

# [120] RC造およびPRC造円筒サイロの力学的挙動に関する 実験的研究

正会員 坂井 正美 (日本鋼管技術研究所)  
 正会員 ○中村 信行 (日本鋼管技術研究所)  
 小林 清三 (飛鳥建設技術本部)  
 砂場 哲郎 (飛鳥建設技術本部)

## 1. まえがき

コンクリート製円筒構造物の地震時における性状はサイロ、原子炉格納容器などの研究を中心にして、かなり解明されてきた<sup>1)~3)</sup>しかし、石炭貯蔵等の巨大なRC造円筒サイロは直径に比べ壁厚が比較的薄い構造物であるため実物に忠実なモデル化が難しく、その弾塑性挙動を実験で確認した例は少ない。さて、RC構造はコンクリートの引張側応力を無視する設計のため、収縮、フープテンション、石炭排出時の偏圧曲げなどによって生じるひびわれは許容しており、常時荷重でさえひびわれ発生を抑えることは困難である。また、軽度のプレストレスを導入するPRC構造にすれば、RCの利点に加えて常時のひびわれ防止や地震の際に発生するひびわれも地震が過ぎ去れば閉じるなどの効果が期待されるがその諸性状は明らかでない。そこで、今回RC造およびPRC造円筒サイロの地震時における耐力、変形、ひびわれ性状を明らかにするため、円筒モデルにより水平加力実験を行い、検討を加えた。

## 2. 試験体

試験体は15,000 ton石炭サイロの1/8縮小の模型で、RCタイプとアンボンドPC鋼線で円周方向のみプレストレスを導入したPRCタイプの各1基である。形状は図1に示すように、高さ545cm、内径325cm、壁厚5cmで、PRC試験体にはPC鋼線定着用のピラスターを円周上に4ヶ所配置した。両試験体とも同一の荷重条件で設計し、補強筋を選定した。その詳細を表1に示すが、内圧に対する補強方法だけが両者で異なる。つまり曲げと水平せん断力に対する補強は両者等しく鉄筋により行い、さらに内圧によるフープテンションをRC試験体は鉄筋で、PRC試験体はPC鋼線で補強した。表2に使用材料の性質を示すが、コンクリートは最大骨材寸法5mmのモルタル、鉄筋はD6、PC鋼線は2.9mm2本よりのアンボンドタイプを使用した。

表1 補強筋の詳細

	PRC試験体	RC試験体
縦筋	1.27筋 (D6 @50シングル)	
横筋	0~5.0m, D6 0.878筋@73	D6 0~1.0m
	アンボンドPC鋼線より線 0~1.3m @2.00	1.31筋@49 1.0~2.0m 1.20筋@5.3
	1.3~2.5m @3.00	2.0~3.0m 1.10筋@5.8
	2.5~5.0m @4.50	3.0~5.0m 0.99筋@6.5

表2 材料の性質

補強筋	公称断面積 cm <sup>2</sup>	降伏強度 kgf/cm <sup>2</sup>	引張強度 kgf/cm <sup>2</sup>	弾性係数 ×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	伸び %
PC鋼線より線	0.1339	19,642	20,762	2.05	7.5
コンクリート	圧縮強度 kgf/cm <sup>2</sup>	弾性係数 ×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	ポアソン比	割裂強度 kgf/cm <sup>2</sup>	曲げ強度 kgf/cm <sup>2</sup>
PRC	355	2.24	0.22	28.9	51.8
RC	319	2.29	0.22	24.9	50.0

