场地土层的动力特征及其对地震力的影响

陈 丙 午
（国家地震局兰州地震研究所）

引 言

国内外历次大地震的震害经验都证明：[1][2][3][4]场地的局部地质条件对震害有着十分明显的影响，其中尤其以土质条件对震害的影响最为显著。在较为松软的土层上的结构其震害总是比在坚硬土层或基岩上为重，震害差异往往可达1至2度。在较高烈度区内，软弱土层有时会发生过大的残余变形、不均匀沉降、地裂缝及饱和砂土地基液化等地基失效现象，从而促使上部结构震害加重。但是震害经验证明，在许多情况下，较软的土层地基并没有发生上述失效现象，而其震害也还是要比基岩或坚硬土层上为重，这是由于土层的存在，影响到地表的地震运动，而使结构受到较大的地震力的结果。

关于土质条件对震害的影响问题，国内外都已经进行了大量的研究，并取得了不少成果，这些成果已应用于抗震设计的实践。目前大多数地震国家的抗震规范，都有了关于考虑场地土质条件的规定。近年来，世界上已取得了相当数量的有用的强震记录，这对研究强地震地面运动以及场地土质条件对地面运动的影响提供了宝贵资料。Trifunac及Brady[5] 研究了从1933年到1971年美国西部57个M＝3.7～7.7的地震时，在126个场地上取得的374条水平加速度过程的记录。经过分析得到如下结果：在沉积层地基上的加速度峰值的平均值，要比基岩地基上为小，而速度和位移的峰值的平均值则反而沉积层场地上要比基岩场地上为大。这就说明由于土层的存在，引起地表地震运动的频谱成分向长周期方向移动。Seed[6] 等人1974年研究了不同地基上地面运动频谱成分的变化，他们使用了美国、日本、土耳其M＝5～7.8级的22次地震时记录到的104条水平加速度过程。其中在第一、二、三、四类地基上的记录分别为28、31、30、及15条。其统计分析结果表示为阻尼比为5％的各类地基上的规准化平均加速度反应谱、见图1。此项研究成果已被美国1974年的统一建筑规范（UBC）所采纳，见图2。

许多国家的抗震规范，计算建筑物基底剪力的公式都可以归纳为如下形式：

$$F = Z.I.K.C.S.W$$

其中：F——设计基底剪力，W——建筑物的总重量，Z——考虑地区地震危险性的系数（基本烈度），I——考虑建筑物重要性的系数（设防烈度），K——与结构类型有关的系数，C——与结构周期有关的系数，S——考虑场地地基土质条件的系数。

