

## II. PCR Vモデル内圧実験

— II-1 1/20シングルキャビティ型PCR Vモデル内圧実験 —

PCR V研究グループ

### II. Internal Pressure Tests for PCR V

— II-1 A 1/20-Scale Single Cavity Type PCR V Model —

PCR V Research Group

#### Abstract

The internal pressure test results of a single-cavity type 1/20-scale PCR V model, the prototype of which is a multi-cavity type PCR V adopted for a large high-temperature gas reactor, are presented in this paper. A model without S/G cavities was used to simplify the analytical idealization.

The elastic responses and inelastic behaviors both at overpressure and ultimate pressure of the model have good agreement with calculated results of non-linear analyses by the finite element method.

#### 概要

この報告は、PCR V構造物に関する一連の研究の一つであるシングルキャビティ型PCR Vモデルの内圧実験結果について述べたものである。モデルは、大型HTGR用マルチキャビティ型PCR Vをプロトタイプとし、その主要諸元の約1/20にしたものであるが、解析の単純化の為にS/Gキャビティ部を除外している。

モデルの弾性応答及び過圧力と終局圧力に対する挙動ともコンクリートひび割れを考慮した有限要素法に依る非線形解析結果と良く一致した。

#### 1. モデルの設計

このモデルの設計基本方針は、設計内圧  $50 \text{ kg/cm}^2$ 、設計温度荷重として内外温度差  $40^\circ\text{C}$  の荷重状態で、且つプレストレス荷重を組合せた時、基本的には弾性的な挙動をするようにしている。

又、ライナーについては、その破断が PCR V そのものの破断になるので、ライナー材そのものの加工性溶接性に重点を置いて設計している。プロトタイプの場合では、ライナーのシャコネクター等が設計上大きな問題となるが、このモデルでは一切考慮していない。又、トップスラブに設けられるスタンドパイプについても、形状を単純化する為に除外した。

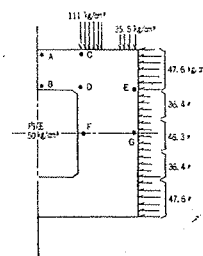
表1、表2に設計組合せ荷重状態における PCR V 主要部の各種応力を示している。それに見られるように、熱応力を組合せた場合、無視できない大きさの引張応力が生ずる領域が認められる。しかし、ACI-AS ME PCR V 設計基準案等に依れば、コンクリート熱応力はその粘弾性材的な特性により、50%近くまで低減できるとしているの、設計上支障はないものと考えている。

プレストレス荷重分布、鉄筋等の断面算定の面では、設計者の意向が大きく左右する。このモデル

では、次のマルチキャビティ型 PCR V モデルとの対応がつくように、基本的には同じ荷重分布及び鉄筋量としている。図1にモデル概要図を示す。

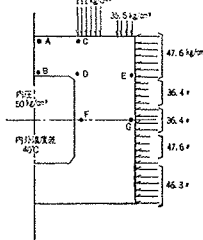
位置 番号	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\sigma_z$	$\tau_{rz}$	主 応 力	
					$\sigma_1$	$\sigma_2$
A	-6.16	-3.99	-2.87	-1.75	-2.11	-6.92
B	-59.77	-59.37	-45.82	-0.31	-45.81	-59.78
C	-30.93	-22.53	-4.99	-11.86	-1.34	-43.58
D	-27.36	-38.17	-4.21	-28.77	15.23	-46.80
E	-38.95	-39.52	-21.04	-1.42	-20.93	-39.06
F	-49.34	-36.74	-15.49	0.67	-15.48	-49.35
G	-45.75	-42.49	-22.47	-0.16	-22.47	-45.75

表一 組合せ荷重による応力(プレストレス, 内圧)



位置 番号	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\sigma_z$	$\tau_{rz}$	主 応 力	
					$\sigma_1$	$\sigma_2$
A	40.44	40.71	1.93	-2.65	40.62	1.75
B	-117.67	-117.37	-42.22	0.79	-42.22	-117.68
C	-2.07	18.74	-0.65	-14.17	12.83	-15.55
D	-95.96	-121.47	-64.71	-11.57	-60.89	-99.78
E	-42.14	-8.17	6.90	-6.07	7.64	-42.88
F	-54.14	-104.64	-72.39	0.07	-49.58	-67.83
G	-46.25	-4.29	21.33	-0.56	21.33	-46.25

表二 組合せ荷重による応力(プレストレス, 内圧, 温度差)



