

I-40

地震応答記録に基づくステイブ・サイロの内容物の有効質量係数

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

石炭・セメント・穀物など多量の粉状体・粒状体の貯蔵施設として、大規模なサイロ構造物が広範に利用されている。我が国のような地震多発地帯では構造設計において耐震性の検討が必要不可欠であるが、この種のサイロ構造物の耐震設計上、内容物の動的影響をどのように評価すべきかが最も重要な問題となる。このような動的問題に対して、ACI¹⁾および日本建築学会²⁾の設計規準では内容物を質量効果として捉え、「地震力の算定にあたっては、地震時の内容物の減衰効果を考慮して、満載荷重の80%を下回らない適切に低減された有効重量を用いてよい」と規定している。一方、内容物の有効重量(有効質量)に関する実証的な研究についても、理論解析を援用しながら模型振動実験結果を通じて検討が行なわれている^{3)~8)}。しかし、これらの研究はいずれも、自由振動時あるいは正弦波定常応答時の実験結果に基づいており、地震応答時の有効質量に関する研究はいまだ見受けられない。

本研究は模型振動実験による地震応答記録に基づいて、不連続な壁体構造を持つコンクリートステイブ・サイロの内容物の有効質量係数の推定評価を試みたものである。内容物は壁体構造の付加質量と見なす簡便な解析モデル化によっており、また模型実験結果と数値解析結果の一致度を判定するための定量化指標を導入している。

2. 内容物の簡易解析モデル化と有効質量係数

内容物の解析モデル化に関して、ここでは簡単のために質量効果だけを考慮し、内容物をサイロ壁体構造の“付加質量”と仮定する。したがって、内容物の付加質量分も含んだサイロ壁体構造の換算質量密度 ρ_e は、次式のように与えられる。

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

ここで、 ρ_w 、 ρ_s はそれぞれサイロ壁体構造と内容物の質量密度、 $r (= V_s / V_w)$ は壁体構造の体積 V_w に対する内容物の容積 V_s の比を表わす。この体積比 r は円筒形サイロの場合、

$$r = (1 - 2p + p^2) / 4p; \quad p = (h / 2R) \quad (2)$$

h 、 R はサイロ壁体構造の壁厚および半径である。そして、(1)式における 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、このような簡便な解析モデル化が適用できるのは、内容物がサイロ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においてである。ステイブ・サイロ壁体構造に関しては、新しい動的解析モデルである“ステイブ・サイロ要素”を使用した⁹⁾が、この構造要素およびその剛性評価法の詳細については文献9)を参照されたい。

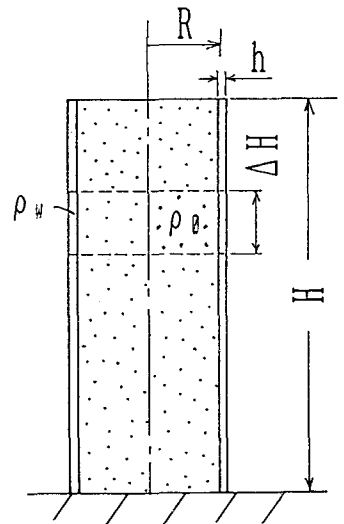


図1 サイロ壁体構造と内容物

3. 正弦波応答時における内容物の有効質量係数

サイロ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 らによる先駆的な研究が挙げられる³⁾。ACI の設計規準において、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 理論によって、内容物の活荷重係数の決定を行なった。ここでは、同様な手法を縮尺1/8模型用スティブ・サイロの実験結果⁹⁾に適用し、参考までに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 [Full] と模型内部が空の状態 [Empty] とで比較したものである。内容物の存在によって、模型用スティブ・サイロの共振振動数(基本固有振動数)が33Hzから19Hzにまで著しく低下することがわかる。前述のスティブ・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。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、正弦波応答時における内容物の有効質量係数 $C_{eff}=0.70$ (70%)を得る。

4. 縮尺1/8模型用スティブ・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3(c)に示す。この地震波は根室半島沖地震(1973-6-17)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3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ものである。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最適値 $\alpha=0.028$ 、 $h=0.020$ を用いた。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4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、内容物の適切な有効質量係数を推定するためにも、模型実験結果と数値解析結果の一致度を定量的に判定できる指標が必要となる。

本研究では、地震波の相似性に関する評価指標を参考にして¹⁰⁾、次式で定義される2つの指標の有効性・妥当性を検討した。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。

