

プレストレストコンクリート圧力容器の破壊実験(その1)

磯 畑 脩
秋 山 宏
(計算センター)
高 橋 和 男
大 築 志 夫

§ 1. まえがき

AGR(改良ガス冷却型黒鉛炉)に用いられるプレストレストコンクリート圧力容器(略してPCPV)を想定した一連のモデル破壊実験のうち、昭和45年7月に社外への紹介を兼ねて実施した実験に関する報告である。

本実験はすでに行なった1/40スケールのモデルの破壊実験¹⁾²⁾に追従して、モデルの破壊過程およびその性状をより広範囲に調べるために行なったものである。

前回までの2つの実験では、破壊は主にモデルの側壁に当る円筒部に生じたわけであるが、これは上部スラブの耐力に大いに関係していた。

今回の実験では上部スラブの挙動に重点を置いて、上部スラブの補強を大幅に減らすことを試みた。

モデルのスケール、プレストレッシング、その他の補強および加圧方法は前回までの実験と同じである。

一方、実験解析に当っては、軸対称厚肉容器に関する有限要素法³⁾を用いて弾性解析を行ない、補強筋やライナーは線要素および面要素として上記解析に繰込んでそれらの影響も調べた。

§ 2. 試験体の形状寸法

想定するPCPVは内径9.5M、外径14.5M、高さ約33Mの厚肉円筒で上下スラブはそれぞれ約5.5M、7.8Mの厚さを有している。

プレストレスは円筒部に配置されたPCケーブルによって導入される。

上部スラブには総数約400個の貫通孔が対称に配置されており、側壁にも大小約100個の貫通孔がある。

今回の1/40スケールモデルでは試験体の形状を単純化するとともに、次のような工夫を施している。

- プレストレッシングは円筒部を上下に貫通する円周上16本のPC鋼棒と円筒面に沿って55段にスパイラル状

に配置したPC鋼線によって行なう。

- 圧力容器の貫通孔は側壁については無視し、上部スラブについては21個の貫通孔で近似する。
- コンクリートとして石こうコンクリートを使用する。試験体の形状寸法は図-1、図-2に表わしてある。

§ 3. 試験体の製作

試験体は加圧およびコンクリート打設時の内枠を兼ねたライナーと、石こうコンクリートおよびPS材の3つの部分からできている。

試験体の製作に関しては各種の予備段階¹⁾²⁾を経た結果、次の方法によって製作した。

3.1 ライナーの製作

木製円板と#20亜鉛引鉄板を用いて円筒状内枠を作り、これを厚さ約5mmのウレタンゴムシートで被覆する。

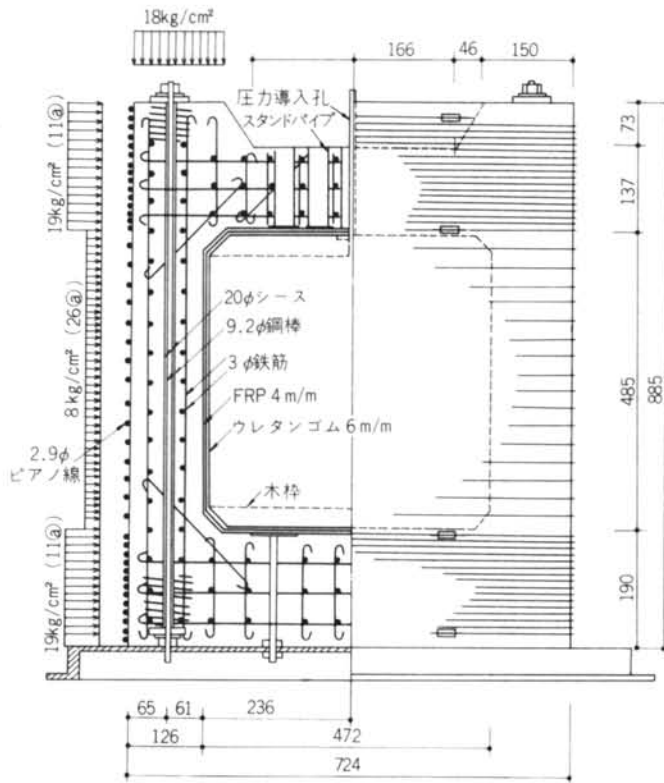
この際、水压導入孔と容器内の空気排出孔(圧力計の取付けを兼ねる)を設ける。

こうしてできた気密容器をFRP(ポリエステル樹脂をガラス繊維で強化したもの)で保護する。

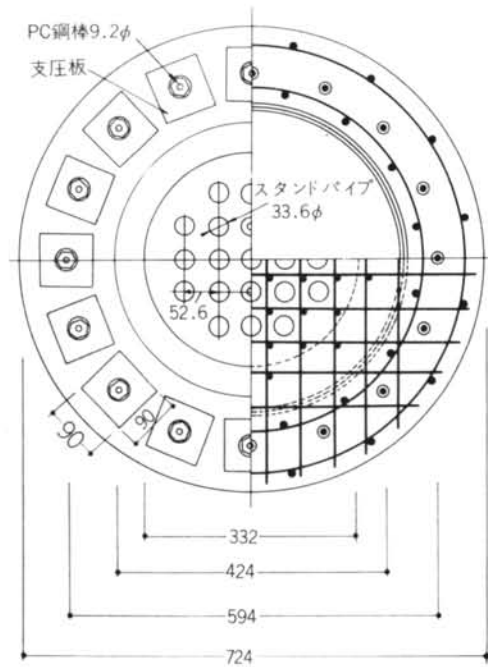
製作状況を写真-1に示す。



写真-1 ライナー製作



図一1 試験体立面



図一2 試験体平面

ライナーは、コンクリート打設時には底板上所定の位置に支持しておく。

3.2 石こうコンクリート (Gypsum Concrete)

