

V-4 PC円形構造物のクリープ、および温度応力に関する研究

(株) 長大橋設計センター 正 梶村雄祐

1. 序

PC構造物におけるコンクリートのクリープによる2次応力の取り扱い、時間の要素が介入するため、かなり複雑な計算を必要とし、一般には、コンクリートの乾燥収縮等を含めて、PC鋼材の有効緊張力を用いるという方法によって処理されている。有効緊張力による構造物の応力状態は初期緊張力による応力状態と相似であり、構造物がPC鋼材方向の変形を許さない部分を有すれば、応力状態はコンクリートのフリープによって再分配が行われ、したがって初期緊張力による応力状態とは相似ではなくなる。円形PCタンクでは、その壁体下面における底版との結合条件(ヒンジ、または固定)により、クリープによる応力再分配が行われる。

また、野外に設けられている構造物は、日射等による熱源により温度変化を受け、一般に熱源と面していない部分との温度差、あるいは、温度分布の非一様性等により温度応力が発生する。円形PCタンクでは、その壁体が円筒形であり、しかも日射が時間的にその方向性を要にするために、温度分布は非定常なものとなり、したがって、温度分布による温度応力は温度分布が定常状態のものとは異なったものとなる。

これら構造物の2次的応力についての研究は、対象が複雑な要素を多く含んでおり、解析においては多くの近似的取り扱いをせざるを得ない。クリープ解析については大串¹⁾が、また温度応力については Clarence H. Kent²⁾、K. Kordina 等³⁾が理論的研究を行なっている。しかし、温度応力については、これらの解は温度状態が定常のものについて解かれたものであり、実際の日射等起因する応力とは異なると思われる。本研究はこれらクリープ、温度応力に対する理論的解析と実際に施工されたPCタンクに埋設されたカーソン型ひずみ計による実験結果との対応による検討を試みてものである。

2. 理論的研究

(1) クリープ応力

コンクリートは2次元状態においても Whitney の法則、および Davis-Granville の法則に従うものとするれば、円形タンクのクリープ解析に対する微分方程式は(1)式で表される。

$$\frac{E_c(t) \cdot I}{1-\nu^2} \cdot \frac{\partial^2 w(t)}{\partial x^2} + E_c(t) \cdot h \cdot \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} = Z(t) - E_c(t) \int_0^t Z(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{1+\varphi(t, \tau)}{E_c(\tau)} d\tau \quad \dots (1)$$

ここに $E_c(t)$: コンクリートのヤング率 ν : コンクリートのポアソン比

I : 壁の断面2次モーメント h : 壁厚

$w(t)$: 壁の半径方向にわき量 t : 壁のポストアプライメント時刻

$\varphi(t, \tau)$: 載荷時刻 τ から時刻 t までのクリープ係数

フリープ解析は(1)式を所定の境界条件と、 $t=0$ における初期条件の下に解くことになる。

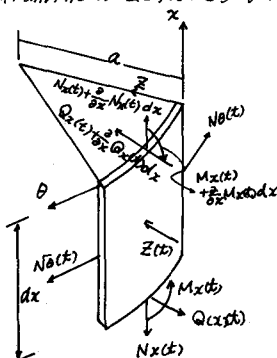


図-1 壁座標系

(1)式を次の仮定の下に変形すれば、

$$\left. \begin{aligned} w(t) &= w(t_1) + \Delta w(t), \quad \varphi(t, \tau) = \varphi(t) - \varphi(\tau) \\ \varphi(t) &= a_0 (1 - e^{-b_0 t}), \quad E_c(t) = E_c \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

$$\begin{aligned} Z(t) &= Z(t_1) - \frac{\Delta w(t_1)}{Q^2} \cdot E_s \cdot A_{sp} \\ \Delta w(t) &= f(x) \cdot \{1 - e^{-b_0(t-t_1)}\} \dots (3) \\ \frac{E_s \cdot I}{E_c \cdot I^2} \frac{d^4 f(x)}{dx^4} + \left\{ E_c \cdot h + E_s \cdot A_{sp} - \frac{a_0}{2} \cdot E_s \cdot A_{sp} \cdot (e^{mt_1} - e^{mt_2}) \right\} \frac{f(x)}{a^2} \\ &= Z(t_1) \cdot a_0 \cdot e^{mt_1} \dots (4) \end{aligned}$$

