

V-138 PCRVに関する開発研究(その2)
-コンクリート模型による諸実験-

東京電力 工藤豊典 鹿島建設 正員 野尻陽一
鹿島建設 山崎敏敏 鹿島建設 正員 内藤豊章
鹿島建設 正員○石谷尹利 鹿島建設 正員 峯尾隆二

I. まえがき

プレストレストコンクリート原子炉圧力容器(PCRV)に関する研究として、(その1)で、圧力容器の弾性時の挙動を知るための三次元光弾性実験、プラスチック模型実験およびこれらに対する応力解析について報告した。ここではコンクリート模型による実験結果について述べる。この実験では曲面体要素を用いた三次元有限要素法による応力解析の妥当性を確認するとともに、内圧を受けた時のひびわれ発生挙動、破壊時の挙動、温度荷重時の挙動を把握することを主な目的とした。模型は330MWe級PCRVの約1/20の縮尺で、内圧実験用2体、温度応力実験用1体の合計3体である。

II. 模型の概要

模型は図-1に示すように6個所にPC鋼棒定着リブをもつ六角柱で、内部に円筒空洞、上下にスラブをもつ厚肉容器である。この形状および寸法を基本として、模型3体の上部および下部スラブを各実験の便宜上、表-1のようにした。同表に各模型の名称を示す。

表-1 実験模型

模型名称	実験目的	上部スラブ	下部スラブ
M 4	内 圧 実 験	貫通孔無	コンクリート下部スラブと等価
M 5		貫通孔有	な剛性の鋼板(板厚100mm)
TM 1	温度応力実験	貫通孔無	上部スラブと同じ

表-2に模型の設計概要を示す。

表-2 模型の設計概要

設計内圧	3.5 kg/cm ²
ひびわれ安全率	1.5 以上
コンクリート骨材最大寸法	15 mm
コンクリート設計基準強度	450 kg/cm ²
P C 鋼 棒	丸棒B種1号SBPR 95/110φ32
貫 通 孔(M5)	30個、開口率 9.4%
貫 通 孔 ライナ- (M5)	圧力配管用炭素鋼鋼管2種STPG 38 外径 42.7 mm 肉厚 3.6 mm
ライナ- (M4, M5)	ガラスクロス補強ポリウレタン

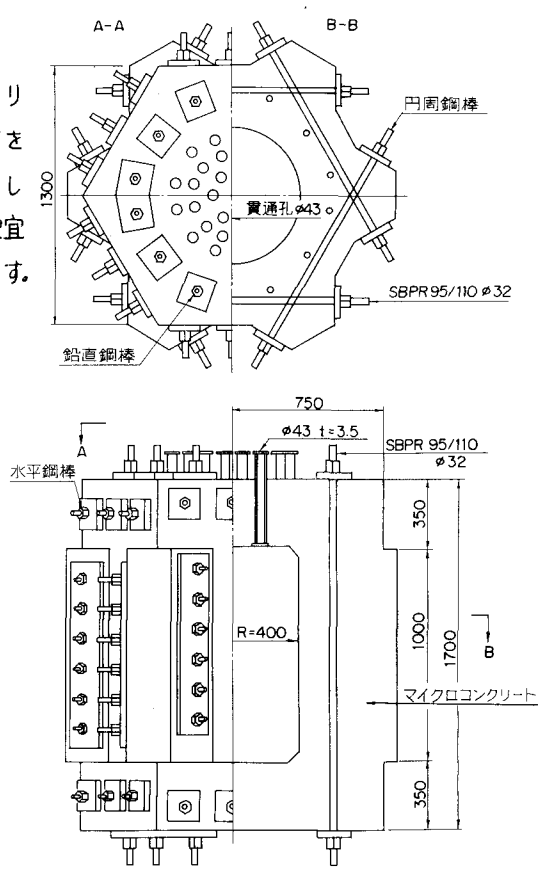


図-1 コンクリート模型の基本形状および寸法

プレストレス導入量は、設計内圧においてコンクリートに引張応力が生じないように、また設計内圧の1.5倍で模型各点の引張応力度がコンクリートの引張強度以下になるように応力解析を行なって決定した。表-3にプレストレス導入量を示す。

