

石炭サイロの動的挙動に関する基礎的研究

表 佑太郎 此上典文
茶谷文雄 鈴木哲夫

Basic Studies on Dynamic Behaviors of Coal Storage Silos

Yutaro Omote Norifumi Konoue
Fumio Chatani Tetsuo Suzuki

Abstract

The purpose of this paper is to learn about the dynamic behaviors of coal inside a silo in order to perform an adequate seismic design for coal storage silos. Physical properties of coal were investigated by use of several testing techniques, and it was concluded that the rigidity and energy absorption characteristics of coal were closely related with the amount of shear strain. Two kinds of model conical bins were made and shaking table tests were conducted under conditions of filling coal inside bins. Test results were summarized regarding the frequency domain responses and damping characteristics of coal. The finite element method was applied to simulate the shaking table test results and good correlations of overall behaviors were obtained when the appropriate rigidity and damping as presented in the study were used.

概 要

本報告は、石炭サイロの耐震設計を合理的に行なう際に必要となるサイロ内石炭の動的挙動に関する基礎資料を提供するものである。まず、石炭の静的及び動的な性質を各種試験により知り、特に石炭の剛性と減衰が、せん断ひずみレベルと密接な関係にあることを述べる。つぎに、剛性の異なる二種類の模型容器に石炭を入れ、振動台上で定常波加振入力を行なった実験結果について示す。実験結果は先の物性試験結果を基に、軸対称 FEM 手法により解析し、かなり良い対応が得られた。石炭サイロの耐震設計に当たっては、各種石炭銘柄に対する石炭の動的物性を十分把握することが当面の大きな課題である。

1. 序

近年我が国では石油の代替エネルギーとして石炭の利用が見直され、その貯蔵方法の一つとして大型石炭サイロの建設が有望視されている。貯炭サイロを合理的に設計する為には、(1) 石炭の静的物性に主に依存するサイロ内石炭の静置時及び流動時の圧力が、壁面やホッパー部に及ぼす影響を適確に把握し、内圧応力に対する構造設計や石炭の適正な払い出しを可能とするホッパー部の設計に反映させること、(2) 石炭の動的物性に主に依存する地震時サイロ内石炭の動的挙動を把握しサイロ構造体の耐震設計に反映させること、などが解明されなければならない。

本報では特に石炭サイロの耐震設計の基礎となる、石炭の動的性質の解明と、地震時応答挙動を把握すること

に着目した。従来、石炭の物性試験と呼ばれるものには石炭の燃焼に関する化学的分析や、石炭の流動性に関する粉粒体工学的試験が主であって、直接サイロの耐震設計に結びつくような、石炭の剛性・減衰を知る為の試験は、その方法も確立しておらず、またデータの蓄積も不足しているように思われる。2章では、従来の静的及び動的三軸試験結果に加えて、剛性の小さい容器内に石炭を入れた弾性波試験と振動実験との結果を示し、石炭の剛性と減衰がせん断ひずみレベルと密接な関係にあることを、土質力学における砂に対するデータと比較しながら考察した。3章では、石炭と筒体の連成振動モデルとして、剛性の異なる二種類の円錐形容器に石炭を入れて、振動台上での定常入力加振を行なった結果を示し入力加速度の大きさによって、内部石炭の応答挙動が異なることを示した。4章では、この振動実験結果を先の

基本物性試験結果を基に、軸対称 FEM モデルで解析した結果とその妥当性について考察した。

2. 石炭の物性試験

カナダ産の石炭をフルイによって選別し、粒径 4.76 mm 以下のもののみを実験に使用した。石炭は気乾状態であり、JIS A1203 に準拠した含水量試験によって含水比を求めたところ、2.7~4.2%の値を示した。上記の石炭に関して以下に示す静的及び動的三軸圧縮試験、弾性波試験、及び振動試験を実施し、粘着力、内部摩擦角、静的及び動的変形係数、ポアソン比、減衰定数などを求めた。なお、各試験時において、供試体の形状寸法と重量から、石炭の単位体積重量も測定した。

2.1. 静的三軸圧縮試験

直径 50 mm、高さ 125 mm の供試体を作成し、拘束圧 σ_3 を 0.2、0.5 および 1.0 kg/cm² とした場合について、三軸圧縮試験を実施し、粘着力、内部摩擦角、及び変形係数を求めた。粘着力と内部摩擦角の値は、表-1 に示した。なお、同表中には、後述の試験も含めて各試験時における石炭の単位体積重量も示した。また、変形係数としては、主応力差~ひずみ曲線において、初期接線勾配 E_i と、供試体破壊時の 1/2 の主応力差における割線

粘着力		0.73t/m ²
内部摩擦角		40.8°
単位体積重量	静的三軸圧縮試験時	0.97t/m ³
	動的三軸圧縮試験時	0.95t/m ³
	弾性波試験時	0.80t/m ³
	振動実験時	

表-1 石炭の強度定数及び単位体積重量

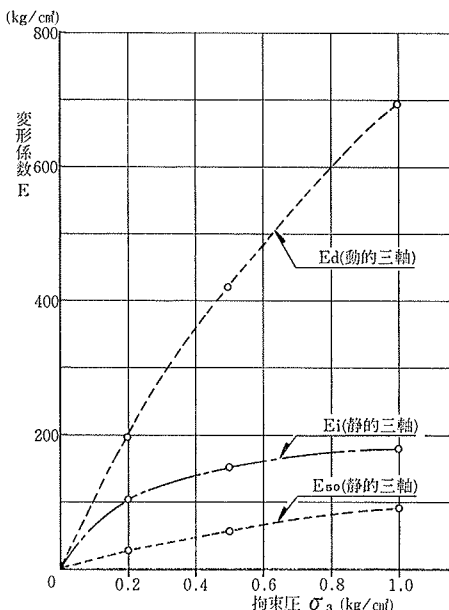


図-1 拘束圧と変形係数との関係

勾配 E_{50} を求めた。これらの変形係数と拘束圧との関係を図-1 に示した。この図によると、石炭の変形係数 E_i 、 E_{50} は、拘束圧の増加にともなって増大する傾向が認められる。

