物理座標とモード座標が混在した タンクのロッキング・すべり連成地震応答*

小林 信之^{*1}, 張 亜 軍^{*1}, 瀬尾 範 章^{*2}
渡辺 昌 宏^{*1}, Friedrich PFEIFFER^{*3}

Rocking and Sliding Coupled Seismic Response of Cylindrical Tank Made Up Physical Mass-Spring Subsystem and Mode Mass-Spring Subsystem

Nobuyuki KOBAYASHI^{*4}, Yajun ZHANG, Noriaki SEO,
Masahiro WATANABE and Friedrich PFEIFFER

^{**} Department of Mechanical Engineering, Aoyama Gakuin University,
5-10-1 Fuchinobe, Sagami-hara-shi, Kanagawa, 229-8558 Japan

This paper deals with the seismic response simulation of storage tanks, which is coupled with the physical spring mass subsystem and the modal spring mass subsystem. The effect of participation factor is introduced in mass matrix and the unilateral contact model for slip and stick due to the friction force is introduced in the equation of motion. The slip response with shaking table excitation test verified the simulation model presented here. Parametric studies for four kind of actual size tank are conducted to examine the effect of participation factor and the friction force on the seismic response of the tank.

Key Words: Seismic Response, Participation Factor, Storage Tank, Sliding, LCP, Unilateral Contact

1. 緒 言

構造物を質点系モデルに置換して地震応答を求める際、物理座標で表されるサブシステムとモード座標で表されるサブシステムが結合したモデルとなる場合がある。例えば、内容液の質量効果を考慮した弾性円筒タンクの横すべりロッキング・連成地震応答を質点モデルに置換して求める場合がそれに該当する。

単純に質点系と考えて各サブシステムを結合したモデルを作成する場合、モード座標で表されるサブシステムの入力の大きさが刺激係数の分だけ異なるので、応答計算に誤差を生じる。しかしながら、従来このような刺激係数の効果は考慮されてこなかった⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

一方、弾性円筒タンクが地震慣性力を受けると、横すべりが生じる場合があることが知られており⁽⁶⁾、取り付け配管の破損などが問題になる。一般に、動摩擦係数は静摩擦係数より小さく、かつ速度依存性があることから、このような摩擦の特性を考慮しなければ、横すべりを含む地震応答解析に誤差が生じる。

摩擦力のシミュレーションにおいては、摩擦面の相対速度によりクーロン摩擦力の向きを切り換える方法、

または、粘完全塑性モデルに置き換えることにより連続な摩擦力を得る方法の2通りが多くの場合用いられる。前者はスティックする前後で摩擦力のチャタリングを起こしやすいし、後者では厳密なスティックを表現できない。

著者の1人は静摩擦と動摩擦の切り替えを含む多点接触問題を、その相補性に着目し、Unilateral contactとしてモデル化し、線形相補性問題 (Linear complimentary problem, 以下、LCPと呼ぶ) に帰着して、すべり状態とスティック状態を厳密に切り換える方法を提案した⁽⁷⁾。この手法は、時刻歴応答の時間ステップ毎にLCPを解くための計算時間が余分に掛かるが、すべり状態からスティック状態に移行するときのみ時間刻みを細かくすれば良いので、総合的には効率的で、精度の高い結果が得られる。

本研究では、弾性円筒タンクの横すべりとロッキングが連成した地震応答特性を調べることを目的に、内容液・タンク連成系の刺激係数を考慮した質点モデルを構築する。また、基礎との摩擦力についてLCPを用いて表現し、静摩擦と動摩擦の切り替えを考慮した地震応答解析法を提案する。その妥当性を、実験および従来の手法による結果と比較することにより調べる。さらに、実機サイズタンクに対して地震応答計算を行った結果について報告する。

* 原稿受付 2004年7月27日。

^{*1} 正員、青山学院大学理工学部(〒229-8558 相模原市淵野辺5-10-1)。

^{*2} 東洋エンジニアリング(株)[元:青山学院大学大学院]。

^{*3} Technical University of Munich(Boltzmannstraße 15, D85748 Garching Deutschland)。

