

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

—II-2 1/20マルチキャビティ型 PCRIV モデル内圧実験—

PCRIV 研究グループ

Study on Prestressed Concrete Reactor Vessel (PCRIV) Structures

—II-2 Pressure Tests of 1/20 Multi-CavityType PCRIV Model—

PCRIV Research Group

Abstract

This paper presents the results of pressure tests on a 1/20-scale multi-cavity type PCRIV model representing the PCRIV of a 1,000-MWe class high temperature gas cooled reactor. The test demonstrated that this PCRIV model had progressive ductile failure characteristics from crack occurrence to the final stage and strength of over 4 times design pressure, which confirmed sufficient safety of the PCRIV structure.

The overall structural response of the PCRIV model during prestressing work and the pressure tests were clarified through experiments, while further, the results of FEM analysis for elastic response of the PCRIV showed acceptable agreement with the experimental results indicating predictability of structural behavior of the PCRIV under the prestressing force and design pressure.

概 要

1000MWe 級の原子力発電用高温ガス炉の PCRIV を想定し、これを 1/20 にモデル化したマルチキャビティタイプ PCRIV モデルの内圧実験を行なった。モデルは設計圧の 4 倍以上の耐力と漸進的な破壊挙動を示し、PCRIV の構造的安全性が確認された。PCRIV モデルのプレストレス導入時の挙動、内圧を受けた時の弾塑性変形性状、ひびわれの発生による機構変化、破壊モード、緊張材の張力増加の状況といった PCRIV の基本的な力学特性に関する諸点を実験的に明らかにするとともに、弾性挙動に対しては FEM 解析結果と比較した。

1. まえがき

マルチキャビティ型 PCRIV は高温ガス炉 (HTGR) を対象としたもので、側壁内に一次冷却器等を納めるための開口 (S/G キャビティ) を有しており、その容器形状が複雑なことから、内圧に対する挙動、特に、変形能、耐力、破壊モードといったひびわれ発生以後の基本的な力学特性の確認は、モデル実験に負う所が多い。

このマルチキャビティ型 PCRIV の、プレストレス導入時の性状ならびに内圧に対する弾塑性挙動を明

らかにし、PCRIV の安全性に関する基礎資料を得ることを目的として、1000MWe 級の高温ガス炉用 PCRIV を想定した 1/20 モデルの内圧実験を行った。

2. 試験体の概要

試験体は、上記 PCRIV の一設計例を参考とし形状、プレストレス量、補強筋比等、ほぼ正確にモデル化したものである。図—1 に試験体図面を示す。PCRIV 形状は直径 150cm、高さ 135cm の厚肉円筒形で、中央部にコアキャビティ、側壁部に 6 個の S/G キャビティを内蔵している。また PCRIV 支持構造は、6

脚のスター型サポートとし、容器部縦鋼棒の一部をマツスラブ下まで貫通させ一体化している。プレストレス形式は縦方向鋼棒、円周方向ワイヤーウィンドイング方式によっている。各種材料特性および試験体製作方法は、前報、シングルキャビティタイプモデルの場合¹⁾と同様である。写真-1は、ライナー容器、鉄筋等をすべて組み上げた試験体を示したものである。

3. F.E.M. 弾性解析

プレストレス力および内圧力に対して、任意6面体要素(1要素20節点)を用いた3次元FEM弾性解析を行なった。解析モデルは試験体を縦に12等分した30°部分を対象とし、S/Gキャビティ、ガスダクト、サポート部分形状をそのままモデル化している。ただしトップスラブのスタンドパイプ部分の剛性変化は考慮せず、全断面同一コンクリートとした。(図-3参照)要素数166、節点数1168である。また解析に用いた常数は以下のごとくである。