2.2. 動的三軸圧縮試験

静的三軸圧縮試験の場合と同様、直径 50 mm、高さ 125 mm の供試体を作成し、拘束圧 σ_3 を 0.2、0.5 及び 1.0 kg/cm² とした場合について、動的三軸試験を実施し、変形係数を求めた。なお、試験は、サイロ内に貯蔵されている石炭の応力状態として、水平方向の拘束圧 σ_3 に対して、鉛直方向に $3\sigma_3$ が作用している状態を想定しこれを試料の初期状態として、鉛直方向に全振幅で約 0.3% の一定振幅ひずみを与えるという方法で行なった。振動波形は、正弦波で、振動数は、後述の布容器を用いた石炭の振動試験結果から得られた 1 次の固有振動数に対応させ、6 Hz とした。

本試験結果から求めた、石炭の動的変形係数 E_d と拘束圧との関係を図-1 に示した。同図によると、動的変形係数は静的三軸圧縮試験結果の場合と同様、拘束圧の増加に伴って増大する傾向が認められる。また、動的変形係数は、静的三軸圧縮試験結果から求めた値と比較して、かなり大きな値を示しており、両者の比は、拘束圧の増加に伴って増大する傾向が認められる。

2.3. 弾性波試験

石炭を紙製円筒器内に充てんし、容器底板から発生させた弾性波を石炭内に埋設したセンサーによって測定する方法である。図-2 に供試体形状を示す。センサーは小型の加速度計とし、横波及び縦波の発生は、それぞれ底板を水平方向及び上向きに木づちで打撃する方法とした。石炭内を伝播する弾性波速度及び下式によって石炭のせん断剛性、ポアソン比、ヤング率を求めた結果を表-2 に示した。

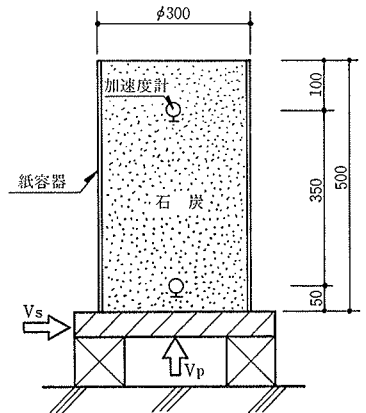


図-2 弾性波試験供試体形状

弾性波試験			
V_s	46m/sec	G_0	17.3kg/cm ²
		ν	0.394
V_p	110m/sec	E	48.2kg/cm ²

表-2 弾性波試験結果

せん断剛性、ポアソン比、ヤング率を求めた結果を表-2 に示した。

$$G = \rho V_s^2$$

$$\nu = \left(\frac{V_p^2}{2V_s^2} - 1 \right) / \left(\frac{V_p^2}{V_s^2} - 1 \right)$$

$$E=2G(1+\nu)$$

2.4. 振動実験

石炭の動特性の把握を目的として、容器がフレキシブルな布製円筒容器内に石炭を充てんし、正弦波による水平方向の強制振動実験を実施した。図-3に供試体形状と測定位置を示す。まず、振動台による入力加速度を、各加振々動数に対して50 gal一定とし、石炭内に埋設した加速度計による加速度共振曲線を図-4(a)に、また入力加速度が200 galの場合を図-4(b)に示した。同図から50gal, 200gal各入力加速度の共振々動数は各々6Hzと4Hzである。そこで次式に基づいて各振動時の石炭の有するせん断剛性(G)を推定した結果を表-3に示した。

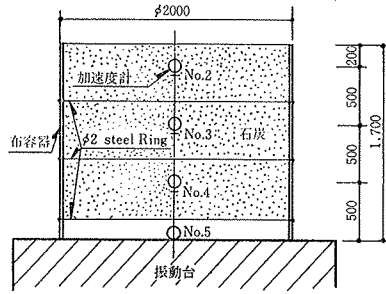


図-3 布容器模型形状

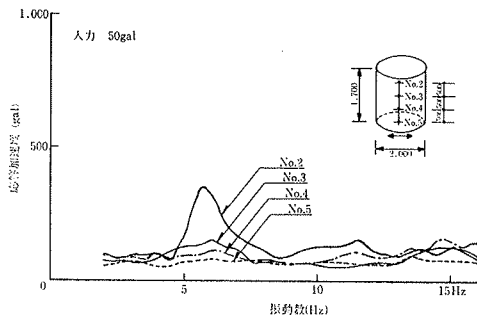


図-4(a) 布容器模型 石炭の加速度共振曲線 (50 gal 入力)

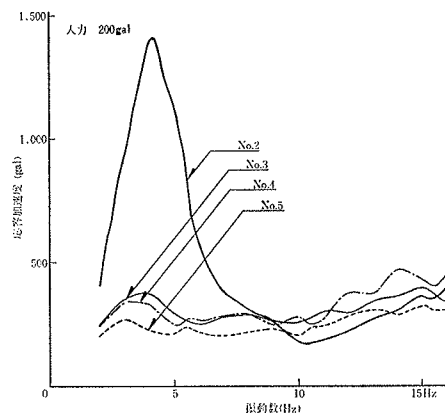


図-4(b) 布容器模型 石炭の加速度共振曲線 (200 gal 入力)

