大型鋼製角型集合石炭サイロの耐震性に関する研究

Study on Seismic Responses of Large Scale Multi Square Celled Steel Coal Silo

技術本部　村瀬良秀[*1]　古田大介[*2]
広島製作所　氏原隆澄[*3]
中国電力株式会社　廣實登志行[*4]　田中國武[*5]
高橋哲也[*6]

石炭火力発電所の効率的な貯炭設備として，鋼製の曲面パネル（サグシェル）で構成する角型集合石炭サイロを開発した．本研究では，縮尺約1/12の単独槽模型を用いて，振動台試験，破壊試験を行ない，角型サイロの地震応答特性及びサグシェル構造の地震時耐荷性能を明らかにするとともに，バネーマスモデル化による実用的地震応答解析法が安全側であることを確認した．

A steel silo of square cellular type with a sag-shell for the side wall has been developed for the coal storage facility in coal-fired power plants. Seismic shaking tests and static loading tests to failure on a twelfth scaled model has been carried out. The tests have shown that the structure has rather superior earthquake resistance characteristics. It has also been proven that the numerical analysis by spring-mass modeling enables a practical simulation of the dynamic behavior.

1. まえがき

一般的な石炭火力発電所は，必要貯炭量を確保するために広大な貯炭スペースを必要とし，また，屋外に貯蔵する場合は強風による炭じん飛散防止対策を施すなどの必要がある．この対応策の一つとして，石炭をサイロに収納する方法があり，多くの場合は円筒型のコンクリートサイロが採用されてきた．

そこで，円筒サイロよりも，さらに積付け効率が高く，建設工期短縮，及び建設コスト低減などをねらいとした，鋼製角型集合石炭サイロを開発した[(1)]．現在中国電力(株)三隅火力発電所にて本型式のサイロを建設中である．

サイロの耐震設計は，日本建築学会“容器構造設計指針”[(2)]によって設計することができる．また，従来の円筒型サイロについては，耐震性に関する研究が幾つかなされている．

今回開発したサイロは，角型の集合体という新しい構造形式である．また，壁面には曲面パネル（サグシェル）を用いている．このため，サイロの耐震性の検証を目的として，特に角型石炭サイロの地震応答特性や，サグシェル構造の地震時座屈強度特性に注目し，基本となる単独槽模型(約1/12縮尺)について，動的及び静的試験を実施した結果を報告する．

2. 構造概要

40万t級貯炭設備の鳥かん図を図1に示す[(1)]．この石炭サイロの特徴として，下記のものが挙げられる．

- サイロ1槽は幅31×長さ31×高さ59.5mで，3.3万t貯炭可能であり，その12槽集合方式である．
- 円筒集合サイロに比べ，敷地面積は約80％となる．
- 角型の集合体とするため，柱・梁（はり）を隣接する槽と共有でき，独立した槽を建設する場合より経済的である．
- 壁体には，内圧に対してフープ力で，地震時水平力に対してはシェルのせん断耐力で対抗するサグシェル（部分円筒シェル）を配置した．これにより，壁面への補強材を不要としている．
- 上部構造は鋼製であるため，コンクリートに比べ軽量で，かつ優れた塑性変形能力を持つなど，耐震性に優れている．

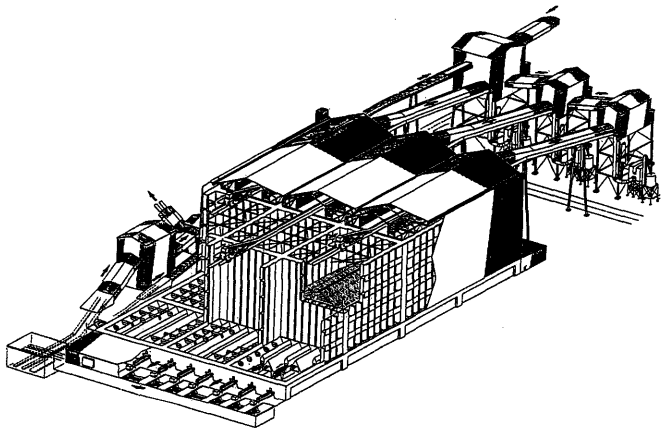


図1　貯炭設備の例　三隅火力発電所石炭サイロ鳥かん図.
Bird's eye view of multi square celled steel coal silo