E-mail: kobanobu@me.aoyama.ac.jp

2. 応答解析モデル

2. 1 質点系モデル 円筒タンクはタンク本体の質量に比較して内溶液の質量がはるかに大きいので、内溶液の質量効果を考慮したモデル化が必要になる。知られているように、タンク内溶液の質量効果は、タンク側板が剛的に変位するときの剛体圧モードによる等価質量とタンク側板が弾性変形するときの連成振動圧モードによる等価質量に分けられる⁽⁸⁾。

タンクの剛体圧モードによる水平・上下方向等価質量を m_{0x} , m_{0y} , 連成振動圧モードによる水平・上下方向等価質量を m_{1x} , m_{1y} とすれば、連成振動圧モードによる水平および上下方向の運動方程式は、それぞれ、

$$\begin{cases} m_{1x}\ddot{v}_{1x} + k_{1x}v_{1x} = -m_{0x}\ddot{u}_{0x} \\ m_{1y}\ddot{v}_{1y} + k_{1y}v_{1y} = -m_{0y}\ddot{u}_{0y} \end{cases} \quad (1)$$

となる⁽⁹⁾。ここで、 v_{1x} , v_{1y} は m_1 の重心における相対変位であり、 u_{0x} , u_{0y} はタンク底面の絶対変位である。

式(1)における刺激係数の効果を考えずに、質量効果のみを考慮した弾性タンクの横すべりとロッキングが連成した質点モデルは図1のようになる⁽⁶⁾。ここで、 h_0 , h_1 は m_{0x} , m_{1x} の重心高さであり、 c_{0x} はタンク底板と基礎の間の摩擦力を表す非線形ダンパーである。

m_{1x} , m_{1y} の絶対変位を u_{1x} , u_{1y} とすれば、図1に示した質点系の運動方程式は次式となる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (2)$$

ここで、

$$\mathbf{U} = \{u_{0x}, u_{0y}, u_{\theta}, u_{1x}, u_{1y}\}^T$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{0x} & 0 & -h_0 m_{0x} & 0 & 0 \\ 0 & m_{0y} & 0 & 0 & 0 \\ -h_0 m_{0x} & 0 & h_0^2 m_{0x} + h_1^2 m_{1x} + I_0 & -h_1 m_{1x} & 0 \\ 0 & 0 & -h_1 m_{1x} & m_{1x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{1y} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{1x} & 0 & 0 & -c_{1x} & 0 \\ 0 & c_{0y} + c_{1y} & 0 & 0 & -c_{1y} \\ 0 & 0 & c_{\theta} & 0 & 0 \\ -c_{1x} & 0 & 0 & c_{1x} & 0 \\ 0 & -c_{1y} & 0 & 0 & c_{1y} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{1x} & 0 & 0 & -k_{1x} & 0 \\ 0 & k_{0y} + k_{1y} & 0 & 0 & -k_{1y} \\ 0 & 0 & k_{\theta} & 0 & 0 \\ -k_{1x} & 0 & 0 & k_{1x} & 0 \\ 0 & -k_{1y} & 0 & 0 & k_{1y} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{Bmatrix} \lambda_T \\ c_{0y}\dot{a}_y + k_{0y}a_y - m_{0y}g \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{Bmatrix}$$

であり、 a_y は上下方向地動変位である。

以下、このような質点系を PC モデルと呼ぶ。

外力項の摩擦力 λ_T を粘完全塑性モデルで表現する、すなわち、非線形ダンパー c_{0x} による出力特性を式(3)に示す bi-linear 型として与える。

$$\lambda_T = \begin{cases} c_{0x}(\dot{u}_{0x} - \dot{a}_x) & \text{for } |c_{0x}(\dot{u}_{0x} - \dot{a}_x)| \leq |\mu_s \lambda_N| \\ \text{sign}(\dot{u}_{0x} - \dot{a}_x) \mu_s \lambda_N & \text{for } |c_{0x}(\dot{u}_{0x} - \dot{a}_x)| > |\mu_s \lambda_N| \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 λ_N はタンク底面における垂直抗力、 a_x は水平方向地動変位である。