表-3 プレストレス導入量

プレストレス名	鋼棒本数 (本)	鋼棒1本当り の導入量(ton)
鉛直プレストレス	12	56
水平プレストレス	9(M4,M5) 18(TM1)	56
円周プレストレス	36	50

Ⅲ. 理論解析

解析モデルは図-2に示すように模型の形状および外力の対称性を考慮して、全体の1/24部分を取り出し、同図に示すような曲面体要素を用いてモデル化を行なった。要素数は186、節点数は1,100である。模型に加わる外力や構造上の条件はできるだけ正確に再現するように与えた。材料特性は実験に使用したコンクリート試験結果より、ヤング率 $E = 2.8 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.225$ を用いた。

Ⅳ. 実験方法

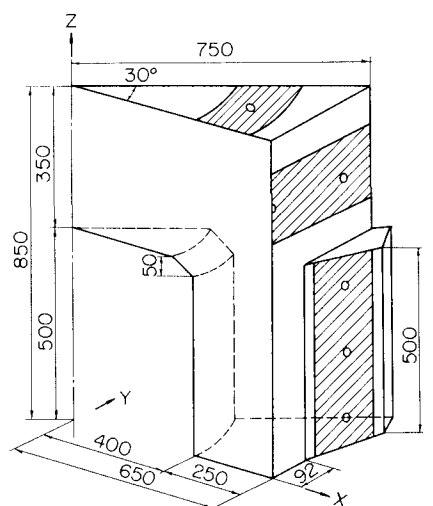
プレストレス導入には6連のセンターホール型油圧ジャッキを使用し、所定の順序および導入量に従い、模型に軸対称にプレストレスを導入した。

内圧実験は油圧ポンプを用い、つぎのような順序で実験を実施した。 a.弾性範囲内での模型の挙動と解析値との比較 b.初ひびわれ発生時の内圧の大きさおよびひびわれ安全率の確認 c.破壊内圧と破壊モードの把握

温度応力実験は模型を温度調節した室内に置き、模型の内部円筒空洞に温水を循環させ、模型の内外に温度差を与えることにより模型の挙動を知ることとした。温水は15℃から3℃/時間の割合で加

表-4 計測の概要

計 測 項 目		計 測 器	計 測 点 数		
			M 4	M 5	TM 1
コンクリート表面 ひずみ分布	外表面	ワイヤストレンゲージ	74	76	14
	内表面		45	52	8
コンクリート内部 ひずみ分布		埋め込み型ワイヤストレンゲージ	74	64	16
		BS型ひずみ計			39
		カーボン型ひずみ計			26
		振動線型ひずみ計			20
コンクリート表面 ひびわれ検知	外表面	ワイヤストレンゲージ	38	46	
		光弾性皮膜		1	
	内表面	ワイヤストレンゲージ	39	44	
PC鋼棒緊張力		ワイヤストレンゲージ	114	57	66
変位		ロードセル	18	20	20
圧力		電気出力式変位計	23	23	33
温度		圧力変換器	2	2	
		熱電対			238
		カーボン型ひずみ計			(26)
合 計			427	384	480



ハッチ部はプレストレス導入位置

曲面体要素

図-2 解析モデル

温し、最高温度を62℃とした。

計測項目、使用計器、計測点数を表-4に示す。これらの実験では計測項目および計測点数が多いため、図-3に示すようなシステムにより自動計測およびデータ処理を行なった。

