

プレストレストコンクリート原子炉圧力容器 (PCR V) 構造物に関する研究

—IV—2 PCR Vのクリープ解析—

PCR V研究グループ

Study on Prestressed Concrete Reactor Vessel (PCR V) Structures

—IV-2 Creep Analysis of PCR V—

PCR V Research Group

Abstract

This report describes an analytical method for understanding the long-term behavior of a PCR V and the results obtained by this method. In the usual analysis the effects of steel elements such as reinforcing bars and liner plates in restraining creep deformation and the influence of stress relaxation in prestressed bars were neglected. In the present analysis, however, these effects are considered and efforts are made to obtain the histories of long-term deformations and stresses of the PCR V under actual operating conditions. In design of a PCR V, the evaluation of thermal load is one of the important items and it is possible for the thermal stresses obtained by the normal elastic analysis to be considerably reduced on analysis of creep taking into account the slow rate of temperature rise in actual structures.

概 要

本報告は、PCR Vの長期挙動を把握するための解析方法、およびその結果について述べたものである。本解析では、従来の解析で無視されていた補強筋・ライナー等の鋼材のクリープ変形拘束効果、及びプレストレスト鋼棒の応力変動をも同時に考慮してより実情に近い条件での長期的な変形・応力履歴の把握を試みた。なお、PCR Vの設計上重要な項目の1つである温度荷重の評価については、実際の構造物の温度上昇時間を考慮してクリープ解析を行なえば従来の単純な弾性計算による熱応力を相当低減できることを解析的に明らかにした。

1. はじめに

PCR V の設計では、原子炉の運転寿命期間中における構造物の長期挙動を予測することが、その機能保持及び耐力安全性を保証するという面から重要な項目の1つとなっている。

従来の PCR V のクリープ解析では、補強筋・ライナー・緊張材等の鋼材の剛性は全く無視してコンクリートだけの構造体として解析した例が多い(文献1, 2) 3)。しかし、実際には断面積で最大1.0%程度の鋼材が配置されており、これらの鋼材はコンクリートのクリープ変形を拘束するので、コンクリート及び鋼材の応力は刻々変化することになる。従って、構造物の応答をより適正に評価するためには、構造物をコンクリ

ートと鋼材の複合体として解析する必要がある。このように複合体として扱えば、構造物の変形に伴う緊張材の応力変化も、より厳密に評価することが可能となる。

本論は、以上の観点から PCR V のより実情に近い条件での長期的な変形履歴、コンクリート・緊張材の応力履歴の把握を試みたものである。

なお、PCR V ではプレストレスト・内圧に比較して熱応力の評価が問題となる場合が多い。ASME 設計基準では¹³⁾、コンクリートの粘弾性効果により弾性係数を低減した弾性計算で熱応力を評価してよいとしているが、その低減率は明確でない。本論では、熱応力に対し、熱荷重負荷時の温度上昇時間を緩やかにしてクリープ解析を行なうと、単純な弾性計算による応力

を相当低減できることを解析的に明らかにした。

2. 解析上の仮定

2.1. コンクリートの材料特性

- 1) コンクリートは、線型粘弾性体とする。コンクリートのひびわれ、弾塑性は考慮しない。
- 2) コンクリートは、応力が圧縮側・引張側共に同じクリープ性状を示すものとする。
- 3) クリープ歪への荷重材令の影響は無視する。

当面の解析対象を PCRV に限定すると、コンクリートの材令が数カ月～数年に達してから始めて本格的なプレストレスが導入されるのが普通であるから、荷重材令がクリープに及ぼす影響を無視しても実用上差支えないと考えられる。ちなみに、Browne⁴⁾によるとクリープへの荷重材令の影響は、図-1 に示す通りであり荷重材令1年以後の変化はほとんどない。

