

## 模型石炭サイロの振動実験と解析

杉田 稔  
横田 治彦  
三田 彰  
(大崎研究室)

### § 1. 目的

石炭サイロは、石炭を貯蔵するための大型構造物であり、大規模なものは直径約50m、高さ約70mにも達するものが計画されている。このような大型構造物の地震時挙動を把握し耐震設計に生かすために、石炭サイロ模型の振動実験を実施した。石炭サイロの地震時挙動を考える上で重要な点として、

- (1)サイロ本体の振動性状の把握（円筒シェルとしての振動性状）
- (2)内容物の石炭の動的性質の把握
- (3)サイロ稼動時などに石炭が偏荷重となる場合の地震時挙動の把握
- (4)サイロ本体と内容物の石炭、基礎・地盤との動的相互作用の検討

などの項目を挙げることができる。これらの問題点は、石炭サイロの動的解析、振動実験、地震観測など各種の実験により解明する必要があると考えられる。模型石炭サイロの振動実験は、耐震設計上の基本的な問題点を抽出、整理するために実施したもので、実物の約1/30に相当するアクリル樹脂製模型を大型振動台上に固定して実験を行なった。

振動実験により、上記項目の(1), (2), (3)を中心に検討し、実験結果と数値解析によるシミュレーション解析結果の比較・検討により解析方法の妥当性を確認した後、実物サイロの振動性状を推定する。

### § 2. 実験概要

模型石炭サイロの振動実験は、以下の4実験からなっている。

#### (i)模型石炭サイロ(空)の振動実験

サイロ本体の振動性状(円筒シェルとしての振動性状)を把握し、模型サイロの振動実験結果と数値解析による

固有値の比較によって解析モデル、解析精度の検討を行なう。実験は「フタなし」と「フタ付」の場合について行なう。

#### (ii)模型石炭サイロ(満載)の振動実験

サイロ中に石炭が入った場合の振動性状の把握、数値解析との比較を目的とし、有効質量の推定、加速度分布、粉体圧分布、ひずみ分布などについて検討する。

#### (iii)石炭が偏荷重となる場合の検討

稼動時などで、サイロ内の石炭が片積みの状態となっている時に地震が起きた場合の、サイロおよび石炭の挙動を調べる。加速度分布、粉体圧分布、ひずみ分布などを調べる。

#### (iv)石炭およびアクリル樹脂の材料試験

石炭の動的性質、静的性質、アクリルの動的性質を調べる。

#### 2.1 模型概要

模型サイロの設計に当って、次の方針に従った。

- ・模型の形状はできるだけ簡単な形とし、数値解析によるシミュレーション結果と比較し易くする。
  - ・屋根部分はフラットな「フタ」に置換し、円筒シェル部分の肉厚な高さ方向に変化しないものとする。
  - ・模型底板はサイロ側板と一体となるように接着し、振動台へ固定する場合は十分な固定度を持つように工夫する。
  - ・模型に取付ける加速度計、土圧計はできるだけ小さなものをとし、振動性状に与える影響を小さくする。
  - ・模型サイロはアクリル樹脂製とし製作精度を高める。
  - ・内容物は石炭(ニューキャッスル炭)とし、実物サイロとの縮尺率を考慮して粒径は2mm以下とする。
  - ・模型の大きさは、想定される石炭サイロの約1/30とし直径、高さともに1.5mとする。シェルの厚さは15mmとする(容量2.65m<sup>3</sup>)。
- 図-1に模型の概要を示す。  
模型の振動諸元に関する縮尺率を以下に検討する。固

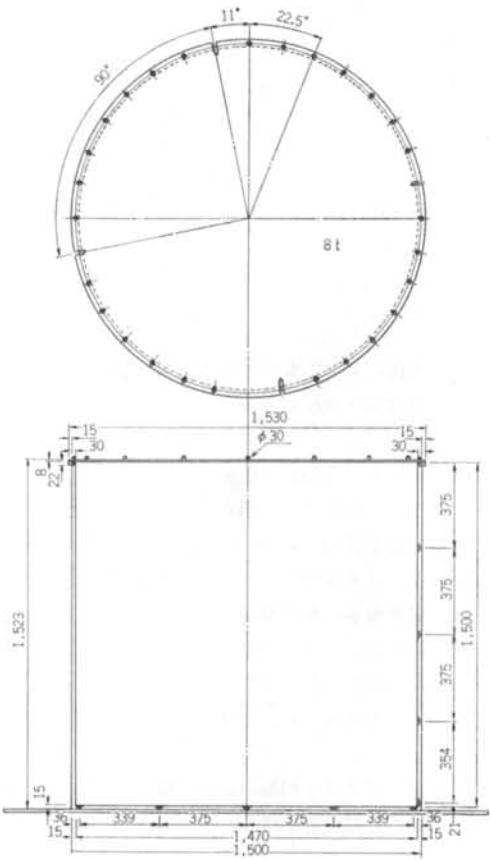


図-1 模型全体図

有振動数に関する式(1)に式(2)を代入して、振動数の縮尺率に関する基本式(3)を得る。

$$f = \frac{1}{T} \propto \sqrt{\frac{K}{m}} \quad \dots \dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} K &\propto E \cdot L \\ m &\propto \rho \cdot L^3 \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots (2)$$

ここに、 $f$ ：固有振動数、 $T$ ：固有周期、

$K$ ：パネ定数、 $m$ ：質量、

$E$ ：ヤング係数、 $\rho$ ：密度、 $L$ ：長さ

$$\lambda_f = \frac{1}{\lambda_L} \sqrt{\frac{\lambda_E}{\lambda_p}} \quad \dots \dots (3)$$

ここに、 $\lambda_f$ ：振動数の縮尺率

$\lambda_L$ ：長さの縮尺率

$\lambda_E$ ：ヤング係数の縮尺率

$\lambda_p$ ：密度の縮尺率

模型サイロの縮尺率  $\lambda_L$  を  $1/30$  とし、実物サイロを鉄筋コンクリート製とすると、空の場合の縮尺率は、

$$\lambda_E = 4.8 \times 10^4 / 2.1 \times 10^5 = 0.23$$

$$\lambda_p = 1.19 / 2.4 = 0.50$$

$$\lambda_f = 20.4$$

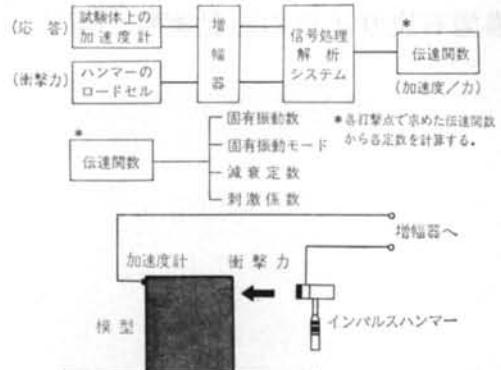


図-2 衝撃荷重による自由振動実験概要

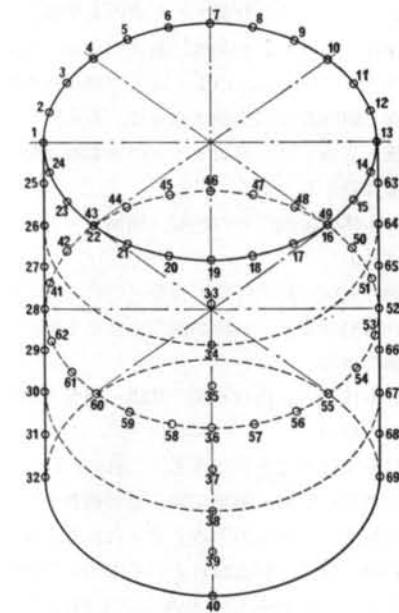


図-3 自由振動試験時の測定点(測定は全て半径方向)となる。

アクリル樹脂は温度により弾性係数が変化するため、実験時の温度を記録する。また、アクリルの角棒の自由振動試験により、動弾性係数の温度依存性を調べることとした。

## 2.2 振動実験法

### (1) 衝撃荷重による自由振動試験(インパルスハンマ試験)

模型サイロが空の場合の振動試験は、円周方向の高次振動モードを含めてできるだけ多くの固有値を確認するために、インパルスハンマによる自由振動実験を行なった。先端にロードセルを装着したハンマにより模型を打撃し、ロードセルによって検出される加振力波形と、模

型に取付けた加速度計による自由振動波形を同時測定する。（自由振動波形／加振力波形）の伝達関数を周波数解析によって求めて、これを打撃点（測定点）の伝達関数とする。加速度計のある点に固定したまま打撃点を順次移動して、全ての測定点の伝達関数を求める。

図-2に衝撃荷重による自由振動実験の概要を示す。このようにして得られた各測定点の伝達関数（加速度／力）は、相反定理により、打撃点を固定して加速度計を順次移動して求めた伝達関数（加速度／力）に等しい。

伝達関数の計算はFFT（高速フーリエ変換）を用いた周波数解析により行なう。伝達関数  $H(f)$  とコヒーレンス関数  $r^2$  は、

$$H(f) = G_{yx}(f)/G_{xx}(f) \quad \dots\dots(4)$$

$$r^2 = \frac{|G_{yx}(f)|^2}{G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)} \quad \dots\dots(5)$$

ただし、  $G_{xx}(f)$ ：入力のパワースペクトル

$G_{yy}(f)$ ：応答のパワースペクトル

$G_{yx}(f)$ ：入力と応答のクロススペクトルによって与えられる。伝達関数の計算に当って10回の打撃を行ない、10回のスペクトルを計算して平均した後に伝達関数を求めて精度を上げている。周波数範囲は0～

