

# 超大型サイロに関する研究 (その2)

——鉄筋コンクリート薄肉円筒構造物の水平加力試験——

武田 寿一 中山 達雄  
大内 一

## Studies on Large-scale Silos (Part 2)

——Reinforced Concrete Cylindrical Shell under Lateral Loads——

Toshikazu Takeda Tatsuo Nakayama  
Hajime Ohuchi

### Abstract

Large-scale silos for various materials are about to be constructed in the near future. Since they will be of large scale, design internal pressures will no doubt be increased, and in design of these structures it will be required to know structural behaviors under combined internal pressures and shearing forces during earthquake, but there have been few cases of experiments made and no design data have been published. It was under these circumstances that studies on reinforced concrete cylindrical shells in torsion were reported in the previous paper.

This report describes results of tests and discussions on reinforced concrete cylindrical shells under lateral loads. The conclusions are as follows. The reinforcement required to resist internal pressure needs simply to be added to that required to resist shear. Skeleton curves for bending and for shear are determined by reinforced concrete plastic theory and on the basis of the previous tests, respectively. Although bending rigidity and shear rigidity are slightly reduced in case of a specimen with vertical cracks caused by internal pressure, there is no problem about strength.

### 概 要

最近、種々の内容物をもつ大型のサイロが建設されようとしている。容器が大型化すると設計内圧の増大を伴い、従って設計には内圧と地震時せん断力との組合せ応力下の力学的挙動を把握しておく必要があるが、現在のところ実験例は少なく設計資料も整っていない。このような現状にあるので、前報(その1)でねじり試験によるせん断の基礎的破壊性状を検討した。

この報告は水平加力試験による鉄筋コンクリート円筒構造物の耐力・変形状を、前報のねじり試験による知見を参考にして、検討したものである。その結果、補強には内圧に対する補強量を地震に対するせん断補強量に加算すればよいことを確認した。曲げに対する復元力特性は鉄筋コンクリート塑性論によって、せん断に対する復元力特性は前報の知見に基づいて、それぞれ定められるものと思われる。内圧による縦ひび割れを有する場合の曲げ及びせん断剛性は内圧を受けない場合に比べて若干低下するが、耐力的には問題はない。

### 1. 序

最近、資源の備蓄が叫ばれ、種々の内容物をもつ大型サイロが建設されようとしている。容器が大型化すると設計内圧の増大を伴うので、設計には内圧と地震時せん断力との組合せ応力下の力学的性状を明らかにしておく必要がある。特に、日本では地震力による面内せん断力

が断面設計で支配的になる厳しい自然条件にあるにも拘らず、この種の構造物の挙動に関する研究は少なく設計資料も整っていない。通常の鉄筋コンクリート部材のせん断破壊機構に関してさえ必ずしも明確でなく、更に内圧などによる面内引張力を受ける断面のせん断耐力に関しては未解明のままである。このような情勢に鑑み、前報(同題 その1)において、せん断の基礎的破壊性状を把

握するためねじり試験を行ない、内圧を伴う鉄筋コンクリート円筒構造物のせん断に対する耐力・変形状を検討した。

この報告は、鉄筋コンクリートサイロを対象とした耐震設計に資する設計資料を得るために、内圧を伴う鉄筋コンクリート円筒構造物の水平加力試験を行ない、前報に示したせん断に対する基礎的破壊性状に関する実験によって得た知見を参考にして検討を加えたものである。

## 2. 試験体

### 2.1. 試験体の形状及び配筋

試験体は基礎スラブ、円筒部、加力用スラブから成る。円筒部の横断面は前報のねじり試験体に合せて外径(D) 600 mm, 内径(d) 500 mm, 壁厚(t) 50 mmとした。基礎スラブ上端から加力点までの高さ(H)は 600 mmである。実験変数にせん断補強量および内圧を選び一つの試験体を基準に各実験変数をそれぞれ単独に変化させた試験体を計画した。試験体円筒部の補強に縦横直交配筋法を用い、縦筋量は全試験体共通の 16-D10である。曲げ耐力時の最大せん断応力度(弾性応力度分布の仮定)の2/3倍, 3/4倍, 5/3倍の値にせん断補強量( $p_s \cdot \sigma_y$ )を設定した。このうち最少のせん断補強量を有する試験体を基準に、内圧( $P_i$ )の大きさを前報に採用した値に合せ3段階に変化させた。内圧を受ける試験体の横筋比( $p_H$ )は、せん断補強筋比( $p_s$ )に、下式を用いて算定した内圧に対する補強筋比( $p_{pi}$ )を加算したものである。

$$p_{pi} = \frac{\sigma_{\theta avg}}{\sigma_y} \dots\dots\dots(1)$$

$\sigma_{\theta avg}$ : 内圧による円周方向応力度  
 $\sigma_y$ : 横筋の降伏応力度

試験体の形状・寸法を図-1に、補強量など一般的事項を表-4に示す。

### 2.2. 試験体の製作

試験体円筒部には鋼製内型枠とボイド管による外型枠を用いた。試験体の製作は図-1に示す状態を上, 下逆にして行なった。はじめに加力用スラブを、後日円筒部と基礎スラブを一体に、コンクリートの打設を行なった。