美国抗震规范除了对不同地基土质条件的场地采用不同的谱曲线而外，而且还规定，在可能条件下，为了决定土质条件系数S的值，要计算场地的特征周期Ts，对具有不同特

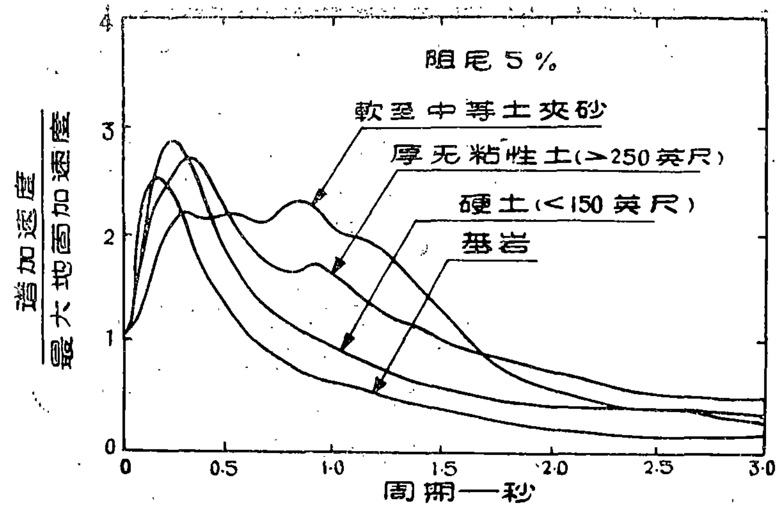


图1　不同场地上的平均加速度谱

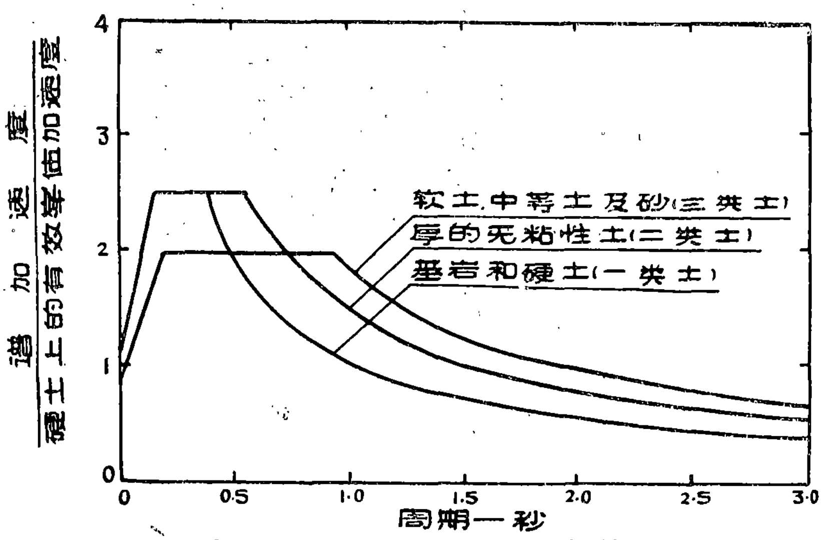


图2　用于建筑规范的谱曲线

征周期的场地上的不同自振周期的结构，采用不同的S值。这一规定，看来可能是比较合理的。

我国抗震规范TJ11—74，关于建筑物基底剪力的计算，所考虑的因素基本上与(1)式相同。我们也是采用对不同的场地上使用不同的谱曲线的方法，来考虑场地土质条件对结构所受地震力的影响。我国规范中关于场地土的分类，是采用一般性描述的方法来决定的。

在实践中，场地土质条件一般都比较复杂，往往是多层的、性质并非均匀的土层的组合，很少是单一的、性质均匀的土层。这就给工程人员造成一定的困难，同一个场地，根据不同人的不同理解，可能被划分为不同的类别。这也就是说，应当建立一个比较合理的，切合实际的，定量的场地土评价准则。

震害经验的客观事实证明：土层的刚度与厚度对结构所受的地震力都有影响，因此合理的、定量的场地土评价准则，至少必须包括土层的刚度与厚度两个参数。同时必须考虑到土层的不均匀性的影响。既然土层对地震力的影响主要是由于土层对基岩入射的地震波所产生修正放大作用所致，而这种放大作用又主要是决定于土层的动力特征。其中包括土层的自振周期、振型及阻尼等，所以土层的动力特征的某些参数有可能作为定量的对场地进行评价的指标。因此我们很有必要对各种土层动力特征的计算方法加以研究和探讨。

结合在场地小区划工作中所遇到的某些地区的场地土层的具体情况，本文在前人研究的基础上，发展了不均匀土层动力特征的理论分析方法，使之理论分析更能与实际土层的情况相符合。并对场地土层条件对地震力影响的问题进行了简短的讨论。

一、水平层状不均匀土层动力特征的计算

1.基本假定和基本方程

在分析地基土层的动力特征时，一般先假定土层是弹性体。实际上所有的土，既使是在应变较小的条件下，也都有比较明显的非线性性质，即土的剪切刚度随应变的增加而减小，阻尼则随应变的增加而增加的性质。对这种非线性，大多数研究者都是采用线性化的方法来处理，同时用某种迭代程序，来决定与实际应变水平相符合的动力特征。本文也采用线性化假定，即我们处理的是线性的或等效线性的模型。

在分析中，用图 3 所示的剪切悬臂梁来代表土层剖面。土层的质量ρ，剪切波速度V都只是深度Z的函数与X，Y无关。即我们讨论的问题是一维的。

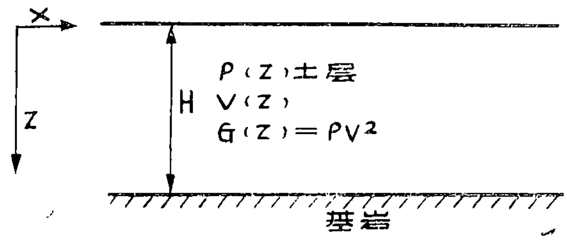


图3　刚性地基上的土层剖面

对于刚度与质量均随深度而改变的剪切梁，其自由振动基本方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial Z}\left[G(Z)\frac{\partial X(Z,t)}{\partial Z}\right]-\rho(Z)\frac{\partial^2 X(Z,t)}{\partial t^2}=0 \qquad (2)$$

考虑方程(2)如下形式的解：

$$X(Z,t)=X(Z)\mathrm{Sin}\omega t \qquad (3)$$

代入(2)式可得：

$$\frac{d}{dZ}\left[G(Z)\frac{dX(Z)}{dZ}\right]+\rho(Z)\omega^2X(Z)=0 \qquad (4)$$