弾性係数 $E = 3.66 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

ポアソン比 $\nu = 0.167$

4. プレストレスの導入

材令70~95日でプレストレスの導入を行なった。導入順序は、まず縦方向プレストレスを導入し、次に円周方向プレストレスを試験体上側から順次下側へ、ワイヤーウィンドイング装置¹⁾を用いて導入した。図-2にプレストレス導入時のコンクリートひずみ分布を示す。Iは縦方向プレストレス導入による縦方向ひずみ ϵ_z の分布を、IIは円周方向プレストレス導入による半径方向ひずみ ϵ_r の分布と円周方向ひずみ ϵ_θ の分布を示したものである。Iの縦方向の分布を見ると、サポート上のI-I断面、S/Gキャビティ部分のII-II断面とも、側壁内側のひずみが大きく、外側が小さな値を示し、解析結果も同傾向となっている。またIIの円周方向導入時のひずみ分布においては、 ϵ_r の分布では、PCR/V部プレストレス導入の影響が、サポート部分まで及んでいること。さらに ϵ_θ の分布から、S/Gキャビティ部分の壁厚の薄くなったII-II断面でI-I断面の2倍以上のひずみが生じていることが分る。解析結果は全般的に同傾向を示している。また、サポートの拘束によるPCR/V内部の導入プレストレスの低下傾向は、ボトムスラブがある程度厚いためもあり、顕著には現われていないと思われる。