コンクリートの充填度を良くするため、バイブレーター、木ハンマー、突棒を随時利用した。試験体はコンクリート打設後、約3日間型枠のまま十分に散水を行なって養生し、以後脱型して試験当日まで室内に気中放置した。

### 2.3. 材料の性質

最大粒径 15 mm の粗骨材, 5 mm の細骨材および普通ポルトランドセメントを用いたレディミックスコン

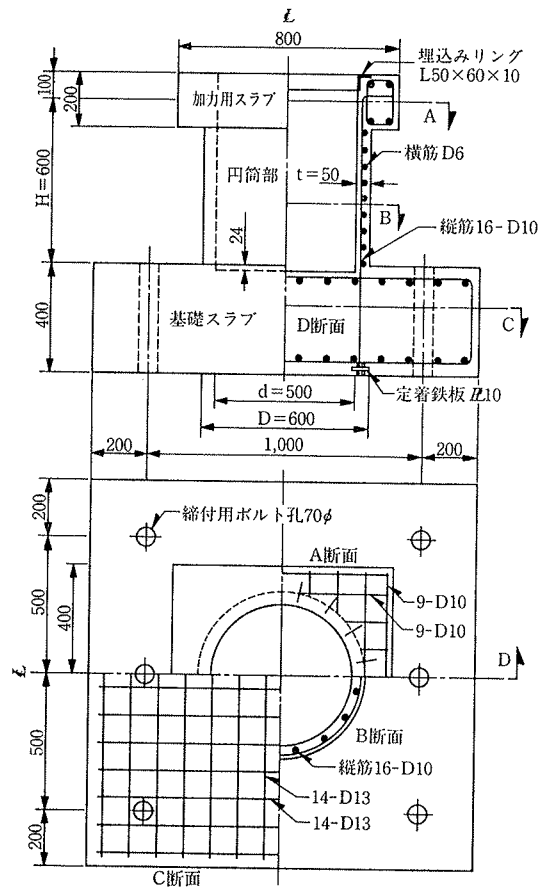


図-1 試験体形状

水セメント比 %	水 kg/m <sup>3</sup>	セメント kg/m <sup>3</sup>	砂 kg/m <sup>3</sup>	砂利 kg/m <sup>3</sup>	混和材* g/m <sup>3</sup>
58	217	374	892	771	145

\*ヴィンゾール

表-1 コンクリートの調合

スランプ cm	空気量 %	圧縮強度 Fc kg/cm <sup>2</sup>	割裂強度 Ft' kg/cm <sup>2</sup>	ひずみ度*1 εb %	ヤング係数*2 Ec 10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup>
21.5	3.5	291	21.3	0.23	2.21

\*1圧縮強度時の値  
 \*2圧縮強度の1/4に於る割線勾配

表-2 コンクリートの試験結果

	公称断面積 cm <sup>2</sup>	降伏点 $\sigma_y$ kg/cm <sup>2</sup>	引張強度 $\sigma_m$ kg/cm <sup>2</sup>	ヤング係数 Es 10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup>	伸び率 %
D6	0.317	3780*	5320	1.91	17.5
D10	0.713	3610	5200	1.80	18.0

\*残留ひずみ度0.2%に対する応力度

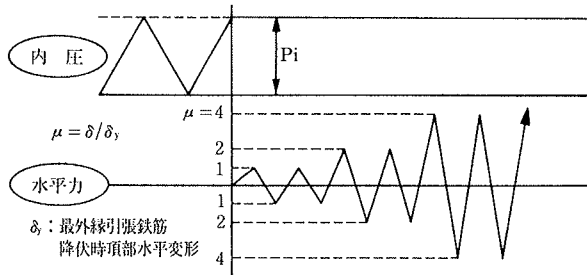
表-3 補強筋の性質

クリートを使用した。コンクリートの性質は、圧縮用に小形シリンダー (100φ×200) を、割裂用に大形シリンダー (150φ×300) を試験体円筒部コンクリート打設時に合わせて製作し、円筒試験体と同一条件 (養生, 材令) で試験を行なって求めた。コンクリートの調合を表一1に、コンクリートの試験結果を表一2に、補強筋の試験結果を表一3に示す。

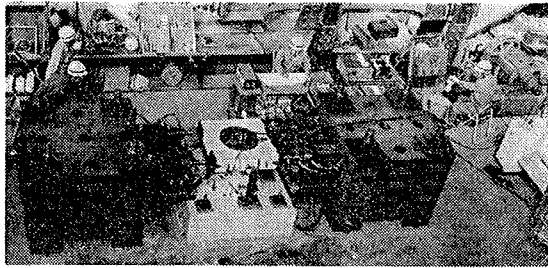
### 3. 実験方法

#### 3.1. 内圧

試験体円筒部に円周方向応力度のみを与えるため、鋼棒・円盤からなる籠とゴム布を組合せた円柱状の袋を用いた。圧力による袋の材軸方向の変形は円盤に取付けた鋼棒 (6-13φ) で拘束される機構とした。圧力は電動ポンプによる水圧を用いて与え、その検出はダイヤフラ