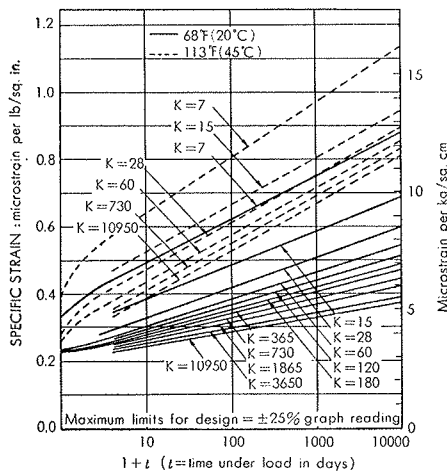


図-1 クリープ歪への荷重材令の影響⁴⁾

- 4) 任意温度でのクリープ歪は、ある基準温度でのクリープ関数と、温度による影響関数の積で表わされるものとする。

$$F(T, t) = \beta(T) \cdot f(t) \quad (\times 10^{-6} / \text{kg/cm}^2)$$

ここに T : コンクリート温度(°C)

t : 荷重後の日数

F(T, t) : 温度T°C時の単位クリープ関数

$\beta(T)$: 温度の影響関数

f(t) : 基準温度でのクリープの関数。

- 5) コンクリートのクリープ特性はケルビンソリッドの任意の直列結合でモデル化する。この仮定によるとクリープ関数は次式で表わされることになる。

$$f(t) = \sum_{i=1}^n a_i \{1 - \exp(-b_i \cdot t)\}$$

ここに、 $a_i \sim b_i$: 実験結果から求まる定数

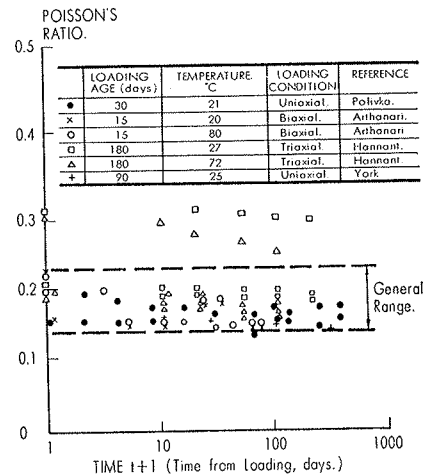


図-2 クリープポアソン比の経時変化⁵⁾

この関数を用いると、任意時間でのクリープ歪を算定するのに、それ以前の応力・温度履歴を一々記憶する必要がなく計算が容易である。

- 6) コンクリートのクリープポアソン比は、時間によらず一定であるものとする。

多軸応力状態でのクリープ性状を論ずる場合、クリープポアソン比の経時的な性状は重要な項目である。Browne and Blundell⁵⁾ が種々の実験結果をまとめて整理したものが図-2である。実験によってはかなりバラツキはあるが、ここでは、クリープポアソン比の経時変化はないものとし、かつ、弾性ポアソン比と等しいと仮定する。

- 7) 解析対象とするコンクリートは、完全にシールされており、内部水分の移動・逸散はなく、乾燥収縮歪も生じないものとする。

- 8) コンクリートの弾性係数は、材令・温度にかかわらず一定であるものとする。

2.2. 鋼材の考え方

- 1) 鋼材は完全弾性体とする。つまり、鋼材自身のクリープ・リラクゼーションは考えない。
- 2) コンクリートと鋼材の付着は完全付着とし、付着のはがれ・スリップは生じないものとする。
- 3) 緊張材は、荷重としてプレストレスをコンクリートに与えるばかりでなく、コンクリートの変形拘束材としての役割を有する。

緊張材の応力変化は、コンクリートの変形に比例して生ずるものとし、プレストレス加力時は外力荷重項のみとして扱い、それ以後は初期導入応力をもつ鉄筋として、その剛性を変形計算に組入れる。