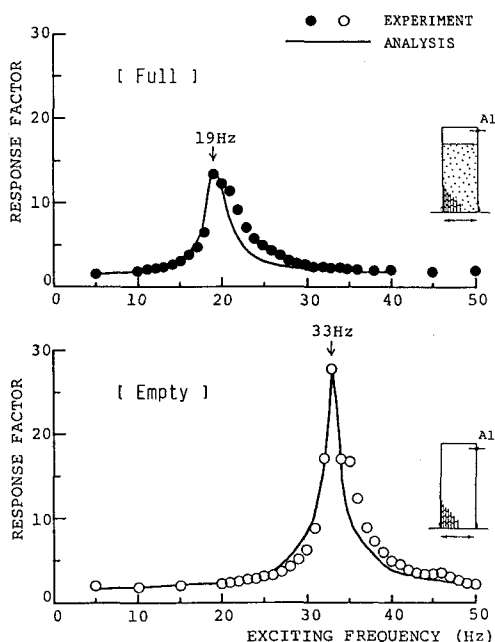


図2 内容物充填による共振振動数の変化

$$E_A = \sum \text{ABS}((X_k^a - X_k) / X_k) * W_k / n_f \quad (3)$$

$$E_P = \sum \text{ABS}((\Phi_k^a - \Phi_k) / \Phi_k) * W_k / n_f \quad (4)$$

$$W_k = X_k / \sum X_k \quad (5)$$

ここで、 X_k 、 Φ_k および X_k^a 、 Φ_k^a 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 はその個数を表わす。また、 W_k が各成分に対する重み係数である。

図5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 $C_{eff} = 0.50 \sim 1.00$ 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。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、同図にはそれぞれの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つの評価指標は明確な極小値を持つことで有効性を示すとともに、時刻歴波形およびフーリエ振幅スペクトルに基づいてその妥当性が認められた。その結果、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5%きざみで、 $C_{eff} = 0.70$ (70%) と推定できる。

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6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最適値 $\alpha = 0.026$ および $h = 0.045$ を用いた。図5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 、基本固有振動数 f_1 (Hz) の関係を図7に示す。この場合は明確な極小値を示した評価指標 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 $C_{eff} = 0.60$ (60%) と推定される。

