

容器構造の動的履歴特性とすべり摩擦型免震を考慮した 地震応答解析手法に関する研究

日大生産工(学部) ○高橋 亜佑美

日大生産工(院) 飯田 和幸

日大生産工 柴田 耕一

1. 序論

近年、大地震が頻発し、その被害は非常に大きく深刻なものであった。国内で消費される穀物、石炭燃料の多くは、海外からの輸入に依存し、それらはサイロ容器に保管されている。穀物や石炭を安全に保管するために、容器構造の振動特性を知る研究は重要となる。地震による構造物への被害を最小限に抑えるための手段として、免震システムがある。本研究では、容器構造の座屈等の損傷を抑えるために、ローコスト、ローメンテナンス性に優れている、すべり摩擦型免震を取り入れた研究を行った。

本論では、容器構造とすべり摩擦型免震を合せ、2自由度系のモデルとして考えた。最初に、サイロ容器の非線形振動解析の手法としてべき関数型等価線形系解析手法の妥当性を検証した。そして、サイロ容器にすべり摩擦型免震を加え2自由度系のモデルとして、べき関数型等価線形系解析手法を用いた応答解析が初めて可能となった。またこのサイロ容器免震の解析は国内外において、はじめての試みとなる。

2. 解析手法

2.1 すべり摩擦型免震の解析手法

本論のモデルは2自由度系で、容器構造の下部ですべる、容器と地盤を結ぶバネで構成されている。Fig.1に示すような2自由度系の質点に摩擦力、ばね剛性、減衰が作用する系に強制外力が働く場合の運動方程式は以下に示す。

[質点が静止している場合]

$$x_1 = \text{CONSTANT} \quad \dot{x}_1 = 0 \quad \ddot{x}_1 = 0 \quad (1)$$

[質点が滑っている場合]

$$m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{y}) + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) + \text{sgn}(\dot{x}_1)F = 0 \quad (2)$$

$$m_2(\ddot{x}_2 + \ddot{y}) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = 0 \quad (3)$$

$$F = \mu(m_1 + m_2)g \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x} > 0 \rightarrow \text{sgn}(\dot{x}) = +1 \\ \dot{x} < 0 \rightarrow \text{sgn}(\dot{x}) = -1 \end{cases} \quad (5)$$

すべり、静止の判定に関しては以下の(6)式を満たすときにすべり運動とし、それ以外は静止とする。また、すべり運動時にも速度の方向が変化した場合、質点が一度静止したとみなし、(6)式の条件を満たすまで静止したままとする。

$$|m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{y}) + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1)| > \mu(m_1 + m_2)g \quad (6)$$

また、クーロン摩擦1自由度系の各種地震応答解析¹⁾から、免震構造の応答値の最小値は固有周期

$T_1 = 3 \sim 4 \text{sec}$ のときに与えられることを示されている。本論でも、地盤と容器とを結合するばね(剛性 k_1)は、固有周期が上記の値になるように調整している。

2.2 べき関数型等価線形系解析手法 (PFT-ELS 法)

上部が容器構造に対する解析手法として述べる。強制外力(加速度 $\ddot{y}$)が作用する場合の1自由度系の運動方程式は質点の質量 m 、変位を x 、復元力を $f(x, \dot{x})$ とすると次式で表される。

$$m\ddot{x} + f(x, \dot{x}) = -m\ddot{y} \quad (7)$$

上式を無次元化すると次式となる。

$$\frac{d^2 X}{d\tau^2} + F(X, \dot{X}) = -\frac{d^2 Y}{d\tau^2} \quad (8)$$

※無次元化パラメータは前論参照

(8)式の履歴振動系を等価な線形振動形に置換すると次式を得る。

$$\frac{d^2 X}{d\tau^2} + 2H_{eq} \frac{dX}{d\tau} + K_{eq} X = -\frac{d^2 Y}{d\tau^2} \quad (9)$$