3. 実験模型

寸法縮尺1/12の単独サイロ模型を用いて振動台試験及び破壊試験を行った．模型は実機同様鋼製とし，内容物も実炭種の一つである石炭(ブレアソール炭，最大粒径53mm，50％粒径10.5mm)を用いた．

石炭のせん断試験によって得られた動的物性を，他炭種の文献値[(3)]と比較して図2に示す．ばらつきはあるもののほぼ類似傾向を示している．

模型の外観を図3に示す．

板厚1mmのサグシェル（$r/t=600$）と，コーナ柱，リング梁，中間柱から成っており，高さ方向には6層（1F～7F）の骨・パネル構造である．模型槽寸法は2.4×2.4×4.1mである．

なお，模型の相似性は，石炭の物性や模型製作上完全に満足させることは困難であるが，石炭剛性が上載圧のパラメータであることを考慮して力の比を用いる相似則[(4)]を適用すると，模型に対する実機の加速度比は1.0，振動数比は1/6.5，壁板厚は40倍程度

*1 広島研究所主管
*2 広島研究所鉄構・土木研究室
*3 鉄構技術部次長
*4 大崎発電所建設所長（元火力部次長）
*5 三隅発電所建設所長
*6 土木部発変電設備建築担当課長

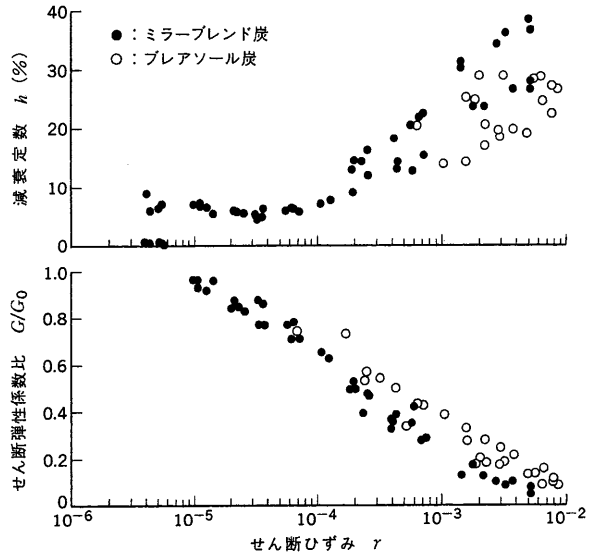


図2　石炭の動的物性　石炭減衰定数，せん断弾性係数比は，せん断ひずみの大きさによって変化する．
Dynamic properties of coal

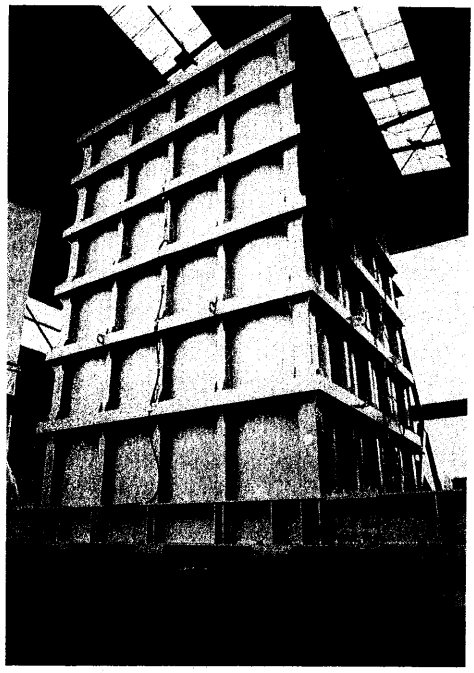


図3　模型外観　板厚1 mmのサグシェルと，コーナ柱，リング梁，中間柱から構成されている．
Outline of model

に相当する．

4．振動台試験

4．1　試験概要

加振試験は，固有振動数及び減衰率などの基本特性を求める正弦波加振試験と，地震時応答を確認するための地震波加振試験を行い，それぞれ加振レベルを低い方から変化させた．

