

文章编号: 1000-7598-(2003)06-0991-06

地层组合对砂土液化的影响分析

庄迎春¹, 谢康和¹, 朱益军^{1, 2}, 徐 洋¹

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310009)

摘 要: 利用 Laplace 变换取得了下卧与上覆层的组合地层在已知地震烈度或地层位移两种初始条件下的剪应力的解析表达式, 提出了一种新的液化判别方法; 并利用编程计算, 分析了地层组合中各参数对砂土液化的影响, 得到了在各种组合情况下砂土液化的难易程度。对工程判别有一定的理论指导作用。

关 键 词: 地层组合; 砂土液化; Laplace 变换

中图分类号: TU 441 **文献标识码:** A

Analysis for influence of multi-layered soil stratum on sand liquefaction

ZHUANG Ying-chun¹, XIE Kang-he¹, ZHU Yi-jun^{1, 2}, XU Yang¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Provincial Plan Design and Research Institute of Communication, Hangzhou 310009, China)

Abstract: A new analytical solution which is about shearing stress of sand layer with underlying substratum and upper covering layer under the suppose of known earthquake intensity or layer displacement, is obtained by Laplace transformation; and a new differentiation method for sand liquefaction is proposed. Additionally, the influence of the soil parameters on sand liquefaction is analyzed by computer programming; from which the possibility of sand liquefaction can be judged under different combination conditions. It is of benefit to practical engineering judgement.

Key words: multi-layered soil stratum; sand liquefaction; Laplace transformation

1 引 言

砂土液化是指饱和砂土体在振动作用下, 当动剪应力大于土的抗剪能力时, 导致饱和砂土体有效应力的丧失, 抗剪强度骤然下降至 0, 而变成粘滞流体状态, 从而达到破坏的现象。文献[1~6]分别在砂土液化的机理、影响因素的试验研究、液化判别方法与评价以及防液化措施等方面进行了一些探讨; 关于砂土液化的判别, 现行的方法有原位测试法、剪应变幅值法、剪应力对比法等, 其中原位测试法有标准贯入法、静力触探法以及剪切波速法等方法。由 Seed 和 Idriss 所倡导的剪应力对比法对砂土液化的判别现已被人们广泛应用。

这种方法包括两个方面的内容, 即计算土层中的剪应力与时间的关系, 求出平均剪应力 τ_{av} ; 在实

验室内测定土的液化剪应力, 即抗液化剪应力 τ_L 。然后, 进行对比分析, 得出液化区域; 同时, 由于这种方法在第一步中需要采用地基反力分析方法, 计算比较麻烦, 所以 Seed 又提出了一种简化方法来计算平均剪应力 τ_{av} [1], 即

$$\tau_{av} = 0.65 \rho h a_0 \gamma_d \quad (1)$$

式中 ρ 为土的密度; h 为单元土柱厚度; a_0 为最大地面加速度; γ_d 为一个根据深度而定的衰减系数。这个公式很难反映出地层组合的不同所产生的液化情况的变化, 即不足以反映工程的实际情况。本文通过考虑砂层上下环境的不同, 分析地层组合对砂土液化的影响, 提出了一种液化判别式。

2 基本假设条件

把土体视为由一系列无限层状土组成的一维线

性粘弹性材料,它承受水平剪切力,在一维情况下,假设土体分为三层,中间一层为砂层,如图 1 所示。

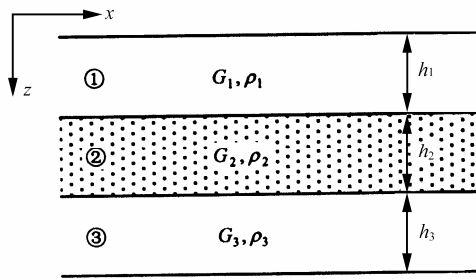


图 1 组合地层示意图
Fig.1 Multilayer sand soil

2.1 基本假设

现作如下假设:

(1) 土层表面、层间界面和基岩表面都视为在水平方向无限延伸,即都为无限水平分层,没有初始剪应力存在;

(2) 各向同性假设:地层中的每一层都假定其为均质、各向同性的一阶线性粘弹体,各层的模量值 G 和粘滞系数 η 可以通过实验方法获得,并符合 $\tau = G\gamma + \eta \frac{d\gamma}{dt}$ 模型;

(3) 振动效应简化为剪应力的竖向传播,忽略垂直向相对位移的影响,即 $w = 0$, 而且 $\frac{\partial w}{\partial z} = 0$, z 为土层竖向层间坐标或相对坐标;

(4) 水平位移沿一个 x 坐标轴运动,它只是 z 的函数,即 $u = f(z)$ 。

2.2 初始条件及边界条件

按已知边界条件划分,分以下两种情况进行讨论。

(1) 已知某地区的地震烈度或地表加速度为 $a_0 \sin \omega t$, 则地表位移为 $\frac{a_0}{\omega^2} \sin \omega t$ 。其中 a_0 为地表最大加速度,并假设地表加速度按正弦波形式变化,则初始条件为

$$\left. \begin{aligned} u_i(t=1) &= 0 \\ \tau_i(t=0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $i = 1, 2, 3$ 。

边界条件如下:

在地表层,有

$$\left. \begin{aligned} \tau_1(z=0) &= 0 \\ u_1(z=0) &= \frac{a_0}{\omega^2} \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

在①和②土层连接处,有

$$\left. \begin{aligned} \tau_1(z=h_1) &= \tau_2(z=0) \\ u_1(z=h_1) &= u_2(z=0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

在②和③土层连接处,有

$$\left. \begin{aligned} \tau_2(z=h_2) &= \tau_3(z=0) \\ u_2(z=h_2) &= u_3(z=0) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(2) 已知某地层位移函数 $u = H \sin \omega t$ 。其中 H 为位移幅值; ω 为圆频率,假设基岩的位移为正弦波形,初始条件为

$$\left. \begin{aligned} u_i(t=0) &= 0 \\ \tau_i(t=0) &= 0 \\ i &= 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

边界条件如下:

$$\text{地表层为} \quad \tau_1(z=0) = 0 \quad (7)$$

在①和②土层连接处,有

$$\left. \begin{aligned} \tau_1(z=h_1) &= \tau_2(z=0) \\ u_1(z=h_1) &= u_2(z=0) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

在②和③土层连接处,有

$$\left. \begin{aligned} \tau_2(z=h_2) &= \tau_3(z=0) \\ u_2(z=h_2) &= u_3(z=0) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在③土层底部,有

$$u_3(z=h_3) = H \sin \omega t \quad (10)$$

3 数理方程的建立及求解

3.1 数理方程的建立

设各层土的剪切弹性模量为 G_i ; 剪切粘滞系数为 η_i ; 质量密度用 ρ_i 表示; 水平位移用 $u_i = u_i(z, t)$ 表示, 则动力平衡方程为

$$\rho_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_i}{\partial z} \quad (11)$$

式中 τ_i 为剪应力, 沿水平层均匀分布; ρ_i 为第 i 层土的质量密度。

由下式:

$$\tau_i = G_i \gamma_i + \eta_i \frac{\partial \gamma_i}{\partial t} \quad (12)$$

$$\gamma_i = \frac{\partial u_i}{\partial z} \quad (13)$$

可以得到:

$$\begin{aligned}\rho_i \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= G_i \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta_i \frac{\partial^3 u}{\partial t \partial z^2} \\ &= (G_i + \eta_i \frac{\partial u_i}{\partial t}) \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2}\end{aligned}\quad (14)$$

3.2 Laplace 变换及求解

对式(12)~(14)进行 Laplace 变换, 由初始条件, 可以得出:

$$R_i = \frac{\partial U_i}{\partial z} \quad (15)$$

$$T_i = (G_i + \eta_i S) \frac{\partial U_i}{\partial z} \quad (16)$$

$$\rho_i S^2 U_i = (G_i + \eta_i S) \frac{\partial^2 U_i}{\partial z^2} \quad (17)$$