振動実験	入力加速度	fo	G	γ	G/Go	h
	50 gal	6Hz	13.7 kg/cm ²	4.92 × 10 ⁻² %	0.79	25%
	200 gal	4Hz	6.04 kg/cm ²	1.75 × 10 ⁻¹ %	0.35	35%

表-3 布容器模型 振動実験結果

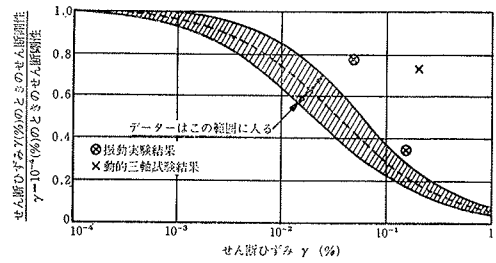


図-5 せん断剛性とせん断ひずみ

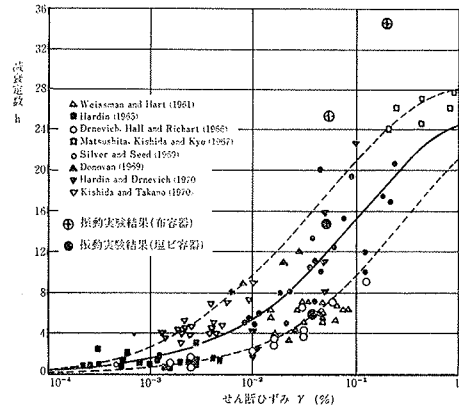


図-6 減衰定数とせん断ひずみ

$$G = \rho V_s^2 \quad H: \text{供試体(石炭)高さ}$$

$$V_s = 4Hf_0 \quad f_0: \text{系の共振々動数}$$

なお、同表には、せん断ひずみも併記した。このひずみ(γ)は、石炭表面付近が急激に増幅されていることを考えて図-3のNo.2を除外した他の測点でのデータの平均値とした。また、表-3には2.3.で求めたせん断剛性値に対する比(G/G₀)も記した。ここで、弾性波試験でのせん断ひずみを1×10⁻⁴%と推定した。両供試体の形状が異なるため、直応力が若干異なるから直接的には比較できないが、石炭のせん断剛性がせん断ひずみに依存しているといえよう。

次に、石炭の減衰性について検討する。図-4(a), (b)を基に、1/√2法、あるいは応答倍率から減衰定数(h)を算出した結果を表-3に示した。この場合にも、石炭表面付近のデータは除外した。減衰定数に関しても、その値がせん断ひずみレベルに依存するといえよう。

以上、弾性波試験、及び布容器を用いた振動実験結果から、石炭の動的変形係数、及び減衰定数は、ひずみ依存性を有していることが明らかとなった。そこで、石炭のこのようなひずみ依存の性状と、同じ粒状体である砂に関するひずみ依存の性状との比較を試みた。図-5はSeed¹⁾が示した砂のせん断剛性とひずみとの関係であり、また、図-6は、Seed, 岩崎ら¹⁾が示した減衰定数とひずみとの関係である。これらの図中に、今回の弾性波試験、及び振動実験結果から求めた値をプロットした

た。これらの図によると、石炭のせん断剛性に関する傾向は砂に関する傾向と比較的合っており、また石炭の減衰定数についても、値自体は砂と比較してかなり大きくなっているが、ひずみに対する傾向は砂と類似している。なお、図-5中には、動的三軸圧縮試験結果から求めた値もプロットした。この値は、図-1に示す拘束圧と動的変形係数 E_d の関係から、布容器による振動実験時における試料の平均的な拘束圧に対応する E_d を求め、さらに、次式によって E_d をせん断剛性 (G) に変換することによって求めたものである。

$$G = \frac{E_d}{2(1+\nu)}$$

但し E_d ; 動的三軸圧縮試験結果から求めた変形係数で、石炭のヤング率をあらわす。

ν ; ポアソン比、弾性波試験結果から 0.394

図-5によると、動的三軸試験結果から求めた値は上記の傾向からかなりはずれた値になっている。この原因としては、動的三軸圧縮試験時と振動試験時における試料の締固め状態の相違、動的三軸圧縮試験の E_d について、既述のような拘束圧の補正を行なったことによる影響、試験方法の相違による影響等が想定されるが、この問題は、今後の検討課題にしたいと考えている。

3. 石炭サイロの模型振動実験

石炭が充てんされた材質の異なる2種類のサイロ模型の正弦波定常加振を、その入力加速度を小入力から大入力まで種々変えて実施し、石炭サイロの動特性を実験的に把握した。

3.1. 実験概要

容器の材質が異なる塩化ビニール樹脂(透明)製円錐模型と鋼製円錐模型(以下各々塩ビ模型、steel模型と称す)の2種類のサイロ模型に対し、振動台入力加速度が、50 gal, 100 gal, 200 gal, 300 galの4ケースについて、6~40 Hzまでの水平方向正弦波加振実験を行なった。サイロ容器への石炭の充てんは、振動台を200 gal程度で加振させる振動締固め方法とし、同時に、換振器を石炭内の所定の位置にセットした。測定項目は、サイロ容器及び石炭の加速度のほか、塩ビ模型については容器のひずみ、steel模型では、容器に加わる圧力である。図-7に steel模型についての測定位置を示したが塩ビ