計測については，加速度は各リング梁位置及び石炭中央部で，また，応力度は最下層側壁のサグシェルのせん断応力及び前壁のサグシェルのフープ応力などをストレインゲージにて計測した．また，石炭圧は槽前壁中間柱に土圧計（ϕ 73）を取付けて計測するとともに，前記フープ応力値からも圧を算出推定した．

振動解析は，サイロ槽壁体を高さ方向に6質点のバネーマス系にモデル化し，それに石炭マスを付加した簡略化モデルにて，弾性応答解析を実施し，実験値と比較した．なお，その際，振動台も併せてモデル化した．

4．2　正弦波加振試験

正弦波加振により振動特性を調べた．5Fの中間リングの加速度応答から求めた周波数応答曲線を図4 (a) に，応答波形（共振時）の一例を小入力（66 Gal）時と大入力（290 Gal）時を比較して図4 (b) に，また，応答分布を簡略化バネーマスモデルによる計算値と比較して図4 (c) に示す．

(1) 図4 (a) から，減衰定数 h は小入力レベルでも10％と大きいが，入力レベルが大きくなるにつれ応答倍率はより小さくなり，h＝20～30％を示す．また，固有振動数は低くなる特性が見られ

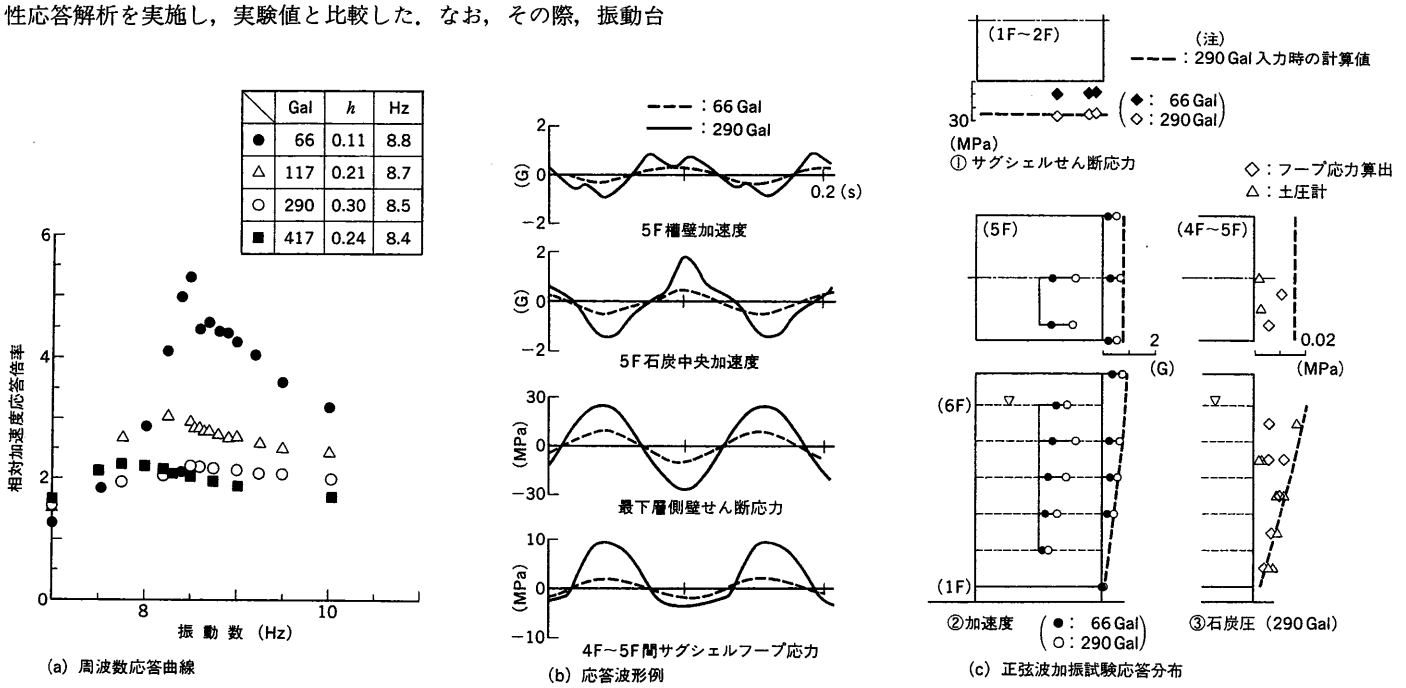


図4　正弦波加振試験結果　周波数応答曲線，応答波形例，応答分布を示す．
Sinusoidal responces

る．

これは，石炭の動的物性がそのせん断ひずみγの大きさによって変化する土質と類似の特性があることを示す（図2参照）．

なお，417 Gal入力になると，減衰定数は290 Galよりも逆に小さくなっているが，これは，加振の継続もあり，石炭が締固まってきた影響であると考えられる．

(2) 石炭圧は，壁面の土圧計による計測と，サグシェルのフープ応力より算出する2つの方法で求めたが，290 Gal入力時の石炭圧分布（図4 (c)③）からは比較的両者は対応しているようである．石炭の挙動は，サグシェルフープ応力応答波形（図4 (b)）から，明らかに加圧側・減圧側とも壁圧が発生し，特に入力が大きくなると減圧時には頭打ちが生じ，石炭は壁から離れるような非線形挙動を示す．