試験体製作に使用した石こうコンクリートの調合を表一に示す。

材 料	調 合 比
石こう：吉野石こう1級	1.00
細骨材：セイライト（粒径0.6~1.2mm）	0.80
粗骨材：セイライト（粒径1.2~5.0mm）	0.80
水	0.65
リン酸2ソーダ	0.012

表一 石こうコンクリートの調合

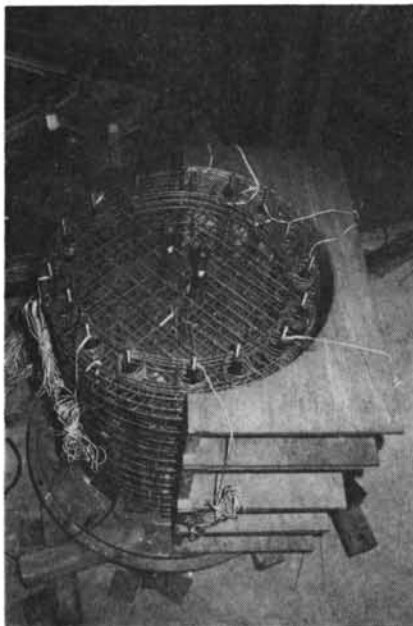
石こうコンクリートは石こうに対するリン酸2ソーダの量を増減させることにより、その硬化時期を調整することができる。

今回の打設では硬化開始を打設後40分程度になるよう決め、打設量を16回に分けて試験体を一体打ちした。

なお、PC鋼線のアンカー金具は外型枠に先付けしておく。

補強筋およびPC鋼線の建込み状況を写真一に示す石こうコンクリートの試験結果を表二に示す。

表中、ヤング係数は $\frac{1}{3}$ のセカントモジュラスであり、使用したテストピースの大きさは150φ×300である。割裂強度と圧縮強度の比は8.5である。



写真一 配筋の建込み状況

テストピース	材 令 (日)	比 重	圧縮強度 (kg/cm ²)	割裂強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (kg/cm ²)
1	1	1.62	61.7	7.4	62,900
2	1		64.0		
3	1		60.0		
4	7	1.55	63.8	7.9	72,000
5	7	1.52	66.2		
6	7	1.52	62.8		
7	7	1.52	7.4	60,600	
8	7	1.52			
9	7	1.55			
平均			63.1	7.6	63,700

表二 石こうコンクリートの特性

3.3 PS材とプレストレス導入

試験体へのプレストレス導入は、縦方向は9.2φ PC鋼棒を用い、円周方向は2.9φ PC鋼線を用いる。

PS材の特性を表三に示す。

	径 (mm)	断 面 (mm ²)	破断強度 (kg/mm ²)	0.2% ひずみ (kg/mm ²)	弾性係数 (kg/mm ²)	破断時伸び (%)
PC鋼線	2.90	6.61	213	204	19,900	5.5
PC鋼棒	9.13	65.5	149	125	19,800	10.7