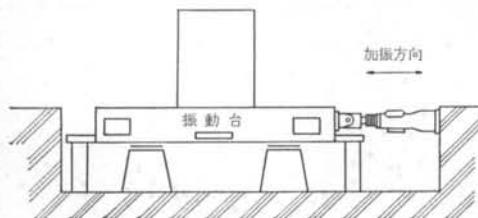


図-4 振動台による強制振動実験概要

400 Hzとした。

図-3に自由振動試験時の測定点の配置を示す。各測定点を打撃する際の加振方向は、全て放射方向である。

## (2) 振動台による強制振動実験

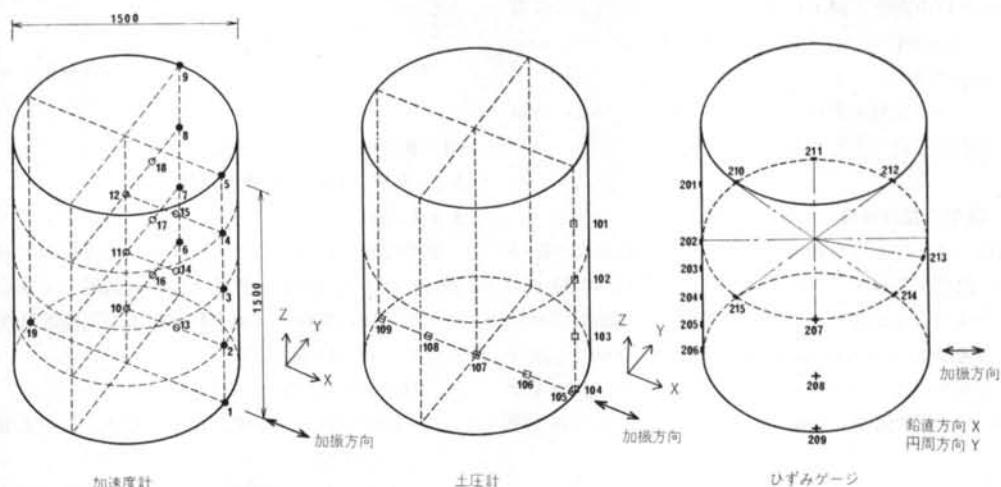
### A. 振動台による定常ランダム加振実験

インパルスハンマによる自由振動試験では、局部振動モードや高次振動モードは検出しやすいが、サイロ全体の並進モードは検出しにくい。また、サイロに石炭を入れた状態では長時間加振すると、中の石炭が振動で圧密され全体としての振動性状が変化する。そこで、サイロが空の状態と石炭満載の状態で振動台による定常ランダム加振実験を行なった。ランダムノイズ発生器によって発生させたホワイトノイズを振動台の入力波形として、振動台をランダム加振し、この時の各測定点の応答を測定する。振動台の加速度波形を入力として、各測定点で得られた応答との伝達関数を計算する。伝達関数の計算に当って、20回のスペクトルを平均して計算を行なっている。周波数範囲は0～200 Hz（空の時）、0～100 Hz（満載時）とした。振動台の最大加速度は約200 galとした。

図-4に振動台による強制振動実験の概要を示す。図-5に加速度計、土圧計、ひずみゲージの配置を示す。

### B. 振動台による正弦波加振実験

正弦波加振実験は、振動台の加速度をほぼ一定に保ち、加振振動数を徐々に変化させる。それぞれの加振振動数において、振動台の加速度に対する模型各部の応答曲線（增幅率、位相）を求める。正弦波加振は石炭満載時のみとし、振動台の加速度振幅は約50 galとした。加振振動数範囲は10～30 Hzとし、振動数ピッチは1 Hzとした。ただし、共振振動数付近は0.5 Hzピッチと



項目	物理的性質	備考
比重	1.19	25°C
ヤング係数	$3 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	20°C
ボアソン比	0.35	-25°C ~ -50°C
引張強度	760 kg/cm <sup>2</sup>	
曲げ強度	1,050 kg/cm <sup>2</sup>	
圧縮降伏強度	1,260 kg/cm <sup>2</sup>	
せん断強度	630 kg/cm <sup>2</sup>	
硬度	M-100	ロックウェルMスケール
線膨脹係数	$7 \times 10^{-5} \text{ cm/cm}^2/\text{°C}$	
吸水率	0.3%	常温浸漬24時間

表-1 アクリライトの物理的性質

した。測定は加速度と土圧について行ない、ひずみは共振点付近のみ記録した。

#### C. 振動台による実地震波加振

石炭満載時と偏載荷重となる場合の検討では、振動台による実地震波加振を行なった。加振波形は El Centro 1940 NS の記録をそのまま用い、波形の最大加速度を変化させた。

### § 3. 材料試験

#### 3.1 アクリルのヤング係数

模型サイロに用いたアクリル樹脂の物理的性質を表-1に示す。

振動実験は室温 7°C ~ 12°C の範囲で行なったので、この温度範囲においてヤング係数の温度依存性、周波数依存性についても検討した。

角棒の自由振動試験から求めたアクリルのヤング係数は、気温 8.5°C で  $4.93 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、12.5°C で  $4.83 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$  であり、その差は約 2% である。したがって、模型サイロの振動実験時のアクリルのヤング係数はほぼ一定と考えて良いと思われる。

#### 3.2 模型の製作精度

円筒シェルのような構造物の場合は、製作精度が振動性状に影響を及ぼす。したがって、出き上がった模型についても精度を確認した。サイロ模型の実測結果では、側壁の板厚は平均 16.36 mm (標準偏差 0.30 mm) と設計値より約 9% 厚くなっていた。円筒上端の内径は平均 732.6 mm (標準偏差 1.9 mm) で、真円度はかなり良い模型といえる。

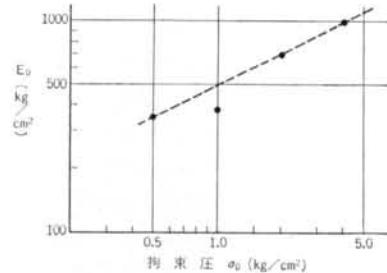


図-6 拘束力と初期ヤング率の関係

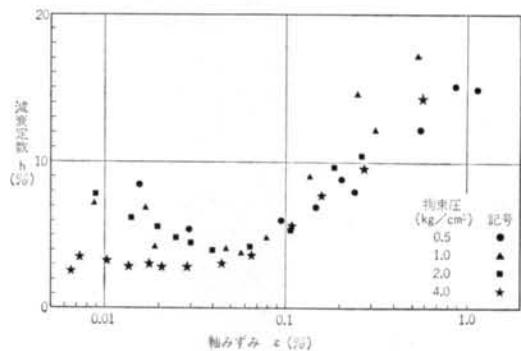


図-7 10サイクル平均の  $\bar{h}$ ~ $\varepsilon$  関係

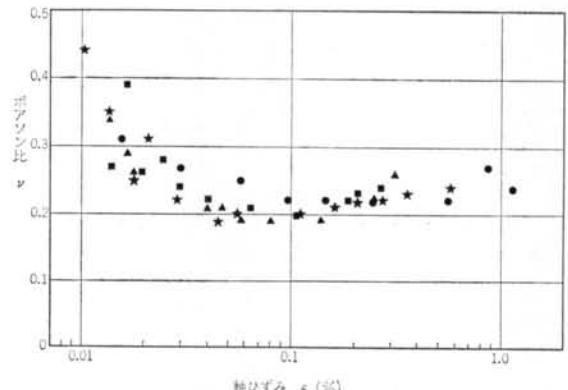


図-8 10サイクル平均の  $\bar{\nu}$ ~ $\varepsilon$  関係

#### 3.3 石炭の動的粉体物性試験

##### 3.3.1 概要

模型実験に使用したニューキャッスル炭の動的性質を明らかにするために、動的三軸圧縮試験を実施した。特に、不飽和石炭粉の非線形特性および周波数特性の把握を目的としている。

試験内容を以下に示す。

- 物理試験：含水率、比重、粒度、相対密度、単位体積重量
- 動的三軸圧縮試験：拘束圧  $\sigma_0$  と加振周波数を各 4段階とし、軸ひずみレベルは  $5 \times 10^{-5}$  から 1

周波数 (Hz)	軸ひずみ ε(%)	ヤング率 E(kg/cm²)	減衰定数 h(%)	ポアソン比 ν
0.1	0.0242	332	4.4	0.20
0.5	0.0272	334	3.3	0.21
1.0	0.0285	335	3.5	0.22
5.0	0.0248	347	2.7	0.24

表-2 周波数特性試験結果

	単位体積重量 (g/cm³)	せん断波速度 (m/sec)	せん断弾性係数 (kg/cm²)
ランダム加振前	0.724	94	65
ランダム加振後	0.740	111	93

表-3 弹性波試験結果

 $\times 10^{-2}$ とした。

- $\sigma_0 = 0.5 \text{ kg/cm}^2, 1 \text{ Hz, 正弦波}$
- $\sigma_0 = 1.0 \text{ kg/cm}^2, 1 \text{ Hz, 正弦波}$
- $\sigma_0 = 2.0 \text{ kg/cm}^2, 1 \text{ Hz, 正弦波}$
- $\sigma_0 = 4.0 \text{ kg/cm}^2, 1 \text{ Hz, 正弦波}$
- $\sigma_0 = 1.0 \text{ kg/cm}^2, 0.1 \text{ Hz, } 0.5 \text{ Hz, } 1 \text{ Hz, } 5 \text{ Hz, 正弦波}$

### 3.3.2 動的三軸圧縮試験結果

動的三軸圧縮試験結果をまとめて以下に示す。以後述べる軸ひずみは、圧縮・引張の両振幅のひずみとする。

#### (1) ヤング率のひずみ依存性

図-6に、各ステージ10波の平均値でEとεの関係を示す。図-6には拘束圧と初期ヤング率の関係を示したが、 $\sigma_0=1.0 \text{ kg/cm}^2$ の結果を除いて対数グラフ上で直線により回帰することができる。ここで、回帰式は以下のように表わせる。

$$E_0 = 495\sigma_0^{0.504}$$

#### (2) 減衰定数のひずみ依存性

ステージごと10波の平均値で軸ひずみεと減衰定数hの関係を図-7に示す。今回の試験において、拘束圧0.5, 1.0, 2.0 kg/cm<sup>2</sup>の減衰定数が $\varepsilon = 3 \times 10^{-2}\%$ 以下の微小なひずみ領域ではばらついているが、小ひずみ領域では $h = 3 \sim 4\%$ の値でほぼ一定値を示し、その後ひずみの増大とともに $\varepsilon = 7 \times 10^{-2}\%$ 付近から急激に大きくなっている。

#### (3) ポアソン比のひずみ依存性

図-8に、軸ひずみ $1 \times 10^{-2}\%$ 以上のポアソン比を各ステージ10波の平均で示す。軸ひずみが $5 \times 10^{-2}\%$ 以下のポアソン比は、横ひずみ計の精度が悪く、ノイズレベルの相対的な増加のため実際より大きく評価しているものと思われる。ポアソン比は、各拘束圧による差は見られず0.19から0.25と小さな値である。

#### (4) 繰返し回数とヤング率・減衰定数・ポアソン比の関係

ヤング率に関しては、繰返し回数による変化はほとんど見られないが、減衰定数は繰返し回数の増加に従い小さくなる傾向がある。ポアソン比はばらつきも大きく、繰返し回数に対する明確な傾向を見い出すことはできなかった。

