II－12　　地盤振動解析における等価地下逸散減衰定数

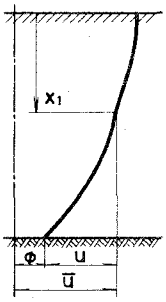
九州大学　学生員　○松尾　修
九州大学　正員　小坪清真
九州大学　正員　園田敏矢

1．まえがき

表面層が基盤からの入射地震波によって振動する場合の地表面の加速度は，波動論によって求められるが，この方法は一般に計算が面倒であり，特に多層地盤の場合に煩雑である。これを補う簡単な方法として振動形解析法が用いられるが，この方法においては減衰定数の設定に難点がある。本研究は振動形解析法を用いる場合の減衰定数の推定に波動論を用いた場合の考え方のいくつかを示し，この減衰定数を用いて地表面の加速度応答を求め，最も合理的な減衰定数の推定法について考察したものである。

2．振動形解析法

ここでは先ず二層地盤の場合について示す。地表層は基盤で固定されているものと考えると，地表層のせん断振動の方程式は次式で表わされる。



$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}=C_1^2\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} \qquad (1)$$

ここに，u_1は地表層の水平変位で，せん断弾性定数をG_1，密度をρ_1とすれば，$C_1=\sqrt{G_1/\rho_1}$である。

この方程式の一般解を求め，基盤および地表面の境界条件を用いると，p次の固有円振動数n_p，および振動形$U_p(x_1)$が得られる。

この振動形を用い，地盤の変位を

$$u_1(x_1,t)=\sum_{p=1} b_p(t)U_p(x_1) \qquad (2)$$

のように表わすと，基準座標b_pに関する次の方程式が得られる。

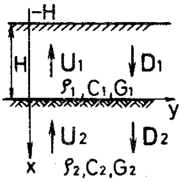
$$\ddot{b}_p+2h_p n_p\dot{b}_p+n_p^2 b_p=-\beta_p\ddot{\phi} \qquad (3)$$

ここに，h_pは表層地盤のp次の減衰定数，$\ddot{\phi}$は基盤上の入力地震加速度，β_pはp次の刺激係数で，次式で与えられる。

$$\beta_p=\frac{\int_0^H \rho_1 U_p\,dx_1}{\int_0^H \rho_1 U_p^2\,dx_1} \qquad (4)$$

3．減衰定数h_pの推定

二層地盤において，上層を1，基盤を2とすれば，それぞれの層に対して(1)式が成り立ち，その解は次のように得られる。



$$u_i(x_i,t)=U_i\left(t+\frac{x_i}{C_i}\right)+D_i\left(t-\frac{x_i}{C_i}\right) \qquad (i=1,2) \qquad (5)$$

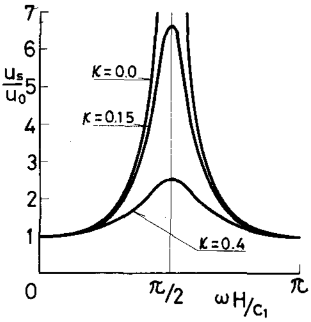
ここに，Uは上昇波，Dは下降波を表わす。いま基盤内を$U_2=e^{j\omega(t+x_2/c_2)}$の波動が上昇するとすれば，$u_1$および$u_2$は次のように表わすことができる。

$$\text{基盤：}\quad u_2=e^{j\omega(t+x_2/c_2)}+D_2e^{j\omega(t-x_2/c_2)}$$

$$表面層：\ u_1 = U_1 e^{j\omega(t+x_1/c_1)} + D_1 e^{j\omega(t-x_1/c_1)} \quad \Big\} \quad (6)$$

ここで，地表面におけるせん断応力が0なること，境界面においてu_1とu_2およびそれらから求めたせん断応力が互いに等しいこと，以上3個の境界条件より上式の未定定数は決定される。いま地表面に生ずる振動の振幅をu_sとし，境界面に生ずる振動の振幅をu_0とすれば，振動の増幅比は次式で与えられる。

$$\frac{u_s}{u_0} = \frac{1}{\sqrt{\cos^2\omega H/_{C_1} + \kappa^2 \sin^2 \omega H/_{C_2}}} \qquad (7)$$



ここに，κは波動インピーダンス比で，$\kappa = G_1c_2/G_2c_1 = \rho_1 c_1/\rho_2 c_2$ である。右図は(7)式による共振曲線を表わしたものである。

(i) 共振曲線より求める方法

共振曲線において，共振時振幅の$1/\sqrt{2}$の振幅を示す振動数の差をΔf，共振時振動数をf_pとすれば，減衰定数h_pは，h_pが小さい場合には近似的に次式で与えられる。

$$h_p = \Delta f / 2f_p \qquad (8)$$

(ii) 地盤内における波動の多重反射による減衰定数の推定

基盤に比して表面層が軟弱な場合は，波動インピーダンス比κは一般に1より小さい。したがって，(7)式より明らかなように，共振時は$H\omega/c_1 = (2p-1)\pi/2$ すなわち$T = 4H/(2p-1)c_1$ のときで，その時の増幅率は$1/\kappa$ である。地盤から基盤に波が進むときの反射係数をαとすれば，$\alpha = (1-\kappa)/(1-\kappa)$ で表わされ，その時境界面を透過する分だけ波は減衰する。それを式で表わせば $e^{-h\omega t} = \alpha^{tV/2H}$ となり，したがってh_pは次式で与えられる。

$$h_p = -\frac{1}{\omega} \times \frac{1}{2H/V} \log \alpha = \frac{1}{(2p-1)\pi} \log \frac{1+\kappa}{1-\kappa} \qquad (9)$$

(iii) 共振点の増幅率と変位応答倍率との等置による減衰定数の推定

強制振動において，h_pが小さいときには，共振は地盤の固有振動数とほぼ等しいときに起こるとみてよい。そのときの変位応答倍率は$1/2h_p$で与えられることがわかっている。したがって，$1/2h_p \fallingdotseq 1/\kappa$。ゆえに，

$$h_p = \kappa/2 \qquad (10)$$

4. 結果

計算例として，$\kappa=0.15$, $H=15m$, $\rho_1=2.0\times10^2 kg\cdot s^2/m^4$, $G_1=7.2\times10^5 kg/m^2$, $c_1=60\,m/s$ の場合の減衰定数を右表に，また，減衰定数を(i)のようにとったときの地震応答図を下図にそれぞれ示した。

	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6
(i)	0.096	0.032	0.019	0.014	0.011	0.009
(ii)	0.096	0.032	0.019	0.014	0.011	0.009
(iii)	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075