図一2 载荷プログラム



写真一1 実験状況

ム型圧力計 (感度 $300 \times 10^{-6} / \text{kg/cm}^2$ , 容量 $10 \text{kg/cm}^2$ ) を用いた。

#### 3.2. 水平力

試験体円筒頂部に設けた加力用スラブの両側にそれぞれ2台の油圧ジャッキ容量 (30t) を基礎スラブ上端から60 cm の位置に計4台設置した。油圧系統は加力方向に対して左右2系統に分け、正荷重および負荷重とも“押し”によって加力した。水平荷重の検出を全点に配置した容量20 tのロードセル (定格出力 $3000 \times 10^{-6}$ ) で行なった。载荷プログラムを図一2に、実験状況を写一1に示す。

#### 3.3. 測定方法

全体水平変形, 円筒部最外縁鉛直変形 (曲げ変形および縦筋の拔出し量) を高感度変位計 (感度500,  $1000 \times 10^{-6} / \text{mm}$ ) で、円筒ウェブ中腹位置のせん断変形をパイ型変位計で、補強筋およびコンクリート表面のひずみ度をW.S.G.で測定した。また、内圧による縦ひび割れ幅の水平力に伴う変動量をクリップ型変位計 (感度 $1200 \times 10^{-6} / \text{mm}$ ) で測定した。

### 4. 実験結果

#### 4.1. 実験結果一覧

表一4に、内圧による縦ひび割れ荷重 ( $P_{ie}$ ), 水平力による曲げひび割れ荷重 ( $P_{bc}$ ), ななめひび割れ荷重 ( $P_{ac}$ ), 最外縁引張鉄筋降伏荷重 ( $P_y$ ) および最大荷重 ( $P_{max}$ ) を一覧表にして示した。諸ひび割れ荷重は、ひずみ度の測定結果, 変形の測定結果や目視による観察などから総合的に判断して定めたものである。

表一5に、縦ひび割れ荷重時, 曲げひび割れ荷重時, ななめひび割れ荷重時, 最外縁引張鉄筋降伏時, 終局強度時の実験値と計算値およびそれらの比を示した。諸荷重時の応力度算定および計算値は同表の下に示した諸式

試験体名	緒 元					補 強 量	実 験 結 果					備 考						
	Fc kg/cm <sup>2</sup>	Ft' kg/cm <sup>2</sup>	Pi kg/cm <sup>2</sup>	Dpi %	Ds %		縦筋	横筋	縦ひび割れ荷重 pic kg/cm <sup>2</sup>	曲げひび割れ荷重 Pbc ton	ななめひび割れ荷重 Pdc ton		最外縁引張鉄筋降伏荷重 Py ton	最大荷重 Pmax ton				
SL-0-85	291	21.3	0	/	0.85	16-DIO	D6@75	/	+1.59	+4.01	+13.4	+18.6	横筋降伏					
SL-0-190					1.86				-1.97	-5.45	-13.2	-16.1						
SL-0-70					0.70				D6@34	+1.61	+3.99	+14.0		+18.3	横筋降伏せず			
SL-14-100										2.40	0.35	-1.96		-4.94		-13.0	-17.0	
SL-25-140										4.55	0.67	+1.58		+4.45		+13.3	+17.2	横筋降伏
SL-44-190										7.96	1.17	-1.97		-4.37		-13.4	-15.6	
SL-14-100	2.40	0.35	D6@60	+2.47	+4.81	+12.9	+17.2	横筋降伏										
SL-25-140	4.55	0.67		-2.36	-4.76	-13.7	-15.8											
SL-44-190	7.96	1.17		D6@46	+2.44	+3.96	+13.9		+17.8	横筋降伏								
SL-44-190	7.96	1.17	-2.43		-3.98	-13.8	-16.6											
SL-44-190	7.96	1.17	D6@34	2.8	+2.42	+3.98	+13.5	+17.1	横筋降伏									
SL-44-190	7.96	1.17			-2.76	-4.36	-13.3	-15.5										

