

地震時地盤変動を受ける大型地下タンクの確率応答解析

宮崎大学工学部 学生員 〇一斗 保宏  
 宮崎大学工学部 学生員 嶋田 剛  
 宮崎大学工学部 正員 原田 隆典

**1. まえがき** 大型地下タンクなどの地中構造物の耐震性は、地震時における周辺地盤の相対変位(すなわち、地盤ひずみ)に、大きく支配されることが明らかにされてきている[1]。そこで、本小文では、浜田博士によるタンクの変形に関する円形梁モデルと著者らの地震時地盤変位の確率モデルを用いて、タンクと周辺地盤の歪特性について、解析的検討を加えたので、ここに概要を報告する。

**2. 確率応答解析の概説** 地下タンクのモデルとして、図-1に示すような円形梁を採用すると、変形方程式、最大曲げおよび軸応力は、次式で与えられる。

$$\begin{cases} -\frac{EI}{\alpha^4}(\frac{\partial^4 U_r}{\partial \theta^4} + \frac{\partial^3 U_\theta}{\partial \theta^3}) - \frac{EA}{\alpha^2}(\frac{\partial^2 U_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial U_r}{\partial \theta}) + k_\theta U_\theta = k_\theta U_{g\theta} \\ -\frac{EI}{\alpha^4}(\frac{\partial^4 U_\theta}{\partial \theta^4} + \frac{\partial^3 U_r}{\partial \theta^3}) + \frac{EA}{\alpha^2}(\frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + U_r) + k_r U_r = k_r U_{gr} \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E\lambda}{2\alpha^2(1-\nu^2)}(U_r + \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial \theta^2}) \quad (2)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{\alpha(1-\nu^2)}(\frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + U_r) \quad (3)$$

ここに、深さ方向は、単位長さ1とする。\$U\_r, U\_\theta\$=タンクの法線および円周方向の変位、\$U\_{gr}, U\_{g\theta}\$=タンク周辺地盤の法線および円周方向の変位、\$k\_r, k\_\theta\$=法線および円周方向の地盤のばね定数、\$E\$=ヤング率、\$I\$=断面2次モーメント、\$A\$=断面積、\$\alpha\$=タンクの半径、\$\lambda\$=タンク側壁厚、\$\nu\$=タンク材料のポアソン比である。地盤変位 \$U\_{gr}, U\_{g\theta}\$ は、時間と場所とともに複雑に変化するが、ここでは、これを空間的な確率過程と考える(地中構造物の地震時歪は、場所による地震動変位の違いに支配される事が明らかにされているので、時間的変動は、考えず、場所(空間)だけの確率関数と考える)。

今、\$X, Y\$座標方向の地盤変位 \$U\_{gx}, U\_{gy}\$ は、平均値0と分散 \$\sigma\_x^2, \sigma\_y^2\$ を持つ均質ガウス確率過程と仮定すると、次式によってシミュレートできる(2)。

$$U_{gx} = \sqrt{2\Delta k} \sum_{i=1}^N H_{1i}(k_i) \cos(k_i X + \phi_{1i}) \quad (4)$$

$$U_{gy} = \sqrt{2\Delta k} \sum_{i=1}^N \{ |H_{22}(k_i)| \cos(k_i X + \phi_{2i}) + |H_{21}(k_i)| \cos(k_i X + \phi(k_i) + \phi_{1i}) \}$$

ここに、

$$\begin{aligned} H_{1i}(k_i) &= \sigma_x \sqrt{S(k_i)} & H_{22}(k_i) &= \sigma_y \sqrt{(1-\nu^2) S(k_i)} \\ |H_{21}(k_i)| &= \sigma_y \nu \sqrt{S(k_i)} & S(k_i) &= \frac{D^2}{\sqrt{\pi} b} e^{-\frac{k_i^2}{2b}} \end{aligned} \quad (5)$$

\$S(k\_i)\$ は、地盤変位の平面的変動を表わす片側パワースペクトル密度関数であり、これらのパラメータ \$D\$ と \$b\$ は、地中埋設管の震害データから推定され、次式によ、て与えられている[3]。

$$D = 2.53 \times 10^4 \times T_g^2 \times a_{max} / (2 \times \ln b + 12.219)^{1/2}, \quad \log b = -(1.564 \log T_g + 1.971) \quad (6)$$

すなわち、地盤の固有周期 \$T\_g\$ と地表加速度 \$a\_{max}\$ が与えられると、(5)と(6)式によりパワースペクトル密度関数の形

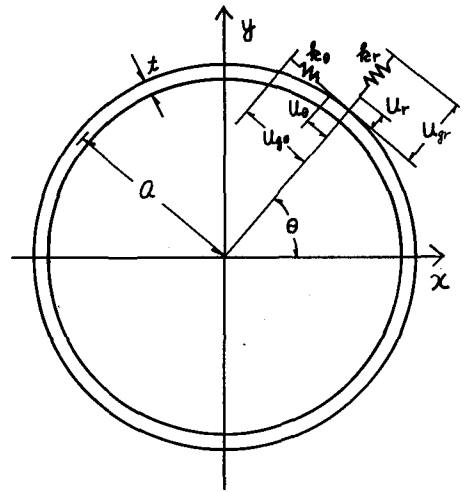


図-1 大型地下タンクの円形梁モデル

が決まる。 $\gamma$ と $\varphi(\theta)$ は、 $U_{gx}$ 、 $U_{gy}$ のコヒーレンス関数の絶対値と位相角であり、 $\varphi_x$ と $\varphi_y$ は、 $0 \sim 2\pi$ の間で一様分布する位相角である。(4)式を極座標変換することにより、空間的確率過程 $U_{gr}$ 、 $U_{go}$ が求まる。この変位を次式を用いて $0 \sim 2\pi$ の間でフーリエ展開する。

$$U_{gr} = \sum_{m=1}^M a_m \cos m\theta, \quad U_{go} = \sum_{m=1}^M b_m \sin m\theta \quad \text{--- (7)}$$