2.3. FEM 適用上の仮定

- 1) 解析対象を3次元軸対称回転体とし、2次元応力場の問題とする。

- 2) コンクリートは、三角形断面リング要素，補強筋・緊張材は線材要素，ライナーは薄膜要素とする。
- 3) 経過時間を多数のステップに分割し，各ステップ内で応力は一定とみなす。
- 4) 応力変化は，各ステップの初めに弾性的に生ずるものとし，その応力と前ステップまでに生じていたクリープ歪を使って現ステップの終了時のクリープ歪を算定し，それを初期歪と同様に等価節点外力として弾性解析を行なう。
- 5) 経過時間の途中で生ずる外荷重・温度変化・温度変化に伴うクリープ特性の変化は，必要に応じて各ステップで入力データとしてとり入れる。

2.4. 解析に使用した材料特性値

今回の解析に使用したコンクリートの基準クリープ関数は，文献10)の常温(20°C)一軸クリープ試験の結果に，最小二乗法を適用して次式のように設定した。

(図-3 参照)

$$f(t) = 0.247\{1 - \exp(-3.75t)\} + 0.372\{1 - \exp(-0.375t)\} + 1.007\{1 + \exp(-0.0375t)\} + 2.226\{1 - \exp(-0.00375t)\}$$

クリープ歪への温度の影響は，文献6)~9)によっても異なるが，ここでは， $\beta(T)$ として近似的に次式で与えた。

$$\beta(T) = (1.5T + 20)/50 \quad (20^\circ\text{C} \leq T \leq 70^\circ\text{C})$$

$$\beta(20) = 1.0, \beta(70) = 2.5$$

その他，基本的な弾性特性，熱特性は表-1に示す通りである。

3. 基本性状の把握

3.1. 鋼材の拘束効果

鉄筋コンクリート部材のクリープ変形時には，無筋コンクリートに比べ，鋼材によるコンクリートのクリープ変形拘束効果によりその全体変形が拘束されるばかりでなく，逐次コンクリートの負担力が鋼材に移行する。図-4は，単純な一軸圧縮部材で外力は常に一定に保ち，部材温度を期間毎に変化させ，通常考えられる鉄筋比の範囲でコンクリート応力の変化と変形の状況を算定したものである。図中，温度変化に伴う膨脹・収縮変形量は省略した。これによると，当然のことながら，鉄筋比が大きく，コンクリートのクリープ特性が大きくなるほどコンクリート応力の変化が大きくなっていることがわかる。

3.2. クリープ効果による熱応力の低減

外荷重によって生じた応力に比べて，自己歪(熱膨脹・乾燥収縮)によって生じた応力にクリープ効果を

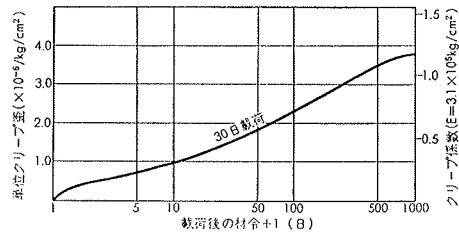


図-3 基準クリープ関数

| | コンクリート | 鋼材 |
|------------------|--|--------------------|
| 弾性係数(kg/cm²) | $3.1 \times 10^5 (F_c = 450 \text{kg/cm}^2)$ | 2.1×10^6 |
| 弾性ポアソン比 | 1/6 | 0.30 |
| クリープポアソン比 | 1/6 | — |
| 線膨脹係数(/°C) | 8×10^{-6} | 8×10^{-6} |
| 熱伝導率(Kcal/mhr°C) | 1.4 | — |
| 密度(kg/m³) | 2400 | — |
| 比熱(Kcal/kg) | 0.2 | — |