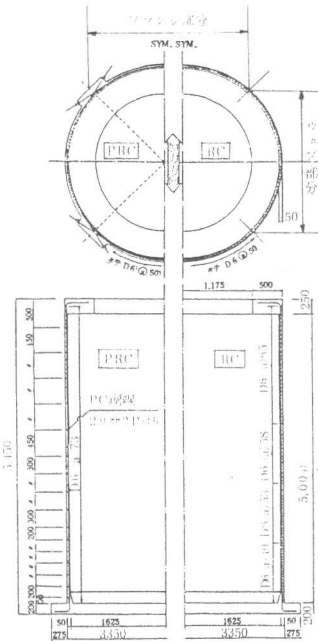


図1 試験体の形状

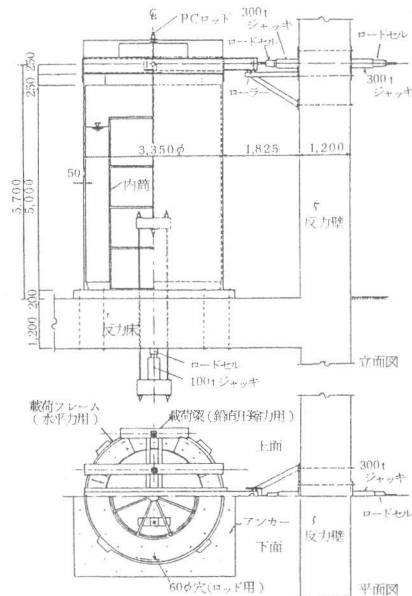


図2 加力装置

### 3. 実験方法

3.1 加力装置 加力装置の概略を図2に示すが、水平力は反力壁に取付けた2台のオイルジャッキを用い、試験体の頂部に鋼製の荷重フレームを介して加えた。鉛直圧縮力は定軸圧を作用させるため頂部の荷重梁を4本のP C ロッドを介して、反力床下に取付けたオイルジャッキにより引張り荷重した。なお、このP C ロッドは水平力荷重方向に対して直交して一列に配置して、曲げモーメントを負担しないように配慮した。また内圧は鋼製円筒を試験体内部に配置し、その外側と試験体内側との間に巨大なリング状のビニールバッグをセットし、4 m の静水圧として加えた。なおP R C 試験体のP C 導入力と水圧によるフープテンションとの関係を図3に示す。

3.2 荷重計画 試験体への荷重方法は4 m の高さまで水を入れた後、所定の鉛直圧縮力 ( $\sigma_0 = 24 \text{ kgf/cm}^2$ ) を加え、その後図4に示す荷重計画に従い水平力を加えた。なお測定項目は頂部の水平変位をはじめ、各部の変位、鉄筋およびコンクリートのひずみ、P C 鋼線の軸力変化、ひびわれ発生をチェック、ひびわれ幅の観察などである。

### 4. 実験結果

4.1 実験経過 実験結果の一覧を表3に示す。また最終状態でのひびわれを図5、図6に示す。実験経過を簡単に述べると、R C 試験体は第1サイクル(短期設計荷重相当)の繰返しで正負とも曲げひびわれせん断ひびわれが発生し 第2サイクル(降伏荷重程度)で曲げひびわれはなめらかな曲線状に発達し、円筒のウェブ部分で発生したせん断ひびわれとつながった。曲げひびわれは荷重が大きくなるにつれ上部に発生してゆき、またせん断ひびわれは下部の方が密といえ、上下まんべんなく発生した。第7、8サイクル(部材角 $1/100$ )の最大荷重時にフランジ脚部の圧縮側コンクリートに圧壊現象が観察できた。最終の第9サイクルで部材角 $1/75$ を越えた時、脚部の圧壊が進み始め、次にウェブ脚部がせん断ずれを起し、コンクリートが剥落して耐力低下に至った。

P R C 試験体の破壊経過もR C とほぼ同様であったが、ひびわれパターンに若干の違いがみられた。P R C の曲げひびわれはR C が曲線状に発達したのに比べ、円筒軸に対して直交する直線状であった。またP R C のせん断ひびわれはR C がウェブ中央から発生しはじめるのに対して、ピラスターで開まれるウェブ部分のあらゆる

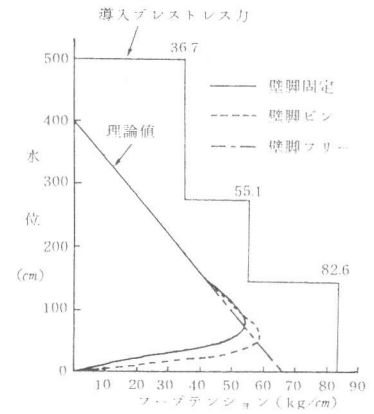


図3 フープテンション

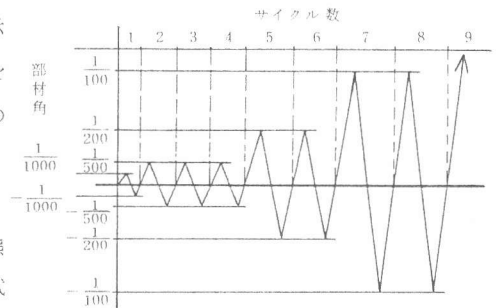


図4 荷重計画

表3 実験結果一覧

	P R C		R C	
	実験値	実/計	実験値	実/計
初期剛性 (ton/cm)	222.2	0.84	204.1	0.99
曲げひびわれ	30.	0.85	30.	0.71
荷重 (ton)	-30.	0.85	-45.	1.07
せん断ひびわれ	45.	1.02	48.	1.14
荷重 (ton)	-45.	1.02	-45.	1.07
縦筋降伏荷重	75.	0.93	78.	0.96
(ton)	-77.	0.95	-65.	0.80
最大荷重	114.	0.97	109.	0.95
(ton)	-108.	0.92	-104.	0.90