また，このとき石炭の加速度応答波形も乱れて大きくなっており，特に上載圧の小さい上層石炭は，局所的に槽壁よりも大きく振動する傾向がうかがえる．なお，石炭の減衰定数が大きいことによって，上層部では槽壁加速度に対して，石炭加速度は約10°程度の位相の遅れも見られた．

(3) この石炭の挙動は加速度応答分布（図4 (c)②）からもうかがえるが，バネーマスモデルによる290 Gal入力時の槽壁加速度応答計算値（モーダル減衰定数は実験値を仮定）は，実験値とほぼ一致した．この加速度応答計算値にそのレベルの石炭質量を乗じて求めた設計石炭圧分布（図4 (c)③），側壁サグシェルのせん断力（図4 (c)①）応答も実験値とほぼ対応した．すなわち，石炭は局所的に大きく振動し得るが，槽壁体の応答への影響は比較的少なく，実用的なバネーマスモデルで槽壁体応答を評価し得ることがうかがえる．

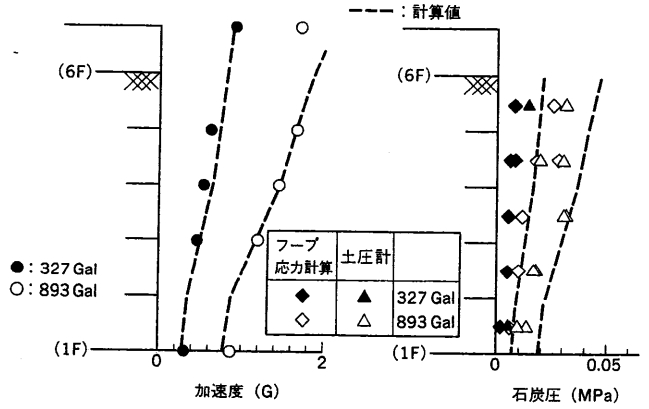


図5　地震波加振試験応答分布　バネーマスモデルによる計算値は，実験値と比較して実用上良好な対応を示す．
Distribution of seismic responses

4．3　地震波加振試験

地震波（エルセントロNS模擬波）を最大加速度約100～900 Gal程度まで変化させて加振し，正弦波加振試験と同様の計測を行った．代表として，327 Gal，893 Gal入力時の槽壁加速度分布と石炭圧分布を計算値と比較して図5に示す．

応答計算は，前記バネーマスモデルを用い，モード重ね合わせ法により時刻歴応答計算を行った．なお，減衰定数は，サイロ層間変形角最大応答を石炭の最大せん断ひずみγとみなし，その2/3ひずみ[5]に対応する石炭減衰定数（図2）を用い，327 Galで10％，893 Galで15％と仮定している．

図5から加速度応答については計算値は実験値とほぼ一致した．一方，石炭圧応答については，前記同様加速度応答に石炭マスを乗じて求めた計算値と比較して，実験値は全般的に30％程度小さめではあるが，傾向的にはほぼ対応している．