神鋼鋼線(株)製

表三 PS材の特性

プレストレス導入量は図一に示す圧力分布にPS材の分担面積を考慮して決める。2つのPS材についての導入量はそれぞれの応力-ひずみ曲線に示してある。

PC鋼棒のプレストレスはトルクレンチを用いて行ない、導入量はPC鋼棒のひずみか、トルク係数をチェックして確認した。

PC鋼線のプレストレスは図三に表わすようなPC導入装置を用いて行なった。

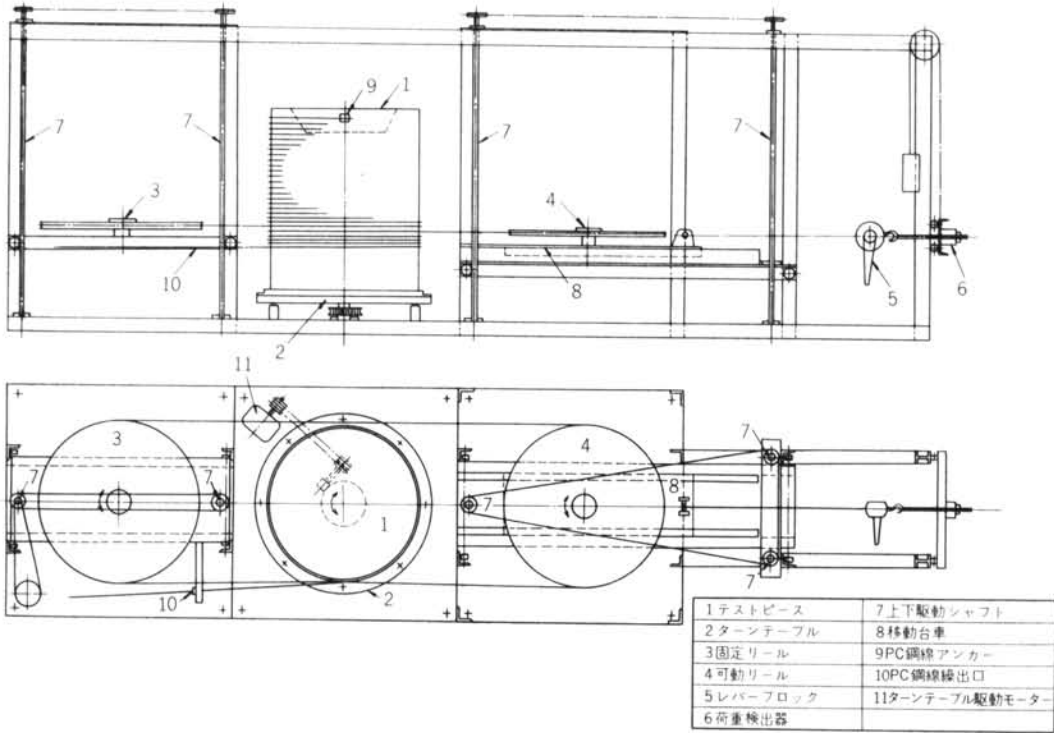
この装置の作動原理は次のとおりである。

PC鋼線線出口から引込んだPC鋼線を試験体に数回巻付け、可動リール、固定リールの順に廻して先端を試験体にアンカーする。

可動リールの取り付けられた移動台車を2Pの力で外側に引張ると、2個のリール間にある各々のPC鋼線には引張力Pが働き、かつ全体系は釣合う。

この時、可動リールと試験体を繋ぐPC鋼線の試験体側の反力は試験に数回巻付けたPC鋼線とコンクリート面の摩擦力でとる。

この状態で試験体を定着したターンテーブルを駆動すると、回転の向きに応じてPC鋼線の巻付け、巻戻しを



図—3 PS導入装置

PS力を働かせたまま行なうことができる。
プレストレスの状況を写真—3に示す。



写真—3 プレストレス

今回の実験では石こうコンクリート打設後25時間でプレストレスを導入し、約50時間後に内圧を加えた。

この間のプレストレス損失については、別途クリープ実験の結果を用いて補正した。

PC鋼線は再緊張が不可能であるため緊張力を約12%増としてある。

またPC鋼線のコンクリートへのめり込みを防ぐため0.5mm厚の鉄板を用いている。

§ 4. 実験方法および測定方法

4.1 実験方法

以上述べた方法で製作した試験体に内圧を加えて破壊させ、圧力と変形またはひずみの関係および破壊性状を調べる。

加圧は上部スラブに設けた圧力導入孔から手動の水圧ポンプを用いて清水を送り込む方法で実施した。

圧力段階はまず設計相当内圧 8.4 kg/cm^2 まで 1 kg/cm^2 ずつ増加させ、上記内圧後は零まで減圧する。

次の段階では 2 kg/cm^2 ずつ試験体が破壊して圧力上昇ができなくなるまで加えた。

変形の小さい間は圧力を一定に保持したが、変形の進行が著しくなった 30kg/cm^2 以後は定圧保持をやめた。

4.2 測定方法

圧力の検出は上部スラブに設けた空気排出孔に抵抗線型圧力変換器を取付けて行なった。

試験体の変形は $1/1000\text{mm}$ 感度のダイヤルゲージと抵抗線型ひずみゲージを利用した変換器（感度約 $1.4 \times 10^{-3} \text{cm}/10^{-6}\text{strain}$ ）を用いて測定した。

試験体各部のひずみは、石こうコンクリートについてはモールドゲージ（ゲージ長 30mm ），補強筋についてはワイヤストレインゲージ（ゲージ長 10mm ）を用いて測定した。またPS材のひずみもワイヤストレインゲージで測定した。