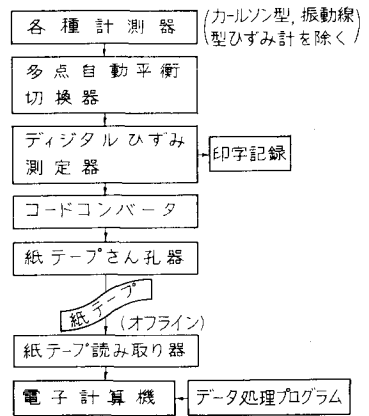


図-3 自動計測およびデータ処理システム

V. 実験結果

1. アレストレス導入結果と解析値との比較

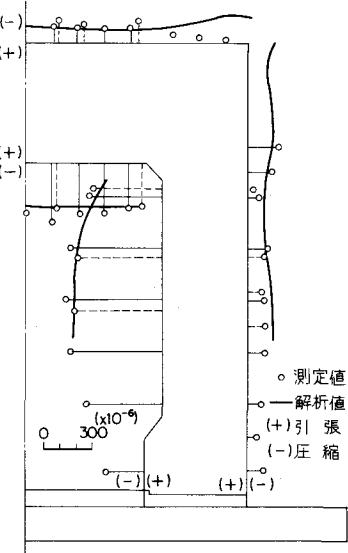
図-4に全プレストレス導入直後のひずみ測定値と解析値との比較の一例を示す。全般的に測定値と解析値は良く一致している。

2. 内圧実験結果(弾性範囲)と解析値との比較

設計内圧35 kg/cm^2 までは十分に弾性挙動を示した。この内圧での測定値と解析値との比較の一例を図-5に示す。ひずみ分布および変位分布ともに測定値と解析値は良く一致しており、M4およびM5模型は同様の測定値を示した。

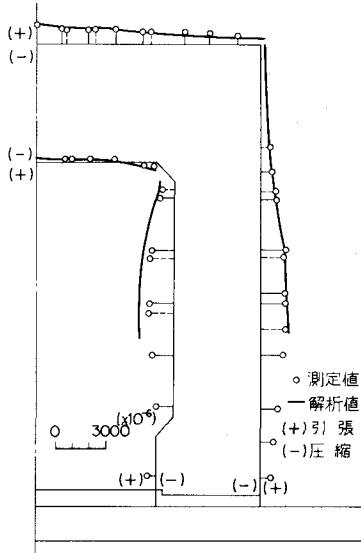
3. 過圧時の状況

模型各部に取り付けたひびわれ検知ゲージによる測定結果をまとめると表-5のようになる。表中の推定値は応力解析結果に基づき、コンクリートの曲げ引張強度を50 kg/cm^2 、純引張強度を35 kg/cm^2 として検討したものである。実験結果から破壊の順序はつぎのように考えられる。a.スラブと円筒壁との接合部にひびわれが生じ、スラブ周辺の拘束が小さくなる。b.ほぼ同時に円筒壁がビヤ樽状に膨脹し、鉛直方向にひびわれが発生する。c.スラブの曲げ変形が進む。d.スラブと円筒壁との接合部の

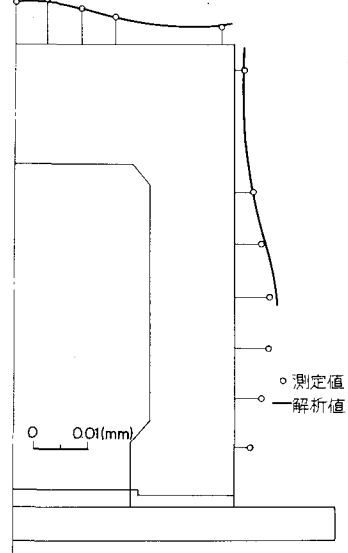


ひずみ分布
(M 4, 円周方向)

図-4 プレストレス導入結果



ひずみ分布
(M 4, 円周方向)



変位分布
(M 5)

