

超大型サイロに関する研究 (その3)

——石炭内圧を受ける薄肉円筒構造物の水平加力試験——

武田 寿一 中山 達雄
表 佑太郎

Studies on Large-scale Silos (Part 3)

——Reinforced Concrete Cylindrical Shell with Coal Pressure under Lateral Loads——

Toshikazu Takeda Tatsuo Nakayama
Yutaro Omote

Abstract

Pressure and earthquake loads govern the structural design of large-scale silos for a granular material such as coal. Therefore, torsional and lateral loading tests of models under internal water pressures have been carried out in the company, and structural behaviors of reinforced concrete cylindrical shells were fundamentally discussed. In this case, lateral loading tests of reinforced concrete cylindrical shells were performed with pressurized coal having shear resistance instead of water pressure contained. The conclusions are as follows. The load-displacement relation of the model with pressurized coal showed the large area contained in the loop in contrast to that without coal. The equivalent viscous damping coefficient was 8-11% (in case of the model without coal, approximately 5%). Shear stiffness of coal contained in the model was about 20-40 kg/cm² in the range of shear strain of 1-8,000×10⁻⁶. These values are less than those obtained in dynamic triaxial test.

概 要

石炭などの粉粒体を内容物とする大型サイロの設計では、内容物による圧力と地震荷重とが構造設計を支配する。当社では、これまでに水圧を作用させた状態でのねじり加力試験および水平加力試験を実施し、鉄筋コンクリート円筒部材の耐力と変形状態に関して基礎的検討を加えてきた。今回、水圧に換え、せん断抵抗を有する圧密状態の石炭を内容物に用いた鉄筋コンクリート円筒構造物の水平加力試験を実施した。その結果、以下のことが分かった。石炭満杯試験体の荷重～変形関係は、石炭が空の試験体に比べ、ループ面積の大きい履歴を描く。等価粘性減衰定数は約8～11%（空の場合、約5%）であった。内容物としての石炭のせん断剛性は、せん断ひずみが1～8000×10⁻⁶の範囲で、約20～40kg/cm²であった。この値は、動的三軸試験結果から得られる石炭のせん断剛性に比べ、小さい。

1. はじめに

石炭などの粉粒体を内容物とする大型サイロの設計では、内容物による圧力と地震荷重とが構造設計を支配する。当社では過去に実機石炭サイロの圧力測定や振動実験を実施し、それらの結果を考察することによって弾性設計手法を確立した。一方、大地震に対しては内圧と地震時せん断力との組合せ応力下において、弾性から塑性に至る構造体の力学的性状を明らかにしておくことが、

耐震安全性の確認を行なう上で重要である。同題（その1）²⁾と（その2）⁴⁾では、水圧による円周方向応力を与えた鉄筋コンクリート円筒模型のねじり加力試験および水平加力試験を実施し、曲げおよびせん断の基礎的破壊性状を考察した。

今回、水圧に換え、せん断抵抗を有する圧密状態の石炭を内容物とする鉄筋コンクリート円筒構造物の水平加力試験を実施した。内容物は、試験体の縮尺率を考慮した粒径の石炭をサイロ内に投入し、これに大型サイロ下

部で予想される圧密度に相当するよう上載圧を加えた。
この報告は、石炭が空の場合と石炭満杯の場合との剛性、耐力、変形などを同一試験体で比較・検討し、耐震安全性の評価のための資料を示すものである。

2. 試験体

2.1. 試験体の設計概要

試験体は、石炭が空の場合 (SP-0-100) と石炭満杯の場合 (SP-CL-100) の2体である。試験体の形状、寸法を図-1に示す。円筒部の横断面は、外径 (D) 1,534 mm, 内径 (d) 1,434 mm, 壁厚 (t) 50 mm とした。基礎スラブ上端から水平加力点までの高さ (H) は 1,337 mm である。円筒部の補強に縦横直交配筋を行ない、縦筋量を 60-D10 とした。曲げ耐力時の最大せん断応力度 (弾性応力度分布の仮定) の半分の値にせん断補強量 ($p_H \cdot \sigma_y$) を設定した。円周方向のプレストレス導入量は下式によった。

$$\frac{\text{ワイヤーの導入張力}}{\text{ワイヤーの間隔}} = \frac{K \cdot \sigma_y \cdot d}{2}$$

記号:「表-6」参照

2.2. 試験体の製作

円筒部には鋼製型枠を用いた。はじめに基礎スラブのコンクリートを、次に円筒部、さらに2週間経過した後に加力スラブのコンクリート打設を行なった。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、加力スラブ打設後、脱型して試験当日まで室内に空中放置した。