(4)式において $f(x)$ は (3)式の仮定より時間 t に無関係であるが、(4)式には時間 t の項が含まれている。しかし、 $f(x)$ の項において、その項を無視してもその影響は少ない。したがって、 $f(x)$ に対する微分方程式は

$$\frac{E_s \cdot I}{E_c \cdot I^2} \frac{d^4 f(x)}{dx^4} + (E_c \cdot h + E_s \cdot A_{sp} - \frac{a_0}{2} \cdot E_s \cdot A_{sp} \cdot e^{mt_1}) \cdot \frac{f(x)}{a^2} = Z(t_1) \cdot a_0 \cdot e^{mt_1} \dots (5)$$

(5)式で与えられる。 A_{sp} は一般に x に對して変化（ほぼ1次関数）するが、その $f(x)$ の項全体に對して影響が小さいので、 A_{sp} を一定として計算する。こゝで A_{sp} は PC 鋼材の断面積、 E_s は PC 鋼材のヤング率である。

同式を

$$\begin{aligned} E_s &= 2 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2 \\ E_c &= 3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$V = 0.18, \quad h = 25 \text{ cm}, \quad a = 18.13 \text{ m}, \quad a_0 = 2.0,$$

$$A_{sp} = 3.5, \quad 2.1 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{m}, \quad e^{-b_0 t_1} = 0.9,$$

$$Z(t_1) = 2.05 - 0.1625 \times \text{kg/cm}^2$$

の数値を用いて解すれば、図-2、図-3のようになる。

(3)式より終局のクリープによるたわみの増加量は $f(x)$ で示され、したがってこのクリープたわみの増加による PC 鋼材の有効緊張率は (2)式より

$$\eta(2) = 1 - \frac{E_s \cdot A_{sp}}{Q^2} \frac{f(x)}{Z(t_1)} \dots (6)$$

となる。 (6)式を $A_{sp} = 2.1 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{m}$ 、 $a_0 = 2.0$ 、 $e^{-b_0 t_1} = 0.9$ の数値に對する計算結果を図-4、図-5に示してゐる。図