諸定数	材料	塩化ビニール樹脂(透明)	鋼材(SS41)
肉厚 t (mm)		8.0	3.2
単位体積重量 ρ (gr/cm ³)		1.38	7.9
ポアソン比 ν		0.341	0.3
ヤング率 E (kg/cm ²)		3.43×10^4	2.1×10^6
せん断弾性係数 G (kg/cm ²)		1.28×10^4	0.81×10^6

表-4 サイロ模型材料の諸定数

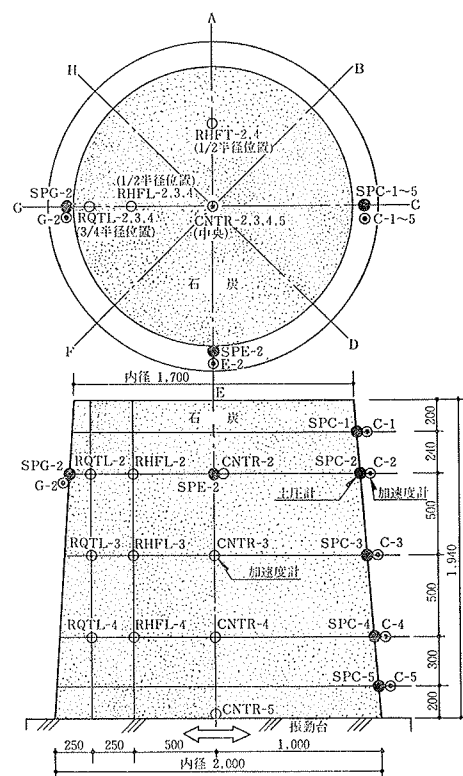


図-7 Steel模型 測定位置図

模型の場合も加速度計の配置は、図-7と同じである。表-4に両容器の材料諸定数を示す。

3.2. 実験結果とその検討

図-8(a)及び(b)に塩ビ模型についての各入力加速度に対する容器及び石炭の加速度共振曲線を示す。入力加速度の増大に伴う系の振動性状の変化が認められる。特に200 gal以上の入力の場合には、50 gal, 100 gal入力時に比して共振曲線の形状が一変している。前述したような石炭物性値のひずみ依存性の他に、容器内への石炭充てん時の振動締固めも一因と思われる。すなわち、石炭投入と併行して振動台を200 gal程度で加振しているため、200 gal以上の入力加速度に対してのみ、石炭の沈下という物理的変化も生じるからである。ちなみに、石炭の自然積付による充てん後の200 gal加振実験後には石炭表面が一様に約100 mm沈下したことを付記しておく。50 gal, 100 gal各入力時においては、入力レベルの増大につれて系の共振数値は低下し、減衰定数は増加している。1/2法による石炭の減衰定数の値は、50 gal入力で6%、100 gal入力で15%であった。なお、この時の石炭のひずみの平均値は各々 $4 \times 10^{-2}\%$, $5 \times 10^{-2}\%$ である。前述の布容器模型での減衰定数25%と比較するとかなり小さいことがわかる。この理由としては、石炭の積付け状態の相違が考えられる。すなわち、布容器の場合は自然積付けであり、塩ビ模型の場合の振動締固めとは異なるからである。図-9は、50 gal入力時の1次及び

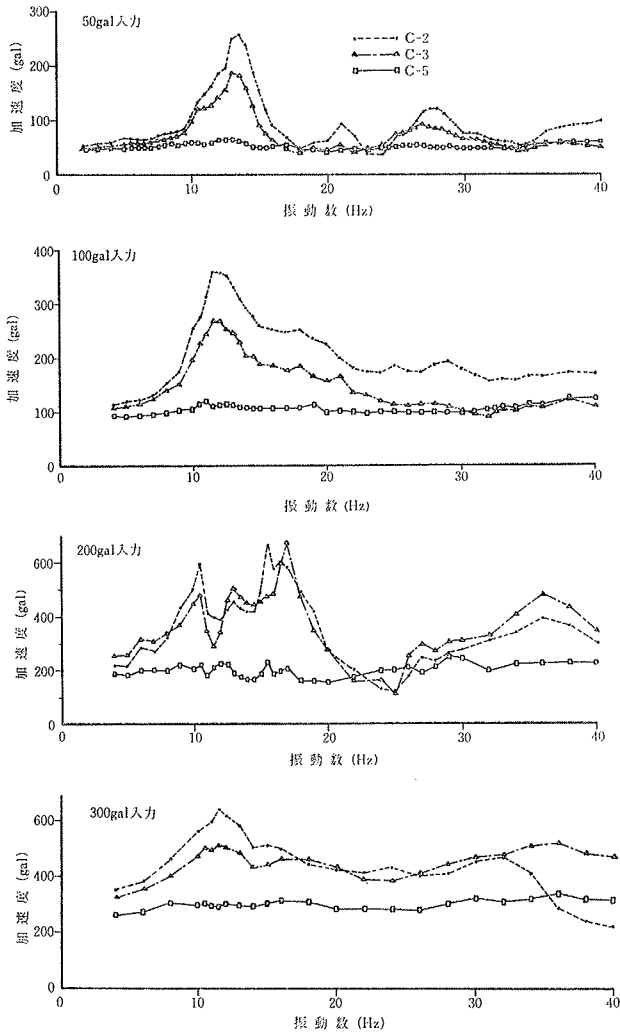


図-8(a) 塩ビ模型 容器の加速度共振曲線

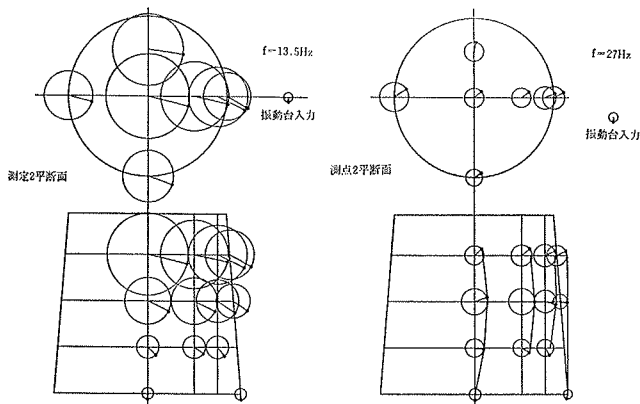


図-9 塩ビ模型 加速度モード (50gal 入力)