2.3. 材料の性質

円筒部のコンクリートには最大粒径 10 mm の粗骨材、2.5 mm の細骨材および普通ポルトランドセメントを用いた。コンクリートの試験結果を表-1に、補強筋の試験結果を表-2に、石炭の物理的性質を表-3および図-2に示す。図-2の傾向は通常の砂質土の試験結果と類似している。

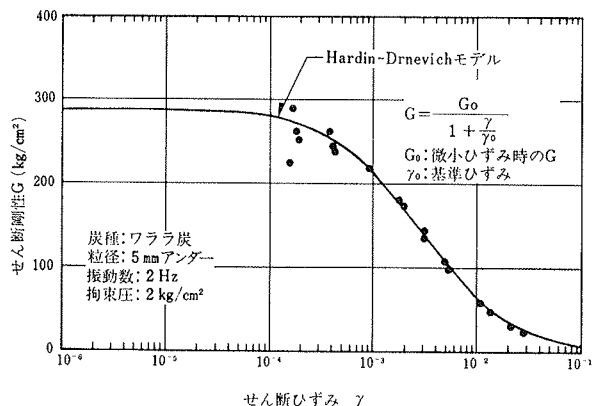


図-2 石炭の動的三軸試験結果

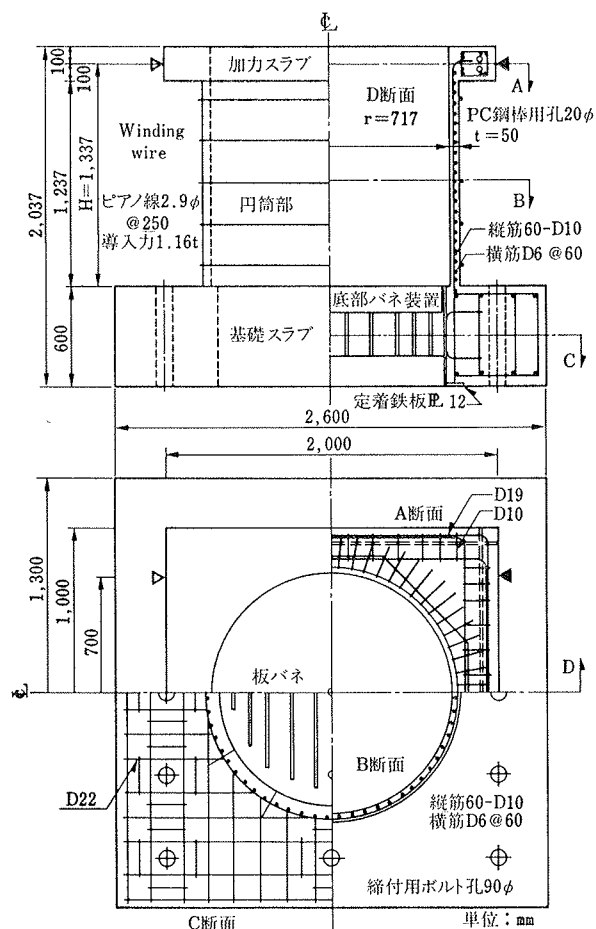


図-1 試験体の形状、寸法

スラブ	圧縮強度	割裂強度	ひずみ度	ヤング係数	ϵ_b : 圧縮強度時の値 ϵ_c : 圧縮強度の1/4における割線勾配
cm	F_c : kg/cm ²	F_t : kg/cm ²	$\epsilon_b \cdot 10^{-6}$	$E_c \cdot 10^6$ kg/cm ²	
22	405	29.6	3,340	2.21	