#### (5) 周波数特性

各周波数10波の平均値を表-2に示す。表-2で見られるように、軸ひずみをほぼ同一とみなすと、ヤング率・減衰定数・ポアソン比に関しては周波数特性を見い出すことはできない。

#### 3.3.3 弹性波試験

石炭満載時に、石炭中に埋設した加速度計を利用して石炭の弾性波試験を実施した。石炭表面上に約20cm角の木材を置き、かけやで材木を水平に打撃し、発生したせん断波の伝播速度を測定した。測定に使用した加速度計は、石炭表面から37.5cm, 75cm, 112.5cmの3個で、これらの記録波形から波動伝播のタイムラグを読み取り伝播速度に換算した。測定は、模型サイロに石炭を投入した直後と、定常ランダム加振実験を行なった直後の2回行なった。結果を表-3に示す。

定数ランダム加振後は中の石炭が圧密され、剛性が約40%増加している。

### 3.4 石炭の静的粉体物性試験

振動試験に用いた試料石炭は、2.1で述べたように模型サイロの縮小寸法比に等しく、最大粒子径60~70mmの石炭を想定して最大粒子径を2mm以下とした。

試験に用いた石炭はオーストラリア産の瀝青炭で、ニューキャッスル炭と呼ばれる。振動試験に用いた石炭の静的な粉体物性を把握すべく、石炭のせん断特性（内部摩擦角）を中心に以下に述べる各種の試験を行なった。

#### 3.4.1 石炭の含水率

振動試験に用いたサイロ内に積付けされた石炭について、投入状態の含水率についてと、振動試験に使用したモデルサイロが直径1,500mm、高さ1,500mmと大きかったので、振動試験後サイロの上部、中部、下部の三部位について位置による含水率の違いについても検討した。

$$\text{投入時含水率 } w = 8.36\%, \sigma_{n-1} = 0.50\%$$

#### 振動試験後含水率

$$\text{上部 } w = 7.72\%, \sigma_{n-1} = 0.14\%$$

$$\text{中部 } w = 7.27\%, \sigma_{n-1} = 0.11\%$$

$$\text{下部 } w = 7.18\%, \sigma_{n-1} = 0.07\%$$

#### 3.4.2 石炭の粒度分布

試料石炭の粒度分布について、日本粉体工業技術協会石炭物性小委員会で検討された標準乾燥法により乾燥さ

ふるいサイズ ( $\mu$ )	残 留 率 (%)	加積残留率 (%)	加積通過率 (%)
1,410	4.03	4.03	95.97
1,000	13.44	17.47	82.53
710	12.27	29.74	70.26
500	17.93	47.67	52.33
350	20.14	67.81	32.19
250	17.41	85.22	14.78
177	8.95	94.17	5.83
	5.85	100.02	

表-4 試料石炭粒度分布測定結果

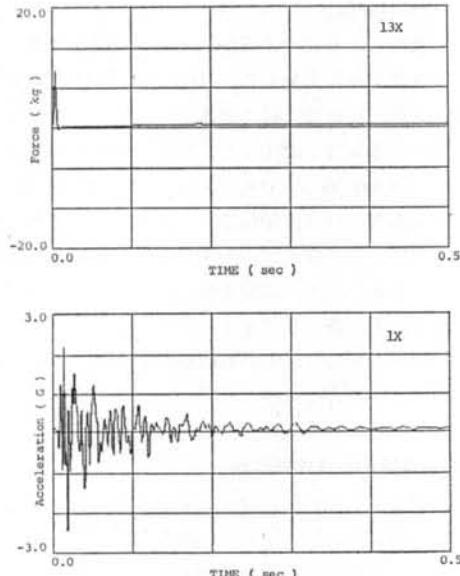


図-9 測定点No.13の加振力波形と測定点No.1の加速度波形  
せた試料により測定した。この乾燥方法は、 $107 \pm 2^\circ\text{C}$ で  
2時間乾燥させたものである。測定は3回行なって、そ  
の平均で表わす。試験結果を表-4に示す。

### 3.4.3 石炭の内部摩擦角

三軸圧縮試験法により、試料石炭の内部摩擦角の測定を行なった。振動実験に用いた石炭から試料を採取したが、三軸試験時の含水率測定値は8.36%であった。

供試体は直径が約50mm、高さは約100mmである。試験は圧密、排気、ひずみ制御方式にて加力し、拘束圧を最大値 $2.0 \text{ kg/cm}^2$ まで、 $0.5 \text{ kg/cm}^2$ ピッチに4段階にて試験した。

## § 4. 振動実験結果

### 4.1 模型石炭サイロ(空)の振動実験

#### 4.1.1 フタなし時のハンマリング試験結果

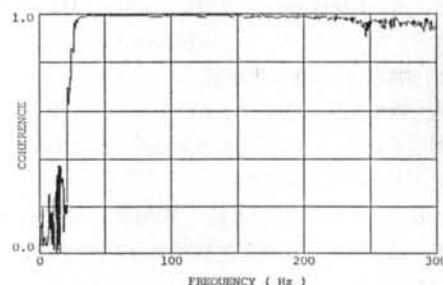
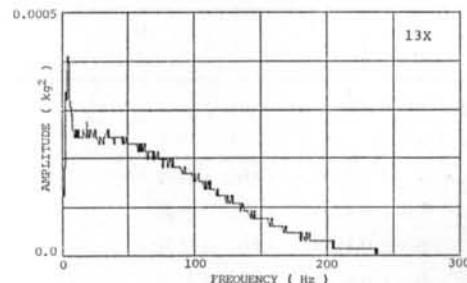
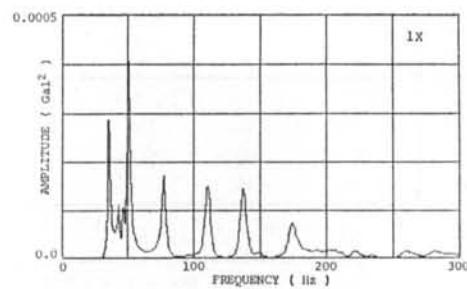


図-10 加速度応答(1x)と加振力(13x)のパワースペクトル  
とコヒーレンス

図-3に示す測定点No.1に加速度計を固定して基準点とし、この点と他の測定点(打撃点)間の伝達関数を求めた。図-9は、測定点No.13を打撃した時の加振力波形と測定点No.1の加速度応答波形を示している。図-10は測定点No.1の加速度波形のパワースペクトル、測定点No.13の加振力波形のパワースペクトルと両波形のコヒーレンス関数を示している。コヒーレンス関数は25Hz～300Hzまではほぼ1となっており、実験結果が良好であることを示している。図-11に $13x/1x$ の伝達関数を示す。振幅比がピークを示している振動数が固有振動数である。このような伝達関数を全ての測定点について求めた。

$13x/1x$ の伝達関数を用いて固有振動数、減衰定数、刺激係数を未知数として多重回帰分析を行ない、各次の固有振動数、減衰定数、刺激係数を求める。

多重回帰分析の結果、300Hz以下に合計14の固有値が存在していることが判明した。減衰定数は約1～3.5%と小さい。

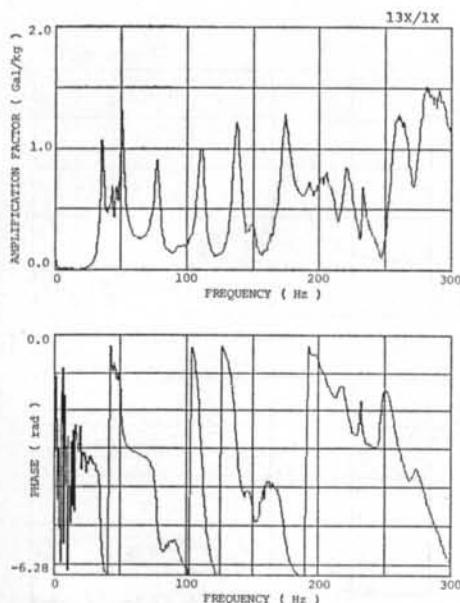


図-11 13x/1xの伝達関数

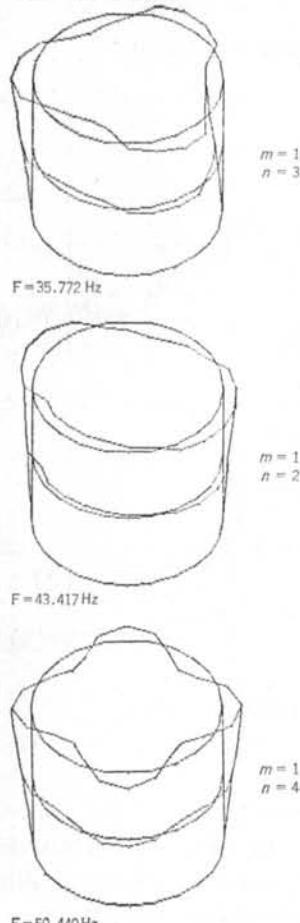


図-12 フタなし時の固有振動モード

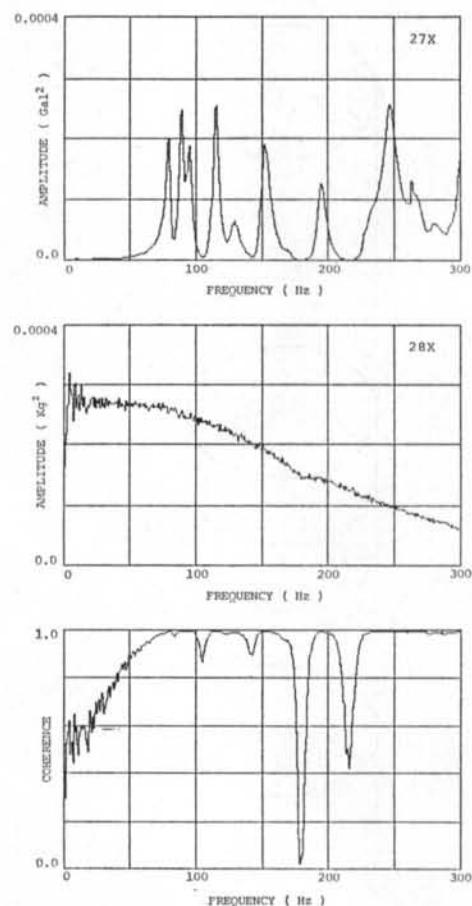


図-13 加速度応答(27x)と加振力(28x)のパワースペクトルとコヒーレンス

これら14の固有振動数に対応する全測定点の振幅比を1自由度モデルによる回帰分析により求めた。このようにして求めた各次の固有振動モードのうち、モード干渉がなくきれいに求まつたモードの一例を図-12に示す。図は、変形前と最大変形時のモードを重ね描きして示している。