-4には有効緊張力に對する値を示してゐる。

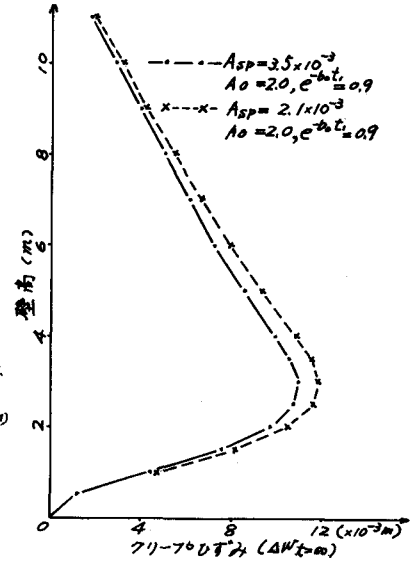


図-2. 壁平行方向にわみ

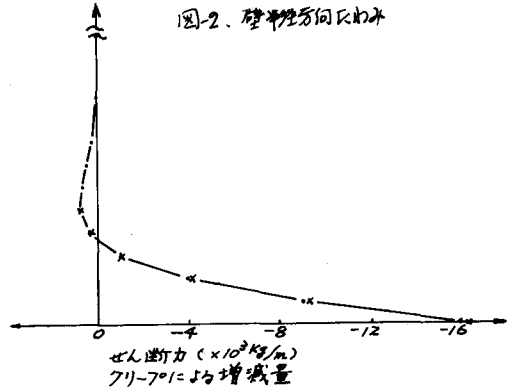


図-3. フリーフローによる断力増減量

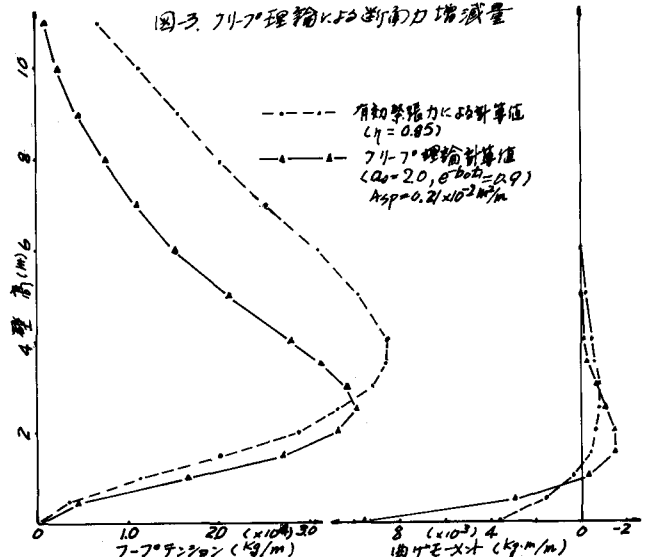


図-4. フリーフロー値と有効緊張力に對する断力の増減量

(2) 温度応力

定常温度状態に対する温度応力に対する微分方程式は(7)式を用いる。

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + E_c h \cdot w = Z(x) \quad \dots (7)$$

ここに w は壁の曲げ剛度である。(7)式の右辺の $Z(x)$ は仮想的な荷重で対象とする温度状態によつて異なる。壁内・外面の温度差 $\Delta T(x)$ に対しては、

$$Z(x) = \frac{E_c h^2}{12(1-\mu)} \cdot \alpha \cdot \frac{d^2}{dx^2} \Delta T(x) \quad \dots (8)$$

また、壁高方向の温度分布 $T(x)$ に対しては

$$Z(x) = \frac{E_c h}{\alpha^2} \cdot d \cdot T(x) \quad \dots (9)$$

で与えられる。ここに α はコンクリートの線膨張係数である。 $T(x)$, $\Delta T(x)$ は3次以下の多項式で表われ、(7)式を所定の境界条件に対して解く。

(3) 結果および考察

図-2, 図-3 に(7)式を用いて計算したクリープひずみ、および曲げモーメント、せん断力の増減量を示している。前述のようにPC鋼材量は一定として計算しているが、結果に対しては、その影響は少ないようである。

図-4 はクリープ理論によるフープテンション、曲げモーメントの減少量と有効緊張力によって計算した場合の同減少量を比較したものである。また図-5 は図-4 にあけるクリープ理論計算値における有効緊張率を示したものである。これらの図より判るように有効緊張率は壁高に対して変化し、フープテンション、曲げモーメント減少量は両計算法においてかなり異なっている。

図-7 はカルソングージ測定による壁体の温度分布を示したものである。内外面のゲージ間の温度差は 4°C 程度を示しており、温度分布を壁内外面間を直線分布と仮定すれば、約 1°C になる。

図-8 は24時間観測による壁体温度の時間的変化を示したものである。本PCタンクの壁厚は 25cm であるが、日射による外壁の温度上昇と内壁の温度上昇の位相差は約2時間程度であり、かなり大きく思われる。またパーライトタルボ塗装することにより、この位相差は約4.5時間程度となり、かつその内外壁面の温度差は小さくなっている。

図-7. 壁温度分布観測値

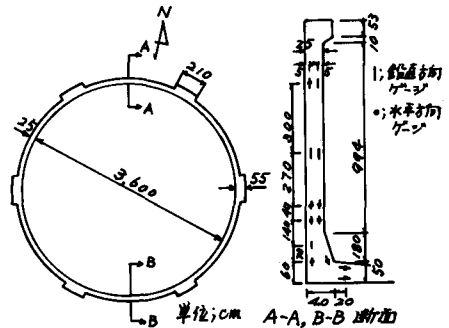
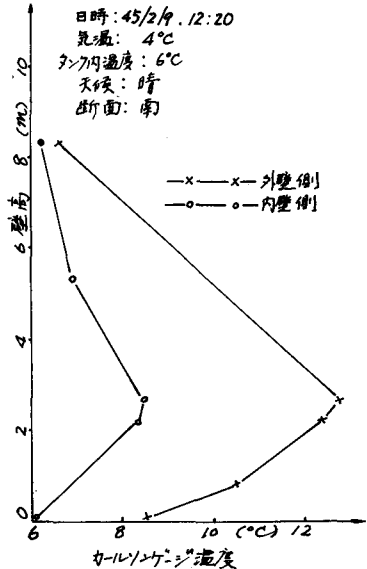


図-6 タンク形状寸法



であるが、計算値は比較的実測値と一致している。

[4] 結論

円形RC管のクリープ、および温度応力についての理論的、実験的研究を行い、以下のような結論が得られた。しかし、クリープ解析については、現在実測データを収集整理中であり、十分な結論は得られていない。

(1) PC管のクリープ解析において用いられるPC鋼材の有効緊張力を求める計算方法は、クリープ理論による計算値とかなり異なり、設計においては換算を要すると思われる。