表-1 コンクリートの材料試験結果

種別(用途)	公称断面積	降伏点	引張強度	破断強度	ヤング係数	伸び率
	cm ²	σ_y kg/cm ²	σ_m kg/cm ²	σ_b kg/cm ²	$E_s \cdot 10^6$ kg/cm ²	$\epsilon_b \%$
2.9φ (プレストレス)	0.0665	19500*	20800		2.06	6.0
D6 (横筋)	0.317	4050	5370	3710	1.84	25.4
D10 (縦筋)	0.713	4770	6360	4210	1.78	16.4

* 残留ひずみ度0.2%に対する応力度

表-2 補強筋の材料試験結果

炭種	最大粒径	粒子比重	含水比	内部摩擦角	壁面摩擦角	ポアソン比
	mm	g/cm ³	%	ϕ_i	ϕ_w	
ワララ炭 (豪州)	25.4	1.45	8.5	40°	25°	0.47

表-3 石炭の物理的性質

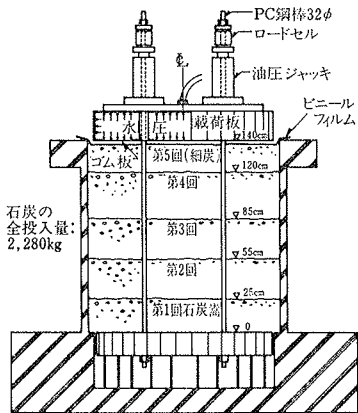


図-3 石炭の圧密方法

3. 試験方法

3.1. 石炭圧密

図-3に示すように、円筒内部の石炭は5層に分けて満杯にした。各層ごとにランマーを用いて石炭を均等に締め固めた後、石炭表面をあらし、次の層の石炭を投入した。土圧計まわりには局部的に細炭(8mmアンダー)を用いた。石炭投入完了後、上蓋(鋼製容器とゴム板からなる載荷板)を設置し、載荷板内部の水圧によって石炭に上載圧(P)を与えた。PC鋼棒の張力(F)をロードセルで測定し、上載圧を確認した。

3.2. 水平力

正および負方向の水平力は2点載荷で与えた。水平荷重の検出を全点に配置した容量100tonのロードセル(定格出力 $3,000 \times 10^{-6}$)で行なった。頂部全体変形角 $R=1 \times 10^{-3}$ を基準に、2倍ごとの変形で各2回繰返し、同 8×10^{-3} の後に破壊させた。

3.3. 測定方法

全体水平変形、円筒部最外縁鉛直変形、縦筋の抜け出し量、円周方向変形を高感度変位計で、円筒ウェブ位置のせん断変形をパイ型変位計で、円筒壁および底板部の壁面圧力を土圧計で、基礎スラブ内板バネ装置の相対水平変形をキャンチレバー型変位計で、鉄筋、PC鋼線およびコンクリート表面のひずみをW.S.G.で測定した。

3.4. 石炭が負担するせん断力の検出方法

全体水平荷重から石炭の負担するせん断力を分離するため、円筒壁内部の基礎スラブに板バネ装置を埋設した。装置は、鉄板を載荷方向に対し直角に並べ、下端を基礎スラブに、上端を円盤に固定したものである。円盤と基礎スラブとは縁が切れている。円筒試験体製作前に行なった水平バネ装置の校正の結果、バネ定数に50.0ton/mmを得た。水平バネ装置の校正係数は、円盤が基礎スラブに平行に変位するため、作用水平荷重位置の高さによって有意な差はない。