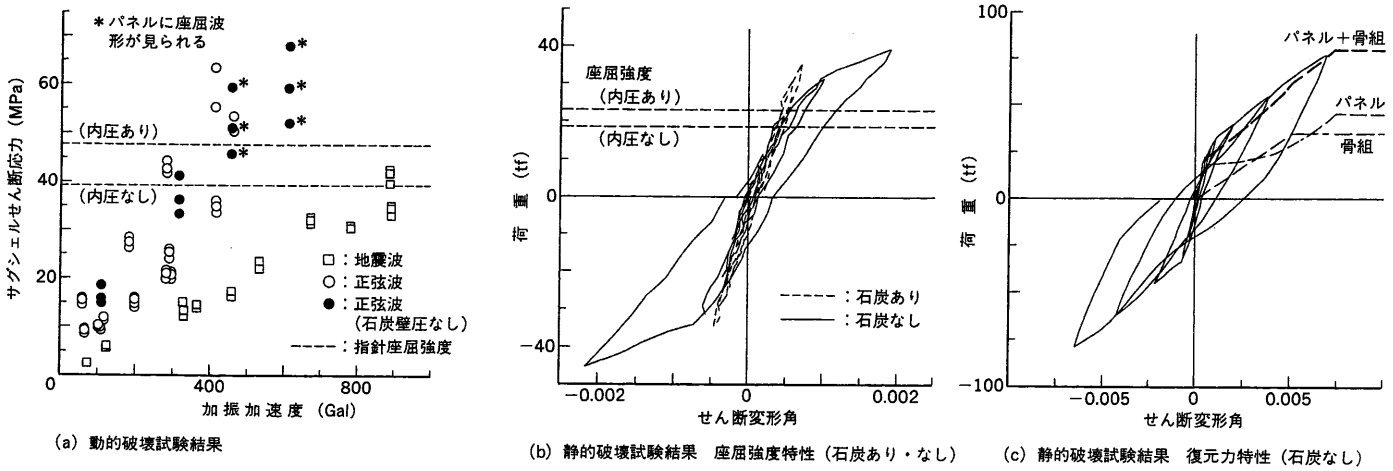
すなわち，本バネーマスモデルによる地震応答評価法は，石炭圧推定についてはさらに究明すべき点はあるが，安全側の実用的応答解析法として有効である．

5．破　壊　試　験

5．1　動的破壊試験

前章の振動台試験においては，エルセントロ地震波加振を最大900 Galまで入力したが，図6 (a)の□印に示すように加振加速度と側壁サグシェルせん断応力の関係は直線的であり，指針による座屈強度[2]（石炭静圧によるフープ応力を考慮，$\sigma_h/F=0.027$）を超えるまでには加振できなかった．

次に，正弦波加振（共振振動数近傍で約9 s加振）による破壊試験を行った結果，指針座屈強度を約1.3倍超える応力が生じたが，やはり座屈波形は見られなかった．これは，内部石炭の剛性による座屈拘束の効果も大きいものと考えられる．このため，最下層の側壁シェルに石炭が接しないようにするため薄鉄板を立て，再度石炭を積付けて同様の正弦波加振をした．その結果，内圧がない場合の指針座屈強度を超える入力では，サグシェルにはせん断座屈特有の斜めの座屈しわの交番が目視できた．しかし，加振後には座屈しわは残留しなかった．



(a) 動的破壊試験結果

(b) 静的破壊試験結果　座屈強度特性（石炭あり・なし）

(c) 静的破壊試験結果　復元力特性（石炭なし）

図6　破壊試験結果　内部石炭の有無による座屈挙動の違いと，座屈後の安定した復元力特性が確認できることを示す．
Results of loading tests to failure

5．2　静的破壊試験

次に，模型の3Fレベルを水平に交互に引張ることによって，せん断力(Q)交番載荷の静的破壊試験を行った．

荷重Qとパネルせん断変形の関係を図6(b)に示す．石炭がある場合は，内圧を考慮した指針座屈強度の約1.3倍の荷重でも座屈しなかったので，そこで載荷は中止した．次に，石炭がない場合の試験では，25～30t付近で剛性の低下が見られ，内圧がない場合の指針座屈強度とほぼ対応する結果となった．また，荷重をさらに漸増させた場合の座屈後復元力特性(図6(c))は，急激な耐力低下はなく，スリップ型に近い安定した復元力特性を有することが確認できた．