(2) 壁体に埋設されたカニ型付設計による壁体温度分布は冬期においてもかなりの内外壁面温度差を示しており、夏期等における実測等がさらに必要と思われる。

(3) 実測値による温度応力はかなり

り大きな応力を示しており、約10MPa程度の雨水応力を導いている。ニから(2)、(3)より、設計においては、温度応力については一考を要しよう。また温度応力の計算値はかなり実測値と一致し、計算値により温度応力を推定できると思われる。

[5] 謝辞

本研究は昭和43年度吉田研究奨励金を授与された研究である。これを附記し、さらに本研究に指導および助力を下された方々に謝意を表す。

- [6] 参考文献 1) 大東照 “PC管のクリープ解析に関する基礎的研究” 日本材料学会PC構造研究委員会資料 1. 1962
2) Clarence H. Kent “Thermal Stresses in Thin-Walled Cylinders” Transaction of A.S.M.E. APM 53-13
3) K. Kordina, J. Eibel “Zur Frage der Temperature-Beanspruchung von Kreis-zylinderischen stahlbeton-siles” Beton-und-stahlbetonbau 1. 1964.

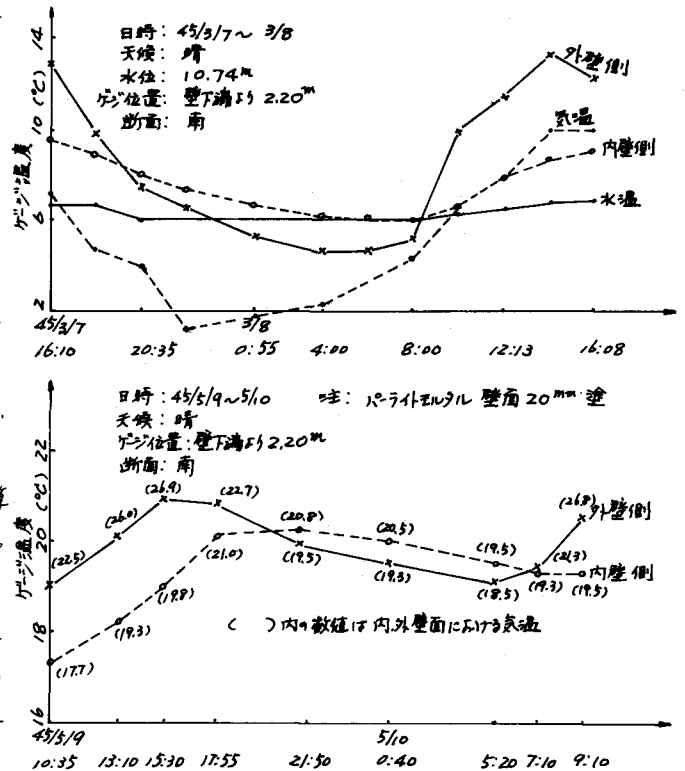


図-8 壁体温度の時間的変化

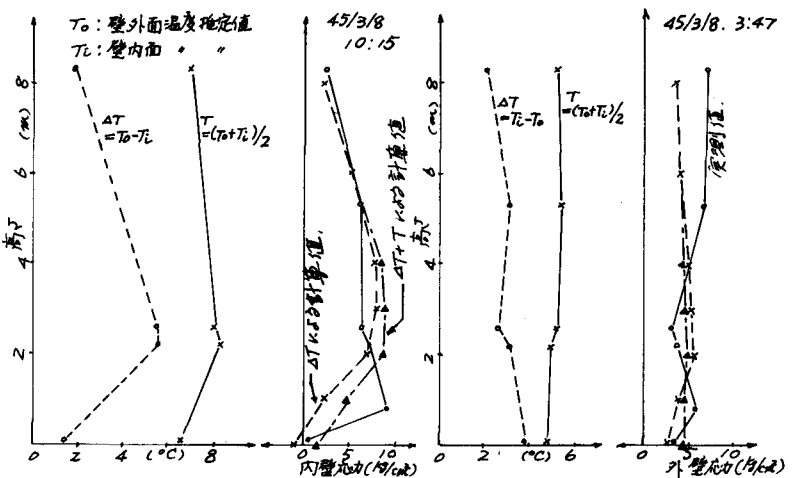


図-9 壁体温度応力実測値と計算値との比較