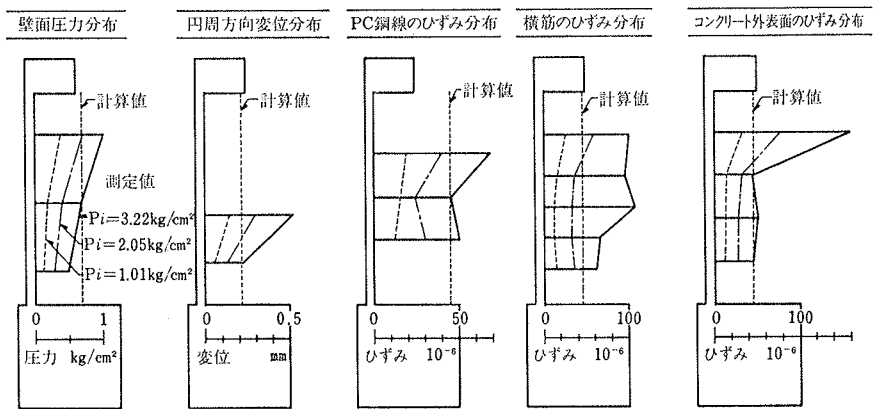


図-4 圧力、変位、ひずみ分布

4. 実験結果

4.1. 加圧時

図-4は上載圧による壁面圧力、円周方向変位およびPC鋼線、横筋、コンクリート外面の円周方向ひずみの鉛直方向分布を示したものである。上載圧による壁面圧力は載荷板に近いほど大きい。それに伴い、変位、ひずみとも一般に載荷板に近いほど大きい分布を示す。図中、下式による半無限円筒弾性計算値(円周方向変位 δ_θ 、円周方向ひずみ ϵ_θ)を点線で示した。

$$\epsilon_\theta = \frac{K \cdot \sigma_v \cdot r}{t \cdot E_c}, \quad \delta_\theta = 2\pi \cdot r_0 \cdot \epsilon_\theta$$

4.2. 加力時

表-4に、諸荷重実験値を示す。石炭満杯試験体に関する諸荷重の値は項部加力スラブに作用させた全体荷重であり、石炭の負担せん断力やPC鋼棒張力の水平成分を取除いていない。図-5に作用全体水平荷重～頂部全体水平変形関係を示す。両試験体とも、せん断ひび割れ、曲げひび割れ、フランジ脚部縦筋降伏、ウェブ横筋降伏、ウェブ縦筋降伏、PC鋼線降伏を経て最大荷重に達した。石炭満杯試験体の荷重～変形関係は、石炭が空の試験体に比べ、ループ面積の大きい履歴を描く。図-6に示すように、石炭満杯試験体の等価粘性減衰定数(h_0)は約8~11%(空の場合、約5%)である。図-7に両試験体のひび割れ進展状況を示す。

試験体名		曲げひび割れ荷重	せん断ひび割れ荷重	最外縁脚部縦筋降伏荷重	ウェブ横筋降伏荷重	ウェブ縦筋降伏荷重	PC鋼線降伏荷重	最大荷重
		Qbc	Qsc	Qfvy	Qwhy	Qwvy	Qwpy	
SP-0-100	正	18.0	15.9	56.3	61.6	77.1	78.5	88.9
	負	-13.8	-19.8	-56.0				
SP-CL-100	正	19.9	18.0		55.3	85.3	85.3	85.3
	負	-21.9	-21.9	-67.8				

