

地盤と構造物の動的相互作用における基礎の埋め込み効果

東北大学 工学部 ○高橋卓也 (学生員)

大学院 石川裕一 (学生員)

工学部 柳沢栄司 (正員)

1. はじめに

重要構造物の地震応答解析を行うためには、地盤と構造物の間における動的相互作用を考慮する必要がある。この場合通常、構造物の寸法と比較して地盤は半無限に延びた連続体と仮定することが行われている。そのため、構造物に散乱される波のエネルギーは系に保存されず無限遠方へ透散していく。そこで近年、埋め込みを有する原子炉等の地震応答解析においては、合理的かつ簡便な方法として、地盤-構造物系を MASS-SPRING-DASHPOT 系にモデル化し、基礎の側面の動的ばねを近似的に求めて、従来の地表面上の構造物と同様の方法で解析する研究がなされている。本研究では、埋め込みを考慮した連続系モデルを考え、その複素剛性を算出し、スウェイモデルを用いて基礎の埋め込み割合による効果を理論的に解析する。

2. 解析方法

地盤、構造物系を図1のようにモデル化する。但し、地盤は半無限弾性体と仮定し、上部構造物は一質点系、下部構造物は円形剛基礎としている。ここで用いた動的特性及び係数は、以下に示すように設定する。

R_H, C_H : 地盤のスウェイに対するバネ係数と減衰係数

R, C : 上部構造物 M のバネ係数と減衰係数

m : 下部構造物 m (基礎) の質量

M : 上部構造物の質量

Z : 地盤変位

Y_0, Y_1 : 基礎と上部構造物の地盤に対する相対変位

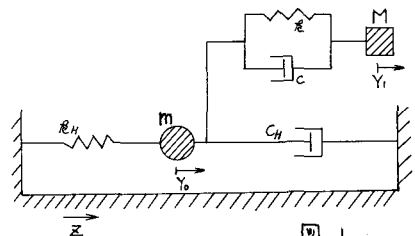


図 1

このとき、系に加した振動方程式は

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Y}_1 \\ \ddot{Y}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & -R \\ -R & R+R_H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & -C \\ -C & C+C_H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Y}_1 \\ \dot{Y}_0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \ddot{Z} \quad (1)$$

と書ける。ここで系に働く外力は正弦波に加わるものとし、また変位解も同様にして次のように表すと、

$$Z = Z_0 e^{i\omega t}, \quad Y_0 = Y_0 e^{i\omega t}, \quad Y_1 = Y_1 e^{i\omega t} \quad (2)$$

となり、(1)、(2)式とともに、以下に示す複素剛性を求めて解析する。

地盤の複素剛性によりバネ定数と減衰定数も算出する。図2に示してあるのは、埋め込みを有する円形剛基礎であり、半径 r 、埋め込み高さ H とする。これが全無限弾性体中で振動するときのインピーダンスは、NOVAK により解析的に与えられているが、本研究においても、それと同様な方法で地盤の水平滑動に対する複素剛性を求め、その実部、虚部により、それぞれ R_H, C_H を算定する。解析にあたっては、主なパラメータを H/r として埋め込み効果をはかった。また、埋め込みがない場合 ($H=0$) は、田沼の振動アドミタンスにより導入した複素剛性を用いた。

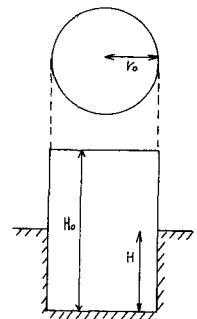


図 2

実際に用いたデータの例を以下に示す。

i) 地盤 : せん断弾性係数 $G = 46000 \text{ t/m}^2$, 単位体積重量 $\rho_0 = 1.8 \text{ t/m}^3$

ポアソン比 $\nu = 0.4$, 減衰定数 $h = 0.02$

ii) 基礎 : $r_0 = 10.0 \text{ m}$, $H_0 = 30.0 \text{ m}$, 密度 $\rho_1 = 2.5 \text{ t/m}^3$

iii) 上部構造物：バネ定数 $E = 200000 \text{ t/m}$, 減衰定数 $h_1 = 0.05$
質量 $M = 20000 \text{ t}$

3. 解析結果

地盤の複素剛性 $K_1 + iK_2$ は、単位埋め込み高さ当たりで次のように表わすものとした。 δ 波, P波の速度比を n とし、

$$K_1 + iK_2 = G\pi a_0^2 \alpha = G\pi (f_1 + if_2) \quad (3)$$

$$\alpha = \omega r_0 / \sqrt{G/\rho}, \quad K = 1/\sqrt{1+2h} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\kappa a_0 H_0 (\kappa a_0 H_1 (n\kappa a_0) + n\kappa a_0 H_0 (n\kappa a_0) H_1 (\kappa a_0) - 4H_1 (n\kappa a_0) H_1 (\kappa a_0))}{n\kappa^2 a_0^2 H_0^{(2)} (n\kappa a_0) - \kappa a_0 H_1^{(2)} (n\kappa a_0) H_0^{(2)} (\kappa a_0) - n\kappa a_0 H_0^{(2)} (n\kappa a_0) H_1^{(2)} (\kappa a_0)} \quad (5)$$

ゆえに、付加質量を無視するものとして、上式より $R_H = K_1$
 $C_H = K_2/\omega$ と表せる。 $H_m^{(2)}$ は m 次のヤング関数である。
この、実部 f_1 虚部 f_2 を図3に示した。これによると、 R_H は無次元振動数 a_0 に関係なく、ほぼ一定値をとり、 C_H は単調増加する傾向がある。また、図4は、位相遅延角 ϕ を表したもので、始めのうち、非線形的に増加するが、 a_0 が大きくなると、ある一定値に収束するものと思われる。

図5については、外力の振動数 ω が変化するとき、基礎の減衰定数 h_0 の変化を見たものである。これによると、 ω が2.5以上になれば、 ω に対する影響はさほどなくなってくるが、 ω が小さいところでは、大きくなっている。埋め込み比 H/r による変化はそれほど顕著に見られないが、 H/r が大きくなるにつれて、 h_0 がやや高くなっている。図6は、 ω に対する上部構造物の変位と下部構造物の変位の振幅比 y_1/y_0 である。これによると、上部の固有振動数付近で共振があり、またそのすぐあとに、上部下部の固有振動数が接近しているため、共振の谷が生じているのがわかる。 H/r で見ると、当然のことながら H/r が大きくなるほど埋め込み基礎の変位が小さくなるために、倍率は大きくなる。つまり埋め込みが大きいほど、基礎は強固になるわけである。

4. あとがき

動的ミッドリン解や田治見の振動アドミタンスに比べNOVAKは無限積分を用いない手法であり、数値計算上極めて有利で簡便だった。しかし、本研究においては、スウェーデンのみであるため、今後においてロッキングも考慮した系で解析を行えるようにする必要がある。

<参考文献>

Novak, M., T. Nogami and F. Aboul-Elia, "Dynamic Soil Reactions for Plane Strain Case," Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 104(4), 1978, 953-959.