刺激係数の効果を考慮するために、式(1)を m_{1x} , m_{1y} の絶対変位 u_{1x} , u_{1y} を用いて書き直す。

$$\begin{cases} m_{1x}(\ddot{u}_{1x} - \ddot{u}_{0x}) + k_{1x}(u_{1x} - u_{0x}) = -m_{0x}\ddot{u}_{0x} \\ m_{1y}(\ddot{u}_{1y} - \ddot{u}_{0y}) + k_{1y}(u_{1y} - u_{0y}) = -m_{0y}\ddot{u}_{0y} \end{cases} \quad (4)$$

整理して、式(2)と同様に運動方程式を求めると

$$\mathbf{M}'\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (5)$$

となる。ここで、

$$\mathbf{M}' = \begin{bmatrix} m_{0x} & 0 & -h_0 m_{0x} & 0 & 0 \\ 0 & m_{0y} & 0 & 0 & 0 \\ h_1 m_{1x} - h_1 m_{0x} - h_1 m_{0x} & 0 & h_0^2 m_{0x} + h_1^2 m_{1x} + I_0 & -h_1 m_{1x} & 0 \\ m_{0x} - m_{1x} & 0 & -h_1 m_{1x} & m_{1x} & 0 \\ 0 & m_{0y} - m_{1y} & 0 & 0 & m_{1y} \end{bmatrix}$$

であり、他の項は式(2)と同じになる。すなわち、刺激係数の効果は、質量行列の3行1列、4行1列および5行2列に表れる。

以下、このような刺激係数を考慮した質点系を PMC モデルと呼ぶ。

Fig.1 5DOF Model

2. 2 Unilateral contact モデル 摩擦運動では stick 時にすべり面の相対変位が零で一定かつ摩擦力が変化, slip 時にすべり面の相対変位が変化しかつ摩擦力が一定 (動摩擦係数に速度依存性がある場合は一定ではないが) となる. すなわち, 相対変位と摩擦力の関係には, 片方が変化する時に他方が一定となる相補性 (complimentary) がある. このことに着目して, stick と slip を Unilateral contact としてモデル化する.

地表面と m_{0x} の相対変位 g_T は

$$g_T = u_{0x} - a_x \quad (6)$$

であるので, 相対速度と相対加速度は

$$\dot{g}_T = \frac{\partial g_T}{\partial \mathbf{U}} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} - \dot{a}_x = \mathbf{W}_T^T \dot{\mathbf{U}} - \dot{a}_x \quad (7)$$

$$\ddot{g}_T = \mathbf{W}_T^T \ddot{\mathbf{U}} - \ddot{a}_x \quad (8)$$

で与えられる. ただし, $\mathbf{W}_T$ は相対変位のヤコビ行列であり, 次式で与えられる.

$$\mathbf{W}_T^T = \frac{\partial g_T}{\partial \mathbf{U}} \quad (9)$$

摩擦力 λ_T を拘束力と考えれば, 式(2)は以下のように書き換えることができる.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} - \mathbf{W}_T \lambda_T = \mathbf{F}' \quad (10)$$

ここで,

$$\mathbf{F}' = \begin{Bmatrix} 0 \\ c_{0y} \dot{a}_y + k_{0y} a_y \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

式(8)に式(10)を代入すると, 次式となる.

$$\ddot{g}_T = \mathbf{W}_T^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{W}_T \lambda_T - \mathbf{W}_T^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} - \mathbf{F}') - \ddot{a}_x \quad (12)$$

摩擦力 λ_T と相対速度 $\dot{g}_T$ または相対加速度 $\ddot{g}_T$ の関係は

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Stick時} & \ddot{g}_T = 0 \wedge |\lambda_T| < \mu_s \lambda_N \\ \text{正方向にSlide開始時} & \ddot{g}_T > 0 \wedge \lambda_T = -\mu_s \lambda_N \\ \text{負方向にSlide開始時} & \ddot{g}_T < 0 \wedge \lambda_T = \mu_s \lambda_N \\ \text{正方向にSlide時} & \ddot{g}_T > 0 \wedge \lambda_T = -\mu_k \lambda_N \\ \text{負方向にSlide時} & \ddot{g}_T < 0 \wedge \lambda_T = \mu_k \lambda_N \\ \text{Stick開始時} & \ddot{g}_T = 0 \wedge |\lambda_T| < \mu_k \lambda_N \end{array} \right\} \quad (13)$$