#### 4.1.2 フタ付時のハンマリング試験結果

サイロの上部に厚さ8mmのアクリル樹脂製のフタを28本のボルトで固定した。測定点No.27に加速度計を固定して基準点として、ハンマリング試験を行なった。図-13は、測定点No.27の加速度波形のパワースペクトル、測定点No.28の加振力のパワースペクトルと両測点間のコヒーレンス関数を示している。

フタなしの時の解析と同様に、各固有振動数に対応する固有振動モードを計算した一例を図-14に示す。

#### 4.2 模型石炭サイロ(満載)の振動実験

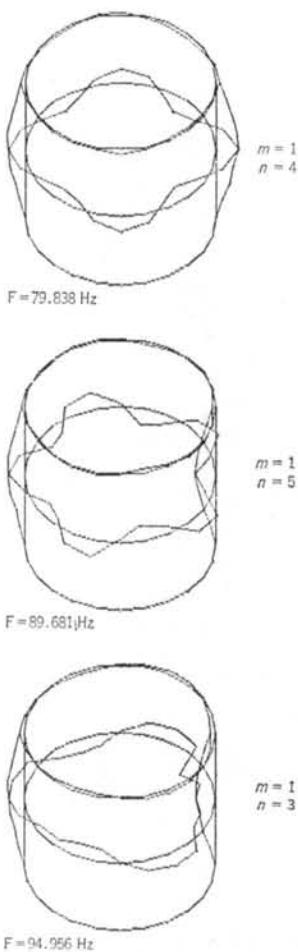


図-14 フタ付時の固有振動モード

#### 4.2.1 定常ランダム加振実験

石炭満載時の加振実験のため、石炭をサイロ内に投入した。石炭は4段階に分けて投入し、1回の投入高さは37.5 cmとした。1段目の投入終了後に石炭面を金ごてで均し平らにした後、安定板を取り付いた加速度計を埋設した。順次このような手順で石炭を投入した後フタを取り付けたが、アクリル製のサイロが若干変形し、全てのボルトを締めつけることができなかった。したがって、フタは数本のボルトで固定した。

加振方法は空の場合の実験時と同様で、最大加速度約200 gal の定常ランダム波による加振とした。石炭を満載した場合の加振実験は、加振と共に石炭が振動により締められて沈下するために石炭の性状が変化する。石炭の単位体積重量は加振前が $0.72 \text{ g/cm}^3$ 、ランダム加振終了時で約3.5 cm沈下した状態では $0.74 \text{ g/cm}^3$ であった。

加振開始直後の $5x/1x$ と $9x/1x$ の伝達関数を重ねて図-15に示す。サイロ前面と側面の伝達関数は良く一

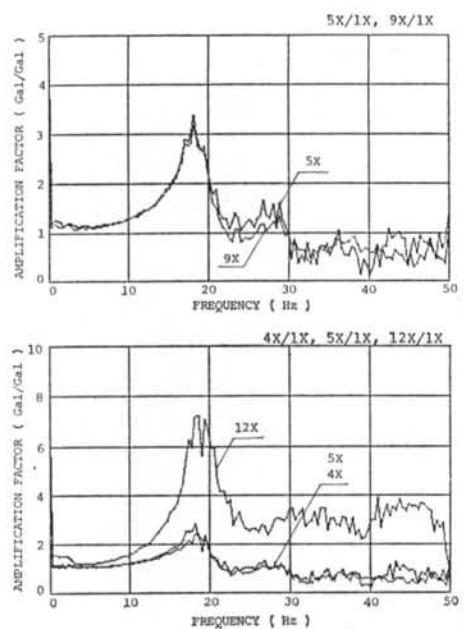


図-15 1回目加振開始直後の伝達関数

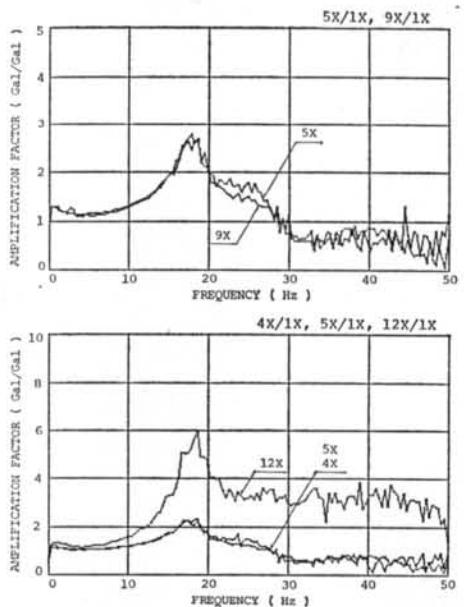


図-16 2回目加振開始直後の伝達関数

致している。また、同図に $12x/1x$ ,  $5x/1x$ ,  $4x/1x$ の伝達関数をも示す。

1回目の加振を約15分間継続した後、2回目のランダム加振を行なった。図-16は、2回目加振時の伝達関数である。図-15の1回目の結果と比較すると固有振動数はほとんど変化していないが、減衰定数がやや大きくなり、したがって増幅率が減少している。図-17は2回目

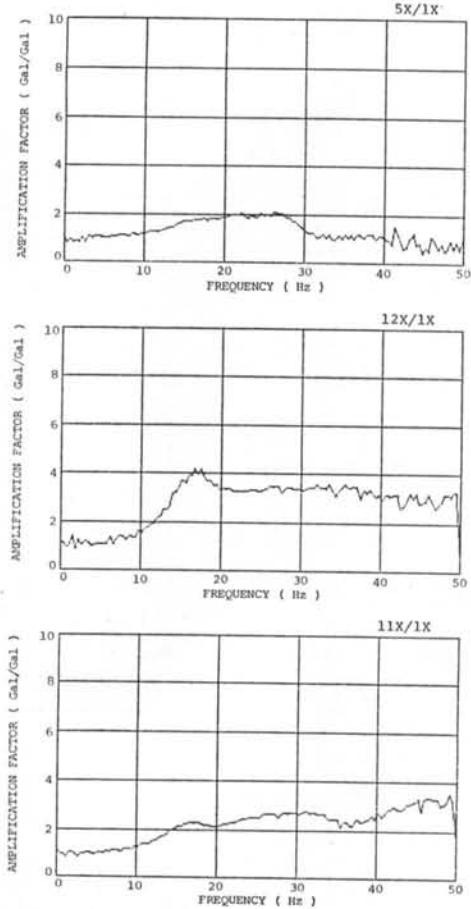


図-17 2回目加振終了時の伝達関数

振動次数	固有振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	備考
1	18.9	10.0	1回目加振直後 9x/1xより
2	29.3	—	11x/1xより
1	18.6	9.3	2回目加振直後 9x/1xより
2	31.2	—	11x/1xより
1	19.2	9.7	1回目加振直後 206x/1xより

表-5 満載時ランダム加振実験結果

加振終了時の伝達関数であるが、この時点では石炭がかなり沈下しており、振動性状が変化していることが分かる。

1回目加振開始直後のひずみの伝達関数から固有振動数、減衰定数を求めた結果を表-5に示す。

これらの固有振動数について、加速度記録から求めた

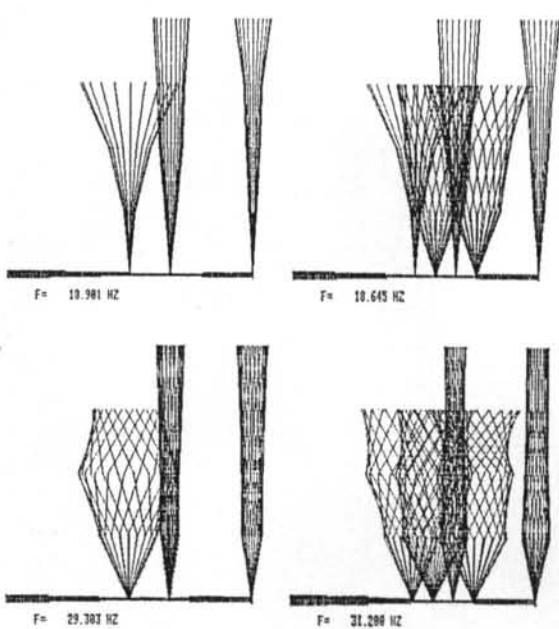


図-18 1回目加振開始直後の振動モード

図-19 2回目加振開始直後の振動モード

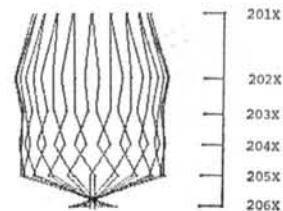


図-20 鉛直方向のひずみ分布

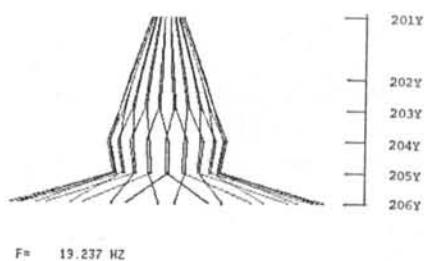


図-21 円周方向のひずみ分布

振動モードを図-18、図-19に示す。18.9 Hz の1次モードでは内容物の石炭がサイロ壁体の動きより大きい。29.3 Hz の振動モードでは、石炭が2次形の振動をしている。

図-20～図-22には、19.2 Hz 時の各ひずみ分布を示す。

#### 4.2.2 正弦波加振実験

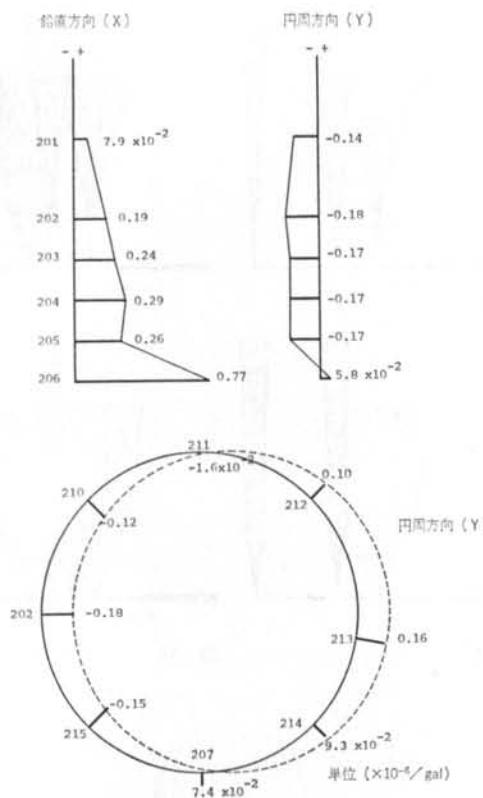


図-22 ひずみ分布 (19.24 Hz)