図-5 設計内圧(35 kg/cm^2)における結果

表-5 ひびわれ発生位置と内圧

発生位置	発生方向	内 圧 (kg/cm ²)		
		推定値	実 験	結 果
			M 4	M 5
円筒壁外表面	鉛 直	53	60~70	60~70
ハンチ部	円 周	55	65	60
リブ内表面	鉛 直	80		70~75
スラブ外表面	半 径	90	70	75~80
スラブ側面	水 平		75	80
円筒壁内表面	鉛 直	145		75~80

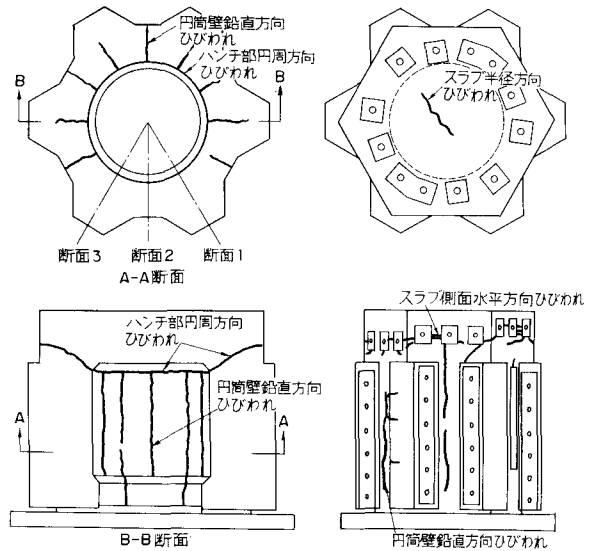


図-6 ひびわれ状況 (M4)

ひびわれが進展し、模型外部へ貫通する。図-6に実験後のひびわれ状況を示す。M4模型およびM5模型ともに同様のひびわれ状況であった。なお実験は貫通したひびわれからの油の噴出でポンプの給油能力に達し終了した。最大内圧はM4模型で95 kg/cm²、M5模型で83 kg/cm²であった。

4. 温度応力実験結果

温度応力実験結果の検討および解析は現在進行中であり、ここでは温度分布について、その結果の一例を図-7に示す。実験開始から約67時間で温度分布は定常状態になり、模型内外の温度差はリブのある部分で34.1℃、リブのない部分で27.9℃であった。

VI. むすび

これらの実験結果の範囲内で得られた事項をまとめるとつぎのようになる。

a. プレストレスおよび設計内圧に対しては、模型は十分に弾性挙動を示し、ひずみおよび変位の大きさや分布については曲面要素を用いた三次元有限要素法による応力解析結果と良く一致し、この解析法が設計に対して有効な手段であることが確認できた。

b. 設計内圧時および過圧時を通じて、M4模型とM5模型はほぼ同様の挙動を示し、貫通孔による影響は殆んど見受けられなかった。

c. 過圧を受けた時のひびわれ発生状況および破壊モードが把握でき、また破壊が漸進的であるということが確認できた。

d. PCR Vの模型実験をする上での種々の実験技術を修得できた。

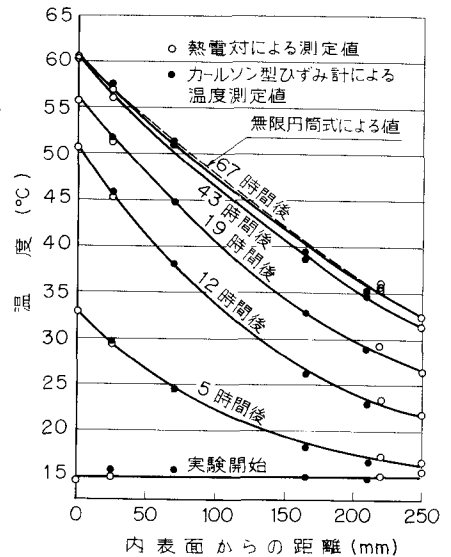


図-7 温度分布 (円筒壁、リブなし部分)