

プレストレスト コンクリートに対するクリープの影響

猪 股 俊 司*

1. クリープひずみ

最近の研究によると、コンクリート クリープひずみは回復クリープ（遅れ弾性ひずみ）と、非回復クリープ（フローひずみ）との2成分からなっていることが明らかとなっている（図-1）。すなわち、時点 t_0 で載荷し、遅れ弾性ひずみが完全に発生するに必要なだけの経過時間後に、時点 t_1 で除荷すると、クリープひずみの内の遅れ弾性ひずみ成分は時間とともに回復し、残留するのはフローひずみ成分のみである。

時点 t_0 において単位応力度を作用させたとき、任意時点 t におけるコンクリートひずみを与える関数をクリープ関数 $c(t, t_0)$ で表わすものとする。

クリープ関数 $c(t, t_0)$ は弾性ひずみ ϵ_{ce} とクリープひずみ ϵ_{cc} との和で与えられる。さらにクリープひずみが作用応力度と比例する比例クリープ則が成立する範囲において、クリープひずみはクリープ係数 $\phi(t, t_0)$ を用いて表わされる。すなわち、次式が成立する。

$$c(t, t_0) = \epsilon_{ce} + \epsilon_{cc} = \frac{1}{E(t_0)} + \frac{1}{E_{28}} \phi(t, t_0) \dots (1)$$

ここに、

$E(t_0)$: 載荷時点 t_0 のコンクリートヤング係数

E_{28} : 材令 28 日のコンクリートヤング係数

クリープ係数 $\phi(t, t_0)$ はさらに遅れ弾性に関するものと、フローに関するものとの和として与えられる。

$$\phi(t, t_0) = \phi_d(t-t_0) + \phi_f(t, t_0)$$

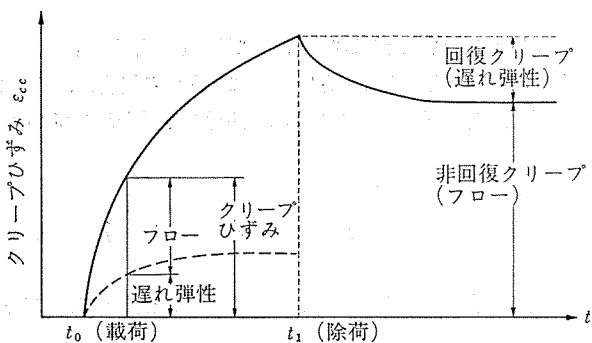


図-1 クリープひずみ

$$= \phi_{d0} \cdot \beta_d(t-t_0) + \phi_{f0} [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] \dots (2)$$

ここに、

ϕ_{d0} : 遅れ弾性ひずみ係数基準値、一般に 0.4 とする。

ϕ_{f0} : フローひずみ係数基準値で環境条件およびコンクリートコンシステンシーに関する（表-1）。

$\beta_d(t-t_0)$: 遅れ弾性ひずみの発生速度に関するもので、載荷後の経過時間 $(t-t_0)$ のみの関数である（図-2）。

$\beta_f(t)$: 0 と $\beta_f(t_{\infty})$ の間の値で変化するフローひずみ発生度に関するもので、部材仮想厚さ h_{th} によって異なる時間 t の関数である（図-3）。

t : コンクリート材令 (日)

t_0 : 初載荷時コンクリート材令

以上コンクリート材令は、過度な水分の損失が保護されている普通の条件のもとで、20°C に保持された早強セメントを用いたコンクリートで

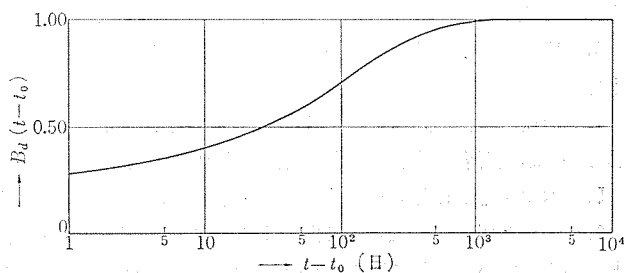


図-2 $\beta_d(t-t_0)$

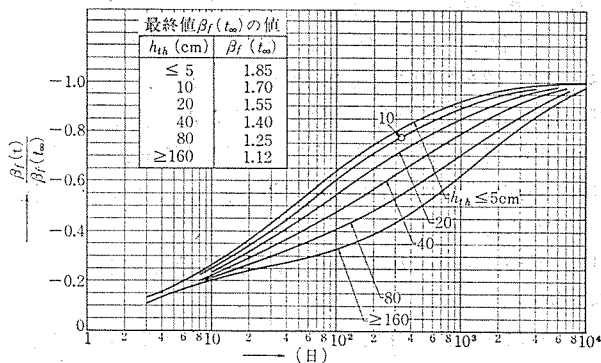


図-3 $\beta_f(t)$

* 工博(株)日本構造橋梁研究所 副社長

表-1 ϕ_{f0} および λ の値

環境条件	相対湿度 (%)	ϕ_{f0}^*	λ
水中		0.8	60
非常に湿った環境	90	1.3	10
一般の屋外	70	2.0	3
乾燥した屋外または屋内	40	3.0	2

* コンクリートスラブ 2~8cm のコンクリートに対する値

は、実際の材令をそのまま用いてよい。もし温度が 20°C でなく、また普通セメントを用いた場合には次式によって補正された材令を定める。

$$(t \text{ または } t_0) = \alpha \frac{\sum (T+10) \Delta t}{30}$$

ここに、

T : °C で表わしたコンクリート日平均温度

Δt : 日平均温度が T °C であった日数

α : セメント硬化速度に関する係数

早強ポルトランドセメント.....1.0

普通ポルトランドセメント.....0.5

h_{th} : 部材仮想厚さで、次式で求められる。

$$h_{th} = \lambda \frac{A_c}{U}$$

ここに、

λ : 環境条件に関する係数 (表-1)

A_c : コンクリート部材断面積

U : 外気に接する部材周長

に対する値である。

式(1),(2)を用い、コンクリートヤング係数の変化を無視すると、 t_0 で荷重されたときの t における単位応力度に対するクリープ関数 $c(t, t_0)$ は次のようである。

$$\begin{aligned} c(t, t_0) &= \frac{1}{E_0} [1 + \phi(t, t_0)] \\ &= \frac{1}{E_0} [1 + \phi_d(t-t_0) + \phi_f(t) - \phi_f(t_0)] \\ &\dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

遅れ弾性ひずみは荷重後比較的短期間に発生するものである。一般には経過日数 $(t-t_0)$ が3か月であれば、遅れ弾性ひずみは完全に発生すると考えてよい。すなわち、 $\phi_d(t-t_0) = 1.0$ としてよい。また $\phi_{d0} = 0.4$ としてよいから、長期間後のクリープを考える場合式(3)は次のように書ける。

$$\begin{aligned} c(t, t_0) &= \frac{1}{E_0} [1 + 0.4 + \phi_f(t) - \phi_f(t_0)] \dots\dots(4) \\ &= \frac{1}{E_0'} [1 + \phi_f'(t) - \phi_f'(t_0)] \end{aligned}$$

$$c(t, t_0) = \frac{1}{E_0'} [1 + \phi'(t, t_0)] \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $E_0' = E_0 / 1.4 = 0.714 E_0$

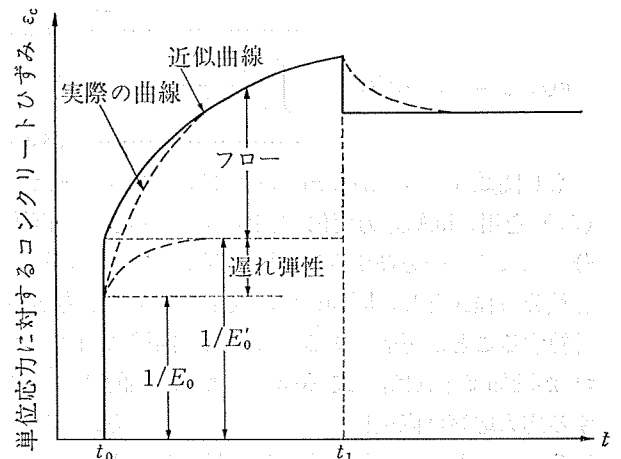


図-4 近似クリープ関数

$$\phi_f'(t) = \phi_f(t) / 1.4$$

$$\phi'(t, t_0) = \phi_f'(t) - \phi_f'(t_0)$$

式(3),(5)の両式を比較して、

$$\phi'(t, t_0) = \frac{\phi(t, t_0) - 0.4}{1.4} \dots\dots\dots(6)$$

式(5)はクリープひずみはすべてフローひずみからなっていると仮定し、遅れ弾性ひずみは荷重と同時に発生するものと考えたものである(図-4)。式(5)の近似クリープ関数は荷重の初期においてはコンクリートひずみ応答を正しく与えてはいないが、長期間後にはまったく正しい結果を与えるものである。

式(5)の近似クリープ関数を考える利点は、クリープ問題またはリラクセーション問題を解く場合、任意時点でのクリープひずみ増分は荷重時点 t_0 には無関係に与えられるからである。すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} c(\tau, t_0) &= \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{1}{E_0'} [1 + \phi'(\tau, t_0)] \\ &= \frac{1}{E_0'} \frac{d}{d\tau} \phi'(\tau, t_0) = \frac{1}{E_0'} \frac{d}{d\tau} \phi_f'(\tau) \end{aligned}$$

となる解析上の便利さがある。

2. クリープ関数とリラクセーション関数およびひずみの一般式

時点 t_0 で一定持続応力度 $\sigma(t_0)$ または一定持続ひずみ $\epsilon(t_0)$ を作用させた場合、任意時点 $t (> t_0)$ におけるひずみ、 $\epsilon(t, t_0)$ または応力度 $\sigma(t, t_0)$ は、それぞれ次に規定されるクリープ関数 $C(t, t_0)$ またはリラクセーション関数 $r(t, t_0)$ によって与えられる。

$$\epsilon(t, t_0) = \sigma(t_0) \cdot c(t, t_0) \dots\dots\dots(7)$$

$$\sigma(t, t_0) = \epsilon(t_0) \cdot r(t, t_0) \dots\dots\dots(8)$$

時間に関する累加原理を用いると、時間とともに変化する応力またはひずみを受ける場合、式(7),(8)の両式は次のように書ける。

$$\epsilon(t, t_0) = \sigma(t_0) \cdot c(t, t_0) + \int_{t_0}^t \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} \cdot c(t, \tau) \cdot d\tau$$

$$\dots\dots\dots (7a)$$

$$\sigma(t, t_0) = \varepsilon(t_0) \cdot r(t, t_0) + \int_{t_0}^t \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} \cdot r(t, \tau) \cdot d\tau$$

$$\dots\dots\dots (8a)$$

もし関数 $c(t, \tau)$ が既知であれば、式 (7) または式 (7a) を用い既知応力変化に対するひずみ応答は直接積分で求まる。一方ひずみに時間的変化があれば、式 (7a) を積分方程式とし、既知ひずみ変化に対する応力応答を計算することが可能である。まったく同様に、関数 $r(t, \tau)$ が既知であれば、式 (8a) により時間的ひずみに対する応力応答は直接積分で求められる。一方式 (8a) を積分方程式とし、既知応力変化に対するひずみ応答は求められる。