ただし、逐次変化する等価減衰係数 H_{eq} 、等価ばね定数 K_{eq} は次式のようにになる。

$$H_{eq} = \frac{2k}{\pi\eta} \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right) X_0^{\alpha-1}, K_{eq} = \frac{4k}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\alpha}{\alpha+1} \right) \frac{\Gamma(\alpha+0.5)}{\Gamma(\alpha+1)} X_0^{\alpha-1} \quad (10)$$

ここで、形状パラメータ α, k は次式で求められる。

$$\alpha(X_0, \eta) = \frac{4F_0(X_0, \eta)X_0 - G_0(X_0, \eta)}{4F_0(X_0, \eta)X_0 + G_0(X_0, \eta)}, k(X_0, \eta) = \frac{F_0(X_0, \eta)}{X_0^\alpha} \quad (11)$$

式(10)を次式に代入することで変位振幅 x_0 、円振動数 ω に依存する非線形の減衰係数 $C(x_0, \omega)$ 、及び、ばね定数 $K(x_0, \omega)$ を求める。

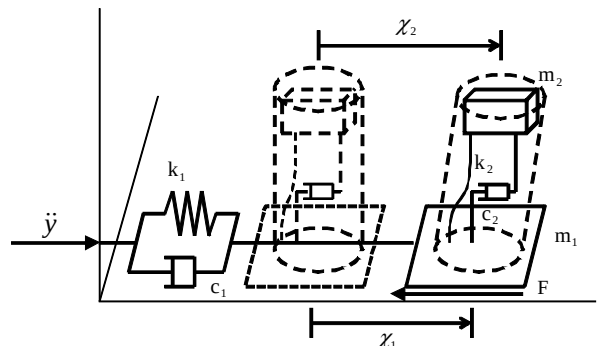


Fig.1 Base Isolated Model

$$C(x_0, \omega) = \frac{2F_s}{\omega_s x_s} H_{eq}, K(x_0, \omega) = k_s K_{eq} \quad (12)$$

この $C(x_0, \omega), K(x_0, \omega)$ を用いて1自由度系に強制外力が作用する場合の運動方程式は次式ようになる。

$$m\ddot{x} + C(x_0, \omega)\dot{x} + K(x_0, \omega)x = -m\ddot{y} \quad (13)$$

上式を解くことにより変位振幅、周波数に依存する減衰・ばね特性を持つ系の応答計算が可能となる。これを等価線形系解析手法という。

2.3 すべり摩擦型免震容器の非線形振動応答

構造物の上部をサイロ容器、下部をすべり摩擦と容器と地盤を結ぶバネで構成されている2自由度系モデルとし、すべり摩擦型免震を含むサイロ容器の非線形振動応答解析を等価線形系解析手法で行った。地盤と容器とを結合するばね(剛性 k_1)は固有周期 $T_1=3\sim 4\text{sec}$ になるように調整している。また、入力 $6.0[\text{Hz}]$ の正弦波入力加速度を用い、摩擦係数は $\mu = 0.3, 0.5, 0.7$ とした。

3. 解析結果

3.1 等価線形系解析を用いた容器構造の解析結果

容器構造の解析に用いた等価線形系解析手法の妥当性について、サイロ容器の振動実験から得た実験値と解析結果との比較を行った。Fig.2は $6.0[\text{Hz}]$ の正弦波入力加速度を用いた座屈前後の実験値と座屈前の解析値の比較を示す。点線が実験値、実線は解析値を示す。実際に実験したサイロ容器は最後に座屈して応答加速度が小さくなっているが、今回の解析モデルは滑らない場合を示しているので座屈しない。

3.2 すべり摩擦型免震容器の非線形振動応答結果

すべり摩擦型免震を含む容器構造の解析結果として、等価線形系解析とすべり摩擦型免震を加えた等価線形系解析を比較した履歴復元力曲線をFig.3に示す。また絶対応答加速度波形をFig.4で示し、 $6.0[\text{Hz}]$ の正弦波入力加速度を用いた振動実験の実験値を点線で示す。容器構造が滑っているため、応答もある一定で加速度以上にならないことがわかる。