表一4 実験結果一覧表

試験体名	縦ひび割れ荷重			曲げひび割れ荷重		せん断ひび割れ荷重			最外縁引張鉄筋降伏荷重			最大荷重				
	実 $\sigma_{bc\ avg}$ kg/cm <sup>2</sup>	計 $\sigma_{\theta C}$ kg/cm <sup>2</sup>	実計	実 $\sigma_{ze}$ kg/cm <sup>2</sup>	計 $\sigma_{\theta}$ kg/cm <sup>2</sup>	実 $\tau_{sc}$ kg/cm <sup>2</sup>	計 $\tau_{sc\ ARA}$ kg/cm <sup>2</sup>	実計	実 P <sub>v</sub> ton	計 P <sub>vE</sub> ton	実計	計		P <sub>U</sub> P <sub>UE</sub>	P <sub>U</sub> P <sub>SU</sub>	
												P <sub>U</sub> ton	P <sub>UE</sub> ton			
SL-0-85				+7.85 -9.72	0.37 0.46	+9.29 -12.6		0.54 0.73	+13.4 -13.2		1.06 1.04	+18.6 -16.1		21.3	1.03 0.89	0.87 0.76
SL-0-190				+7.95 -9.67	0.37 0.45	+9.24 -11.4		0.53 0.66	+14.0 -13.0		1.10 1.02	+18.3 -17.0		25.1	1.02 0.94	0.73 0.68
SL-0-70				+7.80 -9.72	0.37 0.46	+10.3 -10.1		0.60 0.58	+13.3 -14.4		1.05 1.13	+17.2 -15.6		20.7	0.96 0.87	0.83 0.75
SL-14-100	9.0	23.0	0.39	+12.2 -11.7	0.57 0.55	+11.1 -11.0	17.3	0.64 0.64	+12.9 -13.7	12.7	1.02 1.08	+17.2 -15.3	18.0	20.8	0.96 0.88	0.83 0.76
SL-25-140	10.0	23.5	0.43	+12.0 -12.0	0.56 0.56	+9.17 -9.22		0.53 0.53	+13.9 -13.8		1.09 1.09	+17.8 -16.6		21.0	0.99 0.92	0.85 0.79
SL-44-190	14.0	24.3	0.58	+11.9 -13.6	0.56 0.64	+9.22 -10.1		0.53 0.58	+13.5 -13.3		1.06 1.05	+17.1 -15.5		21.2	0.95 0.86	0.81 0.73

● 縦ひび割れ荷重

$$\sigma_{bc\ avg} = P_{ic} \cdot d / (2t)$$

$$\sigma_{\theta C} = \{1 + (n-1) p_H\} F_t'$$

● 曲げひび割れ荷重

$$\sigma_{ze} = P_{bc} \cdot H / Z_e$$

● せん断ひび割れ荷重

$$\tau_{sc} = 2P_{dc} / A_g$$

$$\tau_{sc\ ARA} = k_c (500 + F_c) \frac{0.085}{M/Qd + 1.7}$$

● 最外縁引張鉄筋降伏荷重

P<sub>vE</sub>: e 函数法による

● 終局強度時

P<sub>UE</sub>: e 函数法による

$$P_{SU} = \left\{ k_u \cdot k_p (180 + F_c) \frac{0.115}{M/Qd + 0.115} + 2.7 \sqrt{p_H (\sigma_y - \sigma_{s\theta})} \right\} 4 t r_0 \cos \theta$$

