

# P R C 部材の長期変形・応力に関する研究

手塚正道<sup>1</sup>・佐藤良一<sup>2</sup>・山本浩嗣<sup>3</sup>・鳥取誠一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 オリエンタル建設(株)技術研究所(〒321-4367 栃木県真岡市鬼怒ヶ丘5)  
(宇都宮大学大学院工学研究科博士後期課程)

<sup>2</sup>正会員 工博 宇都宮大学 工学部 建設学科(〒321-8585 栃木県宇都宮市石井町2753)

<sup>3</sup>正会員 住友建設(株)土木本部土木設計部(〒160-0007 東京都新宿区荒木町14)

<sup>4</sup>正会員 (財)鉄道総合技術研究所(〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38)

本研究では、プレストレス導入直後から段階的に増加する持続荷重を受けるP R C部材の変形および応力を任意の材齢まで連続的に取り扱える重ね合わせの原理に基づくクリープ解析方法を提示した。併せて、持続荷重による載荷でひび割れを発生させ、その後2段階に持続荷重が増大した場合のP R C部材の変形挙動を実験的に明らかにすると共に、提示したクリープ解析の検証を行った。その結果、提示したクリープ解析方法は変形、圧縮ひずみ、鉄筋ひずみの挙動をかなりよい精度で評価していることが認められた。しかし、導入プレストレス量が大きい場合や増大された持続荷重下では平均曲率を大きく評価した。次いで、本解析方法により経時変化に伴う増加平均曲率に及ぼすクリープと収縮の影響度を明らかにした。

**Key Words :** *prestressed reinforced concrete, analysis method, creep, shrinkage, deformation, stress, tension stiffening*

## 1. まえがき

P R C構造は、使用限界状態においてひび割れの発生を許容し、異形鉄筋の配置とプレストレスの導入により、ひび割れ幅やたわみの合理的な制御が期待されている構造である。このように使用限界状態を異形鉄筋とプレストレスの両者によって制御することによって、R C構造およびP C構造に比べて、終局限界状態に対しても要求される安全性を適切に設計することができる。このため、構造物の種類や環境条件などに応じて最適な条件を設定でき、自由度が高く、きわめて合理的な構造であると言え、経済的なメリットや施工性、機能性の改善に寄与することが認められるようになり、実構造物に適用されるケースが増加している。

P R C構造は、我が国でR C構造の永久荷重下のひび割れ幅やたわみの制御を目的として考案された構造であり、永久荷重下ではひび割れが許されるものである<sup>1)</sup>。しかし、世界的には永久荷重作用時にはひび割れを認めず、活荷重作用下で認めるという考え方が一般的であり、ひび割れを認めた部材の長期変形性状に関する研究は、必ずしも活発であった

とは言えなかった。近年になって、自由度の高い構造であるP R Cの特長を活かしていくために、持続荷重下においてもひび割れを許す考えが再び認められだし、ひび割れたP R C部材のクリープ変形に関する研究も増加し、コンクリート標準示方書[平成8年制定]設計編<sup>2)</sup>(以下、J S C E)に長期変形の予測のための有効曲げ剛性式が提示されるに至った。この予測式は有効弾性係数を用いているために容易である反面、施工の進捗に伴って段階的に永久(持続)荷重が作用する場合などの適用には限界がある。

このような段階施工に対応できるクリープ解析法を構築するためには、コンクリートの変動応力下のクリープ、収縮による変形、テンションスティフニングを合理的に取り扱うことが必要となる。ひび割れを考慮したP R C部材のクリープ解析の主なものとしては、横道ら<sup>1)</sup>、鈴木ら<sup>3), 4)</sup>、猪股<sup>5)~7)</sup>、Ghaliら<sup>8), 9)</sup>、Raoら<sup>10), 11)</sup>、小宮ら<sup>12)</sup>、Tengら<sup>13)</sup>、高海<sup>14)</sup>、Gutiérrezら<sup>15)</sup>の研究およびC E Bマニユアル<sup>16)</sup>がある。

これらの既往の研究を上記の3点に着目し概観すると、コンクリートのクリープについては、有効弾性係数法を用いたもの<sup>1)</sup>

- ・平均応力法によるもの<sup>3), 4)</sup>
- ・材齢係数を用いたもの<sup>5) ~ 11)</sup>
- ・流動速度法と材齢係数を用いたもの<sup>14)</sup>
- ・材齢係数を考慮したクリープ変形・収縮変形に対する修正係数を用いる方法<sup>16)</sup>
- ・step-by-step法を用いたもの<sup>8), 9), 12), 13), 15)</sup>

などがあり、変動応力を考慮できる水準に至っていることが理解される。

収縮による変形の評価は、Tengら、高海、CEBマニュアルでは収縮のみによる変形をクリープ解析と独立させて求める方法を用いているが、応力ひずみと重ね合わせて全ひずみとし、クリープ解析と統一して取り扱う方法<sup>3) ~ 12), 15)</sup>が一般性が高い。

テンションスティフニングの取り扱いについては、断面設計に主眼において無視する場合、および全断面とひび割れ断面の変形や剛性を按分して考慮する場合<sup>5) ~ 7), 8) 9), 13)</sup>がある。変形を評価する場合や不静定構造の断面力をより正確に算定するためには、テンションスティフニングを考慮することが必要となる。

コンクリートの変動応力については、上述した通り考慮できる水準にあるが、荷重履歴としてみた場合、既往の方法は適用範囲が広いというわけではない。すなわち、既往の方法の多くは、ひび割れ後持続荷重が載荷される場合や、持続荷重が作用した後活荷重によってひび割れが生じる場合を対象としており、持続荷重が異なる場合を扱えるのは、小宮ら、Tengら、Gutiérrezらの方法である。小宮ら、Gutiérrezらの解析は断面応力の評価が目的であり、変形の評価はできない。また、小宮らは中立軸の移動に伴う増加応力分布を線形と仮定しており、変動応力が大きい場合にはその適用に限界があるものと考えられる。Tengらの方法はテンションスティフニングを考慮したものであるが、断面応力の評価はできない。他に Ghaliらも、考え方としては持続荷重が異なった場合も取り扱い、変形および断面応力も算定できるが、中立軸の移動に伴う応力の非線形領域を無視することによって、応力の線形分布を確保している。さらに持続荷重が異なる場合の計算例については示されていない。

以上のように、現時点では上記の持続荷重の履歴、テンションスティフニング、クリープと収縮の統一的处理、および変形と断面応力の両方を評価することの4点を取り扱うことができ、さらにその検証を行っている例はない。

そこで本研究では、プレストレス導入直後から段階的に増大する持続荷重を受けるP R C部材の変形および応力を任意の材齢まで連続的に取り扱える解

析方法を提案するものである。併せて、持続荷重による載荷でひび割れを発生させ、その後2段階に持続荷重が増大した場合のP R C部材の挙動を実験的に明らかにすると共に、提案したクリープ解析の検証を行うことを目的としている。

なお、ひび割れ幅については、P R C部材の長期挙動において重要な課題ではあるが、本研究で提案しているクリープ解析では、ひび割れ性状を直接取り扱っていないことから、別の機会を検討することとした。

## 2. 解析方法

### (1) クリープ解析の仮定

本解析では次のような仮定を設けている<sup>17)</sup>。①平面保持が成立する。②ひび割れ断面の引張域コンクリートは無視する。③鉄筋およびP C鋼材はコンクリートと完全付着とする。④プレストレス力は内力として考慮する。⑤自由収縮ひずみは断面に一樣に作用するものとする。

なお、P C鋼材の純リラクセーションの最終値は1000時間の実測値の3倍の値とした<sup>2) 18)</sup>。また、P C鋼材応力のリラクセーションによる経時的減少は、載荷に伴う鋼材応力の変化は無視し、Ghaliら<sup>19)</sup>の提案式に従って定めた。

曲げモーメント、応力等の符号、座標およびひずみの原点を次のように定めている。①断面下縁に引張応力が生じる曲げモーメントを正とする。②引張応力および伸長ひずみを正とする。③正曲げモーメントに対する断面曲率を正とする。④座標  $z$  の原点を上縁とし、下方に正とする。⑤ひずみの原点をプレストレス導入前の状態とする。

### (2) ひずみの適合条件

コンクリートの応力は自由収縮ひずみからのひずみの変化量で決まるので、図-1, 2に示すように図心位置の自由収縮ひずみ  $\epsilon_{cs}$  からの変化ひずみを  $\epsilon_n$  とすれば、断面のひずみの直線性は成立すると仮定されているので、全断面有効断面およびひび割れ断面ともにひずみの適合条件は以下の式で表すことができる。

$$\psi = \frac{\epsilon_c(z) - (\epsilon_o + \epsilon_{cs})}{z - c} = \frac{\epsilon'_s - (\epsilon_o + \epsilon_{cs})}{d' - c} = \frac{\epsilon_s - (\epsilon_o + \epsilon_{cs})}{d - c} = \frac{\Delta \epsilon_p - (\epsilon_o + \epsilon_{cs})}{d_p - c} \quad (1)$$

ここに、  
 $\psi$  : 曲率

$\epsilon_c(z), \epsilon'_s, \epsilon_s, \Delta\epsilon_p$ : 上縁から  $z$  の位置のコンクリート, 圧縮鉄筋, 引張鉄筋およびP C鋼材のひずみの変化量