4. 結論

これらの結果を以下のようにまとめる。

1. 等価線形系解析手法を用いた解析値は実験値と比べ、座屈前の挙動がよく一致していることがわかる。これにより等価線形系解析手法を容器構造に用いることが出来る。
2. すべり摩擦型免震を含む容器構造の解析結果から、Fig.3の履歴復元力曲線(横軸(変位)、縦軸(復元力))とFig.4の絶対応答加速度波形の低減を可能とした。
3. 履歴曲線から、上部が非線形応答し、下部がすべりを示す振動系のループは、 μ が増加すると上部の膨らみが平らになり抑えられて、すべり摩擦型の特徴を示すようになる。

これらのことからサイロ容器が座屈する以上の加

速度を与えても、上部のサイロ容器への振動は座屈しないように抑えられる。

本研究はサイロ容器の試験体を用いての解析であったが、今後は実大容器に対する免震部の固有周期、摩擦係数の最適化、各種地震波による応答解析を迫及していく。

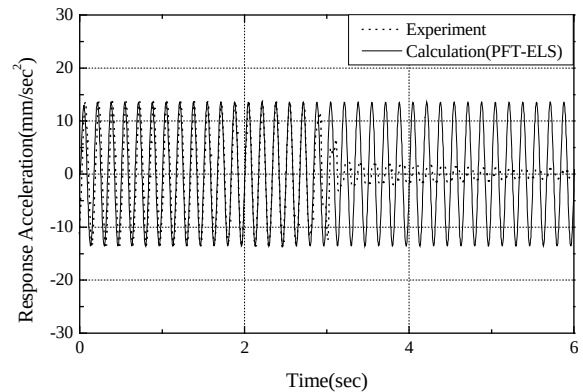


Fig.2 Response Acceleration (Silo Model 6.0[Hz])

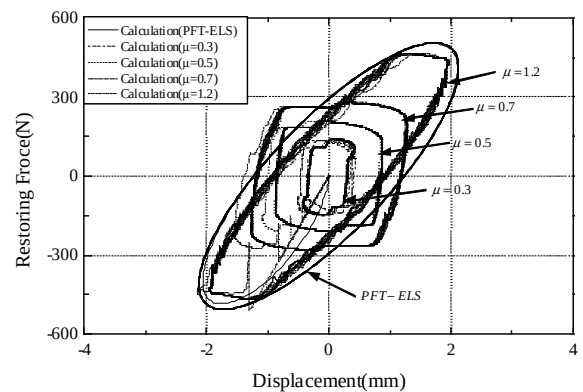


Fig.3 Hysteresis loops (Silo Isolation Model 6.0[Hz])

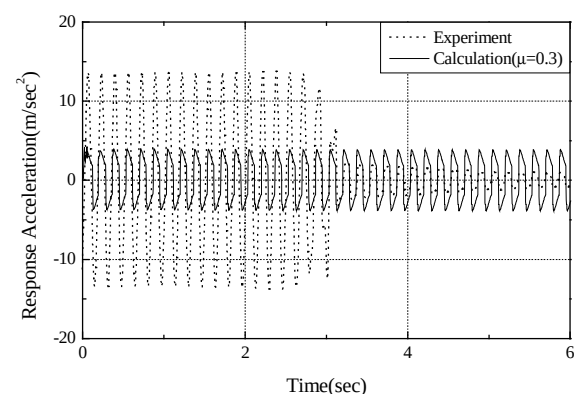


Fig.4 Response Acceleration
(Silo Isolation Model 6.0[Hz], $\mu = 0.3$)

参考文献

1. 柴田耕一, 山田隆夫, 北川博: 摩擦型免震に関する研究(その3 最適設計)(1987), 建築学会大会
2. 渡邊健, 柴田耕一: サイロ容器の地震時履歴復元力特性を考慮した非線形振動応答解析手法に関する研究(変位振幅及び周波数に依存する復元力特性を持つサイロの振動特性と振動実験), 日本建築学会構造系論文集, 575(2004), 137