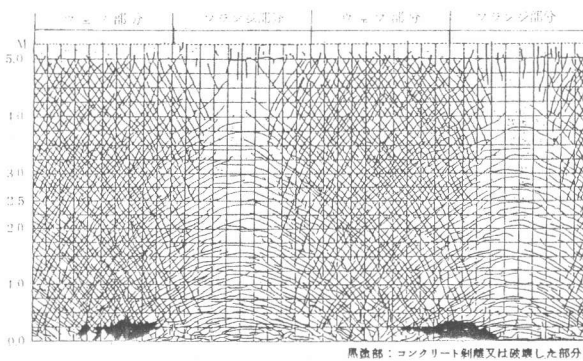


図5 最終時のひびわれ (R C 試験体)

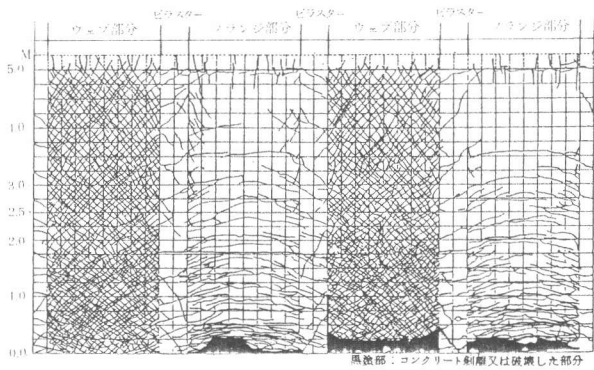


図6 最終時ひびわれ (P R C 試験体)

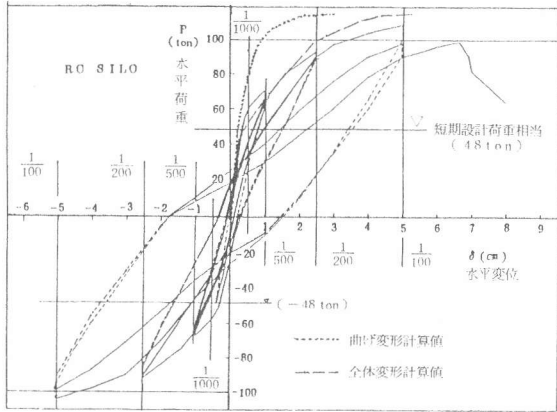


図7 荷重水平変位関係(RC試験体)

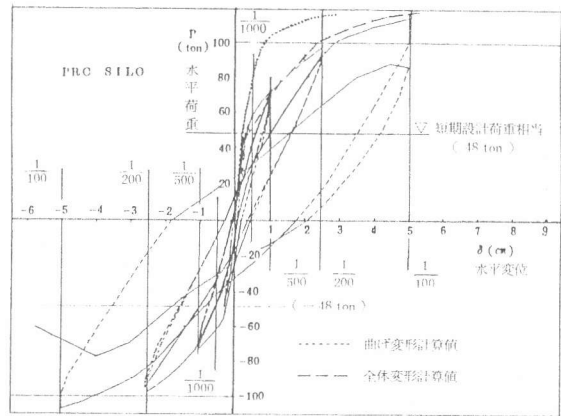


図8 荷重水平変位関係(PRC試験体)

る位置から発生し、最終的にPRCの方が細かなひびわれ間隔となった。最終状態は第8サイクル負側でRCと同様に圧縮側脚部の圧壊が進行し、片側のウェブ脚部のせん断ずれにより耐力低下に至った。図7、図8に頂部の荷重水平変位関係を示すが、圧壊で耐力が決まる曲げ型の破壊性状のため両試験体の降伏開始荷重、最大荷重ともほぼ等しく、復元力特性もほぼ紡錘型の良好な性状を示した。

4.2 平均ひびわれ間隔 図9、図10に平均ひびわれ間隔と試験体高さとの関係を示す。ひびわれ展開図からその傾向は概ね把握できるが、発生ひびわれの位置、進行を定量的に示したものである。曲げ引張りによるひびわれは部材角が増すにつれて細かくなり、脚部近くのひびわれ間隔はRC、PRCともほとんど等しく約10cmとなった。せん断ひびわれ間隔は部材角1/500では下部から上部に向かって大きくなっており、RCとPRCの違いはほとんどない。部材角1/100ではRCは下部、上部ともひびわれ間隔が均一となり、約17cmであった。PRCの上部はRCと変わらないが、下部は約10cmと細かいひびわれ間隔となった。