実験における変形の進行過程を知るため、圧力と上部スラブ中央の変位の関係をXYレコーダによって観察した。

§ 5. 実験結果

試験体の変形およびひずみに関する測定結果の一部を図-4～図-8に示す。

破壊実験の経過は大体次のとおりである。

圧力 8kg/cm^2 までは変形およびひずみともにほぼ一様に増加した。

10kg/cm^2 では上部スラブの内側隅角部のひずみが急増

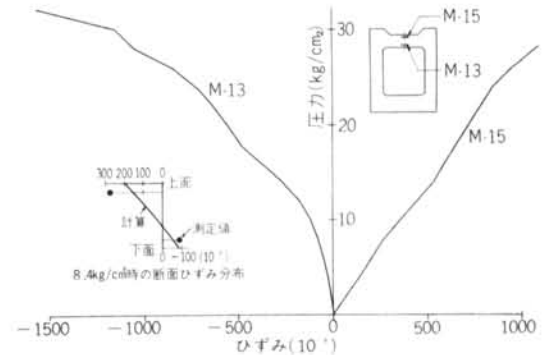


図-5 圧力-ひずみ曲線（上部スラブ中央）

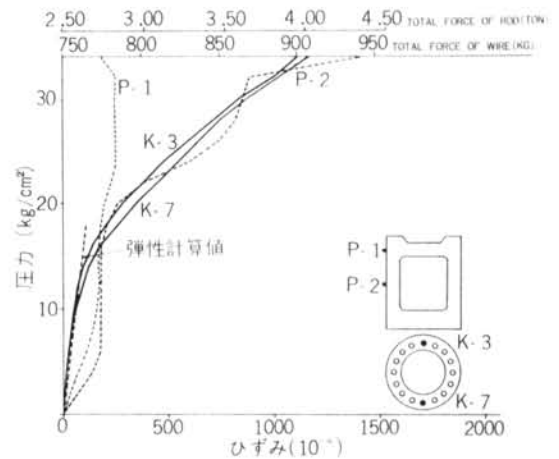


図-6 圧力-ひずみ曲線（PS材）

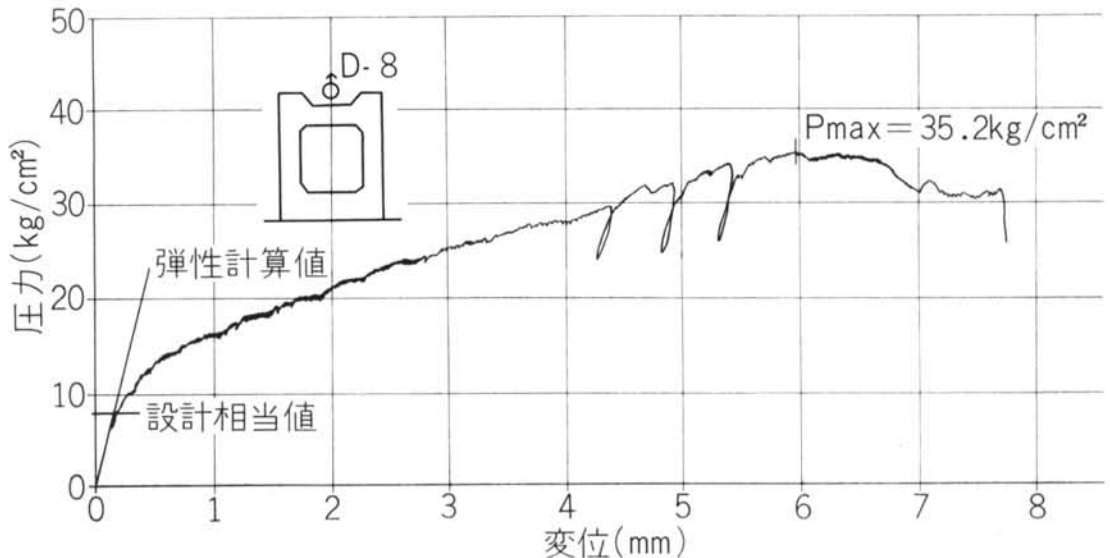


図-4 圧力-変位曲線（上部スラブ中央）

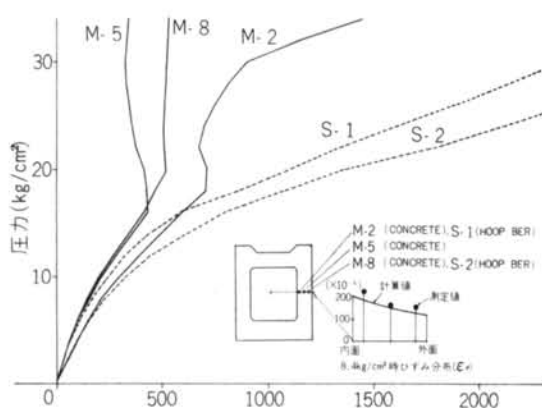


図-7 圧力-ひずみ曲線(側壁 θ 方向)

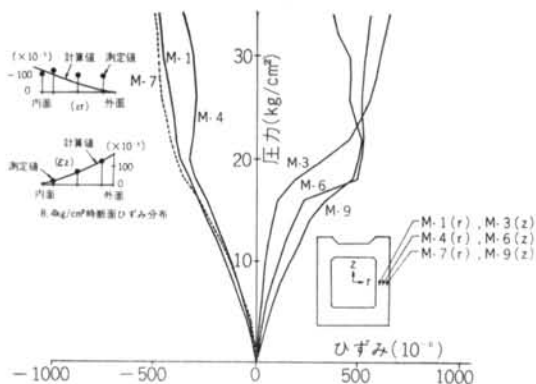


図-8 圧力-ひずみ曲線(側壁 r, z 方向)