$c, d', d, d_p$ : 上縁から図心, 圧縮鉄筋, 引張鉄筋およびP C鋼材までの距離

コンクリートおよび鋼材のひずみは以下の式で表される。

$$\epsilon_c(z) = \epsilon_o + \psi(z - c) + \epsilon_{cs} \quad (2)$$

$$\epsilon'_s = \epsilon_o + \psi(d' - c) + \epsilon_{cs} \quad (3)$$

$$\epsilon_s = \epsilon_o + \psi(d - c) + \epsilon_{cs} \quad (4)$$

$$\Delta\epsilon_p = \epsilon_o + \psi(d_p - c) + \epsilon_{cs} \quad (5)$$

次にプレストレスは内力として考慮するので, P C鋼材のひずみ  $\epsilon_p$  は, P C鋼材の初期引張ひずみ  $\epsilon_{p,0}$  と変化ひずみの和として以下の式で表される。

$$\epsilon_p = \epsilon_{p,0} + \Delta\epsilon_p \quad (6)$$

### (3) 経時変化に伴う応力とひずみ

一般に,  $t_0$  時点にコンクリート応力  $\sigma_c(t_0)$  が作用した時の  $t$  時点のコンクリートひずみ  $\epsilon_c(t)$  は, 経時的応力変化のある場合,  $\tau$  時点における微小経過時間での応力変化を  $d\sigma_c(\tau)$  とすると, 自由収縮ひずみ  $\epsilon_{cs}(t, t_0)$  を含め, 次のようになる。

$$\begin{aligned} \epsilon_c(t) = & \sigma_c(t_0) \left\{ \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{c28}} \right\} \\ & + \int \sigma_c(\tau) \left\{ \frac{1}{E_c(\tau)} + \frac{\phi(t, \tau)}{E_{c28}} \right\} d\sigma_c(\tau) + \epsilon_{cs}(t, t_0) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで, 重ね合わせの原理に基づくstep-by-step法を用いて, 図-3に示すように, 考慮する時間ステップの中間時点で変動応力が生じるとして近似し, step  $i$  の終わりの時点  $t_{i+1/2}$  に着目した場合の上縁から  $z$  の位置の全ひずみは次のように表される。

$$\begin{aligned} \epsilon_{c,i+1/2}(z) = & \sigma_{c,i/2}(z) J(t_{i+1/2}, t_{i/2}) \\ & + \sum_{j=1}^i \Delta\sigma_{c,j}(z) J(t_{i+1/2}, t_j) + \epsilon_{cs,i+1/2} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに,

$t_i, t_{i+1/2}$ :  $i$  番目のタイムインターバルの中間と終点の材齢

$\epsilon_{cs,i+1/2}$ : 時点  $t_{i+1/2}$  における自由収縮ひずみ

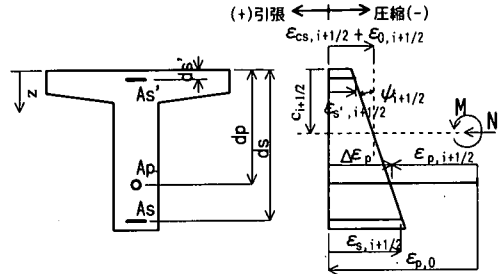
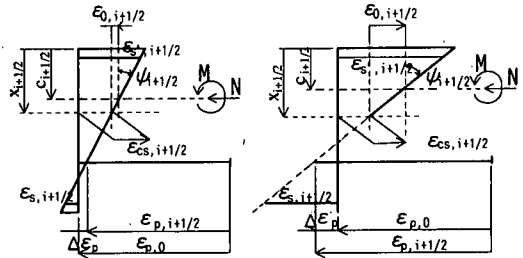


図-1 プレストレス導入時およびストレスロス時のひずみ分布



a. 全断面有効断面 b. ひび割れ断面

図-2 静的載荷時および持続荷重下のひずみ分布

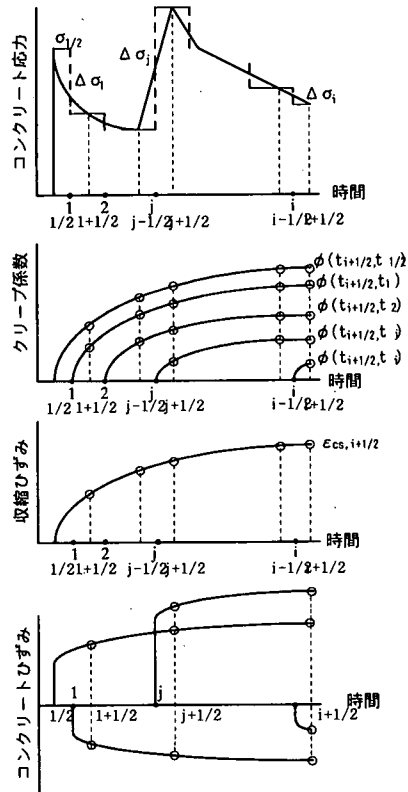


図-3 重ね合わせの原理に基づくstep-by-step法の解析概念

$$J(t_{i+1/2}, t_j) = 1/E_c(t_j) + \phi(t_{i+1/2}, t_j)/E_{c28}$$

$$\Delta\sigma_{c,j}(z) = \sigma_{c,j+1/2}(z) - \sigma_{c,j-1/2}(z)$$

$\phi(t_{i+1/2}, t_j)$  :  $t_j$ に載荷された  $t_{i+1/2}$ におけるクリープ係数

$E_c(t_j), E_{c28}$  :  $t_j$ および標準養生された材齢28日のコンクリートのヤング係数

これより考慮している時点での全応力は次のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_{c,i+1/2}(z) &= E_c(t_{i+1/2}, t_i) \{ \varepsilon_{c,i+1/2}(z) \\ &- \sigma_{c,1/2}(z) J(t_{i+1/2}, t_{1/2}) - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta\sigma_{c,j}(z) J(t_{i+1/2}, t_j) \\ &+ \sigma_{c,i-1/2}(z) J(t_{i+1/2}, t_i) - \varepsilon_{cs,i+1/2} \} \\ &= E_c(t_{i+1/2}, t_i) \{ \varepsilon_{c,i+1/2}(z) - \varepsilon_{ec,i-1/2}(z) - \varepsilon_{cs,i+1/2} \} \\ &= E_c(t_{i+1/2}, t_i) \{ \varepsilon_{o,i+1/2} + \psi_{i+1/2}(z - c_{i+1/2}) \\ &- \varepsilon_{ec,i-1/2}(z) \} \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、

$$\begin{aligned} E_c(t_{i+1/2}, t_i) &= 1/J(t_{i+1/2}, t_i) \\ &= \frac{E_c(t_i)}{1 + \{E_c(t_i)/E_{c28}\} \phi(t_{i+1/2}, t_i)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ec,i-1/2}(z) &= \sigma_{c,1/2}(z) J(t_{i+1/2}, t_{1/2}) \\ &+ \sum_{j=1}^{i-1} \Delta\sigma_{c,j}(z) J(t_{i+1/2}, t_j) - \sigma_{c,i-1/2}(z) J(t_{i+1/2}, t_i) \end{aligned}$$

式(9)により、考慮している時点でのコンクリート応力が求まるので、直接その時点の釣合式に持ち込むことができる。

鋼材の応力とひずみの関係は次のように表される。P C鋼材については、リラクセーションによる応力減少量  $\Delta\sigma_{pr,i+1/2}$ を考慮する<sup>19)</sup>。

$$\begin{aligned} \sigma'_{s,i+1/2} &= E_s \varepsilon'_{s,i+1/2} \\ &= E_s \{ \varepsilon_{o,i+1/2} + \psi_{i+1/2}(d' - c_{i+1/2}) + \varepsilon_{cs,i+1/2} \} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{s,i+1/2} &= E_s \varepsilon_{s,i+1/2} \\ &= E_s \{ \varepsilon_{o,i+1/2} + \psi_{i+1/2}(d - c_{i+1/2}) + \varepsilon_{cs,i+1/2} \} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{p,i+1/2} &= E_p \varepsilon_{p,i+1/2} - \Delta\sigma_{pr,i+1/2} \\ &= E_p \{ \varepsilon_{o,i+1/2} + \psi_{i+1/2}(d_p - c_{i+1/2}) + \varepsilon_{cs,i+1/2} \\ &+ \varepsilon_{p,o} \} - \Delta\sigma_{pr,i+1/2} \end{aligned} \quad (12)$$