となる. ここで, λ_N は垂直抗力, μ_s, μ_k はそれぞれ静摩擦係数, 動摩擦係数である. 式(13)から, それぞれの状態において, 摩擦力 λ_T と相対速度 $\dot{g}_T$ または相対加速度 $\ddot{g}_T$ のどちらかが常に 0 である. すなわち,

$$\ddot{g}_T \geq 0; \mu_s \lambda_N - |\lambda_T| \geq 0; \ddot{g}_T (\mu_s \lambda_N - |\lambda_T|) = 0 \quad (14)$$

などの相補性がある. この関係は図 2 のように表すこ

とができるので, 適当な座標変換を施すことによって, 式(12)は変数 $\ddot{g}_T$ と λ_T に関して LCP として扱うことができ, 時間積分における各時間ステップ毎の拘束力 λ_T が求まる.

Fig.2 Characteristic of Friction Model

以下, 静摩擦と動摩擦の切り替えを考慮した Unilateral contact モデルを UC1 モデル, 静摩擦と動摩擦の切り替えを考慮していない Unilateral contact モデルを UC2 モデルと呼ぶ. また, 式(3)で示した粘完全塑性モデルを VP モデルと呼ぶ.

2. 3 横すべりの評価 構造物のエネルギー授受の観点から, すべりが底板になす仕事に着目する. これを, すべり仕事 W_s と呼ぶことにすれば, 式(15)のように定義することができる.

$$W_s = \int \lambda_T \dot{g}_T dt \quad (15)$$

3 3 質点系による検証実験

図 3 に示すような 3 質点系を対象に, 刺激係数と Unilateral contact を考慮した PC/UC モデルおよび PMC/UC モデルの検証実験を行った.

m_0 は基礎部分, m_1 と m_2 は柔軟構造部分を模擬しているが, m_1 と m_2 とそれらをつなぐばねのばね定数の組み合わせによって刺激係数を変えることができる. このモデルを物理座標モデル (PC モデル) と物理座標とモード座標が結合したモデル (PMC モデル) の 2 通りで運動方程式を導出する. また, 地表面地動 a_x により生じる摩擦力は, Unilateral contact と粘完全塑性の 2 通りを考える.

Fig.3 Mechanical Model

3.1 PCモデルの運動方程式 図3に示すPCモデルの運動方程式の係数行列は、以下のようになる。

$$\ddot{\mathbf{M}}\mathbf{X} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (16)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \text{Diag}[m_0 \quad m_1 \quad m_2] \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} c_1 + c_3 & -c_1 & -c_3 \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_3 & -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \\ \mathbf{K} &= \begin{bmatrix} k_1 + k_3 & -k_1 & -k_3 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_3 & -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \\ \mathbf{X} &= \{x_0 \quad x_1 \quad x_2\}^T \\ \mathbf{F} &= \{\lambda_T \quad 0 \quad 0\}^T \end{aligned}$$

式(16)で表されたPCモデルに、3種類の摩擦力モデル、すなわち、UC1モデル、UC2モデル、VPモデルを導入したものを、それぞれ、PC/UC1モデル、PC/UC2モデル、PC/VPモデルと呼ぶ。

3.2 PMCモデルの運動方程式 基礎 m_0 が加速度 $\ddot{x}_0$ で運動している場合、質点 m_1 と m_2 の m_0 に対する相対変位 $\{x_1 - x_0 \quad x_2 - x_0\}^T$ に関して、質点 m_1 と m_2 の運動方程式をモード座標 $\{\xi_1 \quad \xi_2\}^T$ 表示すれば、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} m'_1 & 0 \\ 0 & m'_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\xi}_1 \\ \ddot{\xi}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k'_1 & 0 \\ 0 & k'_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{Bmatrix} \\ = - \begin{Bmatrix} \phi_{11}m_1 + \phi_{21}m_2 \\ \phi_{12}m_1 + \phi_{22}m_2 \end{Bmatrix} \ddot{x}_0 \end{aligned} \quad (17)$$