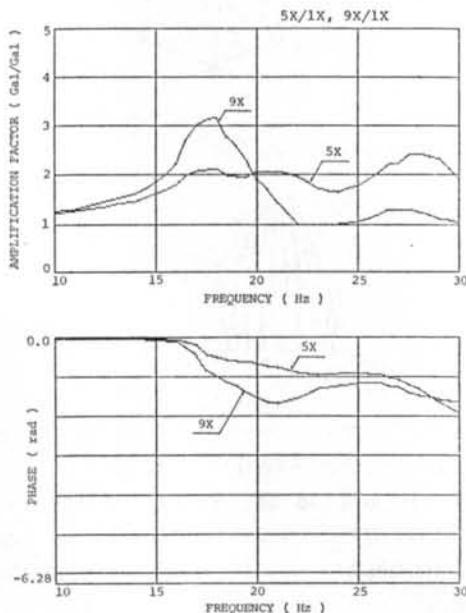


図-23 正弦波加振時の伝達関数

振動台の加速度を約 50 gal とし、10 Hz から 30 Hz まで振動数を変化させて加振実験を行なった。サイロ中の

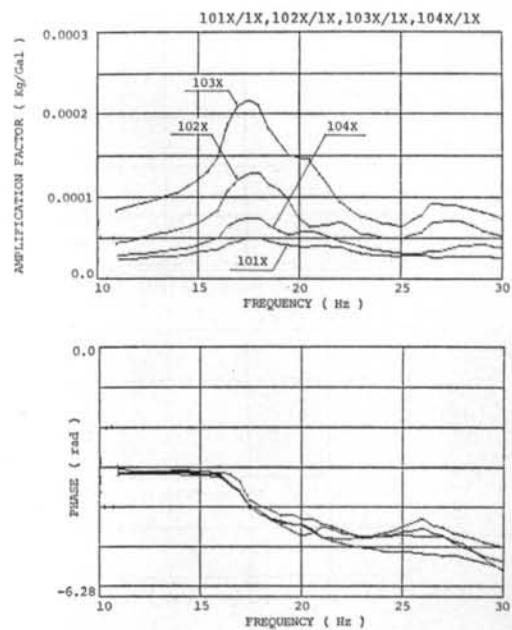


図-24 正弦波加振時の伝達関数(粉体圧)

振動次数	固有振動数(Hz)	減衰定数 (%)
1	17.27	5.9
2	26.53	7.5

表-6 石炭満載時の実験結果

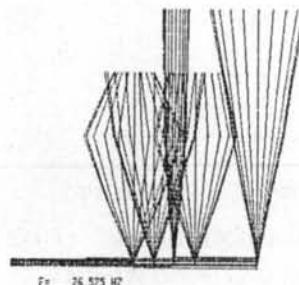
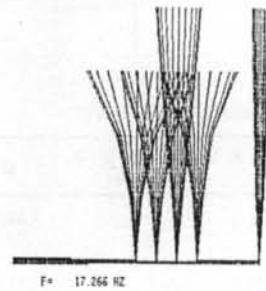
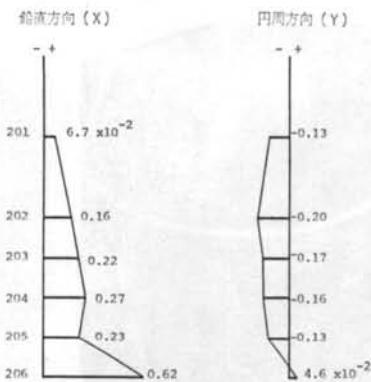
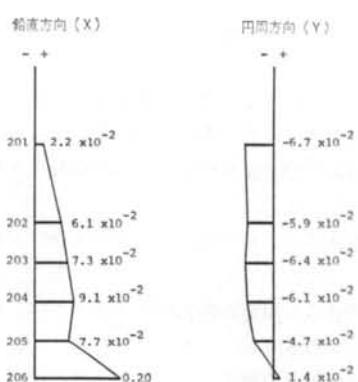


図-25 正弦波加振時の固有振動モード(加速度測定による)  
石炭は満載とし、フタは取りはずした状態で行なった。  
測定は加速度計 1x～18x と 1z, 19z の 20 成分と土圧  
計 101x～104x の 4 成分とし、ひずみデータは共振振

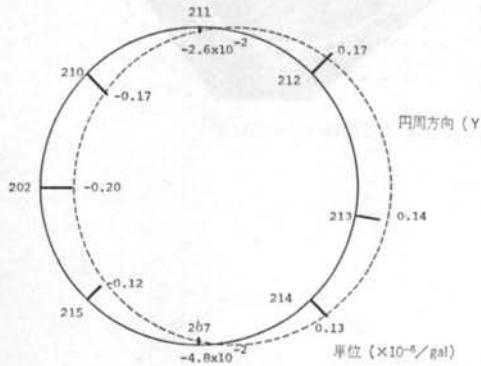


円周方向 (Y)

 $-0.13$  $-0.20$  $-0.17$  $-0.16$  $-0.13$  $4.6 \times 10^{-2}$ 

鉛直方向 (X)

円周方向 (Y)

 $-6.7 \times 10^{-2}$  $-5.9 \times 10^{-2}$  $-6.4 \times 10^{-2}$  $-6.1 \times 10^{-2}$  $-4.7 \times 10^{-2}$  $1.4 \times 10^{-2}$ 

円周方向 (Y)

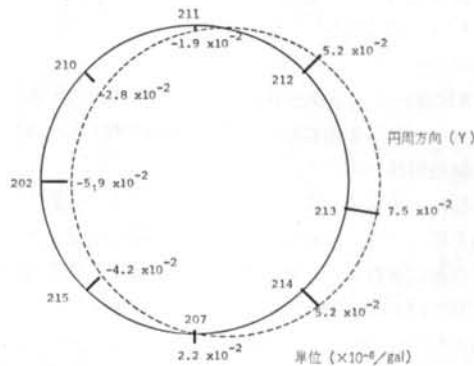
単位 ( $\times 10^{-6}$  gal)

図-27 ひずみ分布 (27.0 Hz)

図-26 ひずみ分布 (17.5 Hz)

動数のみ測定した。データ処理に当って、ノイズ成分を除去して加振成分のみの振幅と位相を読み取っている。図-23に、 $5x/1x$ と $9x/1x$ の伝達関数を示す。正弦波加振を行なう前に約15分間ランダム加振を行なっているために石炭がかなり沈下しており、 $5x$ と $9x$ の伝達関数の増幅比に差が現われている。図-24には、振動台の加速度に対する土圧計の伝達関数を示す。実験結果から固有振動数を求めるとき表-6の結果となった。

17.27 Hz と 26.53 Hz について固有振動モードを求めるとき、図-25の結果となった。17.27 Hz では内容物の石炭が側面の約2倍程度振動しており、またサイロ前面と側面の振幅もかなり異なっている。これは、サイロ本体が円形断面を保っていないことを示している。26.53 Hz の振動モードは内容物の石炭が2次形を示して振動しており、サイロ本体の振幅は側面より前面の方が大きくなっている。

17.5 Hz と 27.0 Hz で加振している時のひずみのデータから各部のひずみ分布を求め、図-26と図-27に示した。図-28には 17.5 Hz 時の粉体圧分布を示す。

粉体圧分布は、本来上部ほど大きな値を示すと考えられるが、実験結果では下から約 1/4 の位置で最大値を示

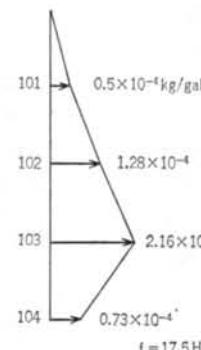
 $f = 17.5 \text{ Hz}$ 

図-28 粉体圧分布 (17.5 Hz)

し、上部では減少している。この理由として、側壁に近い部分の石炭が塑性化しており、力の伝達がスムーズに行なわれていないことが考えられる。

#### 4.3 模型石炭サイロの実地震波加振実験

石炭サイロの使用状態を考えると、サイロ内石炭の積付状況は一様に水平な自由表面を保持している状態よりも、片側に片寄った積付状態となる場合が多いことが想定される。このように、サイロ内が偏荷重となっている

状態で大きな地震力を受けた場合について、耐震設計上十分に検討しておく必要がある。

そこで、以下に述べる検討項目を中心に、石炭サイロ内での偏載荷重時（片寄った積付時）を中心に振動性状について、前記模型サイロを用いて実地震波などによる加振実験を行なった。

①偏載荷重状態でのサイロ内の石炭の挙動はどうなるか。

②偏載荷重状態の場合の地震時にサイロ本体に発生する応力状態はどう変動するか。

③偏載荷重状態での地震時にサイロ本体に加わる石炭の粉体圧力はどう変動するか。

#### 4.3.1 振動実験法

##### (1) 加振方法

2.3に述べた電気油圧式振動台により、水平1方向加振を行なった。加振波形は El Centro 1940 NS 成分の実記録地震波を用いた。

加振は、後に述べる各積付方法ごとに徐々に最大加速度値を増大させ、石炭の自由表面の崩壊程度を記録するなど各測定を行ない、次に新たに偏載荷重状態に積付け、振動台の最大加速度を 400 gal 程の加振をいきなり行なった場合についての実地震波加振を行なった。

なお、満載時についてはランダム波形および正弦波形による加振を行なった。

##### (2) 石炭積付方法（積付条件）

石炭の積付は、満載時、偏載荷重時とも容器ごとに重量を計測し、サイロ上面より人力により静かに投入した。

偏載荷重には、加振方向に対し 0°, 180°, 90° の 3 方向に積付投入位置を変化させて、それぞれの位置の壁面に接する部分が頂点となるように自由落下により投入した。積付自由表面の安息角は約 35° であった。偏載荷重時の積付終了状況を写真-1 に示す。