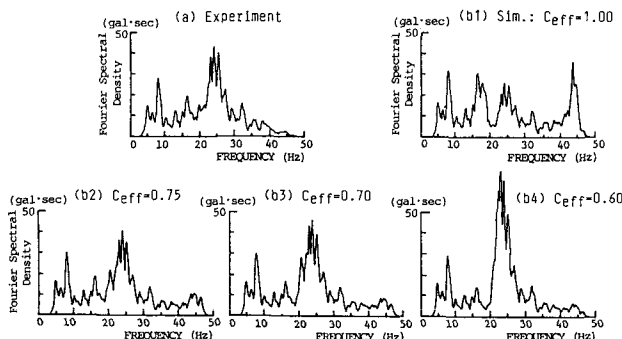


図4 有効質量係数によるフーリエ振幅スペクトルの変化

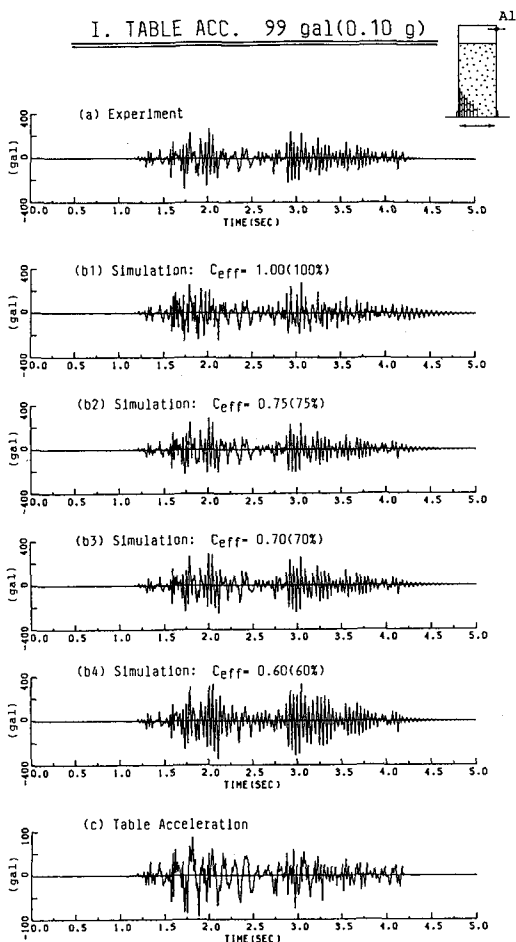


図3 地震応答加速度波形の比較と有効質量係数

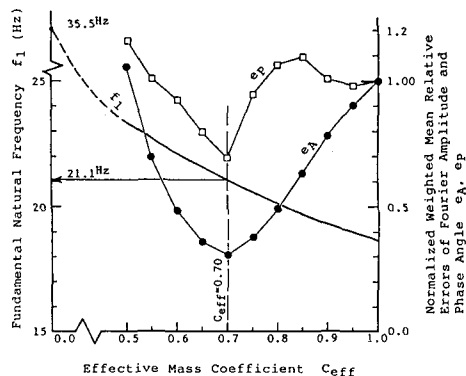


図5

フーリエ振幅・位相の加重平均相対誤差による
内容物の有効質量係数の推定 (0.10 g)

以上の検討結果から、ステイブ・サイロにおける内容物の有効質量係数は入力加速度レベルで若干異なる推定値が得られた。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 $\alpha = 0.028$ 、0.026 は、模型内部が空の状態での基本固有振動数 $f_1 = 35.5\text{Hz}$ 、 34.3Hz に相当する。他方、有効質量係数が $C_{eff} = 0.70$ 、 0.60 では $f_1 = 21.1\text{Hz}$ 、 21.3Hz 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ていないと解釈できる。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であることに留意する必要がある。

参考文献

- 1) ACI Committee 313: Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos, and bunkers for storing granular materials (ACI 313-77) and commentary (Revised 1983). American Concrete Institute, 1983.
- 2) 日本建築学会: 容器構造設計指針・解説、丸善、1990.
- 3) 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.
- 4) Harris, E.C. and Nad, J.D. von: Experimental determination of effective weight of stored material for use in seismic design of silos, ACI Journal, Vol.82, No.6, 1985.
- 5) 柴田耕一、門万寿男: 円筒型サイロの振動特性に関する研究 一 空時の振動特性、粉体の流動及び質量効果について一、日本建築学会論文報告集、第293号、pp.57-68、1980.
- 6) 柴田耕一、門万寿男、松村弘道、佐々木昌克: 鋼製サイロの振動特性に関する研究 一 各種粉粒体の有効質量と実大振動実験について一、日本建築学会論文報告集、第315号、pp.37-47、1982.
- 7) 人見昌地、石原重信、柴田忠生、小松貴雄、落合盛人、池上 博: 粉状物サイロの地震時荷重に関する模型実験研究、川崎重工技報、83号、pp.79-88、1984.
- 8) 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、第379号、pp.79-90、1987.
- 9) 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.
- 10) 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.

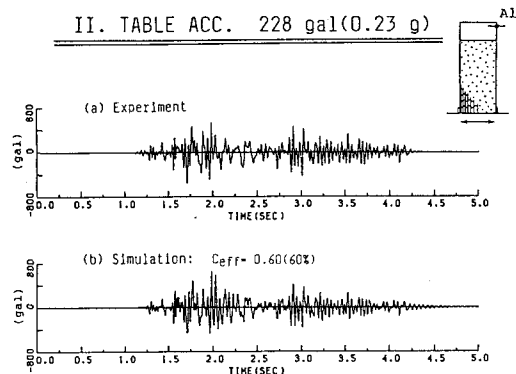


図6 地震応答加速度波形の比較

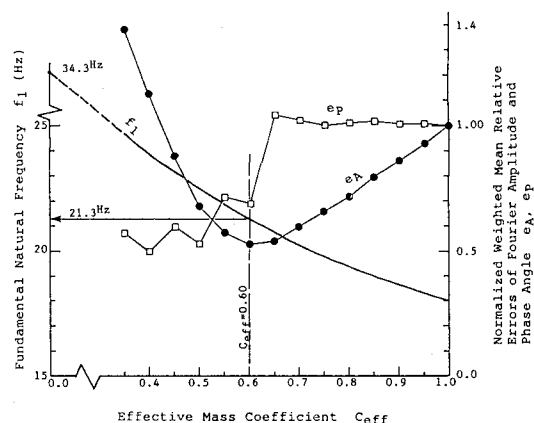


図7 フーリエ振幅・位相の加重平均相対誤差による内容物の有効質量係数の推定 (0.23 g)