ここに、サフィックス  $_{i+1/2}$  は時点  $t_{i+1/2}$  での値を示す。

#### (4) 釣合条件

断面における軸方向力  $N$  および曲げモーメント  $M$  の釣合条件は、式(2)~(6)を用いて図心  $c_{i+1/2}$ 、その位置の軸方向の応力ひずみ  $\varepsilon_{o,i+1/2}$  および曲率  $\psi_{i+1/2}$  に関して整理すると以下の2式で表される。

$$\begin{aligned} N &= \int_{A_c} \sigma_{c,i+1/2}(z) dA_c + A'_s \sigma'_{s,i+1/2} + A_s \sigma_{s,i+1/2} \\ &+ A_p \sigma_{p,i+1/2} \\ &= E_c(t_{i+1/2}, t_i) \{ A_c \varepsilon_{o,i+1/2} + G_e(c) \psi_{i+1/2} \\ &- \int_{A_c} \varepsilon_{ec,i-1/2}(z) dA_c \} + A_p (E_p \varepsilon_{p,o} - \Delta\sigma_{pr,i+1/2}) \\ &+ \varepsilon_{cs,i+1/2} (A'_s E_s + A_s E_s + A_p E_p) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} M &= \int_{A_c} \sigma_{c,i+1/2}(z) (z - c) dA_c + A'_s \sigma'_{s,i+1/2} (d' - c) \\ &+ A_s \sigma_{s,i+1/2} (d - c) + A_p \sigma_{p,i+1/2} (d_p - c) \\ &= E_c(t_{i+1/2}, t_i) \{ G_e(c) \varepsilon_{o,i+1/2} + I_e(c) \psi_{i+1/2} \\ &- \int_{A_c} \varepsilon_{ec,i-1/2}(z - c) dA_c \} + G_p(c) (E_p \varepsilon_{p,o} - \Delta\sigma_{pr,i+1/2}) \\ &+ \varepsilon_{cs,i+1/2} \{ G'_s(c) E_s + G_s(c) E_s + G_p(c) E_p \} \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、

$c, A_e, G_e, I_e$  についてはサフィックス  $_{i+1/2}$  を省略して表示している。

$A_e = A_c + n_s A'_s + n_s A_s + n_p A_p$  : 換算断面積

$A_c$  : コンクリート純断面積

$n_s = E_s/E_c(t_{i+1/2}, t_i), n_p = E_p/E_c(t_{i+1/2}, t_i)$

$G_e(c) = G_e - A_e c$  : 図心に関する換算断面1次モーメント

$G_e = G_e + n_s A'_s d' + n_s A_s d + n_p A_p d_p$  : 上縁に関する換算断面1次モーメント

$G_c$  : 上縁に関する純断面1次モーメント

$I_e(c) = I_e - 2G_e c + A_e c^2$  : 図心に関する換算断面2次モーメント

$I_e = I_e + n_s A'_s d'^2 + n_s A_s d^2 + n_p A_p d_p^2$  : 上縁に関する換算断面2次モーメント

$I_c$  : 上縁に関する純断面2次モーメント

$G'_s(c) = A'_s (d' - c), G_s(c) = A_s (d - c)$  図心に関する鉄筋断面1次モーメント

$G_p(c) = A_p (d_p - c)$  : 図心に関するP C鋼材断面1次モーメント

全断面では、式(13),(14)の釣合条件に加え、図心に関する換算断面1次モーメント  $G_e(c) = 0$  であることから、式(14)から  $\psi_{i+1/2}$  が、式(13)から  $\varepsilon_{o,i+1/2}$  が求められ、断面のひずみ分布が得られる。

ひび割れ断面では、引張域コンクリートは無視するので、 $A_c, G_c, I_c$ が上縁から中立軸  $X_{i+1/2}$  までを対象に算出した値となる。よって、式(13),(14)は  $X_{i+1/2}$  の関数となるが、 $X_{i+1/2}$  が求められれば図心  $c_{i+1/2}$  も容易に求まるので、全断面の場合と同様に  $c_{i+1/2}$  の関数として同一に扱っている。この場合には、最初に  $X_{i+1/2}$  に関する3次方程式の解を求めることが必要となるが、その後は全断面と同様な方法で断面のひずみ分布が得られる。

断面のひずみ分布が得られれば式(9)よりコンクリートの応力分布が得られる。

### (5) 断面の曲率

断面の曲率は式(14)より次のように表される。

$$\psi_{i+1/2} = \frac{1}{E_e(t_{i+1/2}, t_i) I_c(c)} \{M + \Delta M_{ec} - \Delta M_p - \Delta M_{cs}\} \quad (15)$$

ここに、

$$\Delta M_{ec} = E_e(t_{i+1/2}, t_i) \int_{A_c} \epsilon_{ec, i-1/2}(z)(z-c) dA_c$$

$$\Delta M_p = G_p(c)(E_p \epsilon_{p,0} - \Delta \sigma_{pr, i+1/2})$$

$$\Delta M_{cs} = \{E_s G'_s(c) + E_s G_s(c) + E_p G_p(c)\} \epsilon_{cs, i+1/2}$$

式(15)は、外力曲げモーメント  $M$  と同様に、時間依存の影響についても要因別の見かけの付加モーメントとして外力で扱うことができる。 $\Delta M_{ec}$  は、 $t_{i-1/2}$  時点までのコンクリートのクリープによる変動応力に起因する見かけの付加モーメントであり、正となるので曲率を大きくする方向に作用する。

$\Delta M_p$  は、プレストレスによるモーメントであり、正となるので曲率を小さくする方向に作用する。また、内力として扱っていたプレストレス力も外力として単独に扱われており、プレストレス力は内力、外力のどちらで評価しても同一の結果が得られることが理解できる。

$\Delta M_{cs}$  は、収縮に起因する鋼材の拘束による見かけの付加モーメントであり、式の構成から、圧縮鉄筋は  $\Delta M_{cs}$  を正の方向に増大させ曲率を小さくする方向に作用するが、引張鉄筋およびP C鋼材は  $\Delta M_{cs}$  を負の方向に増大させ曲率を大きくする方向に作用することになる。

### (6) 平均曲率

本解析における平均曲率は、テンションステイフニング効果を考慮したCEB-FIP MODEL CODE 1990<sup>18)</sup>

(以下、MC90)に基づいた式(16)の關係を用いている。

$$\bar{\psi} = \psi_2 - \psi_{1s} = \psi_2 - (\psi_{2r} - \psi_{1r}) \beta_2 (M_r / M) \quad (16)$$

$$M_r \leq M \leq M_y;$$

ここに、

$\bar{\psi}$  : 平均曲率

$M$  : 作用曲げモーメント

$M_r$  : ひび割れ発生時のモーメント

$M_y$  : 降伏時のモーメント

$\psi_{1r}$  : 状態1(全断面有効断面)の  $M_r$  に対応する曲率

$\psi_2, \psi_{2r}$  : 状態2(ひび割れ断面)の  $M$  および  $M_r$  に対応する曲率

$\psi_{1s} = (\psi_{2r} - \psi_{1r}) \beta_2 (M_r / M)$  : テンションフテニング効果

$\beta_2$  : 持続荷重あるいは繰返し荷重の影響を表す係数

### (7) 時間ステップ

本解析における step-by-step の時間ステップは、プレストレス導入時を  $t_{0+1/2}$  とし、その後のステップ間隔は、クリープ、収縮の変化が大きい若材齢では短く、クリープ、収縮の変化が小さく、安定するに伴って長く設定している。こうすることで、解析精度を確保しながら、計算時間の短縮を図っている。本実験の解析では、ステップ間隔を2日~200日まで変化させている。また、持続荷重の載荷時では、短期間に載荷されることからステップ間隔を0日とし、その間ではクリープ・収縮が進行しないものとして扱っている。

## 3. 実験概要

### (1) 供試体

供試体の形状は、断面が20×25cm、長さが240cmの矩形断面はりである。供試体の断面の諸元を図-4に示す。パラメータとしては曲げ耐力がほぼ等しくなるようにして、プレストレスの導入レベルを5段階になるように鉄筋とP C鋼材の断面積の組み合わせを変化させたものである。プレストレスの導入レベルは次式に示すプレストレス度 ( $\lambda$ ) を用いて示す。

$$\lambda = \frac{A_p f_{py}}{A_p f_{py} + A_s f_{sy}} \quad (17)$$

表-1 供試体の配置鋼材の構成

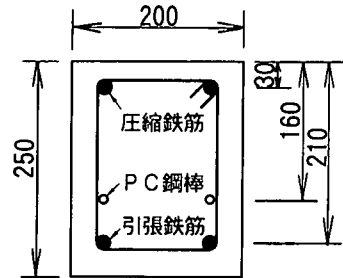
NO.	名称 引張鉄筋 (PC鋼棒) -圧縮鉄筋	引張鉄筋		PC鋼棒		圧縮鉄筋		プレスト レッシング 度 $\lambda$
		断面積 $A_s$ ( $\text{mm}^2$ )	鉄筋比 $\rho_s$ (%)	断面積 $A_p$ ( $\text{mm}^2$ )	鋼材比 $\rho_p$ (%)	断面積 $A_s'$ ( $\text{mm}^2$ )	鉄筋比 $\rho_s'$ (%)	
NL10	D19-0	573	1.15	---	---	---	---	0
NL12	D19-D16	573	1.15	---	---	397.2	0.79	0
NL20	D16(7.1)-0	397.2	0.79	80	0.16	---	---	0.47
NL22	Dm16(7.1)-D16	315.1	0.63	80	0.16	397.2	0.79	0.52
NL30	D13(9.0)-0	253.4	0.51	128	0.26	---	---	0.69
NL32	Dm13(9.0)-D16	186.1	0.37	128	0.26	397.2	0.79	0.75
NL40	D10(10.7)-0	142.7	0.29	180	0.36	---	---	0.85
NL42	D10(10.7)-D16	142.7	0.29	180	0.36	397.2	0.79	0.85
NL50	(12.6)-0	---	---	250	0.50	---	---	1
NL52	(12.6)-D16	---	---	250	0.50	397.2	0.79	1

(引張鉄筋 Dm は溝切り加工したもの、鉄筋比はコンクリート全断面に対する比率を表す.)

