

電力中央研究所 正員 ○加藤 治
電力中央研究所 正員 原口 晃
名古屋大学 正員 田辺忠顕

1 まえがき

近年、わが国においても格納容器等、重要原子炉用コンクリート構造物へのプレストレストコンクリートの適用が計画されている。これらのPC構造物の設計にあたっては、各種のテンドン損失、すなわち弾性変形損失、レラクゼーション損失、クリープ損失等を精度よく算定する必要がある。

本報告は、PC格納容器(PCCV)について、当所で開発した有限要素法による軸対称構造物温度応力クリープ解析プログラムを用いて40年にわたるクリープ解析を行ない、テンドン損失の中で大きな比率を占めるクリープ損失量を算定するとともに、稼動時におけるPCCVのクリープ挙動を検討したものである。

2 クリープ解析手法

本解析は、非定常温度状態におけるクリープ解析を行なう前提として必要である弾性応力解析、非定常温度分布解析ならびに熱応力解析をすべて有限要素法によって行ない、これより算出された温度および応力を用いて最終的にクリープ解析を行なうものである。そして、クリープ解析においては、短い時間ステップごとにその間の応力を一定にして、そのときに生ずる各要素のクリープ変形増分を材料実験から得られたクリープ曲線式を直接あてはめて求めた。また、変位の適合性は、クリープ変形を打ち消す弾性力を作用させることによって保たせることとした。次に各要素のクリープひずみの求め方について述べる。

弾性ひずみ $\varepsilon_e(t)$ とクリープひずみ $\varepsilon_c(t)$ との和 $\varepsilon(t)$ は次のように求まる。まず、r方向成分 $\varepsilon_r(t)$ は、

$$\varepsilon_r(t) = \int_{\tau_1}^t \left\{ \frac{d\sigma_r(\tau)}{d\tau} \left\{ \frac{1}{E(\tau, T)} + C(t, \tau, T) \right\} - \frac{d}{d\tau} \left\{ \sigma_\theta(\tau) + \sigma_z(\tau) \right\} \left\{ \frac{\nu_1(t, \tau, T)}{E(\tau, T)} + \nu_2(t, \tau, T) C(t, \tau, T) \right\} \right\} d\tau \dots (1)$$

ここで、

t ; はじめて載荷した枝令

$\nu_1(t, T)$; 枝令t日における温度Tでのときの瞬時

$C(t, \tau, T)$; 温度Tでのもとで枝令 τ 日に載荷したときの枝令

ポアソン比

t日における単位応力あたりのクリープひずみ

$\nu_2(t, \tau, T)$; 枝令t日に載荷した場合の枝令t日にお

$E(t, T)$; 枝令t日における温度Tでのときの瞬間弾性係数

ける温度Tでのクリーフポアソン比

同様に $\varepsilon_\theta(t)$ 、 $\varepsilon_z(t)$ が求まる。また、

$$\gamma_{rz}(t) = \int_{\tau_1}^t \frac{d\gamma_{rz}(\tau)}{d\tau} \left\{ \frac{1}{G(\tau, T)} + 2 \{ 1 + \nu_2(t, \tau, T) \} C(t, \tau, T) \right\} d\tau \dots (2) \quad \text{ただし、} G(\tau, T) = \frac{E(\tau, T)}{2 \{ 1 + \nu_1(\tau, T) \}}$$

である。軸対称問題だから $\gamma_{r\theta}(t) = \gamma_{\theta z}(t) = 0$ したがって、

$$\begin{aligned} \{ \varepsilon(t) \} &= \int_{\tau_1}^t \frac{1}{E(\tau, T)} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_1(t, \tau, T) & -\nu_1(t, \tau, T) & 0 \\ & 1 & -\nu_1(t, \tau, T) & 0 \\ \text{Sym} & & 1 & 0 \\ & & & 2 \{ 1 + \nu_1(\tau, T) \} \end{bmatrix} \frac{d}{d\tau} \{ \sigma(\tau) \} d\tau \\ &+ \int_{\tau_1}^t \begin{bmatrix} 1 & -\nu_2(t, \tau, T) & -\nu_2(t, \tau, T) & 0 \\ & 1 & -\nu_2(t, \tau, T) & 0 \\ \text{Sym} & & 1 & 0 \\ & & & 2 \{ 1 + \nu_2(t, \tau, T) \} \end{bmatrix} C(t, \tau, T) \frac{d}{d\tau} \{ \sigma(\tau) \} d\tau \\ &= \{ \varepsilon_e(t) \} + \{ \varepsilon_c(t) \} \dots (3) \end{aligned}$$