しており、内壁からひびわれが進行しているようである。

同時に上部スラブの変形が著るしくなっており、一方側壁は異常ない。

16kg/cm²では側壁におけるコンクリートと補強筋のひずみ差が著しくなり、上部スラブの貫通孔を結ぶ線に曲げひびわれが発生しはじめた。

30kg/cm²までは上部スラブ貫通孔を結ぶように縦横に曲げひびわれが増加し、上方にふくれ出したがこの間の上部スラブの変形は一様であった。

一方、側壁は24kg/cm²から中央円周方向にひびわれが生じ始め、圧力増加と共に縦方向中央付近に、シースに沿ったひびわれがあらわれた。

30kg/cm²以後は上部スラブの変形が著るしくなり、最



写真-5 トップスラブ



写真-4 実験状況

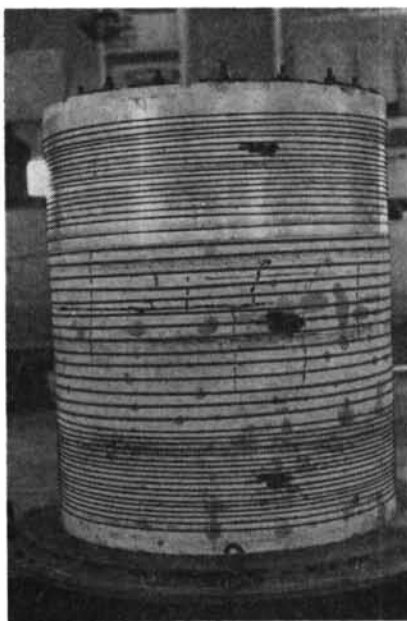


写真-6 側面

大圧力35.2kg/cm²後、やや余力を保ったが、上部スラブ周辺の傾斜面に沿ってスラブが抜け出し実験は終わった。

設計担当圧に対する破壊圧力の比は4.2であった。実験状況を写真-4に示す。

試験体のひびわれ状態を写真-5、6および図-9に示す。

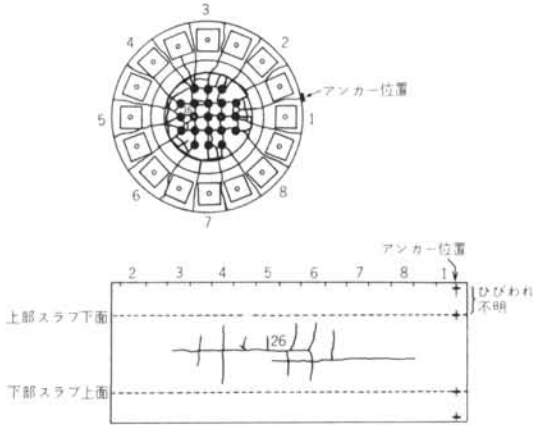


図-9 ひびわれ状況

§ 6. 実験解析

軸対称構造体に対称荷重が作用していることにより、平面ひずみ問題として有限要素法によって弾性解析を行った⁴⁾。

有限要素としては、コンクリートについては軸方向および半径方向に Linear な変形を可能とする角形要素を考える。

すなわち3次元円筒座標(r, θ, z)に関して、 r および z 方向の変位関数 \mathbf{u}, \mathbf{w} を(1)式のようにおく(図-10)。

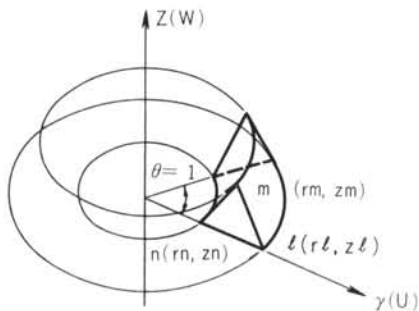


図-10 座標系と要素

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u} &= \phi[\mathbf{AO}]\boldsymbol{\rho}, \\ \mathbf{w} &= \psi[\mathbf{OA}]\boldsymbol{\rho}. \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここに、

$$\phi = [1 \ r \ z], \dots (2)$$

$$\boldsymbol{\rho} = [u_l \ u_m \ u_n \ w_l \ w_m \ w_n]^T, \dots (3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & r_l & z_l \\ 1 & r_m & z_m \\ 1 & r_n & z_n \end{bmatrix} \dots (4)$$

節点力の外力仕事と要素のひずみエネルギーの関係から得られる要素の剛性マトリクス \mathbf{k} は、

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{11} & \mathbf{k}_{12} \\ \mathbf{k}_{21} & \mathbf{k}_{22} \end{bmatrix}^{-1} \dots (5)$$

と置くと、

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{k}_{11} &= \left\{ 2(E_{11} + E_{12})\boldsymbol{\beta}^T\boldsymbol{\beta} + G\boldsymbol{\gamma}^T\boldsymbol{\gamma} \right\} \int dv \\ &\quad + E_{11} \left\{ \boldsymbol{\alpha}^T\boldsymbol{\alpha} \int \frac{dv}{r^2} + (\boldsymbol{\gamma}^T\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\alpha}^T\boldsymbol{\gamma}) \int \frac{z}{r^2} dv \right. \\ &\quad \left. + \boldsymbol{\gamma}^T\boldsymbol{\gamma} \int \frac{z^2}{r^2} dv \right\} + (E_{11} + E_{12}) \left\{ (\boldsymbol{\alpha}^T\boldsymbol{\beta} \right. \\ &\quad \left. + \boldsymbol{\beta}^T\boldsymbol{\alpha}) \int \frac{dv}{r} + (\boldsymbol{\beta}^T\boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{\gamma}^T\boldsymbol{\beta}) \int \frac{z}{r} dv \right\}, \\ \mathbf{k}_{12} &= (2E_{12}\boldsymbol{\beta}^T\boldsymbol{\gamma} + G\boldsymbol{\gamma}^T\boldsymbol{\beta}) \int dv + E_{12}(\boldsymbol{\alpha}^T\boldsymbol{\gamma}) \int \frac{dv}{r} \\ &\quad + \boldsymbol{\gamma}^T\boldsymbol{\gamma} \int \frac{z}{r} dv, \\ \mathbf{k}_{21} &= \mathbf{k}_{12}, \\ \mathbf{k}_{22} &= (E_{11}\boldsymbol{\gamma}^T\boldsymbol{\gamma} + G\boldsymbol{\beta}^T\boldsymbol{\beta}) \int dv. \end{aligned} \right\} (6)$$

