

## 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

小宮 正久<sup>\*1</sup>・酒井 一<sup>\*2</sup>・前田 晴人<sup>\*3</sup>

### まえがき

コンクリート部材の使用および疲労限界状態の検討を行うためには、断面におけるコンクリート、鉄筋、PC鋼材等の応力度を求める必要があり、これらの応力度の算出をコンクリート断面の曲げ解析と呼ぶこととする。

現在行われている曲げ解析法は、コンクリートのクリープ、乾燥収縮の取扱い方により、次の3種類に分類される。

#### (1) コンクリートのクリープ、乾燥収縮を無視した解析法

一般のRC断面の応力度の計算（コンクリートと鉄筋のヤング係数比( $n$ )を15とすることによってコンクリートのクリープ、乾燥収縮の影響を考慮したことになっている）に用いられているのと同じ方法であり、プレストレス力が作用する場合のプレストレス力は、外力として取り扱い、その値としては、導入直後の値を用いる。したがって使用および疲労限界状態の検討方法において、別途コンクリートのクリープ、乾燥収縮の影響を考慮する必要がある。（例えば、土木学会制定のコンクリート標準示方書〔以下、標準示方書という〕では、使用限界状態の検討において、鋼材ひずみが乾燥収縮ひずみ相当増加するものとしてひびわれ幅の計算を行うことによりこの影響を考慮している。なお、この場合の荷重による鋼材応力度の増加量の計算に用いるヤン

グ係数比には15ではなく、標準示方書のヤング係数の規定値の比がそのまま用いられる。）

また、プレストレス導入のために配置したPC鋼材は、引張材の一部として曲げ解析に考慮しなければならない。

- (2) ひびわれが発生する場合であっても、コンクリートのクリープ、乾燥収縮の影響のみひびわれが発生していないものとして取り扱う解析法  
(1)の方法に、ひびわれが発生していないものと仮定して求めたコンクリートのクリープ、乾燥収縮の影響（一般のPC部材に用いられている解析手法が適用できる）を外力として取り込んだ断面解析法である。

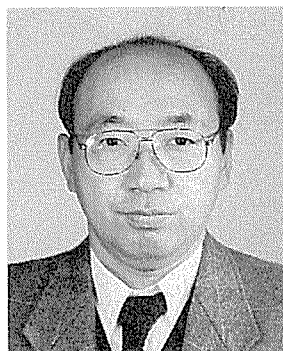
#### (3) 断面の状態に応じてクリープ、乾燥収縮の影響を取り扱う解析法

断面の状態（ひびわれの有無）に応じてコンクリートのクリープ、乾燥収縮の影響を考慮する解析法であり、理論的には、最も厳密な方法である。この解析法としては、材令係数を利用した猪股<sup>1)</sup>、Troost等のものがある。

以上(1)、(2)の解析方法は、計算は簡便であるが、それぞれに大胆な仮定が設定されており、RC部材からPC部材まで、すべてのプレストレスレベルにおけるコンクリート部材の使用および疲労限界状態の検討に適用可能であるが解析的にも確かめられておらず、この点を明らかにする必要がある。



<sup>\*1</sup> Masahisa KOMIYA  
 (株)日本構造橋梁研究所  
 設計第2部部長



<sup>\*2</sup> Hajime SAKAI  
 (株)日本構造橋梁研究所  
 システム課課長



<sup>\*3</sup> Haruhito MAEDA  
 (株)日本構造橋梁研究所  
 設計第2部設計第5課

また、比較的厳密な解が得られる猪股等の方法にも、材令係数の妥当性、段階的に持続荷重が作用する場合における適用性等の問題がある。

本論文においては、クリープ係数、乾燥収縮度を直接的に取り扱った、段階的な荷重載荷等のすべての条件に適用し得る新しい解析法を提案するとともに、上記に示した各解析法との比較を行い、その適用性について理論的に検討するものとする。

また、任意のプレストレスレベルに応じた使用および疲労限界状態の検討に用いる鋼材応力度の増加量の計算方法についても示すこととする。提案する計算方法は、コンクリートのクリープ、乾燥収縮の経時変化が取り扱い易く、電子計算機の利用に便利で厳密な解の得られる区分求積法によるものとする。

### 1. 区分求積法によるコンクリート断面の曲げ解析法

#### (1) 仮定条件

コンクリートのクリープ、乾燥収縮に関する断面の曲げ解析を区分求積法で行うために、次のように仮定する(図-1参照)。

- ① あらゆる場合について平面保持則が成立するものとする。
- ② ひび割れ断面引張区間コンクリートは無視するものとする。
- ③ 付着ある鉄筋、PC鋼材のひずみ変化と同維コンクリートひずみ変化とは一致するものとする。
- ④ 各材料のヤング係数は一定とする(経時的に変化しないものとする)。
- ⑤ 引張縁コンクリート応力度が設計引張強度となる時曲げひびわれが発生するものとする。
- ⑥ 曲げモーメント、応力などの符号は、次のとおりとする。

- ・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。
- ・圧縮応力および短縮ひずみを正とする。
- ・正の曲げモーメントに対する断面曲率を正とする。
- ・座標原点を圧縮縁にとり下方に正とする。

- ⑦ 断面内のひずみおよび応力分布は図-1のとおりとする。

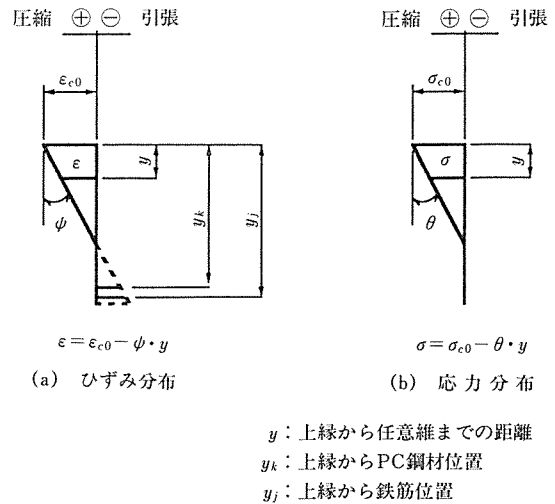


図-1 基本となる応力-ひずみ分布(正の曲げ作用時)

#### (2) 区分求積法における基本式の誘導手順

次項(3)では区分求積法における応力-ひずみの関係式を導く。

まずはじめに1つの持続応力が作用した場合の応力-ひずみの関係式((1)式)を示し、次に持続荷重が時間とともに変化する場合、積分を用いた一般的な応力-ひずみ関係式((2)式)を示す。この関係式に台形則を適用し、区分求積法における応力-ひずみ関係式((4)式)を導く。さらに着目時点 $t_n$ におけるひずみを着目時点1つ前のひずみと、その間に発生したひずみの和で表した漸化式((8)式)を誘導し、これを区分求積法における応力-ひずみ関係の基本式とする。この時、一般式におけるサフィックスと、区分求積法で使用するサフィックスとの対応は表-1に示すとおりである。

(4)項では、鉄筋とPC鋼材を含めた断面内の力つり合い((9)式)に(3)項で求めた応力-ひずみ関係式を代入して、変形法の基本式((14)式)を誘導する。

表-1 一般的な式と区分求積法による式の記号

	積分を用いた一般式(2)	区分求積法による式(4),(8)
・最初の持続荷重作用時点	$t_0$	$t_0$
・着目時点	$t_n$	$t_n$
・ $t_0$ から $t_n$ 間の任意時点	$\tau$	$t_i$
・(任意)時点 $t_i$ での応力	$\sigma(\tau)$	$\sigma_i = \sigma(t_i)$
・同上 ひずみ	-	$\varepsilon_i = \varepsilon(t_i - t_0)$
・時点 $t_{i-1}$ から $t_i$ までの時間 $\Delta t_i$ に生ずる応力	$d\sigma(\tau)$	$\Delta\sigma_i = \sigma_i - \sigma_{i-1}$
・同上 ひずみ	-	$\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}$
・着目時点 $t_n$ での $\Delta\sigma_i$ に対するクリープ関数	$\Phi(t_n, \tau)$	$\frac{1}{2}(\Phi_{n,i} + \Phi_{n,i-1})$
・着目時点 $t_n$ での応力	-	$\sigma_n$
・同上 ひずみ	$\varepsilon(t_n, t_0)$	$\varepsilon_n$
・同上 乾燥収縮ひずみ	$\varepsilon_{sh}(t_n, t_0)$	$\varepsilon_{sh,n}$
・時点 $n-1$ から着目時点 $n$ までに進行した乾燥収縮ひずみ	-	$\Delta\varepsilon_{sh,n}$
・任意時点 $i$ から着目時点 $n$ までに進行したクリープ係数	-	$\phi_{n,i} = \phi(t_n, t_i)$