## 2. モデルの製作

モデルの製作では次の点に留意した。

- (1)ライナーの水密性の確保：予め実験の製作条件に合わせたライナー材の溶接部の強度，変形試験，およびライナー容器製作後の水圧試験を行い水密性と変形能を確認後試験体の製作に供した。
- (2)コンクリートの打設：コンクリートを一体打ちとするため，まず内側型枠として利用するライナー容器を含めて，補強筋，縦鋼棒用シース，モールドゲージ等を含めて，所定位置に組み上げた。また，コンクリート打設に当ってはライナー底部へのコンクリートの流入を確実にするため，外側型枠を2段に連結できるようにして，ライナー底部への流入を確認しながら打設した。締固めにはバイブレーターを用いた。
- (3)コンクリートの養生：打設が厳寒期のため，一晩は室内の保温を行い，コンクリートの凝結後，表面を湿布養生し，3週間後に脱型した。
- (4)支持条件：サポート部での拘束条件を小さくするため，PCR/Vとサポートの間にネオプレンマットを敷いた。

なお，このモデルに用いたコンクリートの配合表と強度試験結果および使用鋼材を表3.～5.に示す。また図2.～5.にそれらの力学的性状を示す。

W/C %	W/C+F %	S/A %	重量比 (kg/m <sup>3</sup> )					
			セメント	FA	水	砂	砂利	混和剤
39.2	32.7	34.2	500	100	196	517	994	1,250
			粗骨材(川砂利)		6～2.5mm			
			細骨材(川砂)		2.5mm以下			
			セメント		普通ポルトランドセメント			

表一3 コンクリートの配合および骨材

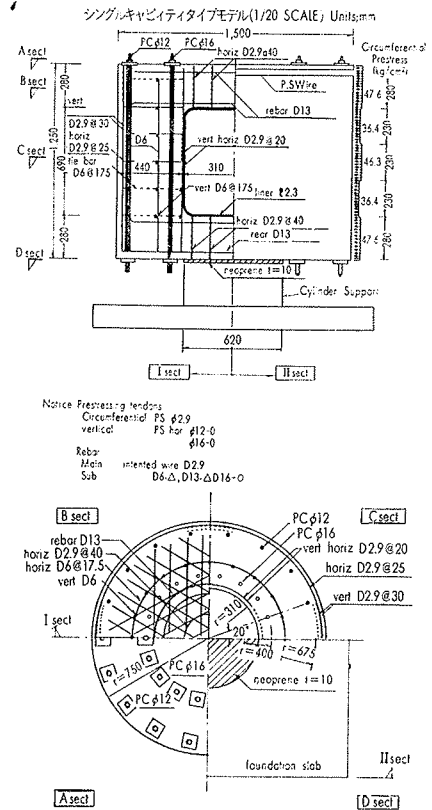
材令	プレストレス導入時			内圧 実験時
	28日	46日	60日	
圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	419 (566)	420	440	440
引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	—	—	—	22
弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	—	2.5×10 <sup>5</sup>	2.7×10 <sup>5</sup>	2.7×10 <sup>5</sup>

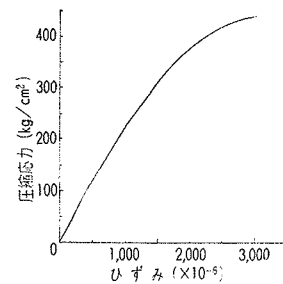
	縦方向		円周方向
	縦方向	円周方向	
PC鋼棒	φ-16 4種PC丸鋼棒	φ-12	
PC鋼線	φ-2.9 降伏点 185 kg/mm <sup>2</sup>		引張強度 201
補強筋	D-2.9 インデントPC鋼線を使用 (降伏点 174 kg/mm <sup>2</sup> )		
	D-13	SD-35	
	D-6	SD-35	
ライナー	2.3mm鋼板 SS41		

表一4 コンクリート強度

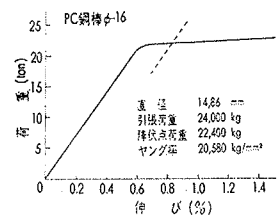
表一5 鋼材



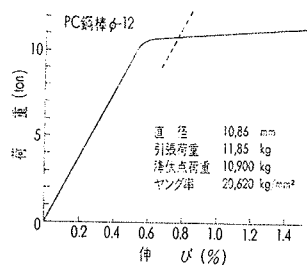
図一1 モデルの概要図



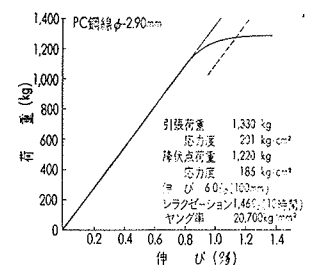
図一2 コンクリート応力ひずみ曲線 (材令90日)