式中 U_i , R_i , T_i 分别为 u_i , γ_i , τ_i 的 Laplace 变换。

(1) 当对边界条件(1)进行 Laplace 变换, 有:

地表层为

$$\left. \begin{aligned} T_1(z=0) &= 0 \\ U_1(z=0) &= \frac{a_0/\omega}{S^2 + \omega^2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

在①和②土层连接处为

$$\left. \begin{aligned} T_1(z=h_1) &= T_2(z=0) \\ U_1(z=h_1) &= U_2(z=0) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

在②和③土层连接处为

$$\left. \begin{aligned} T_2(z=h_2) &= T_3(z=0) \\ U_2(z=h_2) &= U_3(z=0) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

(2) 当对边界条件(2)进行 Laplace 变换, 有:

地表层为

$$T_1(z=0) = 0 \quad (21)$$

在①和②土层连接处为

$$\left. \begin{aligned} T_1(z=h_1) &= T_2(z=0) \\ U_1(z=h_1) &= U_2(z=0) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

在②和③土层连接处为

$$\left. \begin{aligned} T_2(z=h_2) &= T_3(z=0) \\ U_2(z=h_2) &= U_3(z=0) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

在③层底部为

$$U_3(z=h_3) = \frac{H\omega}{S^2 + \omega^2} \quad (24)$$

对式(17)求解, 得

$$U_i = A_i \text{sh}(\alpha_i z) + B_i \text{ch}(\alpha_i z) \quad (25)$$

代入式(16), 求解得

$$T_i = \beta_i [A_i \text{ch}(\alpha_i z) + B_i \text{sh}(\alpha_i z)] \quad (26)$$

式中 A_i , B_i 均为复常系数 α_i , 且有

$$\alpha_i = \rho_i^{\frac{1}{2}} S (G_i + \eta_i S)^{-\frac{1}{2}} \quad (27)$$

$$\beta_i = \rho_i^{\frac{1}{2}} S (G_i + \eta_i S)^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

将边界条件(1), 即式(18)~(20)代入(25), 得

$$A_1 = 0 \quad (29)$$

$$B_1 = \frac{a_0/\omega}{S^2 + \omega^2} \quad (30)$$

$$A_2 = \frac{\beta_1}{\beta_2} \frac{a_0/\omega}{S^2 + \omega^2} \text{sh}(\alpha_1 h_1) \quad (31)$$

$$B_2 = \frac{a_0/\omega}{S^2 + \omega^2} \text{ch}(\alpha_1 h_1) \quad (32)$$

$$A_3 = \left[\frac{\beta_1}{\beta_3} \text{sh}(\alpha_1 h_1) \text{ch}(\alpha_2 h_2) + \frac{\beta_2}{\beta_3} (\alpha_1 h_1) \text{sh}(\alpha_2 h_2) \right] \cdot$$

$$\frac{a_0/\omega}{S^2 + \omega^2} \quad (33)$$

$$B_3 = \frac{a_0/\omega}{S^2 + \omega^2} \left[\frac{\beta_1}{\beta_2} \text{sh}(\alpha_1 h_1) \text{ch}(\alpha_2 h_2) + \text{ch}(\alpha_1 h_1) \text{sh}(\alpha_2 h_2) \right] \quad (34)$$

已知中间层设定为砂层, 则其受力情况为

$$T_2 = \frac{a_0/\omega}{S^2 + \omega^2} [\beta_1 \text{sh}(\alpha_1 h_1) \text{ch}(\alpha_2 z) + \beta_2 \text{ch}(\alpha_1 h_1) \text{sh}(\alpha_2 z)] \quad (35)$$