(3) 区分求積法における経時ひずみの取扱い

一般的に時点  $t_0$  で持続応力を作用させたとき、着目時点  $t_n$  における全ひずみ  $\varepsilon(t_n, t_0)$  は、時点  $t_0$  での初期弾性ひずみと時点  $t_n$  までに生じたクリープおよび乾燥収縮によるひずみの和として次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \varepsilon(t_n, t_0) &= \frac{\sigma(t_0)}{E_c} \{1 + \phi(t_n, t_0)\} + \varepsilon_{sh}(t_n, t_0) \\ &= \sigma(t_0) \cdot \Phi(t_n, t_0) + \varepsilon_{sh}(t_n, t_0) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$\sigma(t_0)$  : 時点  $t_0$  で作用する持続応力

$\phi(t_n, t_0)$  :  $\sigma(t_0)$  に対する着目時点  $t_n$  でのクリープ係数

$E_c$  : コンクリートのヤング係数

$\Phi(t_n, t_0)$  :  $\frac{1}{E_c} \{1 + \phi(t_n, t_0)\}$  (クリープ関数という)

$\varepsilon_{sh}(t_n, t_0)$  :  $t_0$  から  $t_n$  までに進行する乾燥収縮ひずみ

また、時間  $t_0$  から  $t_n$  までに何らかの原因によって、コンクリートの経時ひずみが拘束されたことにより発生した応力によるひずみは、これらを累加することができるものとする、次のように表すことができる。

$$\varepsilon(t_n, t_0) = \int_{t_0}^{t_n} \Phi(t_n, \tau) d\sigma(\tau) + \varepsilon_{sh}(t_n, t_0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$\tau$  :  $t_0 \leq \tau \leq t_n$  期間での変数

$\Phi(t_n, \tau)$  : 時点  $\tau$  に載荷された単位応力に対する着目時点  $t_n$  でのクリープ関数

このうち右辺第1項の積分式は、近似的に台形則を用いて区分求積法におきかえることができる。

$t_0$  から  $t_n$  までの間の任意時点  $t_i$  での応力およびひずみをそれぞれ  $\sigma_i = \sigma(t_i)$ ,  $\varepsilon_i = \varepsilon(t_i, t_0)$  と表し、時点  $t_{i-1}$  と  $t_i$  との期間  $\Delta t_i$  に生ずる応力およびひずみの増減分をそれぞれ  $\Delta\sigma_i = \sigma_i - \sigma_{i-1}$ ,  $\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}$  とする。また時点  $t_n$  ( $t_n > t_i > t_{i-1}$ ) でのクリープ関数を、それぞれ  $\Phi_{n,i} = \Phi(t_n, t_i)$ ,  $\Phi_{n,i-1} = \Phi(t_n, t_{i-1})$  と表すと  $t_{i-1}$  から  $t_i$  までの(2)式中の積分式は近似的に次のようになる(図-2参照)。

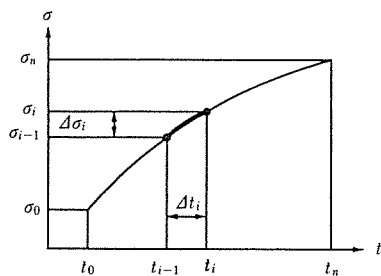
$$\int_{t_{i-1}}^{t_i} \Phi(t_n, \tau) d\sigma(\tau) \approx \frac{1}{2} (\Phi_{n,i} + \Phi_{n,i-1}) \Delta\sigma_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

したがって、時間軸  $t$  上に  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n$  なる  $(n+1)$  個の時点を選定した場合、 $t_n$  時点でのひずみは(2)式に(3)式を代入し、乾燥収縮ひずみを  $\varepsilon_{sh,n} = \varepsilon_{sh}(t_n, t_0)$  とすると、次のように表すことができる。

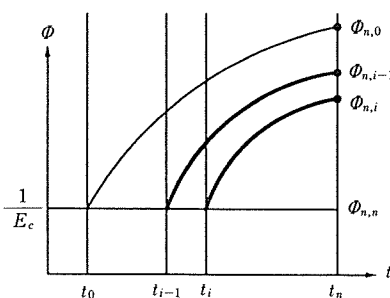
$$\varepsilon_n = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\Phi_{n,i} + \Phi_{n,i-1}) \Delta\sigma_i + \varepsilon_{sh,n} \quad \dots\dots\dots (4)$$

また  $t_{n-1}$  時点では、

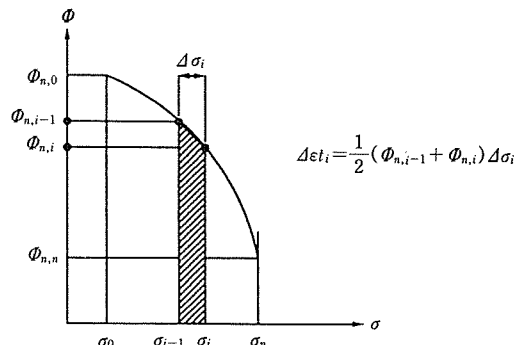
$$\varepsilon_{n-1} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (\Phi_{n-1,i} + \Phi_{n-1,i-1}) \Delta\sigma_i + \varepsilon_{sh,n-1} \quad \dots\dots\dots (5)$$



(a)



(b)



(c)

図-2 区分求積法による累加ひずみの考え方

$t_{n-1}$  から  $t_n$  時点の間のひずみ変化は (4) 式と (5) 式から

$$\begin{aligned} \varepsilon_n - \varepsilon_{n-1} = & \frac{1}{2} (\Phi_{n,n} + \Phi_{n,n-1}) \Delta \sigma_n \\ & + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (\Phi_{n,i} + \Phi_{n,i-1} - \Phi_{n-1,i} - \Phi_{n-1,i-1}) \\ & \cdot \Delta \sigma_i + \Delta \varepsilon_{sh,n} \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

$\Phi_{n,i} = \frac{1}{E_c} (1 + \Phi_{n,i})$  より, (6) 式は,

$$\begin{aligned} \varepsilon_n - \varepsilon_{n-1} = & \frac{\Delta \sigma_n}{E_c} \left( 1 + \frac{\phi_{n,n-1}}{2} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta \sigma_i}{E_c} \\ & \cdot \left( \frac{\phi_{n,1} + \phi_{n,i-1}}{2} - \frac{\phi_{n-1,i} + \phi_{n-1,i-1}}{2} \right) \\ & + \varepsilon_{sh,n} \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

となる。ただし,  $\phi_{n,n} = 0$  である。

(7) 式を変形すると, 区積分積法における応力-ひずみ関係式は次のとおりである。

$$\begin{aligned} \varepsilon_n - \varepsilon_{n-1} = & \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta \sigma_i}{E_c} (\overline{\phi_{n,i}} - \overline{\phi_{n-1,i}}) + \frac{1}{E_c} \\ & \cdot (\sigma_n - \sigma_{n-1}) + \Delta \varepsilon_{sh,n} \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

ここに,

$$\overline{\phi_{n,i}} = \frac{1}{2} (\phi_{n,i} + \phi_{n,i-1})$$

$$\overline{\phi_{n-1,i}} = \frac{1}{2} (\phi_{n-1,i} + \phi_{n-1,i-1})$$

$$\overline{E_c} = E_c / \left( 1 + \frac{1}{2} \phi_{n,n-1} \right)$$

#### (4) 区積分積法による断面曲げ解析の基本式

図-1 に示すような応力-ひずみ分布状態の, 断面内での力つり合いを考える。断面内の力つり合いの一般式は (9) 式で表すことができる。

$$\begin{aligned} N = & \int_{Ac} \sigma dA + E_s \sum_j^j A_{s,j} (\varepsilon_{c0} - \phi y_j) \\ & + E_p \sum_k^k A_{p,k} (\varepsilon_{c0} - \phi y_k) \dots \dots (9 a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M = & \int_{Ac} \sigma dQ + E_s \sum_j^j A_{s,j} (\varepsilon_{c0} - \phi y_j) y_j \\ & + E_p \sum_k^k A_{p,k} (\varepsilon_{c0} - \phi y_k) y_k \\ & \dots \dots \dots (9 b) \end{aligned}$$