2次共振点におけるサイロ模型の加速度モードを示した。1次共振点 (13.5Hz)では、表面付近は、中央部の応答量が最大で、ついで1/2半径位置、3/4半径位置とサイロ壁体に近づくにつれて小さくなっているが、下方になるにつれてその差は小さくなっている。すなわち、容器内の石炭は、表面中央付近が大きく振動しているこ

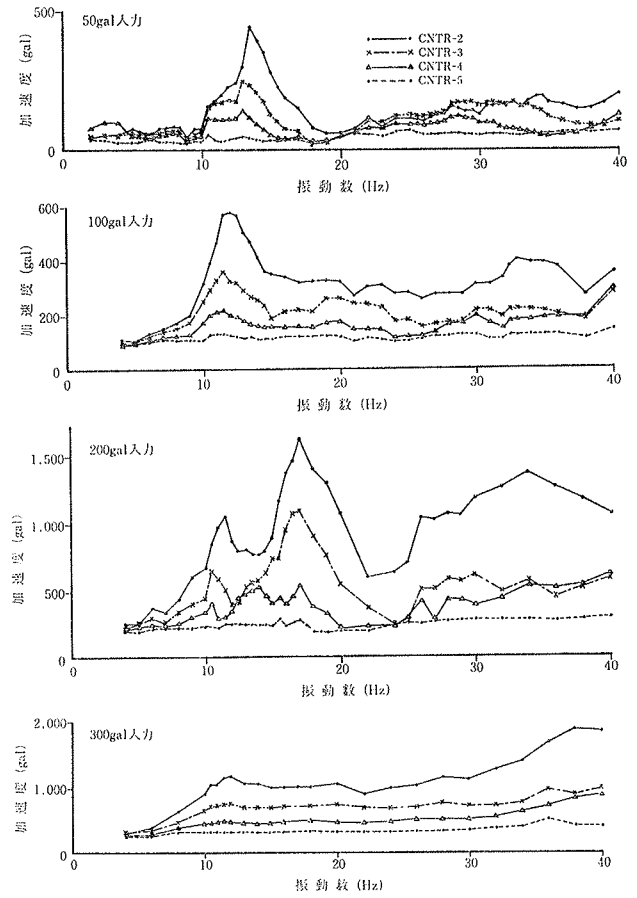


図-8(b) 塩ビ模型 石炭の加速度共振曲線

とを示している。2次共振点 (27 Hz 付近) においては石炭だけが2次モードを呈し、サイロ容器は1次振動形を示している。図-10には、各入力時における1次共振点での加速度応答倍率を示した。塩ビ模型の振動実験では、容器が透明であるから目視による観察も

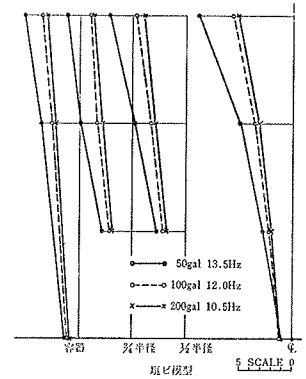


図-10 塩ビ模型 加速度応答倍率

行ない、200gal 以上の入力の場合には、石炭表面のサイロ壁体に近い部分において応答量の差による環状の境界線がみられた。石炭投入時に、各層境界面 (加速度計設置高さ位置) の容器に近い数箇所に白色の粉状ビルトンを散布しておき、これの拡散状態の観察から、大入力時には石炭の上方部分において、サイロ容器との間に空隙が生じると、上部の石炭がその空隙に流れ落ちる現象が認められ、筒体と石炭との間には変位の不連続性も考えられる。