図6(c)に，荷重－パネルせん断変形角関係の計算値を実験値と比較して示す．図中破線で示した計算値は，単調載荷時のパネルと骨組み各々の荷重と変形の関係の和として求めたものである[6]．ここで，パネルは不完全張力場理論[7]，骨組みは層骨組分解法[8]を各々適用して算出した．図から，この予測手法は，実験値の骨格曲線を大略評価し得ることが分かる．

以上の動的及び静的破壊試験から，サグシェル壁の座屈挙動は，内蔵石炭の内圧に加えて剛性による拘束効果も大きいこと，また，せん断座屈が生じても柱，リング梁で囲まれたサグシェルは，いわゆる張力場作用により，せん断抵抗力が十分あることが確認された．

6．実機（集合サイロ）設計

実機12槽集合サイロの耐震設計では，容器構造設計指針[2]による設計に加えて，実地震波を用いた時刻歴応答計算を行い，耐震安全性を確認した．この動的解析では，本研究で安全側であることが検証された単独槽でのバネーマスモデルを，12槽平面的にバネで連ねてモデル化を行っている．

解析モデル及び計算の例を図7に示す．

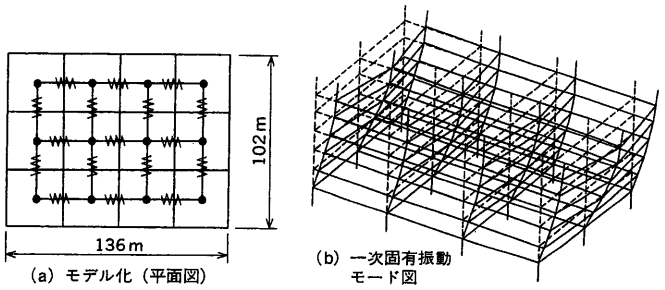


図7　実機応答解析計算例　集合サイロのモデル化と，その振動モード例を示す．
Example of analytical model and natural vibration mode

7．む　す　び

壁面に，サグシェルを用いた鋼製角型サイロについて，縮尺約1/12模型を用いた振動台試験，破壊試験により，以下の結果を得た．

(1) 石炭サイロの減衰定数は，約10％は期待できる．また，入力が大きくなると，さらに大きな減衰となり得る．

(2) サイロ内の石炭応答は，静圧が小さい上層ほど石炭自身の部分的な振動が大きく，大地震時には壁から離れる非線形挙動を示す．

(3) 石炭自身は複雑な挙動を示すが，石炭質量を付加した簡略バネーマスモデルによる実用的応答解析は，槽壁の加速度応答分布とほぼ対応するとともに，その加速度に石炭マスを乗じて求めた石炭圧分布も安全側の結果を与える．

(4) 石炭のある槽壁サグシェルのパネルせん断座屈強度は，指針[2]による座屈強度を1.3倍以上上回った．これは，石炭の内圧のみならずその剛性の座屈拘束効果も大きいものと考えられる．石炭圧のない場合には，指針座屈強度とほぼ一致し，座屈後もパネルの張力場抵抗効果を有する安定した復元力特性を示す．

本研究により開発した地震応答解析手法を三隅火力発電所石炭サイロの検証に適用して，その耐震性を確認した．なお，石炭の非線形的挙動の究明とともに，石炭圧のより精度の良い推定法の確立に向けて，今後も検討を進める必要がある．

なお，本研究に際して東京大学秋山教授に御指導を賜ったことを付し，ここに謝意を表する．

参　考　文　献

(1) 廣實ほか，大型鋼製角型集合石炭サイロの開発，火力原子力発電（1995.12）
(2) 日本建築学会，容器構造設計指針・同解説（1990）
(3) 河添　明ほか，石炭サイロの模型振動台試験とその解析（その3）非線形シミュレーション解析方法，日本建築学会学術講演梗概集（1983.9）
(4) 香川崇章，土構造物の模型振動実験における相似則，土木学会論文報告集　第275号（1978.7）
(5) 土木学会編，動的解析と耐震設計　第2巻　動的解析の方法，技報堂出版（1989）
(6) 見村博明ほか，張力場を形成する鋼板耐震壁の復元力特性，日本建築学会論文報告集　第260号（1977）
(7) Kuhn P., Stresses in aircraft and shell structures, McGraw-Hill, Chapter 3 (1956)
(8) 秋山　宏，建築物の耐震極限設計，東京大学出版会（1980）