ここに,

$\int_{Ac}$ : コンクリートの圧縮部分についての積分を表す

$\sigma$ : 断面内のコンクリート応力分布

$dA, dQ$ : 微小区間の断面積および断面 1 次モーメント

$E_s, E_p$ : 鉄筋および PC 鋼材のヤング率

$A_{s,j}, A_{p,k}$ : 圧縮縁から  $y_j$  の位置の鉄筋断面積と  $y_k$  の位置の PC 鋼材断面積

$\varepsilon_{c0} - \phi y_j$ : 鉄筋位置  $y_j$  におけるひずみ

$\varepsilon_{c0} - \phi y_k$ : PC 鋼材位置  $y_k$  におけるひずみ

ただし, プレストレス力は, 外力扱いとし, 左辺の  $N, M$  に含まれるものとする。

次に (9) 式の右辺  $\sigma$  に, (8) 式の応力-ひずみ関係式を応力について解いた結果を代入して整理し, 変形法の基本式を求める。

まず (8) 式を変形して応力について解くと,

$$\begin{aligned} \sigma_n = & \overline{E_c} \varepsilon_n - \overline{E_c} \varepsilon_{n-1} + \sigma_{n-1} \\ & - \overline{E_c} \left\{ 1/E_c \sum_{i=1}^{n-1} \Delta \sigma_i (\overline{\phi_{n,i}} - \overline{\phi_{n-1,i}}) + \Delta \varepsilon_{sh,n} \right\} \\ & \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

また, 任意時点  $i$  における応力-ひずみを, 断面内での積分 ( $y$  方向) が可能となるように次式で表す (図-1 参照)。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_i = & \varepsilon_{c0,i} - \phi_i y \\ \sigma_i = & \sigma_{c0,i} - \theta_i y \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (11)$$

これらを (10) 式に代入すると  $\sigma_n$  は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \sigma_n = & \overline{E_c} (\varepsilon_{c0} - \phi_n y) - \overline{E_c} (\varepsilon_{c0,n-1} - \phi_{n-1} y) \\ & + (\sigma_{c0,n-1} - \theta_{n-1} y) - \overline{E_c} \left\{ 1/E_c \sum_{i=1}^{n-1} \right. \\ & \left. (\Delta \sigma_{c0,i} - \Delta \theta_i y) (\overline{\phi_{n,i}} - \overline{\phi_{n-1,i}}) + \Delta \varepsilon_{sh,n} \right\} \\ & \dots \dots \dots (12) \end{aligned}$$

この  $\sigma_n$  を断面内のつり合い式 (9) の  $\sigma$  へ代入すると, 着目時点  $n$  における力つり合いは,

$$\begin{aligned} N = & \overline{E_c} \int_{Ac} (\varepsilon_{c0,n} - \phi_n y) dA - \overline{E_c} \int_{Ac} \{ (\varepsilon_{c0,n-1} \\ & - \phi_{n-1} y) + \Delta \varepsilon_{sh,n-1} / \overline{E_c} (\sigma_{c0,n-1} - \theta_{n-1} y) \\ & + 1/E_c \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta \sigma_{c0,i} - \Delta \theta_i y) (\overline{\phi_{n,i}} - \overline{\phi_{n-1,i}}) \} dA \\ & + E_s \sum_j^j A_{s,j} (\varepsilon_{c0,n} - \phi_n y_j) + E_p \sum_k^k A_{p,k} \\ & \cdot (\varepsilon_{c0,n} - \phi_n y_k) \dots \dots \dots (13 a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M = & \overline{E_c} \int_{Ac} (\varepsilon_{c0,n} - \phi_n y) dQ - \overline{E_c} \int_{Ac} \\ & \{ (\varepsilon_{c0,n-1} - \phi_{n-1} y) + \Delta \varepsilon_{sh,n-1} / \overline{E_c} \\ & \cdot (\sigma_{c0,n-1} - \theta_{n-1} y) + 1/E_c \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta \sigma_{c0,i} - \Delta \theta_i y) \\ & \cdot (\overline{\phi_{n,i}} - \overline{\phi_{n-1,i}}) \} dQ + E_s \sum_j^j A_{s,j} (\varepsilon_{c0,n} - \phi_n y_j) y_j \\ & + E_p \sum_k^k A_{p,k} (\varepsilon_{c0,n} - \phi_n y_k) y_k \dots \dots \dots (13 b) \end{aligned}$$

(13) 式を整理して,

$$\begin{bmatrix} EA_e & -E Q_e \\ -E Q_e & -E I_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{c0,n} \\ \phi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \overline{N} \\ \Delta \overline{M} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (14 a)$$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} EA_e = & \overline{E_c} A_c + E_s \sum_j^j A_{s,j} + E_p \sum_k^k A_{p,k} \\ EQ_e = & \overline{E_c} Q_c + E_s \sum_j^j A_{s,j} y_j + E_p \sum_k^k A_{p,k} y_k \\ EI_e = & E_c I_c + E_s \sum_j^j A_{s,j} y_j^2 + E_p \sum_k^k A_{p,k} y_k^2 \end{aligned} \right\} (14 b)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{N} \\ \Delta \bar{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{E}_c A_c & -\bar{E}_c Q_c \\ \bar{E}_c Q_c & \bar{E}_c I_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{c0,n-1} + \Delta \varepsilon_{sh,n-1} / \bar{E}_c \sigma_{c0,n-1} + 1 / \bar{E}_c \sum_{i=1}^{n-1} \Delta \sigma_{co,i} \\ \phi_{n-1} - 1 / \bar{E}_c \theta_{n-1} + 1 / \bar{E}_c \sum_{i=1}^{n-1} \Delta \theta_i (\phi_{n,i} - \phi_{n-1,i}) \end{bmatrix} \dots (14c)$$

となる。

実際の計算は、①～③の手順を繰り返すことにより行う。

- ① 応力0の点の座標  $y_n$  を仮定する。
- ②  $y_n$  について (14 b), (14 c) を計算し, (14 a) 式に代入して  $\varepsilon_{c0,n}$  と  $\phi_n$  を計算する。
- ③ 求められた  $\varepsilon_{c0,n}$ ,  $\phi_n$  と仮定した  $y_n$  を (12) 式に代入し, 仮定した  $y_n$  が応力0 ( $\sigma_n=0$ ) の条件を満たすまで①～③の手順を繰り返し解を求める。

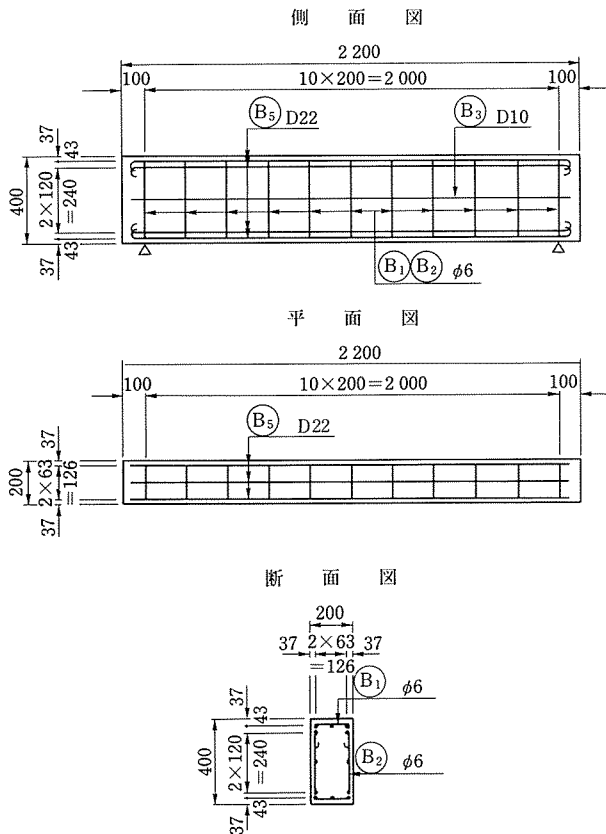


図-3 コンクリート試験桁配筋図

(14) 式および (12) 式は漸化式であるので, 着目時点  $n$  の各時点  $i=1 \sim n-1$  までの解はすべて得られている。

## 2. 提案した区分求積法の妥当性の検証

提案した区分求積法の妥当性を確かめるために, PPC 桁の試験結果と区分求積法の解析結果を比較してみることにする。

PPC 桁の試験は, 図-3 に示すようなプレストレスレベルと鉄筋量を変化させた 12 体の供試体について, コンクリートのクリープ・乾燥収縮による経時変化を 1 年間測定後, 短期載荷試験を行なったものである。ここでは, その中から図-4 に示すようなプレストレス力の偏心量が最も大きく, ひずみ等の測定値が最も明確であった供試体についての比較結果のみを示すことにする。