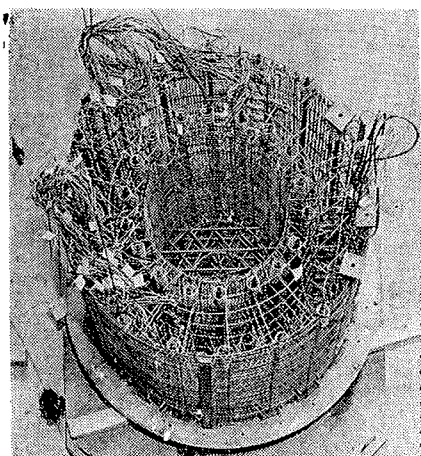
図一3 荷重一伸び線図 (PC鋼棒 φ-16)



図一4 荷重一伸び線図 (PC鋼棒φ-12)



図一5 荷重一伸び線図 (PC鋼線 φ-2.9)



写真一 鉄筋組立て状況

### 3. プレストレスの導入

このモデルでのプレストレス導入順序は、始めに縦方向プレストレスを所定量導入し、次に円周方向プレストレスをモデル下部から上部に向かって順次所定量ずつ導入したものである。米国 AEC などでは、導入作業中にコンクリート引張応力を生じさせないようにかなり厳しい制約を設けているようである。しかし、この程度のモデルでは、そのプレストレス導入時コンクリート応力レベル特に支圧部応力レベルから見てコンクリートのひび割れは殆んど問題にならないし、又弾性縮みの影響も無視できると考え上記の方法を採用した。

#### (1) 縦方向プレストレスの導入

2台の連動ジャッキを用い、対称位置にある2本の鋼棒を同時に緊張する方法を採用した。導入時における鋼棒の緊張力はテンションロード部に設けたロードセルで検出し、その他半数の鋼棒については、その定着端に設けたカラーナット式ロードセルでその緊張力の変動量を検出した。なお、鋼棒緊張力は内側φ-16…15.5ton、外側φ-R…8.35tonである。図一6に縦方向プレストレス導入に依るコンクリート歪分布を示す。

#### (2) 円周方向プレストレスの導入

円周方向プレストレスは、モデル製作用のワイヤーワインディング装置を用いて導入した。写真一2にその作業状況を、図一7に装置概要図を示す。

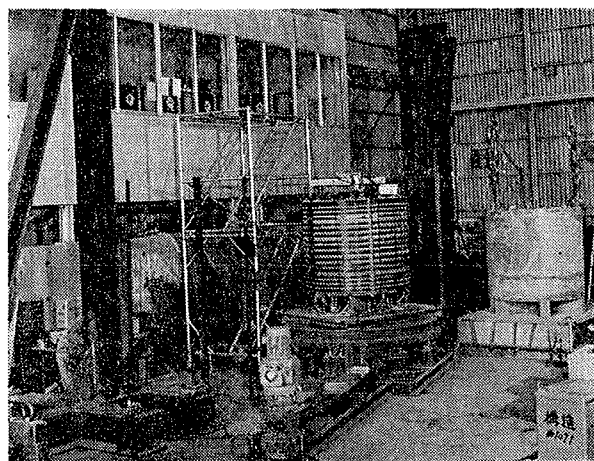
その導入方法は、まず無緊張鋼線を試験体に所要回数巻付けた後、左右のリールを通して、一端を試験体に定着後、重錘で緊張力を与えた状態で、試験体を逆回転させ、緊張鋼線を順次巻付けてゆくものである。この装置の特徴は、緊張力を与えるために重錘を使用

