

1. はしがき

近年、施工機械の発達に伴い、きわめて大規模なフィルダムが建設される傾向にあるが、わが国のような地震国では地震時における安全性が特に問題になってくる。フィルダムは地盤の比較的良くない地質にも建設され得るので、その振動性状を知ることは耐震設計上欠くべからざることである。ここではフィルダムの地震時応答の求め方の一例と実験結果との比較およびフィルダムの振動性状に与える地盤振動の影響について考察を行うものである。

2. 堤体の地震応答

入力地震波があらかじめ知られている場合には、堤体の応答はいわゆるモーダルアナリシスによって計算することとできる。いま、簡単のために二等辺三角形の堤体がセー断振動をするものと仮定すると i 次の刺激次数 β_i として地盤に $\ddot{y}(t)$ なる加速度の地震入力がある場合、堤体のレスポンスは

$$y(t) = - \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{\omega_{di}} \phi_i \int_0^t \ddot{y}(\tau) e^{-n_i(t-\tau)} \sin \omega_{di}(\tau-\tau) d\tau \quad (1)$$

で表わされる。ここで、 ω_i は i 次の固有円振動数、 n_i は減衰定数、 ϕ_i は i 次の固有変数であり、また

$$n_i = h \omega_i$$

$$\omega_{di} = \sqrt{\omega_i^2 - n_i^2}$$

である。松村によれば、セー断振動理論より求めた固有振動モードは、剛性が深さ方向に一定の場合には

$$\phi_i = J_0\left(\frac{z_i^0 z}{H}\right) \quad J_0: 0 \text{ 次のベッセル函数}, \quad z_i^0: J_0(z) = 0 \text{ を満足する } i \text{ 番目の根}$$

で与えられる、また剛性が深さに比例する場合には ($G = G_0 z$)

$$\phi_i = \frac{1}{z_i^1} \sqrt{\frac{H}{z}} J_1\left(z_i^1 \sqrt{\frac{z}{H}}\right) \quad J_1: 1 \text{ 次のベッセル函数}, \quad z_i^1: J_1(z) = 0 \text{ を満足する } i \text{ 番目の根}$$

で与えられる。この時の刺激次数はそれぞれ

$$\beta_i = \frac{\int_0^H z J_0\left(z_i^0 \frac{z}{H}\right) dz}{\int_0^H \{J_0\left(z_i^0 \frac{z}{H}\right)\}^2 dz} = \frac{2}{z_i^0 J_1(z_i^0)}$$

$$\beta_i = \frac{\int_0^H z J_1\left(z_i^1 \sqrt{\frac{z}{H}}\right) dz}{\int_0^H \{J_1\left(z_i^1 \sqrt{\frac{z}{H}}\right)\}^2 dz}$$

で与えられるものとする。1次、2次および3次の固有振動に対する減衰係数をそれぞれ0.1、0.2 および0.3にとった場合、求められる応答はきわめて実験値に近いことが知られる。図-1 はあいのダムにおける地震観測結果と応答計算結果のフーリエスペクトラを示すものであるが、堤頂部分のスペクトラは周期の比較的大きい側をのぞいて、極めてよく似ていることが知られる。

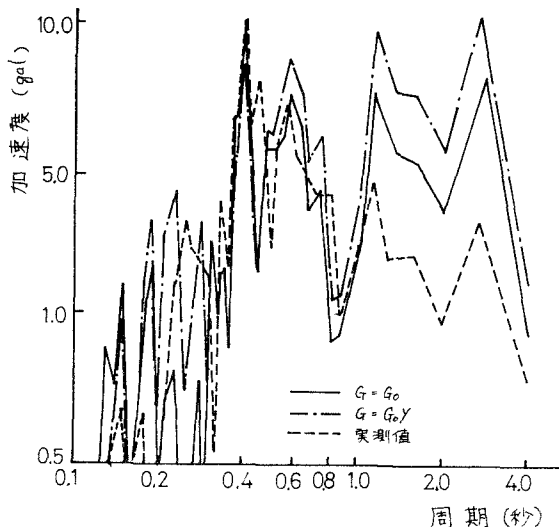


図-1 フーリエ スペクトラ

3. 堤体の振動に及ぼす地表層の影響について

いま、堤体は比較的やわらかな地表層の上に建設されているものとする。岩盤から入射した地震波は一部反射、一部透過して堤体まで上昇し、反射して下降していく。このような上昇する波と下降する波を考えると岩盤における変位 Y_1 、地表層における変位 Y_2 、および堤体の変位 Y_3 はそれぞれ