其边界条件为：

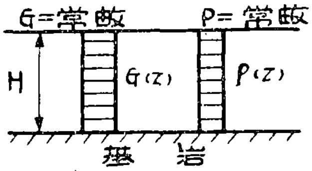
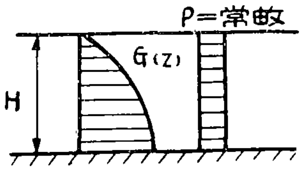
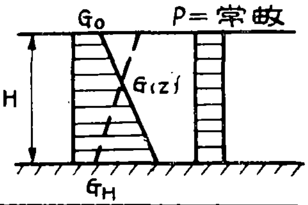
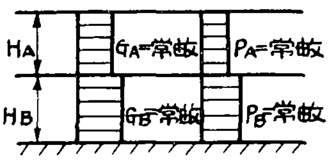
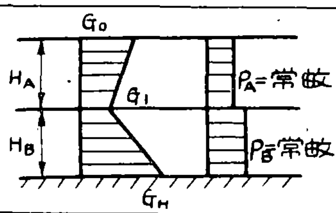
当$Z=0$时，自由表面剪应力为零，$\frac{dX}{dZ}=0$

当$Z=H$时，位移为零，$X=0$。

在双层土的情况下，应当针对每一土层都建立一个(4)式形式的方程，再考虑自由表面应力为零，基底位移为零以及两层土的介面处应力与位移的连续性条件来求解这些方程。

对这个问题，前人已研究了表1所列各种情况[7]。由表1可见：各研究者都假定每个土层的土体质量沿高度是均匀分布的，这一假定是可以接受的，因为一般的土层，其容重的差异总不是很大的，计算中可采用其平均质量。但是实测资料证明，其波速沿

表 1　地基土层理论分析简图

情况	理论分析简图	简图的主要特征	研究者.年代
1		等截面剪切悬臂梁质量及刚度均为沿高度均匀分布	
2		质量均匀分布.波速随深度增加.规律为 $V(Z)=V_0 Z^{P/2}$ 地表刚度为0。	Seed 1968 Dobry 等 1971
3		质量均匀分布.刚度沿高度按线性规律变化：$G(Z)=G_0+\frac{G_H-G_0}{H}Z$	Ambraseys 1959 Urzua 1974 (G(Z)随Z减小)
4		双层土地基.每层的质量及刚度均沿度均匀分布	Madera 1970 Chen 1971 Urzua 1974
5		双层土地基每层质量为均匀分布.刚度按线性规律变化	Urzua 1974

着高度则可能有较大的差异与变化，即各土层其物理性质随深度的变化主要表现在刚度上。本文也假定土层的质量沿高度为均匀分布。

土层在自重压力作用下，随深度增加，固结状态变好、波速变高，因此实际上的不均匀单一土层，一般都是刚度随深度而增加的。但是表1中所列的前人研究的情况2，地表刚度为零，与情况3刚度按线性规律随深度而增加，却都不能完全与实际情况相符合。至少它们不能包括实际土层的某些重要情况。

根据文献[8]对北京市区许多场地的实际勘测资料，得出了粘性土与砂类土剪切波速度与深度的关系，如图4所示。

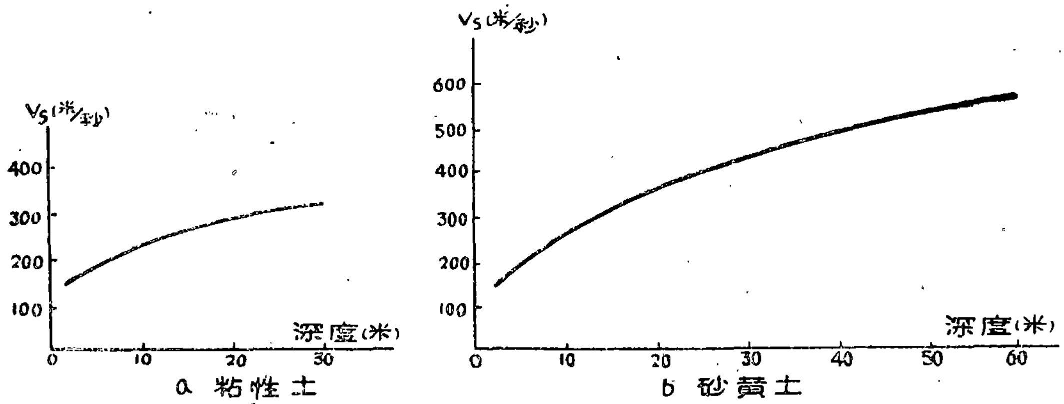


图4 土层剪切波速度与深度的关系

本文根据这种实际情况，参照文献[9]，提出如下公式来表示土层的刚度G(Z)随深度变化的规律；

$$G(Z)=G_0\left(1+\mu\frac{Z}{H}\right)^{\nu} \tag{5}$$

其中：G_0为地表处的刚度（吨／米^2），H为深度（米）。

ν及μ为无是纲参数。

G_0，μ，ν,均为常数，考虑这些参数的物理意义，它们应当是：$G_0>0$，且$\mu>0$，$\nu\geqslant 0$（其物理意义为刚度不能为负值，且刚度为随深度而增加）。适当选择这些参数的值，就可以得到与实际情况较为符合的刚度分布。ν取不同数值时，就可以得出如图5所示的刚度分布的大概情况。

