

論文

[1034] コンクリート部材のクリープ解析に関する研究

正会員 ○綾野 克紀 (岡山大学大学院)

正会員 阪田 憲次 (岡山大学工学部)

榎垣 智 (岡山大学大学院)

1. まえがき

コンクリート部材に作用する応力度は、クリープと乾燥収縮のために時間とともに変化する。クリープ、乾燥収縮といった時間に依存する変形をコンクリート構造物の設計に考慮するには、クリープひずみ、乾燥収縮ひずみの的確な予測式の確立とともに、これらの変形を考慮した解析方法の選択が必要となる。クリープ解析法には、EM法、RC法、TB法など様々な解析手法¹⁾がある。これらの解析手法とクリープ予測式とは密接な関係があり、用いる解析方法によっては、優れた予測式であっても用いることのできない場合がある。これは各種解析法において、クリープ解析を行う上で種々の仮定が存在するためである。また、種々のクリープ、乾燥収縮ひずみ予測式が提案されているが、この種のひずみを完全に表現しうる予測式は確立されているとは言えない。従って、土木学会「コンクリート標準示方書」にもこの種のひずみは原則として実験により求めるよう指示されている。しかし、実験によりこの種のひずみを求めようとする場合、時間的、経済的制約により選択できるクリープ解析法は限られてくる。

そこで本研究では、コンクリートに作用する内部応力がクリープ、乾燥収縮のために減少する状態において、各種解析法に基づくコンクリートひずみの計算値と実験値との比較を行う。そして、応力履歴を考慮することのできない解析法ではあるが、計算式が線形式となること、解析に用いるクリープ曲線を実験より求める場合、必要なクリープ曲線は1本であることから他の解析手法と比較して実用的な解析手法であると思われるEM法の妥当性を検討する。

2. 各種解析に基づく計算値と実験値との比較

現在提案されているクリープ解析法のうち、いかなる予測式をも用いることのできるクリープ解析法にはEM法、TB法、RC法および逐次法¹⁾がある。これらクリープ解析法の違いを示せば以下のようになる。

EM法：クリープの影響を弾性係数の減少でとらえ、載荷開始時材令から変化する応力度が既に載荷開始時材令において載荷されているとする方法。

TB法：EM法同様にクリープの影響を弾性係数の減少でとらえるが、載荷開始時材令から任意材令までの応力変化を材令係数を用いて考慮し、載荷開始時材令から変化する応力度に材令係数をかけた値が載荷開始時材令において載荷されているとする方法。

RC法：クリープひずみの増加割合が載荷開始時材令によらず任意材令で等しいとし、任意材令においてひずみの増加量のつりあい式と力のつりあい式により解析を行う方法。

逐次法：載荷開始時材令から任意材令までを微小な時間区分に分け、各時間区分内での応力度の増分、または減分をクリープの重ね合わせ則に基づき解析を行う方法。

クリープ、乾燥収縮ひずみの予測式に著者らの提案する予測式^{2),3)}、ACI-209の予測式およびCEB/FIP-78の予測式を用いて、EM法、RC法、TB法および逐次法に基づく任意材令における総ひず

み(弾性ひずみ+クリープひずみ+乾燥収縮ひずみ)の計算結果を図-1~図-4に示す。なお、比較には参考文献⁴⁾に示す研究者らによって行われた実験結果を用いた。これらの概要を表-1に示す。

これらの図よりコンクリートの内部応力度がクリープ、乾燥収縮によって減少する場合において、解析法の違いによる計算結果の差はあまりないことがわかる。また、クリープ解析に、いずれのクリープ、乾燥収縮予測式を用いても比較的実験値とよく一致していると言える。

表-1 供試体設計条件

σ_c (kgf/cm ²)	載荷時 材令	鉄筋比 (%)	$\frac{f'_c}{\sigma_c}$
363	4 days	0.31	0.10
349			0.20
349			0.35
353	3 days		0.45
353			0.35
355			0.45