となる。ただし、 m'_1 などは質量などのモード座標表示であり、

$$\boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix}$$

はモード行列である。また、1次と2次の刺激係数は

$$\begin{aligned} \beta_1 &= (\phi_{11}m_1 + \phi_{21}m_2)/m'_1 \\ \beta_2 &= (\phi_{12}m_1 + \phi_{22}m_2)/m'_2 \end{aligned} \quad (18)$$

である。

一方、質点 m_0 の物理座標系による運動方程式は式(16)で表されるので、モード座標を用いて、PCモデルを書き換える。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} m_0 & 0 & 0 \\ \phi_{11}m_1 + \phi_{21}m_2 & m'_1 & 0 \\ \phi_{12}m_1 + \phi_{22}m_2 & 0 & m'_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{\xi}_1 \\ \ddot{\xi}_2 \end{Bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0 & -\phi_{11}c_1 - \phi_{21}c_3 & -\phi_{12}c_1 - \phi_{22}c_3 \\ 0 & c'_1 & 0 \\ 0 & 0 & c'_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & -\phi_{11}k_1 - \phi_{21}k_3 & -\phi_{12}k_1 - \phi_{22}k_3 \\ 0 & k'_1 & 0 \\ 0 & 0 & k'_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_0 \\ \xi_1 \\ \xi_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \lambda_T \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (19)$$

式(19)で表されたPMCモデルに、2種類の摩擦力モデル、すなわち、UC1モデル、UC2モデルを導入したものを、それぞれ、PMC/UC1モデル、PMC/UC2モデルと呼ぶ。

3.3 試験体 シミュレーションモデルの妥当性を検証するために図4に示すような3質点系柔軟試験体の振動台加振実験を行った。

試験体は、剛体 m_0 上に設けられたリニアウエイに可動質量 m_1 、 m_2 を載せ、U字形ばねで接続している。試験パラメータを表1に示す。 m_0 の底面はテフロン(case 1)とアルミ合金(case 2)とした。 m_0 と振動台の摩擦係数は、テフロン/鋼板 $\mu_s=0.09 \sim 0.12$ 、 $\mu_k=0.06 \sim 0.09$ 、アルミ合金/鋼板 $\mu_s=0.26 \sim 0.27$ 、 $\mu_k=0.23 \sim 0.25$ であった。case 1とcase 2は、それぞれ1次固有振動数の0.8~1.2倍と0.9~1.1倍の範囲で、スリープ速度約0.015[Hz/s]の振動数スリープ試験を行い、共振点近傍でのすべり応答を調べた。

Fig.4 Experimental device

Table.1 Parameter of Experimental Device

		case 1	case 2
Mass	m_0 [kg]	1.75	
	m_1 [kg]	0.53	2.46
	m_2 [kg]	2.46	0.53
Spring	k_1 [N/m]	202	208
	k_2 [N/m]	194	191
	k_3 [N/m]	93	87
Static friction coefficient μ_s		0.10	0.27
Kinetic friction coefficient μ_k		0.08	0.24
Fundamental natural frequency [Hz]		1.40	1.59
Participation factor β_1		0.571	1.024

3.4 解析と実験結果の比較 まず、Unilateral contact モデル (UC モデル) および粘完全塑性モデル (VP モデル) のシミュレーション結果と実験結果の比較を行う。

シミュレーションには、3種類のモデルを用いた。

第1は静摩擦と動摩擦の切り替えを考慮した PC/UC1 モデル, 第2は静摩擦のみの PC/UC2 モデル, 第3は粘完全塑性モデルを用いた PC/VP モデルである。

図5に case 1 の材料の組み合わせにおける m_0 の相対変位, m_1 の加速度およびすべり仕事の時刻歴応答波形を示す。

これらの図から, PC/UC1 モデルの時刻歴応答波形は, すべりのタイミングだけでなくすべり変位の大きさも実験結果と良く一致していることがわかる。また, 可動質量の応答加速度も良く一致していることがわかる。PC/UC2 モデルと PC/VP モデルの時刻歴応答波形は, 横すべり開始のタイミングは比較的良く一致しているが, 動摩擦を考慮していない為, すべり変位およびその傾きが小さくなっている。