同理, 将边界条件(2), 即式(21)~(24)代入式(25), 得

$$A_1 = 0 \quad (36)$$

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{a_0/\omega}{S^2 + \omega^2} \left\{ \left[\frac{\beta_1}{\beta_3} \text{sh}(\alpha_1 h_1) \text{ch}(\alpha_2 h_2) + \frac{\beta_2}{\beta_3} \text{ch}(\alpha_1 h_1) \cdot \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \text{sh}(\alpha_2 h_2) \right] \text{sh}(\alpha_3 h_3) + \left[\frac{\beta_1}{\beta_2} \text{sh}(\alpha_1 h_1) \text{sh}(\alpha_2 h_2) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \text{ch}(\alpha_1 h_1) \text{sh}(\alpha_2 h_2) \right] \text{ch}(\alpha_3 h_3) \right\} \end{aligned} \quad (37)$$

$$A_2 = \frac{\beta_1}{\beta_2} B_1 \text{sh}(\alpha_1 h_1) \quad (38)$$

$$B_2 = \beta_1 \operatorname{ch}(\alpha_1 h_1) \quad (39)$$

由于是分析砂土的液化, 所以只需分析它的应力情况。将 A_2 , B_2 代入, 即可得

$$T_2 = [\beta_1 \operatorname{sh}(\alpha_1 h_1) \operatorname{ch}(\alpha_2 z) + \beta_2 \operatorname{ch}(\alpha_1 h_1) \operatorname{sh}(\alpha_2 z)] B_1 \quad (40)$$

3.3 对方程解进行逆变换

对已知地震烈度的情况进行变换, 当 $S = i\omega$ 时, 有

$$\alpha(i\omega) = \omega(\rho/G_d)^{\frac{1}{2}} e^{i\left(\frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \arccos(G/G_d)\right)} = \omega(\rho/G_d)^{\frac{1}{2}} \left[\sqrt{\frac{1-G/G_d}{2}} + i\sqrt{\frac{1+G/G_d}{2}} \right] \quad (41)$$

$$\beta(i\omega) = i\omega(\rho G_d)^{\frac{1}{2}} \left[\sqrt{\frac{1+G/G_d}{2}} + i\sqrt{\frac{1-G/G_d}{2}} \right] \quad (42)$$

令

$$\theta = \omega(\rho/G_d)^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{1-G/G_d}{2}} \quad (43)$$

$$\bar{\theta} = \omega(\rho/G_d)^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{1+G/G_d}{2}} \quad (44)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \arccos(G/G_d) \quad (45)$$

则有

$$e^{\alpha h} = e^{h\theta + i h \bar{\theta}} \quad (46)$$

$$e^{-\alpha h} = e^{-h\theta - i h \bar{\theta}} \quad (47)$$

$$\operatorname{sh}(\alpha h) = \operatorname{sh}(h\theta + i h \bar{\theta}) \quad (48)$$

$$\operatorname{ch}(\alpha h) = \operatorname{ch}(h\theta + i h \bar{\theta}) \quad (49)$$

从而可以得出:

$$A_2(i\omega) = \frac{a_0/\omega}{2i\omega} \left(\frac{\rho_1 G_{d_1}}{\rho_2 G_{d_2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{i(\phi_1 - \phi_2)} \frac{1}{2} \operatorname{sh}(h_1 \theta_1 + i h_1 \bar{\theta}_1) \quad (50)$$

$$B_2(i\omega) = \frac{a_0/\omega}{2i\omega} \frac{1}{2} \operatorname{ch}(h_1 \theta_1 + i h_1 \bar{\theta}_1) \quad (51)$$

$$\tau_2(i\omega) = \frac{a_0/\omega}{2} \left[(\rho_1 G_{d_1})^{\frac{1}{2}} e^{i\phi_1} \operatorname{sh}(h_1 \theta_1 + i h_1 \bar{\theta}_1) \cdot \operatorname{ch}(z\theta_2 + i z\bar{\theta}_2) + (\rho_2 G_{d_2})^{\frac{1}{2}} e^{i\phi_2} \operatorname{ch}(h_1 \theta_1 + i h_1 \bar{\theta}_1) \cdot \operatorname{sh}(z\theta_2 + i z\bar{\theta}_2) \right] e^{i\omega t} \quad (52)$$

