

(株) 大林組技術研究所 正員 大 内 一
前 山 佳 一
(株) 大林組技術研究所 武 田 寿 一

1. はじめに

今日、鉄筋コンクリート製地下式貯槽の設計で考慮される温度応力は、熱伝導解析で得られた温度分布に対して弾性応力解析を行なって得られている。その際全断面剛性を用いたのでは当応力は厳しくなり、そこでひび割れを考慮した適当な剛性評価法^{1),2)}により算定のなされているのが今日の趨勢と言えよう。一方、この種の構造物の応力状態を考える時、シェルという構造特性上任意の多軸応力の発生している事、長期荷重に対してクリープ挙動が予測される事、又非弾性域での応力は荷重組合せに依存する事等により、一義的に温度応力を決定する事はなかなか難しい事の様に思われる。そこで、ひび割れ、クリープ等の材料非線形性を考慮した軸対称回転体 F E M 非線形解析プログラムを開発し、適当な解析スタディを通して温度応力を評価する事にした。その 1 は解析手法の概要に触れ、その 2 では実際の地下貯槽に対する適用結果について述べるものである。

2. コンクリートモデル

(1) 概要 : コンクリートのクリープを含む非線形特性は、図-1 に示される様な一般化 Voigt モデルで表わされると仮定する。全ひずみ増分 $\{d\epsilon\}$ は、弾性成分 $\{d\epsilon^e\}$ 、温度歪成分 $\{d\epsilon^T\}$ 、クリープ歪成分 $\{d\epsilon^c\}$ 、及び塑性歪成分 $\{d\epsilon^p\}$ の和として次式の様に表わされる。

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^T\} + \{d\epsilon^c\} + \{d\epsilon^p\} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 $\{d\epsilon^c\} = \sum \{d\epsilon^c_i\}$

(2) ひび割れ : 弾性状態では等方等質線形弾性体としての取扱いを行なうが、最大主引張応力がその時点での温度に対する引張強度に達した場合、直交する面にひび割れが発生するものとし、その方向の応力を解除する。又ひび割れ発生以後は、直交方向の引張応力は永久に負担出来ないものとする。尚、これらの判定に当っては要素内ガウス点に於て個々に行なうものとする。

(3) ひび割れの開閉 : 次の様に歪で定義されたひび割れ巾 G_w を考える。

$$G_w = \epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4 \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 ϵ_1 : ひび割れ発生時のひび割れ直交方向歪、 ϵ_2 : 同ひび割れ直交方向塑性ひずみ、 ϵ_3 : ひび割れ発生後に生じた節点変位によるひび割れ直交方向歪、 ϵ_4 : 同ひび割れ面に平行な応力成分によるひび割れ面直交方向弾性ひずみ。但し ϵ_1 、 ϵ_3 については、総歪より温度歪、クリープ歪成分を除いたものとして評価する。

そこで、今ひび割れ巾 G_w について $G_w \leq 0$ が成立する時、ひび割れは閉じるものとする。

(4) 降伏曲面・破壊曲面 : 図-3 に単軸応力-歪関係モデルを示すが、

単軸状態であう様に定数を定めた Drucker - Prager の式に基づく初期降

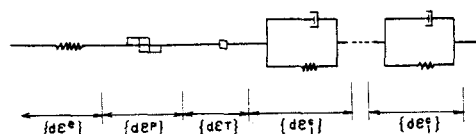


図-1 コンクリート非線形モデル

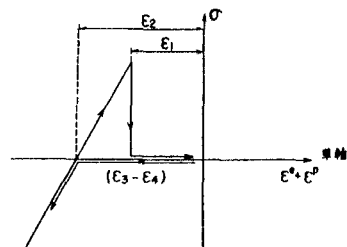


図-2 ひび割れ開閉モデル(単軸)

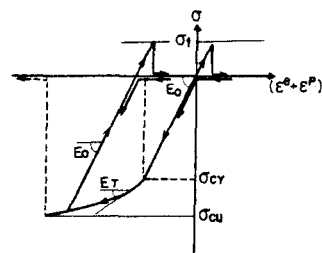


図-3 コンクリート単軸応力-ひずみ関係

曲面を設定する(図-4)。

$$f = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} |\sigma_{OY}| \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 J_1 、 J_2 はそれぞれ応力の第1次及び第2次不変量を表わし、 α は定数である。

又降伏曲面と相似形の圧縮破壊曲面を設定し、応力ベクトルがこの破壊曲面に達した時、全ての応力成分を解除し、以後の応力は生じないものとする。

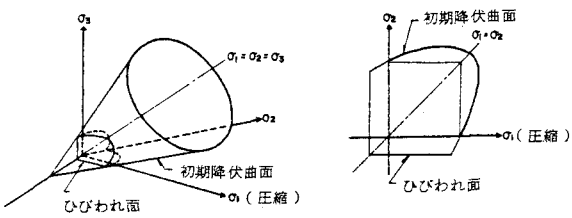


図-4 コンクリート降伏曲面・破壊曲面

(5) 熱弾塑性構成方程式：コンクリートの圧縮

塑性に関し、等方便化則に従う増分塑性理論を適用する。式(1)で現われる塑性歪成分 $\{d\epsilon^p\}$ については、降伏関数 $f = f(\sigma)$ を塑性ポテンシャルとし、垂直性の条件が成立つものとする。又相当応力 $\bar{\sigma} = f(\sigma)$ と相当塑性歪増分 $d\bar{\epsilon}^p$ の概念を導入し、塑性仕事率を考える事により最終的に次の様な構成方程式を得る。

