

I-29

内容物を考慮した円筒形サイロ構造物の地震時挙動シミュレーション

北海道大学工学部	正会員	佐々木 康彦
北海道大学工学部	正会員	芳 村 仁
北海道大学工学部	学生員	中 込 淳

1. まえがき

家畜飼料や食糧および鉱物資源の海外依存度が極めて高い我が国では、穀物・石炭などの大量貯蔵を目的とした大規模な鉄筋コンクリート製サイロあるいは鋼板製サイロが数多く利用されており、備蓄規模の拡大に応じてますます大型化の傾向を見せている。このようなサイロ構造物は内容物として大量の粉粒体を貯蔵しているため、壁面に作用する静的圧力、内容物投入時の衝撃圧、排出時の流動現象や動的過大圧力のほか、地震時におけるサイロ壁体構造と内容物の動的相互作用など、通常の土木・建築構造物には見られない特殊な問題を抱えている。特に地震多発地帯である我が国では、サイロ構造物の合理的な耐震設計をめざして、主に石炭サイロを対象とした各種模型振動実験および数値解析が実施され、粉粒体貯蔵サイロの振動特性や地震時挙動に関する幾つかの研究成果が得られている^{1)~4)}。

本研究では、サイロ壁体構造と内容物の動的相互作用を考慮できる解析手法として、軸対称有限要素および物性試験に基づいた剛性評価法による“内容物の解析モデル”を採用し、二種類のサイロ模型に関する固有振動解析結果と模型振動実験結果との比較によって、その解析モデルの妥当性を検証した。さらには、内容物満杯状態での円筒形サイロ模型の弾性地震応答解析を実施し、地震時のサイロ壁体構造と内容物の応答特性や変形状性に関する検討を行なった。

2. サイロ構造物における内容物の解析モデルと固有振動解析

この章で述べる内容物の解析モデルの妥当性・精度の検討、および次章での地震応答解析に際しては、参考文献4)の模型振動実験で用いられた、図1に示すような二種類のサイロ模型を“数値計算モデル”に選定した。この模型実験では、内容物詰込み状態のみならず、模型内部が空の状態でのサイロ模型の共振振動数も得られている。そのため、サイロ壁体構造単独(模型内部が空の状態)での固有振動解析結果との比較により、これらのサイロ模型の下端支持状態は、理論解析における“完全固定”であったことが確認できた。

以下では図1に示す二種類の円筒形サイロ模型を、それぞれ「サイロ模型A」、「サイロ模型B」と呼ぶことにする。サイロ模型Aは厚さ0.3cmの亚克力樹脂製で、直径40.6cm、高さ100.0cm、(高さ/直径)比は2.46である。また、内容物としては普通ポルトランドセメントを用いている。同様に、サイロ模型Bは厚さ0.1cmの硬質塩化ビニル樹脂製で、直径61.2cm、高さ92.0cm、(高さ/直径)比1.50、内容物は5mmフルイを通過した石炭である。

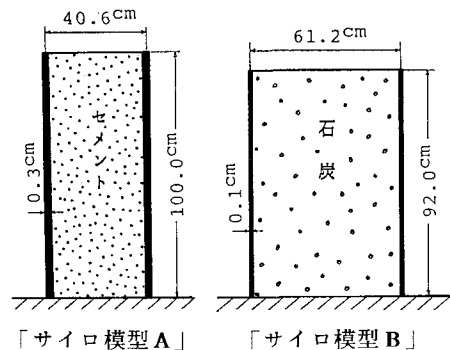


図1 “数値計算モデル”としたサイロ模型

各サイロ模型材料の物性値は、表1に示した数値を使用した。なお、(高さ/直径)比から両サイロ模型の形状を比較すると、サイロ模型Aが比較的“細長”であるのに対して、サイロ模型Bは幾分“幅広”であると見なせる。

2.1 サイロ壁体構造の解析モデル

円筒形サイロ構造物の壁体構造はほぼ薄肉円筒シェルと見なせるので、有限要素解析を行なう場合に「軸対称円筒要素」等が利用される。しかし、本研究では内容物の解析モデルとして用いる「軸対称長方形要素」をサイロ壁体構造にも適用した。これは、サイロ壁体構造と内容物を異種の有限要素でモデル化した場合、境界領域での節線変位の自由度などが異なることを避けるためである。四辺形断面を有する軸対称長方形要素とその節線変位成分を図2に示す。