同样可以得到:

$$\alpha(-i\omega) = -\omega(\rho/G_d)^{\frac{1}{2}} e^{i\left(\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \arccos(G/G_d)\right)} = -\omega(\rho/G_d)^{\frac{1}{2}} \left[-\sqrt{\frac{1-G/G_d}{2}} + i\sqrt{\frac{1+G/G_d}{2}} \right] \quad (53)$$

$$\beta(-i\omega) = -i\omega(\rho G_d)^{\frac{1}{2}} \left[\sqrt{\frac{1-G/G_d}{2}} - i\sqrt{\frac{1+G/G_d}{2}} \right] \quad (54)$$

$$\tau_2(-i\omega) = \frac{a_0/\omega}{2} \left[(\rho_1 G_{d_1})^{\frac{1}{2}} e^{-i\phi_1} \operatorname{sh}(h_1 \theta_1 - i h_1 \bar{\theta}_1) \right]$$

$$\operatorname{ch}(z\theta_2 - i z\bar{\theta}_2) + (\rho_2 G_{d_2})^{\frac{1}{2}} e^{-i\phi_2} \operatorname{ch}(h_1 \theta_1 - i h_1 \bar{\theta}_1) \cdot \operatorname{sh}(z\theta_2 - i z\bar{\theta}_2) \right] e^{-i\omega t} \quad (55)$$

显然 $\tau_2(i\omega)$ 与 $\tau_2(-i\omega)$ 是共轭复数, $\tau_2(i\omega)$ 与 $\tau_2(-i\omega)$ 之和为实数, 每项都含有时间 ωt 与某常数和的余弦, 由于不考虑时域影响, 则得到:

$$\tau_2 = \frac{a_0}{\omega} \left[(\rho_1 G_{d_1})^{\frac{1}{2}} \operatorname{sh}(h_1 \theta_1) \operatorname{ch}(z\theta_2) + (\rho_2 G_{d_2})^{\frac{1}{2}} \operatorname{ch}(h_1 \theta_1) \operatorname{sh}(z\theta_2) \right] \quad (56)$$

式(56)是已知地震烈度时砂层任一点受到的动剪应力。

同样对式(40)进行 Laplace 逆变换, 其动剪应力为

$$\tau_2 = \frac{C}{D} \quad (57)$$

$$\text{其中 } C = H\omega \left[(\rho_1 G_{d_1})^{\frac{1}{2}} \operatorname{sh}(h_1 \theta_1) \operatorname{ch}(z\theta_2) + \right.$$

$$D = \left[\left(\frac{\rho_1 G_{d1}}{\rho_3 G_{d3}} \right)^{\frac{1}{2}} \text{sh}(h_1 \theta_1) \text{ch}(h_2 \theta_2) + \left(\frac{\rho_2 G_{d2}}{\rho_3 G_{d3}} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ch}(h_1 \theta_1) \text{sh}(h_2 \theta_2) \right] \text{sh}(h_3 \theta_3) + \left[\left(\frac{\rho_1 G_{d1}}{\rho_2 G_{d2}} \right)^{\frac{1}{2}} \text{sh}(h_1 \theta_1) \text{sh}(h_2 \theta_2) + \left(\frac{\rho_2 G_{d2}}{\rho_3 G_{d3}} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ch}(h_1 \theta_1) \text{ch}(h_2 \theta_2) \right] \text{ch}(h_3 \theta_3)$$

很明显式(56)、式(57)反映出了上下土层厚度、质量密度和动力参数对砂层应力的影响, 突出了模量的影响。

4 对几种情况的分析

4.1 下卧层的影响分析

通过对式(57)编程计算, 并作出下卧层厚度与动剪应力的变化曲线(图2), 可以看出: 下卧层越厚, 砂层受到的动剪应力越小, 而且反映比较敏感, 即砂层离基岩越远, 动剪应力衰减越快。