4.3 残留ひびわれ幅 図11に水平力載荷時のひびわれ幅と除荷時のひびわれ幅を示す。これに示すように部材角1/500(縦筋降伏開始時)までのせん断ひびわれは除荷すると閉じることを確認した。それ以後の変形でひびわれが残留するのはウェブの横筋が降伏することや骨材のかみ合いなどの原因が考えられる。

## 5. 実験結果の検討

### 5.1 剛性および各種強度値

表3に実験値と計算値の比較を示すが、初期剛性、曲げひびわれ荷重はシェル要素によるFEM弾性解析に、また降伏荷重、最大荷重は平面保持を仮定した断面の曲げ理論解析にほぼ一致した。またせん断ひびわれ荷重は梁における荒川式に軸力の項を補正した(1)式によりほぼ推定できた。

$$\tau_{sc} = \sqrt{\{\tau_0 + 0.1(\sigma_F - \sigma_H)\}(\tau_0 + 0.1\sigma_O)} \quad \dots\dots(1)$$

$$P_{sc} = \tau_{sc} \cdot A / \kappa \quad \dots\dots(2)$$

ここに  $\tau_{sc}$ 、 $P_{sc}$  : せん断ひびわれ応力度、せん断ひびわれ荷重  
 $\tau_0$  : 荒川式によるせん断ひびわれ応力度、 $\tau_0 = kc(500 + F_c) \frac{0.085}{M/Qd + 1.7}$   
 $\sigma_F$  : プレストレス力、 $\sigma_H$  : フープテンション  
 $\sigma_O$  : 鉛直圧縮力、 $A$  : 円筒断面積、 $\kappa$  : 形状係数

### 5.2 荷重・変位関係の比較

頂部の荷重・水平変位関係を次の計算によ

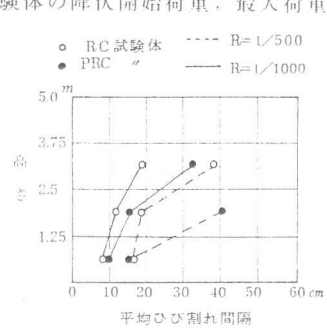


図9 平均ひびわれ間隔(曲げ)

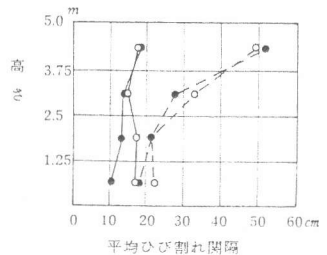


図10 平均ひびわれ間隔(せん断)

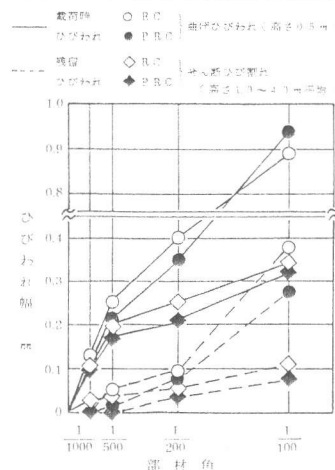


図11 残留ひびわれ幅

り求めた。ここで全体変形は曲げ変形とせん断変形を加え合わせたものとする。曲げ変形は平面保持を仮定した断面の曲げ解析により、曲げモーメントと曲率の関係を求め、材軸方向に曲率を積分する通常の方法により求めた。せん断変形はCollinsのせん断理論<sup>4)</sup>を適用することにより板要素のせん断応力とせん断歪の関係を求め、せん断歪を材軸方向に積分することにより求めた。ここでCollins理論について簡単に説明する。図12に示す作用応力状態を考え、平均応力の釣合条件は図13で示されるモールの応力円に従うものとし、また平均歪の適合条件は図14に示すモールの歪円に従うものとする。さらに主応力方向と主歪方向が一致すると仮定することにより、以下の関係式が得られる。

