

日本鋼管 (株) 正 員 岩倉 肇
 北海道大学工学部 正 員 渡辺 昇
 北海道大学工学部 正 員 金子 孝吉

1. まえがき

本研究は、水平動 2 成分と上下動の地震波が立体的に構造物に入力されたときのその振動性状を扱うものである。対象とする構造物としてガスタンクなどを想定し、それを X, Y, Z 軸回りの回転成分も考慮した、6 自由度の剛体にモデル化して解析を行なった。(図-1)

2. 運動方程式とその解

剛体の運動範囲を微小なものとし、また座標軸を剛体の重心慣性主軸に一致させることにより、運動方程式は、式 (1) で表わされる。ただし、減衰力、減衰モーメントは、それぞれ座標軸方向の相対速度、座標軸回りの角速度に比例するものとする。

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x(t) \\ \ddot{u}_y(t) \\ \ddot{u}_z(t) \\ \ddot{\theta}(t) \\ \ddot{\phi}(t) \\ \ddot{\psi}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_\psi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_x(t) \\ \dot{u}_y(t) \\ \dot{u}_z(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{\phi}(t) \\ \dot{\psi}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} & k_{x\theta} & k_{x\phi} & k_{x\psi} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} & k_{y\theta} & k_{y\phi} & k_{y\psi} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} & k_{z\theta} & k_{z\phi} & k_{z\psi} \\ k_{\theta x} & k_{\theta y} & k_{\theta z} & k_{\theta\theta} & k_{\theta\phi} & k_{\theta\psi} \\ k_{\phi x} & k_{\phi y} & k_{\phi z} & k_{\phi\theta} & k_{\phi\phi} & k_{\phi\psi} \\ k_{\psi x} & k_{\psi y} & k_{\psi z} & k_{\psi\theta} & k_{\psi\phi} & k_{\psi\psi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x(t) \\ u_y(t) \\ u_z(t) \\ \theta(t) \\ \phi(t) \\ \psi(t) \end{Bmatrix} = -m \begin{Bmatrix} \ddot{g}_x(t) \\ \ddot{g}_y(t) \\ \ddot{g}_z(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

m : 剛体の質量 ($\text{kg} \cdot \text{sec}^2 / \text{cm}$)

I_i : i 軸に関する慣性モーメント ($i=x, y, z$: $\text{kg} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{cm}$)

c_i : 減衰係数 ($i=x, y, z$: $\text{kg} \cdot \text{sec} / \text{cm}$. $i=\theta, \phi, \psi$: $\text{kg} \cdot \text{sec} \cdot \text{cm}$)

k_{ij} : 復原係数 $\begin{bmatrix} \text{kg/cm} & \text{kg} \\ \text{kg} & \text{kg} \cdot \text{cm} \end{bmatrix}$

$u_i(t)$: x, y, z 方向の相対変位 ($i=x, y, z$: cm)

x, y, z 軸回りの角変位 ($i=\theta, \phi, \psi$: rad)

$g_i(t)$: i 方向の地震動の加速度 ($i=x, y, z$: cm/sec^2)

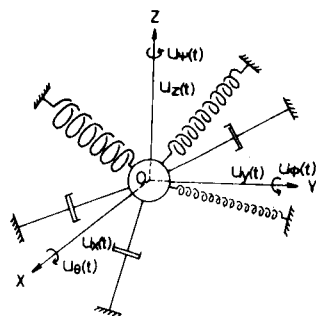


図-1

式 (1) を、ゼロ初期条件のもとで LAPLACE 変換し、その結果得られる特性方程式を解くと、6 組の共役な複素根 $\alpha_k \pm i\beta_k$ ($k=1, 6$) が得られる。このとき振動系が動的にも静的にも安定であるためには α_k が負の実数でなければならない。伝達関数 $H_{ij}(s)$ と、その LAPLACE 逆変換である、変位インパルス応答関数 $h_{ij}(t)$ は次式で求められる。

$$H_{ij}(s) = \sum_k \frac{i\gamma_{jk}s + i\delta_{jk}}{(s - \alpha_k)^2 + \beta_k^2}, \quad h_{ij}(t) = \sum_k \exp(\alpha_k t) \left\{ \frac{1}{\beta_k} (i\gamma_{jk}\alpha_k + i\delta_{jk}) \sin\beta_k t + i\gamma_{jk} \cos\beta_k t \right\} \quad (2)$$

相対変位 (角変位) $u_i(t)$; 絶対加速度 (角加速度) $\ddot{u}_i(t) + g_i(t)$ は次式で求められる。

$$u(t) = \int_0^t h(t-\tau) \ddot{g}(\tau) d\tau, \quad \ddot{u}(t) + \ddot{g}(t) = \int_0^t \ddot{h}(t-\tau) \ddot{g}(\tau) d\tau, \quad (h_{ij}(t) = \dot{h}_{ij}(t) = 0, t < 0)$$