ここに、

$$[\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}] = \begin{bmatrix} 1 & r_l & z_l \\ 1 & r_m & z_m \\ 1 & r_n & z_n \end{bmatrix}^{-1}, \dots (7)$$

$$E_{11} = \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} E, \dots (8)$$

$$E_{12} = \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} E,$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$\int dv$ は要素の体積積分を表わす。

rz 面内の線要素の剛性マトリクス \mathbf{k} は次式で表わせる。

$$\mathbf{k} = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_0 & -\mathbf{k}_0 \\ -\mathbf{k}_0 & \mathbf{k}_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k}_0 = \begin{bmatrix} \cos^2\alpha & \cos\alpha\sin\alpha \\ \cos\alpha\sin\alpha & \sin^2\alpha \end{bmatrix} \dots (9)$$

ここに、 α は線要素と r 軸のなす角、 A は単位角当りの線要素の断面積、 l は線要素の実長である、

ただし部材 lm の節点変位ベクトル $\boldsymbol{\rho}$ は、

$$\boldsymbol{\rho} = [u_l \ w_l \ u_m \ w_m]^T \dots (10)$$

円周方向の線要素の部材剛性は、半径方向の剛性に置換する。

線要素の応力 P と円周方向分布外力 p の力の釣合式

$$P = pr \quad \dots\dots(1)$$

から P と半径方向変位 u の関係を求めると、

$$P = \frac{EA}{r^2} u \quad \dots\dots(2)$$

よって位置 r における線要素の半径方向剛性は EA/r^2 である (A は線要素の実断面積)。

θz 面の面要素の剛性は、 θz 面内のせん断力が零であるから r および z 方向の線要素に分解して考慮する。

解析モデルを図-11に示す。