$$\theta = \pi \cdot p_v \cdot \sigma_y / (F_c + 2 p_v \cdot \sigma_y)$$

$$\sigma_{s\theta} = \sigma_{\theta} / p_H$$

● 記号

n: ヤング係数比

Z<sub>e</sub>: 縦筋考慮断面係数

A<sub>g</sub>: 円筒全水平断面積

p<sub>v</sub>: 縦筋比

p<sub>H</sub>: 横筋比

r<sub>0</sub>: 円筒壁芯の半径

表-5 各種強度実験値と計算値

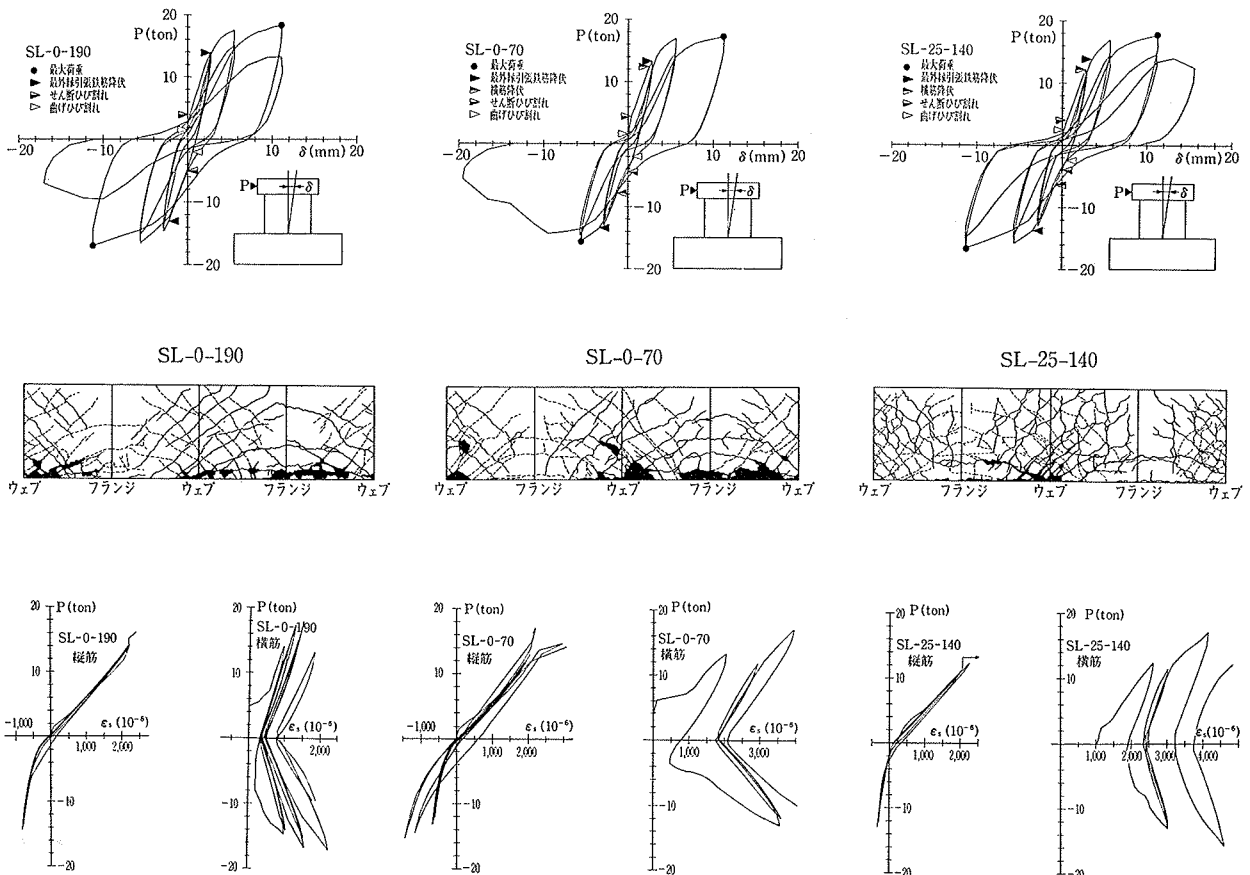


図-3 P~δ 関係, P~ε 関係および最終破壊状況

によった。縦ひび割れ荷重時の円周方向応力度はコンクリート引張強度係数の0.4~0.6倍に分布した。曲げひび割れ荷重時の縁引張応力度は、同様に0.3~0.7倍に分布し、この値は内圧を伴う場合の方が内圧のない場合に比べて若干大きいようである。内圧の有無によるななめひび割れ荷重の変化は認められなかった。

4.2. 破壊状況

頂部水平荷重と頂部全体水平変形関係、最終ひび割れ状況および荷重と補筋筋ひずみ度関係の代表例を図-3に示す。

SL-0-70 本実験内容の基準となる試験体である。内圧を受けず、せん断補強量 ( $p_s \cdot \sigma_y$ ) 26.6 kg/cm<sup>2</sup> を有する。この量は曲げ耐力時の最大せん断応力度の2/3倍である。はじめにフランジ脚部に曲げひび割れが発生した後、ななめひび割れがウェブ中腹に生じた。やや遅れて横筋のひずみ度が急激に増大し、続いて最外縁引張鉄筋が降伏した。横筋のひずみ度は荷重  $P_y$  時に  $2,050 \times 10^{-6}$  を示し、以後荷重の繰り返りに従い増加した。正荷重の  $4\delta_y$  を経験した後、負の荷重時にウェブ脚部がせん断破壊した。

SL-0-190 基準試験体に対して2.6倍のせん断補強量を与えたものである。横筋のひずみ度は荷重  $P_y$  時に  $960 \times 10^{-6}$  を示し、以後横筋のひずみ度の十分な流れは認められない。 $4\delta_y$  を経験した後、ウェブ脚部のせん断圧縮破壊を示した。

SL-25-140 基準試験体に対して内圧 4.55 kg/cm<sup>2</sup> を与えたものである。横筋のひずみ度は、目標内圧時に  $1,040 \times 10^{-6}$  を、荷重  $P_y$  時に  $2,600 \times 10^{-6}$  を示した。縦ひび割れは約10本生じた。 $4\delta_y$  を経験した後、ウェブ脚部のせん断圧縮破壊を示し、試験体 SL-0-70に比較して破壊状況に大きな差は認められない。

5. 検討

5.1. 内圧時挙動

図-4は内圧による円周方向ひずみ度の鉛直方向分布を、コンクリート外表面(円周上4点の平均値)と横筋(円周上8点の平均値)について、示したものである。測定結果には基礎スラブと加力用スラブによる円筒部の面外変形拘束の影響があらわれている。円筒中腹位置を対象として、内圧と横筋のひずみ度 ( $\epsilon_{s\theta}$ ) との関係を図-5に示す。実験値は満水時を原点とした。図中、式(2)による半無限円筒弾性計算値を破線で、式(3)によるひび割れ断面の計算値を点線で、示した。

$$\epsilon_{\theta} = 4.86P_i/E_c \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\epsilon_{\theta} = dP_i/(2tp_{II}E_s) \quad \dots\dots\dots(3)$$

縦ひび割れ発生前の初期低内圧時  $\epsilon_{s\theta}$  は弾性計算値よ

り若干大きい。縦ひび割れ発生後、 $\epsilon_{s\theta}$  は内圧の増大に伴い急激に増し、以後  $P_i \sim \epsilon_{s\theta}$  関係は式(3)による計算値を漸近線とする傾向にあった。

5.2. 復元力特性

(1) 水平変形モード

図-6は水平変形の鉛直方向分布を示したものである。同図より、せん断変形の卓越している様子がうかがえる。破壊時の変形は、図中の破線の分布形より、円筒脚部に集中している。