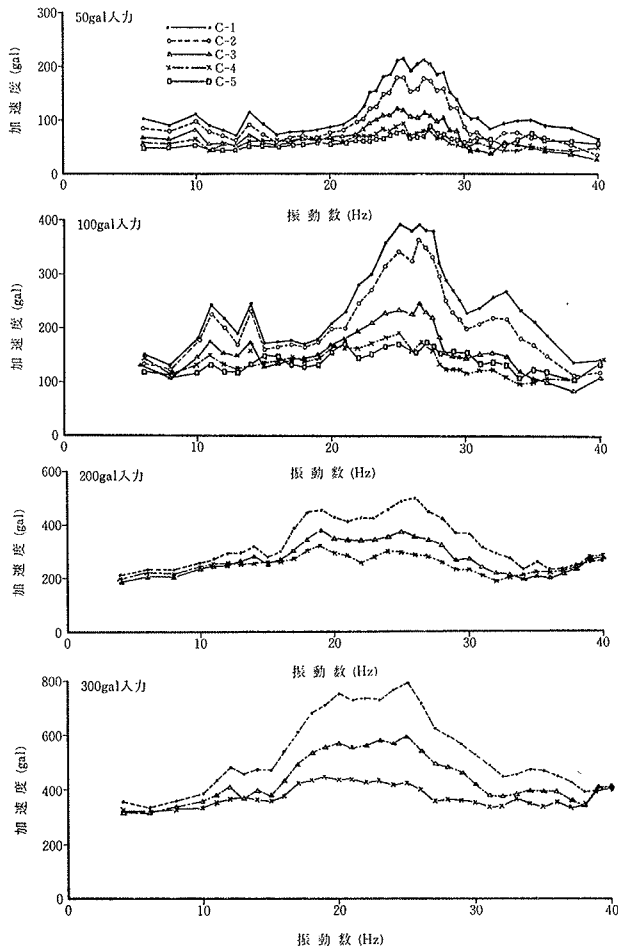


図-11(a) Steel 模型 容器の加速度共振曲線

次に steel 容器についての各入力加速度に対する容器及び石炭の加速度共振曲線を図-11(a)及び(b)に示す。入力加速度の増大に伴い、石炭の挙動が変化することは、塩ビ模型の場合と同様である。steel 模型の場合、200 gal あるいは 300 gal の入力では、石炭の上方中央部においては、ある振動数を境に、それ以上の高振動数領域で応答量はほぼ一定で、明確なピークはみられない。下方あるいは、1/2 半径、3/4 半径各位置では、容器の共振曲線と同様の形状を示していることを考えると、石炭の表面中央部付近だけが液状化に近い挙動を示しているようである。両模型の同一入力時の共振曲線を比較すると、内部の石炭の挙動は容器の剛性と関連があり、サイロ容器の剛性の高いものの方が低いものより石炭の応答が大きくなる傾向がある。

3.3. 実験結果のまとめ

実験結果を要約すると、容器内に充てんされた石炭の応答は、容器の材質によって応答に変化がみられること入力レベルの増大に伴い、石炭の剛性は低下し、減衰性は大きくなること、石炭表面部分を頂点としたおわん型部分の振動が大きいこと、石炭とサイロとの間に空隙が生じ、上部の石炭がすべり込む場合もあることなどが判

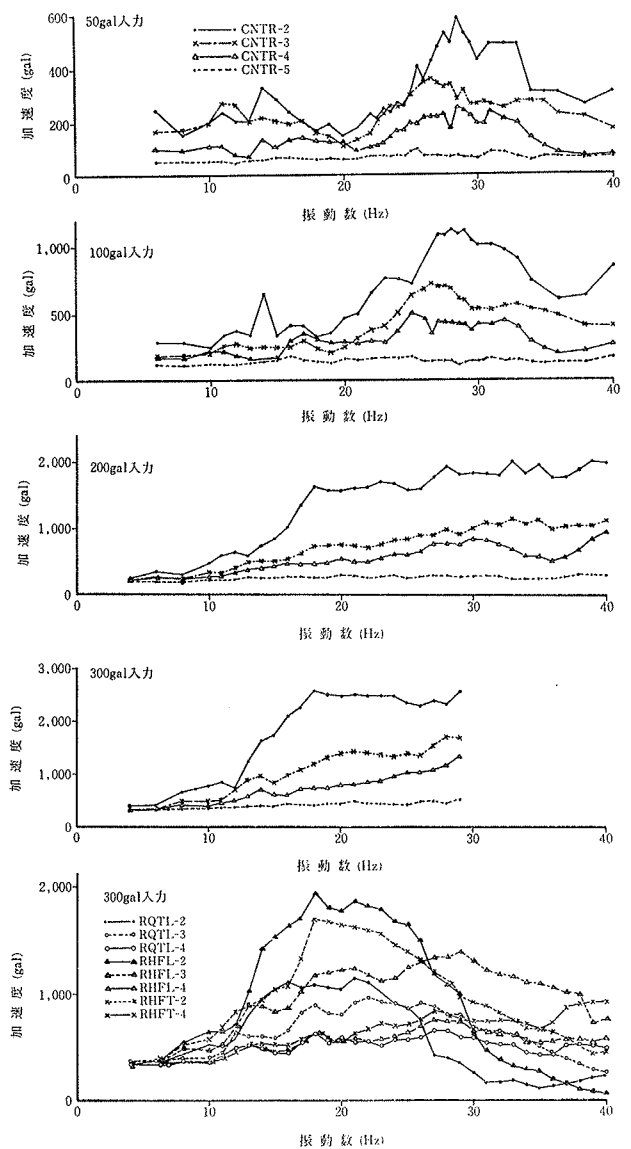


図-11(b) Steel 模型 石炭の加速度共振曲線

明した。

今回の実験では、本報で述べて来たもの以外にも、両模型に対する実地震動入力の実験や、容器形状の違いをみるために行なった塩ビ製円筒容器の実験も行なっている。また、steel 容器の場合には、土圧計によって、容器に加わる石炭内圧の測定も行なっている。本報では紙数の関係で省略したが、機会をみて報告する予定である。

4. シミュレーション解析

軸対称回転体有限要素法²⁾により解析する。石炭は回転体リング要素とし、容器は今回の実験の板厚が薄いことを考え円すい形断面のままの曲げ、せん断及び伸び縮みを考えたビーム要素とする。

4.1. 解析仮定

(1) 石炭は弾性体とし、鉛直応力レベルに応じ相応な

せん断剛性を有する。また、ひずみレベルによりせん断剛性を変化させる。

- (2) 石炭と容器は変位連続とする。
- (3) 容器のオーバリング変形は無視する。
- (4) 基礎は原則的に固定として扱う。
- (5) 減衰は石炭及び容器でそれぞれ異なった減衰定数を与えるいわゆる各部減衰とし、全体系の減衰マトリックス[C]は次式から決定する³⁾。

$$[C] = [\tilde{M}]^{1/2} \{ [\tilde{M}]^{-1/2} [\tilde{K}] [\tilde{M}]^{-1/2} \}^{1/2} [\tilde{M}]^{1/2}$$

