

正会員 ○ 宮川 邦彦 (九州産業大学)

同上 渡辺 明 (九州工業大学)

1 まえがき

コンクリートは低応力状態においても大きな時間依存変形を生じる非弾性材料であり、しかも、変形特性が使用材料、配合などの要因だけでなく、施工場所の環境条件にも支配されるため、その値を一義的に定め得ない特異な材料である。このようなコンクリートと許容値以下の応力ではほぼ弾性状態で材質の安定した鋼材とを複合化したRC部材やPC部材を設計する際には、特にコンクリートの時間依存変形がそれら部材全体の力学性状に及ぼす影響について十分考慮すべきである。

コンクリートの時間依存変形がPC部材の力学性状に及ぼす影響については、これまでに数多くの解析手法が提案されてきたが、その大半はDishingerの微分方程式を展開したものである。だが、それらの解析式は微分方程式を展開する際、実際のコンクリートの変形特性とは多少相違する仮定を用いなければならないため、部材内部で生じる時間依存変化を満足に表示できない場合もある。

ここに提案するクリープ解析法は従来のそれらとは異なり、ブレンコンクリートのクリープ解析に用いた力学モデル(応力平衡化回転モデル)をさらにPC部材のそれに適用したものである。ただし、同モデルによるブレンコンクリートのクリープ解析は定性的にはその性状を表示し得るが、モデル要素値にまだ多くの疑問点を有しており、今後モデル要素値の決定には実測結果との十分な比較検討を行なわねばならないと考えている。しかしながら、同モデルは現在のクリープ解析における重要課題としての遅延弾性変形(回復クリープ)や載荷材令の違いによるクリープ曲線形状の相違をほぼ妥当に表示し得る。それゆえ、本解析法は、前記のそれらと比較して、部材内部で生じる時間依存変化をよりの確に表示でき、しかもその数値計算が簡単であるため、時間依存変形が特に重要視される部材のクリープ解析には有用であろうと考える。

2 応力平衡化回転モデル

筆者らはクリープの成分である遅延弾性変形に関する基礎的研究から、同変形の発生機構がコンクリートを構成する骨材粒子とセメントペーストとの弾性係数差に起因するもので、このような二相材料が持続荷重を受ける場合、その内部各相の応力ひずみ状態が時間の経過に伴って変化し、載荷直後のひずみ一定状態から最終時の応力一定状態へと除除に移行するであろうと考えるに至った。

図-1はこのような遅延弾性変形の過渡現象を表示する目的で考案した力学モデルであり、図中に示すモデル要素値を用いれば上記の二相材料内部で生じる時間依存性の現象を表示できる。コンクリートのクリープ解析を目的とした力学モデルはこれまでに数多くのもが考案されてきたが、ここに示す応力平衡化回転モデルは従来のそれらとは異なり、変形要因の一つである各相の容積割合を表わすため、モデル要素として新たに腕の長さを組み入れた新しい力学モデルである。だが、若材令で載荷されたコンクリートのクリープはその大半が非回復性の変形成分であるため、クリープ全体を解析するモデルとして、筆者らは図-1の力学モデルを図-2のよう

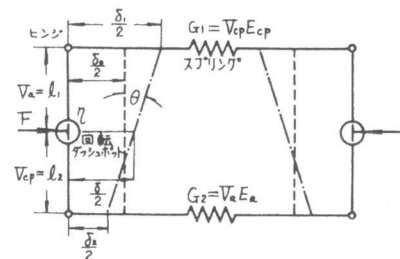


図-1 応力平衡化回転モデル(基本モデル)

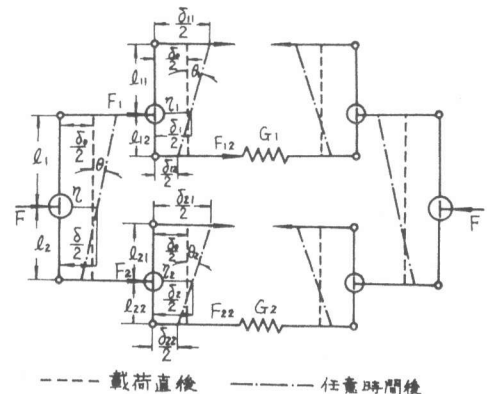


図-2 応力平衡化回転モデル

な粘性流動成分を含む力学モデルに改良した。

### 3 モデル要素値とブレンコンクリートのクリーブ解析例

本研究に際し、ブレンコンクリートの力学モデルの要素値を決定するため、6配合の水中養生条件下におけるコンクリート（単位水量 190 kg/m<sup>3</sup>、細骨材率 42%、水セメント比 40～60%）および同配合のセメントペーストに対するブリージング率、動弾性係数の材令変化、ならびに水セメント比 52% のコンクリートに対するクリーブ曲線を実測した。これらの実験結果を基にして、モデル要素値を下記のように決定した。