(2) 全体変形の変離

頂部全体水平変形から曲げ変形(縦筋の基礎スラブから

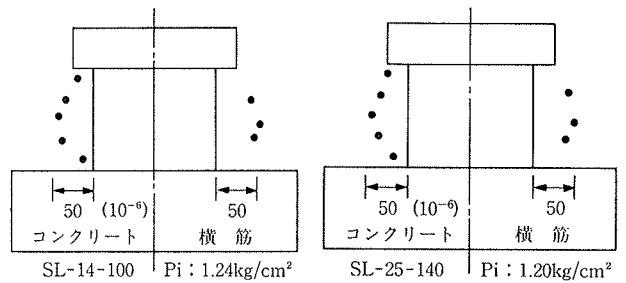


図-4 内圧による円周方向ひずみ度の鉛直方向分布

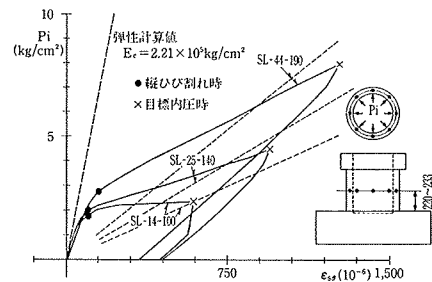


図-5 内圧と横筋ひずみ度との関係

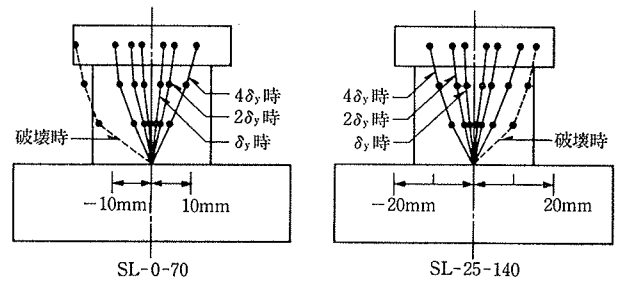


図-6 水平変形モード

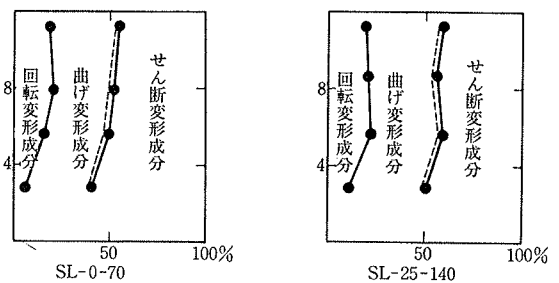


図-7 全体変形に占める各種変形成分の推移

の抜け出しによる回転変形成分を含む)を除いたものをせん断変形成分とみなし、全体変形に占めるせん断変形成分の推移を図-7の点線で示す。曲げ変形は円筒部の引張縁における鉛直変形分布(基礎スラブ内を含む)から得られる曲率を用いて算出したものである。

図-9は、縦筋の抜け出し量およびり込み量について、ひずみ度の積分値と変位計による値( $\Delta\theta$ )とを比較した1例である。 $\Delta\theta$ は式(4)によって求めた。図-9の左側に基礎スラブ内の縦筋のひずみ度分布を示した。▼印のひずみ度分布から右図の▼印点を、以下同様に対応する記号の点を、それぞれ得る。右図に示すように縦筋の抜け出しとり込みによる回転角は両者の間でほぼ等

$$\Delta\theta = \textcircled{B} - \{l/(L-l)\} \textcircled{A} - \textcircled{B} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\Delta\theta = \textcircled{A} - \textcircled{B} + \{l/(L-l)\} \textcircled{A} - \textcircled{B} \quad \dots\dots\dots(5)$$

しいことが認められた。従って、以後 曲げ変形成分用の脚部の鉛直変位を式(5)によって、回転変形成分用の鉛直変位を式(4)によって求めた。

このようにして求めた曲げ変形成分( $\delta_b$ )、回転変形成分( $\delta_\theta$ )、せん断変形成分( $\delta_s$ )の全体変形に占める推移を図-7の実線で示した。せん断変形成分の全体変形に占める割合が最も大きく約半分、残りを曲げ変形と回転変形が占めている。荷重と全体変形の分離による各種変形成分との関係および荷重とウェブの対角線方向の変位によるせん断変形との関係の1例を図-10に示す。