$\nu=0$为等刚度情况，即表1中的情况1，这种情况下方程（4）很容易求解。它的解可表示三角函数。$\nu=1$即为表1中的情况3，它只是本文给出的结果的一个特例。与实际情况最为符合的主要是要$0<\nu<1$的情况。但是$\nu=1$，$0<\nu<1$及$\nu>1$，这几种情况在数学处理上并没有区别，所以本文一并加以分析。

2.方程的解

将（5）式代入（4），即可得到如下方程；

$$\left(1+\mu\frac{Z}{H}\right)^{\nu}\frac{d^2X}{dZ^2}+\nu\frac{\mu}{H}\left(1+\mu\frac{Z}{H}\right)^{\nu-1}\frac{dX}{dZ}+\frac{\omega^2}{v_0^{\,2}}X=0 \tag{6}$$

其中：V_0表示地表处的剪切波速度，

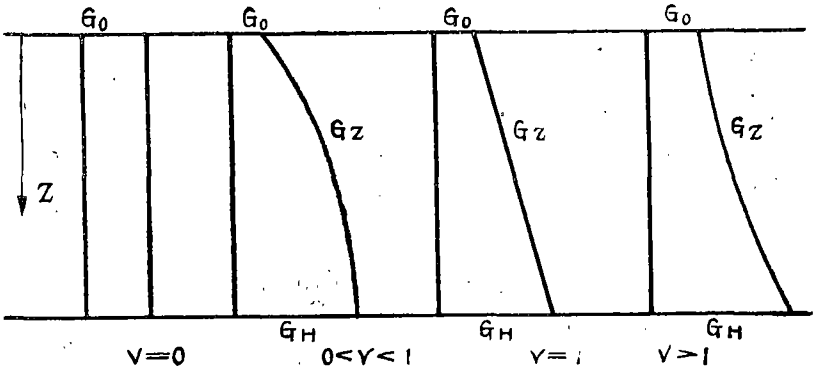


图5　V取不同数值时的刚度分布

$$V_0=\sqrt{\frac{G_0}{\rho}}$$

ρ为土层的平均质量（吨·秒²／米⁴）。

当 $0<\nu<2$ 时，引入下列变量代换；

$$u=\xi(1+\mu\frac{Z}{H})^{1-\frac{\nu}{2}} \qquad (8)$$

方程（6）即变换为：

$$\frac{d^2X}{du^2}+\frac{1}{u}\frac{\nu}{2-\nu}\frac{dX}{du}+\frac{4H^2\omega^2}{\xi^2\mu^2(2-\nu)^2V_0^2}X=0 \qquad (9)$$

再令　$\xi=\frac{2H\omega}{\mu(2-\nu)V_0}$　(10)

（9）式即变换为：

$$\frac{d^2X}{du^2}+\frac{\nu}{2-\nu}\frac{1}{u}\frac{dX}{du}+X=0 \qquad (11)$$

将函数X变换为Z，

$$Z=u^{-n}X \qquad (12)$$

$$n=\frac{1-\nu}{2-\nu} \qquad (13)$$

则(11)式即变换为n阶Bessel方程：

$$\frac{d^2Z}{du^2}+\frac{1}{u}\frac{dZ}{du}+(1-\frac{n^2}{u^2})Z=0 \qquad (14)$$

当n为整数时，(14)式的解为：

$$X=u^n[AJ_n(u)+BY_n(u)] \qquad (15)$$

当n为非整数时，(14)式之解可写为：

$$X=u^n[AJ_n(u)+BJ_{-n}(u)] \qquad (16)$$

其中：$J_n(u)$，$Y_n(u)$分别为第一类及第二类

Bessel函数。积分常数A，B应由边界条件决定。

当n为整数时，根据(15)式，

当　$Z=0$ 时，$\dfrac{dx}{dz}=0$，得：

$$AJ_{n-1}(\xi)+BY_{n-1}(\xi)=0 \tag{17}$$

当$Z=H$时，$X=0$，得：

$$AJ_n(\alpha\xi)+BY_n(\alpha\xi)=0 \tag{18}$$

其中：

$$\alpha=(1+\mu)^{1-\frac{\nu}{2}} \tag{19}$$

由式(17)、(18)令A,B的系数行列式为零，即可得频率方程：

$$\begin{vmatrix} J_{n-1}(\xi) & Y_{n-1}(\xi) \\ J_n(\alpha\xi) & Y_n(\alpha\xi) \end{vmatrix}=0 \tag{20}$$