表-2 供試体の応力状態

NO.	PC鋼棒 7° $\pi$ 導入 直後実測 緊張応力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	導入直後 の応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )			載荷 モーメント ( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )	載荷直後 の応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	
		上縁 コンクリート	引張 鉄筋	下縁 コンクリート		上縁 コンクリート	引張 鉄筋
NL10	---	---	---	---	19.5→22.1	-15.3	181.8
NL12	---	---	---	---	19.5→22.1	-13.3	181.6
NL20	867.7	-0.3	-13.4	-2.3	22.1→25.1	-17.8	160.5
NL22	863.9	-0.2	-13.4	-2.4	22.1→25.1	-16.7	192.6
NL30	929.4	-0.5	-23.3	-4.1	22.2→25.1	-17.7	119.0
NL32	927.3	-0.3	-23.8	-4.2	22.2→25.1	-16.3	139.9
NL40	917.8	-0.6	-33.3	-5.9	23.5→25.1	-17.5	70.4
NL42	933.9	-0.5	-34.1	-6.0	23.5→25.1	-14.7	54.2
NL50	789.1	-0.6	---	-7.3	25.0	-17.7	---
NL52	800.8	-0.5	---	-7.5	25.0	-14.5	---

(→は経過1215日に増加した値を示す。)



(unit:mm)

図-4 供試体断面図

ここに、 $A_p, A_s$ はそれぞれPC鋼材および引張鉄筋の断面積、 $f_{py}, f_{sy}$ はそれぞれPC鋼材および引張鉄筋の降伏強度を示す。

また、圧縮鉄筋比もパラメータとして加え、供試体数を10体とした。供試体の鋼材の構成を表-1に示す。表-2には、プレストレス導入直後におけるPC鋼材の実測応力度から弾性計算で求めた応力状態と持続荷重載荷直後における後述の本解析で求めたひび割れ断面の応力状態をそれぞれ示す。

この他に、載荷用供試体と同断面のブレンコンクリートによるクリープ係数および収縮測定用の供試体も同時に製作した。クリープ係数測定供試体では、断面中央に設けたダクト(直径50mm)にPC鋼

表-3 コンクリート使用材料

使用材料	種類
セメント C	早強ポルトランドセメント 比表面積 4420 $\text{cm}^2/\text{g}$ 比重 3.13
細骨材 S	鬼怒川産(安山岩)川砂 F.M.2.78 比重 2.61
粗骨材 G	鬼怒川産(安山岩)砕石 F.M.6.65 比重 2.64
高性能減水剤 SP	高縮合トリアジン系高性能減水剤 (標準形I種)
AE助剤	変性ロジン酸系空気調整剤(I)

棒(呼び径32mm)を配置して緊張する事によって、初期応力度 8.3  $\text{N}/\text{mm}^2$ を導入している。ブレンのコンクリート供試体は3体1組として、クリープ係数測定用を載荷時材齢が異なる2組、収縮測定用を1組とした。

表-4 コンクリートの配合表

目標強度 (N/mm <sup>2</sup> )	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤 SP	AE助剤
40	20	55	46	165	300	843	1,000	6.0	1.2

ただし、高性能AE減水剤(SP)および AE助剤は混練水(W)を含む。

(2) 使用材料

供試体に用いたコンクリートの使用材料および配合を表-3、表-4に示す。鉄筋には呼び名D19, D16, D13, D10のSD295を、PC鋼材には呼び名7.1, 9.0, 10.7, 12.6 mmの細径異形PC鋼棒(D種1号)をそれぞれ使用した。

(3) 供試体の養生および環境条件

養生としては、プレストレス導入時(材齢9日)まで湿潤養生を行い、導入後直ちに乾燥を開始し、試験終了まで実験室内に放置した。試験期間における実験室内の平均気温は15.3℃、平均湿度は64%であった。

(4) 荷重方法および計測方法

荷重はスパン210cm, せん断スパン長65cmの2点荷重とした。荷重装置の概要を図-5に示す。純曲げ区間80cmを試験対象区間として平均曲率, コンクリートの圧縮ひずみ, ひび割れ幅, 鉄筋ひずみを計測した。平均曲率は試験対象区間中央で変位計(精度1/100mm)を用いて計測された試験区間のたわみ量より円弧と仮定して近似的に求めた。コンクリートの圧縮ひずみは圧縮縁から1cmの位置で標点距離を10cmとして, コンタクトゲージ(精度1/1000mm)を用いて試験対象区間全長にわたって計測した。ひび割れ幅は引張鉄筋位置で標点距離を2cmとして, コンタクトゲージ(精度1/1000mm)を用いて計測した。引張鉄筋ひずみは異形鉄筋の縦リブの位置に深さ3mm, 幅4mmの溝を切削加工して, その溝に試験対象区間の中央52cmに2cm間隔で貼付したひずみゲージより求めた。

プレーンのコンクリート供試体のクリープおよび収縮ひずみの測定には, 埋込み型ひずみ計と標点距離を10cmとしたコンタクトゲージ(精度1/1000mm)を併用した。クリープ供試体の導入応力は, PC鋼棒の初期引張応力を引張強度の5割以下のリラクゼーションのない状態に設定し, PC鋼棒に貼付した直行する2組のひずみゲージより荷重を計測し求めた。

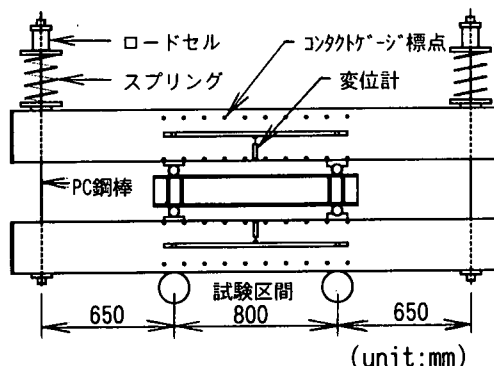


図-5 荷重概要図

表-5 コンクリートの強度試験結果

試験時期	プレストレス導入時 (材齢9日)	持続荷重 載荷時 (材齢17日)	標準養生 (材齢28日)
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	39.9	45.4	44.5
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	---	3.6	3.6
ヤング係数 (kn/mm <sup>2</sup> )	30.1	32.7	36.8

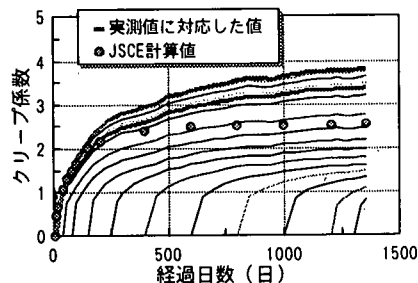


図-6 プレコンクリートのクリープ係数

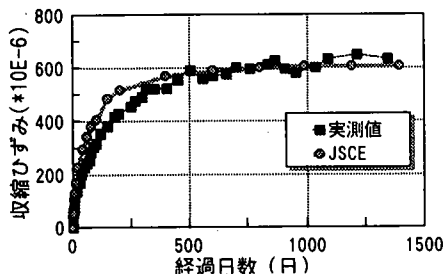


図-7 プレコンクリートの収縮ひずみ

### (5) 載荷条件

載荷条件は、材齢9日でプレストレスを導入し、材齢17日で持続荷重を載荷した。途中1100日で、持続荷重下における活荷重による剛性評価を目的に変動荷重を与え、さらに、プレストレス導入から1215日で持続荷重を増加し、約1360日間で持続載荷を終了した。終了時には除荷した後に破壊まで載荷を行った。ただし、本論文では変動荷重および持続荷重終了後の載荷については検討の対象から除外している。

## 4. 材料特性

コンクリートの材料特性として、強度試験結果を表-5に示す。また、ブレンコンクリートのクリープ係数および収縮ひずみの測定結果を図-6、図-7にそれぞれ示す。

クリープ係数の載荷時材齢としては、供試体の載荷と合わせてプレストレス導入時と持続荷重載荷時の2種類としている。クリープひずみの測定では、クリープ、収縮に伴う変形によって低下するコンクリート応力の減少を調整していない。そこで、クリープ係数は、実測されたクリープひずみとコンクリート応力を用いて、応力の減少を考慮した重ね合わせ法による結果と等しくなるように、載荷時材齢を考慮できるMC90のクリープ予測式に補正係数乗じて対応させて求めた。これを図-6に太い実線で示す。その他の図中の細い実線は、解析に必要なその他の時間ステップの中間時点を載荷時材齢とするクリープ係数について、前で求めた補正係数を乗じたMC90の予測式から算出したものである。解析では、これらの実線の値を入力データとしている。

収縮ひずみについては、図-7に示す実測値を入力データとしている。

参考のために図-6、7にはJ S C Eによる予測結果を合わせて示している。

鉄筋およびP C鋼棒のヤング係数は $200.9\text{kN/mm}^2$ 、 $201.9\text{kN/mm}^2$ である。また、P C鋼棒のリラクセーション率は1000時間試験で0.9%である。