していること、および巻付いてゆく鋼線の緊張部分の距離が長いことにより緊張力の変動が極めて安定した、プレストレスが得られることにある。

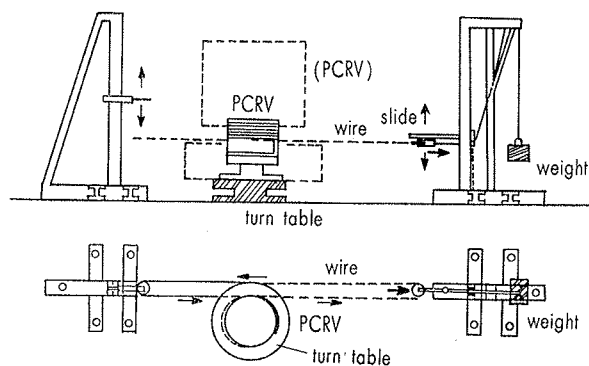
モデルの側壁には鋼製のチャンネルを17段取り付け各々のチャンネルには800kgの張力を与えたφ2.9mm PC鋼線を所要導入量に合わせて27~34回3層に巻き付けた。尚、鋼線は各チャンネル毎にモデルに設けられた固定治具にクサビで定着した。

又、円周方向プレストレス導入時の歪測定は、1チャンネル分の導入作業終了後毎に行った。その結果を図一8に示す。図一9は円周方向プレストレス導入作業完了後のコンクリート歪分布を示したものである。

図一5、図一9に示されるように、測定結果と計算結果との比較から、このモデルはほぼ所定のプレストレスが導入されたと思われる。尚、プレストレス導入作業中においてはコンクリートひび割れは認められなかった。



写真二 ワインディング作業状況



図一七 ワイヤーワインディング装置概要図

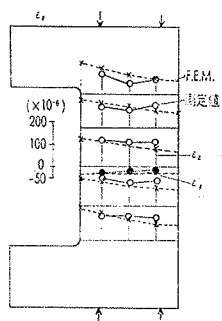


図-6 縦方向プレストレス導入時ひずみ分布

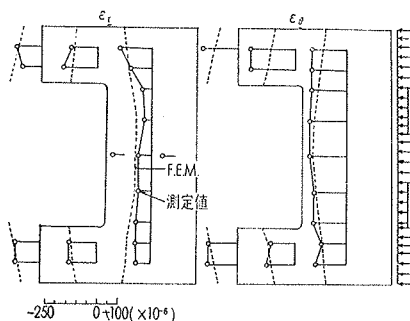


図-9 円周方向プレストレス導入時ひずみ分布

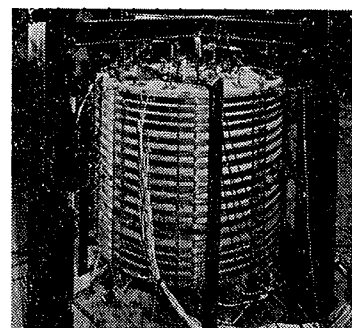


写真-3 内圧実験状況

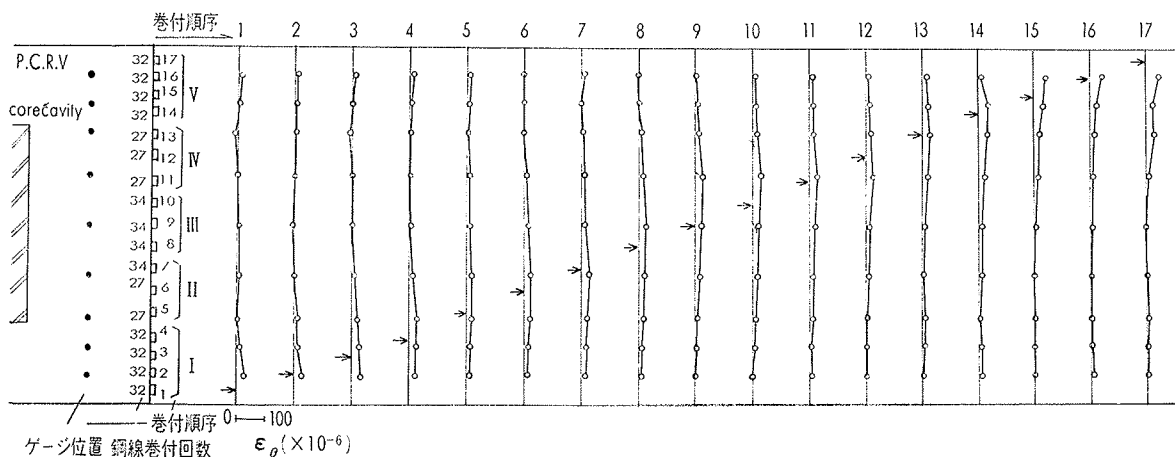


図-8 各チャンネル導入時の  $\epsilon_{\theta}$  分布 (側壁中心部)