即：

$$J_{n-1}(\xi)Y_n(\alpha\xi)-Y_{n-1}(\xi)J_n(\alpha\xi)=0 \tag{21}$$

令积分常数$A=1$，从(17)式可求得：

$$B=-\frac{J_{n-1}(\xi)}{Y_{n-1}(\xi)} \tag{22}$$

振型函数为：

$$X(Z)=u^n[J_n(u)+BY_n(u)] \tag{23}$$

当n为非整数时，则根据(16)式可得：

当$Z=0$时，$\dfrac{dX}{dZ}=0$，

$$AJ_{n-1}(\xi)-BJ_{-(n-1)}(\xi)=0 \tag{24}$$

当$Z=H$时，$X=0$，

$$AJ_n(\alpha\xi)+BJ_{-n}(\alpha\xi)=0 \tag{25}$$

由(24)及(25)式，令A,B的系数行列式为零,求得频率方程为：

$$\begin{vmatrix} J_{n-1}(\xi) & -J_{-(n-1)}(\xi) \\ J_n(\alpha\xi) & J_{-n}(\alpha\xi) \end{vmatrix}=0,$$

即：

$$J_{n-1}(\xi)J_{-n}(\alpha\xi)+J_{-(n-1)}(\xi)J_n(\alpha\xi)=0 \tag{26}$$

令积分常数$A=1$，由(25)式可得：

$$B=-\frac{J_n(\alpha\xi)}{J_{-n}(\alpha\xi)} \tag{27}$$

振型函数为：

$$X(Z)=u^n[J_n(u)+BJ_{-n}(u)] \tag{28}$$

求解频率方程(21)式或(26)式，可得其根为ξ_j，然后利用(10)式，即可求得各阶振型的频率ω_j：

$$\omega_j=\frac{(2-\nu)\mu v_0}{2H}\xi_j \tag{29}$$

将求得的ξ_j代入(23)式或(28)式即可求得各阶频率对应的各阶振型函数。当土层较薄时，可以只考虑基本振型，但当土层较厚时，必须考虑前面几个较高阶振型的影响。

3.算例

设有某一单层不均匀土层剖面，如图6所示。其平均质量密度为$\rho=0.15$吨·秒^2/米^4。

地表处剪切波速度为$V_{so}=100$米/秒，$G_0=\rho V_{so}^2=1.5\times10^3$吨/米²，土层底部处$V_{SH}=200$米/秒，$G_H=\rho V_{SH}^2=6.0\times10^3$吨/米²。

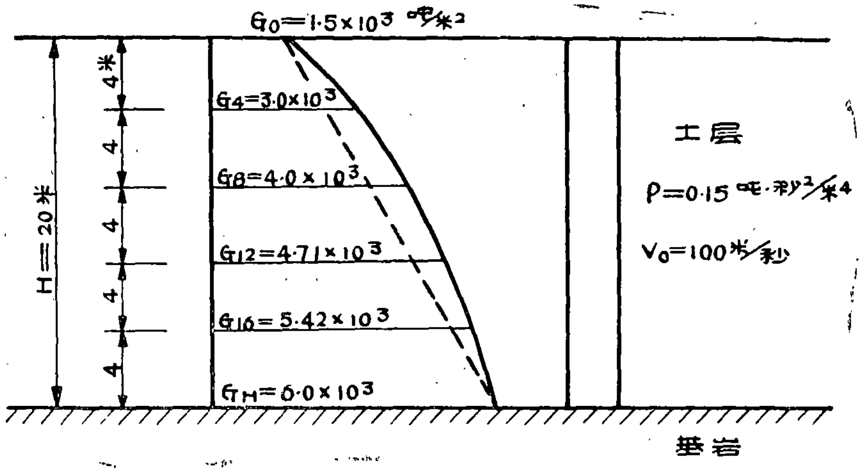


图 6　例题简图

根据土层刚度的实际分布，我们取(5)式中的参数如下：

$\nu=\frac{1}{2}$，$\mu=15$，即$G(Z)$的表达式如下：

$$G(Z)=G_0(1+\mu\frac{Z}{H})^{\nu}=1500(1+\frac{3}{4}Z)^{\frac{1}{2}},$$

$$\alpha=(1+\mu)^{1-\frac{\nu}{2}}=8,$$

$$n=\frac{1-\nu}{2-\nu}=\frac{1}{3}$$

频率方程为：

$$J_{-\frac{2}{3}}(\xi)J_{-\frac{1}{3}}(8\xi)+J_{\frac{2}{3}}(\xi)J_{\frac{1}{3}}(8\xi)=0$$

用试算法可求得上式的前三个根分别为：

$\xi_1=0.257$，$\xi_2=0.665$，$\xi_3=1.17$

根据(10)式求得前三个频率及周期为：

$\omega_1=14.5$ 1/秒，$T_1=0.433$秒；$\omega_2=37.5$，$T_2=0.167$；$\omega_3=66.1$，$T_3=0.095$。