## 5. 実験結果および考察

実験結果を整理するうえで、図の原点は、原則として、プレストレス導入直前の状態あるいはその時点とし、経過日数はプレストレス導入時からの日数を示す。

### (1) ストレスロスの経時変化

ストレスロスが生じている間の平均曲率の経時変

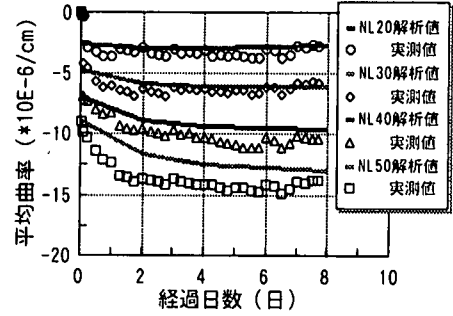


図-8 平均曲率の経時変化

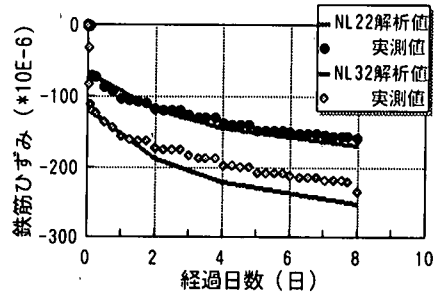


図-9 鉄筋ひずみの経時変化

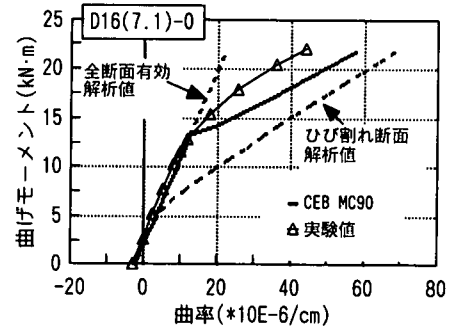


図-10 モーメントと平均曲率の関係(NL20)

化について、代表的な供試体の結果を実測値と解析値を比較して図-8に示す。解析値は実測値に対して、プレストレスが大きくなると小さく評価する傾向がみられるが概ね良く一致している。

また、図-9にはひび割れ幅を算定する際に必要となる引張鉄筋ひずみの経時変化を示すが、実測値と解析値を比較すると、解析値はNL22供試体では良く一致し、NL32供試体では少し大きめに評価している。

### (2) 持続荷重載荷時の挙動

最初に持続荷重を載荷した時の作用モーメントと平均曲率の関係について、代表的な供試体の結果を図-10に示す。解析値としては、全断面有効断面、ひび割れ断面およびテンションスティフニング効果を考慮した式(16) (この場合、 $\beta_2=0.8$ を使用)によ



る結果を示している。ひび割れ発生モーメント( $M_r$ )の算出において、コンクリートの引張強度は、荷重試験時に行った割裂試験による値とプレストレスとして荷重直前のP C鋼材の実測ひずみを用いて計算した値を使用している。これらの図によれば、ひび割れ発生モーメントは計算値と実測値が概ね一致していると言える。

しかし、ひび割れ発生以後の変形に着目すると、解析値はモーメントの増加に伴ってテンションステイフニング効果の低下割合が大きい傾向を示すのに対して、実測値は緩やかな低下傾向を示している。この緩やかに低下する現象はRC供試体では見られず、PRC供試体特有なものであった。特にひび割れ発生直後の段階で顕著な傾向が見られた。

図-11には引張鉄筋ひずみについて、実測された27点の内の最大値(以下、実測最大値)と解析値を示す。実測最大値はひび割れ断面のひずみとほぼ解釈することができる。解析値については、ストレス中に生じた圧縮ひずみが、持続荷重載荷後に及ぼす影響について評価するために行ったパラメータ解析の結果も併せて示している。パラメータ解析としては、クリープ、収縮が無かったと仮定した場合とクリープ、収縮の値を実測値( $\phi_m, \epsilon_{csm}$ )の2倍と仮定した場合についてである。パラメータ解析によれば、ひび割れが生じるまでは、クリープ、収縮が大きくなるほど鉄筋の圧縮ひずみが大きい。しかし、ひび割れが生じた後はその影響が作用モーメントの増加に伴って急速に消失し、所定の荷重における鉄筋ひずみは全て等しくなる。このように、ひび割れ後の鉄筋ひずみの絶対値は、ストレス中の影響を受けないが、ひび割れ幅算定に用いる鉄筋位置のコンクリート応力が0からの変化量はストレス中に生じた圧縮ひずみが大きい方が大きくなる。これは、ひび割れ幅算定に用いる鉄筋ひずみをコンクリート応力が0の状態において生じている鉄筋の反力として加えて評価する<sup>20)</sup>ことと一致している。

なお、実測最大値のひび割れ発生以後の挙動は、ひび割れ断面の解析値に近づくことなくほぼ平行に推移している。このことは、持続荷重載荷時点ではひび割れ断面においても、ひずみ勾配による引張域で、コンクリートが応力を受け持っていることを示していると考えられる。

### (3) 圧縮ひずみの経時変化

圧縮縁から1cmの位置におけるコンクリートの平均圧縮ひずみの経時変化について、代表的な供試体の測定結果を解析値と併せて図-12に示す。解析値は全断面有効断面およびひび割れ断面の場合を示す。

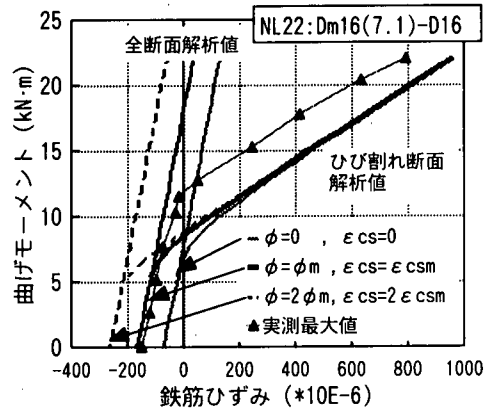


図-1.1 モーメントと引張鉄筋ひずみの関係(NL22)

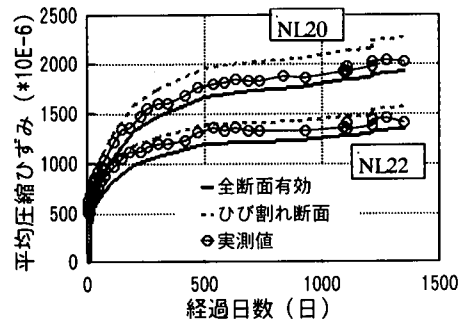


図-1.2 圧縮ひずみの経時変化

表-6 圧縮ひずみの結果一覧表

NO.	名称	圧縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )		
		実測値 <sup>*1</sup> ①	解析値 <sup>*2</sup> ②	②/①
NL10	D19-0	1,980	1,937	0.98
NL12	D19-D16	1,392	1,408	1.01
NL20	D16(7.1)-0	2,020	2,280	1.13
NL22	Dm16(7.1)-D16	1,410	1,577	1.12
NL30	D13(9.0)-0	2,121	2,384	1.12
NL32	Dm13(9.0)-D16	1,488	1,656	1.11
NL40	D10(10.7)-0	2,116	2,535	1.20
NL42	D10(10.7)-D16	1,491	1,711	1.15
NL50	(12.6)-0	2,319	2,615	1.13
NL52	(12.6)-D16	1,477	1,653	1.12
平均				1.11

ここで、数値は経過日数1360日の値を示す。

\*1: 平均値を示す。

\*2: ひび割れ断面の解析値を示す。

表-6には全供試体について経過日数1360日における実測値とひび割れ断面の解析結果を示す。これらの結果によれば、圧縮ひずみに関しては、全断面有効およびひび割れ断面の解析値の差は小さく、実測値は両解析値の間に位置しており、ひび割れ断面の解

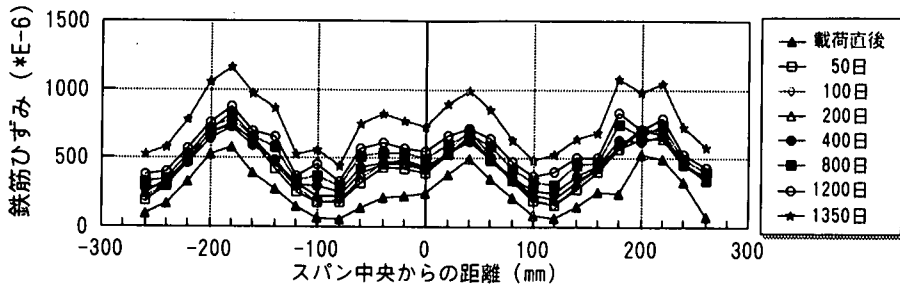


図-13 鉄筋ひずみ分布 (NL32;Dm13(9.0)-D16)