PC/UC1 モデルのすべり仕事は, 実験結果と良く一致しているが, PC/UC2 モデルと PC/VP モデルのすべり仕事の値は相当小さくなっており, かつ, 似たすべり波形になっている。これは動摩擦を考慮していないことが大きな原因であるが, 特に VP モデルでは, スティック時にも速度を持つのですべり仕事が 0 とならない。このエネルギー散逸のために, 質点系の運動エネルギーが減少したこともすべり変位に差が生じた理由の一つである。

次に物理座標とモード座標の結合したシステムの応答について考察する。図6に case 2 の材料の組み合わせにおける m_0 の相対変位およびすべり仕事の時刻歴応答波形を示す。シミュレーションには2種類のモデルを用いた。第1は物理座標とモード座標の結合した UC モデル (PMC/UC1 モデル), 第2は物理座標で表した UC モデル (PC/UC1 モデル) である。これらの図から, 2つの解析モデルの時刻歴応答波形は実験結果と良く一致していること, 解析モデルと実験結果がすべり変位のみならずすべり仕事も概ね一致していることがわかる。

4. 実機タンクの応答及び考察

4. 1 解析対象タンク 実機タンクにおける地震時におけるすべり挙動とロッキング運動の相互作用を調べるために, 液位と直径のアスペクト比(R_A)の大きい比較的小型のタンクからアスペクト比の小さい大型のタンクまで4種類の代表的なタンクについて応答計算を行なった。その主仕様と刺激係数を表2に示す。液体の有効質量, 基礎の回転ばね定数などは, 文献(5)で解析したものと同じ値を用いた。

静摩擦係数 μ_s は0.1, 0.3, 0.5の3種類をパラメータと

Fig.5 Comparison between analyses and experiment

Fig.6 Comparison between analyses and experiment

[Case2]

Table 2 Specifications of actual tanks

Tank capacity	Water height	Diameter D [m]	Shell thickne	$R_A = H/D$	β_{lx}
880	10.90	9.68	6	1.126	1.322
5000	16.99	19.36	14	0.878	1.367
30000	20.11	43.59	22	0.461	1.516
113000	22.05	82.00	37	0.269	1.563

し, 地震波は神戸ポートアイランド NS 波を 150% に増幅して用いた。

4. 2 解析結果 刺激係数の考慮の有無による応答の比較を $\mu_s = 0.3$ の場合の30000m³タンクに対して解

析した。その結果の内、すべり変位とロッキング回転角および入力地震波を図7に示す。

式(5)から推察されるように、刺激係数の効果は水平力のみならず転倒モーメントにも影響してくるので、刺激係数を考慮した PMC モデルの方がすべり変位もロッキング回転角も大きくなることがわかる。

$\mu_s=0.3$ と 0.5 の場合について、 30000m^3 タンクに対して PMC/UC モデルと PMC/VP モデルのすべり変位について比較した。図8に両者のすべり変位の時刻歴応答波形を示す。この解析結果より、 $\mu_s=0.3$ の場合には両モデルのすべり変位はほとんど一致しているが、 $\mu_s=0.5$ では両モデルの差が大きくなっていることがわかる。PMC/VP モデルでは、スティック時にすべり速度を持つことを許容しているために、実際にすべっていないでも相対速度が zero にならないために、すべり変位が生じる。すべり変位が大きい場合には両者の差がそれほど顕著ではないが、小さい場合には誤差率は大きくなる。すなわち、PMC/VP モデルではスティック時にもエネルギーの散逸が起きるので正しい結果が得られないことになる。

図9に $\mu_s=0.3$ の場合について4種類の代表的なタンクのすべり応答を示す。すべり変位の大きい方から、 $880, 5000, 30000$ および 113000m^3 のタンクである。

図9から、アスペクト比の大きなタンクほどすべり変位が大きいこと、いずれのケースでも刺激係数を考慮した PMC/UC1 モデルが大きな応答変位を生じていることがわかる。特にタンクのアスペクト比が小さくなるほど、すなわち大型のタンクほど刺激係数が大きくなるが、両者間のすべり変位誤差率も大きくなる傾向があることがわかる。

アスペクト比の大きなタンク、すなわち小型のタンクでは、刺激係数が小さいにもかかわらずすべり変位が大きくなっている。それは、アスペクト比が大きくなるに従って、有効液量率が大きくなり、その重心高さが高くなるためである。