如果按图 6 中的虚直线所描述的刚度按线性规律增加的情况来计算，其结果如下：

此时应取$\nu=1$，$\mu=3$，

即：$G(Z)=G_0(1+\mu\frac{Z}{H})=1500(1+3\frac{Z}{H})$,

$$\alpha=(1+\mu)^{1-\frac{1}{2}}=2,$$

$$n=\frac{1-\nu}{2-\nu}=0,$$

频率方程为：

$$J_1(\xi)Y_0(2\xi)-Y_1(\xi)J_0(2\xi)=0$$

求得上式的前三个根分别为：

$$\xi_1=1.79,\ \xi_2=4.62,\ \xi_3=8.02,$$

相应的前三个频率及周期分别为：

$$\omega_1=13.5\ 1/秒,\ \omega_2=34,\ \omega_3=60。$$

$$T_1=0.465秒,\ T_2=0.185,\ T_3=0.104。$$

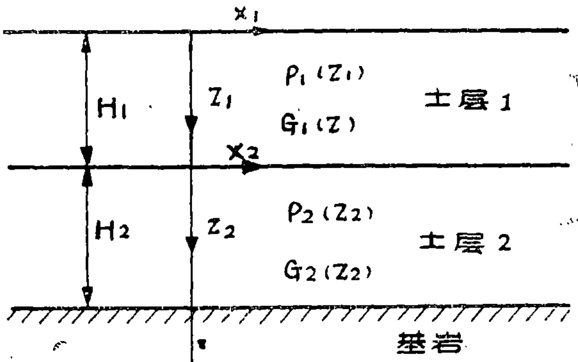


图 7　双层刚度不均匀地基

虽然图 6 中描述刚度分布的实曲线与虚直线看上去它们的差别似乎并不显著，但是按两种计算简图的计算结果，其差别还是相当大的。即如果用直线的刚度分布规律来近似描述实际上是曲线的刚度变化，那么这种近似计算误差可达10%左右。

4.双层土场地动力特征的计算

上述单层土场地的计算方法，不难推广到如图 7 所示的双层刚度不均匀场地土层的情况。

为了更为紧密的结合我们目前正开展的兰州市区场地小区划工作，考虑兰州市区某些典型场地的实际情况，本文主要分析如图 8 所示的简图。土层1（黄土层）的刚度按 $G_1(Z_1)=G_0\left(1+\mu_1\frac{Z_1}{H_1}\right)^{\nu_1}$ 的规律随深度而增加，土层2(砂卵砾石层)的刚度沿高度为均匀分布。两土层的质量则分别为不同的常数。当然也不难把这种分析方法推广到两层土的刚度均为随深度按曲线增加的情况中去。为节省篇幅本文不拟赘述。

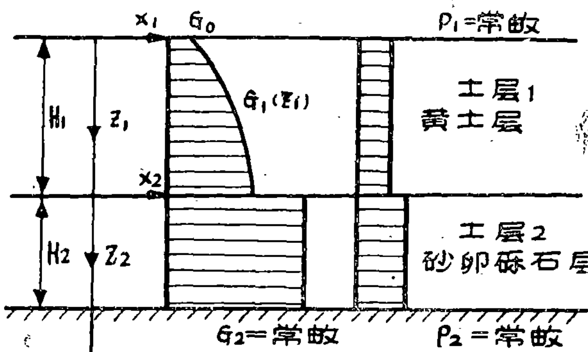


图 8　典型的双层土地基

我们取：

$$\begin{cases} G_1(Z_1)=G_0\left(1+\mu_1\dfrac{Z_1}{H_1}\right)^{\nu_1} & (30a)\\ G_2(Z_2)=G_2=常数 & (30b)\end{cases}$$

两个土层的运动方程分别为：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial Z_1}\left[G_1(Z_1)\dfrac{\partial X_1(Z_1,t)}{\partial Z_1}\right]-\rho_1\dfrac{\partial^2 X_1(Z_1,t)}{\partial t_2}=0 & (31a)\\ G_2\dfrac{\partial^2 X_2(Z_2t)}{\partial Z_2^2}-\rho_2\dfrac{\partial^2 X_2(Z_2,t)}{\partial t^2}=0 & (31b)\end{cases}$$

取方程(31)的解为：

$$\begin{cases} X_1(Z_1,t)=X_1(Z_1)\sin\omega t & (32a)\\ X_2(Z_2,t)=X_2(Z_2)\sin\omega t & (32b)\end{cases}$$

将上式代入方程(31)可得：

$$\begin{cases} \frac{d}{dZ_1}[G_1(Z_1)\frac{dX_1(Z_1)}{dZ_1}]+\rho_1\omega^2X_1=0 & (33a)\\ G_2\frac{d^2X_2(Z_2)}{dZ_2^2}+\rho_2\omega^2X_2=0 & (33b)\end{cases}$$

将(30a)代入(33a)可得：

$$(1+\mu_1\frac{Z_1}{H_1})^{\nu_1}\frac{d^2X_1}{dZ_1^2}+\nu_1\frac{\mu_1}{H_1}(1+\mu_1\frac{Z_1}{H_1})^{\nu_1-1}\frac{dX_1}{dZ_1}+\frac{\omega^2}{V_0^2}X_1=0 \tag{34}$$