析値を用いても比較的精度良く安全側に評価できることが解る。

#### (4) 鉄筋ひずみの経時変化

鉄筋のひずみ分布の経時変化の一例を図-13に示す。この鉄筋ひずみの平均値と最大値の経時変化を図-14に示す。図中には全断面およびひび割れ断面の解析値も併せて示す。また、表-7に測定した2体の供試体について持続荷重下の経時変化を示す。表中の解析値はひび割れ断面の値である。表-7に示す実測最大値に着目すると、載荷直後から15日程度(経過日数23日まで)の間に急激な増加が見られる。この現象は、引張域コンクリートを無視した解析値の増加速度と比較すればわかるように、持続荷重載荷時点では受け持っていたひび割れ断面引張域のコンクリート応力が持続荷重載荷後急速に消失したものと考えられる。載荷後15日以降の持続荷重下の実測最大値とひび割れ断面の解析値を比較すると、実測値の方が全体的にわずかに増加が大きい傾向を示しているが、両者は比較的良く一致している。

図-14および表-7に示す最大値と平均値の差の経時変化は、一定の持続荷重下ではほぼ一定か若干小さくなる傾向を示す。しかし、持続荷重が増大した後では、差はむしろ大きくなる傾向を示し、先行持続荷重下で、テンションスティフニング、すなわち付着は回復でき得るほどの状態が維持されていると言えよう。

そこで、図-15には鉄筋のひずみ分布から求めた付着応力の平均値(以下、平均付着応力)の経時変化を示す。当然ながら、平均付着応力は前述の最大値と平均値の差の場合と同様な傾向を示し、先行持続荷重下においては時間経過による変化は若干小さくなるかほとんど一定である。後続の持続荷重下では明らかに平均付着応力は増大していることも認められる。

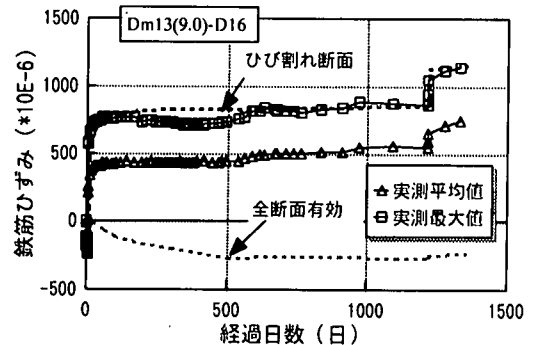


図-14 鉄筋ひずみの経時変化(NL32)

表-7 鉄筋ひずみの経時変化

No. 名称	引張鉄筋ひずみ(*10E-6)					
	経過日数	8日*1	23日	500日	1200日	1300日
NL22 Dm16 (7.1)- D16	平均値①	542	734	815	984	1,139
	最大値②	798	938	1,026	1,146	1,301
	②-①	256	204	211	162	162
	解析*2③	959	1,012	1,051	1,061	1,284
	③/②	1.20	1.08	1.02	0.93	0.99
NL32 Dm13 (9.0)- D16	平均値④	219	401	441	559	752
	最大値⑤	576	735	740	873	1,160
	⑤-④	357	334	299	314	408
	解析*2⑥	696	783	842	860	1,167
	⑥/⑤	1.21	1.07	1.14	0.99	1.01

\*1:プレストレス導入時からの経過日数で持続載荷直後

\*2:ひび割れ断面の解析値

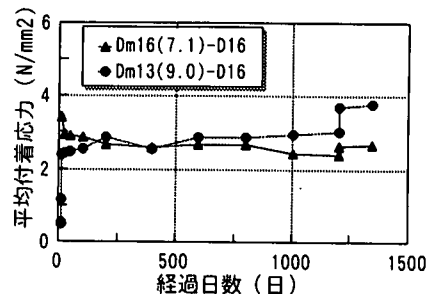


図-15 平均付着応力の経時変化

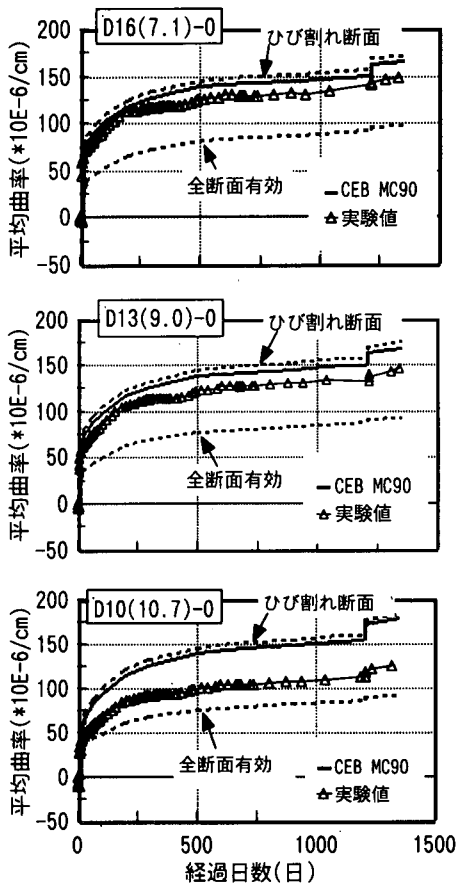


図-16 平均曲率の経時変化  
(上からNL20, NL30, NL40)

### (5) 平均曲率の経時変化

平均曲率の経時変化について、代表的なP R C供試体の結果を図-16に示す。また、全供試体について、平均曲率の経過日数1360日における実測値と解析値の比較を表-8に示す。解析値としては、全断面有効断面、ひび割れ断面およびテンションスティフニング効果を考慮したMC90式(16)（この場合、 $\beta_2=0.5$ を使用）による平均曲率の結果を示している。解析値は、RCのNL10, NL12については予測精度が高いが、導入プレストレス量が大きくなるほど過大評価している。言い換えれば、テンションスティフニング効果を過小評価している。特に、NL40(D10(10.7)-0)については実測値との差は大きい。この理由の一つに、導入プレストレス量が大きく、ひび割れ幅が小さい場合にはひび割れ断面引張域のコンクリート応力が消失しない可能性が考えられる。したがって、ひび割れ発生時の引張域コンクリートを無視したひび割れ断面および全断面の曲率差に基づいて按分する方法では、導入プレストレス量が大きい場合には過小評価するものと考えられる。

表-8 曲率の結果一覧表

NO.	曲率 ( $\times 10^{-6}/\text{cm}$ )		
	実測値 ③	解析値 ④	$\frac{④}{③}$
NL10	145	147	1.01
NL12	122	126	1.03
NL20	147	165	1.12
NL22	136	135	0.99
NL30	145	168	1.16
NL32	110	133	1.21
NL40	126	174	1.38
NL42	94	115	1.22
NL50	131	176	1.34
NL52	63	90	1.43
平均			1.19

ここで、数値は経過日数1360日の値を示す。

解析値: MC90式(16)による計算値を示す。

経過1215日で持続荷重を増加しているが、後続の持続荷重下での平均曲率の解析は、相対的に載荷期間は短い、先行持続荷重下と比べて、変形を大きく評価することが認められる。これは、図-14に示すように最大鉄筋ひずみの高い解析精度を考慮すれば、前述の付着応力の増大によるテンションスティフニングの回復に起因すると考えられる。これまでのテンションスティフニングの評価式には荷重履歴の影響が考慮されておらず、この問題は今後の重要な課題であると考えられる。

### (6) 増加平均曲率に及ぼすクリープと収縮の割合

持続荷重載荷後からの増加平均曲率(以下、増加曲率)に及ぼすクリープと収縮の割合を検討するために、パラメータ解析を行った。解析は、全供試体について本実験と同一条件のもとで収縮ひずみを考慮した場合と無視した場合( $\epsilon_{cs}=0$ )について行い、後者の結果をクリープに起因する増加曲率、前者と後者の差を収縮ひずみに起因する増加曲率とした。中立軸位置に大きな影響を及ぼすプレストレス度を主たる要因とし、クリープと収縮の増加曲率への貢献を、圧縮鉄筋のない場合を図-17に、圧縮鉄筋のある場合を図-18に示す。図中には対応する実測値も併せて示す。これらの図に示す解析結果によれば、クリープによる増加曲率は導入プレストレス量が大きいほど増加するのに対して、収縮による増加曲率は導入プレストレス量に影響なくほぼ一定となる。ただし、圧縮鉄筋があり、導入プレストレス量が大きく全断面に近い場合には収縮による増加曲率は小さくなる。クリープによる増加曲率が導入プレストレス量の増加に伴い増大するのは、後述(7)

断面解析結果に述べる引張鉄筋ひずみの増大と圧縮ひずみの増大によるものであると考えられる。また、収縮による増加曲率の減少は、中立軸が深く圧縮鉄筋と図心との距離が長くなり、式(15)に示されるように変形を抑制する圧縮鉄筋の断面一次モーメントが増大する一方、変形を促進する鉄筋およびP C鋼材の断面一次モーメントが小さくなるためである。入が0.5程度であれば、全増加曲率に占めるクリープの影響は約6割、収縮の影響は約4割である。なお、プレストレス度が大きくなると、先に述べたように、実測の増加曲率は解析値より小さい。これはひび割れ断面のコンクリートの引張応力負担によるもので、全断面の挙動に近くなることを意味すると考えられる。ところで全断面における収縮による増加曲率はプレストレス度の大きさに拘わらず小さく、特に圧縮鉄筋がある場合は、収縮の影響は増加曲率を減少させる方向に作用し、プレストレス度が大きくなるとこの傾向は若干大きくなる。これらのことを考慮すれば、実測値における収縮による増加曲率は、全断面に近くなるプレストレス度が大きくなると、解析値の場合より収縮の影響は小さくなると考えられる。