#### 4. 内圧実験

##### (1) 実験方法

容量 $300 \text{ kg/cm}^2$ 、吐出量 $10 \text{ l/min}$ の電動水圧ポンプを用いて加圧した。加圧サイクルは $50 \text{ kg/cm}^2$ で5回、 $75, 100, 150 \text{ kg/cm}^2$ で各1回行い、その次の回で破壊させた。尚、標準加圧ステップを $5 \text{ kg/cm}^2$ とした。

モデルの変形、歪等の測定点数は全体で350点で、その内、30点は変形、残り320点はコンクリート、緊張材、鉄筋等の歪を測定したものである。変形測定には、特にカンチレバー型歪ゲージ式の変換器(分解能 $1/500 \text{ mm}$ )を製作し、それを用いた。

##### (2) 実験結果

i) 変形：図-10, 11にトップスラブ中央点、及び側壁中腹位置の内圧-変位曲線を示す。図に見られるように、トップスラブ中央点の変位曲線では内圧 $80 \text{ kg/cm}^2$ 程度から変位が増大し始めていることが認められるが、側壁中腹のそれからは、内圧 $150 \text{ kg/cm}^2$ 程度まで認められない。又、設計内圧 $50 \text{ kg/cm}^2$ の範囲内の繰り返し载荷に対し、モデルの剛性低下は認められず、それ以後の大きな内圧に対する非弾性域にお

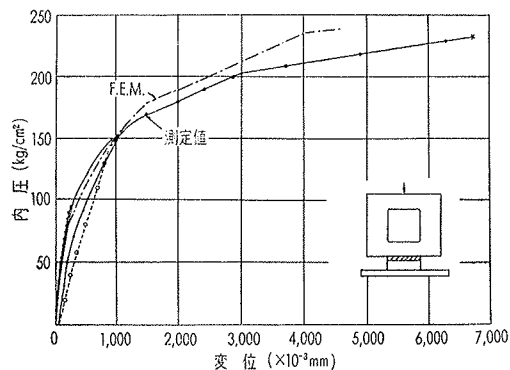


図-10 トップスラブ中央点の内圧-変位曲線

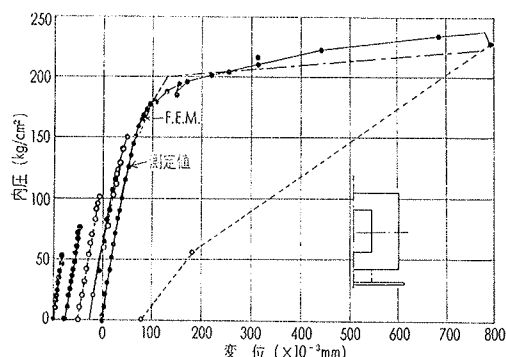


図-11 側壁中腹位置の内圧-変位曲線

る挙動でも充分な復元性を持っていることが認められる。尚、解析結果を図中に併記しているが、両者は良く一致した。

図12. は各内圧時のモデル表面の変位分布を示したものである。トップスラブの変形に比べ側壁部の変形は小さく、又内圧 150 kg/cm<sup>2</sup> 程度まではその分布性も直線的である。それ以後は、上下端のせり出しと中腹部のふくらみが認められるようになる。

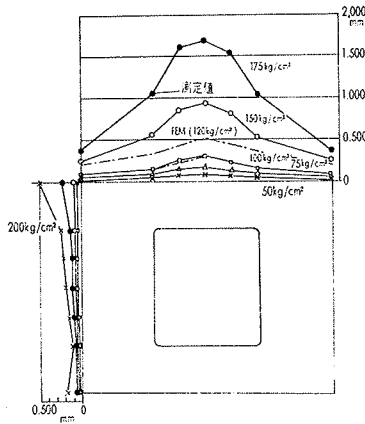


図-12 モデル表面変位分布の推移

ii) コンクリートひずみ：図13. ~14. に内圧50及び120 kg/cm<sup>2</sup> 時におけるコンクリートひずみ分布を示す。図に見られるように、側壁部では内圧 120 kg/cm<sup>2</sup> 時でも実験値と解析値は良く一致しているが、上下スラブ部では、差が認められる。