すなわち、 $c(t, \tau)$ と $r(t, \tau)$ とは相互に関連があり、一方が既知であれば、他方は数学的に決定されるものである。例えば、クリープ関数 $c(t, \tau)$ が既知とし、これに対応するレラクセーション関数 $r(t, \tau)$ を求めるには次のようにすればよい。

式 (7a) をレラクセーション問題に適用し、 t_0 時点でひずみ $\varepsilon(t_0)$ を与え、これを保持したときの応力応答を求めるものとする。すなわち、 $\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon(t_0)$ とおいて、

$$\varepsilon(t_0) = \sigma(t_0) \cdot c(t, t_0) + \int_{t_0}^t \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} \cdot c(t, \tau) \cdot d\tau$$

となる。右辺を部分積分して、

$$\begin{aligned} \varepsilon(t_0) &= \sigma(t_0) \cdot c(t, t_0) + \left[\sigma(\tau) \cdot c(t, \tau) \right]_{t_0}^t \\ &\quad - \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \cdot \frac{\partial c(t, \tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau \\ &= \sigma(t) \cdot c(t, t) - \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \cdot \frac{\partial c(t, \tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau \end{aligned} \dots\dots\dots (9)$$

一方一定ひずみ保持に対する応力応答に関しては式 (8) が成立するから、式 (8) を式 (9) に代入して、両辺の $\varepsilon(t_0)$ を消去すると、次式も求められる。

$$1 = r(t, t_0) \cdot c(t, t_0) - \int_{t_0}^t r(\tau, t_0) \cdot \frac{\partial c(t, \tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau$$

書換えて、

$$\begin{aligned} r(t, t_0) &= \frac{1}{c(t, t)} + \frac{1}{c(t, t)} \int_{t_0}^t r(\tau, t_0) \\ &\quad \cdot \frac{\partial c(t, \tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

$c(t, \tau)$ が既知であれば式 (8) の積分方程式を解いて $r(t, t_0)$ は求められる。クリープ関数として式 (5) を採用するものとする、

$$c(t, t) = \frac{1}{E_0'}$$

よって式 (10) は次のように書ける。

$$\begin{aligned} r(t, t_0) &= E_0' + E_0' \int_{t_0}^t r(\tau, t_0) \frac{1}{E_0'} \frac{\partial}{\partial \tau} \\ &\quad \cdot [1 + \phi_{f'}(t) - \phi_{f'}(\tau)] \cdot d\tau \\ &= E_0' - \int_{t_0}^t r(\tau, t_0) \cdot \frac{d\phi_{f'}(\tau)}{d\tau} \cdot d\tau \end{aligned}$$

すなわち、

$$\int_{t_0}^t r(\tau, t_0) \frac{d\phi_{f'}(\tau)}{d\tau} \cdot d\tau = E_0' \left[1 - \frac{r(t, t_0)}{E_0'} \right] \dots\dots\dots (11)$$

式 (11) の両辺を t で微分すると次の 1 次微分方程式がえられる。

$$r(t, t_0) \cdot d\phi_{f'}(t) = -dr(t, t_0)$$

式 (11) で $t=t_0$ において $r(t, t_0) = E_0'$ となることを考慮して、微分方程式を解くと、

$$\begin{aligned} r(t, t_0) &= E_0' \cdot e^{-[\phi_{f'}(t) - \phi_{f'}(t_0)]} \\ &= E_0' \cdot e^{-\phi'(t, t_0)} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

$E_0' = 0.714 E_0$, $\phi'(t, t_0) = 0.714 [\phi(t, t_0) - 0.4]$ であるから、

$$r(t, t_0) = 0.714 E_0 e^{-0.714(\phi - 0.4)} \dots\dots\dots (13)$$

クリープ関数およびレラクセーション関数を用いて、応力変化のある場合のひずみ変化応答を定める一般式が次のように求められる。

クリープ関数として式 (5) を採用し、コンクリートヤング係数は E_0' 、クリープひずみはフローひずみからなっているものと仮定する。この場合の応力度、ひずみを特に区別するため、ダッシュを付けることとする。

式 (7a) に式 (5) を代入して、

$$\begin{aligned} \varepsilon'(t) &= \frac{\sigma'(t_0)}{E_0'} [1 + \phi'] \\ &\quad + \frac{1}{E_0'} \int_{t_0}^t [1 + \phi'(t, \tau)] \frac{\partial \sigma'(\tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau \\ &= \frac{\sigma'(t_0)}{E_0'} [1 + \phi'] + \frac{1}{E_0'} [\sigma'(t) - \sigma'(t_0)] \\ &\quad + \frac{1}{E_0'} \int_{t_0}^t \phi'(t, \tau) \cdot d\sigma'(\tau) \end{aligned}$$

$$d\varepsilon'(t) = \varepsilon'(t) - \varepsilon'(t_0),$$

$$d\sigma'(t) = \sigma'(t) - \sigma'(t_0)$$

と書いて、ひずみおよび応力度変化を表わす。

上式を書換えて、

$$\begin{aligned} d\varepsilon'(t) &= \frac{\sigma'(t_0)}{E_0'} \phi'(t, t_0) + \frac{1}{E_0'} d\sigma'(t) \\ &\quad + \frac{1}{E_0'} \int_{t_0}^t \phi'(t, \tau) d\sigma'(\tau) \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

式 (8a) をレラクセーション問題に適用すると、 $\varepsilon'(t) = \varepsilon'(t_0)$ である。レラクセーション関数の性質から、

$$d\sigma'(t) = \varepsilon'(t_0) \cdot dr(t, t_0)$$

となるので、次のように式 (8a) は書ける。

$$0 = \frac{\sigma'(t_0)}{E_0'} \phi'(t, t_0)$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{E_0'} \int_{t_0}^t [1 + \phi'(t, \tau)] \cdot \epsilon'(t_0) dr(\tau, t_0) \\
 & = \frac{\sigma'(t_0)}{E_0'} \phi'(t, t_0) + \frac{\epsilon'(t_0)}{E_0'} [r(t, t_0) - E_0'] \\
 & + \frac{\epsilon'(t_0)}{E_0'} \int_{t_0}^t \phi'(t, \tau) \cdot dr(\tau, t_0)
 \end{aligned}$$

すなわち,

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{E_0'} \int_{t_0}^t \phi'(t, \tau) \cdot d\sigma'(\tau) & = - \frac{\sigma'(t_0)}{E_0'} \phi'(t, t_0) \\
 - \frac{\epsilon'(t_0)}{E_0'} [r(t, t_0) - E_0'] & \dots\dots\dots (15)
 \end{aligned}$$

式(15)を式(14)に代入して,

$$\begin{aligned}
 \Delta\sigma'(t) & = \frac{\sigma'(t_0)}{E_0'} \phi'(t, t_0) + \frac{1}{E_0'} \Delta\sigma'(t) + \\
 & - \frac{\epsilon'(t_0)}{E_0'} \{ [r(t, t_0) - E_0'] + E_0' \cdot \phi'(t, t_0) \} \\
 & \dots\dots\dots (16)
 \end{aligned}$$

レラクセーション関数の性質から,

$$\Delta\sigma'(t) = \epsilon'(t_0) [r(t, t_0) - E_0']$$

であるから, 式(16)は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \Delta\sigma'(t) & = \frac{\sigma'(t_0)}{E_0'} \cdot \phi'(t, t_0) + \frac{1}{E_0'} \\
 & \cdot \Delta\sigma'(t) \left\{ 1 + \left[\frac{1}{1 - r(t, t_0)/E_0'} - \frac{1}{\phi'(t, t_0)} \right] \phi'(t, t_0) \right\}
 \end{aligned}$$

$\kappa(t, t_0)$ を次のように表わす。

$$\kappa(t, t_0) = \left[1 - \frac{r(t, t_0)}{E_0'} \right]^{-1} - [\phi'(t, t_0)]^{-1} \dots\dots (17)$$

よって, 応力変化 $\Delta\sigma'(t)$ に対するひずみ変化 $\Delta\epsilon'(t)$ の一般式は次のように書ける。

$$\begin{aligned}
 \Delta\epsilon'(t) & = \frac{\sigma'(t_0)}{E_0'} \cdot \phi'(t, t_0) \\
 & + \frac{\Delta\sigma'(t)}{E_0'} [1 + \kappa(t, t_0) \cdot \phi'(t, t_0)] \dots\dots (18)
 \end{aligned}$$

式(17)の κ の値を ϕ を用いて書換えると,

$$\kappa = [1 - e^{-0.714(\phi - 0.4)}]^{-1} - [0.714(\phi - 0.4)]^{-1}$$

となる。 ϕ の各種の値に対する κ 値は表-2 のようである。

表-2 κ の値

ϕ	ϕ'	κ
0.5	0.0714	0.506
1.0	0.429	0.536
1.5	0.786	0.565
2.0	1.143	0.593
2.5	1.500	0.621
3.0	1.857	0.646
3.5	2.214	0.671

3. コンクリートクリープ, 乾燥収縮による断面力変動

断面力を N_0, M_0 とし, コンクリート断面積および断

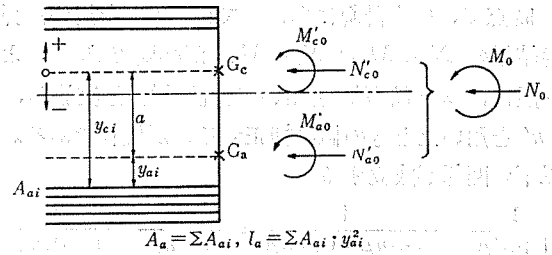


図-5 付着ある鋼材を有する断面に対する各断面力

面2次モーメントを A_c, I_c , 付着ある鋼材 (PC緊張材および鉄筋の総称) の断面積および断面2次モーメントを A_a, I_a で表わす。コンクリート断面図心 G_c と付着ある鋼材断面図心との距離を a とする (図-5)。 G_a が G_c より下方にある場合は負号とする。

コンクリート断面および鋼材断面に作用する t_0 時点での断面力をそれぞれ N_{c0}', M_{c0}' および N_{a0}', M_{a0}' とする。断面力 N_0 は付着ある鋼材とコンクリートとの合成断面図心, G_{c+a} に作用する。これら各種計算にあたってコンクリートヤング係数は $E_c' = E_c/1.4$ とする。またヤング係数比 $n' = E_a/E_c' = 1.4 \cdot n$ を用いる。

換算断面図心 G_{a+c} とコンクリート断面図心 G_c との

$$\text{距離} = a \cdot \frac{n' \mu}{1 + n' \mu}$$

ここに, $\mu = A_a/A_c$

断面力釣合および G_c に関するモーメント釣合条件 $N_{c0}' + N_{a0}' = N_0 \dots\dots\dots (19)$

$$M_{c0}' + M_{a0}' + N_{a0}' \cdot a = M_0 + N_0 \cdot a \frac{n' \mu}{1 + n' \mu} \dots (20)$$

