

大林組技術研究所

前山 佳一

同上

正員 ○大内 一

同上

武田 寿一

## 1. 序

今日設計上考慮される温度応力は、熱伝導解析で得られた立体的な温度分布に対して弾性温度応力解析を行って得られているが、その際常温時の物性を用いた当初の断面剛性の1/2を限度として剛性低下を行ってよいとされている。しかしながらこれは上下面に温度差を与えた鉄筋コンクリート梁の純曲げ実験結果を基にしたものであり、<sup>1)</sup> 自明の様に非弾性域での応力は種々の荷重組合せに依存する事、又LNG地下式貯槽を考える時軸力と曲げが任意に組合さった多軸応力状態にあると予測される事から、上記は簡便法であり一般性を持つに到っていない事が容易に分る。そこで、クリープ及びひび割れ、塑性挙動までを考慮した軸対称回転体FEM解析プログラムを開発し、設計に資する事とした。今回の報告は以前に実施されたRC円筒の温度応力実験<sup>2)</sup>に対して主としてひび割れ挙動に着目した解析を行ない、当解析法の妥当性を検討するものである。

## 2. 軸対称回転体FEM解析法

## 2.1 熱弾塑性の一般的構成方程式

材料の弾塑性特性を表わす為に全ひずみ増分 $\{d\epsilon\}$ は、弾性成分 $\{d\epsilon^e\}$ 、塑性成分 $\{d\epsilon^p\}$ 、熱ひずみ成分 $\{d\epsilon^T\}$ 、クリープ成分 $\{d\epsilon^c\}$ の和として与えられると仮定する。

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

塑性流れ理論における直交条件及び相当応力 $\bar{\sigma}$ と相当塑性ひずみ増分 $d\bar{\epsilon}^p$ の概念を用いた塑性仕事率を考える事より次式の様な構成方程式を得る。

$$\{d\sigma\} = [D^e] - \frac{[D^e]\{\partial f/\partial \sigma\}\{\partial f/\partial \sigma\}^T[D^e]}{S} \{d\epsilon\} - \{d\epsilon^T\} - \{d\epsilon^c\} + \left[ [I] - \frac{[D^e]\{\partial f/\partial \sigma\}\{\partial f/\partial \sigma\}^T}{S} \right] \\ \times \left( \frac{\partial [D^e]}{\partial T} dT \right) \{ \epsilon^e \} + [D^e]\{\partial f/\partial \sigma\}\{\partial \bar{\sigma}/\partial T\}dT/S \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $[D^e]$ ：弾性材料特性マトリックス， $f$ ：塑性ポテンシャル， $S$ ： $H' + \{\partial f/\partial \sigma\}^T[D^e]\{\partial f/\partial \sigma\}$

## 2.2 コンクリートモデル

単軸状態での応力-ひずみ関係を図1の様に仮定し、降伏後はマルチリニアモデルとする。又Drucker-Pragerの式に基づいた初期降伏曲面を設定する(図2)。尚降伏曲面と相似形の圧縮破壊曲面を考え、応力点がこの曲面に達した時、全ての応力成分を解除する。引張側では、最大引張応力が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。尚ひび割れは連続体の観点から、ガウスの積分点の支配領域に分布するとして取扱う。

## 2.3 鋼材モデル

単軸状態での応力-ひずみ関係は図3に示される様なバイリニア型を仮定する。多軸状態ではMisesの式に基づく初期降伏曲面を設定し、降伏後は塑性流れ理論に従うものとする。硬化則として等方便化、或いはZieglerによって修正されたPragerの移動硬化則を採用する。

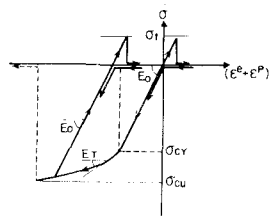
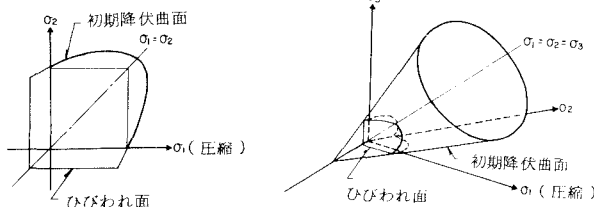
図1 コンクリート単軸 $\sigma-\epsilon$ 関係

図2 コンクリート降伏曲面・破壊曲面

## 2.4 数値計算法

構成方程式(2)を次の様に書き直す。

$$\{\dot{\sigma}\} = [D_a](\{\dot{\epsilon}\} - \{\dot{\epsilon}^T\} - \{\dot{\epsilon}^e\}) + [D_b](\partial[D^e]/\partial T \cdot \dot{T})\{\epsilon^e\} + [D^e]\{\partial f/\partial \sigma\}(\partial \sigma/\partial T \cdot \dot{T})/S$$

又仮想仕事の原理より次の様な形の平衡方程式を得る。…… (3)

$$\{f\} = \int_{vol} [B]^T \{\sigma\} dV - \{P\} = \{O\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