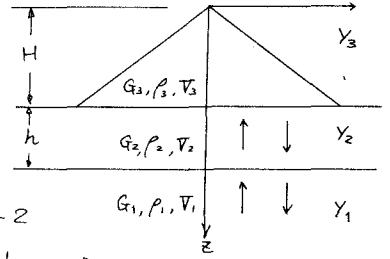


図-2

$$Y_1 = A_1 \cos \left\{ p \left(t - \frac{z-H-h}{V_1} \right) - \phi_1 \right\} + B_1 \cos \left\{ p \left(t + \frac{z-H-h}{V_1} \right) - \phi_2 \right\} \quad (2)$$

$$Y_2 = A_2 \cos \left\{ p \left(t - \frac{z-H}{V_2} \right) - \psi_1 \right\} + B_2 \cos \left\{ p \left(t + \frac{z-H}{V_2} \right) - \psi_2 \right\} \quad (3)$$

$$Y_3 = Y_2 + \xi \quad \xi = \sum F_i(z) Q_i(t) \quad (4)$$

と表わすことができる。

境界条件は

$$\textcircled{1} \quad G_3 \frac{\partial \xi}{\partial z} + \eta \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2 \partial z} = G_2 \frac{\partial Y_2}{\partial z} \quad (z=H)$$

$$\textcircled{2} \quad Y_1 = Y_2 \quad (z=H+h)$$

$$\textcircled{3} \quad G_1 \frac{\partial Y_1}{\partial z} = G_2 \frac{\partial Y_2}{\partial z} \quad (z=H+h)$$

であるから、それぞれの変位条件と式(2)、(3)、(4)とから

$$F_i(z) =$$

$$Q_i(t) = C_i (D_i \cos pt + E_i \sin pt)$$

$$C_i = \frac{\mu_i \left(\frac{P}{P_i} \right)^2}{D_i^2 + E_i^2} U_0$$

$$\mu_i = \frac{z}{z_i J_1(z_i)}$$

$$D_i = 1 - \left(\frac{P}{P_i} \right)^2 \quad E_i = \frac{\eta P}{G}$$

$$\left(\begin{aligned} A_2 \cos \psi_1 - B_2 \cos \psi_2 &= \alpha_2 C_i E_i \left(\frac{P}{P_i} \right) J_1(z_i) = k_2 U_0 \\ B_2 \sin \psi_2 - A_2 \sin \psi_1 &= \alpha_2 C_i (D_i + E_i) \left(\frac{P_i}{P} \right) J_1(z_i) = k_2 U_0 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\left(\begin{aligned} A_1 \cos \phi_1 + B_1 \cos \phi_2 &= A_2 \cos \left(\psi_1 + \frac{Ph}{V_2} \right) + B_2 \cos \left(\psi_2 - \frac{Ph}{V_2} \right) \\ A_1 \sin \phi_1 + B_1 \sin \phi_2 &= A_2 \sin \left(\psi_1 + \frac{Ph}{V_2} \right) + B_2 \sin \left(\psi_2 - \frac{Ph}{V_2} \right) \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\left(\begin{aligned} A_1 \cos \phi_1 - B_1 \cos \phi_2 &= \alpha_2 \left\{ A_2 \cos \left(\psi_1 + \frac{Ph}{V_2} \right) - B_2 \cos \left(\psi_2 - \frac{Ph}{V_2} \right) \right\} \\ A_1 \sin \phi_1 - B_1 \sin \phi_2 &= \alpha_1 \left\{ A_2 \sin \left(\psi_1 + \frac{Ph}{V_2} \right) - B_2 \sin \left(\psi_2 - \frac{Ph}{V_2} \right) \right\} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

いま、入力波の振幅 A_1 が既知であり、かつ、位相差はある時点を基準とすればよいことから、 $\phi_1 = 0$ とすれば未知数の数は6個になり、上の連立方程式は解くことができる。地表層 ($z=H$) での振幅を U_0 とおいて(4)式を求めているので、 $z=H$ における(3)式

の絶対振幅が U_0 となる条件から、 U_0 は A_1 について求められるので、振幅をすべて A_1 について書くことができる。いま、堤頂における振幅を U_1 とし、これと A_1 との比を求めたものが、図-3 である。2.5 Hz 附近の堤体の1次振動および4.2 Hz 附近の堤体の2次振動の他に6.8 Hz 附近に地盤振動の影響が表われている。今後、更にパラメータを変化させて応答特性を求めれば地盤振動の影響が明確に求められるであろう。

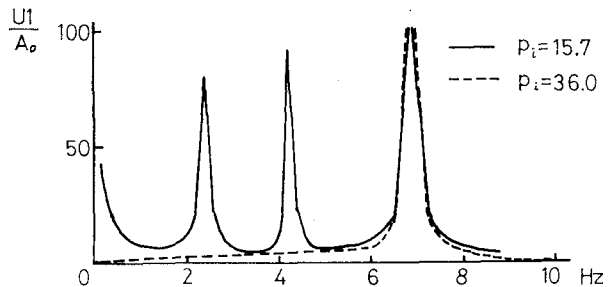


図-3 堤頂における振幅比

参考文献

- 1) 松村琢治：地震動による土壌堤の変形，土木研究所報告 第28号第3冊 pp 1~87 (1935)
- 2) 岡本義三：耐震工学