图3为动剪应力随动剪模量的变化曲线。即当下卧层是软弱层时, 其模量较小, 不利于动剪应力向上传播, 所以传播到砂层的动剪应力较小, 降低了砂土液化能力。式(57)也反映了这一原则。相反, 坚硬层模量较大时, 则砂土液化能力最大。

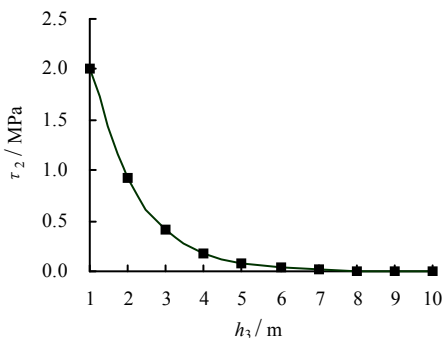


图2 砂层动剪应力随下卧层厚度的变化模拟曲线
Fig.2 Simulated curve of dynamic shear stress changing with underlying substratum depth

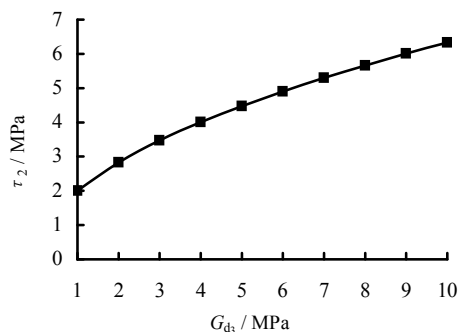


图3 动剪力随模量的变化模拟曲线
Fig.3 Simulated curve of dynamic shear stress changing with modulus ratio

4.2 上履层的影响分析

从式(57)中可以看出上履层越厚, 砂层中剪应力就越大, 但这种影响呈双曲线正余弦函数关系。通过在程序中调试 ρ_1, G_{d1} 的值, 可以得出动剪应力有一个临界值。当模量小于该临界时, 动剪应力随 G_{d1} 增加而增加; 当 G_{d1} 大于临界值时, τ_2 随 G_{d1} 增加而减小, 如图4所示。这与 Seed 的结论相反。

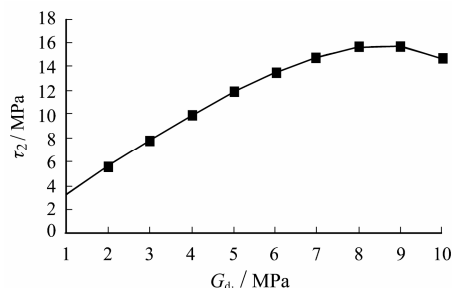


图4 砂层中动剪应力随 G_{d1} 的变化模拟曲线
Fig.4 Simulated curve of dynamic shear stress changing with G_{d1}

反映在式(57)中, 当模量较小时, θ_1 的影响较小(图5), 当 G_{d1} 超过一定值时, 双曲正余弦函数的变化要比模量在系数上的影响变化快, 此时动剪应力随模量的增加而变小。

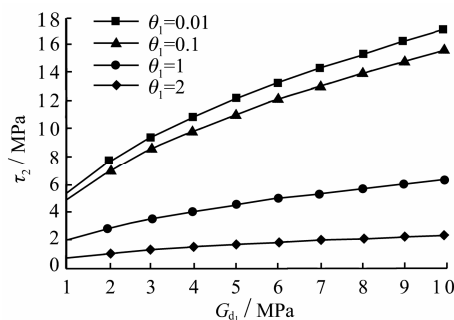


图5 不同的 θ_1 值对动剪应力的影响的模拟曲线
Fig.5 Simulated curves of dynamic shear stress changing with θ_1