作用している荷重の相違による応力状態の影響を調べるために、同一供試体について持続荷重レベルを変化させた条件のもとで収縮ひずみを考慮した場合と無視した場合について解析を行った。その結果、図には示していないが、圧縮鉄筋がない場合には応力状態に関係なく前述と同様にほぼ一定の結果となっている。圧縮鉄筋のあるNL32(Dm13(9.0)-D16)について、図-19に持続荷重載荷直後の引張鉄筋応力度をx軸にとって示すが、前述と同様に持続荷重レベルが小さく持続荷重下で中立軸位置が深い場合を除いて、ほぼ一定の値を示す。

これらのことから、高プレストレスレベルで、厳しいひび割れ幅制御を受ける部材の場合には、単純にクリープ変形と収縮変形を加算できない可能性があると言えよう。

### (7) 断面解析結果

現行の部材設計では、クリティカルとなるひび割れ断面の応力が必要となる。そこで、本実験における供試体および載荷条件を対象にして、持続荷重を変化した場合を含む、次の(a)~(f)の時点における断面のひずみおよび応力分布の解析結果の一例を図-20、21に示す。ただし、ひび割れが生じていない時点(a)、(b)では全断面有効の解析結果を、ひび割れが生じている時点(c)、(d)、(e)、(f)ではひび割れ断面の解析結果を示している。

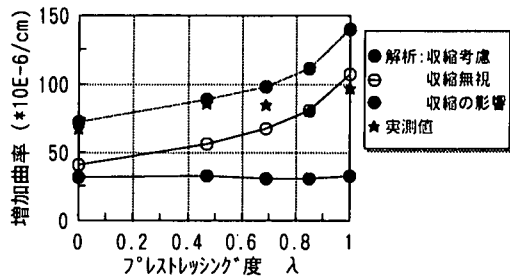


図-17 増加曲率-収縮-プレストレスング度の関係 (圧縮鉄筋がない場合)

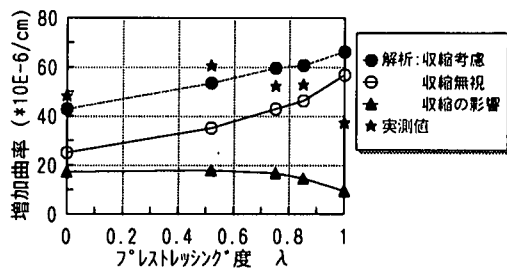


図-18 増加曲率-収縮-プレストレスング度の関係 (圧縮鉄筋のある場合)

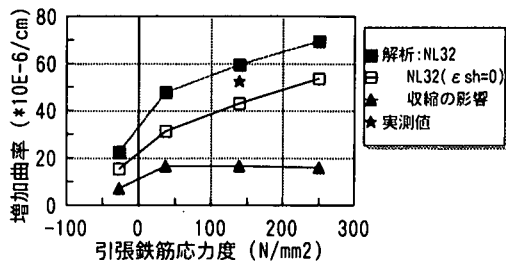


図-19 増加曲率-収縮-引張鉄筋応力度の関係

- (a)プレストレス導入直後(経過日数 0日)
- (b)持続荷重載荷直前(経過日数 8日)
- (c)持続荷重載荷直後( // , M=22.2kN・m)
- (d)持続荷重増加前(経過日数1215日, // )
- (e)持続荷重増加後( // , M=25.1kN・m)
- (f)持続荷重終了時(経過日数1366日, // )

図-20は圧縮鉄筋のない供試体、図-21は圧縮鉄筋のある供試体の場合を示す。持続荷重下の挙動として、クリープと収縮の変化量の大きい(c)~(d)に着目し、圧縮鉄筋のない場合がある場合と比較すると、曲率の増加は大きく、また、断面応力の再分配により中立軸が下がることによってP C鋼材の引張応力が減少し、その分の引張力を鉄筋が負担するために引張応力の増加が顕著となっている。

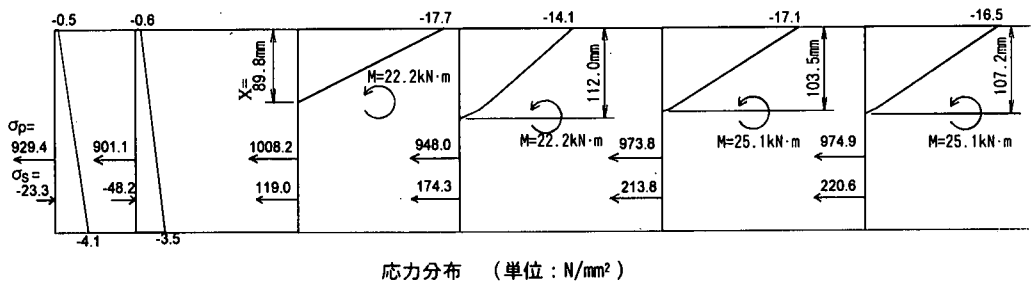
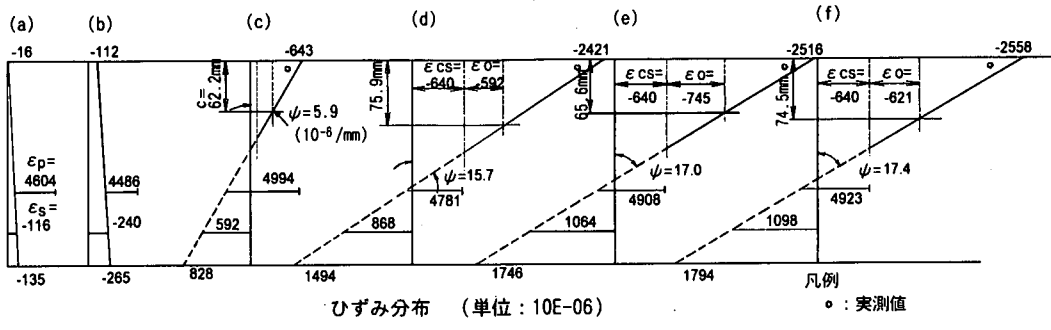


図-20 断面のひずみと応力分布( D13(9.0)-0 )

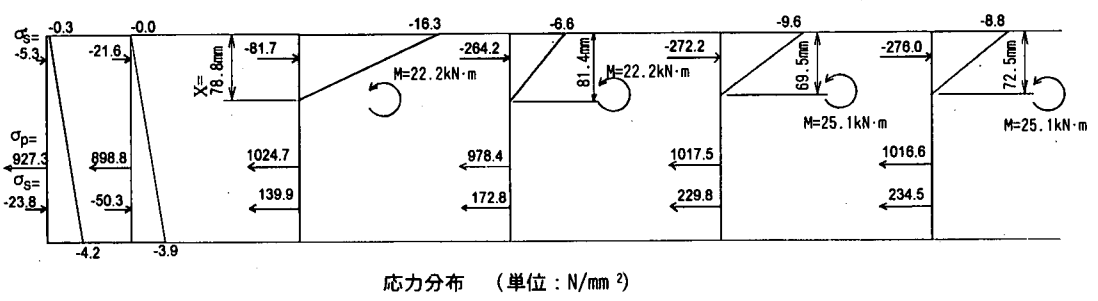
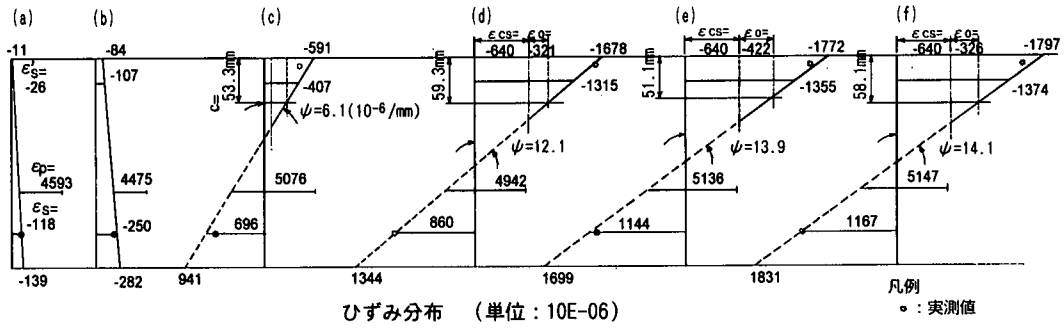


図-21 断面のひずみと応力分布( Dm13(9.0)-D16 )

圧縮鉄筋がある場合には、圧縮域コンクリートのクリープ、収縮による進行を鉄筋が拘束するため曲率の増加は抑制されるが、圧縮域のコンクリート応力が鉄筋に移行するため、圧縮鉄筋の圧縮応力の増加が顕著となっている。中立軸はわずかに下がるので、圧縮鉄筋のない場合と同様に引張鉄筋の応力度の増加が見られるがその量は圧縮鉄筋のない場合ほどではない。

このように持続荷重下で中立軸が下がり、PC鋼材の引張応力が減少することによる引張鉄筋応力度の増加は、PC鋼材が中立軸に近く、PC鋼材断面積が引張鉄筋断面積に比べて大きい場合、本実験の場合で言い換えれば、導入プレストレス量が多い場合ほど顕著になる。このような場合には、ひび割れ幅算定における引張鉄筋応力度として、持続荷重