付着ある鋼材図心での両部材ひずみおよび両部材曲率の適合条件

$$\frac{N_{a0}'}{E_a \cdot A_a} = \frac{N_{c0}'}{E_c' \cdot A_c} + \frac{M_{c0}'}{E_c' \cdot I_c} \cdot a \dots\dots\dots (21)$$

$$\frac{M_{a0}'}{E_a \cdot I_a} = \frac{M_{c0}'}{E_c' \cdot I_c} \dots\dots\dots (22)$$

式(19)~(22)を解いて次式が求められる。

$$\left. \begin{aligned}
 N_{c0}' & = N_0 \frac{1}{1 + n' \mu} - \frac{M_0}{a} \frac{k' - 1}{k' + n' \left(\frac{I_a}{I_c} \right)} \\
 M_{c0}' & = M_0 \frac{1}{k' + n' \left(\frac{I_a}{I_c} \right)} \\
 N_{a0}' & = N_0 \frac{n' \mu}{1 + n' \mu} + \frac{M_0}{a} \frac{k' - 1}{k' + n' \left(\frac{I_a}{I_c} \right)} \\
 M_{a0}' & = M_0 \frac{n' \left(\frac{I_a}{I_c} \right)}{k' + n' \left(\frac{I_a}{I_c} \right)}
 \end{aligned} \right\} \dots (23)$$

$$\text{ここに, } k' = 1 + \frac{n' \mu}{1 + n' \mu} \frac{a^2}{r_c^2}$$

t_0 時点での応力計算にあたっては、 E_c を用いた弾性計算結果の $N_{c0}, M_{c0}; N_{a0}, M_{a0}$ が必要である。よって一般には $n = E_a/E_c$ を用いて弾性計算を実施し、のち、 n' を用いたときの値に補正するのが便利である。

以下の関係が成立する。

$$\frac{1}{1+n'\mu} = \frac{1}{1+n\mu+0.4n\mu} = \frac{1}{1+n\mu} \cdot \frac{1}{1+0.4\beta}$$

$$\frac{n'\mu}{1+n'\mu} = \frac{n\mu}{1+n\mu} \cdot \frac{1.4}{1+0.4\beta}$$

ここに、 $\beta = \frac{n\mu}{1+n\mu}$

$$k'+n'\left(\frac{I_a}{I_c}\right) = 1 + \frac{n\mu}{1+n\mu} \cdot \frac{a^2}{r_c^2} \cdot \frac{1.4}{1+0.4\beta}$$

$$+ 1.4n\left(\frac{I_a}{I_c}\right)$$

$$= \frac{1}{1+0.4\beta} \left[1 + 0.4\beta + 1.4 \frac{n\mu}{1+n\mu} \frac{a^2}{r_c^2} + 1.4n\left(\frac{I_a}{I_c}\right)(1+0.4\beta) \right]$$

$$= \frac{1}{1+0.4\beta} \left\{ \left[1 + \frac{n\mu}{1+n\mu} \frac{a^2}{r_c^2} + n\left(\frac{I_a}{I_c}\right) \right] + 0.4\beta + 0.4 \frac{n\mu}{1+n\mu} \frac{a^2}{r_c^2} + 0.4n\left(\frac{I_a}{I_c}\right)(1+1.4\beta) \right\}$$

$$= \left[k+n\left(\frac{I_a}{I_c}\right) \right] \frac{1}{1+0.4\beta} \cdot \{1+0.4[\beta\gamma+\delta(1+1.4\beta)]\}$$

ここに、

$$r = \left(1 + \frac{a^2}{r_c^2}\right) \sqrt{\left[1 + \frac{n\mu}{1+n\mu} \frac{a^2}{r_c^2} + n\left(\frac{I_a}{I_c}\right) \right]}$$

$$\delta = n\left(\frac{I_a}{I_c}\right) \sqrt{\left[1 + \frac{n\mu}{1+n\mu} \frac{a^2}{r_c^2} + n\left(\frac{I_a}{I_c}\right) \right]}$$

$$k'-1 = \frac{n'\mu}{1+n'\mu} \frac{a^2}{r_c^2} = \frac{n\mu}{1+n\mu} \frac{a^2}{r_c^2} \frac{1.4}{1+0.4\beta}$$

$$= (k-1) \frac{1.4}{1+0.4\beta}$$

以上の関係式を用いて式 (23) を書換えると次のようである。

$$N_{c0}' = N_0 \frac{1}{1+n\mu} \times \left\{ \frac{1}{1+0.4\beta} \right\}$$

$$- \frac{M_0}{a} \frac{k-1}{k+n\left(\frac{I_a}{I_c}\right)} \times \left\{ \frac{1.4}{1+0.4[\beta\gamma+\delta(1+1.4\beta)]} \right\}$$

$$M_{c0}' = M_0 \frac{1}{k+n\left(\frac{I_a}{I_c}\right)} \times \left\{ \frac{1+0.4\beta}{1+0.4[\beta\gamma+\delta(1+1.4\beta)]} \right\} \dots(24)$$

$$N_{a0}' = N_0 \frac{n\mu}{1+n\mu} \times \left\{ \frac{1.4}{1+0.4\beta} \right\}$$

$$+ \frac{M_0}{a} \frac{k-1}{k+n\left(\frac{I_a}{I_c}\right)} \times \left\{ \frac{1.4}{1+0.4[\beta\gamma+\delta(1+1.4\beta)]} \right\}$$

$$M_{a0}' = M_0 \frac{n\left(\frac{I_a}{I_c}\right)}{k+n\left(\frac{I_a}{I_c}\right)} \times \left\{ \frac{1.4 \times (1+0.4\beta)}{1+0.4[\beta\gamma+\delta(1+1.4\beta)]} \right\}$$

ここに、 $\beta = \frac{n\mu}{1+n\mu}$

$$\gamma = \left(1 + \frac{a^2}{r_c^2}\right) \sqrt{\left[k+n\left(\frac{I_a}{I_c}\right) \right]}$$

$$\delta = n\left(\frac{I_a}{I_c}\right) \sqrt{\left[k+n\left(\frac{I_a}{I_c}\right) \right]}$$

$$k = 1 + \frac{n\mu}{1+n\mu} \frac{a^2}{r_c^2}$$

式 (24) の { } 内の各乗数は弾性比 n を用いて求めた弾性値を、 n' を用いた場合に補正するためのものである。したがって、 n を用いた N_{c0}, M_{c0} , 等を求めるには、{ } 内乗数をすべて 1.0 とおけばよい。

コンクリートクリープおよび乾燥収縮による断面力の変化を求めるには式 (18) を用いるものとする。式 (18) は応力とひずみとの関係であるが、曲げモーメントと曲率との関係についても同型式のものが成立する。

コンクリート断面および付着ある鋼材断面に作用する断面力のクリープ、乾燥収縮による断面力変化量を、

$$\Delta N_{ct}', \Delta M_{ct}'$$

$$\Delta N_{at}', \Delta M_{at}'$$

とする。

内力の釣合条件、

$$\Delta N_{ct}' + \Delta N_{at}' = 0 \dots\dots\dots(25)$$

$$\Delta M_{ct}' + \Delta M_{at}' + \Delta N_{at}' \cdot a = 0 \dots\dots\dots(26)$$

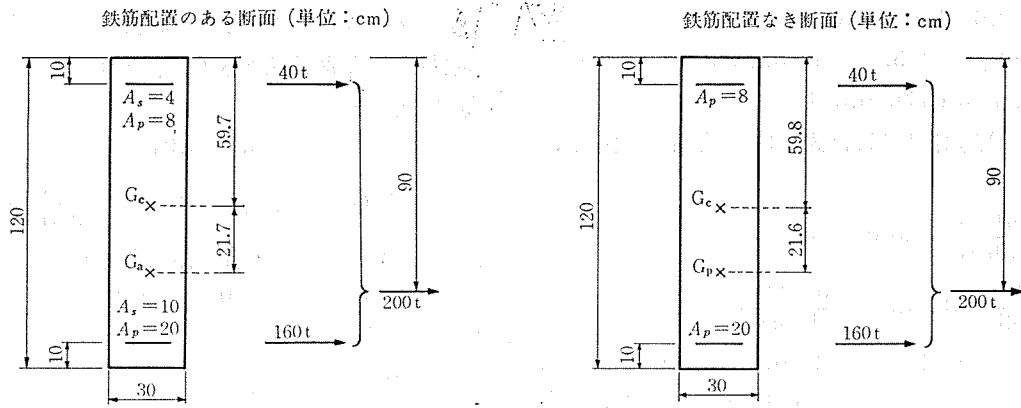
付着ある鋼材断面図心位置のひずみ変化の適合条件およびコンクリート部材と鋼材部材との曲率変化の適合条件

$$\frac{\Delta N_{at}'}{E_a \cdot A_a} = \left(\frac{N_{c0}'}{E_c' \cdot A_c} + \frac{M_{c0}'}{E_c' \cdot I_c} a \right) \phi'$$

$$+ \left(\frac{\Delta N_{ct}'}{E_c' \cdot A_c} + \frac{\Delta M_{ct}'}{E_c' \cdot I_c} \right) (1 + \kappa \phi') + \epsilon_{cs} \dots\dots(27)$$

$$\frac{\Delta M_{at}'}{E_a \cdot I_a} = \frac{M_{c0}'}{E_c' \cdot I_c} \phi' + \frac{\Delta M_{ct}'}{E_c' \cdot I_c} (1 + \kappa \phi') \dots\dots(28)$$

ここに、 ϵ_{cs} : コンクリート乾燥収縮
式 (25)~(28) を解いて次式が求められる。



●コンクリート断面諸元
 $A_c = 3558 \text{ cm}^2$, $I_c = 421.5 \times 10^4 \text{ cm}^4$
 $r_c^2 = 1185 \text{ cm}^2$
 断面係数 $\left\{ \begin{array}{l} \text{上縁} 70.6 \times 10^3 \text{ cm}^3 \\ \text{下縁} 69.9 \times 10^3 \text{ cm}^3 \end{array} \right.$
 ●鋼材断面諸元
 $A_a = 42 \text{ cm}^2$, $I_a = 8.57 \times 10^4 \text{ cm}^4$
 断面係数 $\left\{ \begin{array}{l} \text{上段} 1.20 \times 10^3 \text{ cm}^3 \\ \text{下段} 3.00 \times 10^3 \text{ cm}^3 \end{array} \right.$

●コンクリート断面諸元
 $A_c = 3572 \text{ cm}^2$, $I_c = 425.0 \times 10^4 \text{ cm}^4$
 $r_c^2 = 1189 \text{ cm}^2$
 断面係数 $\left\{ \begin{array}{l} \text{上縁} 71.07 \times 10^3 \text{ cm}^3 \\ \text{下縁} 70.60 \times 10^3 \text{ cm}^3 \end{array} \right.$
 ●PC緊張材断面諸元
 $A_p = 28 \text{ cm}^2$, $I_p = 5.714 \times 10^4 \text{ cm}^4$
 断面係数 $\left\{ \begin{array}{l} \text{上段} 0.800 \times 10^3 \text{ cm}^3 \\ \text{下段} 1.998 \times 10^3 \text{ cm}^3 \end{array} \right.$