### (1) 経時変化

コンクリートのクリープ, 乾燥収縮による上側および

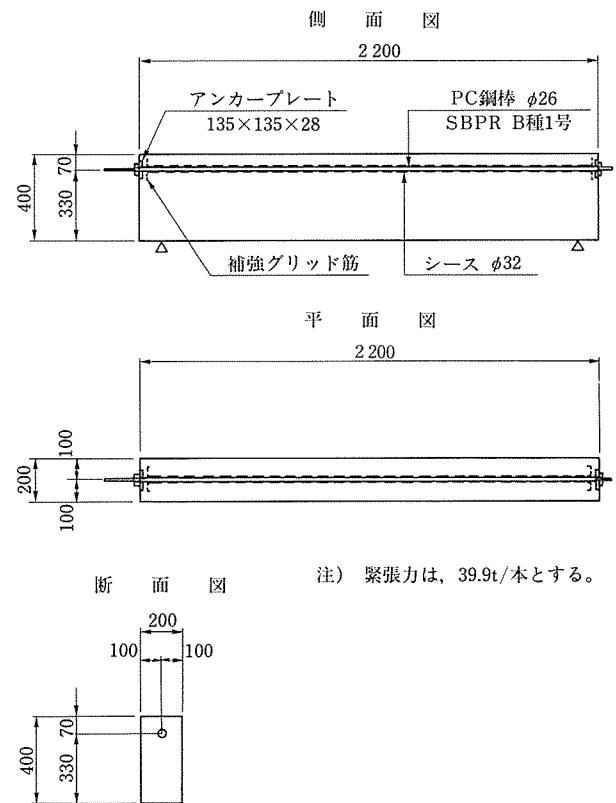


図-4 試験桁 PC 鋼材配置図

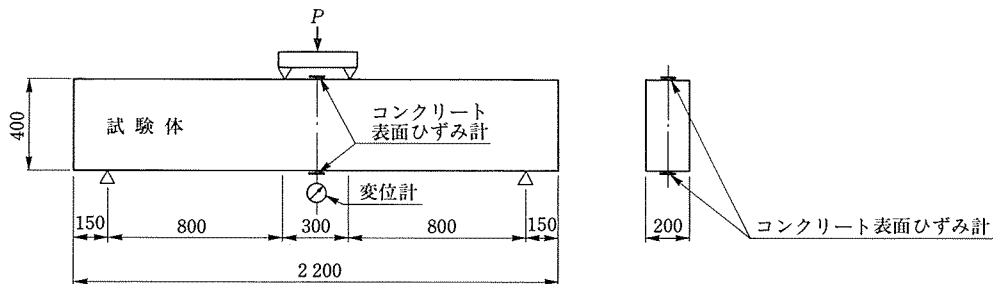
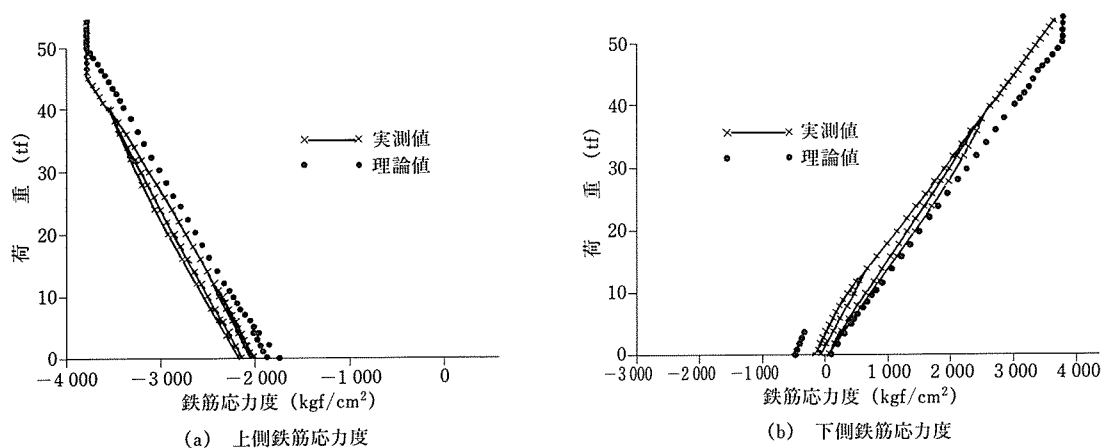
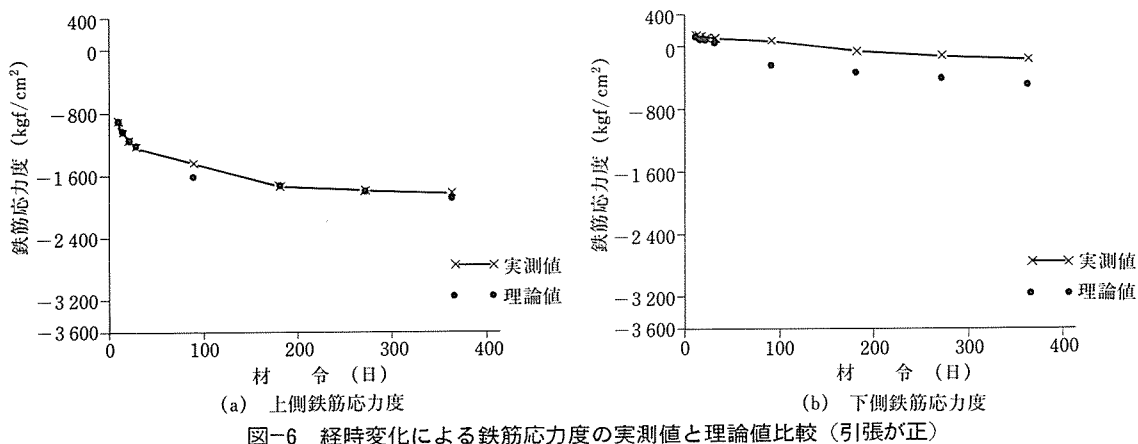


図-5 載荷試験装置図



下側鉄筋応力度の変化は図-6 に示すとおりであり、鉄筋応力度の実測値と区分求積法による解析結果はよく一致している。なお、計算に用いたコンクリートのクリープ係数と乾燥収縮率は、各供試体の上・下段鉄筋応力度の測定値を用いて平均応力度法により算出した値の平均値を用いている。

### (2) 短期荷重載荷試験

短期荷重載荷試験による上側および下側鉄筋応力度の変化を図-7 に示す。

この図に示すとおり、鉄筋がコンクリートのクリープ、乾燥収縮を拘束することによる初期応力としての拘束応力度および載荷荷重による鉄筋の応力度変化の様子を実測値も計算値もよくとらえており、また両者はよく一致している。

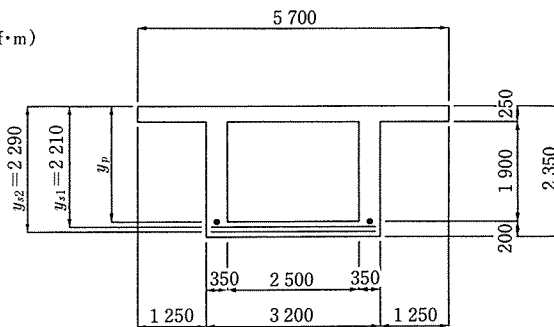
ここでは、試験結果の一例を示したが、提案した区分求積法の結果は、他の供試体についてもよく一致しており、その妥当性は、十分確かめ得たものといえる。

### 3. 解析法の比較検討

まえがきに述べた各種の曲げ解析法による計算結果の比較を図-8 に示す断面について行った。この断面は支

各荷重による曲げモーメント (tf・m)

自重 1900 }  
 橋面工 400 } 2300 (0.75)  
 活荷重 750 } 3050 (1.00)



PPR 値	0.33	0.46	0.57	0.69
PC 鋼材本数 (本)	6	8	10	12
PC 鋼材断面積 (cm <sup>2</sup> )	66.888	89.184	111.480	133.776
PC 鋼材図心位置 y <sub>p</sub> (m)	2.200	2.185	2.150	2.130
鉄筋径およびピッチ	D 32 ctc 100	D 25 ctc 100	D 22 ctc 100	D 16 ctc 100
鉄筋断面 (cm <sup>2</sup> )	2 × 254.144	2 × 162.144	2 × 123.872	2 × 63.552
鉄筋図心位置 y <sub>s1</sub> , y <sub>s2</sub>	図中に示す			
プレストレス力 (tf)	604	805	1006	1207
曲げ破壊安全度	1.19	1.07	1.09	1.05

図-8 各種解析法比較検討モデル

間 40 m 程度の 1 等橋の断面を想定したものであり、死荷重と活荷重の比は 3 : 1 程度である。プレストレスは PC 鋼材本数 (12 T 12.4 相当) を 6, 8, 10 および 12 本と変化させた 4 種類のレベルを考慮した。次式によるプレストレスの導入レベル (以下 PPR 値という) は、0.33~0.69 の間にある。

$$(\text{PPR 値}) = \frac{(\text{デコンプレッションモーメント})}{(\text{供用状態曲げモーメント})}$$

鉄筋量は、道示Ⅲに規定される曲げ破壊安全度が 1 以上となり、また設計活荷重作用時 (以下設計供用状態という) の鉄筋応力度が 1 800 kgf/cm<sup>2</sup> 程度以下となるように決めている。