4.3 砂层性质对砂土液化的影响

通过对式(56)编程计算,并绘制其变化曲线可以看出,砂层埋藏深,则 τ_2 大(图6); G_{d1} 增加时,砂层的 τ 增加(图7),同时砂土抗液化强度增长更快,提高了砂土的抗液化能力。

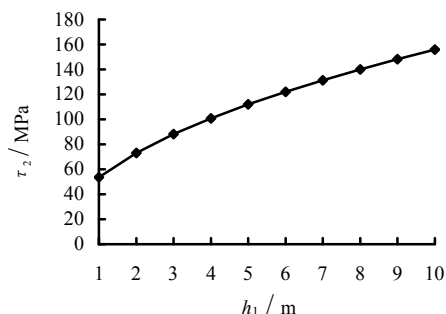


图6 砂层埋深对 τ_2 的影响的模拟曲线

Fig. 6 Simulated curve of sand anti-liquefaction properties influenced by sand buried depth

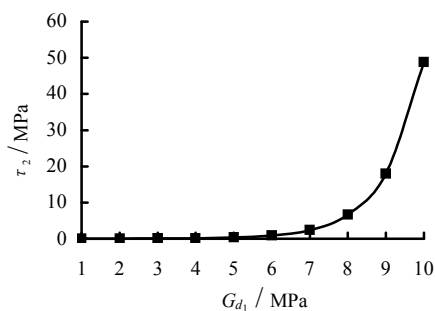


图7 G_{d1} 对砂土抗液化能力影响的模拟曲线

Fig. 7 Simulated curve of sand anti-liquefaction properties influenced by G_{d1}

5 结论

(1) 不同地层对砂土液化有很大的影响,特别是模量的影响表现出一定的复杂性和多变性,只用一个折减系数来反映,是很难完全反映出来砂土液化的性质的。

(2) 当上覆层和下卧层都是坚硬层,即上、下层的 G 很大,此时砂土最有可能液化。

(3) 当上覆层和下卧层都是软弱层,即上、下层的 G 很小,此时砂土最不易液化。

(4) 当一方为软弱层,一方为坚硬层,则砂土液化的可能性介于两者之间。

参考文献

- [1] 钱家欢. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京: 水利水电出版社, 1996.
- [2] 刘金韬, 金晓媚. 饱和砂土液化判别方法中问题浅析[J]. 工程地质学报, 2000, 8(3): 379-384.
- [3] 史宏彦, 谢定义. 饱和砂土判别准则的探讨[J]. 西北水资源与水工程, 2000, 11(3): 16-21.
- [4] 杨秀竹, 王星华. 地震时饱和砂土液化机理及统计判别法[J]. 长沙铁道学院学报, 2001, 19(1): 34-37.
- [5] 石兆吉, 张荣祥. 砂土液化判别和评价综合方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(1): 82-88.
- [6] 张柏山, 邵萍萍, 孙敬东. 砂土液化的防范措施[J]. 岩土工程界, 2001, 4(6): 29.

第5届国际固体断裂与强度会议在日本召开

2003年国际固体断裂与强度会议(FEOfS2003)于2003年10月20~23日在日本仙台召开,来自18个国家的280多名专家、学者出席了大会,大会交流论文293篇,涉及复合材料、金属、岩石和土等的疲劳、损伤和断裂等研究领域。中国共有51名学者参加了会议,清华大学、中科院地质所、中科院岩土所、中国矿业大学、西安交通大学、中科院金属所、北京大学等单位均派出了代表,中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、杨春和研究员等一行7人出席了大会,并在会上作了学术报告。

会议议题如下:

(1) 工程材料的疲劳特性研究;(2) 材料动荷载响应研究及数值模拟;(3) 裂隙扩张过程中的强度与变形研究及有限元分析;(4) 材料的本构模型及弹塑性理论研究;(5) 工程环境下材料的损伤与破坏研究;(6) 材料力学参数测量与实际方法研究;(7) 地质体变形监测与预测预报。

(中国科学院武汉岩土力学研究所 刘才华供稿)