ここで、 $h(t)$ は変位インパルス応答関数マトリックス、 $\dot{h}(t)$ は

加速度インパルス応答関数マトリックスである。

3. 数値計算例

数値計算は、表-1に示す構造諸元を有するモデルについて、行なった。特性方程式を解いた結果、このモデルの持つ共振点は、表-2のようになる。外力として三方向から正弦波（三方向とも、円振動数同じ、位相差なし、Z方向の振幅は X, Y 方向の 1/2 とした）を入力した場合の各方向の加速度の応答倍率、各軸回りの角加速度を、図-3 (a), (b) に示す。図-3 (a) より、第2, 3共振点付近で、X, y, z方向ともピークを示しているが、第1共振点では、y方向、第6共振点では z方向のみがピークを持っている。

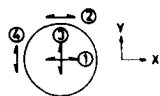
図-3 (b) より、角加速度については、第3, 4共振点付近に、ピークを持っている。図-2は、三方向から自然地震波（1968年十勝沖地震）が入力された場合の、パワースペクトル密度から求めた加速度の応答倍率である。三方向とも長周期部分では、倍率はほぼ1であるが、NS, EW 方向は短周期部分では第1, 2共振点付近でピークを示している。UD方向については、入力地震波に似た応答を示していることがわかる。図-4は、円筒タンクを用いた振動実験の結果を示している。図のように加速度計を円筒タンクの中心部と、円周に配置した。Y方向にのみ正弦波（周期0.2秒）を入力した場合、Z軸回りの回転運動が現われているのがわかる。

（ただし 円筒タンクは、直径それぞれ10, 8, 6mmの3本の脚で非対称に支持されている）

4. あとがき

ここでは構造物の回転成分を考慮した立体的地震応答解析を行なった。さらに振動実験を行ない結果との比較を試みた。

実際の構造物のモデル化、構造諸元の決定などに十分な配慮がなされれば、かなり一般的な問題にまで応用することが可能である。



INPUT Y f = 5.0 Hz

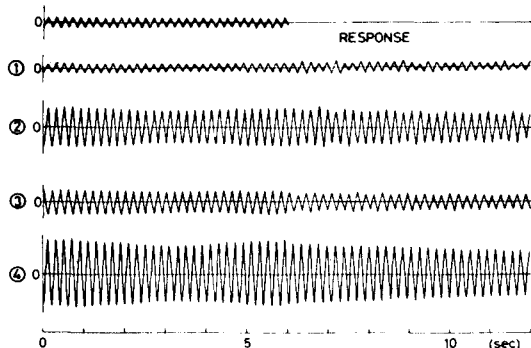


図-4

$m = 2.45 \times 10^{-2}$						[kgsec ² /cm]
$I_x = I_y = 7.7$		$I_z = 6.0$				[kgsec ² ·cm]
$C_x = C_y = 5.0 \times 10^{-2}$		$C_z = 5.0 \times 10^{-1}$				[kgsec/cm]
$C_\phi = C_\psi = 5.0 \times 10^{-2}$		$C_\theta = 1.0 \times 10^{-2}$				[kgsec·cm]
$K = \begin{bmatrix} 1.7 \times 10^4 & 7.7 & -7.7 \times 10^3 & 7.7 \times 10^3 & 5.7 \times 10^3 & -1.9 \times 10^2 \\ & 1.5 \times 10^4 & -6.6 \times 10^3 & 7.8 \times 10^3 & 9.2 \times 10^3 & -2.4 \times 10^2 \\ & & 1.3 \times 10^3 & -5.2 \times 10^2 & -5.0 \times 10^2 & 8.9 \times 10^2 \\ & & & 4.0 \times 10^4 & -1.0 \times 10^4 & -5.7 \times 10^3 \\ & & & & 4.0 \times 10^4 & -5.8 \times 10^3 \\ & & & & & 1.6 \times 10^4 \end{bmatrix}$						
Sym.						

表-1 構造諸元

0.3581916	0.1409836	0.0779315
0.2875229	0.0940584	0.0273843

Tk(sec) K=1,6

表-2 共振点

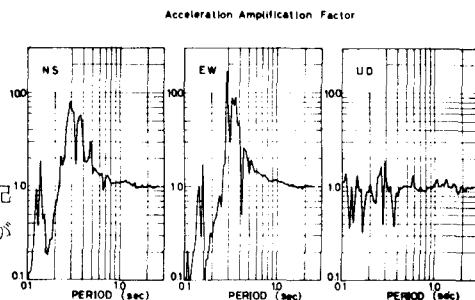
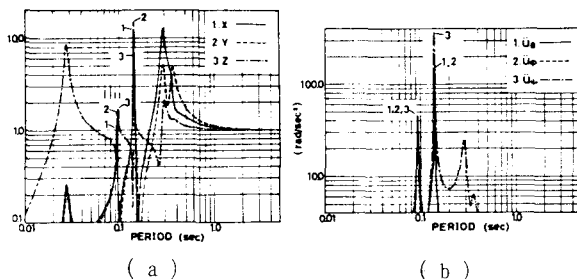


図-2



(a)

(b)

図-3