内容物の解析モデルに関する検討前に、模型内部が空の状態におけるサイロ模型A、Bの固有振動解析を行ない、軸対称長方形要素による要素分割数と解の収束状況を検討した。表2は、軸対称円筒要素および軸対称長方形要素による固有振動数 f （円周方向波数 $n=1$ 、高さ方向次数 $m=1$ ）を、参考文献4)における実験値と比較したもので、要素分割数はいずれも高さ方向16等分割である。この数値計算モデルは、軸対称長方形要素における四辺形断面の辺比が非常に大きくなるにもかかわらず、同表の結果から高精度な数値解が得られることがわかる。なお、高さ方向に10要素分割でも、相対誤差は5%以内に収まり、実用上十分な精度であった。

2.2 内容物の解析モデルとせん断剛性の評価方法

粉粒体である内容物をここでは簡単のために弾性体と仮定し、図2に示すような「軸対称長方形要素」でモデル化する。この有限要素は断面隅角部に4節線を配置し、各節線で軸方向、円周方向および半径方向の三変位成分を未知量とする。また、変位成分のほか応力やひずみ等の各物理量は円周方向にフーリエ級数展開されている。

内容物の動的物性に関しては、弾性波試験・振動実験などから、石炭の剛性や減衰がせん断ひずみレベルと密接な関係にあることが示されている³⁾。しかし、ここでは低ひずみ弾性領域における物性値を考慮し、「上載圧に依存するせん断弾性係数」という形で内容物のせん断剛性を評価した。図3は弾性波伝播試験によって求められた、せん断弾性係数と上載圧に関する実験データおよび実験式である⁴⁾。これらの結果はサイロ模型Aでのセメント、サイロ模型Bでの石炭に対するものである。以下の固有振動解析および地震応答解析においては、同図の実験式から上載圧に応じて各要素ごとにせん断弾性係数を求め、高さ方向に変化させた値を用いている。なお、上載圧の推定値は静的粉体圧の理論式であるJanssen式によって算定した。

表1 サイロ模型材料の物性値

	単位体積重量 $w \text{ (kgf/cm}^3\text{)}$	縦弾性係数 $E \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	ポアソン比 $\nu \text{ (-)}$
サイロ模型A	1.18×10^{-3}	3.86×10^4	0.35
サイロ模型B	1.45×10^{-3}	2.42×10^4	0.34

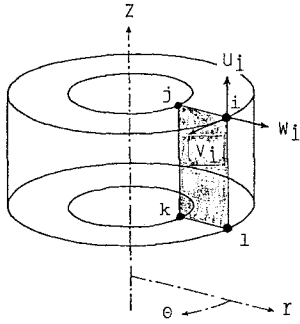


図2 軸対称長方形要素と節線変位

表2

模型内部が空の状態での固有振動数の比較

	サイロ模型A	サイロ模型B
実験値 (Hz) :	1 1 4	1 1 4
計算値 (Hz) :		
軸対称円筒要素	1 1 5	1 1 4
軸対称長方形要素	1 1 6	1 1 5
(相対誤差)	(+1.8%)	(+0.9%)

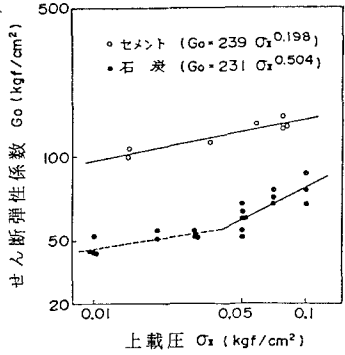


図3 内容物のせん断弾性係数と上載圧

単位体積重量・ポアソン比に関して、今回は内容物の全領域で一定値を用いた。セメントおよび石炭の単位体積重量は、それぞれ 1.6×10^{-3} 、 $0.9 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^3$ 、ポアソン比はいずれも 0.30 である。