f'_c : 初期導入応力
 σ_c : 載荷時圧縮強度
 断面寸法 : 20×35×210 (cm)
 セメントの種類 : 早強ホルトランドセメント

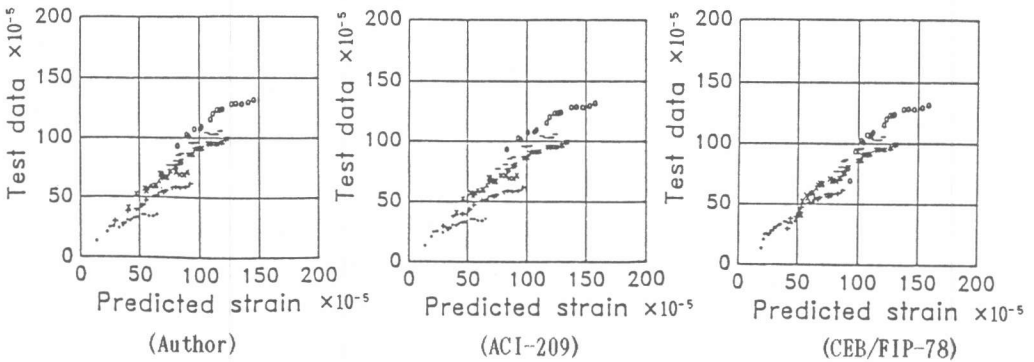


図-1 EM法に基づく解析結果

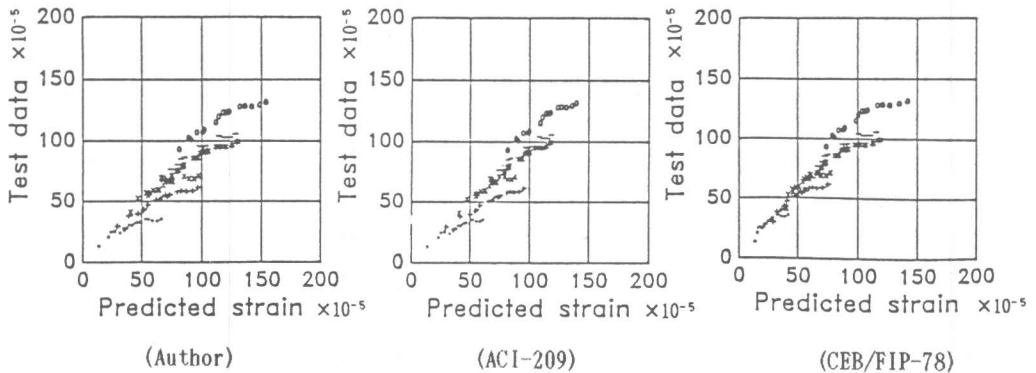


図-2 RC法に基づく解析結果

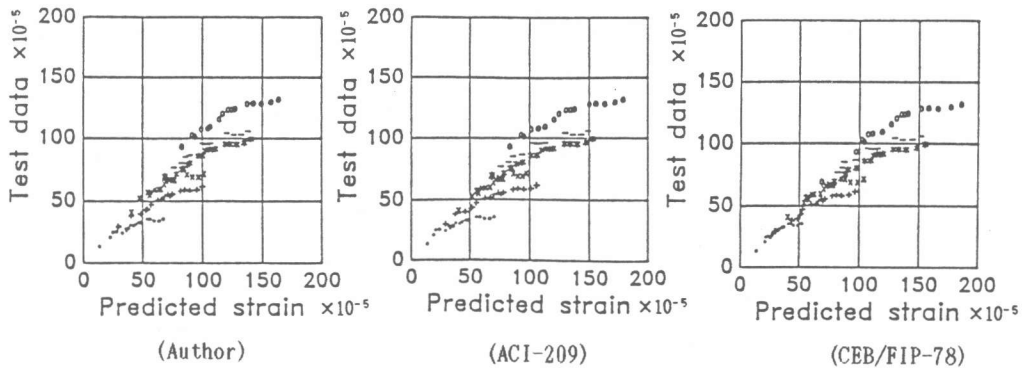


図-3 T B法に基づく解析結果

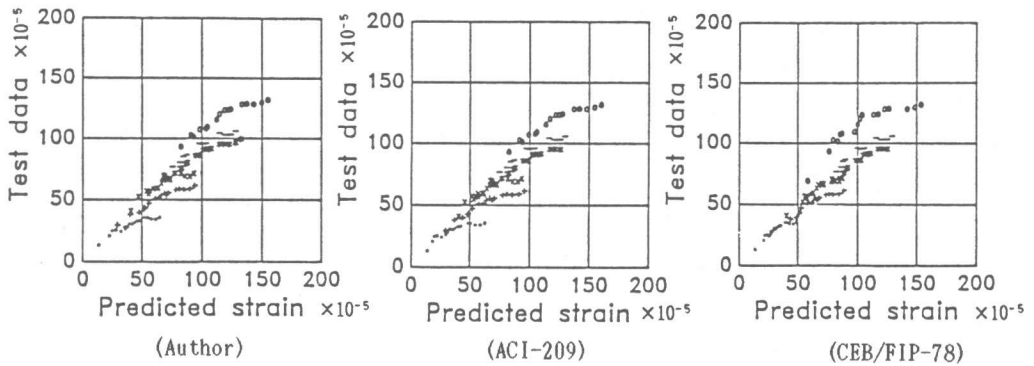


図-4 逐次法に基づく解析結果

3. 実験概要およびEM法による計算概要

1). 実験概要

本実験はコンクリート供試体の内部拘束を遠え、クリープ、乾燥収縮ひずみによりコンクリートの内部応力度が減少するもとのコンクリートの経時的なひずみの進行を測定する。実験要因は載荷時材令および供試体の内部拘束条件である。測定は温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $70 \pm 5\%$ の恒温室内で行った。ひずみの測定には最小目盛 5×10^{-6} のホイットモア式ひずみ計を用いた。表-1に示方配合を示す。

表-1 配合表

W / C	単 位 量 (kg/m ³)				A i r (%)	S l u m p (cm)
	C	W	S	G		
52.6	380	200	774	1008	2.0	17 ± 1

測定用供試体を図-5～図-7に示す。拘束条件を以下のように設定し、コンクリートの内部応力度の減少状態を想定する。また、乾燥開始時材令と載荷開始時材令は同じ材令で行った。