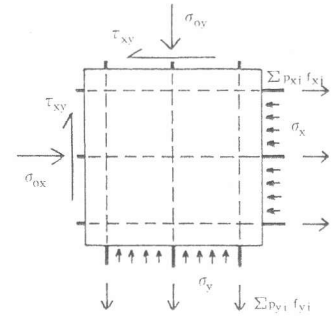


図12 作用応力

x, y方向の力の釣合より

$$\sigma_x = \sum p_{xi} f_{xi} + \sigma_{OX} \quad \dots(3)$$

$$\sigma_y = \sum p_{yi} f_{yi} + \sigma_{OY} \quad \dots(4)$$

応力と歪の関係は

$$f_{xi} = E_{xi} \epsilon_x \leq f_{xi}^y \quad \dots(5)$$

$$f_{yi} = E_{yi} \epsilon_y \leq f_{yi}^y \quad \dots(6)$$

$$\sigma_d = E_c \epsilon_d \leq \sigma_u \quad \dots(7)$$

モールの応力円より

$$\sigma_x = \tau_{xy} / \tan \theta \quad \dots(8)$$

$$\sigma_y = \tau_{xy} \cdot \tan \theta \quad \dots(9)$$

$$\sigma_d = \tau_{xy} (\tan \theta + 1 / \tan \theta) \quad \dots(10)$$

モールの歪円より

$$\tan^2 \theta = (\epsilon_d + \epsilon_x) / (\epsilon_d + \epsilon_y) \quad \dots(11)$$

$$\tau_{xy} = 2 (\epsilon_d + \epsilon_x) / \tan \theta \quad \dots(12)$$

また、せん断破壊条件は実験式として(13)式が与えられている。

$$\sigma_d = 3.6 \sigma_u / (1 + 2 r_m / \epsilon_u) \quad \dots(13)$$

(3)~(10)式により求めた $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_d$ を(11)式に代入して $\theta$ を求めれば、(12)式より $\tau_{xy}$ の値に対する $r_{xy}$ の値が求まる。

以上より求めた荷重変位の関係を図7, 図8に示すが、かなり良い一致を示した。なおCollins理論によるせん断耐力値は両試験体とも曲げ最大耐力値の約1.5倍となっているため、せん断破壊は生じない条件にある。

## 6. むすび

- (1) RC, PRC両試験体とも荷重変位関係は靱性のある良好な性状を示した。
  - (2) 曲げ型の破壊性状のため降伏耐力, 最大耐力は平面保持を仮定した断面の曲げ解析にほぼ一致した。
  - (3) 平面保持を仮定した曲げ理論とCollinsのせん断理論を組み合わせることにより、荷重変位関係を良好に追跡することができた。
  - (4) PRC試験体の短期設計荷重相当に発生するひびわれは水平力を除くとほぼ完全に閉じることを確認した。
- (謝辞)本研究を実施するにあたり、東京理科大学助教授松崎育弘博士に御指導頂いた。ここに謝意を表します。
- (参考文献)

- 1) 瀬戸川; 円筒型鉄筋コンクリート耐震壁に関する水平加力実験, 日本建築学会論報, 第209号, 昭55. 4
- 2) P.Gergely, R.N.White; Research Needs for Design of Concrete Containment Structures, Nuclear Engineering and Design 69, 1982, p.183-186
- 3) 大内, 武田; RC・PC円筒体のせん断挙動に関する理論的考察, RCせん断コロキウム, JCI, 1982.6
- 4) M.P.Collins; Towards a Rational Theory for RC Members in Shear, ASCE ST4, vol.104, 1978.4

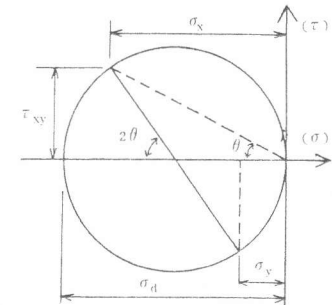
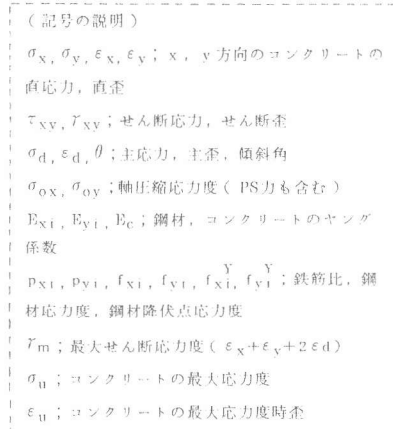


図13 モールの応力円

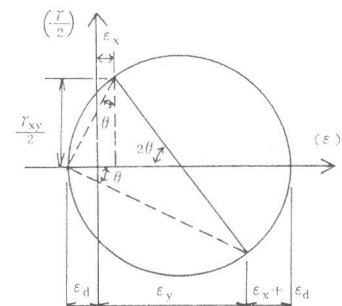


図14 モールの歪円