単位: ton

表-4 実験結果

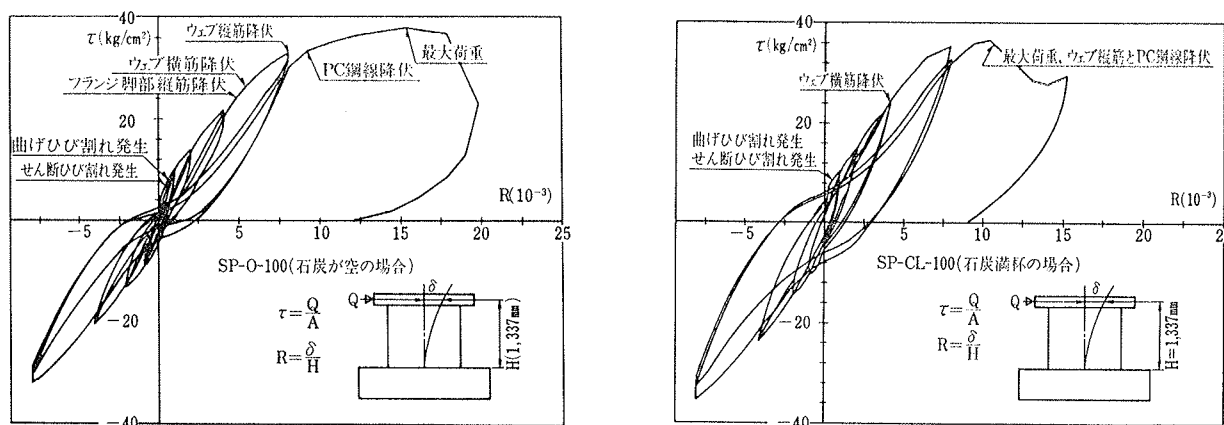


図-5 全体水平荷重～頂部全体水平変形関係

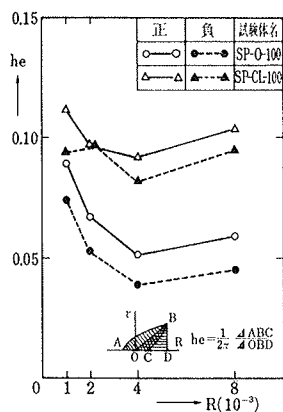


図-6 等価粘性減衰定数の推移

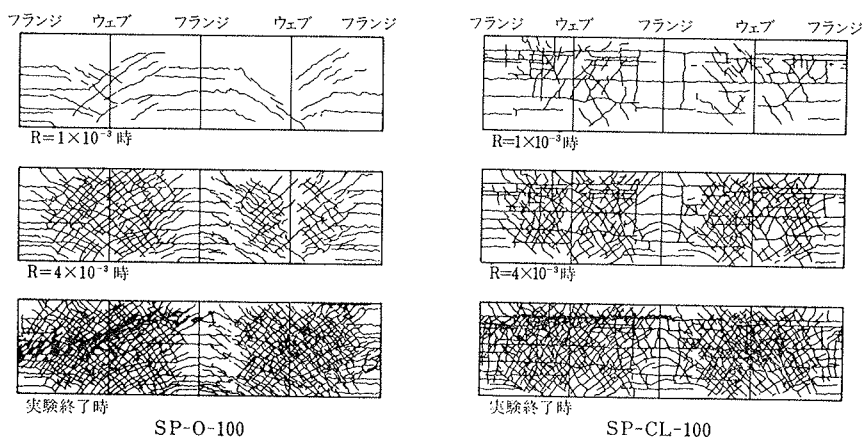


図-7 ひび割れ進展状況

5. 考察

5.1. 作用全体水平荷重の補正

水平バネ装置から検出した石炭負担せん断力と頂部全体水平変形との関係を図-8に示す。最大荷重時の頂部全体水平荷重 85.3 ton のうち、石炭の負担せん断力 (Q_0) に 2.3 ton が得られた。各ループのピークを結ぶ直線の勾配を求めると、表-5を得る。内容物としての石

炭のせん断剛性は、せん断ひずみが $1 \sim 8,000 \times 10^{-6}$ の範囲で、約 $20 \sim 40 \text{ kg/cm}^2$ である。この値は、図-2に示す動的三軸試験結果における同ひずみレベルに比べ、小さい。また、PC鋼棒が試験体と一体に変形するものとしてPC鋼棒張力の水平成分 (Q_p) を求めると、最大荷重時で 0.5 ton が得られた。図-9は、頂部全体水平荷重から Q_0 および Q_p を除いた場合である。荷重～変形関係は、両試験体で、良く近似している。

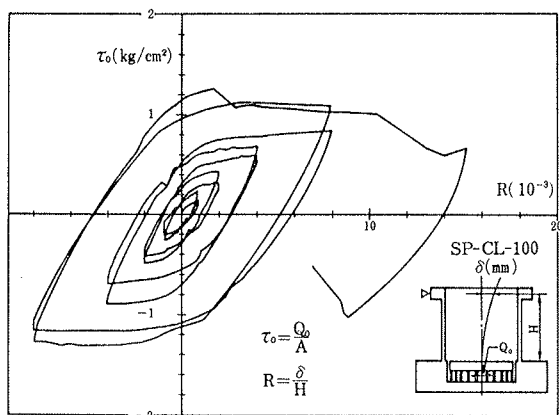


図-8 石炭の負担せん断力～頂部全体水平変形関係

R (10 ⁻³)		第1サイクル時		第2サイクル時		G₀ (kg/cm²)	
		Q₀ (ton)	R (10 ⁻³)	Q₀ (ton)	R (10 ⁻³)	第1サイクル時	第2サイクル時
1	正	0.34	0.90	0.55	0.88	26	39
	負	0.44	0.97	0.59	0.93		
2	正	0.75	1.95	1.02	1.95	27	34
	負	0.98	2.02	1.15	2.02		
3	正	1.39	3.98	1.62	4.07	23	28
	負	1.63	4.02	2.09	4.04		
4	正	1.95	7.96	2.54	7.91	18	21
	負	2.70	7.99	2.98	8.01		

