

(159) 不連続構造を持つステイブ・サイロの地震応答解析と内容物の動的効果

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

1. まえがき

“コンクリートステイブ・サイロ (concrete stave silo)”とはコンクリートブロック(ステイブ)を円筒状に組合せて積上げ、外壁をリング状の鉄筋(フープ)で締付けるといふ、不連続な壁体構造を持つ粉粒体貯蔵用サイロ構造物である。このようなステイブ・サイロの地震時挙動に関する数値解析的な研究を目的とし、“ステイブ・サイロ要素”と名付けた新しい動的解析モデルを考案した。また、壁体構造の不連続性に起因する剛性低減効果を考慮した構造剛性の評価方法を提示し、サイロ模型実験結果に基づいて等価線形化した地震応答解析を進めてきた¹⁾。

本報告はさらに、内容物を壁体構造の“付加質量”と見なす簡便なモデル化によって、内容物を充填した状態での地震応答解析を試みた。また、ステイブ・サイロ模型振動実験結果との比較により、正弦波応答時および地震波応答時における内容物の有効質量係数についても検討を加えた。

2. 模型用ステイブ・サイロの概要と壁体構造・内容物の解析モデル

地震応答解析の数値計算モデルとした、縮尺1/8模型用ステイブ・サイロを図1に示す。この模型の寸法は直径80cm、高さ198.5cm、壁厚2.0cmで、円周方向50個、高さ方向13段のモルタル製模型用ステイブ(単位体積重量 2.09gf/cm³; 幅5.0cm、高さ15.2cm、厚さ2.0cm)を円筒状に組立て、外壁を32組のフープ(4mm径の軟鋼線材)で締付けてある。内容物は「米(単位容積重量0.70~0.75gf/cm³)」を使用し、詰め込み深さは模型高さの80%とした。

ステイブ、フープ、ステイブ継目というステイブ・サイロ壁体構造の主要な構成要素を、それぞれ直方体形状の『剛体』、両ステイブの半径方向相対変位に抵抗する『フープバネ』、剛体間に配置した『分布バネ・集中バネ』としてモデル化した。これら三種類の基本解析モデルで構成される円筒状の“剛体-剛体間バネ-フープバネ”系(円筒状RBH系)モデルを、さらに2つの水平面で切断して取出した構造要素が、図2に示す“ステイブ・サイロ要素”である。この新たな構造要素は切断面における各節線上で、図のような4個の節線変位・回転角を未知量とする。なお、このような円筒状RBH系モデルの“有限要素化”により、解析モデルの簡略化と自由度の大幅な低減が可能となった。

次に、剛体間バネの剛性定数に関する評価方法が必要不可欠である。ここでは、解析すべきステイブ・サイロ壁体構造と『同一材料・同一寸法の円筒殻』を考え、その円筒殻と等価な剛性定数を基準値とし、さらにステイブ・サイロ模型実験結果に基づいて、不連続性に起因する構造剛性の低減率を推定する。ただし紙面の関係から、円筒殻と等価な剛体間バネの剛性定数(基準値)の算定式の誘導過程、その基準剛性定数の算定式の妥当性と精度の検証結果、そして模型実験結果に基づいた剛性低減率の推定方法については、参考文献1)を参照されたい。

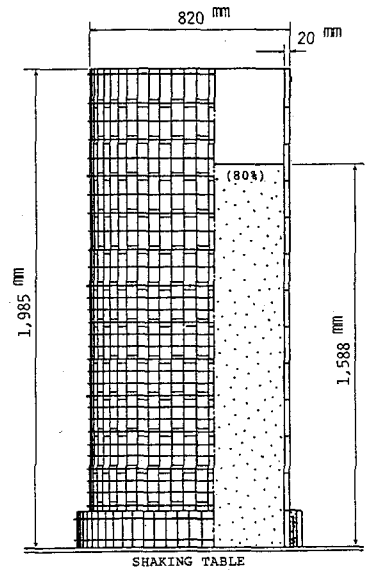


図1 模型用ステイブ・サイロ
(幾何学的縮尺1/8)

内容物の解析モデルに関して、ここでは簡単のために質量効果だけを考慮し、内容物を壁体構造の付加質量と仮定する。したがって、内容物の付加質量を含むサイロ壁体構造の換算質量密度 ρ_e は、次式で得られる。

$$\rho_e = \rho_w + C_{eff} \cdot \rho_0 \cdot r \quad (1)$$

ここで、 ρ_w 、 ρ_0 はそれぞれ壁体構造と内容物の質量密度、 $r (= V_0 / V_w)$ は壁体構造の体積 V_w に対する内容物の容積 V_0 の比を表わす。また、 C_{eff} は内容物の有効質量係数と呼ばれ、内容物の全質量に対する付加質量の割合を表わす重要な指標である。なお、このような簡略なモデル化は、内容物が壁体構造と一体化した動的挙動を示す場合や、内容物が塑性化して顕著な減衰効果を示す以前の応答領域では妥当な仮定であろう。