解析法は 1) 一般の RC 断面の計算法で、コンクリートのクリープ、乾燥収縮を無視した方法 (ヤング係数比  $n=E_s/E_c=7$  と 15), 2) ひびわれが発生する場合であっても、コンクリートのクリープ、乾燥収縮の影響のみはひびわれが発生していないものとして取り扱う方法, 3) 材令係数を利用し、断面の状態に応じて、クリープ、乾

燥収縮の影響を取り扱う猪股の方法、および 4) 本論文の方法の 4 種類である。また、計算は、すべての持続荷重が同時に載荷される場合と、段階的に載荷される場合の 2 ケースについて行うものとする。

### 3.1 すべての持続荷重が同時に載荷される場合

#### (1) 曲げ応力度について

すべての持続荷重が同時に載荷される場合における各解析法による曲げ応力度の計算結果は、表-2 に示すとおりである。なお、解析法 2) および 4) における持続荷重載荷時のコンクリートの材令は、0 日としている。この表より、以下の事項を読みとることができる。

■全死荷重作用時および設計供用状態におけるコンクリート応力度は、PPR 値が 0.5 程度以下では本論文の解析結果と他解析結果との差は相当に大きく、他解析結果は、大きな結果 [特に解析法 1) は、RC 部材に近づくにつれて大きすぎる結果] を示す。しかしながら、PPR 値が 0.6 程度以上になると解析法による差は、ほとんど無くなる。

表-2 持続荷重が同時に載荷される場合の曲げ応力度

(単位 : kgf/cm<sup>2</sup>)

PPR 値	解 析 法	全 死 荷 重 作 用 時		設 計 供 用 状 態	
		$\sigma_c$	$\sigma_s$	$\sigma_c$	$\sigma_s$
0.33	1) クリープ・乾燥収縮無視 $n=7$ $n=15$	80 (1.25) 73 (1.14)	-913 (0.76) -964 (0.80)	111 (1.16) 100 (1.04)	-1 537 (0.89) -1 600 (0.93)
	2) ひびわれ後もクリープ・乾燥収縮は全断面有効として計算	75 (1.17)	-1 008 (0.84)	106 (1.10)	-1 625 (0.94)
	3) 材令係数を利用 $\rho=0.5$ した猪股の方法 $\rho=0.8$ $\rho=1.0$	68 (1.06) 72 (1.13) 73 (1.14)	-1 118 (0.93) -1 072 (0.89) -1 059 (0.88)	100 (1.04) 103 (1.07) 104 (1.08)	-1 693 (0.98) -1 676 (0.97) -1 670 (0.97)
	4) 本解析法	64 (1.00)	-1 201 (1.00)	96 (1.00)	-1 720 (1.00)
0.46	1) クリープ・乾燥収縮無視 $n=7$ $n=15$	80 (1.19) 73 (1.09)	-810 (0.75) -881 (0.81)	114 (1.12) 102 (1.00)	-1 666 (0.91) -1 748 (0.96)
	2) ひびわれ後もクリープ・乾燥収縮は全断面有効として計算	77 (1.15)	-916 (0.85)	111 (1.09)	-1 775 (0.97)
	3) 材令係数を利用 $\rho=0.5$ した猪股の方法 $\rho=0.8$ $\rho=1.0$	70 (1.04) 72 (1.07) 73 (1.09)	-1 002 (0.92) -961 (0.89) -947 (0.87)	105 (1.03) 107 (1.05) 108 (1.06)	-1 799 (0.99) -1 787 (0.98) -1 782 (0.98)
	4) 本解析法	67 (1.00)	-1 084 (1.00)	102 (1.00)	-1 826 (1.00)
0.57	1) クリープ・乾燥収縮無視 $n=7$ $n=15$	76 (1.04) 72 (0.99)	-485 (0.79) -574 (0.93)	112 (1.02) 102 (0.93)	-1 444 (0.93) -1 549 (0.99)
	2) ひびわれ後もクリープ・乾燥収縮は全断面有効として計算	76 (1.04)	-558 (0.91)	113 (1.03)	-1 543 (0.99)
	3) 材令係数を利用 $\rho=0.5$ した猪股の方法 $\rho=0.8$ $\rho=1.0$	72 (0.99) 72 (0.99) 72 (0.99)	-622 (1.01) -610 (0.99) -606 (0.99)	109 (0.99) 109 (0.99) 109 (0.99)	-1 552 (0.99) -1 549 (0.99) -1 548 (0.99)
	4) 本解析法	73 (1.00)	-614 (1.00)	110 (1.00)	-1 560 (1.00)
0.69	1) クリープ・乾燥収縮無視 $n=7$ $n=15$	70 (0.97) 69 (0.96)	-157 (1.08) -238 (1.64)	112 (0.98) 102 (0.89)	-1 317 (0.94) -1 467 (1.05)
	2) ひびわれ後もクリープ・乾燥収縮は全断面有効として計算	73 (1.01)	-76 (0.52)	116 (1.02)	-1 381 (0.99)
	3) 材令係数を利用 $\rho=0.5$ した猪股の方法 $\rho=0.8$ $\rho=1.0$	72 (1.00) 71 (0.99) 71 (0.99)	-113 (0.78) -195 (1.34) -210 (1.45)	114 (1.00) 114 (1.00) 113 (0.99)	-1 371 (0.98) -1 439 (1.03) -1 442 (1.03)
	4) 本解析法	72 (1.00)	-145 (1.00)	114 (1.00)	-1 395 (1.00)

注 1) ( ) 内は本解析法に対する比

注 2)  $\sigma_c$  : コンクリート応力度で圧縮が正。

注 3)  $\sigma_s$  : 鉄筋応力度で引張が負。

■解析法 1) の  $n=7$  とした場合の全死荷重作用時における鉄筋応力度は、PPR 値のあらゆるレベルにおいて本論文の解析結果と相当大きな差 (10 %~25 %) を生ずる。これ以外の解析法による結果は、PPR 値が 0.6 付近においては、本論文の解析結果とよく一致するが、これ以外の PPR 値においては解析法 1) の  $n=7$  の場合と同様、かなりの差がある。

■設計供用状態における鉄筋応力度は、PPR 値が高くなるにつれて本論文の解析結果と他の解析結果は近づくが、他解析結果は、本論文の解析結果を下回り、危険側である。PPR 値が 0.6 付近で解析法による差は無くなり、PPR 値が 0.7 を超えると再び他解析法との差は開きはじめる傾向を示す。しかしながら PPR 値が 0.5 以上では、解析法 1) の  $n=7$  の場合を除き実用上解析法による差はないといえる。

■本論文の解析結果と比較的よく一致するのは材令係数を 0.5 とした解析法 3) である。したがって曲げ応力度の計算における材令係数は、0.5 としてよい。また、 $n=15$  とした解析法 1) は、解析法 2) とほぼ等価な解を得ることができる。

以上の結果をまとめると、持続荷重が同時に載荷される場合の曲げ応力度の計算は、次のように行ってよいと結論される。

- ① 比較的小さな応力度しか発生しない荷重状態 (例えば全死荷重作用時) またはプレストレス導入量が比較的小量 (例えば PPR 値が 0.5 以下) の場合等において厳密解を得たい場合には、本論文の方法によるのがよい。また、断面がコンクリートの圧縮応力度で決定され、部材寸法に制限を受け、相当量の圧縮鉄筋を配置しなければならないような場合においては、応力度の計算方法として本論文の方法の採用を検討するのがよい。
- ② ひびわれ幅の計算に用いる鋼材引張応力度の増加量は、 $n=7$  とした解析法 1) の結果に、何らかの方法により定めたコンクリートのクリープ、乾燥収縮による鋼材引張応力度の増加量を加えることにより実用的に十分正しい値を定めることができる。この鋼材引張ひずみの増加量 ( $\epsilon_{s,SH}$  と表すこととする) を表-2 の設計供用状態における計算結果を用いて定めると表-3 のようにな

表-3 コンクリートのクリープ・乾燥収縮による鋼材ひずみの増加量 (持続荷重が同時に載荷される場合)

$$\epsilon_{s,SH} = \frac{\sigma_{s-4} - \sigma_{s-1(n=7)}}{E_s}$$

ただし、

$\sigma_{s-4}$  ……本論文解析法による設計供用状態鉄筋応力度  
 $\sigma_{s-1(n=7)}$  …… $n=7$  とした解析法 1) による設計供用状態鉄筋応力度  
 $E_s$  ……鉄筋のヤング係数 ( $=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ )

	( $\times 10^{-6}$ )			
PPR 値	0.33	0.46	0.57	0.69
$\epsilon_{s,SH}$	87	76	55	33

り、ひびわれ幅の計算において  $\epsilon_{s,SH}=150 \times 10^{-6}$  とする標準示方書の規定は、安全側であるといえる。ただし、表-3は、便宜的に設計供用状態における結果を用いたが、ひびわれ幅を検討する荷重状態とここに示した設計供用状態の荷重とは、かならずしも一致しないことに注意する必要がある。

