

I-50

強震時における地中構造物の応答解析

宮崎大学工学部 学生員 〇嶋田 剛 学生員 早川 進
宮崎大学工学部 学生員 筑紫 寛幸 正員 原田 隆典

1. まえがき 地下鉄、共同溝、ガス・水道供給管、地下タンク等、規模の異なる種々様々な地中構造物の地震時歪の特性を把握することを目的として、これら地中構造物と地震入力をモデル化した。地中構造物は、質点系に離散化し、各節点に地盤のばねを介して、定常確率過程のシミュレーションから得られる地盤変位を入力した。このような地中構造物のモデルにより、地中構造物に生じる歪の2乗平均値や最大歪の特性と地盤歪の関係を定量化したので、その概要を報告する。

2. 解析手法とモデルの概説 これまでの研究により、地中構造物の地震時挙動は、周辺地盤の振動特性に大きく支配され、管路の変形は周辺地盤とほぼ同様であることや、管路の地震時応力は、地盤の相対変位に支配されること等が明らかにされている。そこで地中構造物のモデルとして、図-1に示すように、地震時外力を地盤変形と考え、地盤ばねを介して管路に作用させるという擬静的な応答解析モデルを採用する。

数値計算モデルでは、図-1に示すように、両端を固定し、各パイプ要素間に継ぎ要素(軸方向、せん断、回転)を設け、地盤ばね(水平、鉛直)で支えられたはりと考え、構造物の応答は、①式より求められる。

$$[K_{\text{system}}]\{D_{\text{system}}\} = [K_{\text{soil}}]\{D_g\} \quad \text{--- ①}$$

ここで、 $[K_{\text{system}}]$ 、 $[K_{\text{soil}}]$ は、構造物モデルの剛性マトリックスと地盤ばね要素の剛性マトリックスで、 $\{D_{\text{system}}\}$ 、 $\{D_g\}$ は、構造物モデルの各応答と入力地震動変位ベクトルである。

2-1. 地盤ばねの算定 地盤ばねの算定に関しては、色々な方法があるが、今回は地盤反力係数(Kg/m^3)によって決めることにする。各要素と地盤を結ぶ水平、鉛直方向の地盤ばね定数 k_{hs} 、 k_{vs} (Kg/m)は、次式で与えられる(図-1参照)。

$$\text{水平ばね定数 } k_{hs} = \pi D_i K_{is} l_i$$

$$\text{鉛直ばね定数 } k_{vs} = D_i K_{ih} l_i$$

ここに K_{is} 、 K_{ih} は地盤反力係数(Kg/m^3)、 D_i 、 l_i は各パイプ要素の外径(m)と長さ(m)である。

2-2. 入力地震動 地盤変位は、場所と時間の関数であるが、地中構造物の地震時歪み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、時間を固定し、場所sだけの関数と考える。入力モデルとして、2つのたがいに相関する定常確率過程(平均値0)、 $U_g(x)$ (x座標方向の地盤変位)、 $V_g(x)$ (y座標方向の地盤変位)を採用すると、サンプル波 $u_g(x)$ 、 $v_g(x)$ は、次式により計算できる。

$$u_g(x) = \sqrt{2\sigma^2} \sum_{m=1}^N H_{11}(k_m) \cos(k_m x + \phi_{1m}) \quad \text{--- ②}$$

$$v_g(x) = \sqrt{2\sigma^2} \sum_{m=1}^N \{ H_{22}(k_m) \cos(k_m x + \phi_{2m}) + H_{21}(k_m) [\cos(k_m x + \phi(k_m) + \phi_{1m})] \} \quad \text{--- ③}$$

②、③式において、 $H_{ij}(k_m)$ ($i, j = 1, 2$)は、 $0 \leq k_m \leq k_u$ に対して成り立ち、 $k_u = N\Delta k$ 、 $k_m = m\Delta k$ であり、 ϕ_{1m} 、 ϕ_{2m} は、 $0 \sim 2\pi$ の間で一様な分布を持つランダム位相角、 k_m は波数である。また $H_{ij}(k_m)$ に

関しては、以下のようにして求められる¹⁾。

いま、たがいに相関するx方向、y方向の地盤変位 $u_g(x)$ 、 $v_g(x)$ のパワースペクトルマトリックスは次式のように与えられる。

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^2 S_{xx}(k) & \sigma_x \sigma_y S_{xy}(k) \\ \sigma_x \sigma_y S_{xy}^*(k) & \sigma_y^2 S_{yy}(k) \end{bmatrix} \quad \text{--- ④}$$

ここで、 σ_x 、 σ_y はそれぞれ $u_g(x)$ 、 $v_g(x)$ の標準偏差、 $S_{xx}(k)$ 、 $S_{yy}(k)$ は、パワースペクトルであり、実数となる。 $S_{xy}(k)$ 、 $S_{yx}(k)$ は複素数となるクロススペクトルである。なお $S_{yx}(k) = S_{xy}^*(k)$ の関係が成立する。このクロススペクトルの位相角 $\varphi(k)$ は、次式で定義される。

$$\varphi(k) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im } S_{xy}}{\text{Re } S_{xy}} \right) \quad \text{--- ⑤}$$

