実験値を比較する。⁵⁾

$$P_n = P' - r \{ P' + (1 - r) (D_s \cdot S_n / \varphi_n + \Delta S_n / \varphi_n / h) / r \} \varphi_n \dots\dots\dots (11)$$

$$P' = P - \Delta P_n = P \{ 1 - \psi_n (1 - r) \} \dots\dots\dots (12)$$

ψ_n (PC鋼材レラクセーション係数 0.03), ΔS_n (乾燥収縮差最終値 0), h (断面の全せい7cm)

$D_s (=E_s A_s)$, (11)式により計算した結果を表5に示す。

表5 有効率比較表

表5より、計算値と実験値の有効率は、ほぼ同じ値を示した。

また、建築学会規準値 $\varphi_n = 2.57$, $S_n = 321 \times 10^{-6}$ を用いて、 $P/A_c = 150 \text{ kg/cm}^2$ の場合計算すると $\eta = 59\%$ となった。

次に有効率の相違は、(11)式を変形すると、 $P_n = P' (1 - r\varphi_n) - (1 - r) D_s S_n$ となり、右辺の後半の値が一定であるので、 η が $(\Delta P_s / 26250 - \Delta P_s / 52500) \times 100 =$

P (kg)	φ_n	P_n (kg)	有効率 計算値	有効率 実験値
52500	1.19	37451	71	70
26250	1.19	15561	59	58
52500	1.67	34492	66	70
26250	1.67	14082	54	58

12%だけ、 $P/A_c = 75 \text{ kg/cm}^2$ の方が、小さくなるのは当然の結果であると言える。

4・5 乾燥収縮歪及びクリープ係数最終値の文献との比較

本実験条件に近い文献値を表6に示す。本実験のクリープ係数は、建築学会規準値より約50%小さく、西林らの実験値に近かった。乾燥収縮については、学会規準値や他の規準値と比べ150~200%程度大きくなっている。しかし、断面最小寸法が10cm程度と言うことを考慮すれば、妥当な値であると思われる。

4・6 結論

蒸気養生された高強度コンクリート薄肉版は、クリープ係数として、1.2前後であり、乾燥収縮も大きい。建築学会の応力減退計算式と実験測定値とは一致した。

表6 文献値との比較^{1)~3)}

コンクリート配合条件					28日 圧縮 強度 (kg/cm ²)	28日 弾性 係数 ($\times 10^5$ kg/cm ²)	試 験 体 寸 法 (cm)	試 験 体 養 生 条 件	載 荷 方 法 及 び 試 験 方 法	実 験 結 果			参 考 文 献
骨寸 材 最 大 (mm)	ス ラ ン プ (cm)	水 セ メ ン ト 比 (%)	単 位 セ メ ン ト 量 (kg/m ³)	単 位 容 積 重 量 (kg/m ³)						実 験 式	ク リ ー プ 係 数 φ_n	乾 燥 収 縮 S_n ($\times 10^{-6}$)	
20	0~3	3.5	420	2438	611	3.40	7×50 ×200	打設後8時間蒸気養生した後、材令1日で脱型	13φアンボンド鋼棒6本にて、アンカープレートを介して応力導入	$S_t = \frac{t \times 10^{-4}}{5.73 + 0.22t}$	1.67	452	本 実 験
										$\varphi_t = \frac{t}{1.29 + 0.84t}$	1.19		
25		3.5		2400	454	2.79	10×10×50 20×22×100	打設後3日で脱型した後空中養生		$S_t = \frac{t \times 10^{-4}}{10.7 + 0.23t}$		441	1)
										$S_t = \frac{t \times 10^{-4}}{20.6 + 0.83t}$		263	
25	6~8	5.8	319	2332	325	3.78	8×8 ×100	打設後1日で脱型後恒温室(20±1°C RH85~95%)にて空中養生	PC鋼棒を通し両端のアンカープレートにより応力導入。載荷材令は7日。尚1週毎に応力を一定とする。	$\varphi_t = \frac{t}{1.13 + 1.03t}$	0.97	400	3)
					345	3.53				$\varphi_t = \frac{t}{2.89 + 0.96t}$	1.04		
					343	3.58				$\varphi_t = \frac{t}{2.52 + 1.15t}$	0.96		
25	3.4	37.5	446	2403	434	3.46	10×10×50	打設後1月で脱型後恒温恒湿室	3分間練りませ、30~60秒振動締め	$S_t = \frac{t \times 10^{-4}}{0.47 + 0.25t}$		400	2)

参 考 文 献

- 1) 坂静雄, 六車 稔 “かた練りコンクリートの硬化収縮ひずみ”, セメント技術年報, XIV, 1960,
- 2) 大島久次, 池永博威 “高強度中練りコンクリートの収縮について”, コンクリートジャーナル, Vol.17, No.5,
- 3) 西林新蔵, 富沢年道, 兼田 郁: “コンクリートのクリープに関する2, 3の実験”, セメント技術年報, XXII, 1968,
- 4) 六車 稔 “プレストレストコンクリート”, コロナ社, 1976,
- 5) 日本建築学会編: “プレストレストコンクリート設計施工規準, 同解説”, 日本建築学会, 1975,