5. 内圧実験

材令155~176日において内圧実験を行なった。加圧

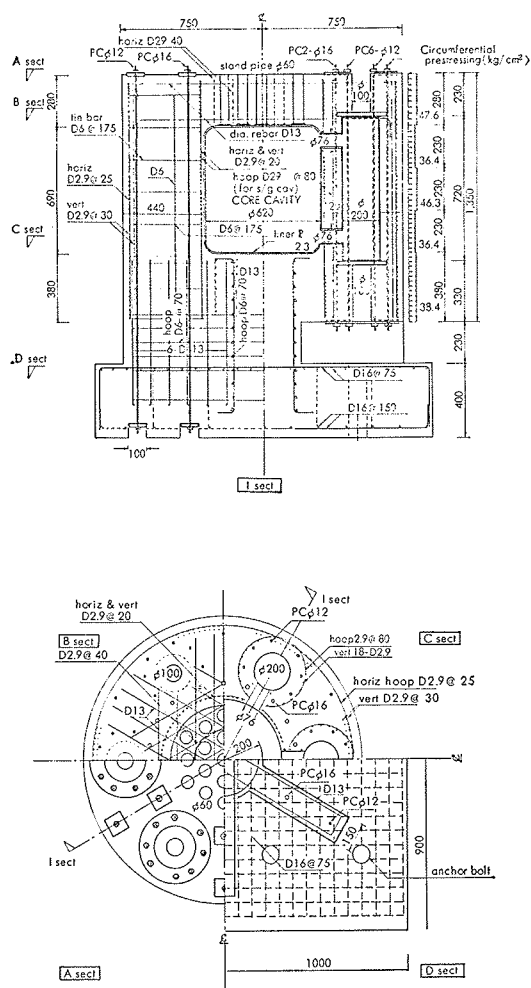


図-1 試験体図面

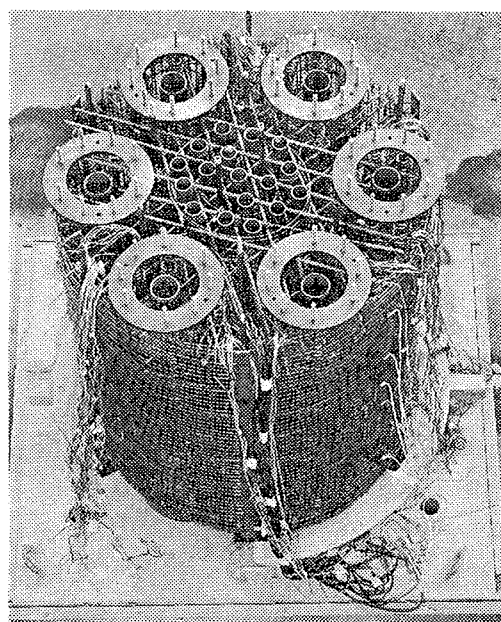


写真-1 鉄筋組立て状況

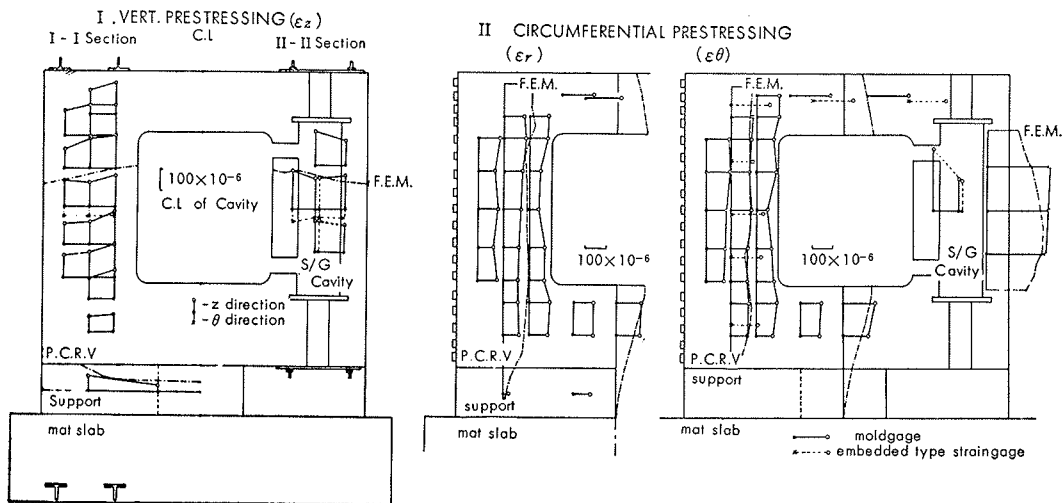


図-2 プレストレス導入時、コンクリートひずみ分布

経過は、設計圧の 50 kg/cm^2 で2回、 75 kg/cm^2 、 100 kg/cm^2 、 125 kg/cm^2 で各1回のひびわれ確認のための加圧をした後、破壊までの最終加圧を行なった。加圧法、測定方法は文献1)の場合と同様である。以下に実験結果を列挙する。

(1) 弾性挙動

設計圧テストにおいては、主に試験体の初期剛性の確認を行ない解析結果と比較した。図-3に内圧 50 kg/cm^2 における変形分布の比較を、図-4にコンクリートひずみ分布の比較を示す。解析結果と実験結果はほぼ同傾向を示している。

(2) 試験体の変形性状

図-5にトップスラブ中央点および側壁中腹の内圧一変位関係を示す。両者とも内圧 90 kg/cm^2 付近でひびわれ発生に伴う剛性低下を示し、また以後の挙動は復元性に富み大変形を呈した。図-6は試験体表面の変形分布を示したものである。トップスラブ、側壁とも、全体として曲げ変形の性状を呈した。また側壁下端部はサポートの拘束により微小な変形であった。

(3) コンクリートのひずみ

図-7に内圧 100 kg/cm^2 時のコンクリートひずみ分布を示す。 ϵ_z の分布から、側壁中腹は曲げの影響により、外側の引張ひずみが内側より大きいこと。 ϵ_r の分布から、側壁中腹の圧縮ひずみが内側と外側で大きく中央部で小さくなっていること。 ϵ_θ の分布から、側壁中腹部において内側、外側の引張ひずみに対して中央部では圧縮ひずみが表われていること。さらに S/G キャビティ外側の壁厚の薄い部分では、引張ひずみ量が大きいこと。以上の諸点が明らかである。このひずみ分布の傾向は弾性域においても同様であった。