1) シリーズ1；図-6に示す供試体を用いる。プレストレスの初期導入を行った後、再導入を行わず、プレストレス力の減少によりコンクリートの応力減少状態を想定する。載荷開始時材令は3日、7日、14日、28日である。

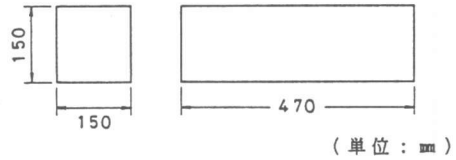


図-5 乾燥収縮ひずみ測定用供試体

2) シリーズ2；図-7の供試体を用いる。プレストレス力を一定にし、鉄筋のひずみによる応力再分配によってコンクリートの応力減少状態を想定する。載荷開始時材令は14日と28日である。

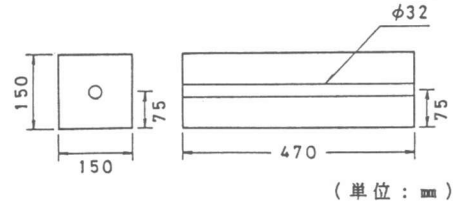


図-6 シリーズ1、クリープひずみ測定用供試体

3) シリーズ3；図-7の供試体を用いる。プレストレス初期導入後再導入は行わず、プレストレス力の減少と鉄筋のひずみによる応力再分配によってコンクリートに作用する応力度の減少状態を想定する。載荷開始時材令は14日と28日である。

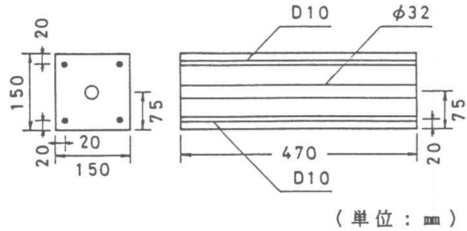


図-7 シリーズ2、3用供試体

また、コントロール用に、図-5の供試体より乾燥収縮ひずみを、図-6の供試体を用いてクリープ係数を求めた。

2). EM法による任意材令のコンクリートひずみの計算方法

コンクリートに作用する応力度が連続的に変化する場合、クリープの重ね合わせ則を適用すれば、任意材令におけるコンクリートのひずみは次式より求まる。

$$\epsilon(t) = \frac{1+\phi(t, t_0)}{E(t_0)} \sigma(t_0) + \int \frac{\delta \sigma(t')}{\delta t'} \frac{1+\phi(t, t')}{E(t')} dt' + \epsilon_{sh}(t, t_0) \quad \text{---- (1)}$$