##### (3) 測定項目

###### (i) 偏載荷重状態でのサイロ内石炭の挙動の把握

加振方向と積付傾斜面との各方向の違いごとに、石炭自由表面の沈下および上昇量をサイロ槽壁部にてスケールにて測定した。自由表面の変化を計測した測定点は、図-3 に示された自由振動試験時の測定点 No. 1~24 の点を用いて、それぞれの測定点より鉛直下の石炭自由表面までの深さの変化を計測した。

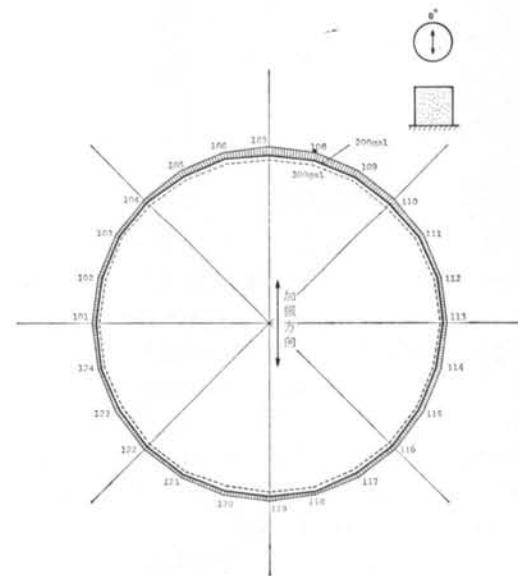
また、Video tape recorder および 16 mm撮影機により積付石炭の自由表面の挙動を記録し観察を行なった。

###### (ii) 偏載荷重状態でのサイロに加わる粉体圧の測定

サイロ壁およびサイロ底板に加わる石炭の粉体圧の変動を、図-5 に示す各圧力計を用いてその圧力変動につ



写真-1 偏載荷重時の石炭積付状況



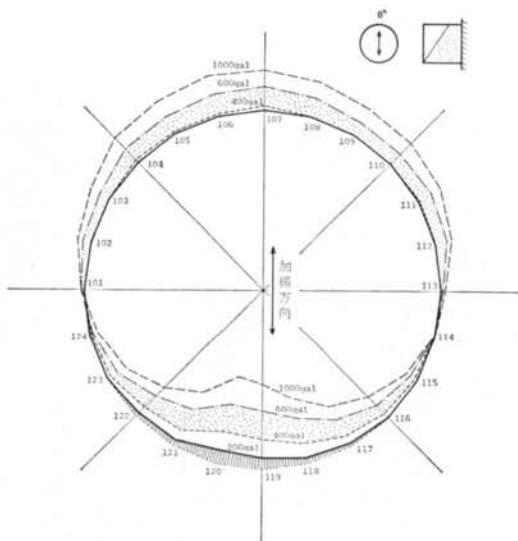


図-30 石炭偏荷重時（加振方向に $0^\circ$ ）沈下量（地震波：El Centro NS）

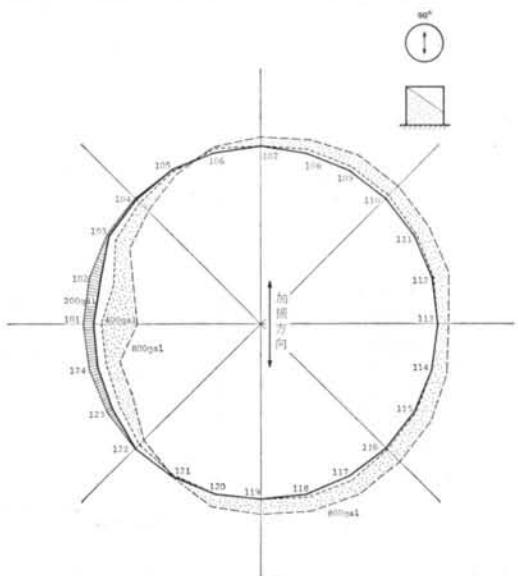


図-31 石炭偏荷重時（加振方向に $90^\circ$ ）沈下量（地震波：El Centro NS）

向を示してはいるが、ほぼ一様な沈下を示している。

(iv) 図-30に、加振方向に一致し、加力側を頂点として偏載荷した場合の積付石炭の自由表面の沈下量を示す。加振は実記録地震波を用いた加振を行ない、地震波形は El Centro NS 成分を用いた。加振台の最大加速度を 200, 400, 600, 1000 gal と 200 gal ピッチに順次加振最大加速度を変化させて加振した。

最大加速度 200 gal までは山側の石炭がくずれ頂部で

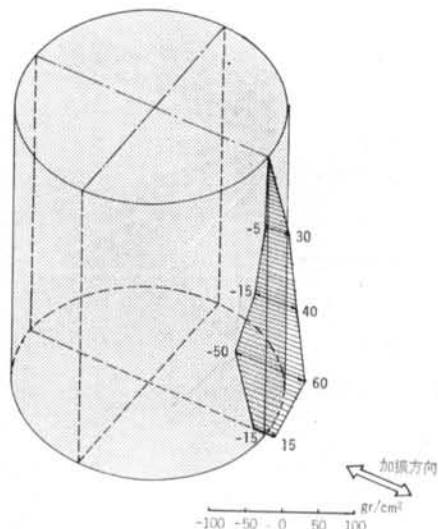


図-32 満載荷重時最大変動圧分布図（地震波：El Centro NS, 600 gal）

約 50 mm の沈下が計測されたが、谷側の自由表面の上昇は見られなかった。

400, 600, 1000 gal と加振力を増加するに従って山側の沈下量は増大し、1 回に 110 mm の沈下が見られ（頂部にて）自由表面では石炭の表層部分のすべり現象とひびわれ現象が観察された。加振方向にはほぼ  $90^\circ$  直交方向に当る測定点 No. 101 および 114 を結ぶ線にて沈下する山側部分と、自由表面が増大する谷側部分に 2 分されるように見られる。沈下量に対して谷側部分の自由表面部分の上昇速度が小さい傾向が見られる。

(v) 図-31に、加振方向に対して  $90^\circ$  の積付傾斜面を持つ石炭の偏載荷した場合の積付石炭の自由表面の沈下量を示す。加振地震波は El Centro NS を用い、加振台の最大加速度を 200, 400, 800 gal とした時の沈下量を計測した。

山側部分の沈下は、最大加速度 200 gal の時から現われてきた。

最大加速度 400, 800 gal とした時の石炭自由表面の上昇は、加振方向に対し  $\pm 45^\circ$  方向の測定点 No. 109, 110 および No. 117, 116 の部分に最大の上昇量が示された。この傾向は後で述べるサイロ槽壁の円周方向のひずみ分布の変動にも見られ、同じように加振方向に対し  $\pm 45^\circ$  方向に最大ひずみ変動が示された。

#### 4.3.3 偏載荷重状態での変動粉体圧

図-5に示したモデルサイロ壁体に取付けた圧力計によって、加振時の動的圧力変動を測定した。動的圧力変動とは、石炭積付状態の静的圧力状態からの加振時に示

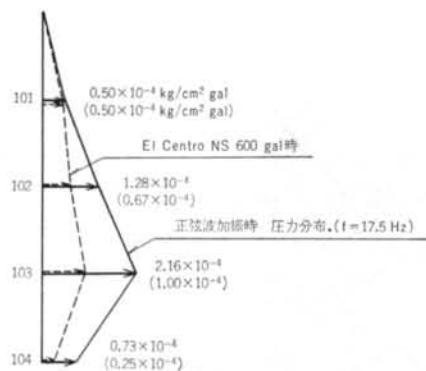


図-33 正弦波加振と実地震波加振との最大圧分布の比較

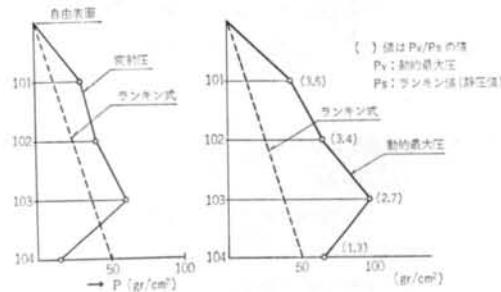


図-34 静的圧力値と動的最大圧の関係

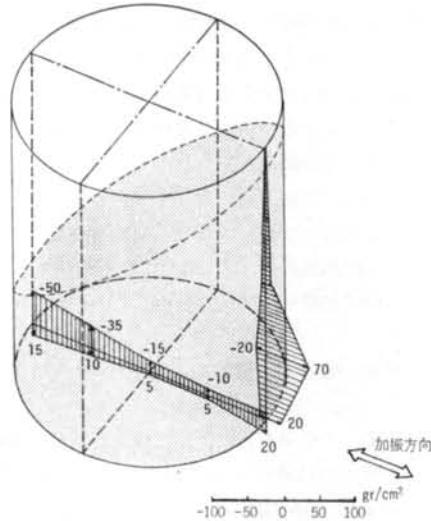


図-35 偏載荷重時最大変動圧分布図(地震波: El Centro NS, 800 gal)

す圧力変動をいい、その変動値について測定した。

(イ)図-32に、満載荷重時の加振方向サイロ側面の最大変動圧分布を示す。加振には実地震波形の El Centro NS 成分を用いた。最大加速度 600 gal 時のものである。これは、後に行なった偏載荷重時の実験結果との比較検

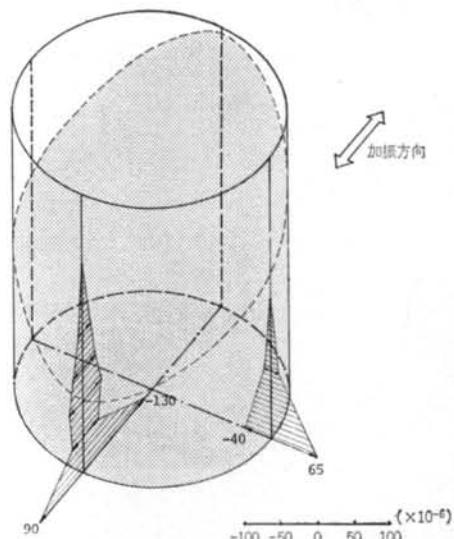


図-36 偏載荷重時軸方向ひずみ最大変動ひずみ分布図(地震波: El Centro NS, 800 gal)

