

電力中央研究所 正会員 阿部 博俊

" 田辺 忠頭

" ○大沼 博志

1. はじめに 原子力発電用プレストレストコンクリート圧力容器は、従来のコンクリート構造物と異なり、容器内部のコンクリートは設計温度で50～80℃と比較的高温の温度荷重を受ける。よく知られているように、コンクリートはこの程度的高温においても、そのクリーブは著しく増大する。また、この温度荷重によって、容器壁内には大きな応力勾配が生じる。従って、圧力容器の設計には、大きな応力勾配の下での熱クリーブ現象について検討することが必要であろう。本報告は、実規模の構造物を対象として、非定常熱伝導状態をも考慮に入れた熱クリーブ解析について述べたものである。

2. 熱クリーブ解析プログラムの特長 コンクリートは、そのクリーブ性状を考慮する際、粘弾性体として取扱うことのできる代表的な材料の1つであるが、今日まで発表されているクリーブ解析手法では、ほとんどがコンクリートは線形粘弾性体であるとし、簡単なレオロジーモデルでコンクリートのクリーブ性状を表現し、有限要素法における構成式を与えている。しかし、実際にはコンクリートを単純なレオロジーモデルで表わすことは困難であると考えられるので、本解析では、材料実験から得られたクリーブ曲線式を直接利用して、step-by-step法により、時間stepの間、その要素の応力と温度が一定であると仮定してクリーブひずみを求めた。

3. 計算条件 熱クリーブ解析の対象とした実構造物の主要寸法と有限要素法の要素分割を図-1にまた、プレストレス・内圧および温度の荷重履歴を図-2に示す。軸方向と円周方向のプレストレスは、それぞれ、床版端部の節点力と容器外側面の外圧で与えた。計算に使用したコンクリートの材料特性は密度、弾性係数、ポアソン比が、それぞれ、 $\rho = 0.0024 \text{ Kg/cm}^3$ 、 $E = 3 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$ 、および $\nu_1 = 0.20$ であり、熱膨張係数、熱伝導率、比熱が、それぞれ、 $\alpha = 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、 $K = 0.022 \text{ kcal/cm} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 、および $C = 0.29 \text{ kcal/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$ である。クリーブ曲線としては、次の実験式を用いた。

$$C(t, \tau, T) = (0.2 + 0.04T) \times 0.414 \times 10^{-6} \ln(1 + t - \tau) \quad \text{ここで、} t; \text{ 載荷後の日数,}$$

τ ; 載荷時のコンクリート材令, T ; コンクリートの温度である。なお、クリーブポアソン比は0.15とした。

4. 計算結果と考察 (1) コンクリートの熱伝導率は金属に比べて小さいので、例えば、容器内の温度が20℃から70℃へ一気に上昇したとすると、容器壁部では約4ヶ月間にわたって非定常熱伝導状態が持続する。この時の壁部中央断面における応力分布を図-3に示す。加熱後しばらくは、定常状態よりも相対的に大きな圧縮応力が容器の内側に生じることがわかる。(2) 図-5と6に、壁部中央断面における円周方向と軸方向応力の履歴を示す。これらの図から明らかなように、常温クリーブによっては、壁内の応力分布はほとんど変化しない。しかし、熱応力による大きな応力勾配が生じると、熱クリーブによって容器内側の圧縮応力は減少し、外側の圧縮応力が増加する応力緩和現象が起る。図-5のように、弾性解析では引張応力が生じる外側の部分でも、熱クリーブによる応力緩和によって圧縮応力となる。そうして、加熱1年後には、弾性的な熱応力の4～6割が熱クリーブによる著しい応力緩和によって消失する。従って、熱クリーブを考慮すると、圧力容器の設計の際、このような温度履歴の熱応力は、4割程度減少させてよいものと思われる。(3) 長期間の熱クリーブによる応力緩和現象が生じた後に、一時的に内圧が除去されたり、温度が低下した時には、プレストレスに温度応力と逆の熱クリーブによって緩和された応力が作用することになり、容器内側には、引張応力の生じる可能性がある(図-6)。また、内圧のみが除去された時には、容器内側に非常に大きな圧縮応力が生じる。本解析のみで断定することはできないが、コンクリートの設計強度定め、緊張材の配置、圧力容器の変形と配管系の連結等を検討する上に、熱クリーブは重要な要素である。