2.3 内容物の解析モデルの妥当性

軸対称長方形要素および前節で述べた内容物のせん断剛性の評価方法によって、内容物満杯状態でのサイロ模型 A、B の固有振動解析を行なった。要素分割数は高さ方向を 10 等分割とし、内容物の半径方向については解の収束状況から 4 等分割で十分であった。円周方向波数 $n = 1$ 、高さ方向次数 $m = 1$ に対する両サイロ模型の固有振動数 f を、実験値⁴⁾と比較して表 3 に示す。内容物が石炭であるサイロ模型 B については、実験値と計算値が良く一致している。しかし、サイロ模型 A についてはセメントのせん断剛性を少し高めに評価したため、相対誤差で約 12% 程度大きめの計算結果であった。

以上の比較結果から、内容物のせん断剛性を適切に評価できれば、比較的簡単な仮定と解析手法によっても、内容物とサイロ壁体構造の動的相互作用を考慮した「円筒形サイロ構造物の固有振動数」をかなり良い精度で推定できることが明らかになった。

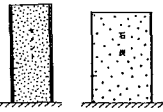
3. 内容物満杯状態での円筒形サイロ模型の弾性地震応答解析

図 1 に示した二種類のサイロ模型 A、B を数値計算モデルとして、内容物満杯状態でのサイロ模型の地震応答解析を行なった。使用した有限要素モデルおよび内容物のせん断剛性評価法、要素分割数などは前章で述べた固有振動解析の場合と同様である。なお、この地震応答解析では粘性減衰を仮定し、減衰定数 5% を与えた。円周方向波数は $n = 1$ である。運動方程式の数値積分は Newmark の β 法 ($\beta = 1/4$) により、時間間隔を $\Delta t = 0.005$ 秒として計算を行なった。また、使用した入力地震加速度波形を図 4 (a) に示す。

図 4 (b)、(c) はサイロ模型 A、B における地震応答加速度波形を、それぞれ壁体頂部と内容物表面中心位置とで比較したものである。サイロ模型 A、B のいずれの場合も、両位置での応答性状は殆ど一致しており、地震応答時にはサイロ壁体構造と内容物とが一体となって挙動することが同図からわかる。

表 3

内容物満杯状態
での固有振動数の比較



	サイロ模型 A	サイロ模型 B
実験値 (Hz)	17.8	17.0
計算値 (Hz)	20.0	16.9
(相対誤差 %)	(+12.4%)	(-0.6%)