また、図-8はキャビティ近傍主要点コンクリー

トひずみの履歴を示したものであり、これから内部ひびわれの発生を推測することが出来る。

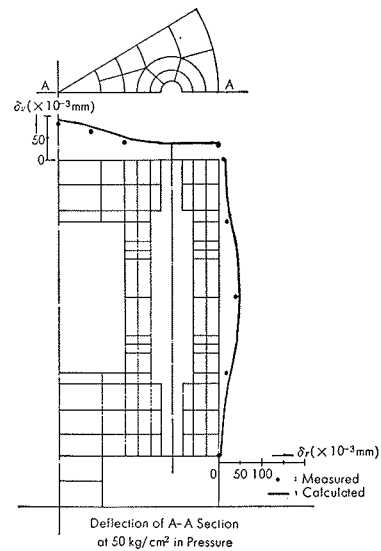


図-3 内圧 50 kg/cm^2 における変形分布

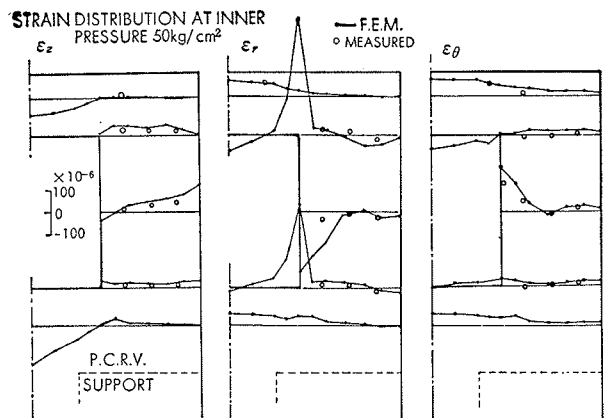


図-4 内圧 50 kg/cm^2 におけるひずみ分布

(4) 緊張材の挙動

図-9に中腹部巻付鋼線のひずみ増加の状況を、図-11に縦方向各鋼棒中腹位置(グラウト無し)のひずみ増加の状況を示す。これらはいずれも終局状態において塑性域に達している。また図-10は側壁にそった巻付鋼線のひずみ増加量の分布を示したものである。

(5) 破壊経過、ひびわれ状況、破壊モード

図-12にひびわれの発生順序を示す。この試験体の破壊経過を記述すると、まず内圧80kg/cm²近くまでは弾性挙動を示し、90~100kg/cm²で内壁上隅角部ひびわれ、内壁S/Gキャビティ部縦ひびわれ、(1)内壁下隅角部ひびわれ(2)が発生し、続いて120kg/cm²前後でトップスラブ表面中央部、側壁中腹表面水平およびS/Gキャビティ上面縦ひびわれ(3)が発生した。内圧150kg/cm²を越えると変形量が増大し、238kg/cm²においてライナーが破断し、内部の水が流出した。図-13は試験体表面の最終ひびわれ状況を示したものであるが、トップスラブでは放射状の曲げひびわれが全面に進展し、側壁表面では中腹部水平ひびわれが、外周全域にわたり、またS/Gキャビティ上面には縦ひびわれが発生し、中腹から上端に達している。これらのひびわれ状況と試験体全体の変形状態から判断して、トップスラブの曲げと側壁の曲げおよび縦割れによる破壊をこのモデルの破壊モードと考えることができる。また、終局時においては、主要緊張材が塑性域に入っていたことと試験体が大変形を呈していたことから考えて、このモデルは、その構造的耐力にほぼ達していたものと推定される。

6. まとめ

1/20マルチキャビティタイプ PCRV モデルの内圧実験を行ない、その弾塑性挙動、終局耐力、破壊モ

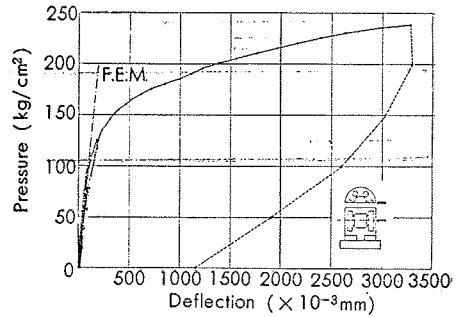
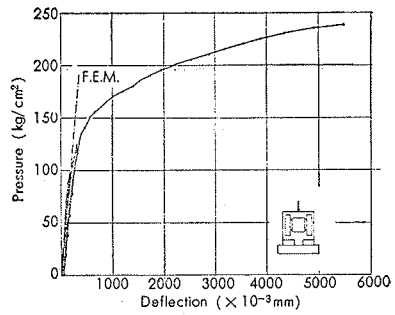