EM法では載荷開始時材令から変化する応力度が既に載荷開始時材令において載荷されていると考えるため(1)式は(2)式のようになる。

$$\epsilon(t) = \frac{1+\phi(t, t_0)}{E(t_0)} \sigma(t_0) + \Delta \sigma(t) \frac{1+\phi(t, t_0)}{E(t_0)} + \epsilon_{sh}(t, t_0) \quad \text{---- (2)}$$

$$\Delta \sigma(t) = \sigma(t) - \sigma(t_0)$$

ここに、

- $\epsilon(t)$; 任意材令 t におけるコンクリートのひずみ
- $E(t_0), E(t')$; それぞれ材令 t_0, t' におけるコンクリートの弾性係数
- $\sigma(t_0), \sigma(t')$; それぞれ材令 t_0, t' におけるコンクリートに作用する応力度
- $\phi(t, t_0), \phi(t, t')$; それぞれ材令 t_0, t' に初載荷されたコンクリートのクリープ係数
- $\epsilon_{sh}(t, t_0)$; 材令 t_0 に乾燥を開始させた場合の乾燥収縮ひずみ

である。

シリーズ1、シリーズ2、シリーズ3の任意材令における初期ひずみからのひずみの増分はそれぞれ、(3)式、(4)式、(5)式となる。

$$\Delta \epsilon(t) = \frac{\epsilon_0 \phi + \epsilon_{sh}(t, t_0)}{1 + n_p \rho_p (1 + \phi(t, t_0))} \ell / \ell_L \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$\Delta \epsilon(t) = \frac{\epsilon_0 \phi + \epsilon_{sh}(t, t_0)}{1 + n_s \rho_s (1 + \phi(t, t_0))} \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$\Delta \epsilon(t) = \frac{\epsilon_0 \phi + \epsilon_{sh}(t, t_0)}{1 + (n_s \rho_s + n_p \rho_p \ell / \ell_L) (1 + \phi(t, t_0))} \quad \text{-----} \quad (5)$$

ここに、

- n_p ; E_p/E_c , n_s ; E_s/E_c
- E_p ; プレストレス鋼の弾性係数 ($2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)
- E_s ; 鉄筋の弾性係数 ($2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)
- E_c ; 載荷時のコンクリートの弾性係数
- ρ_p ; (プレストレス鋼の断面積) / (コンクリートの断面積)
- ρ_s ; (鉄筋の断面積) / (コンクリートの断面積)
- ϵ_0 ; 初期弾性ひずみ
- ℓ ; コンクリート供試体の長さ (47cm)
- ℓ_L ; プレストレス鋼の定着点間の距離 (53cm)

である。

3). EM法による計算結果の妥当性

図-8に、実験値と実験より求めたクリープ、乾燥収縮ひずみを用いてEM法に基づき計算を行った結果との対比図を載せる。EM法に基づく計算値がコンクリートの弾性ひずみからのひずみ増加を十分に表すことが可能であることがわかる。図-9～図-11にクリープ解析にクリープ、乾燥収縮ひずみに各種クリープ、乾燥収縮ひずみ予測式を用いた場合の計算値と実験データとの比較を示す。ACI-209とCEB/FIP-78のクリープ、乾燥収縮ひずみ予測式を用いたEM法の計算結果が実験値を過小に評価している。ACI-209の乾燥収縮ひずみ予測式は比較的实验値と合うがクリープ予測式は過小ひずみにクリープひずみを評価し、CEB/FIP-78のクリープ予測式は比較的实验値と合うが乾燥収縮ひずみ予測式は過小ひずみに乾燥収縮ひずみを評価する。クリープ、乾燥収縮といった時間に依存する変形をコンクリート構造物の設計に考慮するには、無筋コンクリートのクリープ、乾燥収縮ひずみの正確な把握が重要な要諦となる。