$[\tilde{M}]$, $[\tilde{K}]$ はそれぞれ石炭リング要素と容器ビーム要素毎の質量マトリックス $[m_i]$ 及び剛性マトリックス $[k_i]$ に要素毎の減衰定数を乗じたマトリックス $[m_{ai}]$, $[k_{ai}]$ の重ね合せにより定義する。

$$[m_{ai}] = 2h_i [m_i]$$

$$[k_{ai}] = 2h'_i [k_i]$$

なお、以下の解析では $h_i = h'_i$ とする。

4.2. 解析モデル

図-12に要素分割を示す。石炭は三角形リング要素とし、高さ方向7分割、半径方向5分割とする。なお、同図には実験値と解析値の共振曲線を比較する際の実験時測定箇所及び解析値表示箇所をそれぞれ黒丸、白丸で示してある。

4.3. 解析に用いた諸定数と固有値解析

石炭の諸定数は2章を参考にし、かつ振動実験時の積付法を勘案して表-5のように設定したもので、せん断剛性Gの与え方を2種類仮定した。CASE 1 は石炭のGを高さ方向一様とした場合、CASE 2 は上載圧 σ_v (kg/cm²) に応じ $G \approx 125 \sigma_v^{0.75}$ とした場合である。なお、塩ビ及び steel の諸定数は表-4の値を用い、また、減衰

定数は塩ビの場合1%, steelの場合0.2%とした。

石炭のみ及び石炭と容器の連成した場合の固有値解析結果を表-6に一括して示す。1次振動数に着目すると、塩ビ容器の場合、CASE 1 と 2 はほとんど変化しない。しかし steel 容器のように容器の剛性が高い場合はCASE 2 の振動数の方がCASE 1 に比べ低くなる傾向にある。steel 容器の場合の1次振動モードを2つのCASEについて図-13に比較して示したが、CASE 2 の場合は上方部石炭の変形がCASE 1 に比べ大きいことがわかる。

4.4. 応答解析

応答解析はモード合成法による。石炭のせん断剛性Gを上載圧 σ_v により変化させたCASE 2 の場合についての結果を以下に示す。

塩ビ容器50 gal 入力時の水平加速度共振曲線、1次共振点でのモード形をそれぞれ図-14, 15に実験値と比較して示す。1次共振点での応答値は解析結果の方が若干大きい。共振曲線及びモード形とも解析結果と実験結果はほぼ一致している。なお、解析において1次モードのモード減衰定数は4.2%であった。更に、塩ビ容器100 gal 入力時の場合の水平加速度共振曲線を図-16に示す。100 gal 入力の場合、石炭の応答値の増大に伴う物

	石炭のみ		石炭+塩ビ容器		石炭+Steel容器	
	CASE1	CASE2	CASE1	CASE2	CASE1	CASE2
1次(Hz)	4.87	5.27	14.1	13.9	32.2	27.9
2次(Hz)	13.02	13.65	29.2	26.7	33.2	30.6
3次(Hz)	22.75	20.44	37.3	29.8	41.6	40.1

※塩ビ容器のみの1次振動数≒56Hz

※Steel容器のみの1次振動数≒200Hz

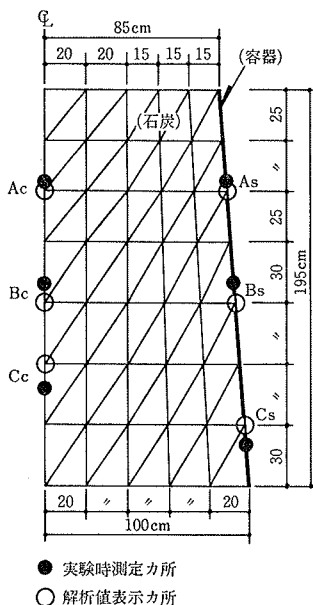


図-12 要素分割

ρ (t/m ³)	ν	G (kg/cm ²)		h (%)
		CASE1	CASE2	
0.8	0.4	20	6	13
0.8	0.4	20	11	11
0.8	0.4	20	15	9
0.8	0.4	20	20	7
0.8	0.4	20	23	5
0.8	0.4	20	27	3
0.8	0.4	20	31	2

ρ : 単位体積重量
 ν : ポアソン比
 G : せん断剛性
 h : 減衰定数

表-5 石炭の諸元

表-6 固有振動数(計算値)

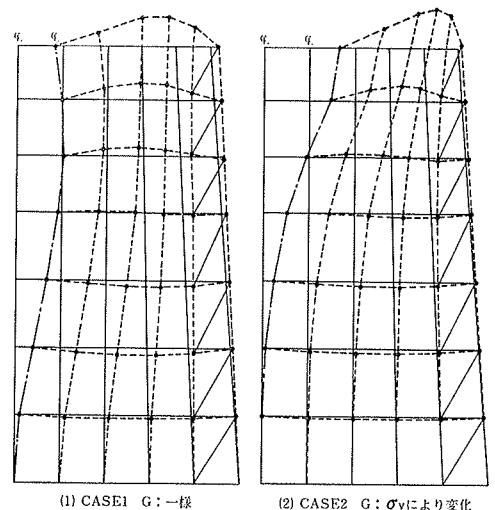
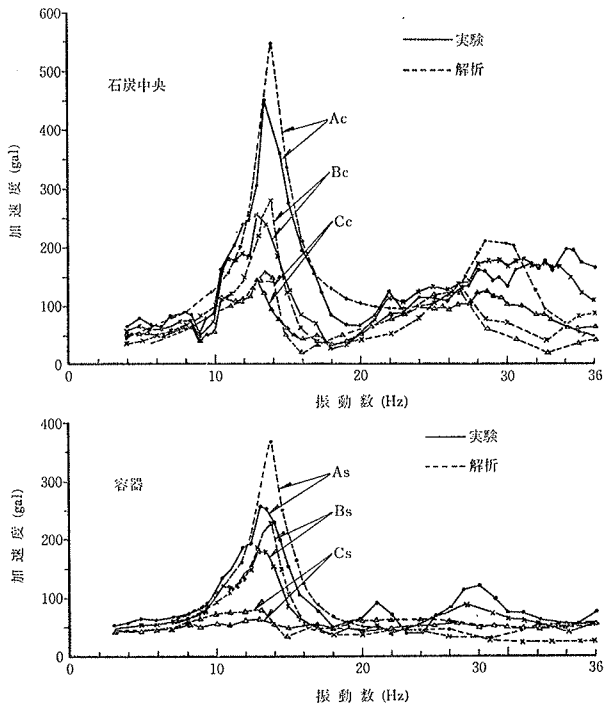