図-5 トップスラブ中央および側壁中腹の内圧-変位関係

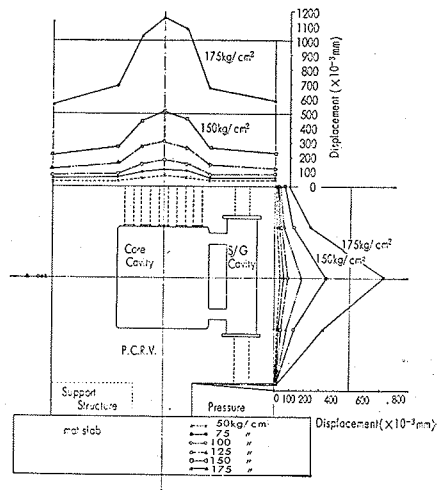


図-6 試験体表面の変形分布

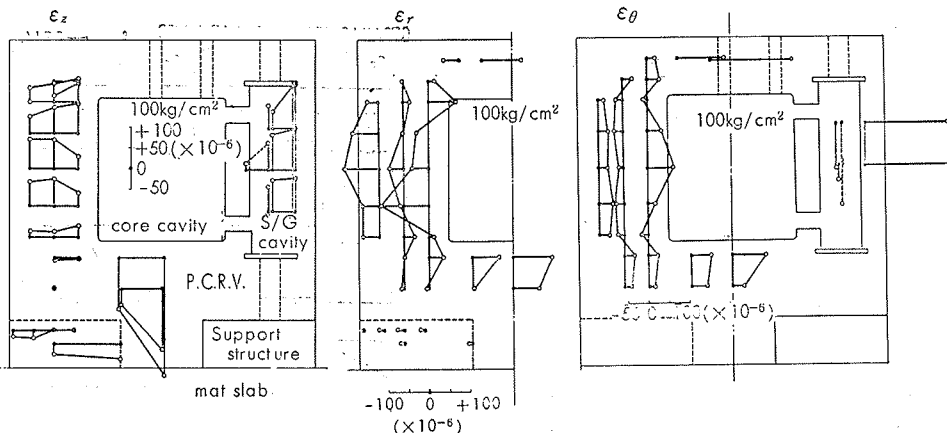


図-7 内圧 100kg/cm²におけるコンクリートのひずみ分布

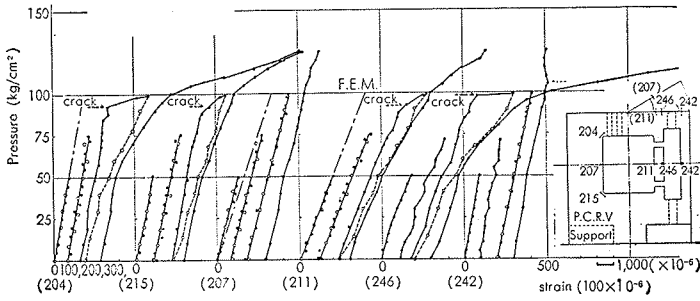


図-8 主要点コンクリートひずみの履歴

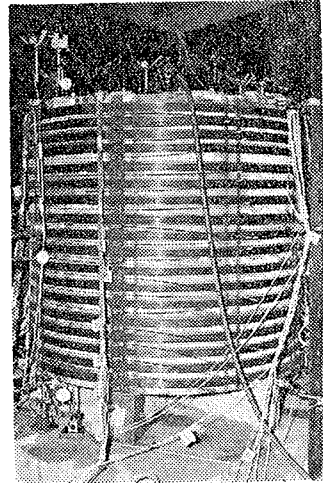


写真-2 実験状況 (破壊時)