また、タンクの変位 $U_r$ 、 $U_o$ も同じく次式のように展開すると、

$$U_r = \sum_{m=1}^M c_m \cos m\theta, \quad U_o = \sum_{m=1}^M d_m \sin m\theta \quad \text{--- (8)}$$

$U_{gr}$ 、 $U_{go}$ は、既知であるから、(7)式のフーリエ係数 $a_m$ 、 $b_m$ は、計算できる。さらに、(1)式と(7)、(8)式を用いると $c_m$ 、 $d_m$ が、 $a_m$ 、 $b_m$ の間数として求まるので、結局、 $c_m$ 、 $d_m$ が決まり、タンクの変位 $U_r$ 、 $U_o$ およびタンクの歪が求まる。なお、地盤の軸歪 $\epsilon_x$ とせん断歪 $\gamma_{xy}$ は、

$$\epsilon_x = \frac{\partial U_{gx}}{\partial x}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial U_{gy}}{\partial x} \quad \text{--- (9)}$$

で与えられる。

**3. 計算例と考察** 以上の確率的解析方法を表-1に示すようなタンク-地盤モデルに適用して、タンクや地盤の歪特性を考察してみた。表-1のタンクは、円筒形RC大型地下タンクを模擬したものであり、地盤の固有周期 $T_g \cong 0.67$  ( $f_g = 1.5\text{Hz}$ )として比較的軟弱な地盤を想定したものである。地盤変動のシミュレーション(4)式では、現時点で、 $\gamma$ と $\varphi$ の値は、不明確であるので、ここでは、 $\gamma = 0$ 、 $\varphi = 0$ とした。すなわち、 $U_{gx}$ と $U_{gy}$ は、互いに独立なものと仮定したことになる。また、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ の比についても不明確であるので、 $\sigma_x = D$ 、 $\sigma_y = 2D$ とした。地盤加速度 $A_{max} = 200 \text{gal}$ とすると、 $D = 0.01(\text{m})$ 、 $b = 0.02$ となる。(4)、(7)と(8)式の $N$ 、 $M$ は、 $N = 200$ 、 $M = 10$ とした。以上の結果の1例を地盤変位については、図-2、タンク変位では、図-3に示す。5回のシミュレーション結果のタンクと地盤の歪の比の平均と標準偏差を表-2に示す。表より、タンクの最大歪は、地盤の最大歪に対して、最大で約10%でしかなく、また地盤の最大軸歪 $\epsilon_x = 6.0 \times 10^{-6}$ 、せん断歪 $\gamma_{xy} = 1.0 \times 10^{-5}$ であるので、タンクの歪は、極めて小さいことがわかる。

表-1 タンク諸定数と地盤ばね定数

半径 $a$ (m)	34.0	ポアソン比 $\nu$	0.33	地盤ばね定数 ( $\text{kg/m}^2$ )	
側壁厚 大 (m)	2.0	ヤング率 $E$ ( $\text{kg/m}^2$ )	$3.0 \times 10^9$	$k_o$	$k_r$
				$0.25 \times 10^6$	$0.5 \times 10^6$

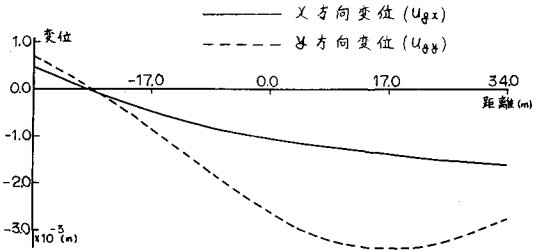


図-2 地盤の変位波形

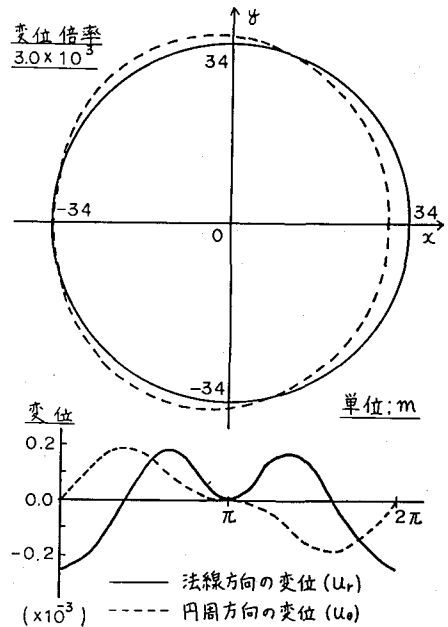


図-3 タンクの変位図および変位波形

表-2 タンクと地盤歪の比の平均と標準偏差

	$\frac{\sigma_r}{E} / \epsilon_x$	$\frac{\sigma_o}{E} / \gamma_{xy}$	$\frac{\sigma_o}{E} / \epsilon_x$	$\frac{\sigma_r}{E} / \gamma_{xy}$
平均値	0.1146	0.0610	0.0129	0.0069
標準偏差	0.0108	0.0093	0.0032	0.0020

- 1). 浜田政則, "大型地下タンクの地震時挙動の観測と解析", 土木学会論文報告集, 第273号, 1978年5月
- 2). Shinguzha, M. and Jan, C.-M., "Digital Simulation of Random Processes and Its Application", Journal of Sound and Vibration, 1972, vol.25(1)
- 3). 織田増田, 原田, "地震動変位の工学的平面分布モデルに関する一考察" 第37回土木年次講演I-324, 1982.