(2) 応力変動について

すべての持続荷重が同時に載荷される場合における設計活荷重による応力度の増加量 (設計供用状態と全死荷重作用時の応力度の差、以下応力変動幅という) の計算結果は表-4 に示すとおりであり、この表より次の事項を読み取ることができる。なお、表-3 に取り上げた例は、すべて鉄筋応力度が引張域で変動する、いわゆる片振り状態を示している。

■コンクリート応力度の変動幅については、解析法 1) の  $n=15$  を除き、他の解析結果は、よく一致している。この解析が他の解析結果と一致しないのは、短期荷重による解析にもコンクリートのクリー

表-4 設計活荷重による応力度変動幅 (持続荷重が同時に載荷される場合)

(単位:  $\text{kgf/cm}^2$ )

種別	解析法 PPR 値	1)		2)	3)			4)
		$n=7$	$n=15$		$\rho=0.5$	$\rho=0.8$	$\rho=1.0$	
コンクリート 応力度変動幅	0.33	31 (0.97)	27 (0.84)	31 (0.97)	32 (1.00)	31 (0.97)	31 (0.97)	32 (1.00)
	0.46	34 (0.97)	29 (0.83)	34 (0.97)	35 (1.00)	35 (1.00)	35 (1.00)	35 (1.00)
	0.57	36 (0.97)	30 (0.81)	37 (1.00)	37 (1.00)	37 (1.00)	37 (1.00)	37 (1.00)
	0.69	42 (1.00)	33 (0.79)	43 (1.02)	42 (1.00)	43 (1.02)	42 (1.00)	42 (1.00)
鉄筋 応力度変動幅	0.33	624 (1.20)	636 (1.23)	617 (1.19)	575 (1.11)	604 (1.16)	611 (1.18)	519 (1.00)
	0.46	856 (1.15)	867 (1.17)	859 (1.16)	797 (1.07)	826 (1.11)	838 (1.13)	742 (1.00)
	0.57	59 (1.01)	975 (1.03)	985 (1.04)	930 (0.98)	939 (0.99)	942 (1.00)	946 (1.00)
	0.69	1 160 (0.93)	1 229 (0.98)	1 305 (1.04)	1 258 (1.01)	1 244 (1.00)	1 232 (0.99)	1 250 (1.00)

注 1) ( ) 内は本解析法 4) に対する比



ブ乾燥収縮の影響 ( $n=15$  としていること) が取り込まれているためである。

■鉄筋応力度の変動幅については、PPR 値が高くなるにつれて、本論文の解析と他の解析結果は近づき、PPR 値が 0.6 以上になると解析法による差はほとんどなくなる。また、PPR 値が 0.6 以下にあっては、他解析法による結果は、本論文による解析結果を 10 %～20 % 上回る安全側の結果を示している。

■PPR 値が高くなるにつれて鉄筋応力度の上下限値は低下するが、応力変動幅は、逆に増加している。

■本論文の解析結果と比較的よく一致するのは、材令係数を 0.5 とした解析法 3) である。したがって応力度の変動幅の計算においても、曲げ応力度の計算と同様材令係数は 0.5 としてよい。また、鉄筋応力度変動幅の計算に限っては、 $n=15$  とした解析法 1) は、解析法 2) とほぼ等価な解を得ることができる。

以上の結果をまとめると、接続荷重が同時に載荷される場合の活荷重による応力変動幅は、次のように求めてよいと結論される。

- ① プレストレス導入量が比較的少量 (例えば PPR 値が 0.5 以下) の場合において厳密な解を得たい場合、疲労により断面が決定され、著しく不経済にな

る場合、等にあつては、本論文の方法によるのがよい。

- ② 疲労の検討による鋼材応力度の変動幅は、一般に  $n=7$  とした 1) の方法で求めてよい。この方法によると、PPR 値が 0.7 以上になると若干危険側になるが、プレストレスレベルが高い範囲にあっては、疲労の問題は少ないこと、コンクリートのクリープ、乾燥収縮による損失を無視しているため PC 鋼材の引張応力度を高めに見積もっていること、両振り状態の応力振幅を片振りで見なしていること等を考慮すると、この方法によっても特に問題はないと判断される。

### 3.2 持続荷重が段階的に作用する場合

持続荷重 (自重、自重以外の死荷重) が段階的に作用する場合の解を表-5 に示す。持続荷重が段階的に作用する場合を取り扱うことができるのは、本論文の解析法と 2) の解析法であるので、表-5 には、この 2 つの解析法による結果が示してある。表-5 中の持続荷重載荷時材令 ( $t_i, t_j$ ) は  $t_i$  は自重、また  $t_j$  は自重以外の死荷重が載荷された時のコンクリートの材令を表している。ケース (0, 0) は持続荷重がコンクリート材令 0 日において同時に作用した場合の解であり、表-2 の結果に一致している。ケース (10, 70) は材令 10 日において自重が作用し、その 60 日後に橋面工等の自重以外の死荷重が施

表-5 持続荷重が段階的に載荷される場合の曲げ応力度

(単位: kgf/cm<sup>2</sup>)

PPR 値	解 析 法	荷重載荷材令(日) (自重, 橋面工)	全死荷重作用時		設 計 供 用 状 態	
			$\sigma_c$	$\sigma_s$	$\sigma_c$	$\sigma_s$
0.33	2) クリープ・乾燥収縮は 全断面有効として計算	0, 0	75 (1.04)	-1 008 (0.95)	106 (1.03)	-1 625 (0.97)
		10, 70	78 (1.08)	-980 (0.92)	109 (1.06)	-1 606 (0.96)
		200, 400	80 (1.11)	-963 (0.91)	110 (1.07)	-1 591 (0.95)
	4) 本解析法	◎ 0, 0	64 (0.89)	-1 201 (1.13)	96 (0.93)	-1 720 (1.03)
◎ 10, 70		72 (1.00)	-1 062 (1.00)	103 (1.00)	-1 667 (1.00)	
◎ 200, 400		75 (1.04)	-1 027 (0.97)	106 (1.03)	-1 645 (0.99)	
0.46	2) クリープ・乾燥収縮は 全断面有効として計算	0, 0	77 (1.05)	-916 (0.97)	111 (1.03)	-1 775 (1.00)
		10, 70	80 (1.10)	-883 (0.94)	113 (1.05)	-1 755 (0.99)
		200, 400	80 (1.10)	-865 (0.92)	114 (1.06)	-1 739 (0.98)
	4) 本解析法	◎ 0, 0	67 (0.92)	-1 084 (1.15)	102 (0.94)	-1 826 (1.03)
◎ 10, 70		73 (1.00)	-941 (1.00)	108 (1.00)	-1 778 (1.00)	
◎ 200, 400		76 (1.05)	-900 (0.96)	110 (1.02)	-1 755 (0.99)	
0.57	2) クリープ・乾燥収縮は 全断面有効として計算	0, 0	76 (1.01)	-558 (1.01)	113 (1.01)	-1 543 (1.01)
		10, 70	78 (1.04)	-518 (0.94)	114 (1.02)	-1 519 (0.99)
		200, 400	78 (1.04)	-502 (0.91)	114 (1.02)	-1 502 (0.98)
	4) 本解析法	◎ 0, 0	73 (0.97)	-614 (1.11)	110 (0.98)	-1 560 (1.02)
◎ 10, 70		75 (1.00)	-553 (1.00)	112 (1.00)	-1 532 (1.00)	
◎ 200, 400		76 (1.01)	-526 (0.95)	113 (1.01)	-1 510 (0.99)	
0.69	2) クリープ・乾燥収縮は 全断面有効として計算	0, 0	73 (1.00)	-76 (1.13)	116 (1.01)	-1 381 (1.01)
		10, 70	74 (1.01)	-20 (0.30)	117 (1.02)	-1 352 (0.99)
		200, 400	73 (1.00)	-37 (0.55)	115 (1.00)	-1 334 (0.98)
	4) 本解析法	◎ 0, 0	72 (0.99)	-145 (2.16)	114 (0.99)	-1 395 (1.02)
◎ 10, 70		73 (1.00)	-67 (1.00)	115 (1.00)	-1 362 (1.00)	
◎ 200, 400		72 (0.99)	-65 (0.97)	115 (1.00)	-1 340 (0.98)	

注 1) ( ) 内は本解析法による通常材令 (10, 70) での解析結果に対する比

工されると仮定した一般的な施工工程の場合における解である。またケース (200, 400) は、非現実的ではあるが、持続荷重が段階的に作用する場合、載荷時のコンクリート材令がどの程度解析法に影響するかを考察するためのものである。なお、 $(\infty, \infty)$  とした解は、コンクリートのクリープ、乾燥収縮終了後に持続荷重が同時に載荷されることになるため、コンクリートのクリープ、乾燥収縮の影響を無視した解析法 1) の  $n=7$  の場合の解に等しくなる。