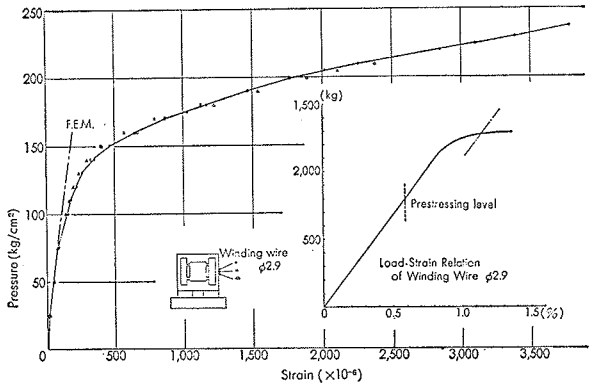


図-9 中腹部巻付鋼線の内圧～ひずみ増加量関係

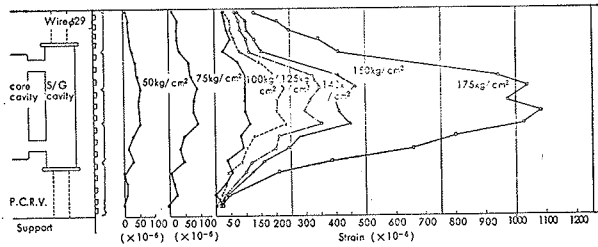


図-10 巻付鋼線ひずみ増加量の分布

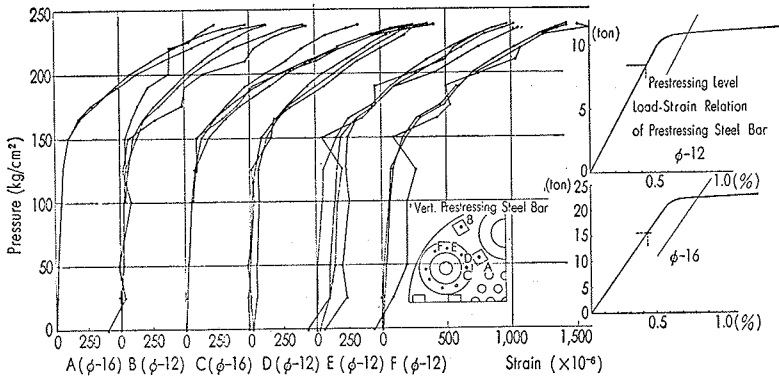


図-11 縦方向鋼棒の内圧～ひずみ増加量関係

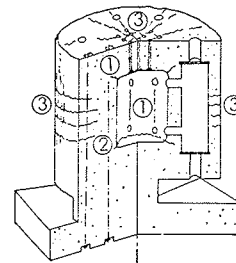


図-12 ひびわれの発生順序

ードを確認した。モデルは充分の耐力と漸進的な破壊性状を示した。また、プレストレス導入時の性状、内圧に対する弾性挙動については、FEM 弾性解析を行ない、実験結果と比較した。(執筆 多田利正)

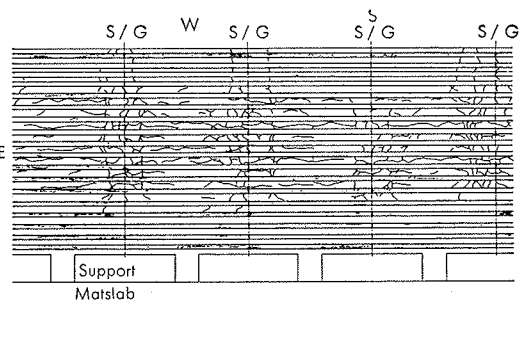
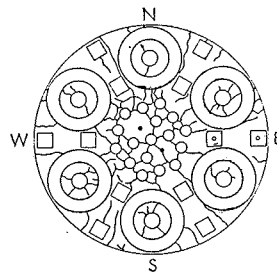


図-13 試験体表面最終ひびわれ状況

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート原子炉圧力容器(PCRVR)構造物に関する研究：大林組技術研究所報 No. 8, 1974.
- 2) 同題, 1/20マルチキャビティタイプモデル内圧

実験-1, -2, 昭和48年度建築学会関東支部研究報告集