図-13 石炭+Steel 容器の1次モード



図一四 塩ビ容器の場合の共振曲線 (50gal 入力)

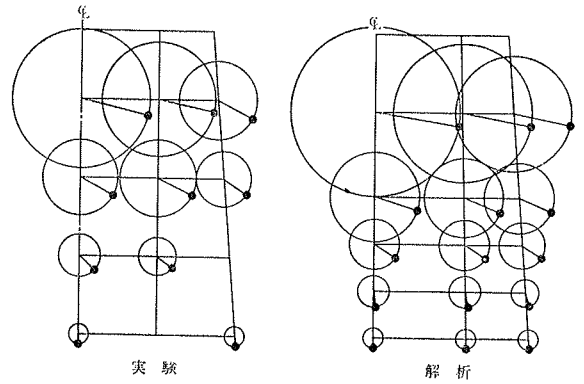
性の変化（剛性低下と減衰性の増大）を予め考慮し、表一五に示したGを $\frac{1}{2}$ 倍に、hを2倍にそれぞれ変化させて解析したものである。図一六より大入力時においては、等価弾性的な考え方ではほぼ実験結果と合致した結果が得られることがわかる。

steel 容器50gal 入力時の水平加速度共振曲線を図一七に示す。steel 容器の場合実験結果には数箇所ピークがみられるのに反し、解析結果は28ghz付近にしか顕著なピークがみられず、解析結果は実験結果を良く説明し得るとは言いがたいが、応答値の大きいところでの振動数及び応答値は比較的良く対応していると言えよう。

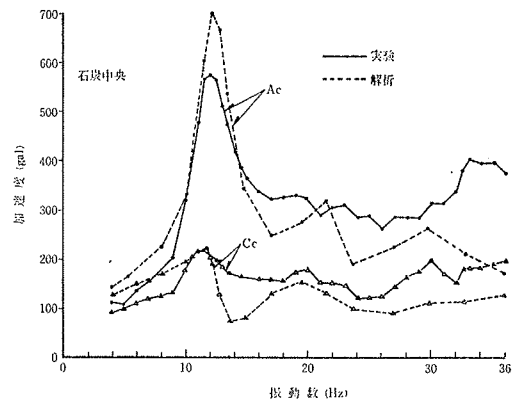
5. むすび

本報では地震時石炭サイロの応答性状に関する模型振動実験と解析結果とについて述べた。実験結果を石炭の物性試験結果に基づいてFEM 解析手法により石炭を等価弾性体と考えた解析によれば、比較的良い対応が得られた。しかしながら、剛性の高い steel 容器の場合の解析では、筒体と石炭とを一体として扱ったことなど若干の問題も残った。

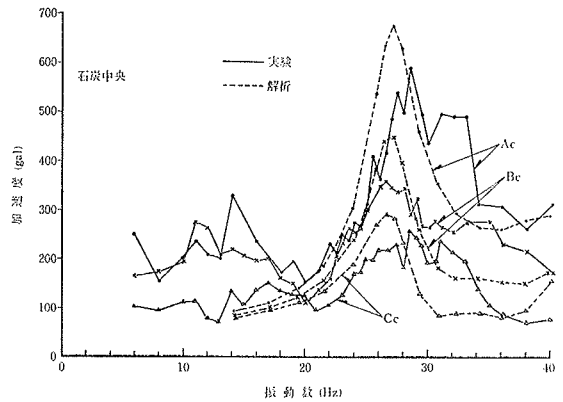
貯炭サイロを合理的に設計する為には、今後、ある意味での非線形性も考慮した石炭—筒体—地盤の連成振動解析も必要であるが、同時に各種銘柄に対する石炭の物理的、及び力学的性質に関するデータの蓄積が当面の重要課題である。



図一五 塩ビ容器の場合の1次共振点モード (50gal 入力)



図一六 塩ビ容器の場合の共振曲線 (100gal 入力)



図一七 Steel 容器の場合の共振曲線 (50gal 入力)

参考文献

- 1) 土質工学会編：土質基礎工学ライブラリー9，土と構造物の動的相互作用，(昭和48.10) pp. 38~39
- 2) 後藤，白砂：回転体有限要素法による地下タンクの地震応答解析，大林組技術研究所報，No. 19，(1979) pp. 24~28
- 3) Caughey, T. K. etc: Classical Normal Modes in Damped Linear Dynamic Systems, Journal of Applied Mechanics, ASME, vol 32, No. 3, (Sept. 1965), pp. 583~588