図-6 計算例題 1

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{ct}' &= -\Delta N_{at}' \\ &= -\lambda' \left\{ (E_a \cdot A_a \cdot \varepsilon_{cs} + \phi' \cdot n' \mu \cdot N_{co}') \right. \\ &\quad \cdot \left[1 + n' \left(\frac{I_a}{I_c} \right) (1 + \kappa \phi') \right] \\ &\quad \left. + \phi' \cdot n' \mu \frac{a^2}{r_c^2} \frac{M_{co}'}{a} \right\} \\ \Delta M_{ct}' &= -\lambda' \left\{ (E_a \cdot A_a \cdot \varepsilon_{cs} + \phi' \cdot n' \mu \cdot N_{co}') \cdot a \right. \\ &\quad \left. + \phi' \left[n' \mu \frac{a^2}{r_c^2} + n' \left(\frac{I_a}{I_c} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \cdot (1 + n' \mu (1 + \kappa \phi')) \right] M_{co}' \right\} \\ \Delta M_{at}' &= \lambda' \cdot n \left(\frac{I_a}{I_c} \right) \left\{ - (E_a \cdot A_a \cdot \varepsilon_{cs} \right. \\ &\quad \left. + \phi' \cdot n' \mu N_{co}') (1 + \kappa \phi') a \right. \\ &\quad \left. + \phi' [1 + n' \mu (1 + \kappa \phi')] M_{co}' \right\} \end{aligned} \right\} (29)$$

ここに、

$$\frac{1}{\lambda'} = 1 + n' \mu (1 + \kappa \phi') \left(1 + \frac{a^2}{r_c^2} \right) + n' \left(\frac{I_a}{I_c} \right) (1 + \kappa \phi') \{ 1 + n' \mu (1 + \kappa \phi') \}$$

計算例題 1

図-6 に示すプレテンション方式部材断面応力計算。作用する永久荷重モーメント $M_g = 4500 \times 10^3 \text{ kg-cm}$ である。プレストレスング力は上下各段 PC 緊張材につき 40 t および 160 t とする。全プレストレスング力作用点は上縁から 90 cm の位置にある。

(1) 鉄筋配置ある場合

a) プレストレスを与えた直後 $n=6$ とすると、合成断面図心とコンクリート断面図心との距離は、

$$a \frac{n \mu a}{1 + n \mu a} = -21.7 \times \frac{6 \times 42 / 3558}{1 + 6 \times 42 / 3558} = -1.4 \text{ cm}$$

プレストレスング合力と合成断面図心との距離、
 $-90 + (59.7 + 1.4) = -28.9 \text{ cm}$

よって断面力 N_0, M_0 は次のようである。

$$N_0 = 200 \times 10^3$$

$$M_0 = -200 \times 10^3 \times 28.9 + 4500 \times 10^3 = -1280 \times 10^3$$

$$n \left(\frac{I_a}{I_c} \right) = 0.1220, \quad \frac{a^2}{r_c^2} = \frac{21.7^2}{1185} = 0.3974$$

$$k = 1 + \frac{0.07083}{1 + 0.07083} \times 0.3974 = 1.0263,$$

$$k + n \left(\frac{I_a}{I_c} \right) = 1.148$$

よってプレストレスを与えた直後の各断面力は、

$$N_{co} = 200 \times 10^3 \times \frac{1}{1.0708} + \frac{1280 \times 10^3}{21.7} \times \frac{0.0263}{1.148} = 186.8 \times 10^3 - 1.4 \times 10^3 = 185.4 \times 10^3$$

$$M_{co} = -\frac{1280 \times 10^3}{1.148} = -1.115 \times 10^3$$

$$N_{a0} = 200 \times 10^3 \times \frac{0.0708}{1.0708} + \frac{1280 \times 10^3}{21.7} \times \frac{0.0263}{1.148} = 13.2 \times 10^3 + 1.4 \times 10^3 = 14.6 \times 10^3$$

$$M_{a0} = -1280 \times 10^3 \times \frac{0.1220}{1.148} = -136 \times 10^3$$

b) クリープ、乾燥収縮による断面力変化

$\phi = 2.6, \varepsilon_{cs} = 20 \times 10^{-5}$ とする。

報 告

$$\phi' = 0.714(2.6 - 0.4) = 1.57$$

$$\kappa = (1 - e^{-1.57})^{-1} - 1.57^{-1} = (1 - 0.2080)^{-1} - 0.6369$$

$$= 1.2626 - 0.6369 = 0.626$$

N_{co}' , M_{co}' 等を求めるには式 (24) の補正乗数を用いる。

$$\beta = \frac{0.07083}{1 + 0.07083} = 0.06615, \quad 1 + 0.4\beta = 1.026$$

$$\gamma = \frac{1.3974}{1.148} = 1.215 \quad \delta = \frac{0.1220}{1.148} = 0.1063$$

$$1 + 0.4[\beta\gamma + \delta(1 + 1.4\beta)] = 1 + 0.4 \times (0.06615 \times 1.215$$

$$+ 0.1063 \times 1.0926) = 1.079$$

$$N_{co}' = 186.8 \times 10^3 \times \frac{1}{1.026} - 1.4 \times 10^3 \times \frac{1.4}{1.079}$$

$$= 182.1 \times 10^3 - 1.8 \times 10^3 = 180.3 \times 10^3$$

$$M_{co}' = -1115 \times 10^3 \times \frac{1.026}{1.079} = -1060 \times 10^3$$

$$N_{ao}' = 13.2 \times 10^3 \times \frac{1.4}{1.026} + 1.4 \times 10^3 \times \frac{1.4}{1.079}$$

$$= 19.8 \times 10^3$$

$$M_{ao}' = -136 \times 10^3 \times \frac{1.4 \times 1.026}{1.079} = -181 \times 10^3$$

$$1 + \kappa\phi' = 1.983$$

$$n'\mu_a = 0.09916 \quad n'\mu_a(1 + \kappa\phi') = 0.1966$$

$$n'\mu_a \frac{a^2}{r_c^2} = 0.03941$$

$$n' \frac{I_a}{I_c} = 0.01708 \quad n' \frac{I_a}{I_c} (1 + \kappa\phi') = 0.3387$$

$$E_a A_a \varepsilon_{cs} + \phi' n' \mu_a N_{co}' = 20 \times 10^5 \times 42 \times 20 \times 10^{-5}$$

$$+ 1.57 \times 0.09916 \times 180.3 \times 10^3$$

$$= 44.9 \times 10^3$$

$$\frac{1}{\lambda'} = 1 + 0.1966 \times 1.3974 + 0.3387 \times 1.1966 = 1.680$$

式 (29) より,

$$4N_{ct}' = -4N_{at}'$$

$$= -\frac{1}{1.680} \left(44.9 \times 10^3 \times 1.339 + 0.03941 \times \frac{1060 \times 10^3}{21.7} \times 1.57 \right) = -37.6 \times 10^3$$

$$4M_{ct}' = -\frac{1}{1.680} [-44.9 \times 10^3 \times 21.7 + 1.57$$

$$\times (0.03941 + 0.1708 \times 1.197) \times (-1060 \times 10^3)]$$

$$= +822 \times 10^3$$

$$4M_{at}' = \frac{0.1708}{1.680} (44.9 \times 10^3 \times 1.983 \times 21.7$$

$$- 1.57 \times 1.197 \times 1060 \times 10^3) = -6.8 \times 10^3$$

検算

$$4M_{ct}' + 4M_{at}' + 4N_{at}' \cdot a = +822 \times 10^3 - 6.8 \times 10^3$$

$$- 37.6 \times 10^3 \times 21.7 = 0$$

(2) 鉄筋配置なき場合

a) プレストレスを与えた直後 $n=6$ とした PC 緊張材との合成断面図心 G_{c+p} とコンクリート断面図心 G_c との距離

$$n\mu_p = 6 \times 28/3572 = 0.04703$$

$$G_{c+p} \text{ と } G_c \text{ との距離} = -21.6 \times \frac{0.04703}{1.04703} = -1.0 \text{ cm}$$

プレストレス力合力作用点と G_{c+p} との距離

$$-(90 + 59.8 + 1.0) = -29.2 \text{ cm}$$

よって断面力は,

$$N_0 = 200 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$M_0 = -200 \times 10^3 \times 29.2 + 4500 \times 10^3$$

$$= -1340 \times 10^3 \text{ kg-cm}$$

$$n \left(\frac{I_a}{I_c} \right) = 0.08067 \quad \frac{a^2}{r_c^2} = 0.3924,$$

$$k = 1 + 0.04492 \times 0.3924 = 1.0176$$

$$k + n \left(\frac{I_a}{I_c} \right) = 1.0983$$

$$N_{co} = \frac{200 \times 10^3}{1.0983} - \frac{1340 \times 10^3}{21.6} \times \frac{0.0176}{1.0983}$$

$$= 191.0 \times 10^3 - 1.0 \times 10^3 = 190.0 \times 10^3$$

$$M_{co} = -\frac{1340 \times 10^3}{1.0983} = -1220 \times 10^3$$

$$N_{po} = \frac{200 \times 10^3}{1.0983} \times 0.04703 + \frac{1340 \times 10^3}{21.6} \times \frac{0.0176}{1.0983}$$

$$= 9.0 \times 10^3 + 1.0 \times 10^3 = 10.0 \times 10^3$$

$$M_{po} = -\frac{1340 \times 10^3}{1.0983} \times 0.08067 = -98.4 \times 10^3$$

b) クリープ, 乾燥収縮による断面力変化 N_{co}' , M_{co}' に対する補正を実施する。

$$\beta = 0.04492 \quad 1 + 0.4\beta = 1.0180$$

$$\gamma = 1.3924/1.0983 = 1.2678$$

$$\delta = 0.08067/1.0983 = 0.07345$$

$$1 + 0.4[\beta\gamma + \delta(1 + 1.4\beta)] = 1 + 0.4 \times (0.04492 \times 1.268$$

$$+ 0.07345 \times 1.0629) = 1.054$$

$$N_{co}' = 191.0 \times 10^3 \times \frac{1}{1.0180} - 1.0 \times 10^3 \times \frac{1.4}{1.054}$$

$$= 186.3 \times 10^3$$

$$M_{co}' = -1220 \times 10^3 \times \frac{1.018}{1.054} = -1178 \times 10^3$$

$$N_{po}' = 9.0 \times 10^3 \times \frac{1.4}{1.018} + 1.0 \times 10^3 \times \frac{1.4}{1.054}$$

$$= 13.7 \times 10^3$$

$$M_{po}' = -98.4 \times 10^3 \times \frac{1.4 \times 1.018}{1.054} = -133 \times 10^3$$

$$n'\mu_p = 0.06584, \quad n' \left(\frac{I_a}{I_c} \right) = 0.1129, \quad \phi' n'\mu_p = 0.1034,$$

$$n'\mu_p \cdot \frac{a^2}{r_c^2} = 0.02584, \quad n'\mu_p(1 + \kappa\phi') = 0.1306$$

表-3 断面力 (単位 kg, cm)