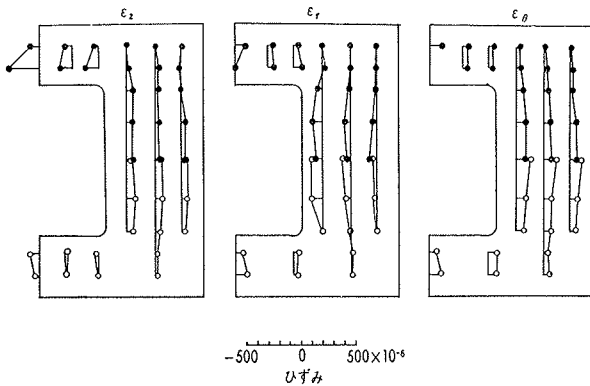


図-13 内圧50 kg/cm<sup>2</sup>におけるコンクリートひずみ分布

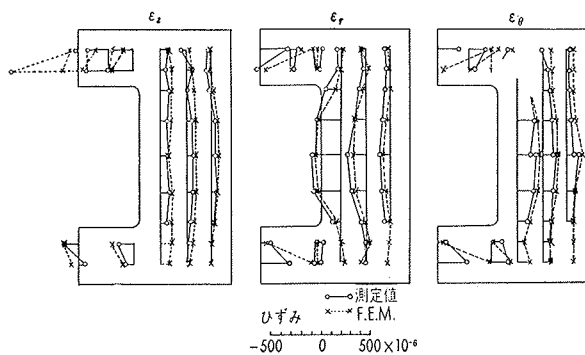


図-14 内圧120 kg/cm<sup>2</sup>におけるコンクリートひずみ分布

図15. に上下隅角部内側、および側壁中腹内側のコンクリートの荷重—ひずみ曲線を示す。隅角部では内圧80 kg/cm<sup>2</sup> 程度からひずみの増加率が大きくなり、又定量的な面からもひび割れが発生したと考えられる。

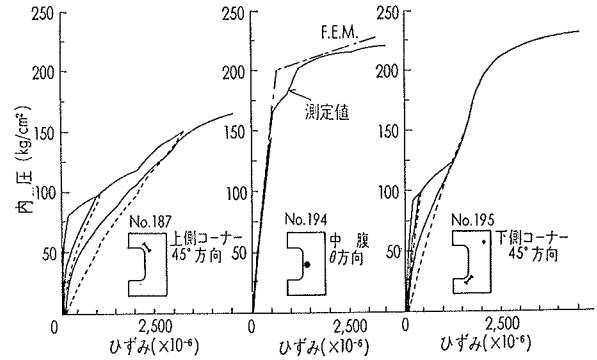


図-15 内側コンクリートの荷重—ひずみ曲線

iii) 緊張材の挙動 図-16は、側壁上端と中腹のワインディング鋼線のひずみ増分および縦鋼棒の反力と内圧の関係を示したものである。内側鋼棒は終局時には塑性域に入っている。図-17にはワインディング鋼線のひずみ増分の分布を示す。これら緊張材の挙動はモデルの変形性状と良く対応している。

iv) 鉄筋の挙動：図18. はモデル各位置におけるフープ筋の内圧—ひずみ関係を示したものである。鉄筋のひずみの挙動には、コンクリートひび割れ、付着応力等局所的な要因が関係する。このため、解析上の巨