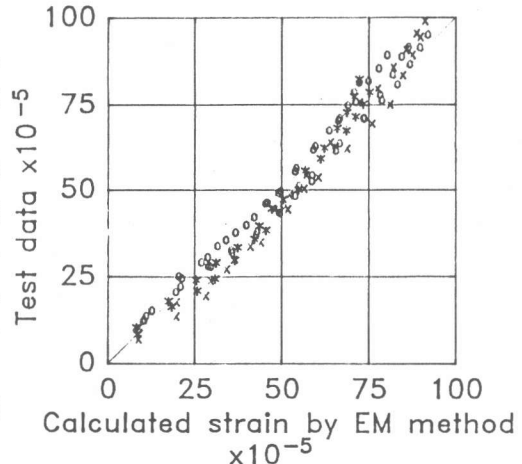


図-8 実験より求めたクリープ、乾燥収縮ひずみを用いEM法に基づく計算を行った結果と実験値の対比

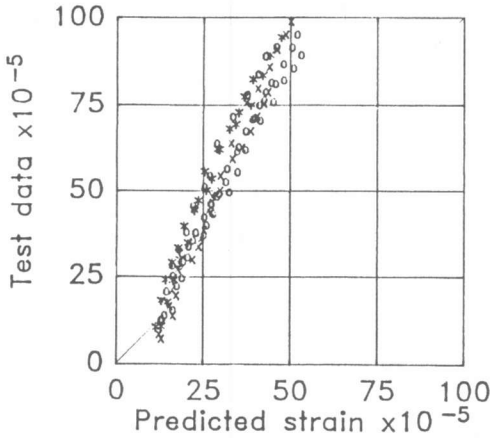


図-9 予測式にCEB/FIP-78の予測式を用いた場合

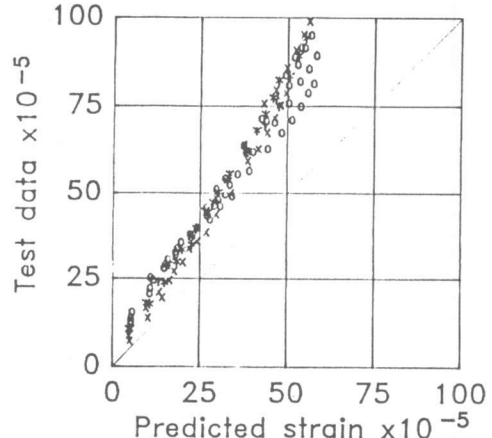


図-10 予測式にACI-209の予測式を用いた場合

5. まとめ

クリープ、乾燥収縮ひずみにより、コンクリートの内部応力度が減少する下で、EM法、TB法、RC法、逐次法による計算結果と実験結果との比較を行い、クリープ解析法の違いによる計算結果にあまり差がないこと、実験により求めたクリープ、乾燥収縮ひずみを用いたEM法に基づく計算結果がひずみの進行を十分に表わすことを示した。

EM法では荷重開始時材令から変化する応力度が既に荷重開始時材令において荷重されていると考えるため応力履歴を考慮することのできない解析手法とされているがクリープ、乾燥収縮が原因となり、コンクリートの内部応力が変化する下でのひずみの進行を計算するには十分実

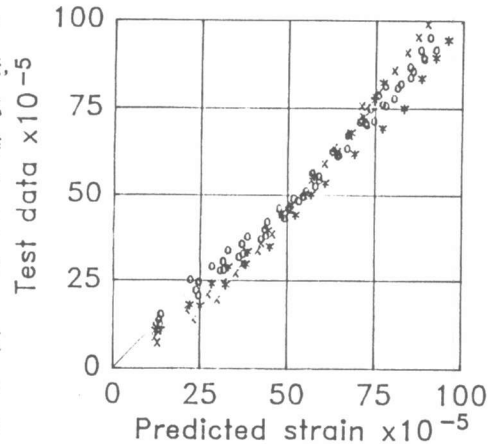


図-11 予測式に著者らの予測式を用いた場合

参考文献

- 1) A. M. Neville, W. H. Diger, J. J. Brooks: Creep of plain and structural concrete, Construction Press, pp. 246~pp. 263, 1983
- 2) 阪田憲次, 綾野克紀, 廣村治: コンクリートのクリープひずみの予測式の提案, コンクリート工学年次論文報告集, 日本コンクリート工学協会, 第10巻, 第2号, pp271~276, 1988
- 3) 阪田憲次, 綾野克紀, 廣村治: コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式の提案, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集第5部, 社団法人土木学会, pp16~17, 1988
- 4) 竹内研一, 大庭光尚, 米内昭夫: PRC桁の応力度算定に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 日本コンクリート工学協会, 第10巻, 第3号, pp17~22, 1988