其中： $V_0^2=\frac{G_0}{\rho_1}$；为地表的剪切波速度。

采取与单层土情况完全相类似的变换即，

令： $u_1=\xi_1(1+\mu_1\frac{Z_1}{H_1})^{1-\frac{\nu_1}{2}}$ (35)

$$\xi_1=\frac{2\omega H_1}{(2-\nu_1)\mu_1V_0} \tag{36}$$

$$Z_1=u_1^{-n_1'}X_1 \tag{37}$$

$$n_1=\frac{1-\nu_1}{2-\nu_1} \tag{38}$$

则可得到如下两个方程：

$$\begin{cases} \frac{d^2Z_1}{du_1^2}+\frac{1}{u_1}\frac{dZ_1}{du_1}+\left(1-\frac{n_1^2}{u_1^2}\right)Z_1=0 & (39a)\\ \frac{d_2X_2}{dZ_2^2}+\frac{\omega^2}{V_2^2}X_2=0 & (39b)\end{cases}$$

其中： $V_2^2=\frac{G_2}{\rho_2}$；为土层 2 的剪切波速度。

当 $0<\nu_1<2$ 且n_1为整数时，方程(39)的解为：

$$\begin{cases} X_1=A_1u_1^{n_1}[J_{n_1}(u_1)+B_1Y_{n_1}(u_1)] & (40a)\\ X_2=A_2[\sin\frac{\omega Z_2}{V_2}+B_2\cos\frac{\omega Z_2}{V_2}] & (40b)\end{cases}$$

积分常数A_1，B_1，A_2，B_2，由下列边界条件及连续性条件决定。

当 $Z_1=0$时， $\frac{dX_1}{dZ_1}=0$，得出：

$$B_1 = -\frac{J_{n_1-1}(\xi_1)}{Y_{n_1-1}(\xi_1)} \tag{41}$$

当 $Z_2 = H_2$时，$X_2 = 0$，得出：

$$B_2 = -tg\frac{\omega H_2}{V_2} \tag{42}$$

当$Z_1 = H_1$时，土层1底面处的位移Δ_1及剪应力τ_1分别为：

$$\Delta_1 = |X_1|_{Z_1=H_1} = A_1(\alpha_1\xi_1)^{n_1}[J_{n_1}(\alpha_1\xi_1) + B_1Y_{n_1}(\alpha_1\xi_1)] \tag{43}$$

$$\tau_1 = \left|G_0(1+\mu_1\frac{Z_1}{H_1})^{\nu_1}\frac{dX_1}{dZ_1}\right|_{Z_1=H_1}$$

$$= A_1G_0(1+\mu_1)^{\frac{\nu_1}{2}}(\alpha_1\xi_1)^{n_1}\frac{\omega}{V_1}[J_{n_1-1}(\alpha_1\xi_1) + B_1Y_{n_1-1}(\alpha_1\xi_1)] \tag{44}$$

当$Z_2 = 0$时，土层2顶面处的位移Δ_2及剪应力τ_2分别为：

$$\Delta_1 = |X_2|_{Z_2=0} = A_2B_2 \tag{45}$$

$$\tau_2 = \left|G_2\frac{dX_2}{dZ_2}\right|_{Z_2=0} = G_2A_2\frac{\omega}{V_2} \tag{46}$$

根据介面上位移及应力的连续性条件，即$\Delta_1 = \Delta_2$，$\tau_1 = \tau_2$，可得频率方程 如 下：

$$\frac{Jn_1(\alpha_1\xi_1) + B_1Yn_1(\alpha_1\xi_1)}{J_{n_1-1}(\alpha_1\xi_1) + B_1Y_{n_1-1}(\alpha_1\zeta_1)} = B_2\frac{G_0V_2}{G_2V_1}(1+\mu_1)^{\frac{\nu_1}{2}} \tag{47}$$

其中：　$\alpha_1 = (1+\mu_1)^{1-\frac{\nu_1}{2}}$

方程(47)为仅包括ω为未知数的超越方程（根 据(10)式$\xi_1 = \xi_1(\omega)$，$B_1 = B_1(\omega)$，$B_2 = B_2(\omega)$）。用试算法可求得各阶频率$\xi_j(\omega_j)$。同时 将 所 得$\xi_j(\omega_j)$代入到(40)式，即可求得振型函数：

对土层1振型曲线为：X_1/Δ_1，

对土层2振型曲线为：X_2/Δ_2。

当$0 < V_1 < 2$，且n为非整数时，方程(39)的解为：

$$\begin{cases} X_1 = A_1u_1^{n_1}[Jn_1(u_1) + B_1J_{-n_1}(u_1)] & (48a) \\ X_2 = A_2[\sin\frac{\omega Z_2}{V_2} + B_2\cos\frac{\omega Z_2}{V_2}]。 & (48b) \end{cases}$$