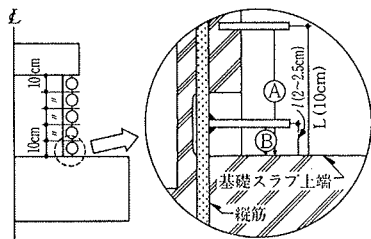


図-8 脚部鉛直変形測定詳細図

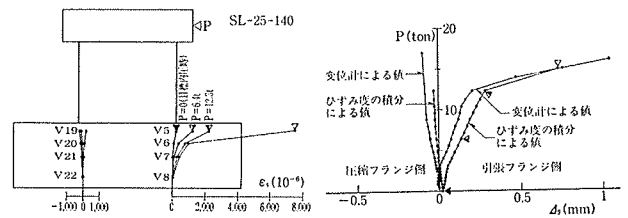


図-9 回転変形用鉛直変形測定値の比較

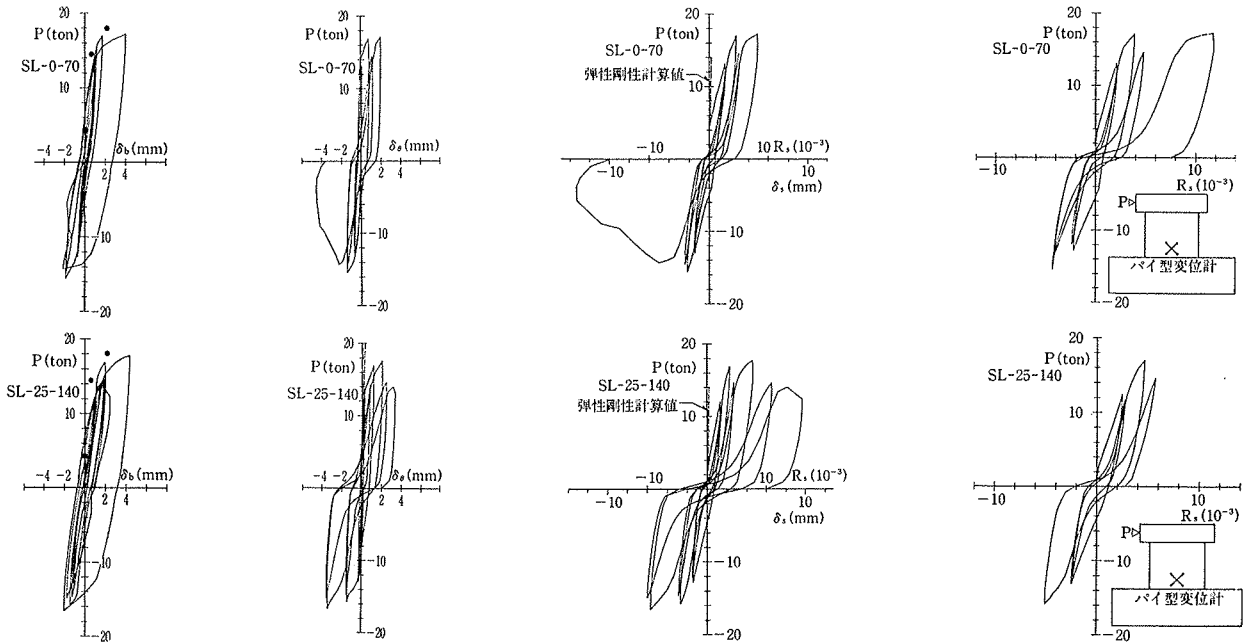


図-10 荷重と各種変形成分との関係

試験体名	鉄筋比		曲 げ						せん 断							
	縦筋 pv %	横筋 Dh %	初期曲げ剛性		降伏時曲げ剛性		初期せん断剛性		ななめひび割れ発生後のせん断剛性		ななめひび割れ発生後のせん断剛性		ななめひび割れ発生後のせん断剛性			
			実計	計	実計	計	実計	計	実計	計	実計	計	実計	計		
SL-0-85	1.32	0.85	9.64	11.2	0.86	2.19	2.46	411	1.13	0.65	0.71	0.92	1.11	0.77	0.98	0.79
SL-0-190		1.87														
SL-0-70		0.70	4.33	0.39	1.28	0.52	361	0.60	0.69	0.79	0.87					
SL-14-100		1.06	1140	2.01	0.18	0.82	0.33	246	0.37	0.69	0.88	0.78				
SL-25-140		1.38	1650	1.86	0.17	0.74	0.30	154	0.22	0.63	0.98	0.65				
SL-44-190		1.87	2130	1.98	0.18	0.95	0.39	89								

表-6 実験値と計算値の比較

\*ハイゲージによる測定値

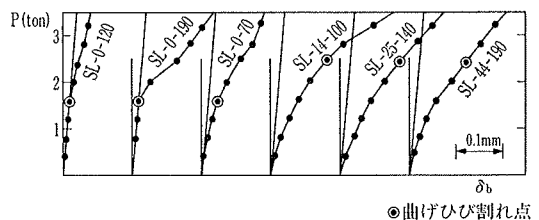


図-11 初期曲げ剛性

荷重とせん断変形との関係は、大変形時を除けば、両者で類似の結果を示していよう。

(3) 曲げ変形

P~δ<sub>b</sub> 関係の初期部分を図-11に示す。図中、実線は縦筋を考慮した弾性剛性計算値である。初期曲げ剛性は、内圧を受ける試験体の場合、計算値に比べて小さい。荷重 P<sub>bc</sub> 時の曲げ剛性(割線勾配)を表-6に示した。