断 面			鉄 筋 配 置	
			あ り	な し
コンクリート断面	プレストレスを与えた直後	軸 力	+185.4×10 ³	+190.0×10 ³
		曲げモーメント	-1115×10 ³	-1220×10 ³
コンクリート断面	クリープ, 乾燥収縮終了時	軸 力	+142.7×10 ³	+158.8×10 ³
		曲げモーメント	-238×10 ³	-522×10 ³
鋼材断面	プレストレスを与えた直後	軸 力	+14.6×10 ³	+10.0×10 ³
		曲げモーメント	-136×10 ³	-98.4×10 ³
鋼材断面	クリープ, 乾燥収縮終了時	軸 力	+57.4×10 ³	+41.2×10 ³
		曲げモーメント	-187.6×10 ³	-194.9×10 ³

$$n' \left(\frac{I_p}{I_c} \right) (1 + \kappa \phi') = 0.224$$

$$E_a \cdot A_a \cdot \epsilon_{cs} + \phi' n' \mu_p N_{c0}' = 400 \times 28 + 1.57 \times 0.06584 \times 186.3 \times 10^3 = 30.5 \times 10^3$$

$$\frac{1}{\lambda'} = 1 + 0.1306 \times 1.3924 + 0.2240 \times 1.1306 = 1.435$$

$$\Delta N_{ct}' = -\Delta N_{pt}'$$

$$= -\frac{1}{1.435} \left(30.5 \times 10^3 \times 1.224 + 0.1034 \times 0.3924 \times \frac{1178 \times 10^3}{21.6} \right) = -27.5 \times 10^3$$

$$\Delta M_{ct}' = -\frac{1}{1.435} \left[-30.5 \times 10^3 \times 21.6 + 1.57 \times (0.02584 + 0.1129 \times 1.1306) \times (-1178 \times 10^3) \right] = +656 \times 10^3$$

$$\Delta M_{pt}' = \frac{0.1129}{1.435} \left(30.5 \times 10^3 \times 1.983 \times 21.6 - 1.57 \times 1.1306 \times 1178 \times 10^3 \right) = -61.9 \times 10^3$$

検算

$$\Delta M_{ct}' + \Delta M_{pt}' + \Delta N_{pt}' \cdot a = +656 \times 10^3 - 61.9 \times 10^3 - 27.5 \times 10^3 \times 21.6 = 0$$

(3) 鉄筋配置の有無による応力度の相違

コンクリート断面および鋼材断面に作用する断面力および断面力の変化をまとめると表-3のようになる。

各断面力(表-3)を用い,各断面の断面諸元を用いて求められる。すなわち,軸力と曲げを受ける場合の応力計算を実施すればよい。断面諸元は図-5に示してある。計算結果は表-4のようである。

以上はプレストレスと永久荷重との合成したものに對するものであるが,鉄筋配置によってPC緊張材引張応力度の減少量は小さくなるが,鉄筋拘束によってコンクリート下縁応力度の減少量は大となる。

表-4 応力度計算結果

断 面			鉄筋配置	
			あ り	な し
コンクリート 応 力 度 (kg/cm ²)	プレストレス を与えた直後	上縁	+36	+34
		下縁	+68	+72
コンクリート 応 力 度 (kg/cm ²)	クリープ, 乾 燥収縮終了時	上縁	+37	+37
		下縁	+44	+52
P C 緊張材 応 力 度 (kg/mm ²)	プレストレス を与えた直後	上段	-47.6	-47.6
		下段	-76.0	-75.9
P C 緊張材 応 力 度 (kg/mm ²)	クリープ, 乾 燥収縮終了時	上段	-37.9	-37.7
		下段	-65.7	-64.3
鉄筋応力度 (kg/mm ²)	プレストレス を与えた直後	上段	+2.4	-
		下段	+4.0	-
鉄筋応力度 (kg/mm ²)	クリープ, 乾 燥収縮終了時	上段	+12.1	-
		下段	+14.3	-

計算例題 2

図-7 に示すポストテンション方式桁断面の応力計算 PC 緊張材端引張力 511 t, 摩擦損失は考える断面で 56 t, 永久荷重曲げモーメント 186.3 tm とする。

(1) 鉄筋断面を考慮する場合

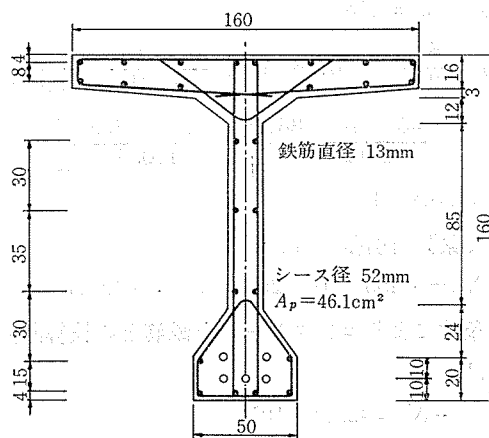


図-7 計算例題 2

報 告

断面諸元は次のようである。

コンクリート断面

$$A_c = 0.6284 \text{ m}^2, I_c = 0.2023 \text{ m}^4, r_c^2 = 0.3219 \text{ m}^2, e_{pc} = 0.869 \text{ m}$$

断面図心位置上縁より $y_{ct} = 0.591 \text{ m}$, 下縁より $y_{cb} = 1.009 \text{ m}$

鉄筋断面：コンクリート断面図心と鉄筋断面図心との距離 $a_s = +2.3 \text{ cm}$

$A_s = 33.02 \text{ cm}^2, I_s = 12.03 \times 10^4 \text{ cm}^4$ 断面図心位置上縁より $y_{st} = 568 \text{ cm}$

全鋼材断面：コンクリート断面図心と全鋼材断面図心との距離 $a_a = -49.7 \text{ cm}$

$A_a = 79.12 \text{ cm}^2, I_a = 27.34 \times 10^4 \text{ cm}^4$, 断面図心位置上縁より $y_{at} = 108.8 \text{ cm}$

a) プレストレスを与えた直後 弾性変形によるプレストレッシング力損失 ΔP_{el}

$$\Delta P_{el} \cong \frac{N-1}{2N} \cdot A_p \cdot n \times (\text{PC緊張材図心位置コンクリート応力度})$$

ここに N : PC緊張材本数

PC緊張材位置コンクリート応力度は鉄筋の合成断面に対して求めると次のようである。

PC緊張材位置コンクリート応力度

$$= \frac{P}{A_c} \frac{1}{1+n\mu_s} + \frac{Pe_{pc}^2}{I_c} \frac{\left(1 - \frac{a_s}{e_{pc}} \frac{n\mu_s}{1+n\mu_s}\right)^2}{k_s + n \left(\frac{I_s}{I_c}\right)}$$

$$n\mu_s = 6 \times \frac{3302}{6284} = 0.03153$$

$$k_s = 1 + \frac{0.03153}{1.03153} \times \frac{2.3^2}{3219} = 1.0000502$$

$$n \left(\frac{I_s}{I_c}\right) = 6 \times \frac{12.03 \times 10^4}{2023 \times 10^4} = 0.03568$$

$$1 - \frac{a_s}{e_{pc}} \cdot \frac{n\mu_s}{1+n\mu_s} = 1 - \frac{2.3}{(-86.9)} \times \frac{0.03153}{1.03153} = 1.000809$$

$$P = 511 - 56 = 455 \text{ t}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{el} &= \frac{5-1}{2 \times 5} \times 46.16 \times 6 \times \left[\frac{455 \times 10^3}{6284} \times \frac{1}{1.0315} \right. \\ &\quad \left. + \frac{455 \times 10^3 \times 86.9^2}{2023 \times 10^4} \times \frac{1.000809^2}{1.0357} \right] \\ &= 25.9 \times 10^3 \end{aligned}$$

よって緊張材引張力は、

$$N_p = -455 \times 10^3 + 25.9 \times 10^3 = -429.1 \times 10^3$$

釣合条件によりコンクリートと鉄筋との換算断面に対する力は、

$$N_0 = -N_p = 429.1 \times 10^3$$

$$M_0 = -429.1 \times 10^3 \times 86.9 \times 1.000809 + 18630 \times 10^3$$

$$= -18689 \times 10^3$$

コンクリートおよび鉄筋断面に対する断面力は、

$$\begin{aligned} N_{c0} &= \frac{429.1 \times 10^3}{1.03153} + \frac{18689 \times 10^3}{2.3} \times \frac{0.0000502}{1.0357} \\ &= 416.0 \times 10^3 + 0.4 \times 10^3 = 416.4 \times 10^3 \end{aligned}$$

$$M_{c0} = -\frac{18689 \times 10^3}{1.03153} = -18045 \times 10^3$$

$$\begin{aligned} N_{s0} &= \frac{429.1 \times 10^3}{1.03153} \times 0.03153 - \frac{18689 \times 10^3}{2.3} \\ &\quad \times \frac{0.0000502}{1.0357} = 13.1 \times 10^3 - 0.4 \times 10^3 \\ &= 12.7 \times 10^3 \end{aligned}$$

$$M_{s0} = -\frac{18689 \times 10^3}{1.0357} \times 0.03568 = -644 \times 10^3$$

b) クリープ、乾燥収縮による断面力変化 $\phi = 2.6$

$\epsilon_{cs} = 20 \times 10^{-5}$, とすると $\phi' = 1.57, \kappa = 0.626$

以下コンクリートヤング係数を $E_c' = E_c/1.4$ として計算を進める。

$n' = 1.4n$ として計算する場合の $\Delta P_{e'l}$ に対する補正

$$\beta_s = n\mu_s / (1+n\mu_s) = 0.03153 / 1.03153 = 0.03057$$

$$1 + 0.4\beta_s = 1.0122$$

$$= r_s(1 + a_s^2/r_c^2) / \left(k_s + n \left(\frac{I_s}{I_c} \right) \right) = \left(1 + \frac{2.3^2}{3219} \right) / 1.0357$$

$$= 0.9671$$

$$\delta_s = n \left(\frac{I_s}{I_c} \right) / \left(k_s + n \left(\frac{I_s}{I_c} \right) \right) = 0.03568 / 1.0357$$

$$= 0.03445$$

$$\lambda_s = \left(1 - \frac{a_s}{e_{pc}} \right) / \left(1 - \frac{a_s}{e_{pc}} \frac{n\mu_s}{1+n\mu_s} \right)$$

$$= (1 + 2.3/86.9) / 1.000809 = 1.0256$$

$$1 + 0.4[\beta_s r_s + \delta_s(1 + 1.4\beta_s)] = 1.0262$$

$$1 + 0.4\beta_s \lambda_s = 1.0125$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{e'l} &= 110.64 \left[70.2 \times \frac{1.4}{1.0122} \right. \\ &\quad \left. + 164.3 \times \frac{1.4 \times 1.0125^2}{1.0122 \times 1.0262} \right] = 35.9 \times 10^3 \end{aligned}$$

$$N_p' = -455 \times 10^3 + 35.9 \times 10^3 = -419.1 \times 10^3$$

よって、

$$N_0' = 419.1 \times 10^3$$

$$\begin{aligned} M_0' &= -419.1 \times 10^3 \times 86.9 \times 1.00119 + 18630 \times 10^3 \\ &= -17833 \times 10^3 \end{aligned}$$