表-1 材料特性値

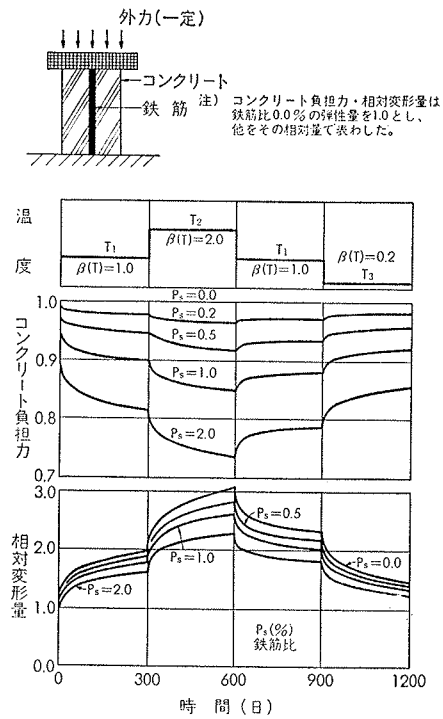


図-4 鋼材の拘束効果

考慮すると，応力再配分が大きくなることは容易に想像される。ここでは一例として，一軸完全拘束部材に20°Cの温度上昇を与えた時に生ずる熱応力について，温度上昇時間を変えてクリープ効果による応力変化を算定した(図-5)。これによると，温度上昇時間を緩やかにするほど弾性応力に比べてそのピーク応力が低減していることがわかる。実際の構造物では，非定常温度分布域での局所的な熱によるひびわれを防ぐための考慮から，熱荷重負荷を緩やかにするのが通例である。熱応力算定にあたって，実際の温度上昇時間を

考慮したクリープ解析を行なうと弾性計算による応力を相当低減できることがわかる。なお、一旦上昇させた温度を冷却する場合、瞬間的な冷却を行なうと、逆方向に大きなピーク応力が生ずるので、冷却に対しても加熱と同様にできるだけ緩やかに冷却するのが望ましい。

4. PCRIV の解析

今回の解析は、シングルキャビティタイプのPCRIVを対象として行なった¹²⁾。解析モデルは軸対称性を考慮して図-6のように設定した。プレストレスは、縦方向と、半径方向の2方向から加力している。補強筋は、鉄筋比で縦方向0.264%、円周方向0.140%である。載荷履歴は、実際の原子炉の運転サイクルから図-7に示すように設定した。

解析例として、従来の解析法¹⁾と本解析法の相違を比較するため、次の2通りについて計算した。

(1) 構造体をコンクリートのみと考える。プレストレスは、外力として一定で扱う。温度荷重は、内圧と同時に定常状態で作用するものと仮定する。

(2) 鋼材をも考慮し、鉄筋コンクリート構造体として緊張材の応力変動も考慮する。温度荷重は、原子炉の実際の加熱状況から熱伝導時間を考慮して、図-8に示すように内表面温度をステップ状に上昇させて非定常温度分布解析を行ない、その結果から図中の実線の時刻毎に壁体内の温度分布の変化にみあった熱荷重を負荷した。

解析結果は、図-9~図-11に示す通りである。各図中、実線の階段状の変化は非定常温度分布を期間毎に一定とみなして解析したためである。解析例(2)では鋼材の拘束効果により変形及びコンクリート応力共に低減しており、解析例(1)に比べて、変形で約15%、応力で10~15%小さくなっている。一方、トップヘッドスラブの熱荷重によるピーク応力は弾性応力に対して

約50%と相当低下していることがわかる。また、鋼材の応力変化の様子も明確に把握できている。緊張材の応力ロスは、内圧作用直前で最も大きくなっているが量的には高々数パーセントに過ぎない。ライナーでは局部的にかなり高い圧縮応力を受けていることがわかる。

