

I - B 251

半無限地盤上の盛土に対する地震応答

ハザマ技術研究所 正会員 松原勝己
同 上 正会員 浦野和彦

1. まえがき 現在、盛土地盤に対しては、特に重要度の高いものや特殊な構造を除いて、十分な耐震検討が実施されないのが通例であるが、1995 年兵庫県南部地震以後、重要度の高い河川堤防などで液状化時の検討が実施されつつある。筆者らは、先に台形状を有する盛土地盤に対する実用的な地震応答計算法を提案するとともに、盛土高さや勾配をパラメータとした地震応答計算結果を示した¹⁾。しかしながら、先の検討では、盛土下方の地盤の影響を考慮していないために、大きめの応答評価になっているものと考えられる。下方地盤の影響を簡易的に取り込む方法としては、等価逸散減衰で評価する方法が考えられ、土岐²⁾および大町³⁾がそれぞれ平行層および三角形断面の盛土に対して減衰の評価式を導入している。また、佐藤ら⁴⁾は多層系地盤上の盛土に対する等価逸散減衰を評価する手法を提案している。本報ではこれらの方法と同様の考え方を用い、台形断面を有する盛土の下方地盤の影響を、等価逸散減衰で評価する方法を検討するものである。

2. 盛土の変位応答 盛土部分の運動方程式（振動数領域）は式(1)で表される¹⁾。

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial U}{\partial z} + \left(\frac{\omega}{V_s} \right)^2 U = 0 \quad (1)$$

ここに、 U ：盛土の変位（振動数領域）、 ω ：円振動数、 V_s ：盛土のせん断波速度である。

変数変換 $y = (\omega/V_s)z$ により、式(1)はゼロ次のベッセル方程式となり、一般解が式(2)で表される。

$$U = c_1 H_0^{(1)} \left(\frac{\omega z}{V_s} \right) + c_2 H_0^{(2)} \left(\frac{\omega z}{V_s} \right) \quad (2)$$

ここに、 $H_0^{(1)}$ 、 $H_0^{(2)}$ ：ゼロ次の第1種および第2種ハンケル関数である。次に、盛土下方の半無限地盤を考えると、図-1を参照し一般解が式(3)で表される。

$$U_1 = A \exp(i\zeta_1 z_1) + B \exp(-i\zeta_1 z_1) \quad (\zeta_1 = \omega/V_{s1}) \quad (3)$$

ここに、 U_1 ：下方地盤の変位（振動数領域）、 A, B ：入射波および下降波の変位振幅、 V_{s1} ：下方地盤のせん断波速度である。境界条件として、(1) 盛土天端でのせん断応力がゼロ、(2) 盛土底面および半無限地盤表面の変位が一致する、(3) 盛土底面および半無限地盤表面のせん断応力が一致することを考慮すれば、式(2)および(3)より、式(4)が得られる。

$$\begin{cases} c_1 H_1^{(1)}(\omega H_1/V_s) + c_2 H_1^{(2)}(\omega H_1/V_s) = 0 & (4a) \\ c_1 H_0^{(1)}(\omega H/V_s) + c_2 H_0^{(2)}(\omega H/V_s) = A + B & (4b) \\ c_1 H_1^{(1)}(\omega H/V_s) + c_2 H_1^{(2)}(\omega H/V_s) = i\rho_1 V_{s1}/(\rho V_s) \cdot (B - A) & (4c) \end{cases}$$

ここで、無次元パラメータとして、 $r = H_1/H$ 、 $\xi = \omega H/V_s$ （無次元振動数）、 $\alpha = \rho V_s/(\rho_1 V_{s1})$ （インピーダンス比）を定義すれば、式(4)より、式(5)を得る。

$$\begin{cases} c_1 H_1^{(1)}(r\xi) + c_2 H_1^{(2)}(r\xi) = 0 & (5a) \\ c_1 H_0^{(1)}(\xi) + c_2 H_0^{(2)}(\xi) = A + B & (5b) \\ c_1 \alpha H_1^{(1)}(\xi) + c_2 \alpha H_1^{(2)}(\xi) = iB - iA & (5c) \end{cases}$$

式(5)を連立して c_1 および c_2 を求めると、式(6)が得られる。

$$c_1 = \frac{iA \cdot H_1^{(2)}(r\xi)}{J_0(\xi)N_1(r\xi) - J_1(r\xi)N_0(\xi) + i\alpha \{J_1(\xi)N_1(r\xi) - J_1(r\xi)N_1(\xi)\}} \quad (6a)$$

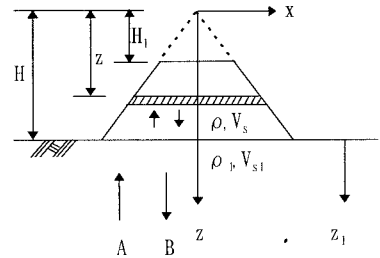


図-1 盛土-半無限地盤系

キーワード：盛土、地震応答、逸散減衰、半無限地盤

連絡先（住所）〒305-0822 つくば市荻間字西向 515-1 TEL:0298-58-8813 FAX:0298-58-8829)

$$c_2 = \frac{-iA \cdot H_1^{(1)}(r\xi)}{J_0(\xi)N_1(r\xi) - J_1(r\xi)N_0(\xi) + i\alpha\{J_1(\xi)N_1(r\xi) - J_1(r\xi)N_1(\xi)\}} \quad (6b)$$