$$V_{cp} = l_2 = l_{11} + l_{12} \quad V_a = l_1 = l_{21} + l_{22}$$

$$l_{11} = \frac{(0.129 + 0.741W/C)Tl_2}{(-5.47 + 14.5W/C) + (0.129 + 0.741W/C)T}$$

$$l_{21} = \frac{(0.133 + 0.130W/C)Tl_1}{(-0.312 + 1.10W/C) + (0.133 + 0.130W/C)T}$$

$$E_{cp} = 10^5 / (0.129 + 0.741W/C) \quad \text{kg/cm}^2$$

$$E_a = 10^5 / (0.133 + 0.130W/C) \quad \text{kg/cm}^2$$

$$\eta = 1.0 G_1 \quad \eta_1 = 0.2 G_1 \quad \eta_2 = 10.0 G_1$$

(注) W/C : 水セメント比 ... %単位ではなくそのままの値

T : 日単位のコンクリート材令

$l_{11}$  : 求めようとする材令におけるセメントペースト部の有効容積割合

$l_{21}$  : 求めようとする材令における骨材部の有効容積割合

$\eta, \eta_1, \eta_2$  : 実測クリーブ曲線から推定した日単位の粘性係数

ここに、 $E_{cp}$ 、 $E_a$  : セメントペーストの動弾性係数の最終値および骨材の見掛弾性係数の最終値、 $V_{cp}$ 、 $V_a$  : ブリージングの影響を考慮して求めたセメントペーストおよび骨材の容積割合を表わす。

なお、骨材の見掛弾性係数 ( $E_a$ ) は、コンクリートおよびセメントペーストの実測弾性係数を用い、下記のひずみ一定状態に対する式から逆算した値である。

$$E_c = V_{cp} E_{cp} + V_a E_a$$

ここに、 $E_c$  : コンクリートの動弾性係数

以上のモデル要素値を用い、図-2の力学モデルから求めた水セメント比 52% のコンクリートに対する単位ひずみ解析曲線の一例を図-3に示す。図中の実線は持続荷重を一定期間載荷した後、その荷重を除去した時の単位ひずみ曲線を、破線および一点鎖線は一定荷重まで段階的に載荷した時のそれを示す。

図示するように同モデルによるコンクリートの単位ひずみ曲線は種々な荷重条件下でもそのひずみを表示しうる。なお、本解析における載荷材令 5 日のクリーブ係数は  $\phi = 1.53$  であった。

軸方向鉄筋を有する PC 部材のクリーブ解析には、図-2のモデルに軸方向鉄筋を表わすスプリング ( $G_s$ ) および PC 鋼材を表わすスプリング ( $G_p$ ) を加えた図-5のモデルを用いばよい。ただし、コンクリート断面および軸方向鉄筋が対称で、PC 鋼材がその部材図心に作用する場合には、コンクリート、軸方向鉄筋ならびに PC 鋼材の時間経過に伴うひずみ変化が等しいため、バネ定数  $G_s$ 、 $G_p$  は次式で求められる。

$$G_s = (A_s + A'_s) E_s / A_c = Z_1 E_s \quad G_p = A_p E_p / A_c = Z_2 E_p$$

ここに、 $E_s$ 、 $E_p$  : 軸方向鉄筋および PC 鋼材の弾性係数 を表わす。

なお、解析計算においては  $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、 $E_p = 2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  を用いた。