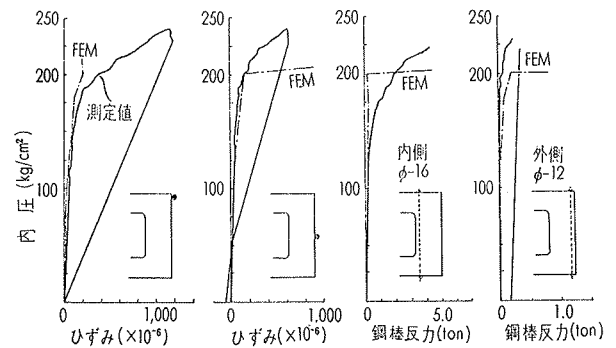


図-16 ワインディング鋼線の荷重—ひずみ曲線と縦鋼棒の荷重—反力関係

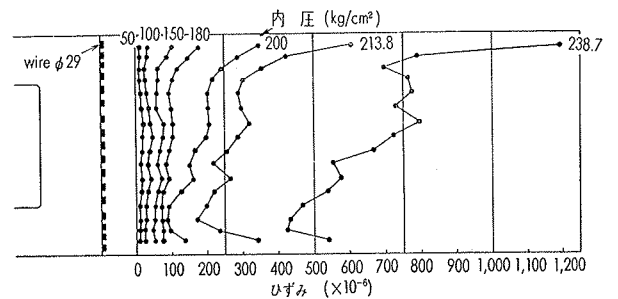


図-17 鋼線のひずみ増加量分布の推移

視的な仮定条件そのものは、実際の条件と対応しない面を多分持っているが、図に見られるように、定性的には実験値とは比較的良好な一致を示している。

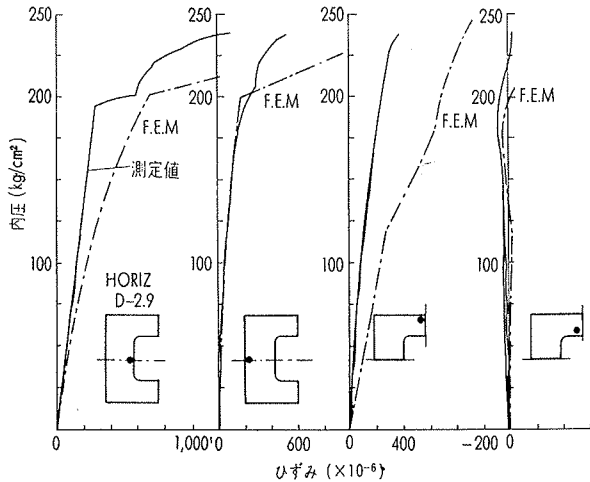


図-18 補強筋の内圧-ひずみ関係

v) **ライナーの挙動**：図19. にライナー外表面の内圧-ひずみ関係を示す。ライナーはそれに密着したコンクリートとの相互作用に依り複雑な挙動をしている。尚、定性的に判断した場合、低荷重域においては薄膜的な挙動を示すが、圧力増大と共に壁体全体の曲げ変形に依る影響が現れてくるものと考えられる。特にトップスラブ中央位置では、その傾向が見られる。

vi) **コンクリートひび割れ状況**：図-20にコンクリートひび割れパターンを示す。又表-6にはモデルの内圧に対する主な挙動を掲げる。コンクリートのひび割れは、ゲージの応答、肉眼観察等により判断した。

ひび割れ発生状況を解析結果と比較すると、トップスラブの放射状ひびわれ発生内圧とその進展状況、隅

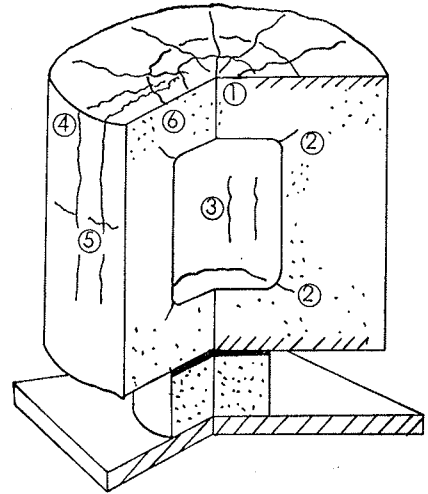


図-20 ひびわれのパターン

内圧 (kg/cm²)	P C R V の 挙 動
0 ~ 60	弾性挙動を示し、ひびわれの発生は認められない。
75 ~ 80	トップスラブ表面中央部にひびわれ発生。①
80 ~ 90	内壁上下隅角部にひびわれ発生。② トップスラブの変形増える。
150	トップスラブの放射状曲げひびわれ、キャビティ上部のほぼ全面に進展。
150 ~	側壁中腹内側縦ひびわれ発生③。側壁の変形増え始める。
190	側壁縦ひびわれ、外側表面に出る。④
200 ~	側壁中腹表面の一部に水平ひびわれ発生⑤。 トップスラブの内側鋼棒付近に、円周状のせん断ひびわれ発生⑥。
238	水がトップスラブひびわれから流出を始める。