円筒断面の曲げモーメントと曲率との関係を鉄筋コンクリート塑性論によって求めたのが図-12である。この関係を破線でモデル化し、モールの定量によって円筒脚部つけ根を対象にひび割れ時・降伏時・終局時の曲げ変形を求めると、図-10に示す P~δ<sub>b</sub> 関係図中の●印を得る。図より、曲げに対する復元力特性は鉄筋コンクリート塑性論で評価し得ると思われる。しかし、降伏時の変形は内圧による縦ひび割れを生じている場合、内圧を受けない試験体のそれに比べて若干大きいようである。

(4) せん断変形

初期せん断剛性を表-6に示す。弾性剛性計算値は下式で求めた。

$$P/\delta_s = GA_g / (\kappa H) \quad (\kappa = 1.99) \quad \dots\dots\dots(6)$$

初期せん断剛性実験値の計算値に対する比は内圧による横筋の初期存在応力度が大きいほど小さい。

図-13は、ななめひび割れ発生後を対象とした、P~δ<sub>s</sub> 関係を示したものである。図中の実線で表わした実験値を整理すると表-6を得る。前報のねじり試験より、ななめひび割れ発生後のねじり剛性(接線勾配)はトラス理論に基づき下式で表わせた。

$$\frac{\tau}{R} = 0.6 \frac{E_s}{4n + (1/p_v) + (1/p_H)} \quad \dots\dots\dots(7)$$

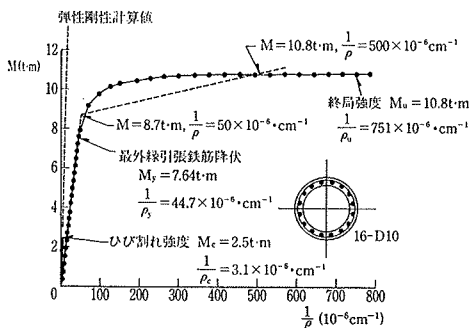


図-12 円筒断面の曲げモーメントと曲率の関係

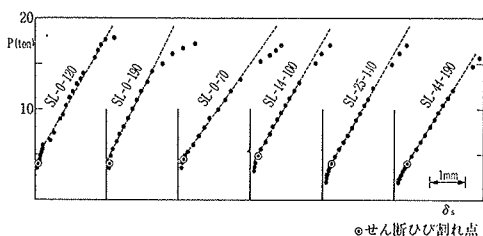


図-13 ななめひび割れ発生後のせん断剛性

水平荷重を対象として式(7)を式(8)に変換する。

$$\frac{P}{\delta_s} = \left\{ 0.6 \frac{E_s}{4n + (1/p_v) + (1/p_H)} \right\} \frac{A_g}{H} \quad \dots\dots\dots(8)$$

式(8)に対するななめひび割れ発生後のせん断剛性実験値の比は、内圧を受けない場合、平均約85%となった。従って、水平荷重に対するななめひび割れ発生後のせん断剛性は式(9)で評価できよう。

$$\frac{P}{\delta_s} = \left[ 0.5 \frac{E_s}{4n + (1/p_v) + (1/p_H)} \right] \frac{A_g}{H} \quad \dots\dots\dots(9)$$

しかし、内圧を受けて縦ひび割れを生じている場合、実験値の計算値に対する比は更に小さく、この値は内圧による横筋の初期存在応力度が大きいほど小さい。

6. まとめ

今回の水平加力試験の結果、以下のことが判明した。

- (1) 内圧に対する補強は円周方向応力度を材料の降伏応力度でもたせるように横筋比を定めれば十分と考え得る。
- (2) 曲げ耐力時の最大せん断応力度(弾性応力度分布の仮定)の2/3倍のせん断補強量(p<sub>s</sub>・σ<sub>y</sub>)を与えた試験体で、最外縁引張鉄筋降伏時の4倍の変形を確保できた。従って、設計では全補強式でせん断補強すれば十分であると考えられる。
- (3) 全体変形を各種の変形成分に分離した結果、せん断変形成分が最も多く約半分、残りを曲げ変形成分と縦筋の抜け出しによる回転変形成分が占めた。
- (4) 内圧による縦ひび割れを有する場合の初期曲げ剛性、ひび割れ発生後の曲げ剛性は内圧を伴わない場合に比べて若干低下するようであるが、曲げに対する復元力特性は実用上鉄筋コンクリート塑性論によって推定し得る。
- (5) 内圧による縦ひび割れを有する場合の初期せん断剛性、ななめひび割れ発生後のせん断剛性は内圧を伴わない場合に比べて低下する。従って、前報に示したねじり試験結果を基に定めたせん断に対する復元力特性は内圧による縦ひび割れの存在によって修正する必要がある。

この報告は断片的な検討にとどまった。次回においてこれまでのねじり試験結果、水平加力試験結果を統合した定量的検討を行なう予定である。

参考文献

- 1) 中山達雄, 武田寿一: 内圧を受ける鉄筋コンクリート円筒のねじり試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和53. 9)
- 2) 中山達雄, 大内 一, 武田寿一: 超大型サイロに関する研究(その1)—鉄筋コンクリート薄肉円筒構造物のねじり試験—, 大林組技術研究所報, No. 19, (1979)
- 3) 中山達雄: 内圧を受ける鉄筋コンクリート円筒のねじり試験(II), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和54. 9)