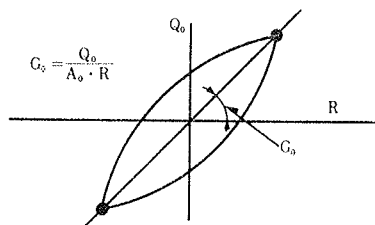


表-5 石炭のせん断剛性

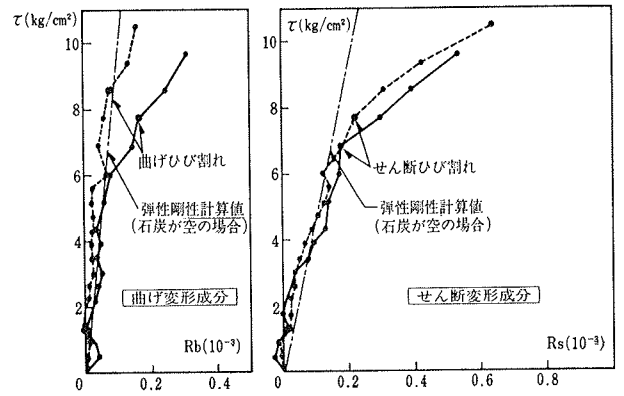
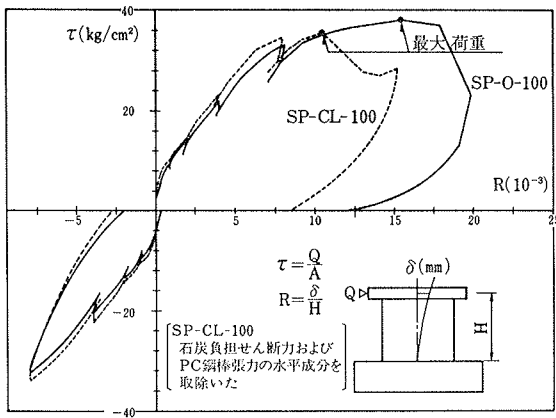