すべりが生じたとき、一般に動摩擦係数は相対速度の関数となる。式(14)では、そのような効果も計算できるが、簡単のため、動摩擦係数を一定の値として、静摩擦係数との比を変化して、静摩擦と動摩擦切り換えの効果を調べた。すべり変位の一番大きかった 880m^3 のタンクについて静摩擦係数 $\mu_s=0.3$ の場合について解析した結果を図10に示す。静摩擦と動摩擦切り換えの効果は、6s 付近で大きく出ており、 μ_k と μ_s との比が小さいほど、すべり変位は大きくなり、比の値が 0.7 では、静摩擦のみを考えたときより 30%程度大きくなっている。解析結果は省略したが、静摩擦

Fig.7 Seismic response in the case of 30000m^3 tank ($\mu_s=0.3$)

Fig.8 Friction coefficient effect on 30000m^3 tank

Fig.9 Tank size effect on sliding ($\mu_s=0.3$)

Fig.10 Kinetic friction coefficient effect on sliding (880m^3 tank, $\mu_s=0.3$)

のみを考えたときと静摩擦と動摩擦切り換えを考えたときの差は、摩擦係数が大きくなるほど顕著になる。すなわち、地盤や基礎に直置きされるタンクのすべり変位を評価するには、静摩擦と動摩擦切り換えを考える必要がある。

5 結 言

物理座標で表されるサブシステムとモード座標で表されるサブシステムが結合したタンクのロッキングとすべりを考慮した地震応答解析法について、解析モデルの構築と応答解析結果に対する考察を行い、以下の結論を得た。

- (1) 物理座標で表されるサブシステムとモード座標で表されるサブシステムが結合したタンクの運動方程式を導き、従来の質点系モデルのそれと比較した。
- (2) すべりとスティックの切り換えを厳密に考慮した Unilateral contact モデルを摩擦モデルとして導入し、静摩擦係数と動摩擦係数の切り換えも考慮した地震応答解析を行った。
- (3) 刺激係数の効果と Unilateral contact による摩擦モデルを導入した質点モデルによる地震応答解析法が高精度であることを、模型実験との比較により示した。
- (4) 上記モデルを用いた実機相当タンクの地震応答計算を行い、従来の質点系による方法より応答が大きくなること、動摩擦係数を考慮することによりすべり変位が大きくなることを示した。

文 献

- (1) 谷口, 面谷, 小森, 吉原, 平底円筒貯槽の滑動実験, 川崎重工技報, 139, 1998, 2-7
- (2) Tanaka, M. et al., Analysis of Horizontal Slip behavior shown by Cylindrical Storage Tanks due to Seismic Loading, *Proc. Pressure Vessel and Piping Conf.*, Seismic Engineering, PVP-Vol.387, ASME, 1999, 141-146
- (3) Malhotra, P.K., Veletsos, A.S. and Tang, H.T., Seismic Response of Unanchored Liquid Storage Tanks, *Trans. 12th SMiRT*, SD103/1, 1993, 201-212
- (4) Ishida, K. and Kobayashi, N., An Effective Method of Analyzing Rocking Motion for Unanchored Cylindrical Tanks Including Uplift, *Transaction of the ASME, J. Pressure Vessel Technology*, 110 -1, 1988, 76-87
- (5) 伊藤, 小林, 渡辺, 佐藤, 地震時における底板の弾性変形を考慮した円筒形タンクのロッキングと横滑りの連成応答, D&D2000 機講論 00-6, 2000, 311
- (6) 小林, 廣瀬, 円筒型液体タンク, 容器構造, 阪神・淡路大震災調査報告 建築編-3, 丸善 1997, 353-378
- (7) Pfeiffer, F., The idea of complimentary in multibody dynamics, *Proc. 2001 ASME Design Engineering Technical Conf.*, DETC2001/VIB-21328, 2001, 1-8
- (8) Wozniak, R.S., and Mitchell, W.W., "Basis of Seismic Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks", API Refining Dep. 43rd Midyear Meeting, 1978, 1-34
- (9) 小林, 円筒形液体貯槽の地震時挙動に関する研究, 東京大学学位請求論文, 1986, 59-66