設計相当内圧 8.4 kg/cm^2 の時の解析結果と実験値の比較を、変形およびひずみに関して図-4~9に示した。

FIG.11 IDEALIZED MODEL FOR ANALYSIS

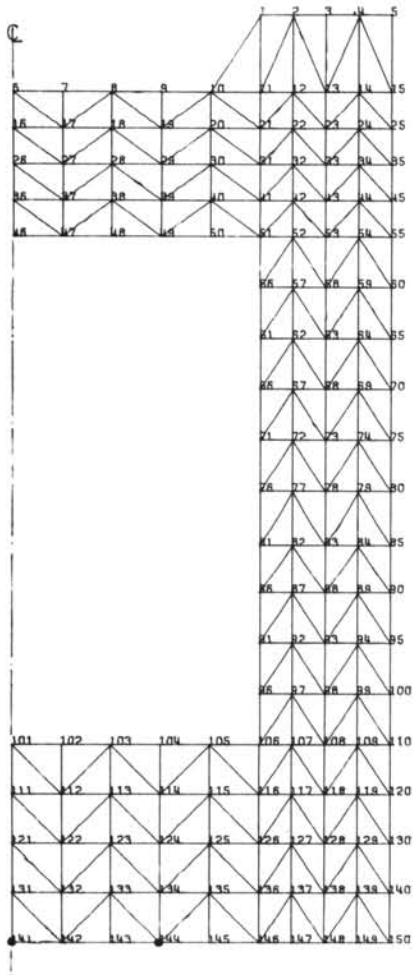


図-11 有限要素分割

モデルの rz 面の变形状態および主応力状態を図-12 図-13に表わす。

また、ひずみに関する数値の比較を表-4に示す。

§ 7. 考 察

前回までの実験と同様破壊は応力集中の大きい上部隅部内側より始まり、そこが徐々にヒンジ化して行く。

今回の実験では、上部スラブの曲げ破壊の進行が著しく、そのため側壁に対する拘束が低下して破壊は上部スラブに集中する一方、側壁の破壊の進行が緩和される結果となった。

上部スラブの破壊の進行過程は補強筋があるため、図

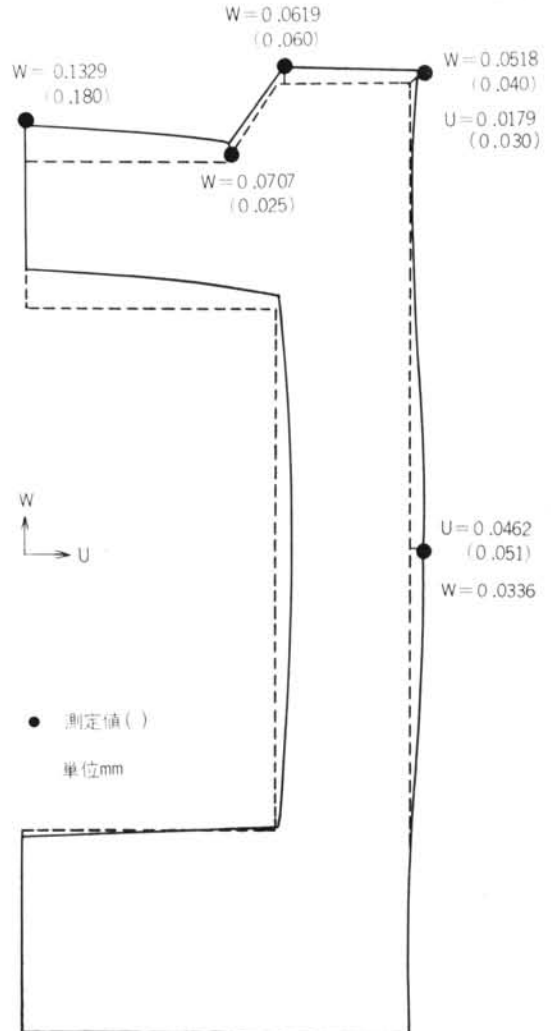


図-12 内圧 (8.4kg/cm²) 時のモデルの変形

—4に見るごとく漸進的であり、今回の実験の大きな特徴である。

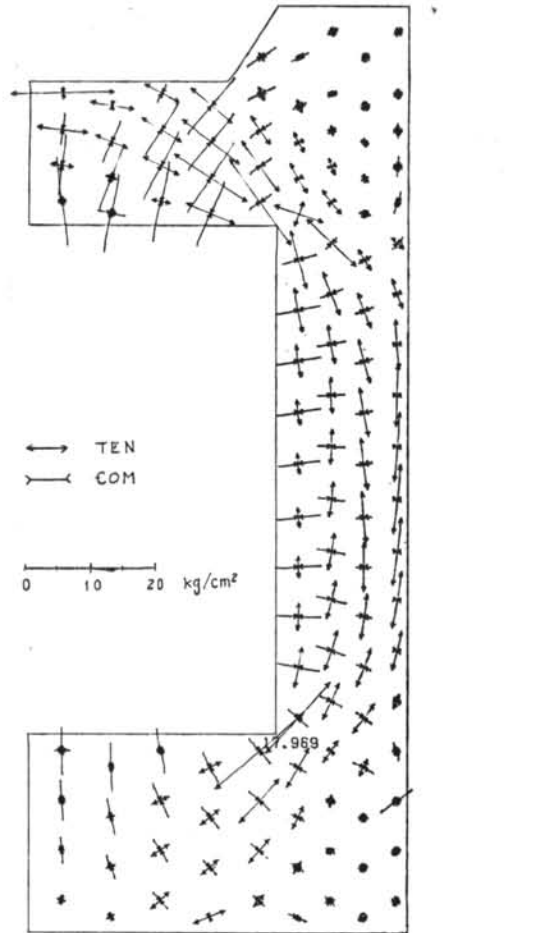
この点は図—5で圧力12kg/cm²以降の断面のひずみ状態(曲げひずみ)にも表われている。

側壁に関しては、圧力18kg/cm²から断面のひずみ分布が乱れ始め、抵抗は補強筋とPC鋼線に移り、特にr方向のひずみ分布(図—8)からみるとライナーの抵抗は無視できないようである。

ひびわれの生じ方では、縦ひびわれがPC鋼棒位置に表われており、シースの配置と断面形状の影響がみられる。

最大圧力時の上部スラブ周辺の垂直面に対する平均せん断応力 τ_{mean} は、

FIG.13 PRINCIPAL STRESSES BY INTERNAL PRESSURE



図—13 内圧(8.4kg/cm²)時の断面主応力分布

$$\tau_{mean} = \frac{Pr}{2h} = \frac{35.2 \times 16.6}{2 \times 13.7} = 21.3 \text{ kg/cm}^2$$

であった。

石こうコンクリートの割裂強度7.6kg/cm²を考慮すると高い値であるが、むしろプレストレスと補強筋の効果による。

弾性解析についていえば、今回の程度の要素分割でも変位、ひずみともに実験値とほぼ一致した結果が得られた。

特に変位の場合は、通常の構造物実験に比べ弾性域内では微小であるゆえ測定に苦労したが、解析値との対応はよい。

ひずみの場合は、ひびわれまたは塑性状態になるとゲージとコンクリートの分離が起きて、実際のひずみ状態を表わしているとはいえないが、これはモールドゲージの特徴であろう。