表-5 に示されるように、持続荷重載荷時のコンクリート材令が進むに従ってコンクリートのクリープ、乾燥収縮の影響が減少するため、コンクリート応力度は大

表-6 設計活荷重による応力度変動幅  
(持続荷重が段階的に載荷される場合)

(単位 : kgf/cm<sup>2</sup>)

応力度	PPR 値	解析法 1)		解析法 4) ケース (10, 70)
		$n=7$	$n=15$	
コンクリート	0.33	31 (1.00)	27 (0.87)	31 (1.00)
	0.46	34 (0.97)	29 (0.83)	35 (1.00)
	0.57	36 (0.97)	30 (0.81)	37 (1.00)
	0.69	42 (1.00)	33 (0.79)	42 (1.00)
鉄筋	0.33	624 (1.03)	636 (1.05)	605 (1.00)
	0.46	856 (1.02)	867 (1.04)	837 (1.00)
	0.57	959 (0.98)	975 (1.00)	979 (1.00)
	0.69	1 160 (0.90)	1 229 (0.95)	1 295 (1.00)

きくなり逆に鉄筋応力度は小さくなる。

持続荷重が同時に作用する場合と段階的に作用する場合の結果はほぼ等しく、前者は後者を常に上回り、安全側の結果を示すので持続荷重が段階的に作用する影響は、一般に無視しても安全側である。また、すべてのプレストレスレベルにおいて解析法 2) と解析法 4) との間有意の差はない。

一般的な施工工程で持続荷重が段階的に作用するケース (10, 70) の解析結果と、表-2 に示す  $n=15$  による解析結果および表-6 に示す設計活荷重による応力度の変動幅は、鉄筋応力度に関してはよく一致している。 $n=7$  とした解析法 1) による場合は、表-7 に示すように 3.1 項に示した  $\varepsilon_{s,SH}$  を 70 % 程度低減した値を考慮すれば、鉄筋とコンクリートの応力度および設計活荷重による応力度の変動幅ともに実用上十分正確な解が得られるので、通常の設計計算は、この方法が簡便で実用的である。

表-7 持続荷重が段階的に作用する場合の  $\varepsilon_{s,SH}^*$

$$\varepsilon_{s,SH}^* = \frac{\sigma_{s-4}(10,70) - \sigma_{s-1}(n=7)}{E_s}$$

ただし、

$\sigma_{s-4}(10,70)$  ……表-5 に示される解析法 4), ケース (10, 70) の供用状態鉄筋応力度

( $\times 10^{-6}$ )

PPR 値	0.33	0.46	0.57	0.69
$\varepsilon_{s,SH}^*$	62	53	42	21
$\varepsilon_{s,SH}/\varepsilon_{s,SH}$	0.71	0.70	0.76	0.64

#### 4. 圧縮鉄筋の影響

前項では圧縮側の鉄筋を無視して検討を行ったが、ここでは圧縮縁に配置されている鉄筋を考慮した場合について考察することとする。検討は、図-8 に示すモデルの圧縮フランジに D 13 鉄筋が 20 cm 間隔で上下に配置

表-8 圧縮鉄筋を考慮した場合の曲げ応力度変化

(単位 : kgf/cm<sup>2</sup>)

解析法	PPR	圧縮鉄筋	全死荷重作用時		設計供用状態	
			$\sigma_c$	$\sigma_s$	$\sigma_c$	$\sigma_s$
1) クリープ・乾燥収縮無視 $n=7$	0.33	有	79 (1.00)	-910 (1.00)	108 (1.00)	-1 534 (1.00)
		無	80 (1.01)	-913 (1.00)	111 (1.03)	-1 537 (1.00)
	0.69	有	68 (1.00)	-150 (1.00)	109 (1.00)	-1 310 (1.00)
		無	70 (1.03)	-157 (1.05)	112 (1.03)	-1 317 (1.01)
3) ひびわれ後もクリープ、乾燥収縮は全断面有効として計算、載荷時材令 (10, 70)	0.33	有	71 (1.00)	-967 (1.00)	101 (1.00)	-1 595 (1.00)
		無	78 (1.10)	-980 (1.01)	109 (1.08)	-1 606 (1.01)
	0.69	有	67 (1.00)	18 (1.00)	108 (1.00)	-1 330 (1.00)
		無	74 (1.10)	-20 (-1.1)	117 (1.08)	-1 352 (1.02)
4) 本解析法 載荷時材令 (10, 70)	0.33	有	65 (1.00)	-1 044 (1.00)	95 (1.00)	-1 653 (1.00)
		無	72 (1.11)	-1 062 (1.02)	103 (1.08)	-1 667 (1.01)
	0.69	有	65 (1.00)	-25 (1.00)	107 (1.00)	-1 338 (1.00)
		無	73 (1.12)	-67 (2.68)	115 (1.07)	-1 362 (1.02)

注) ( ) 内に圧縮鉄筋を考慮した場合に対する考慮しない場合の比

されているケースについて行うこととする。

検討結果を表-8 に示す。クリープ、乾燥収縮を無視した解析法は、この程度の圧縮鉄筋が配置されても、コンクリート応力度、鉄筋応力度ともほとんど変化しない。これに対し、クリープ、乾燥収縮を考慮した解析法は、圧縮鉄筋を配置すると鉄筋応力度は変化しないもののコンクリート応力度は、10%程度低減される。

この結果より、一般の許容応力度法において計算しているRC断面のコンクリート応力度は、実際よりも相当大きな値であること、また、特にコンクリートの圧縮応力度が問題にならない場合には、圧縮側に配置された鉄筋は無視して差し支えないことが明らかである。

### 5. 使用および疲労限界状態の検討に用いる鋼材応力度の計算方法

表-9 は、コンクリートのクリープ、乾燥収縮の影響を無視した場合 ( $n=7$  とした解析法 1)) とこれを断面の状態 (ひびわれの有無) に応じて考慮した本論文に示した解析法 (解析法 4)) により、PPR 値が 0.33 と 0.80 の場合について求めたコンクリート応力度およびひずみ分布を示したものである。ただし持続荷重は同時に載荷されるものとしている。

コンクリートのクリープ、乾燥収縮を無視した場合は常に応力分布とひずみ分布が一致するため、鋼材応力度は、応力分布より求めてもひずみ分布より求めても同一値 ( $\sigma_s = n \cdot \sigma_c = E_s \cdot \epsilon$ ) となる。

一方、解析法 4) のように、断面に発生したひびわれの有無に応じて、コンクリートのクリープ、乾燥収縮を考慮する場合、コンクリートの応力分布とひずみ分布は一致しないため、鉄筋の応力度は、コンクリートの応力分布から求めた値 ( $\sigma_s = n \cdot \sigma_c$ ) とひずみ分布から求めた値とは異なり、いずれの値を用いるべきかを明確にする必要がある。鋼材応力度は、常に断面内の力つり合いが成立するように定めなければならないが、この力つり合いのとれる鋼材応力度は断面のひずみ分布より求めた値であるから、鋼材応力度はひずみつり合いより定めるのが正しい。

図-9 は、解析法 4) による場合のコンクリート応力分布およびひずみ分布より求めた鋼材応力度並びに解析法 1) で  $n=7$  とした場合の鋼材応力度を PPR 値をパラメータとしてプロットしたものであるが、解析法 4) のひずみ分布より求めた鋼材応力度は、 $n=7$  とした解析法 1) の結果とよく似た分布を示しており、鋼材応力度はひずみつり合いより定めるのが正しいことを裏付けている。3. および 4. で示した鉄筋応力度は、すべてひずみ分布より求めた値である。

疲労限界状態の検討において、解析法 1) により鋼材

表-9 コンクリート応力およびひずみ分布

(単位:  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

PPR	荷重状態	解析法 1) クリープ・乾燥収縮無視 ( $n=7$ )	解析法 4) 本解析法
0.33	全死荷重作用時	$\sigma_c = 80$ コンクリート応力およびひずみ分布一致 $\sigma_s = -913$	$\sigma_c = 64$ コンクリート応力分布 $n = E_s/E_c$ $\sigma'$ : 鉄筋位置のコンクリート応力 ひずみ分布 $n\sigma' = -57$ $E_s \cdot \epsilon = -1201$
	設計供用状態	$\sigma_c = 111$ $\sigma_s = -1537$	$\sigma_c = 96$ ひずみ分布 $n\sigma' = -571$ $E_s \cdot \epsilon = -1720$
0.80	全死荷重作用時	$\sigma_c = 76$ $\sigma_s = -53$	$\sigma_c = 68$ コンクリート応力分布 ひずみ分布 $n\sigma' = -37$ $E_s \cdot \epsilon = +517$
	設計供用状態	$\sigma_c = 106$ $\sigma_s = -821$	$\sigma_c = 115$ ひずみ分布 $E_s \cdot \epsilon = -880$ $n\sigma' = 1423$