解析結果の定量的な評価は、解析に使用するコンクリートのクリープ特性値をさらに検討する必要がある

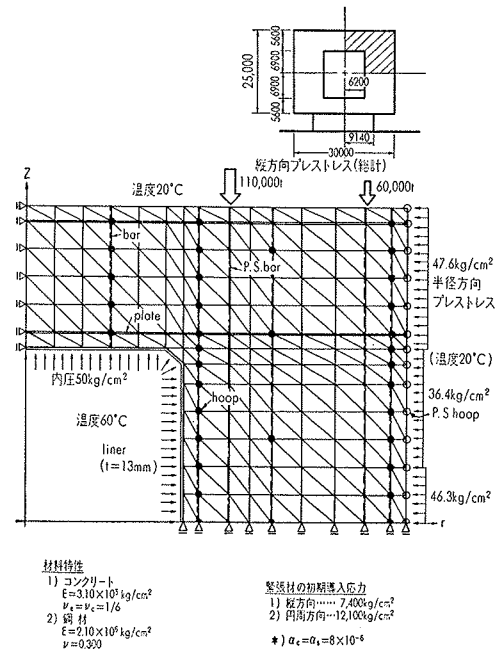


図-6 解析モデル

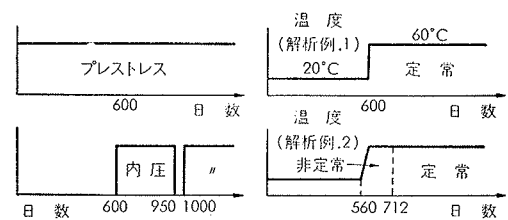


図-7 載荷履歴

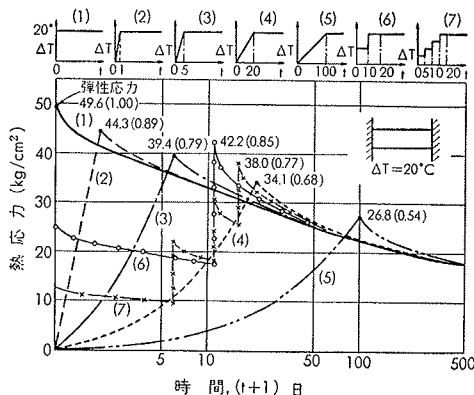


図-5 クリープ効果による熱応力の低減

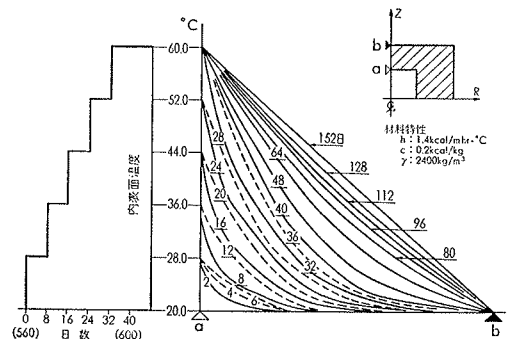


図-8 非定常温度分布解析結果

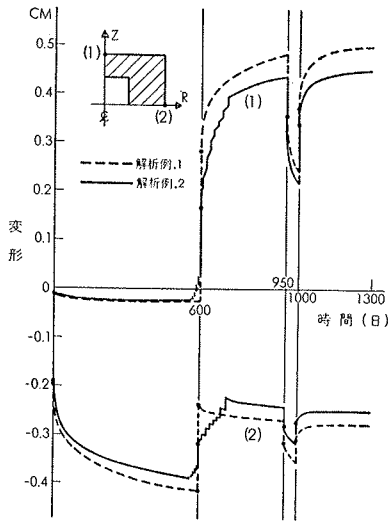


図-9 変形履歴

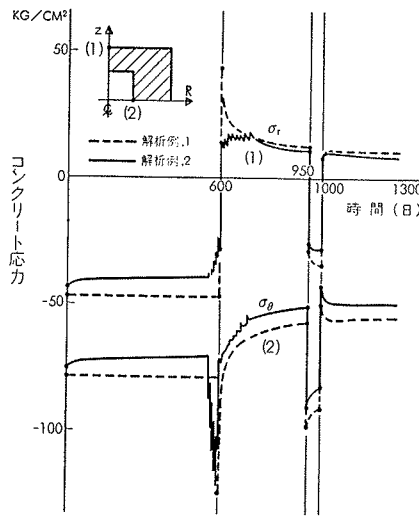


図-10 コンクリートの応力履歴

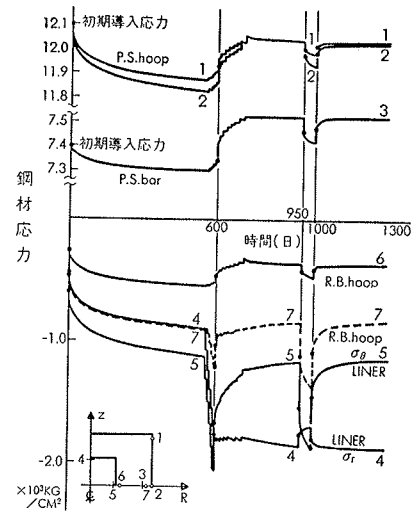


図-11 鋼材の応力履歴

が、定性的な把握は今回の解析で充分できたと考える。

5. まとめ

本解析によって、従来無視してきた PCRVR の補強筋・ライナー・緊張材等の鋼材は、その絶対量はごくわずかであるが、長期的な変形状に対する拘束効果が大きく、長期に亘る応答を適正に評価するためには必ずしもその剛性が無視できないことがわかった。また、緊張材の応力変化も比較的簡単に計算にとり入れることができた。熱応力の評価については、実際の原子炉運転時の温度上昇・冷却時間を考慮したクリープ解析を行なうと、単純な弾性計算による応力を相当低減できることがわかった。

今回の解析では、コンクリートの熱クリープ性状については、資料不足から大胆な仮定で解析を進めている。特に、高温クリープ時の除荷後のクリープ回復については、重ね合せの原理の適用性を疑問視する研究も報告されており^{3), 5), 6)}、材料自身としてコンクリートのクリープ性状の解明についても解析と並行して研究を継続し、より実情に合った解析モデルを設定して解析方法の改良を進める必要があると思われる。

参考文献

- 1) 川口他：有限要素法によるクリープ解析，大林組技研所報，No. 9, 1974, p. 32
- 2) 川股他：有限要素法を用いた原子炉圧力容器のクリープ解析，コンクリートジャーナル，Vol. 12, No. 6, 1974, p. 111
- 3) 阿部他：プレストレストコンクリート圧力容器の高温クリープ性状とクリープ解析について，コンクリートジャーナル，Vol. 12, No. 6, June 1974