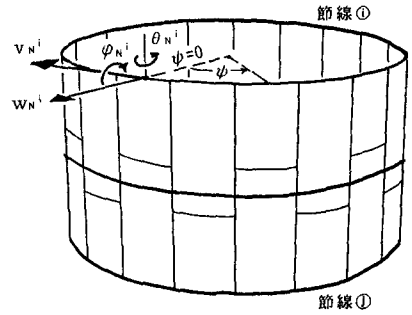


図2 “ステイブ・サイロ要素” および節線変位

3. 正弦波応答時における共振振動数の変化と内容物の有効質量係数

貯蔵用構造物における内容物の活荷重(動的な質量効果)に関しては、A. R. Chandrasekaran の先駆的な研究が挙げられる²⁾。ACI 規準において、地震力の算定に際して内容物の有効重量を80%まで低減することを許容する、その根拠を与えた研究でもある。内容物の有無による円筒模型の固有振動数の変化に着目し、自由振動実験結果および Timoshenko beam 理論から、内容物の活荷重係数を決定した。ここでは、同様な手法を縮尺1/8模型用ステイブ・サイロの実験結果に適用し、正弦波応答時における内容物の有効質量係数を算定してみる。

図2は正弦波定常加振(振幅20gal)に対する模型頂部での加速度共振曲線を、内容物を充填した状態と模型内部が空の状態とで比較したものである。内容物の存在によって、模型用ステイブ・サイロの共振振動数(基本固有振動数)が33Hzから19Hzにまで低下することが同図からわかる。

前述のステイブ・サイロ要素による固有振動解析結果から、模型内部が空の状態での基本固有振動数を実験値(33Hz)に一致させると、剛性低減率は $\alpha = 0.024$ という数値が求まる¹⁾。さらに、付加質量として内容物を考慮した固有振動解析結果に基づくと、基本固有振動数を実験値(19Hz)に一致させることにより、内容物の有効質量係数 $C_{eff} = 0.70(70\%)$ が得られる。

なお、粘性減衰を仮定した正弦波応答解析を行なうと(図2の実線参照)、各模型状態での共振点における応答倍率値から、減衰定数はそれぞれ $\eta = 0.023(2.3\%)$ 、 $0.045(4.5\%)$ という数値が得られた。このような減衰定数の増加は、内容物の減衰効果を表わすひとつの指標となる。

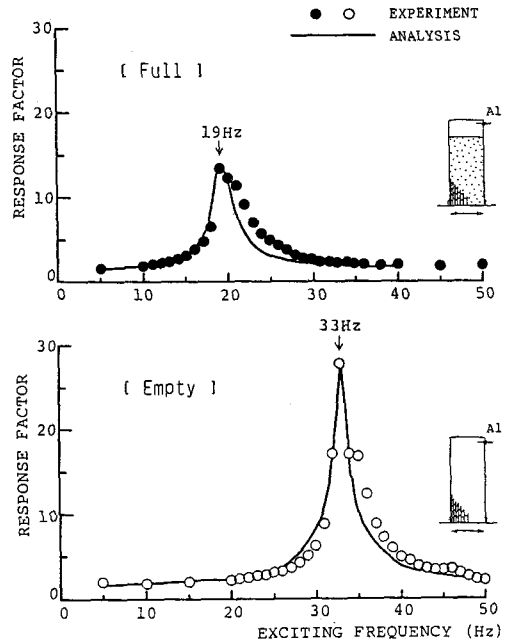


図3 内容物充填による共振振動数の変化

4. 縮尺1/8模型用ステイブ・サイロの地震応答解析と内容物の有効質量係数

模型実験および地震応答解析で使用した入力地震波形を図4(c)に示す。この地震波は根室半島沖地震(1973)の北海道厚岸町で得られた加速度記録であり、相似則に従って時間軸は1/8に圧縮してある。

以下では、最大入力加速度 99 gal、228 gal (0.10 g、0.23 g) に対する比較結果を示す。

図4は最大入力加速度レベル0.10 g に対する模型頂部での応答加速度の時刻歴波形を、(a)模型実験と(b1)~(b4)数値解析とで比較した結果である。この数値解析において、剛性低減率および減衰定数は、模型内部が空の状態における同一入力加速度レベルでの設定値 $\alpha = 0.029$ 、 $h = 0.030$ を用いた¹⁾。また、(b1)~(b4)は内容物の有効質量係数を、それぞれ $C_{eff} = 1.00$ 、0.75、0.70、0.60 とした場合の解析結果である。さらに、(a)模型実験および(b1)~(b4)数値解析における応答加速度波形のフーリエ振幅スペクトルを図5に示す。