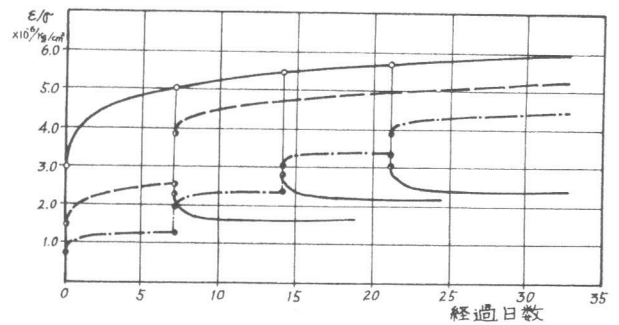


図-3 ブレンコンクリートのクリーブ解析例

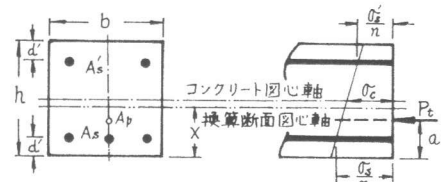


図-4 PC部材の断面

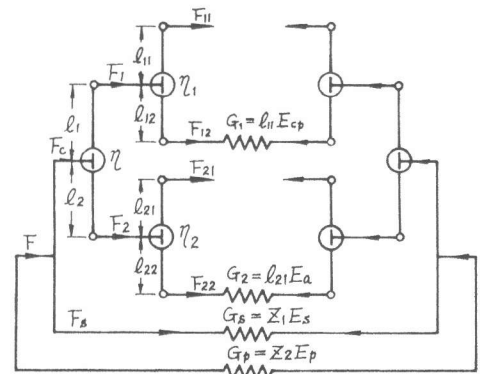


図-5 PC部材を表わす力学モデル

だが、一般的なPC部材、すなわち、コンクリート断面あるいは軸方向鉄筋が非対称でPC鋼材が偏心している場合には、部材断面にひずみ勾配を生じるため、その影響を考慮してバネ定数  $G_s$ 、 $G_p$  を求めなければならない。このときのバネ定数は次式で求められる。(図-4 参照)

$$G_s = (W_2 A'_s + W_3 A_s) E_s / W_1 A_c = Z_1 E_s$$

$$G_p = W_4 A_p E_p / W_1 A_c = Z_2 E_p$$

ここに、 $W_1 = \{ 1/A_i + (X-a)(X-h/2)/I_i \}$

$$W_2 = \{ 1/A_i + (X-a)(X-h+d')/I_i \}$$

$$W_3 = \{ 1/A_i + (X-a)(X-d')/I_i \}$$

$$W_4 = \{ 1/A_i + (X-a)^2/I_i \}$$

$A_i$ 、 $I_i$  : 換算断面の断面積および断面2次モーメント

#### 4 数値解析法と解析例

図-4 に示すPC部材を力学モデルに置き換えてクリーブ解析するためには、プレストレス導入後の任意時間  $t$  においてモデルに作用する力 ( $F$ ) を

$$F = P_t / A_c = \sigma_c + (\sigma'_s A'_s + \sigma_s A_s) / A_c = F_c + F_s$$

$$F_c = \sigma_c = W_1 P_t \quad F_s = (\sigma'_s A'_s + \sigma_s A_s) / A_c = n P_t (W_2 A'_s + W_3 A_s) / A_c$$

とすれば、セメントペーストを表わすスプリング ( $G_1$ ) に作用する力  $F_1$  および軸方向鉄筋を表わすスプリング ( $G_s$ ) に作用する力  $F_s$  は、任意時間  $t$  において

$$F_1 = A_1 e^{\varphi_1 t} + A_2 e^{\varphi_2 t} \quad F_s = \alpha P_i + B_1 e^{\varphi_1 t} + B_2 e^{\varphi_2 t}$$

となる。ここに  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $\alpha$  : 境界条件から求まる定数、 $P_i$  : PC鋼材の初期プレストレス力

また、そのときのコンクリート図心軸位置における部材のひずみ ( $\epsilon_c$ ) および有効プレストレス力 ( $P_t$ ) は、

$$\epsilon_c = F_s / G_s \quad P_t = P_i - \epsilon_c G_p$$

で求めることができる。

ただし、コンクリートの変形特性値はセメントペーストの水和反応過程で変化するため、上記のモデル解析においてもその要素値が時間関数であるとして解析すべきであるが、直接解析することは困難であるため、時間間隔を区切り各間隔の midpoint における要素値がその間隔内で一定であるとして、step-by-step 法により数値解析した。また、換算断面の図心軸位置 ( $X$ ) や弾性係数比 ( $n$ ) の値も時間の関数であるためこのことを考慮して軸方向鉄筋およびPC鋼材を表わすバネ定数  $G_s$ 、 $G_p$  の値も各時間間隔で変化させた。以下に軸方向鉄筋を有するPC部材の解析例を図-6、7 に示す。なお、解析に用いたコンクリートの配合は前記の解析例と同様、水セメント比52%である。

図-6 にコンクリート断面および軸方向鉄筋が対称で、PC鋼材がその部材図心にあるときの解析例を示す。図示するように軸方向鉄筋量の増加に伴い、部材軸方向のひずみ ( $\epsilon_c$ ) は明らかに減少し、有効係数 ( $\xi$ ) は増加する。