- 4) R. D. Browne; Properties of concrete in reactor vessels, Conference on Prestressed Concrete Reactor Pressure Vessels, I. C. E. Paper C 13
- 5) R. D. Browne, R. Blundell: The behavior of concrete in pressure vessels, Nuclear Engineering and Design, Vol. 20, No. 2, 1972
- 6) 河角他：高温度下におけるコンクリートのクリープ，電力中央研究所技術第2研究所報告，No. 72018 1973
- 7) D. J. Hannant: Strain Behavior of Concrete up to 95°C Under Compressive Stresses, Conf. on P. C. R. V's, I. C. E., Paper C 17
- 8) J. E. McDonald: An Experimental Study of Multiaxial Creep in Concrete, SP-34, A. C. I., 1972
- 9) G. P. York. et al.: Experimental Investigation of Creep Subjected to Multiaxial Compressive Stresses and Elevated Temperatures, No. 2864-2 Univ. of Texas, June, 1970
- 10) PCRVR 研究グループ：PCRVR 構造物に関する研究 IV-1 常温，一軸・三軸コンクリートクリープ試験，大林組技研所報，No. 12, 1976
- 11) 井元他：有限要素法による R. C 部材の弾塑性解析，大林組技研所報，No. 8, 1974
- 12) PCRVR 研究グループ：PCRVR 構造物に関する研究，II. PCRVR モデル内圧実験，大林組技研所報，No. 8, 1974
- 13) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, "Nuclear Vessel, Article 1-9", 1968 Edition

(文責 川口 徹)