ここに、 J, N : それぞれベッセル関数およびノイマン関数である。式(6)を式(2)に代入することにより、盛土の変位応答が得られる。

3. 等価逸散減衰 以下では、先に求めた盛土半無限地盤系での盛土天端における一次共振点での変位応答が、盛土のみのそれと一致するように等価逸散減衰を定める。

式(2)および(6)より、盛土天端での変位応答が式(7)で表される。

$$(U)_{z=H_1} = \frac{J_0(r\xi)N_1(r\xi) - J_1(r\xi)N_0(r\xi)}{J_0(\xi)N_1(r\xi) - J_1(r\xi)N_0(\xi) + i\alpha\{J_1(\xi)N_1(r\xi) - J_1(r\xi)N_1(\xi)\}} \cdot 2A \quad (7)$$

ここで、一次固有値 x_1 に対しては、振動数方程式より、式(8)が成立する¹⁾。

$$J_1(rx_1)N_0(x_1) - N_1(rx_1) \cdot J_0(x_1) = 0 \quad (8)$$

式(7)および(8)より、式(9)が得られる。

$$(U)_{z=H_1}^{\xi=x_1} = \frac{J_1(rx_1)N_0(x_1) - J_0(rx_1)N_1(rx_1)}{\alpha\{J_1(x_1)N_1(rx_1) - J_1(rx_1)N_1(x_1)\}} \cdot 2iA \quad (9)$$

一方、盛土のみの変位応答（盛土底面固定）を、一次モードのみに着目すれば、式(10)で表される¹⁾。

$$u(z, t) = \phi_1(z)Q_1(t) + u_B \quad (10a)$$

$$\ddot{Q}_1(t) + 2h_{e1}\omega_1\dot{Q}_1(t) + \omega_1^2 Q_1(t) = -\mu_1\ddot{u}_B \quad (10b)$$

$$\phi_1(z) = J_0(x_1 z/H) - \frac{J_0(x_1)}{N_0(x_1)} \cdot N_0(x_1 z/H) \quad (10c)$$

$$\mu_1 = \frac{\pi N_0(x_1)}{1 - \{\pi/2 \cdot rx_1 N_0(x_1)\phi_1(H_1)\}^2} \quad (10d)$$

ここに、 $u(z, t)$: 盛土の変位、 $\phi_1(z)$: 盛土の一次変形モード、 u_B : 盛土底面での変位、 ω_1 : 盛土の一次固有円振動数、 h_{e1} : 等価逸散減衰定数である。

式(10)で、 $Q_1(t) = \bar{Q}_1 e^{i\omega t}$ 、 $u_B = \bar{u}_B e^{i\omega t}$ と置いて振動数領域で書けば、式(11)が得られる。

$$\bar{u} = \phi_1(z)\bar{Q}_1 + \bar{u}_B \quad (11a)$$

$$\bar{Q}_1 = \frac{\mu_1 \omega^2 \bar{u}_B}{\omega_1^2 - \omega^2 + 2ih_{e1}\omega_1\omega} \quad (11b)$$

式(11a)および(11b)より、盛土天端における共振点（ $\omega = \omega_1$ ）での変位は、式(12)で表される。

$$|(\bar{u})_{z=H_1}^{\omega=\omega_1}| = \frac{\sqrt{4h_{e1}^2 + \{\mu_1\phi_1(H_1)\}^2}}{2h_{e1}} |\bar{u}_B| \quad (12)$$

式(9)および(12)を用い、 $2A = |\bar{u}_B|$ の条件のもとに右辺を等置

すれば等価逸散減衰定数 h_{e1} が式(13)で得られる。

$$h_{e1} = \frac{1}{2} \mu_1 \phi_1(H_1) \frac{\alpha}{\sqrt{\{\frac{\pi}{2} x_1 N_0(x_1) \phi_1(H_1)\}^2 - \alpha^2}} \quad (13)$$

特に、三角形断面では $r = 0$ とし、 $\mu_1 = \pi N_0(x_1) = 2/\{x_1 J_1(x_1)\}$ 、

$\phi_1(H_1) = J_0(0) = 1$ より、式(14)が得られる。

$$h_{e1} = \frac{\alpha}{x_1 \sqrt{1 - \{\alpha J_1(x_1)\}^2}} \quad (14)$$

式(13)を用い、 r をパラメータとした時の h_{e1} と α （盛土と下方地盤のインピーダンス比）の関係を、図-2 に示す。

4. あとがき 本報では、盛土半無限地盤系での変位応答解を用い、一次共振点における盛土天端での変位が等しくなる条件で等価減衰を評価した。これにより、盛土下方地盤の影響が、盛土底面固定条件のもとに導かれた先の簡易計算法に容易に組み込むことができる。今後、数値計算を実施し、下方地盤の影響を検討してゆく予定である。

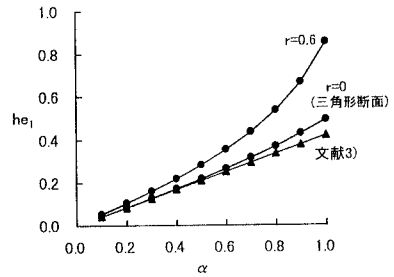


図-2 h_{e1} と α の関係

<参考文献> 1) 松原勝己, 浦野和彦, 三原正哉: 盛土地盤の簡易地震応答計算(その1)(その2), 第33回地盤工学研究発表会講演集, 1998 2) 土岐憲三: 構造物の耐震解析, 技報堂出版, 1981 3) 大町達夫: フィルダム振動の地下逸散減衰量の算定, 土木学会第36回年次学術講演概要集第1部門, 1981 4) T. Sato, T. Shibata and Y. Sunasaka: Simplified dynamic analysis of embankments, Proc. 5th Inter. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 3, 1985