コンクリートおよび鉄筋に対する断面力は、

$$N_{c0}' = \frac{419.1 \times 10^3}{1.03153} \times \frac{1}{1.0122} + \frac{17833 \times 10^3}{2.3}$$

$$\times \frac{0.0000502}{1.0357} \times \frac{1.4}{1.0262} = 402.2 \times 10^3$$

$$M_{c0}' = -\frac{17833 \times 10^3}{1.0357} \times \frac{1.0122}{1.0262} = -16983 \times 10^3$$

$$N_{s0}' = \frac{419.1 \times 10^3}{1.03153} \times 0.03153 \times \frac{1.4}{1.0122} - \frac{17833 \times 10^3}{2.3} \times \frac{0.0000502}{1.0357} \times \frac{1.4}{1.0262}$$

$$= 17.2 \times 10^3$$

$$M_{s0}' = -\frac{17833 \times 10^3}{1.0357} \times 0.03568 \times \frac{1.4 \times 1.0122}{1.0262}$$

$$= -848 \times 10^3$$

緊張材は付着しているのので、クリープ、乾燥収縮による断面力変化の計算には、全鋼材断面積を考慮する。

$$n' \mu_a = 0.1058, n' \mu_a (1 + \kappa \phi') = 0.2097, \phi' n' \mu_a = 0.1661$$

$$n' \frac{I_a}{I_c} = 0.1135, n' \left(\frac{I_a}{I_c} \right) (1 + \kappa \phi') = 0.2251$$

$$\frac{1}{\lambda'} = 1 + 0.2097 \times 1.7673 + 0.2251 \times 1.2097 = 1.643$$

$$E_a A_a \varepsilon_{cs} + \phi' n' \mu_a N_{c0}' = 98.5 \times 10^3$$

$$\Delta N_{ct}' = -\Delta N_{at}' = -100.0 \times 10^3$$

$$\Delta M_{ct}' = +6525 \times 10^3$$

$$\Delta M_{at}' = -1558 \times 10^3$$

検算

$$\Delta M_{ct}' + \Delta M_{at}' + \Delta N_{at}' \cdot a = 6525 \times 10^3 - 1558 \times 10^3 - 100 \times 10^3 \times 49.7 = 0$$

c) 応力計算

1) プレストレッシング直後:

$$N_{c0} = 416.4 \times 10^3, M_{c0} = -18045 \times 10^3,$$

$$N_{s0} = 12.7 \times 10^3, M_{s0} = -644 \times 10^3$$

• コンクリート応力度

$$\text{上 縁} \dots 416.4 \times 10^3 / 6284 - 18045 \times 10^3 / 342.3 \times 10^3 = +14 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{下 縁} \dots 416.4 \times 10^3 / 6284 + 18045 \times 10^3 / 200.5 \times 10^3 = +156 \text{ kg/cm}^2$$

• 鉄筋応力度

$$\text{最上段} \dots 12.7 \times 10^3 / 33.02 - 644 \times 10^3 / 2.278 \times 10^3 = +100 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{最下段} \dots 12.7 \times 10^3 / 33.02 + 644 \times 10^3 / 1.213 \times 10^3 = +920 \text{ kg/cm}^2$$

• 緊張材応力度

$$\text{平均値} \dots -429.1 \times 10^3 / 46.1 = -9310 \text{ kg/cm}^2$$

2) クリープ、乾燥収縮終了時

$$N_{c0}' + \Delta N_{ct}' = 402.2 \times 10^3 - 100 \times 10^3 = 302.2 \times 10^3$$

$$M_{c0}' + \Delta M_{ct}' = -16983 \times 10^3 + 6525 \times 10^3 = -10458 \times 10^3$$

$$N_{s0}' = 17.2 \times 10^3, M_{s0}' = -848 \times 10^3$$

$$\Delta N_{at}' = +100 \times 10^3, \Delta M_{at}' = -1558 \times 10^3$$

• コンクリート応力度

$$\text{上 縁} \dots 302.2 \times 10^3 / 6284 - 10458 \times 10^3 / 342.3 \times 10^3 = +18 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{下 縁} \dots 302.2 \times 10^3 / 6284 + 10458 \times 10^3 / 200.5 \times 10^3 = +100 \text{ kg/cm}^2$$

• 鉄筋応力度

$$\text{最上段} \dots (17.2 \times 10^3 / 33.02 - 848 \times 10^3 / 2.278 \times 10^3) + (100 \times 10^3 / 79.12 - 1558 \times 10^3 / 2.609 \times 10^3) = +820 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{最下段} \dots (17.2 \times 10^3 / 33.02 + 848 \times 10^3 / 1.213 \times 10^3) + (100 \times 10^3 / 79.12 + 1558 \times 10^3 / 5.79 \times 10^3) = +2750 \text{ kg/cm}^2$$

• 緊張材応力度

$$\text{平均} \dots -419.1 \times 10^3 / 46.1 + (100 \times 10^3 / 79.12 + 1558 \times 10^3 / 7.349 \times 10^3) = -7615 \text{ kg/cm}^2$$

(2) 鉄筋を無視する場合

コンクリート断面諸元は次のようである。

$$A_c = 6317 \text{ cm}^2, I_c = 2035 \times 10^4 \text{ cm}^4, r_c^2 = 3221 \text{ cm}^2$$

$$y_{ct} = 59.1 \text{ cm}, y_{cb} = 100.9 \text{ cm}, e_{pc} = -86.9 \text{ cm} = a_p$$

a) プレストレッシング直後

$$\Delta P_{el} = \frac{5-1}{2 \times 5} \times 46.1 \times 6 \times \left(\frac{455 \times 10^3}{6317} + \frac{455 \times 10^3 \times 86.9^2}{2035 \times 10^4} \right) = 26.7 \times 10^3$$

よって

$$N_{c0} = 455 \times 10^3 - 26.7 \times 10^3 = 428.3 \times 10^3$$

$$M_{c0} = -428.3 \times 10^3 \times 86.9 + 18630 \times 10^3 = -18589 \times 10^3$$

$$N_{p0} = -428.3 \times 10^3$$

b) クリープ、乾燥収縮終了時断面力変化

$$\Delta P_{el}' = 1.4 \times P_{el} = 37.4 \times 10^3$$

$$N_{c0}' = 455 \times 10^3 - 37.4 \times 10^3 = 417.6 \times 10^3$$

$$M_{c0}' = -417.6 \times 10^3 \times 86.9 + 18630 \times 10^3 = -17659 \times 10^3$$

$$N_{p0}' = -417.6 \times 10^3$$

$$n' \mu_p = 1.4 \times 6 \times 46.1 / 6317 = 0.06130$$

$$n' \mu_p (1 + \kappa \phi') = 0.12156$$

$$n' \left(\frac{I_p}{I_c} \right) = 0$$

$$\frac{1}{\lambda'} = 1 + 0.12156 \times (1 + 86.9^2 / 3221) = 1.4066$$

$$E_p A_p \varepsilon_{cs} + \phi' n' \mu_p N_{c0}' = 58.6 \times 10^3$$

$$\Delta N_{ct}' = -\Delta N_{pt}' = -74.3 \times 10^3$$

$$\Delta M_{ct}' = +6453 \times 10^3$$

$$\text{検算 } \Delta M_{ct}' + \Delta N_{pt}' \cdot e_p = 0$$

c) 応力度計算

1) プレストレッシング直後

$$N_{c0} = 428.3 \times 10^3 = -N_{p0}, M_{c0} = -18589 \times 10^3$$

- コンクリート応力度
上 縁... $428.3 \times 10^3 / 6 \cdot 317 - 18 \cdot 589 \times 10^3 / 344.3 \times 10^3$
= +14 kg/cm²
下 縁... $428.3 \times 10^3 / 6 \cdot 317 + 18 \cdot 589 \times 10^3 / 201.7 \times 10^3$
= +160 kg/cm²

- 緊張材応力度
平 均... $-428.3 \times 10^3 / 46.1 = -9 \cdot 290$ kg/cm²

2) クリープおよび乾燥収縮終了後

- コンクリート応力度
 $N_{co}' + \Delta N_{ct}' = 417.6 \times 10^3 - 74.3 \times 10^3 = 343.3 \times 10^3$
 $M_{co}' + \Delta M_{ct}' = -17 \cdot 659 \times 10^3 + 6 \cdot 453 \times 10^3$
= -11 206 × 10³

上 縁.....+ 21 kg/cm²

下 縁.....+110 kg/cm²

- 緊張材応力度
 $N_{po}' + \Delta N_{po}' = -417.6 \times 10^3 + 74.3 \times 10^3 = -343.3$ t
平 均.....-7 450 kg/cm²

(3) 鉄筋の有無による応力度比較

鉄筋断面積を考慮した場合と、無視した場合とについて各部材応力度計算結果をまとめると表-5 のようである。

表-5 応力度の比較 (kg/cm²)

			鉄筋断面	
			考慮	無視
コンクリート 応 力 度	プレストレッ シング直後	上縁	+14	+14
		下縁	+156	+160
	クリープ、乾 燥収縮終了時	上縁	+18	+21
		下縁	+100	+110
緊張材平均 応 力 度	プレストレッ シング直後	-9 310	-9 290	
	クリープ、乾 燥収縮 終了時	-7 615	-7 450	
鉄筋応力度	プレストレッ シング直後	最上段	+100	-
		最下段	+920	-
	クリープ、乾 燥収縮終了時	最上段	+820	-
		最下段	+2 750	-

以上は付着ある鉄筋の影響を特に考慮する場合、緊張材が数段に配置され、これらをその図心に集中しているとみなせない場合、等に用いられる計算方法であるが、相当煩雑である。以上の例からも明らかなように、鉄筋の拘束の応力に対する影響は無視できないものである。

4. 分割施工における永久荷重モーメント変動

時点 t_{n-1} と t_n とにおける支点 i におけるコンクリートクリープによる不静定モーメントを $X_{i,n-1}'$ および $X_{i,n}'$ とする。

$\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$ 時間内に生ずる基本的静定系支点 i 断面の相対回転の増分は両時点間での不静定モーメントの差 $\Delta X_{i,n}'$ による弾性増分とクリープ増分との和である。

$X_i = 1$ による基本静定系における弾性相対回転を r_{ii}' (E_c' を用いて計算する) とすれば、 $\Delta X_{i,n}'$ による相対回転増分は、

$$\Delta X_{i,n}' \cdot r_{ii}' \cdot (1 + \kappa \cdot \Delta_n \phi')$$

である。 $\Delta_n \phi'$ は Δt_n 時間内でのクリープ係数 ϕ' の増分であり、これに対する κ 値は式 (17) で定められる。

r_{ii}' を求めるにあたってコンクリート材令の異なる区間にわたる積分が含まれるときには、それぞれの区間についての値を別々に求めておく。例えば

$$r_{ii}' = \int M_i \cdot M_i \cdot ds / E_c' I$$

の積分が、材令の異なるコンクリート区間 a, b, c にわたる場合は次のように表わす。

$$r_{ii}' = r_{ii(a)'} + r_{ii(b)'} + r_{ii(c)'} \\ = \int_a \frac{M_i \cdot M_i}{E_c' I} ds + \int_b \frac{M_i \cdot M_i}{E_c' I} ds + \int_c \frac{M_i \cdot M_i}{E_c' I} ds$$