表-6 PCR V の内圧に対する挙動

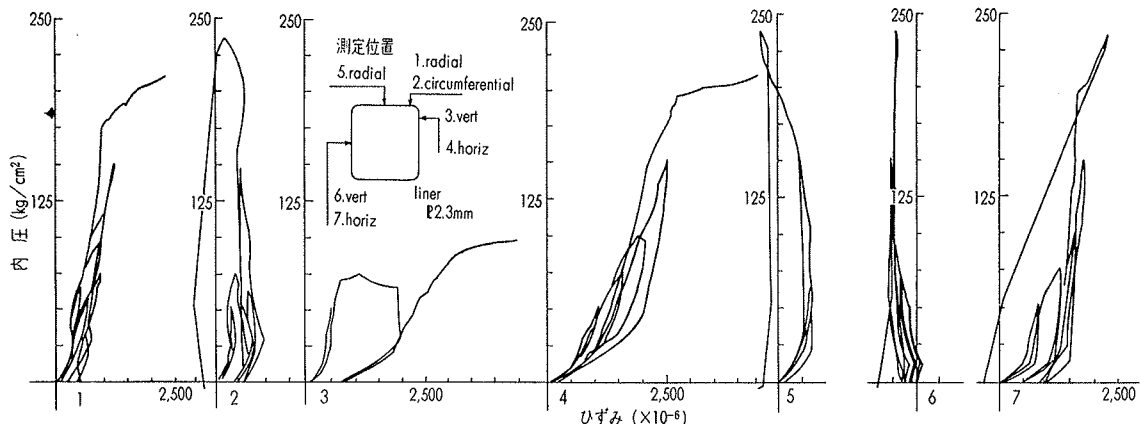


図-19 内圧によるライナープレート各点のひずみ履歴

角部内側の斜めひび割れ，側壁中腹，内側の縦ひび割れ等多少の相違は認められるが，ほぼ良好な対応を示している。

内圧が  $190 \text{ kg/cm}^2$  以上になると，側壁外表面に縦ひび割れが発生し， $200 \text{ kg/cm}^2$  以上では，側壁中腹外表面に水平ひび割れ，トップスラブ表面に円周状のひび割れが発生し始める。しかし内圧がこの程度になるとコンクリートのひび割れ領域がかなり広範囲にひろがり，定量的には解析結果との対応がつき難くなっている。

最終的なトップスラブコンクリートのひび割れ状況を写真4. に示す。それに見られるように，放射状ひび割れがスラブ全域に進展し，側壁部縦ひび割れに結びついている。ボトムスラブ底面もほぼ同様の状況が認められた。更に，トップスラブには，内側のPC鋼棒位置とそれより中央寄りの位置に円周状ひび割れが現れている。前者は浮上りの傾向を持ち，せん断ひび割れ的なものであると考えられる。後者は曲げに起因するものである。

## 5. まとめ

以上に述べた内圧実験結果から次の事項が言える。

(1)コンクリートひび割れ発生から破壊に至るまでのPCRVRモデルの内圧に対する非弾性挙動をほぼ正確に把握することが出来た。又，緊張材，鉄筋等の挙動についても，把握できたものと思う。

(2)破壊に至るまでの様相は漸進的で，且つ十分な耐力と靱性を持つことが確認された。

(3)軸対称回転体構造物に開発した有限要素法に依る非弾性挙動解析結果は実験結果と良好な一致を示し，解析的に弾塑性挙動を把握できることが認められた。

尚，この実験におけるPCRVRモデル非弾性挙動に

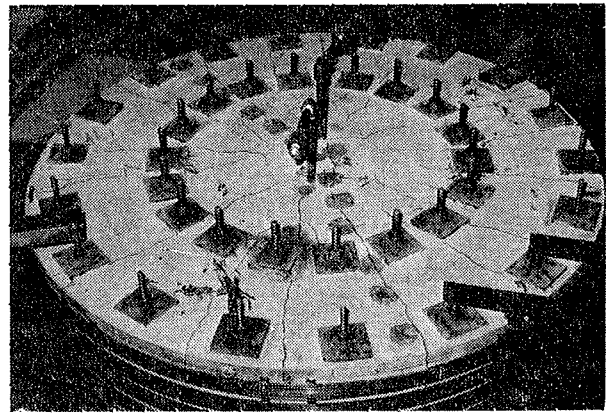


写真4 トップスラブの最終ひびわれ状況

関する解析法については，本所報の“有限要素法によるRC部材の弾・塑性解析（その2. 軸対称回転体）”で述べている。

次回には，1/20マルチキャビティ型PCRVR内圧実験の結果を報告する予定である。

## 参考文献

- 1) S.L. Paul, “Structural Behavior of Prestressed Concrete Reactor Vessels” July, 1971.ASCE
- 2) F.S. Ople, Jr., H.L. Gotschall, “Fort St. Vrain Unit 1-PCRVR Pressure Test Report for the Public Service Company of Colorado” Gulf-GA-A 10839
- 3) S.L. Paul, M. A. Sozen, etc., “Strength and Behavior of Prestressed Concrete Vessels for Nuclear Reactors, Vol. 1~2” July, 1969. Univ. of Illinois
- 4) B.I. Karlsson, “Shear Strength of End Slabs With and Without Penetrations in Prestressed Concrete Reactor Vessels” 1971, Univ. of Illinois