$$\{d\sigma\} = \left[[D^e] - \frac{[D^e]\{\partial f / \partial \sigma\}\{\partial f / \partial \sigma\}^T [D^e]}{S} \right] \left(\{d\epsilon\} - \{d\epsilon^T\} - \{d\epsilon^c\} \right) + \left[[I] - \frac{[D^e]\{\partial f / \partial \sigma\}\{\partial f / \partial \sigma\}^T}{S} \right] \left(\frac{\partial [D^e]}{\partial T} dT \right) \{ \epsilon^e \} + \frac{[D^e]\{\partial f / \partial \sigma\} \{d\bar{\sigma} / d\bar{\epsilon}^p\} dT}{S} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $[I]$ ：単位行列、 $S = H' / C + \{\partial f / \partial \sigma\}^T [D^e] \{\partial f / \partial \sigma\}$ 、 $H' = d\bar{\sigma} / d\bar{\epsilon}^p$ 、 $C = \bar{\sigma} / \{\sigma\}^T \{\partial f / \partial \sigma\}$ 。式中右辺第2項は弾性応力-歪行列 $[D^e]$ の温度依存による項を表わし、第3項は降伏応力の温度依存による項を表わす。

(6) 温度歪：温度歪増分 $\{d\epsilon^T\}$ は線膨張係数を α 、温度上昇を dT とした場合、回転体について次式で表わされる。
 $\{d\epsilon^T\}^T = \{d\epsilon_R, d\epsilon_Z, d\epsilon_\theta, d\gamma_{RZ}\} = \{d\epsilon_1, d\epsilon_2, d\epsilon_3, d\gamma_{12}\} = \{\alpha dT, \alpha dT, \alpha dT, 0\} \quad \dots\dots\dots (5)$

(7) クリープモデル：クリープ特性は図-1で示す様な Voigt モデルの直列結合で表わせるものとする。i番目の Voigt モデルについて時間ステップ Δt でのクリープ歪増分 $\{\Delta \epsilon_i^c\}$ は次の様に表わされる。

$$\{\Delta \epsilon_i^c\} = \frac{C_{Gi}}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\eta_{Gi} C_{Gi}}\right) \right] \{\sigma_i'(t)\} + \frac{C_{ki}}{3} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\eta_{ki} C_{ki}}\right) \right] \{\sigma_{mi}(t)\} - \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\eta_{Gi} C_{Gi}}\right) \right] \{\epsilon_i'(t)\} - \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\eta_{ki} C_{ki}}\right) \right] \{\epsilon_{mi}(t)\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、“’”、“G”は偏差成分に関する添字を、又“m”、“K”は体積成分に関するそれを表わす。

次に ν_{ci} をクリープポアソン比としてクリープコンプライアンス C_{Gi} 、 C_{ki} 及び粘性係数 η_{Gi} 、 η_{ki} をそれぞれ、 $C_{Gi} = 1/G_i = 2(1+\nu_{ci})/E_i$ 、 $C_{ki} = 1/K_i = 3(1-2\nu_{ci})/E_i$ 、 $\eta_{Gi} = \eta_i/2(1+\nu_{ci})$ 、 $\eta_{ki} = \eta_i/3(1+2\nu_{ci})$ で表わされたとするとクリープ歪増分 $\{\Delta \epsilon^c\}$ は最終的に次の様に表わされる。

$$\{\Delta \epsilon^c\} = \sum_i \{\Delta \epsilon_i^c\} = \sum_i \left[\frac{1}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{E_i}{\eta_i} \Delta t} \right) [C] \{\sigma\} - \left(1 - e^{-\frac{E_i}{\eta_i} \Delta t} \right) \{\epsilon_i^c\} \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに $[C]$ はクリープポアソン比 ν_{ci} に関する対称行列を表わす。

3. 鋼材モデル

単軸状態での応力-歪関係は図-5に示される様なバイリニア型を仮定する。弾性時は等方等質線形弾性体としての取扱いを行ない、塑性状態については Mises の式に基づく降伏曲面を設定し、増分塑性理論を適用する。硬化則として等方便化則、又は Ziegler により修正された Prager の移動硬化則を採用する。尚、鋼材のクリープについてはこれを考慮しないものとする。

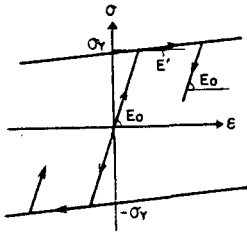


図-5 鋼材単軸応力-歪関係

4. 有限要素

コンクリートを対象に4節点アイソパラメトリック回転体要素、メンブレン材を対象に膜要素、そしてフープ材に対して線要素を用いる。又、縦筋については直交異方性の膜要素としてこれを取扱う事にする。

1)青柳他：LNGタンクを対象としたRC部材の剛性評価に関する実験的考察，昭54セ技年 2)青柳他：温度勾配による鉄筋コンクリート中空円筒のひび割れ性状，昭51セ技年