下の増加量を考慮しないとひび割れ幅を過小評価することが考えられる。

また、持続荷重下で中立軸の変動は鋼材応力に影響を及ぼすが、その下がる量はここでは示していないが、導入プレストレス量が大きい場合程小さい。中立軸の下がる量が小さい場合にはコンクリートの応力緩和は小さく、クリープによる圧縮ひずみの増加は大きくなる。

図中には、コンクリートの平均圧縮ひずみの実測値および引張鉄筋ひずみの実測最大値をプロットしているが、実測値においても持続荷重下における引張鉄筋ひずみの増加現象が解析結果と同様に認められ、解析値は持続荷重の変化を含む各時点で、実測値を比較的精度良く評価している。

## 6. 結論

本研究の範囲で得られた結論は以下の通りである。

(1) 重ね合わせの原理に基づくstep-by-step法を用いて考慮している時点でのコンクリート応力式(9)を導き、これを釣合式に直接持ち込むことにより、プレストレス導入直後から段階的に増大する持続荷重の任意材齢までの変形および応力に対して、連続的に適用可能なクリープ解析を提示した。

(2) 本クリープ解析により、ひび割れ幅算定のための鉄筋位置のコンクリート応力が0の状態からの鉄筋応力度の増加量は、クリープ、収縮によってひび割れ発生までに生じた鉄筋の圧縮ひずみが大きい方が大きくなることを示した。

(3) ひび割れ断面における本クリープ解析は、持続荷重が2段階に増加した場合を含み、引張鉄筋ひずみおよびコンクリートの圧縮ひずみを良い精度で予測し得ることが認められた。ただし、引張鉄筋ひずみは持続荷重載荷および載荷後初期の段階において過大に評価した。これは、本実験のように持続荷重載荷で鉄筋応力が $100\text{N}/\text{mm}^2$ 程度を超える場合には、コンクリートが持続荷重載荷時点でひび割れ断面引張域で応力を負担するが、その後15日間程度で急速に消失する現象を無視したためであると考えられる。

(4) 鉄筋ひずみから得られた最大値と平均値の差および平均付着応力の持続荷重下での経時変化は、一定の持続荷重下ではほぼ一定か若干小さくなる傾向を示す。しかし、持続荷重が増大した後では、差はむしろ大きくなる傾向を示し、先行持続荷重下で、テンションスティフニング、すなわち付着は回復でき得るほどの状態が維持されているものと考えられる。

(5) CEB-FIP MODEL CODE 1990を取り入れた本クリープ解析は、一定の持続荷重を受ける平均曲率に対して、RCおよび導入プレストレス量が小さいPRCの場合には概ね精度よく予測できる。しかし、導入プレストレス量が大きい場合には過小に評価することが認められた。この理由の一つに、導入プレストレス量が大きく、ひび割れ幅が小さい場合にはひび割れ断面引張域のコンクリート応力が消失しない可能性が考えられる。したがって、ひび割れ発生時の引張域コンクリートを無視したひび割れ断面および全断面の曲率差に基づいて按分する方法では、按分の程度を変えても導入プレストレス量が大きい場合には過小評価するものと考えられる。

(6) 本クリープ解析は、持続荷重を増大した後の持続荷重下での平均曲率を大きく評価した。これは、(4)に述べたように、持続荷重の増大により付着応力が大きくなったためである。これは、テンションスティフニングに荷重履歴の影響を考慮する事の必要性を意味する。

(7) 本クリープ解析により、持続荷重下の全増加平均曲率に及ぼすクリープによる増加平均曲率は導入プレストレス量が大きいほど増加するのに対して、収縮による増加平均曲率は導入プレストレス量に影響なくほぼ一定となることを示した。ただし、圧縮鉄筋があり、導入プレストレス量が大きく全断面に近い場合には収縮による増加平均曲率は小さくなる。プレストレス度入が0.5程度であれば、全増加平均曲率に占めるクリープの影響は約6割、収縮の影響は約4割であった。

(8) ひび割れ断面の本クリープ解析において、持続荷重下で断面応力の再分配により中立軸が下がり、これによってPC鋼材の引張応力度が減少し、その分の引張力を鉄筋が負担するために引張鉄筋応力度が増加することを示し、実験からもこれに良く一致する現象が認められた。このような引張鉄筋応力度の増加は、PC鋼材が中立軸に近く、PC鋼材断面積が引張鉄筋断面積に比べて大きい場合ほど顕著になる。このような場合には、ひび割れ幅算定時の引張鉄筋応力度として、持続荷重下の増加量を考慮しないとひび割れ幅を過小評価することが考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり宇都宮大学大学院生、津田守氏（現東京電力(株)）、阿部司氏（現東日本旅客鉄道(株)）、袖山隆行氏、学部生陳建宏氏、オリエンタル建設(株)落合勝氏ら多くの方々の協力を得た。また、(財)鉄道総合技術研究所涌井一氏には貴重な助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 横道英雄, 角田与史雄: PRCはりのひずみにおよぼすクリープおよび収縮の影響について, セメント技術年報XX, pp.406-410, 1966.
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 [平成8年制] 設計編, 1996.
- 3) 鈴木計夫, 大野義照, 花房隆: プレストレスト鉄筋コンクリートはりの長期曲げひびわれ幅とたわみについて, セメント技術年報 33, pp.508-512, 1979.
- 4) 鈴木計夫, 大野義照, 栗田佳彦, 横田聡: 持続荷重下におけるプレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げ性状, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.481-484, 1985.
- 5) 猪股俊司: パーシャルプレストレストコンクリート部材断面の設計法, 土木学会論文集, 第348号, V-1, pp.1-12, 1984.8.
- 6) Inomata, S.: An Approach for Creep Analysis of Cracked Partially Prestressed Concrete Members, PCI Journal, pp.104-125, January-February 1987.
- 7) 猪股俊司: 構造コンクリート曲げ部材使用限界状態の統一設計計算法, コンクリート工学, Vol.26, No.12, pp.1-11, Dec. 1988.
- 8) Ghali, A. and Tadros, M. K.: Partially Prestressed Concrete Structures, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No.8, pp.1846-1865, August 1985.
- 9) Ghali, A. and Elbadry, M. M.: Serviceability Design of Continuous Prestressed Concrete Structures, PCI Journal, pp.54-91, January-February 1989
- 10) Rao, A. S. P. and Jayaraman, R.: Creep and Shrinkage Analysis of Partially Prestressed Concrete Members, Journal of Structural Engineering, ASCE, V.115, No.5, pp.1169-1189, May 1989.
- 11) Rao, S. V. K. M., Rao, A. S. P. and Dilger, W. H.: Time-Dependent Analysis of Cracked Partially Prestressed Concrete Members, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.119, No.12, pp.3571-3589, Dec. 1993.
- 12) 小宮正久, 酒井一, 前田春人: コンクリートのクリープ・乾燥収縮を考慮した断面曲げ解析, プレストレストコンクリート, Vol.34, No.6, pp.59-71, Nov. 1992.
- 13) Teng, S. and Branson, D. E.: Initial and Time-Dependent Deformation of Progressively Cracking Nonprestressed and Partially Prestressed Concrete Beams, ACI Structural Journal, pp.480-489, September-October 1993.
- 14) 高海克彦: P P C はりのクリープ有限要素解析法コンクリート工学論文集, 第6巻第1号, pp.65-71, 1/1995.
- 15) Gutiérrez, S. E., Cudmani, R. O. and Danesi, R. F.: Time-Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Members, ACI Structural Journal, pp.420-427, July-August 1996.
- 16) CEB: Manual on Cracking and Deformation, Bulletin D'Information No.158, 1985
- 17) 山本浩嗣, 佐藤良一, 涌井一, 落合勝: PRC部材の長期変形挙動の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.973-978, 1994.
- 18) CEB-FIP: MODEL CODE 1990.
- 19) Ghali, A. and Trevino, J.: Relaxation of Steel in Prestressed Concrete, PCI Journal, pp.82-94, September-October 1985.
- 20) 館石和雄, 大庭光商, 竹内研一, 津吉毅: PRC桁の設計における乾燥収縮度の影響について, 構造工学論文集, Vol.36 A, pp.1185-1190, 3/1990.

(1997.11.6 受付)

## A STUDY ON LONG-TERM DEFORMATION AND STRESS OF PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE MEMBERS

Masamichi TEZUKA, Ryoichi SATO, Hirotsumu YAMAMOTO  
and Seiichi TOTTORI

A new creep analysis method based on principle of superposition for concrete is proposed, which can analyze not only deformations but also stresses of prestressed reinforced concrete (PRC) members under sustained loads at any ages between the age at prestressing and the age considered. Time-dependent deformation and stress of PRC members, which are cracked by instantaneous loads and afterwards sustained load is increased in two steps, is experimentally studied and the present analysis method is investigated comparing the computed results with experimental results. As a consequence, the present analysis method showed fairly good agreement with experimental results, which overestimated average curvature of the member prestressed higher and that subjected to increased sustained load. Furthermore, the effect of creep and that of shrinkage of concrete on long-term deformation are estimated numerically.