今、[B]を時間に対し不変とし(4)式の微分形に(3)式を代入し、ひずみ-変位関係を考慮して整理すると最終的に次の形の全体平衡方程式を得る。

$$[K]\{\Delta u\} = \{\Delta P\} + \{\Delta P^T\} + \{\Delta P^e\} + \{\Delta P^e\} + \{\Delta R\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $[K] = \sum \int_v [B]^T [D_a] [B] dvol$ 、 $\{\Delta P^T\} = \sum \int_v [B]^T [D_a] \{\Delta \epsilon^T\} dvol$ 、

$\{\Delta P^e\} = \sum \int_v [B]^T [D_a] \{\Delta \epsilon^e\} dvol$ 、 $\{\Delta P^e\} = \sum (-\int_v [B]^T [D_b] \{\Delta D^e\} \{\epsilon^e\} dvol)$

$\{P\}$ : 前荷重ステップまでの総外力ベクトル、 $\{\sigma\}$ : 同総応力ベクトル

尚不平衡力については次ステップに持ち込し解消する方法を用いる。又大次元行列よりなる線形方程式の解法は修正 Crout 法に基づくものとした。

## 3. 温度勾配を受ける RC 中空円筒の非線形挙動解析

構造体モデルは縦横筋比共 0.5 倍よりなる No.3 試験体(文献 2)参照)を対象とし、上下対称性より上半分を軸対称として解析(図 4)。物性の温度依存性及びクリープは考慮しない。温度条件については外表面は散水による一定温度、内面冷却による温度勾配は直線とした。図 5 にひび割れ進展パターンを示すが、中央高さ部内面より円周曲げ  $M_\theta$  による縦ひび割れが発生し、順次厚さ及び高さ方向に拡がっていく。同時に鉛直曲げ  $M_z$  によるひび割れが中央高さ部に発生するが  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$  以降は定常に達すると言える。図 6 には内外面温度差-横筋ひずみ関係を示すが、実験値平均ひずみとの良好な対応が得られていると言える。又図 7 には同様に外表面各高さでの半径方向変位を示すが、頂部を除き差異を示している。これは低温時物性変化、特に付着特性の変化とひび割れの非均一性に帰因するものと考えられる。図 8 は中央断面で応力度を積分して求めたひび割れモーメントの弾性モーメントに対する比を内外面温度差に対して示したもので、その値は  $\Delta T = 40 \sim 50^\circ\text{C}$  以降は 0.15 程度となっている。

## 4. あとがき

低温時物性変化、クリープ、又内槽との関係で変形の問題に対する適切な配慮を行ないつつ設計に資する事が今後の課題であろう。

謝辞: 本研究に当り貴重な実験データを提供致だいた当研究所、上野孝之氏に深く感謝します。

- 1) 例えば青柳他: 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, S 54 学技年報
- 2) 上野他: 低温領域における RC 円筒の温度応力に関する研究, S 53 年土木学会年講

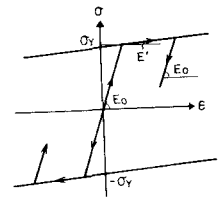


図 3 鋼材応力-ひずみ関係

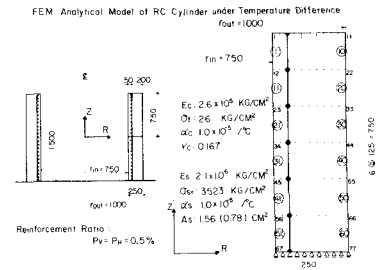


図 4 RC 円筒軸対称 FEM モデル

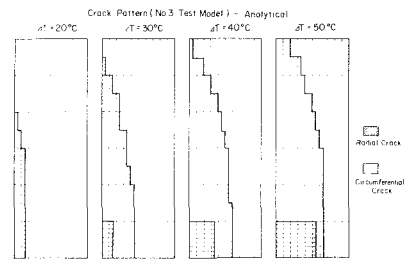


図 5 ひび割れ進展パターン(解析値)

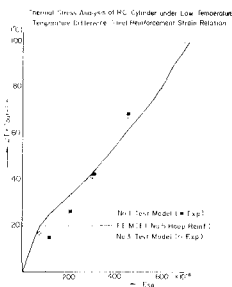


図 6 内外面温度差-横筋ひずみ関係

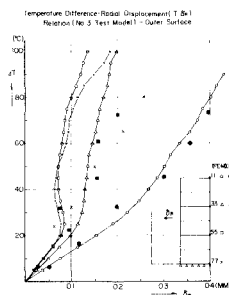


図 7 内外面温度差-半径方向変位関係

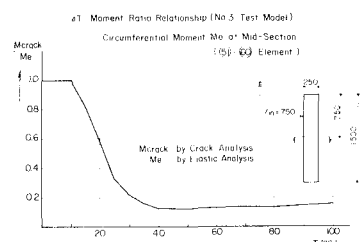


図 8 内外面温度差-曲げモーメント比関係 (中央断面)