次に数値解析に関して2, 3の点を補足する。

弾性域内における石こうコンクリートに対する補強筋(PC鋼棒を含めて)およびライナーの影響は、定量的には上部スラブ中央に関して表—5のようなものである。

またプレストレス+設計相当内圧8.4kg/cm²の時の断面の応力状態を図—14に表わす。

この図によれば内側隅角部に応力集中によって引張応力の生じていることがわかる。

単位: 10⁻⁴

測定点	記号	方向	実験値	計算値	備考		
側壁中央	A	M-1	ϵ_r	-120	-85	鉄筋	
		M-2	ϵ_θ	230	190		
		S-1	ϵ_θ	250	190		
		M-3	ϵ_z	35	35		
内側隅角部	B	M-4	ϵ_r	-100	-45		
		M-5	ϵ_θ	165	155		
		M-6	ϵ_z	85	80		
側壁下部	C	K-1	ϵ_z	45	50	鋼棒	
		M-7	ϵ_r	-100	-20	鉄筋	
		M-8	ϵ_θ	155	130		
		S-2	ϵ_θ	180	130		
側壁下部	D	M-9	ϵ_z	130	135		
		P-2	ϵ_θ	180	125		ピアノ線
		上部スラブ	E	M-15	ϵ_r		290
M-13	ϵ_r			-85	-60		
P-1	ϵ_θ			145	25	ピアノ線	

表—4 8.4kg/cm²時のひずみの比較

FIG.14 PRINCIPAL STRESSES BY
INTERNAL PRESSURE
PRESTRESS

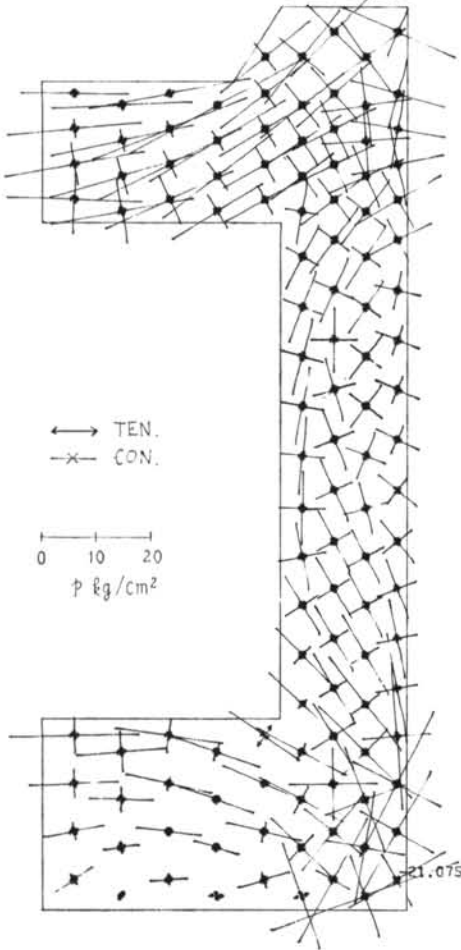


図-14 内圧 (8.4kg/cm²) とプレストレスによる
断面主応力分布

§ 8. 結 論

1/40スケールモデルに対する今回の実験でも、前回の2つの実験と同様に破壊までの過程は極めて漸進的であ

<参考文献>

- 1) 坪井, 川股, 半谷, 米田, 金井, 遠藤, 高山: "プレストレストコンクリート圧力容器の破壊実験その2" 建築学会大会学術講演梗概集 1970
- 2) 坪井, 川股, 半谷, 米田, 金井, 遠藤, 高山: "プレストレストコンクリート圧力容器の破壊実験その3" 建築学会大会学術講演梗概集 1970
- 3) 坪井, 川股, 半谷, 米田, 金井: "プレストレストコンクリート圧力容器の破壊実験その1" 建築学会大会学術講演梗概集 1970
- 4) 川股重也: "有限要素法による回転体の応力解析" 生産研究 Vol.20, No.5 1968

	上面変位 w	上面ひずみ ϵ_r
石こうコンクリート	1.000	1.000
石こうコンクリート +補強筋	0.947	0.926
石こうコンクリート +補強筋, ライナー	0.921	0.885

表-5 内圧時における補強筋とライナーの影響

ることがわかった。

最大圧力は35.2kg/cm²であり、設計相当圧力8.4kg/cm²の約4.2倍となるが、通常の構造物の概念からすれば高い値である。

一方、有限要素法による弾性解析によって実験値を裏付けることができた。

§ 9. おわりに

今回までの3つのモデル実験によって、PCPVの破壊過程あるいは破壊機構が把握できたが、実大のPCPVへの適用については次の諸点が問題として残る。

すなわち、石こうコンクリートは圧縮強度に対する割裂強度の比率が高いこと（普通コンクリートで約10~12であるのに対し、約8.4である）、PS材の配置および貫通孔の影響等の主にスケールに関連する形状寸法の効果、長期加圧（クリープの問題）や温度負荷等の主に試験方法に関する点などである。

また解析の面では材料の弾塑性を導入する必要があるが、以上の諸問題と並行して今後の実験に考慮して行きたい。

謝 辞

本実験は東京大学生産技術研究所川股研究室の指導を得て実施したものである。

総括的にご指導いただいた坪井善勝東大名誉教授、川股重也助教授、半谷裕彦助手、米田護技官および同研究室諸氏に深謝します。

本実験はまたPCPVに関心を持たれる社外の方々に公開することができたが、実験実施に当りご助力いただいた設計部、企画室、研究所諸氏に感謝します。