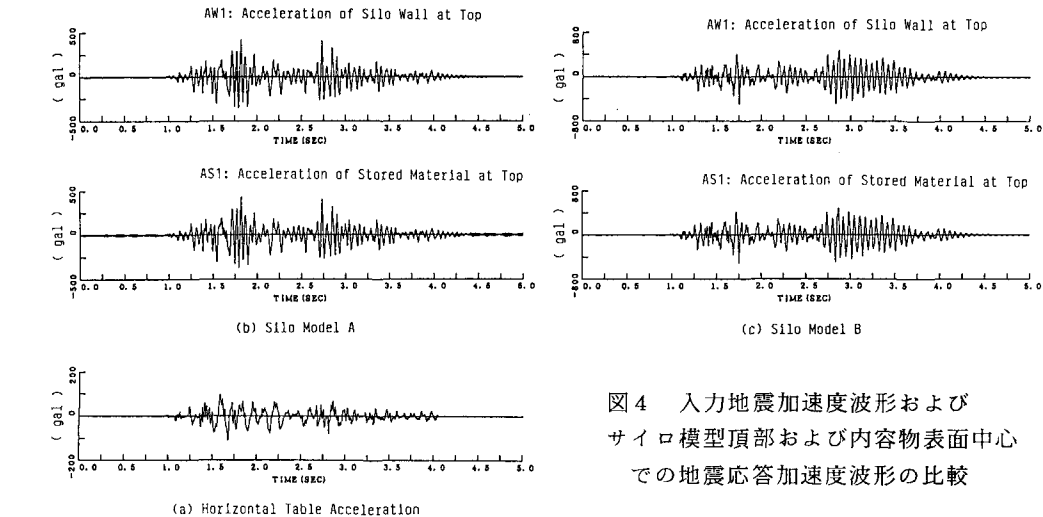


図 4 入力地震加速度波形およびサイロ模型頂部および内容物表面中心での地震応答加速度波形の比較

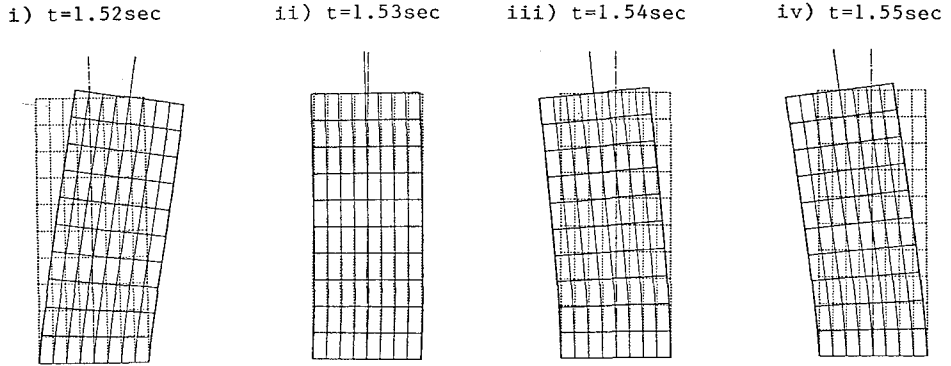


図 5 (a) 地震応答時の変位応答性状の推移 [サイロ模型 A]

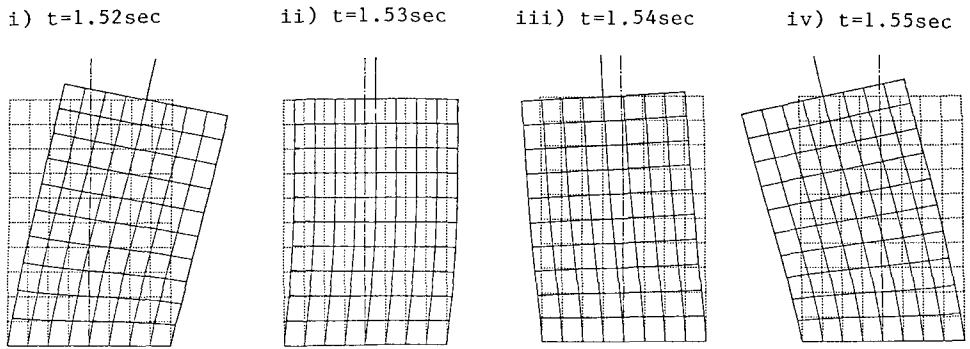


図 5 (b) 地震応答時の変位応答性状の推移 [サイロ模型 B]

図 5 (a)、(b)は、内容物表面中心位置での応答変位が最大となる時刻を含んだ、サイロ壁体構造および内容物の変位図であり、地震応答過程において0.01秒間隔で表示したものである。いずれのサイロ模型も、高さ方向1次モードが卓越している。しかし、サイロ模型Aが比較的細長であるため、「曲げ振動モード」で応答しているのに対して、幾分幅広であるサイロ模型Bの方は「せん断振動モード」も含まれており、(高さ/直径)比による地震応答性状の相違が指摘できる。

《 参 考 文 献 》

- 1) 森 翠、坂井藤一、門屋大二、迫田治行： 粒状物サイロの模型振動実験、川崎技報、No. 69、pp. 58-64、1979.
- 2) 河添 斉、堀越静視、本橋章平、内藤幸雄、前田祥三： 石炭サイロ模型の振動台実験とその解析、第6回日本地震工学シンポジウム講演集、pp. 961-968、1982.
- 3) 表 佑太郎、此上典文、茶谷文雄、鈴木哲夫： 石炭サイロの動的挙動に関する基礎的研究、大林組技術研究所報、No. 26、pp. 15-22、1983.
- 4) 島本 明、児玉道正、山村正明： 粉・粒状物サイロの動的有効質量に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集、No. 379、pp. 79-90、1987.