これらの比較結果から、内容物の有効質量係数が $C_{eff} = 1.00$ あるいは0.60のような極端な場合はともかく、 $C_{eff} = 0.75$ と0.70の場合のように、時刻歴波形およびフーリエ振幅スペクトルだけでは一致度の判定が非常に難しいことがわかる。したがって、内容物の最適な有効質量係数を決定するためにも、模型実験結果と数値解析結果の一致度を判定できる定量的な指標が必要となる。

本報告では、地震波の相似性に関する評価指標を参考にして³⁾、次式で定義される2つの指標の妥当性・有効性を検討した。すなわち、フーリエ振幅および位相に関する相対誤差の絶対値の加重平均 E_A 、 E_P である。

$$E_A = \sum \text{ABS}((X^s_k - X_k) / X_k) * W_k / n_f \quad (2)$$

$$E_P = \sum \text{ABS}((\Phi^s_k - \Phi_k) / \Phi_k) * W_k / n_f \quad (3)$$

$$W_k = X_k / \sum X_k \quad (4)$$

ここで、 X_k 、 Φ_k および X^s_k 、 Φ^s_k は、それぞれ模型実験および数値解析で得られた応答波形のフーリエ振幅・位相の成分を、 n_f はその個数を表す。また、 W_k が各成分に対する重み係数である。

図6は前述の地震応答解析において、内容物の有効質量係数を $C_{eff} = 0.60 \sim 1.00$ の範囲で変化させた場合の、2つの指標値 E_A 、 E_P の変動を表わしたものである。

I. TABLE ACC. 99 gal(0.10 g)

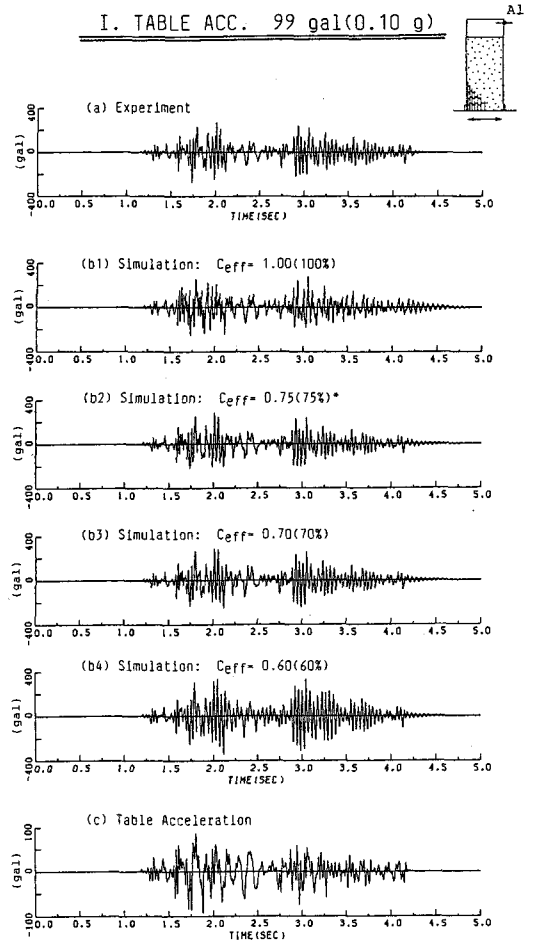


図4 地震応答波形の比較および有効質量係数

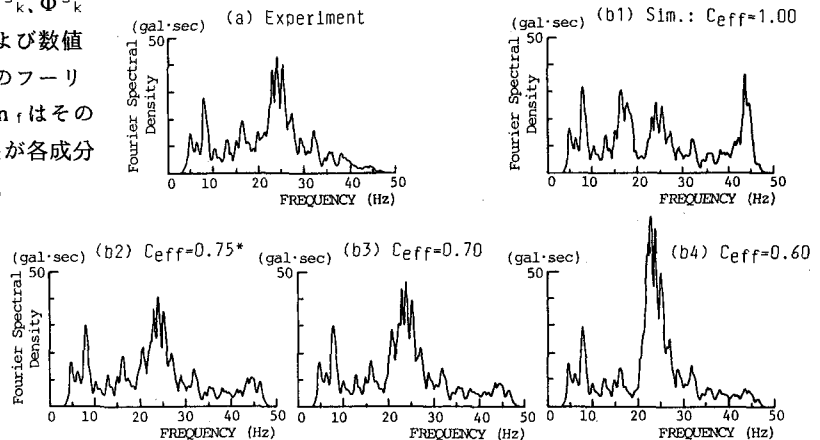


図5 有効質量係数によるフーリエ振幅スペクトルの比較

ただし、同図では $C_{eff}=1.00$ の指標値で正規化した評価指標 e_A, e_P で示してある。また、同図中には各有効質量係数に対応した模型用ステイブ・サイロの基本固有振動数 f_1 (Hz) も記入してある。これら2つの評価指標の妥当性を時刻歴波形およびフーリエ振幅スペクトルに基づいて判断すると、フーリエ振幅に関する指標 e_A には有効性が認められる。したがって、入力加速度レベル 0.10 g における、内容物の最適な有効質量係数は $C_{eff}=0.75$ (75%) と特定できる。