図-9 水平荷重(補正後)～頂部全体水平変形関係の比較

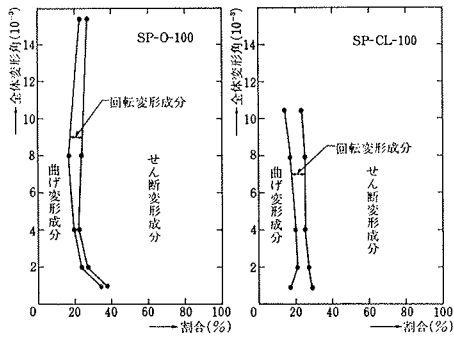


図-10 各種変形成分の推移

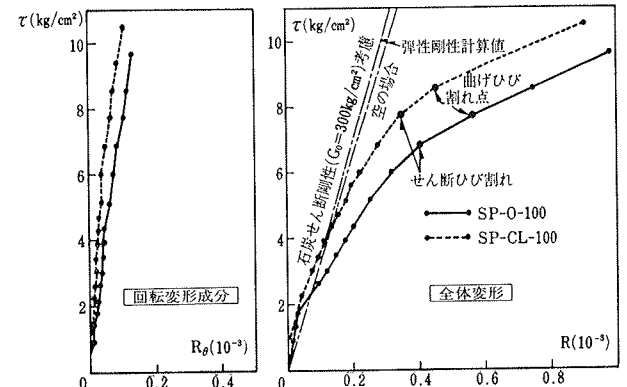


図-11 初期剛性

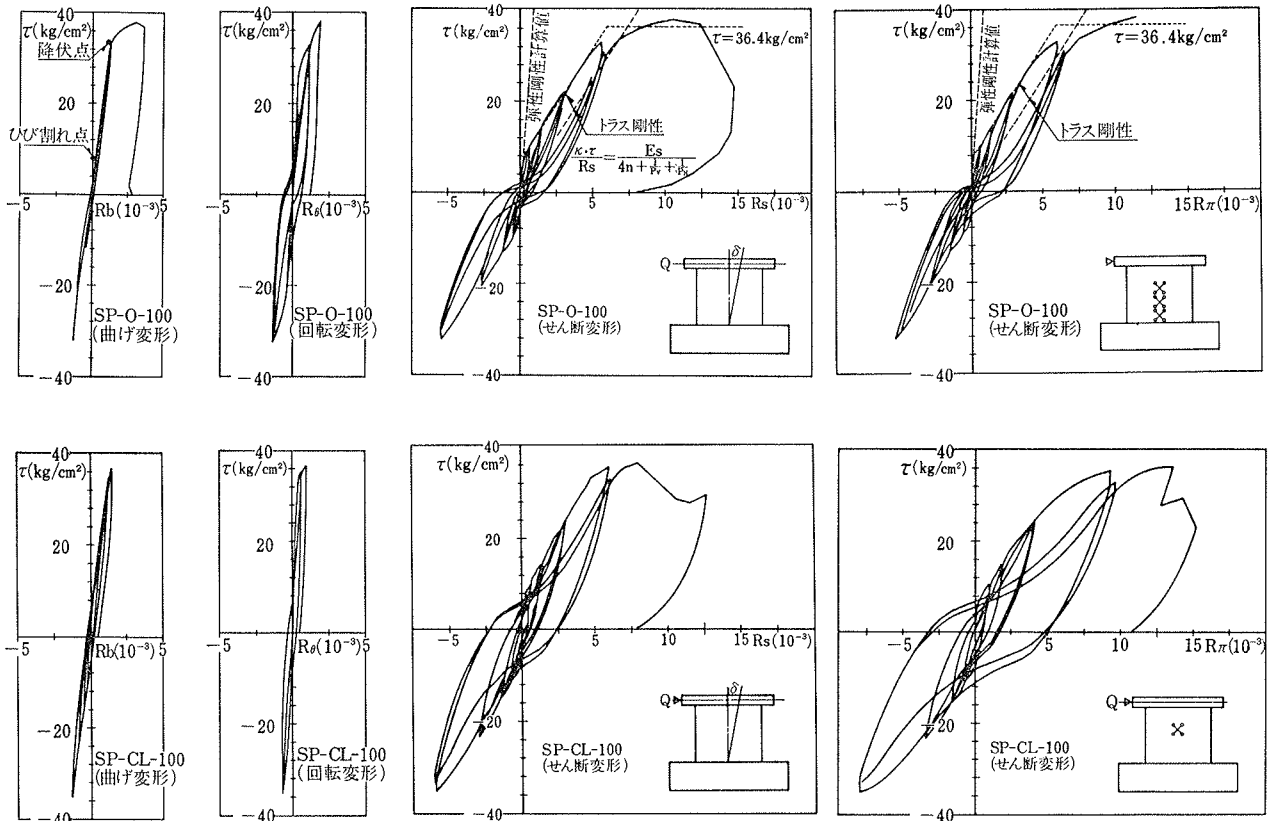


図-12 荷重～各種変形成分関係

5.2. 復元力特性

頂部全体水平変形から曲げ変形成分および回転変形成分（縦筋の基礎スラブからの抜け出しとめり込みによる変形成分）を除いたものをせん断変形成分とみなし、全体変形に占める各種変形成分の推移を図-10に示す。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70%，残りを曲げ変形と回転変形が占める。荷重～各種変形成分関係の初期部分を図-11に示す。図中、弾性剛性計算値を一点鎖線で示した。石炭が空の場合、初期曲げ剛性およびせん断剛性は弾性理論でほぼ評価できた。石炭満杯試験体の初期剛性は、石炭が空の場合より若干大きい。

図-12に示すように、荷重～せん断変形成分関係は大変形時を除けば、両者で類似の結果を示す。前報までの検討により、ななめひび割れ発生後のせん断剛性（接線勾配）はトラス理論で表わせた。弾性剛性理論値および表-6に示したななめひび割れ荷重と最大荷重計算値を用いると、荷重～せん断変形関係はトラス理論によって近似できた。また、円筒断面の曲げモーメント～曲率関係を鉄筋コンクリート塑性論（e関数法）によって求め、モールの定理によってひび割れ時、降伏時の曲げ変形を求めると、図-12に示す図中の●印を得る。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えよう。