図-7 は非対称部材の解析例である。図示す

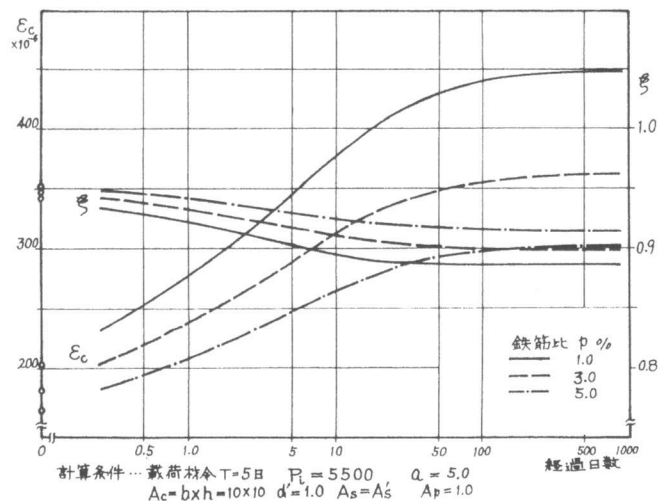


図-6 対称PC部材のクリーブ解析例

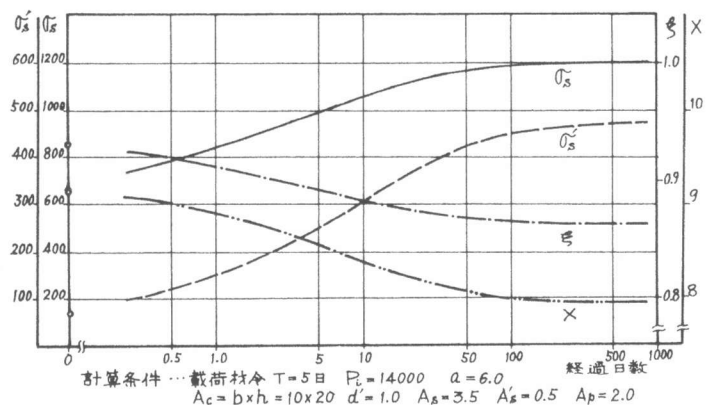


図-7 非対称PC部材のクリーブ解析例

るように非対称部材の場合、換算断面の図心位置（ $X$ ）が日時の経過に伴って変化するため、正負鉄筋の応力度（ $\sigma_s$ 、 $\sigma'_s$ ）および有効係数（ $\xi$ ）の値もその影響を受ける。

上記の解析例に見られるように軸方向鉄筋を有するPC部材では、コンクリートのクリープによる部材軸方向のひずみを減少させることができる。また、部材が非対称性になるほど、換算断面の図心軸位置の時間変化も大きくなり、このような部材では図心軸の移動に伴う部材内部応力の変化を設計計算に考慮すべきである。逆に、PC部材のそりやたわみの時間的変化を減少させるような軸方向鉄筋の配筋方法もこのような解析法を用いれば求めることができる。

なお、本解析の場合、コンクリートの乾燥収縮を考慮しなかったが、この問題に関しては現在検討中である。また、部材自重による曲げモーメントも解析計算では省略したが、この点に関しては前記の係数 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  および $W_4$  にその影響を考慮すれば、同じモデルで解析できる。

あとがき

以上、軸方向鉄筋を有するPC部材のクリープ解析法として、力学モデルによる解析手法について簡単に述べてきたが、その結果を下記に要約する。

- (1) 筆者らの提案する応力平衡化回転モデル（図-2）はコンクリートのクリープ性状をほぼ満足に表示することができる。
- (2) 同モデルは軸方向鉄筋を有するコンクリート部材のクリープ解析にも応用できる。
- (3) PC部材は軸方向鉄筋量あるいはその配筋方法で部材の変形状やその内部応力状態が相違する。
- (4) 軸方向鉄筋を有する非対称PC部材の換算断面図心軸は時間的に変化する。

コンクリート部材はその使用用途の拡大に伴い、単に部材耐力の安全性だけでなく、今日ではその形状寸法の施工精度確保をも要求されることがある。特に現場施工の省力化を目的としたコンクリート部材のプレキャスト化が急速に進行しつつある現在、コンクリートの時間依存変形による部材のそりやたわみの増加はその施工精度に影響するだけでなく、構造物全体の耐力にも大きな影響を及ぼす。このような問題を解決するためにもコンクリート部材の時間依存性をより正確に求め得るような解析法を確立すべきであろう。本研究に用いた力学モデルは前記したようにまだその要素値に多くの疑問点を有するが、RC部材やPC部材のクリープ解析にも応用できるため、従来の力学モデルと比較して多くの有利性を有するものと考ええる。

参考文献

1. Neville A. M. : Creep of Concrete: Plain, Reinforced, and Prestressed, North Holland
2. A. E. Brooks and K. Newman : The Structure of Concrete, Cement and Concrete association
3. 宮川, 渡辺 : 新力学モデルの提案とそれによるコンクリートの遅延弾性現象の解析, コンクリート工学 Vol 15 No 4
4. 鹿島出版会 : コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