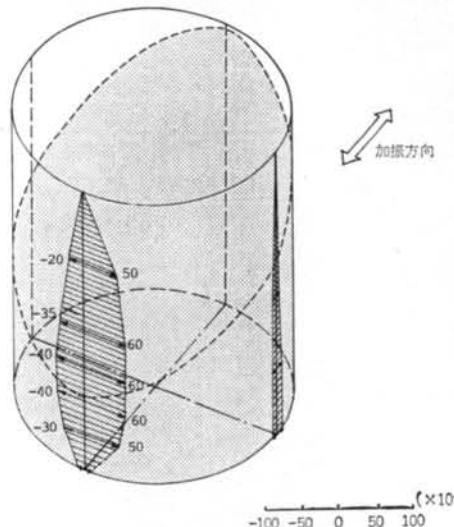


図-37 偏載荷重時水平方向ひずみ最大変動ひずみ分布図(地震波: El Centro NS, 800 gal)

討を行なうために、満載荷重について測定したものである。測定点 No105~109 の底板については、測定計器の関係で計測を行なっていない。

測定点 No101~104 の最大変動圧の分布形状は、図-28 に示した正弦加振実験時の満載、フタなし状態での共振時最大圧分布形と比較的良く一致しており、最大圧は底板より 1/4 の高さ部分の測定点 No103 に現われている。

正弦波加振時のデータと比較するために、加振時の最大加速度で除してディメンジョンをそろえて比較すると

図-33に示す結果となり、実地震波による加振時の圧力値は、いずれも正弦波加振、共振時圧力値を越えるものではなく、分布形状の良い一致がみられる。

静置圧力値は直接測定していないが、今回の実験モデルサイロは直径に対する貯槽壁の高さの比率が  $H/D = 1.0$  であって、浅槽型である。そこで、貯槽壁での石炭と壁面との摩擦力の効果を無視しうるため、Rankine 式にて静置圧力値を求めてみる。

#### 3.4 に示した試料石炭の粉体物性測定値を用いて、

$$\text{石炭嵩比重 } \gamma = 0.7 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{内部摩擦角 } \phi_i = 36.8^\circ, \sin \phi_i = 0.599, \sin^2 \phi_i = 0.357$$

$$\text{ランキン定数 } K = \frac{1 - \sin^2 \phi_i}{1 + \sin^2 \phi_i} = 0.47$$

$$\text{深さ } x \text{ cm} \text{ での側圧 } P_h = \gamma \cdot K \cdot x \text{ より}$$

$$x = 150\text{cm}, P_h = 0.7 \times 0.74 \times 150$$

$$= 49.4 \text{ gr/cm}^2$$

最大変動圧を示した測点 No.103 では  $P_h = 37.0 \text{ gr/cm}^2$  であり、したがって動的な変動圧は  $37.0 - 50 - 37.0 + 60 \text{ gr/cm}^2$  となり、静的圧力値の約 2.7 倍の値となった。

図-34に、静置時の圧力分布に Rankine 式を当てはめた場合の実地震波形の El Centro NS 成分、最大加速度 600 gal とした場合の動的最大圧分布を示す。

この図に示すように、静置圧力に対する動的圧力値の比率を求めるとき、サイロ槽壁上部で 3.5～3.7 の値を示しており、サイロ上部での比率の高い傾向が示された。

(a) 図-35に加振方向に安息角で傾斜した偏載荷重時の最大変動圧分布の測定結果を示す。実地震波 El Centro NS 波形を用い、最大加速度 800 gal で加振した時の最大変動圧の測定結果である。

側壁面の最大圧は満載時の場合と同様、測定点 No.103 の底板より  $1/4$  の高さの点に生じた。満載時の変動圧分布形との違いは、傾斜部に相当する上部測定点 No.101～102 の圧力変動が殆んど発生していない点である。

また、底板部の圧力変動は、中心部より側壁側に直線的に変動幅が増大する分布形が示された。

#### 4.3.4 偏載荷重状態でのひずみ分布

図-5に示したモデルサイロ壁体に取付けたひずみ計にて、実地震波形を用いた加振時のサイロ壁体部の動的ひずみ変動について計測した。

図-36および図-37に、加振方向に対して 0 度の方向に偏載荷した場合の軸方向ひずみと水平方向ひずみの動的最大変動ひずみ分布を示す。

加振を El Centro NS 成分の実地震波による最大加速度 800 gal とした場合のひずみ分布を示した。

軸方向ひずみは、サイロ底部に近い加振方向の測定点

No.206 に最大変動ひずみが生じ、この部位の大きな軸方向応力の発生を示している。これらの値は、偏載荷時で石炭の積付量が少ないにもかかわらず、満載時の最大変動ひずみ値とほぼ等しい変動量を示していることが注目される。分布形は満載時の結果とほぼ一致している。加振方向と直角な筒壁部の軸方向ひずみ分布は、底部に近い測定点 No.209 は満載時とほぼ同じ程度のひずみ変動を示したが、その他の部位は殆んど変動を示していない。

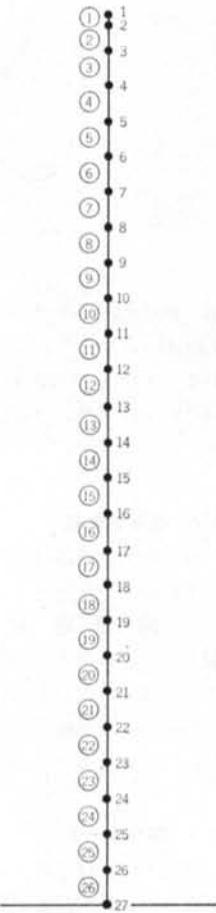
水平方向ひずみは、加振方向線上のサイロ壁部が殆んど石炭が接していない状態ではあるが、満載時のひずみ分布形とほぼ同じ分布形状を示し、対角方向の円周方向ひずみの変動量が殆んど無いのに対して対照を示している。

## § 5. 模型石炭サイロ (空)の解析結果

### 5.1 解析モデルと解析方法

サイロのようなシエル構造物の振動解析には種々の方法が用いられてきたが、今回は軸対称 FEM を用いることにした。石炭サイロの厚さは直径に比して十分小さいと考えられるので、有限要素として線要素回転体を用いた。要素の長さは頂部を除いて全て 6 cm とし、26 要素のモデルとした。解析はフタなしの場合とフタ付きの場合の 2 種類について行なったが、計算プログラムの制約からフタ付きの場合は最上部の剛性を増し、フタの分の質量を付加することによってフタの効果をモデル化することにした。図-38にモデル図と解析に用いた諸量を示す。

また、石炭を入れた場合には三角形要素回転体を用いてモデル化するので、ここで用いた線要素回転体の場合とフタなしの場合について固有振動数の比較をしたところ表一 図-38 モデル図と物性値



$$E = 4.9 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$$

$$\nu = 0.25$$

$$\rho = 0.72$$

	1次モード	2次モード	3次モード
線要素(26要素)	120.2Hz	316.0Hz	383.2Hz
三角形要素(104要素)	121.4Hz	325.4Hz	412.5Hz

表-7 2種のモデルの固有値の比較(円周方向展開次数

$n = 1$ )

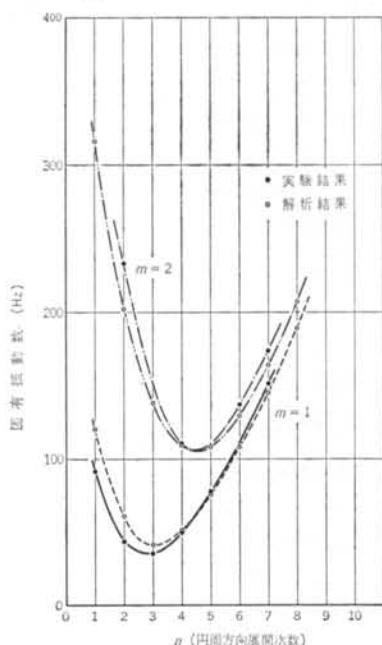


図-39 実験結果の固有振動数と解析結果(フタなし, 空)  
7 のようになった。この表から計算結果が良く一致していることが分かる。なお、解析には当社開発の軸対称 FEM プログラムである SHELL-3A, SSD-02 を用いた。

## 5.2 固有振動数

固有振動数は、円周方向展開次数  $n = 1 \sim 10$  とし、それぞれについて 3 次まで算出した。実験結果と比較をしたのが図-39、図-40である。実験では全てをモード分解することはできないので、計算結果の全てと対応させることはできないが、モード分解ができる次数の分かることについて比較したこのグラフを見ると、解析と実験が良く一致することが分かる。

## 5.3 固有モード

固有モードは変位と応力について算出した。変位の固有モードは、円周方向展開次数  $n = 1$  について 3 次までを、フタなしの場合を図-41に、フタ付きの場合を図-42に示した。応力の固有モードは、円周方向展開次数  $n = 1$  で 1 次の場合について、フタなしの場合を図-43、

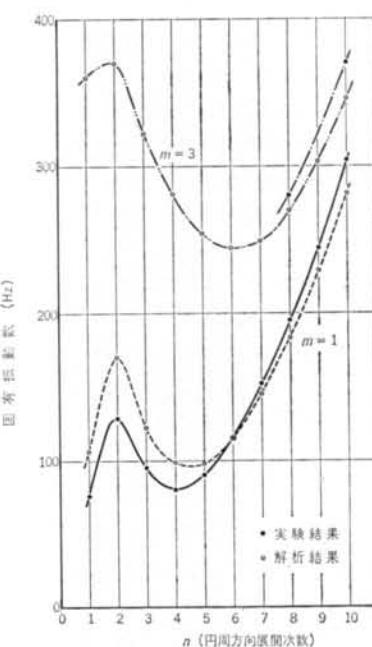


図-40 実験結果の固有振動数と解析結果(フタ付, 空)

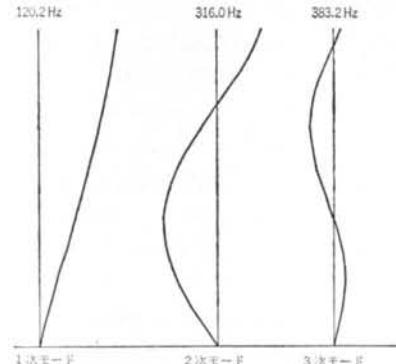


図-41 固有変位モード(フタなし, 空)

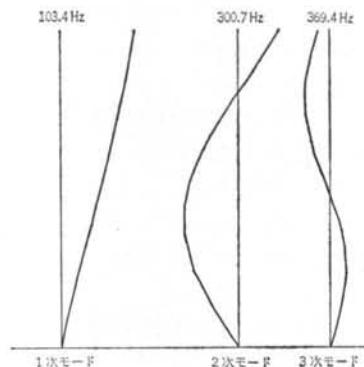


図-42 固有変位モード(フタ付, 空)