同様に r_{ij}' は $X_j = 1.0$ が作用したときの支点 i の静定基本系に関する相対回転を求めることが可能である。

永久荷重および、一定モーメント作用による、静定基本系断面 i の相対回転を r_{io}' とする。

よって断面 i における適合条件を Δt_n 時間内で、3連モーメントの式を用いて書くと次のようである。

$$\Delta X_{i-1,n} [r_{i,i-1}' + r_{i,i-1(a)'} \cdot \kappa(a) \cdot \Delta_n \phi_n(a)'] \\ + r_{i,i-1(b)'} \cdot \kappa(b) \cdot \Delta_n \phi_n(b)' + r_{i,i-1(c)'} \cdot \kappa(c) \cdot \Delta_n \phi_n(c)'] \\ + \Delta X_{i,n} [r_{ii}' + r_{ii(a)'} \cdot \kappa(a) \cdot \Delta_n \phi(a)'] \\ + r_{i,i(b)'} \cdot \kappa(b) \cdot \Delta_n \phi(b)' + r_{i,i(c)'} \cdot \kappa(c) \cdot \Delta_n \phi(c)'] \\ + \Delta X_{i+1,n} [r_{i,i+1}' + r_{i,i+1(a)'} \cdot \kappa(a) \cdot \Delta_n \phi(a)'] \\ + r_{i,i+1(b)'} \cdot \kappa(b) \cdot \Delta_n \phi(b)' + r_{i,i+1(c)'} \cdot \kappa(c) \cdot \Delta_n \phi(c)'] \\ + \delta_{i0(a)'} \cdot \Delta_n \phi(a)' + \delta_{i0(b)'} \cdot \Delta_n \phi(b)' + \delta_{i0(c)'} \cdot \Delta_n \phi(c)' = 0 \\ \dots \dots \dots (31)$$

ここに、

$$\Delta_n \phi(a)' = \phi(a)'(t_n) - \phi(a)'(t_{n-1})$$

であってフローのみを考え、 $\phi' = \frac{1}{1.4} \phi_f$ とすればよい。

以上の3連モーメント方程式を順次施工進行に応じて計算する。

例 題 3

図-8 に示す3径間連続桁を3区間に分割施工するものとする。各区間支保工撤去は、各区間コンクリート材令 10 日のときとする。各施工時点での各区間コンクリート材令は表-6 のようである。

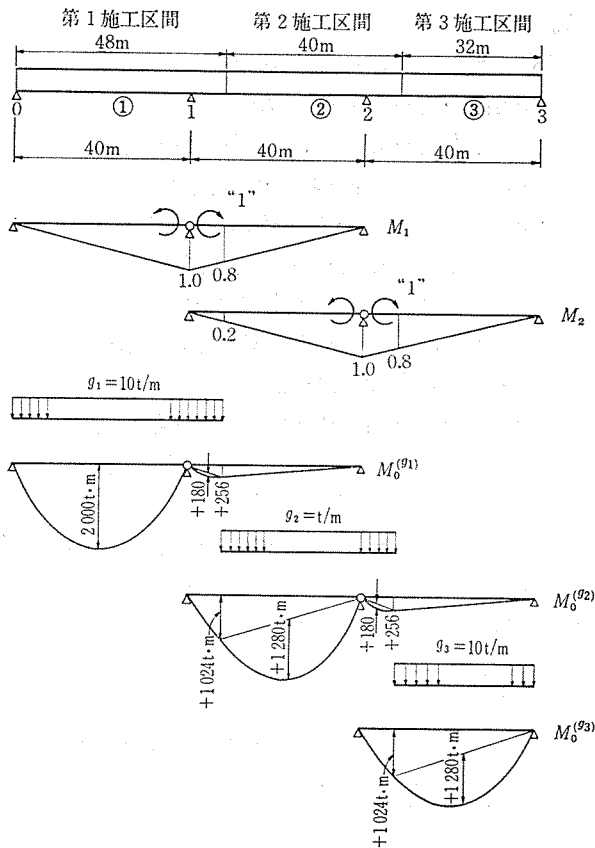


図-8 計算例題3

表-6 施工段階のコンクリート材令(日)

	各区間コンクリート材令(日)		
	第1区間	第2区間	第3区間
第1区間支保工撤去	10		
第1, 第2区間結合 第2区間支保工撤去	60	10	
第2, 第3区間結合 第3区間支保工撤去	100	50	10

クリープ関数は近似式を用い、 $h_{th}=40$ cm, 基準フロ一値 $\phi_f=2.0$ と仮定する。

基本静定系は中間支点断面にヒンジをそう入した構造とする。弾性回転 r' は $E_c \cdot I$ は一定と仮定し、これを単位値とし計算すると次のようである(図-8 参照)。

$$r_{11}' = \int \frac{M_1 M_1}{E'I} dx = r_{11(1)'} + r_{11(2)'} = 19.84 + 6.83 = 26.67$$

$$r_{12}' = \int \frac{M_1 M_2}{E'I} dx = r_{12(1)'} + r_{12(2)'} = 0.693 + 5.973 = 6.67$$

$$r_{22}' = \int \frac{M_2 M_2}{E'I} dx = r_{22(1)'} + r_{22(2)'} + r_{22(3)'} = 0.107 + 19.734 + 6.827 = 26.67$$

$$r_{10}'(g_1) = \int \frac{M_1 M_0(g_1)}{E'I} dx = r_{10(1)}'(g_1) + r_{10(2)}'(g_1) = 27\,938 + 2\,185 = 30\,123$$

$$r_{20}'(g_1) = \int \frac{M_2 M_0(g_1)}{E'I} dx = r_{10(1)}'(g_1) + r_{10(2)}'(g_1) = 179 + 1\,912 = 2\,091$$

$$r_{10}'(g_2) = \int \frac{M_1 M_0(g_2)}{E'I} dx = r_{10(1)}'(g_2) + r_{10(2)}'(g_2) = 3\,550 + 19\,661 = 23\,211$$

$$r_{20}'(g_2) = \int \frac{M_2 M_0(g_2)}{E'I} dx = r_{20(1)}'(g_2) + r_{20(2)}'(g_2) + r_{20(3)}'(g_2) = 546 + 25\,301 + 2\,185 = 28\,032$$

$$r_{10}'(g_3) = \int \frac{M_1 M_0(g_3)}{E'I} dx = 0$$

$$r_{20}'(g_3) = \int \frac{M_2 M_0(g_3)}{E'I} dx = r_{20(2)}'(g_3) + r_{20(3)}'(g_3) = 3\,550 + 19\,661 = 23\,211$$

各施工順序に従って中間支点モーメントを次のように計算する。以下時点 t は第1区間コンクリート材令(日)を用いて表わすものとする。

(1) $t=10\sim60$ 日(第1区間支保工撤去後第2区間との結合直前)

この期間では静定構造であるから曲げモーメント変化はない。第1中間支点モーメントは

$$M_1 = M_1(g_1) = -320 \text{ tm}$$

である(図-9(a))。

(2) $t=60\sim100$ 日(第1第2区間結合後, 第2第3区間結合直前)

第2区間永久荷重 g_2 は, 2径間連続桁に作用する。よって弾性方程式は,

$$r_{11}' \cdot M_1(g_2) + r_{12}' \cdot M_2(g_2) + r_{10}'(g_2) = 0$$

$$M_1(g_2) = -(23\,211 - 6.67 \times 320) / 26.67 = -790 \text{ tm}$$

よって

$$M_1 = -320 - 790 = -1\,110 \text{ tm}$$

$$M_2 = -320 \text{ tm}$$

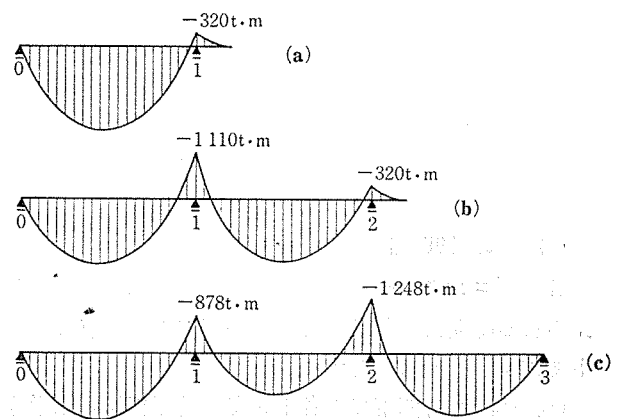


図-9 弾性曲げモーメント分布

弾性モーメント分布は 図-9(b) に示す。

$t=60\sim 100$ 日間における中間支点断面モーメントの変化を $\Delta X_{1,1}$ とすると、回転増分に関する適合条件式は、式 (31) と同様に次のように書ける。

$$\begin{aligned} \Delta X_{1,1} & [\tau_{11}' + \tau_{11(1)'} \cdot \kappa_{(1)} \cdot \Delta_1 \phi_{(1)'} + \tau_{11(2)'} \cdot \kappa_{(2)} \cdot \Delta_1 \phi_{(2)'}] \\ & + M_1 [\tau_{11(1)'} \cdot \Delta_1 \phi_{(1)'} + \tau_{11(2)'} \cdot \Delta_1 \phi_{(2)'}] \\ & + M_2 [\tau_{12(1)'} \cdot \Delta_1 \phi_{(1)'} + \tau_{12(2)'} \cdot \Delta_1 \phi_{(2)'}] \\ & + [\tau_{10(1)'}^{(g_1)} + \tau_{10(1)'}^{(g_2)}] \cdot \Delta_1 \phi_{(1)'} \\ & + [\tau_{10(2)'}^{(g_1)} + \tau_{10(2)'}^{(g_2)}] \cdot \Delta_1 \phi_{(2)'} = 0 \end{aligned}$$

ϕ_f は 図-3 を用いる。

$$\Delta_1 \phi_{(1)'} = \frac{2.0}{1.4} [\beta_f(100) - \beta_f(60)]$$

$$= 2.0 \times (0.48 - 0.42) = 0.12$$

$$\kappa_{(1)} = [1 - e^{-0.12}]^{-1} - 0.12^{-1} = 0.516,$$

$$\kappa_{(1)} \cdot \Delta_1 \phi_{(1)'} = 0.062$$

$$\Delta_1 \phi_{(2)'} = \frac{2.0}{1.4} [\beta_f(50) - \beta_f(10)]$$

$$= 2.0 \times (0.40 - 0.22) = 0.36$$

$$\kappa_{(2)} = [1 - e^{-0.36}]^{-1} - 0.36^{-1} = 0.533,$$

$$\kappa_{(2)} \cdot \Delta_1 \phi_{(2)'} = 0.192$$

よって上式の式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta X_{1,1} & (26.67 + 19.84 \times 0.062 + 6.83 \times 0.192) \\ & - 1110 \times (19.84 \times 0.12 + 6.83 \times 0.36) \\ & - 320 \times (0.693 \times 0.12 + 5.973 \times 0.36) \\ & + 31488 \times 0.12 + 21846 \times 0.36 = 0 \end{aligned}$$

$$\text{よって } \Delta X_{1,1} = -190 \text{ tm}$$

第2, 第3 区間結合直前各中間支点モーメント

$$M_1 = -1110 - 190 = -1300 \text{ tm}$$

$$M_2 = -320 \text{ tm}$$

(3) $t=100$ 日 (第2 第3 区間結合直後)

g_3 は 3 径間連続桁に作用する。弾性方歩程式は次のようである。

$$\tau_{11}' \cdot M_1^{(g_3)} + \tau_{12}' \cdot M_2^{(g_3)} + \tau_{10}^{(g_3)} = 0$$

$$\tau_{12}' \cdot M_1^{(g_3)} + \tau_{22}' \cdot M_2^{(g_3)} + \tau_{20}^{(g_3)} = 0$$