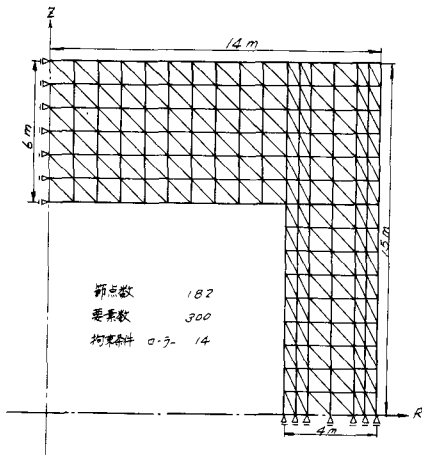


図-1 主要寸法と要素分割

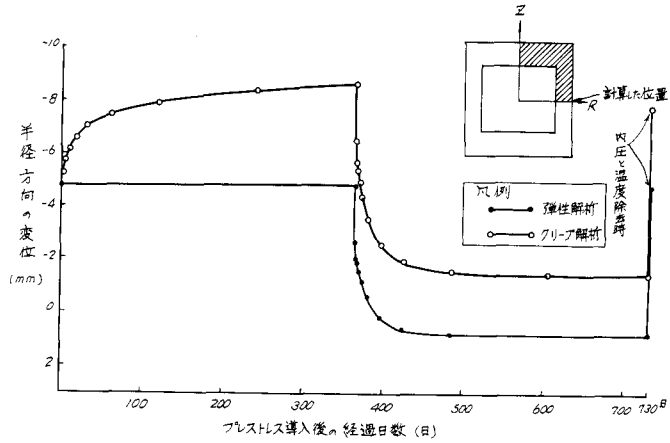


図-4 壁部中央における半径方向変位

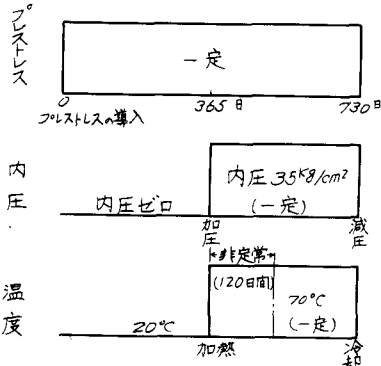


図-2 荷重履歴

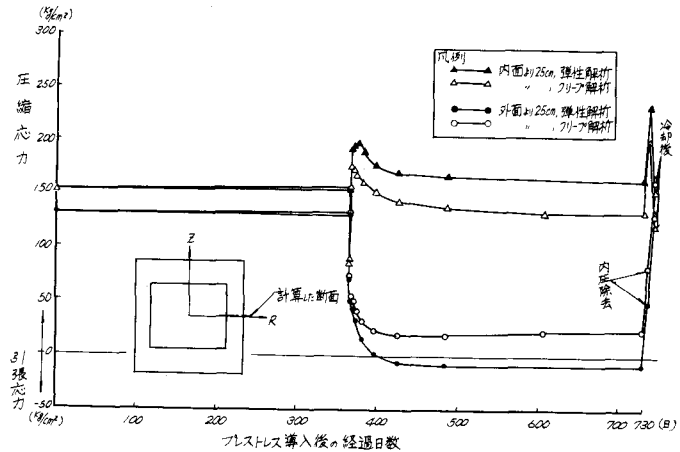


図-5 壁部中央断面の円周方向応力 (σ_{θ}) の変化

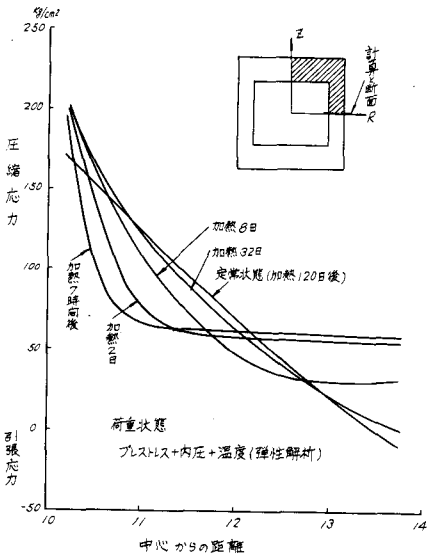


図-3 非定常熱伝導状態における (σ_{θ}) の変化

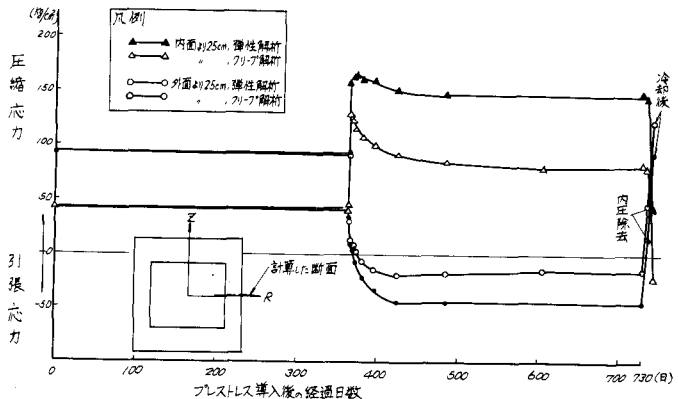


図-6 壁部中央断面の軸方向応力 (σ_z) の変化