項目	計算値	SP-O-100		SP-CL-100	
		実験値	実/計	実験値	実/計
曲げひび割れ荷重 Qbc(ton)	18.4 ⁽¹⁾	18.0	0.98	19.7	1.07
		-13.8	0.75	-21.4	1.16
せん断ひび割れ荷重 Qsc(ton)	18.8 ⁽²⁾	15.9	0.85	17.8	0.95
		-19.8	1.05	-21.4	1.14
最外縁脚部縦筋降伏荷重Qfvy(ton)	73.5 ⁽³⁾	56.3	0.77		
		-56.0	0.76	-64.8	0.88
ウェブ横筋降伏荷重 Qwhy(ton)		61.6	0.80	53.7	0.70
ウェブ縦筋降伏荷重 Qwvy(ton)	76.7 ⁽⁴⁾	77.1	1.01	82.4	1.07
PC鋼線降伏荷重 Qwpy(ton)		78.5	1.02	82.4	1.07
最大荷重 Qmax(ton)	84.7 ⁽⁵⁾	88.9	1.05	82.4	0.97

- (1) $Qbc = F \cdot t \cdot Z / H$ (2) $Qsc = 0.8 \sqrt{F_c} \cdot A / x$
 - (3) 鉄筋コンクリート塑性論(e関数法)による。
 - (4) $Qwy = \frac{P_v \cdot \sigma_y + (P_H \cdot \sigma_y + P_r \cdot \sigma_y)}{2} \cdot \frac{A}{x}$
 - (5) $Qsu = 4tr_o \cdot \cos \theta \cdot \tau_u$ (東大提案式)
 $\tau_u = \frac{KuKp(180 + Fc)0.115}{Qd} + \frac{P_w \cdot \sigma_y + 2.7 \sqrt{P_w \cdot \sigma_y}}{2} + 0.115$
- 記号
 A : 円筒壁の水平断面積(2,330cm²)
 A_o : 円筒壁の内部面積(16,140cm²)
 K : $\tan^2(45^\circ - \frac{\phi_i}{2}) \rightarrow 0.217$
 P_i : 上載圧
 P_H : 横筋比
 P_v : PC鋼線の鉄筋比
 P_v : 縦筋比
 P_w : P_H + P_v
 r : 円筒壁内法半径(71.7cm)
 r_o : 円筒壁芯半径(74.2cm)
 Z : 円筒壁の断面係数(83,100cm³)
 x : 2.0
 σ_v : 石炭の圧密応力度
 φ_i : 石炭の内部摩擦角(40°)

表-6 実験値と計算値の比較

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) 石炭満杯試験体の荷重と変形の関係は、空の試験体のそれに比べ、ループ面積の大きい履歴を描く。石炭満杯試験体の等価粘性減衰定数は約8~11%（空の試験体の場合、約5%）であった。
 - (2) 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70%，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。
 - (3) 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（e関数法）によって、せん断に対する復元力特性はトラス理論によって、それぞれ推定し得た。
 - (4) 曲げ耐力時の最大せん断応力度（弾性応力度分布の仮定）の半分のせん断補強量（ $p_H \cdot \sigma_y$ ）を与えた石炭が空の試験体で、最外縁引張鉄筋降伏時の3.7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。
 - (5) せん断終局耐力は、東大提案式によって精度良く評価できた。
 - (6) 石炭負担せん断力～せん断変形角関係の正負のピークを結ぶ直線の勾配から求めたせん断剛性は、 $R = 1 \sim 8,000 \times 10^{-6}$ の範囲で、約20~40 kg/cm²であった。この値は、粒径5mmアンダーで実施した動的三軸試験結果の同ひずみレベルに相当する石炭のせん断剛性に比べて小さく、設計との対応については今後検討を要する。

参考文献

- 1) 中山, 武田: 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), pp. 1837~1838
- 2) 中山, 大内, 武田: 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一, 大林組技術研究所報, No. 19, (1979), pp. 1~6
- 3) 中山: 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), pp. 1391~1392
- 4) 武田, 中山, 大内: 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一, 大林組技術研究所報, No. 24, (1982), pp. 17~23
- 5) 武田, 中山: 内圧を受ける鉄筋コンクリート円筒の水平加力試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和57.10), pp. 1639~1640