注 1) PPR値0.8の場合、PC鋼材14本、引張側鉄筋は下フランジにDc13tc100を2段考慮

注 2) 圧縮鉄筋として上フランジにD13tc200を2段考慮

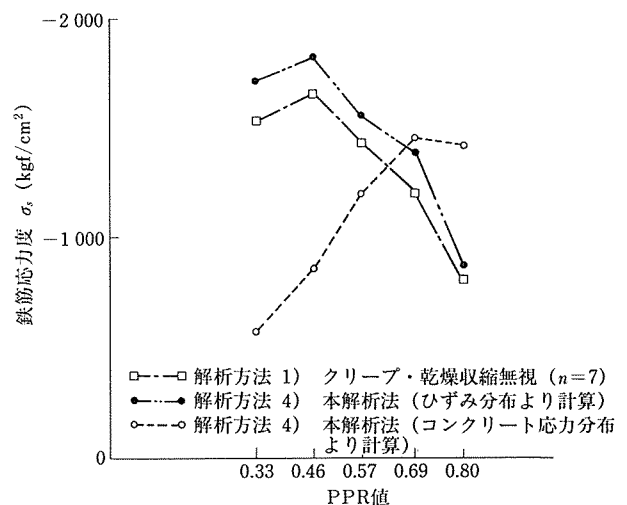


図-9 ひずみ分布およびコンクリート応力分布から求めた鉄筋応力度 (持続荷重は同時載荷)

応力度を算出すると、鋼材応力度の振幅は PPR 値が 0.7 以下の場合比較的正しく求められる (表-4)。しかしながら、振幅の上下限値が圧縮応力度と引張応力度の両領域にまたがる比較的プレストレスレベルが高い場合 (表-9, 10 で PPR=0.8) にあっては、このような両振り挙動および振幅を正しく評価できないので注意が必要である。また本解析法を用いた場合、応力振幅という点からは応力分布から求めた値とひずみ分布から求めた値とでは有意の差はない (表-10 参照)。

表-10 疲労限界状態における鉄筋の応力変動 (単位: kgf/cm<sup>2</sup>)

PPR	解析法1) クリープ・乾燥収縮無視 (n=7)		解析法4) 本解析法	
	変動範囲	変動幅	変動範囲	変動幅
0.33	-913~-1 537	624	$n \cdot \sigma' = -57 \sim -571$ $E_s \cdot \varepsilon = -1 201 \sim -1 720$	514 519
0.80	-53~-821	768	$n \cdot \sigma' = -27 \sim -1 406$ $E_s \cdot \varepsilon = 517 \sim -880$	1 379 1 397

注) 持続荷重が同時に積荷される場合

## 6. PC 鋼材応力度の変化について

図-10 は、本解析法を用い、持続荷重の載荷材令を (10, 70) として算出したコンクリートのクリープ、乾燥収縮による PC 鋼材応力度の変化を、PPR 値をパラメータとして図示したものである。

フルプレストレス部材 (PPR=1.0) のクリープ終了時の PC 鋼材応力度は、クリープ、乾燥収縮およびリラクセーション (図-10 では D3~D4 間で 5% の減

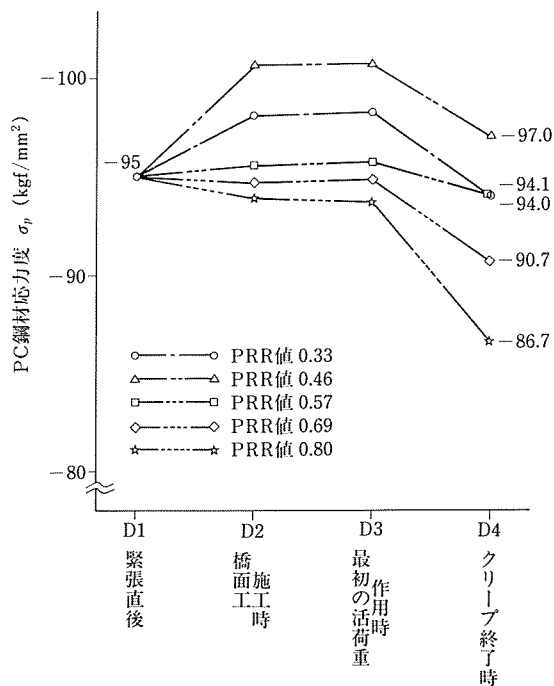


図-10 クリープ・乾燥収縮による PC 鋼材応力度変化 (本解析法による。材令 (10,70))

少を考慮している) により減少し、緊張直後よりも小さな値となるが、PPR 値の小さな部材 (図-10 では 0.6 以下) の場合には、ほとんど変わらないか、場合によっては増加する傾向にある。したがって、活荷重によりさらに増加することも考慮すると、PPR 値が低い場合は、所定の許容値を満足させるために PC 鋼材の初期導入張力を通常の PC 部材よりも下げなければならない場合もあるので注意が必要である。

またこのことから n=7 とした解析法 1) による場合のプレストレス力の値として、導入直後の鋼材応力度を用いても大きな間違いはないと言える。

## 7. 結 論

本論文の検討を通じて得られた主要な結論は、次のとおりである。

- 1) 区分求積法によるあらゆるプレストレスレベルを有するコンクリート断面の普遍的な曲げ解析法を提案した。また提案した解析法により試験結果を解析し、その妥当性を確認した。
- 2) 一般的な施工が行われる部材の断面解析は、標準示方書に示されるようにコンクリートと鋼材のヤング係数比を用いて通常の RC 部材と同様に行い、ひびわれ幅等のようなコンクリートのクリープ、乾燥収縮による鋼材ひずみの増加量 ( $\varepsilon_{s,SH}$ ) を考慮する必要がある場合は、別にこれを加算すればよい。

この場合  $\varepsilon_{s,SH}$  は、プレストレス導入レベルに応じて変えるのが妥当であり、本解析結果によれば表-11 に示す値として十分である。また、持続荷重は、同時に載荷されるものとしてよい。

表-11 本論文における検討より得られた  $\varepsilon_{s,SH}$  ( $\times 10^{-6}$ )

PPR 値	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70
$\varepsilon_{s,SH}$	100	85	70	60	40

- 3) 鋼材応力度は、断面ひずみ分布より定めなければならない。
- 4) プレストレスレベルの低い部材にあっては、コンクリートのクリープ、乾燥収縮により PC 鋼材応力度は減少せず、場合によっては、増加することもある。

したがって、2) に述べた方法により鋼材応力度の増加量を計算する場合のプレストレス力としては、導入直後の値を用いても大きな間違いはない。

## あとがき

現状では最も厳密な解が得られると思われる猪股の方法を発展させた、区分求積法によるコンクリート断面の

曲げ解析法を提案した。

提案した解析法の妥当性の検証をひびわれ発生のない経時変化状態と短期載荷状態について行ったが、最も必要なひびわれの発生した経時変化状態の検証は、適当な既存の試験結果も見当たらないため行っておらず今後の大きな課題である。

一方、実用設計における曲げ解析は、標準示方書に示されている方法を発展させた非常に簡便な方法で十分に言い得ることも示した。この著者らの提案があらゆるプレストレスレベルのコンクリート部材設計の簡略化に役立ち、RC、PC部材以外のPPC部材が広く普及することに連るならばこれに勝る喜びはない。

最後に PPC 桁の試験結果を私どもの論文に採録することを心よく承諾して下さった鉄建公団の方々の御好意に心より御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) 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. 95~105 1988年12月
- 2) 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年8月
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書（平成3年版）
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編（平成2年2月）
- 5) 小宮正久，酒井 一，前田晴人：任意形コンクリート構造物のクリープ解析法に関する一提案，プレストレストコンクリート技術協会誌，Vol. 29, No. 2, PP. 8~17, 1987年3月
- 6) 小宮正久，酒井 一，前田晴人：PC合成桁のクリープ解析，プレストレストコンクリート技術協会誌，Vol. 32, No. 2, PP. 63~73, 1990年3月

【1992年9月4日受付】

---

#### ◀刊行物案内▶

### PC 技術の役割と発展

<第20回 PC 技術協会講習会テキスト>

（平成4年2月）

頒布価格：4 500 円（送料：450 円）

内 容：プレストレストコンクリートの国際動向と役割 [池田尚治]／プレストレス導入理念の拡大と応用 [六車 熙]／最近における PC 構造の展開と新材料 [山崎 淳，近藤真一，石橋悦治，材寄 勉]／都市内 PC 橋計画の手引—PC 橋のフォルム— [池田尚治]／各地における注目すべき構造物 [各開催地域の講師]／PC 連結げたの設計・施工について [西川和廣，箕作光一，杉山 純，（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会]

---