コヒーレンス関数 γ^2 を用いて、さらに $u_g(x)$ 、 $v_g(x)$ の変動の様子はほぼ等しいと仮定すると、 $S(k) = S_{xx}(k) = S_{yy}(k)$ とおけるので、④式は、 γ^2 、 $\varphi(k)$ 、 $S(k)$ を使って次式のように書くことができる。

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x \sigma_y \gamma e^{-i\varphi(k)} \\ \sigma_x \sigma_y \gamma e^{i\varphi(k)} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} S(k) \quad \text{--- ⑥} \quad \gamma^2 = \frac{|S_{xy}(k)|^2}{S_{xx}(k) S_{yy}(k)}$$

従って②、③式の $H_{ij}(k_m)$ [$i, j = 1, 2$]は、 σ_x 、 σ_y 、 $S(k)$ 、 γ^2 を使って次式のように表わされる。

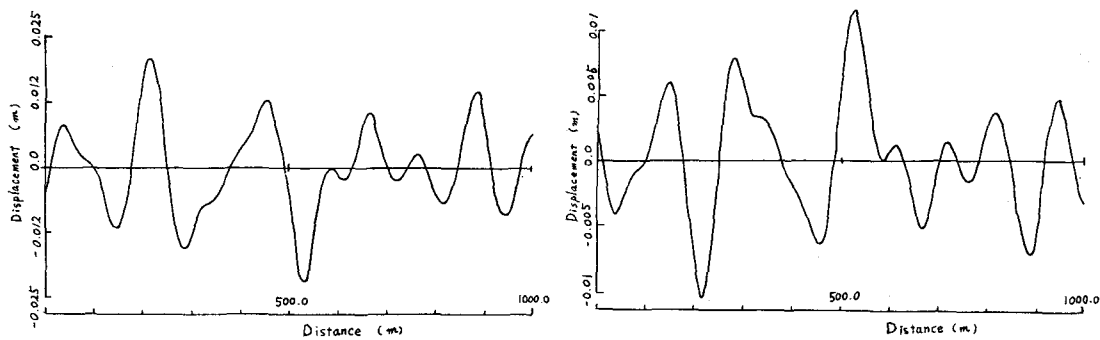
$$H_{11}(k_m) = \sqrt{\sigma_x^2 S_{xx}(k_m)} = \sigma_x \sqrt{S(k)} \quad |H_{21}(k_m)| = \sigma_y^2 \overline{S_{xy}(k_m)} / H_{11}(k_m) = \gamma \sigma_y \sqrt{S(k_m)}$$

$$H_{22}(k_m) = \left(\frac{\sigma_x^2 S_{xx}(k_m) \sigma_y^2 S_{yy}(k_m) - \sigma_x^2 \sigma_y^2 |S_{xy}(k_m)|^2}{\sigma_x^2 S_{xx}(k_m)} \right)^{\frac{1}{2}} = \sigma_y \sqrt{(1 - \gamma^2) S(k_m)}$$

従って $u_g(x)$ 、 $v_g(x)$ はパワースペクトル $S(k_m)$ と σ_x 、 σ_y 、 γ^2 、 $\varphi(k_m)$ を与えることにより求めることができる。

いま $\sigma_x = 0.01$ (cm)、 $\sigma_y = \frac{1}{2} \sigma_x$ 、 $S(k_m) = k_m^2 \text{EXP}(-k_m^2/4b^2)/2b^2\sqrt{\pi}$ 、 $b = 0.015$ 、 $\varphi = \pi$ 、 $\gamma = 1$ 、 $N = 1024$ 、 $\Delta k = 0.307 \times 10^{-2}$ として²⁾、計算したサンプル地盤変位波の例を図-2に示す。

以上のモデルにより構造物の各応答が求まり、これにより、構造物の歪み特性を考察する。構造物モデルに生じる歪の最大値 ε_{pmax} 、2乗平均値 ε_{prms} 、および地盤歪の最大値 ε_{smax} 、2乗平均値 ε_{srms} を算出し、 $\varepsilon_{pmax}/\varepsilon_{smax} = \alpha$ 、 $\varepsilon_{prms}/\varepsilon_{srms} = \beta$ が“構造物の違い”、“地盤ばね定数”、“継手のばね定数”によってどのように変化するかを検討する。なお計算結果および考察は当日発表する予定である。



x座標方向地盤変位波形 ($u_g(x)$)

y座標方向地盤変位波形 ($v_g(x)$)

図-2 サンプル波

参考文献

- 1) H. Shinozuka, C-M. Jan; "Digital Simulation of Random Process and Its Application" Journal of Sound and Vibration 1972, Vol 25 (1)
- 2) 織田, 嶋田, 泉田; "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