次に、最大入力加速度レベル 0.23 g に対する応答加速度の時刻歴波形を図7に、(a) 模型実験と (b) 数値解析とで比較して示す。この数値解析においても、模型内部が空の状態における同一入力加速度レベルでの設定値、剛性低減率 $\alpha=0.024$ および減衰定数 $h=0.030$ を用いた。また、図6と同様に、内容物の有効質量係数 C_{eff} と正規化した評価指標 e_A, e_P および基本固有振動数 f_1 (Hz) の関係を図8に示す。この場合も有効な評価指標 e_A の結果に基づいて、入力加速度レベル 0.23 g における、内容物の最適な有効質量係数は $C_{eff}=0.55$ (55%) と決定できる。

以上の検討結果をみると、内容物の有効質量係数は入力加速度レベルで異なるという結論になる。ここで、2つの入力加速度レベル 0.10 g、0.23 g における剛性低減率 $\alpha=0.029, 0.024$ は、模型内部が空の状態での基本固有振動数 $f_1=36.1$ Hz、32.9 Hz に相当する。他方、有効質量係数が $C_{eff}=0.75, 0.55$ では $f_1=20.9$ Hz、21.0 Hz となり、この結果は逆に、内容物の剛性効果によって、内容物を充填した状態での固有振動数は殆ど変化しないと解釈できる。このような考察から、“内容物の有効質量係数”とは内容物の質量効果だけでなく、剛性効果をも含んだ数値となることに留意する必要がある。

参考文献 1) 佐々木康彦、芳村 仁：コンクリートステイブサイロの構造不連続性を考慮した動的解析モデルと地震応答解析、構造工学論文集、Vol. 37A, pp. 883-892, 1991. 2) Chandrasekaran, A.R. and Jain, P.C.: Effective live load of storage materials under dynamic conditions, Indian Concrete Journal, Vol. 42, No. 9, pp. 364-365, 1968. 3) 田村重四郎、鄭 京哲：工学的見地から見た地震波の相似について、生産研究、43巻2号、pp. 43-46, 1991.

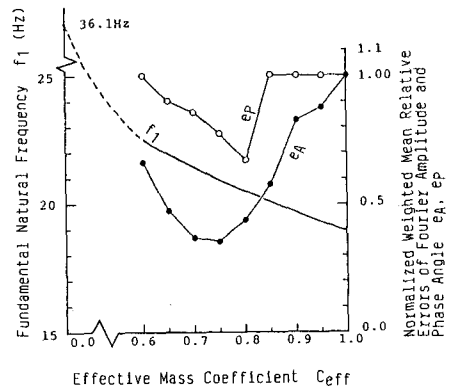


図6 内容物の有効質量係数とフーリエ振幅・位相の加重平均相対誤差

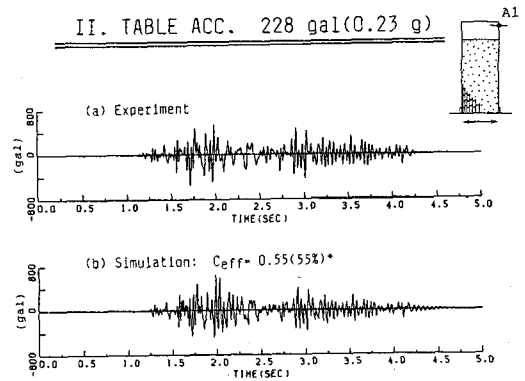


図7 地震応答加速度波形の比較

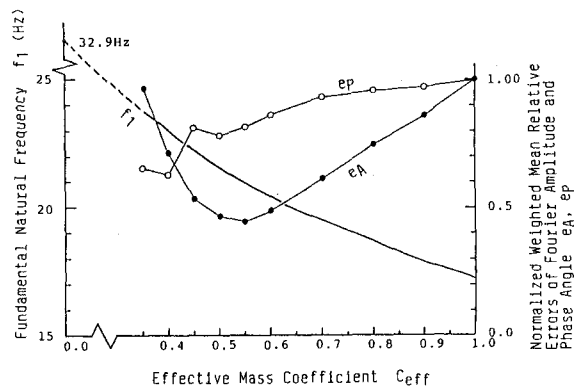


図8 内容物の有効質量係数とフーリエ振幅・位相の加重平均相対誤差