3 計算条件

解析の対象としたPCCVは、シリンダー部の壁厚が1.3 m、内半径が21.5 mであり、ドーム部は半球型で壁厚が1.1 m、基礎スラブ上面よりドーム天頂部までの高さは65.6 mである。計算モデルは図1に示すように、ドーム部およびシリンダー部に基礎スラブ、岩盤を考慮したものであり、非定常温度分布計算応力クリープ計算はいずれも軸対称問題として扱った。容器内温度ならびに外気温は、それぞれ1月に最低温度、7月に最高温度となるサインカーブで与えた。クリープによる応力変動を計算する場合、一年以内ではその時点ごとの温度分布を用い、一年以降は年平均気温となる10月の温度分布を通して用いた。クリープ関数は、シリンダー部には載荷杖令365日、ドーム部には載荷杖令180日のクリープ実験結果を用い、さらに壁厚方向を二分割にして容器内側にはシール杖、外側にはアンシール杖の結果を用いた。また、鉄筋の剛性を考慮して鉄筋量による補正を加えたものをコンクリートの弾性係数とした。鉛直ならびにフープテンションによる定着後のフレストレス力は、PC鋼杖の角度変化に対する摩擦係数を0.14、シースの波打ちに対する摩擦係数を0.001として算出し、これら一本一本のテンドンによる各節点のR、 θ 、Z方向の非軸対称荷重を等価な軸対称荷重に変換し与えた。

4 解析結果ならびに考察

解析結果の概略は次の通りである。(1) フレストレス導入により、シリンダー部はPCCV中心方向に約0.7 cmの変位を示し、ドーム天頂部は下方へ約1.4 cm変位した。また、40年間のクリープによって前述の弾性変形量とほぼ同量の変位を示した。(図2参照) (2) クリープによる応力変動は、極くわずかであり問題とするに値しなかったが、フレストレスの減少を考慮し、クリープによるテンドン損失からこれを試算すると、フレストレス導入直後と40年後とでは数%の変動が考えられる。(3) 40年間のクリープによるテンドン損失量は、鉛直テンダンの場合、ひずみ値にして 270×10^{-6} 、フープテンダンの場合が 350×10^{-6} となった。(図3・図4参照) これらのまとめは勿論、前項の計算条件に左右されるものであるが、一応、設計上の参考になるものと考えられる。

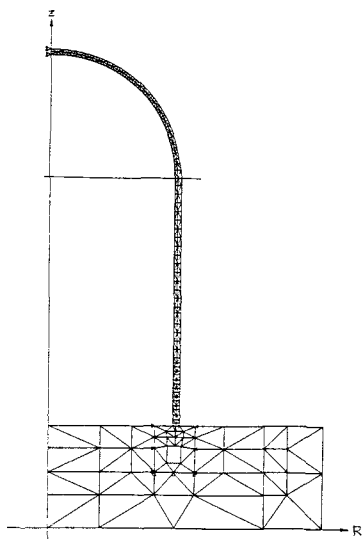


図1 計算モデル

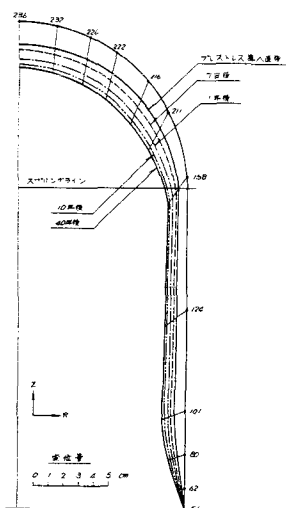


図2 断面変形図

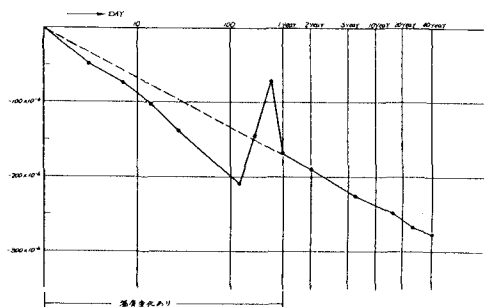


図3 鉛直逆ひテンドン損失の経時変化

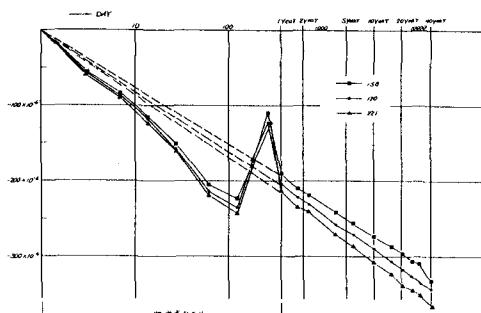


図4 フープテンドン損失の経時変化