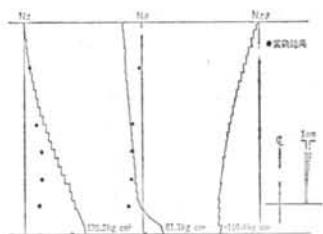


図-43 固有応力モード(フタなし, 空)一その1

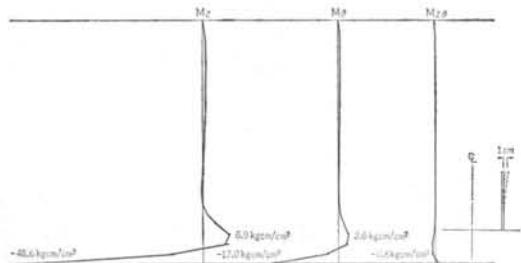


図-44 固有応力モード(フタなし, 空)一その2



図-45 石炭層の分割

図-44に示した。図中の黒丸は実験値をプロットしたものである。なお、応力の大きさは頂部の変位振幅を1 cmとした時のものである。グラフを見ると応力は実験値の方が小さ目であることが分かる。

## § 6. 模型石炭サイロ(満載)のシミュレーション解析

### 6.1 解析モデル解析手法

§ 5. で述べたように、今回の石炭サイロの振動解析には軸対称 FEM を用いている。石炭が満載の場合にはサイロ部分も石炭部分もすべて三角形要素回転体とした。

弾性体として解析するので、モデル化に必要な物性値は密度、ヤング係数、ボアソン比の3つとなる。アクリル製のサイロ部分についてはそれらの物性値を § 5. と同じとし、石炭部分の物性値は以下のようにそれぞれ決定

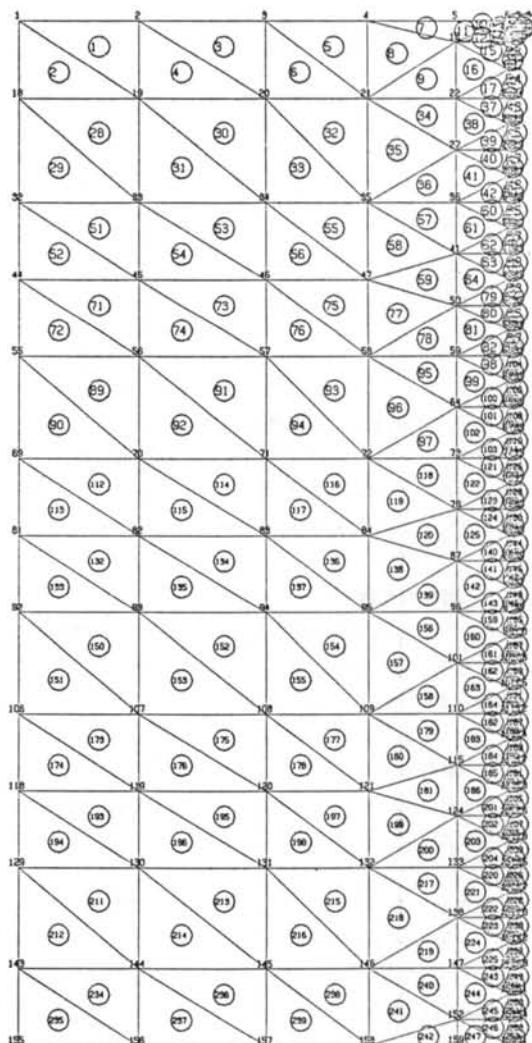


図-46 要素図

した。

- ・密度：サイロに投入した石炭の総重量をサイロの容積で除した見掛けの密度を用いた。
- ・ボアソン比：動的三軸試験の結果より決定した。ボアソン比は石炭の拘束圧、ひずみレベルに殆んど依存せず一定である。
- ・ヤング係数：石炭の拘束圧、ひずみレベルに依存するので、図-45に示すように大きく4層に分け、さらに最上層のみをa, b, cの3層に分割し、それぞれの層の中央点における拘束圧およびひずみを用いてヤング係数を決定した。その決定は、拘束圧～ヤング係数の関係を外挿し、軸ひずみが  $5 \times 10^{-5}$  の時のヤング係数  $E_0$  を求め、次に定常ランダム加振実験からせん断

		密 度 (g/cm <sup>3</sup> )	ポアソン比	拘 束 壓 (g/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数E <sub>0</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	軸ひずみ	ヤング係数E (kg/cm <sup>2</sup> )
サ イ ロ		1.19	0.35	—	—	—	$4.9 \times 10^4$
石	a	0.72	0.25	2.25	23.5	—	16.5
	b			7.50	42.9		$1.0 \times 10^{-3}$
	c			12.70	56.0	$4.5 \times 10^{-4}$	30.0
	2			22.50	74.4		39.2
炭	3			37.50	96.0	$2.5 \times 10^{-4}$	59.5
	4			52.50	113.6	$9.7 \times 10^{-5}$	86.4
							113.6

表-8 解析モデルの物性値

ひずみを算出し、それを軸ひずみに換算することによってヤング係数Eを読み取るという方法で行なった。なお、拘束圧としては平均主応力を採用した。以上のようにして決定された物性値を表-8に示す。また、解析に用いた要素図を図-46に示す。節点数161、要素数253の軸対称有限要素モデルである。

## 6.2 固有振動数

解析で得られた固有振動数と実験で得られた固有振動数とを表-9に示す。1次モード、2次モードとも解析値の方が高めであることが分かる。

## 6.3 固有モード

1次と2次の変位モードを図-47に示す。固有振動数が高めであるにもかかわらず、モードの性状は良く似ている。すなわち、1次モードにおいてはサイロと石炭が一体として振動し、石炭中央部の振幅が頂部に近づくに従ってサイロ部分よりかなり大きくなっている。また、2次モードではサイロ部分はほぼ剛体変位しており、中の石炭部分のみが2次形をしている。これらの特徴は実験でも認められるところである。

## 6.4 まとめ

実験で得られた物性値をそのまま使って、軸対称有限要素モデルとして解析したところ、1次、2次ともモードの性状は実験結果を良く表現するものとなった。しかしながら、固有振動数は1次、2次とも実験値より高めに出ている。このことは、空の時の円周方向展開次数n=1の1次についてもいえることであった。全体として本解析手法は妥当と思われるが、今後、応答解析まで行なうことを想定すれば、次にあげるような点が課題である。

(1)模型の底部は鉄板で補強し、かなり剛と考えられるが、解析モデルにロッキングのバネを入れてその効果を検討する。

	1次モード (Hz)	2次モード (Hz)
実験結果	18.9	29.3
解析結果	26.0	43.8

表-9 固有振動数の比較

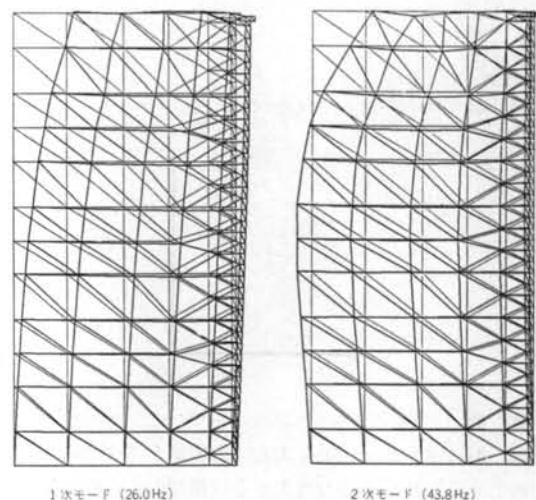


図-47 変位モード

(2)石炭とサイロとが連続しているとしたが、より現実に近い境界としたモデルについて検討する。

(3)石炭の物性値の決定方法についてより詳細な検討を加える。

(4)大振幅時の挙動が特に問題となるので、石炭の非線形性をうまくモデル化する（等価バネ定数、等価粘性減衰定数）。

以上の4点が、今回の実験および解析からはっきりしてきた。次のステップには是非解決すべきことと思われる。

## § 7. むすび

本研究は、§ 1. で述べたように大型石炭サイロの耐震設計を行なうに当って、未だ不明確な地震時の挙動を把握する手段の一つとして、模型サイロを使用しての振動実験を行なったものである。

### 1) サイロ本体の振動性状の把握について

円筒シエルとしての石炭サイロを内容物の石炭の動的物性値を用いて、軸対称有限要素モデルとして解析した結果、1次、2次ともモードの性状は実験結果と良い一致を見た。しかしながら、固有振動数については1次、2次とも解析値は高めに出ている。全体として、本解析手法によって設計が可能であると考えられる。今後さらに応答解析まで行なうとなれば、さらに4点程の検討課題が残った。

### 2) 内容物の石炭の動的性質の把握について

本研究の解析に用いた石炭の物性値については、動的性質を明らかにするために動的三軸試験を、静的性質を把握するために静的三軸試験を行なった。

動的三軸試験では、拘束圧として0.5, 1.0, 2.0, 4.0 kg/cm<sup>2</sup>を取りあげたが、実験での拘束圧は0.1 kg/cm<sup>2</sup>以下であり、データとしては外挿法により得られた各データを用いた。しかし、結果としてはほぼ妥当な結果を得

た。実機では拘束圧が大きい状態であるので、測定により得られた物性値による設計が可能と考えられる。

今後の課題としては、石炭の粒径が大きくなつた場合の試験が必要であること、また石炭の含水率などによる物性値の依存性の把握が必要となろう。

### 3) 石炭が偏荷重となる場合の地震時の挙動について

実地震波を用いて、サイロ稼動時の石炭が偏荷重となつた場合の挙動について各種の検討を行なつた。実験結果によれば幾つかの新しい知見が得られたが、いずれも満載時の応力、荷重以上の値とならないとの結果を得た。ただし、偏荷重状態では地震の入力方向によっては最大応力の発生部位や、最大粉体圧の発生部に偏りが生ずることが判明した。今後のサイロ構造設計の上に十分反映させたいと考えている。

今後に幾つかの課題が残されているが、耐震設計上の基本的な問題点の抽出とそれらの一応の検討ができたものと考えている。今後、石炭サイロの実証実験などいくつかの検討を積み重ねて、より良い研究成果へと結びつけたいと考えている。

終りに、本実験に終始ご協力いただいた当研究所実験課の諸氏および技術開発室の諸氏にお礼申し上げます。また、本実験の助手として実験およびデータ整理にご協力いただいた南誠君、宇津巻俊二君に謝意を表します。