これを解いて、

$$M_1^{(g_3)} = +232 \text{ tm}$$

$$M_2^{(g_3)} = -928 \text{ tm}$$

よって支点モーメントは、

$$M_1 = -1300 + 232 = -1068 \text{ tm}$$

$$M_2 = -320 - 928 = -1248 \text{ tm}$$

(4) $t > 100$ 日

各区間コンクリートクリープ進行度が相似であると考えられる時間帯に分割して各時間帯内の支点モーメント変化を求めるものとする。

$(t_n - t_{n-1})$ 時間帯での各中間支点断面相对回転増分の適合条件式は第1, 第2 両支点について次のようであ

る。

$$\begin{aligned} \Delta X_{1,n} & [\tau_{11}' + \tau_{11(1)'} \cdot \kappa_{(1)} \cdot \Delta_n \phi_{(1)'} \\ & + \tau_{11(2)'} \cdot \kappa_{(2)} \cdot \Delta_n \phi_{(2)'}] + \Delta X_{2,n} [\tau_{12}' \\ & + \tau_{12(1)'} \cdot \kappa_{(1)} \cdot \Delta_n \phi_{(1)'} + \tau_{12(2)'} \cdot \kappa_{(2)} \cdot \Delta_n \phi_{(2)'}] \\ & + M_1(t_{n-1}) [\tau_{11(1)'} \cdot \Delta_n \phi_{(1)'} + \tau_{11(2)'} \cdot \Delta_n \phi_{(2)'}] \\ & + M_2(t_{n-1}) [\tau_{12(1)'} \cdot \Delta_n \phi_{(1)'} + \tau_{12(2)'} \cdot \Delta_n \phi_{(2)'}] \\ & + [\tau_{10(1)'}^{(g_1)} + \tau_{10(1)'}^{(g_2)}] \cdot \Delta_n \phi_{(1)'} \\ & + [\tau_{10(2)'}^{(g_1)} + \tau_{10(2)'}^{(g_2)}] \cdot \Delta_n \phi_{(2)'} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta X_{1,n} & [\tau_{12}' + \tau_{12(1)'} \cdot \kappa_{(1)} \cdot \Delta_n \phi_{(1)'} + \tau_{12(2)'} \cdot \kappa_{(2)} \cdot \Delta_n \phi_{(2)'}] \\ & + \Delta X_{2,n} [\tau_{22}' + \tau_{22(1)'} \cdot \kappa_{(1)} \cdot \Delta_n \phi_{(1)'} \\ & + \tau_{22(2)'} \cdot \kappa_{(2)} \cdot \Delta_n \phi_{(2)'} + \tau_{22(3)'} \cdot \kappa_{(3)} \cdot \Delta_n \phi_{(3)'}] \\ & + M_1(t_{n-1}) [\tau_{12(1)'} \cdot \Delta_n \phi_{(1)'} + \tau_{12(2)'} \cdot \Delta_n \phi_{(2)'} + \tau_{12(3)'} \cdot \Delta_n \phi_{(3)'}] \\ & + M_2(t_{n-1}) [\tau_{22(1)'} \cdot \Delta_n \phi_{(1)'} + \tau_{22(2)'} \cdot \Delta_n \phi_{(2)'} \\ & + \tau_{22(3)'} \cdot \Delta_n \phi_{(3)'}] + [\tau_{20(1)'}^{(g_1)} + \tau_{20(1)'}^{(g_2)}] \cdot \Delta_n \phi_{(1)'} \\ & + [\tau_{20(2)'}^{(g_1)} + \tau_{20(2)'}^{(g_2)} + \tau_{20(2)'}^{(g_3)}] \cdot \Delta_n \phi_{(2)'} \\ & + [\tau_{20(3)'}^{(g_2)} + \tau_{20(3)'}^{(g_3)}] \cdot \Delta_n \phi_{(3)'} = 0 \end{aligned}$$

ここに、

$M_1(t_{n-1}), M_2(t_{n-1}) \equiv$ 時点 t_{n-1} における第1, 第2 支点モーメント

a) $t=100$ 日 \sim 190 日

$$\Delta_2 \phi_{(1)'} = \phi_f'(190) - \phi_f'(100) = 0.18$$

$$\kappa_{(1)} = (1 - e^{-0.18})^{-1} - 0.18^{-1} = 0.505$$

$$\Delta_2 \phi_{(2)'} = \phi_f'(140) - \phi_f'(50) = 0.26$$

$$\kappa_{(2)} = (1 - e^{-0.26})^{-1} - 0.26^{-1} = 0.521$$

$$\Delta_2 \phi_{(3)'} = \phi_f'(100) - \phi_f'(10) = 0.52$$

$$\kappa_{(3)} = (1 - e^{-0.52})^{-1} - 0.52^{-1} = 0.546$$

$$\kappa_{(1)} \cdot \Delta_2 \phi_{(1)'} = 0.091$$

$$\kappa_{(2)} \cdot \Delta_2 \phi_{(2)'} = 0.135$$

$$\kappa_{(3)} \cdot \Delta_2 \phi_{(3)'} = 0.284$$

以上から適合方程式は次のようである。

$$\begin{aligned} \Delta X_{1,2} & (26.67 + 19.84 \times 0.091 + 6.83 \times 0.135) \\ & + \Delta X_{2,2} (6.67 + 0.693 \times 0.091 + 5.973 \times 0.135) \\ & - 1068 \times (19.84 \times 0.18 + 6.83 \times 0.26) \\ & - 1248 \times (0.693 \times 0.18 + 5.973 \times 0.26) \\ & + 31488 \times 0.18 + 21846 \times 0.26 = 0 \\ \Delta X_{1,2} & (6.67 + 0.693 \times 0.091 + 5.973 \times 0.135) \\ & + \Delta X_{2,2} (26.67 + 0.107 \times 0.091 \\ & + 19.734 \times 0.135 + 6.827 \times 0.284) \\ & - 1068 \times (0.693 \times 0.18 + 5.973 \times 0.26) \\ & - 1248 \times (0.107 \times 0.18 + 19.734 \times 0.26 \\ & + 0.827 \times 0.52) + 725 \times 0.18 + 30763 \times 0.26 \\ & + 21846 \times 0.52 = 0 \end{aligned}$$

上式を解いて、

$$\Delta X_{1,2} = -69 \text{ tm}$$

$$\Delta X_{2,2} = -202 \text{ tm}$$

よって $t=190$ 日での中間支点モーメントは、

$$M_1 = -1\,068 - 69 = -1\,137 \text{ tm}$$

$$M_2 = -1\,248 - 202 = -1\,450 \text{ tm}$$

b) $t=190$ 日~ 650 日

以上と同様な計算を実施して、

$$\Delta X_{1,3} = -125 \text{ tm}, \quad \Delta X_{2,3} = -82 \text{ tm}$$

$$M_1 = -1\,137 - 125 = -1\,262 \text{ tm}$$

$$M_2 = -1\,450 - 82 = -1\,532 \text{ tm}$$

c) $t=650$ 日~ t_∞ 日 計算結果は次のようである。

$$\Delta X_{1,4} = -141 \text{ tm}, \quad \Delta X_{2,4} = -35 \text{ tm}$$

$$M_1(t_\infty) = -1\,262 - 141 = -1\,403 \text{ tm}$$

$$M_2(t_\infty) = -1\,532 - 35 = -1\,567 \text{ tm}$$

すなわち、3 径間連続桁を一度に施工した場合の中間支点モーメント、 $-1\,600 \text{ tm}$ に対し、分割施工時永久荷重モーメントは第 1 中間支点で 87.8%，第 2 中間支点で、97.9% である。

5. 結 論

コンクリートクリープひずみは遅れ弾性ひずみとフローひずみとの和であるという、すでに広く認められた概念を PC 構造物の設計に適用するにあたり、遅れ弾性ひずみは載荷時に生じ、その後はフローひずみのみであると近似的に仮定することにより、レラクセーション関数を数学的に求めることができる。

レラクセーション関数を用いることで、応力変化を受ける場合のひずみ変化応答に関する一般式を簡単な型式で与えることが可能となる。

この一般式を用い PC 断面のクリープ、乾燥収縮による応力変化、分割施工連続桁モーメント変化、等が容易に計算可能である。

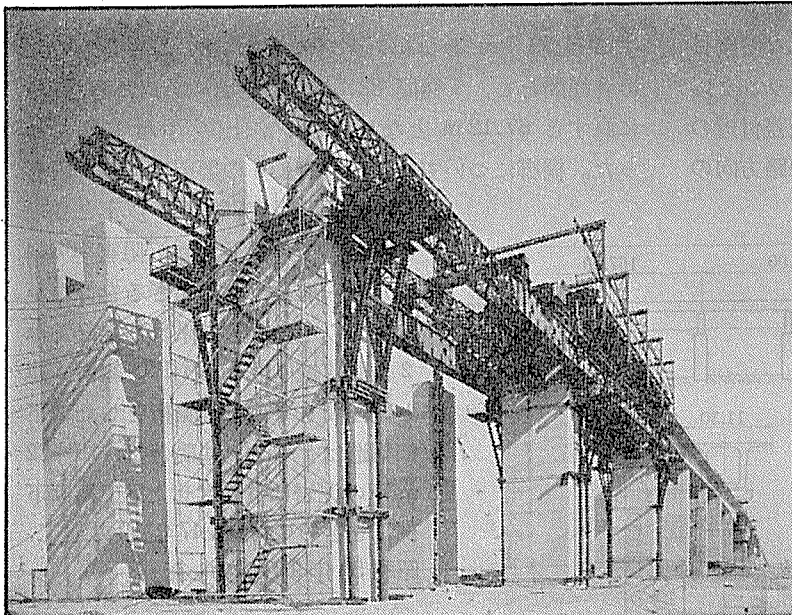
1976.1.9 受付

プレストレスト コンクリート橋の設計施工上の最近の諸問題

A 4 判 116 ページ

定 価：1500 円 送 料 400 円

内 容：(1) PC 橋の施工開始前の諸問題、(2) PC 橋の工事ならびに施工管理について、(3) 新しい PC 設計方法について、(4) 最近の話題の橋梁



PC長大橋梁に 豊富な経験

日本道路公団

浜名バイパス舞阪高架橋



オリエンタルコンクリート株式会社

取締役社長 東 善 郎

東京都千代田区五番町 5 番地 TEL (261)1171 (代)