与上列推导过程完全类似，可求得各相应的公式为：

$$B_1 = +\frac{J_{n_1-1}(\xi_1)}{J_{-(n_1-1)}(\xi_1)}$$

$$B_2 = -tg\frac{\omega H_2}{V_2}$$

$$\Delta_1 = A_1(\alpha_1\xi_1)^{n_1}[Jn_1(\alpha_1\xi_1) + B_1J_{-n_1}(\alpha_1\xi_1)]$$

$$\tau_1 = A_1(\alpha_1\xi_1)^{n_1}G_0(1+\mu_1)^{\frac{\nu_1}{2}}\frac{\omega}{V_1}[J_{n_1-1}(\alpha_1\xi_1)$$

$$-B_1J_{-(n_1-1)}(\alpha_1\xi_1)],$$

$$\Delta_2 = A_2B_2,$$

$$\tau_2 = A_2G_2\frac{\omega}{V_2}。$$

频率方程为：

$$\frac{J_{n_1}(\alpha_1\xi_1)+B_1J_{-n_1}(\alpha_1\xi_1)}{J_{n_1-1}(\alpha_1\xi_1)-B_1J_{-(n_1-1)}(\alpha_1\xi_1)} = B_2\frac{G_0V_2}{G_2V_1}(1+\mu_1)^{\nu_1/2} \qquad (49)$$

根据方程(49)用试算法可求得其前几个根$\xi_j(\omega_j)$，同时代入方程(48)即可 求 得 与各阶频率相应的各阶振型函数。

二、场地土层条件对地震力影响

在引言中我们已经论述了场地土层条件对地震力影响的一般情况。为了定量的来分析场地土层条件对地震力的影响，可以根据具体场地的情况，选择一个在类似条件下的基岩上取得的加速度过程的记录，并根据具体条件加以适当的修正，作为土层的地震输入，求得地表的地震运动过程。再根据求得的地表地震运动计算地震反应谱。分析各种土层条件下的地面运动的反应谱的特征，即可得出关于土层对地震力影 响 的 结 论。

在求得土层的自振特性以后，进一步求土层的地震反应，是比较方便的。在线性化假定的条件下，求地震反应可采用振型分解的方法来进行。即把 土 层 的 总 地 震 反 应 $x(z, t)$按上述求得的无阻尼振型函数$X_j(z)$加以分解。求得各振型的地震反 应， 迭加之可得到总的地震反应。在求各振型的地震反应时，应考虑适当的振型阻尼比。这些过程是众所周知的，本文不拟赘述。

根据土层条件对场地进行评价，我们认为应当特别提出以下两点：

(1)土层条件对地震力的影响，不仅与土质的刚度(软硬)有关，而且与土层厚度关系十分密切。这可从客观震害的客观事实及理论分析两方面加以证实。当土层的刚度并不很低，但其厚度很大时，可能与较薄的软弱土层具有相类似的地面运动反应谱。看来我国抗震规范关于场地土的规定应当进一步完善，应当补充场地土厚度方面的考虑，并经过进一步分析研究给出定量的场地土评价(分类)的指标。

(2)土层较厚时，土层的高阶振型的影响不容忽视。大量的客观考察震 害 经 验 证实：无论是刚性建筑物，还是柔性建筑物，在软土层上其震害总比在坚硬土层上为重。至少很少发现，刚性建筑物在软土层上比基岩或硬土层上震害减轻的现象。这个事实说明，软土层或厚土层，高振型可能起着比较重要的作用。

参 考 文 献

〔1〕通海地震影响场调查组：通海地震烈度分布与场地影响。中国科学院工程力学研究所，地震工程研究报告集，第三集，1977。

〔2〕中国科学院工程力学研究所，地面运动组：海城地震震害分布与场地条件的关系，中国

科学院工程力学研究所，地震工程研究报告 1975.

〔3〕Duke,C.M: Effects of ground on destructiveness of large earthqukes, J. Soil Mech.Found.Div.ASCE vol.84 1958.

〔4〕Медведев, С.В: ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ 1962.

〔5〕Trifunac, M.D.and A.G.Brady: On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion, Bull.Seism.Soc.Am.Vol 65.1975.

〔6〕Seed, H.B.,C.Ugas,J.Lysmer: Site Dependent Spe ctra for Earthquake-Resistant Design, Reprt No EERC74—12, College of Engineering, University of California, Berkeley, California.1974.

〔7〕Dobry, R.D.,I.Oweis, and A.Urzua: Simplified procedures for estimating the fundamental period of a soil profile, Bull.Seism.Soc.Am.Vol 66.1976.

〔8〕董津城，张在明，唐海山：北京市区地质概况和土的动特性，北京地区场地土地震影 响研究报告之一 1978.

〔9〕王光远：多层建筑自由振动的计算方法，哈尔滨建筑工程学院学报，1963年.第1期.

〔10〕Seed, H.B., I.M.Idriss, and H.Dezfulian: Relationships between Soil Conditions and Building Damage in the Caracas Earthquake of July 29, 1967, Report No EERC70—2 College of Engineering University of California, Berkeley, 1970.

〔11〕Clough, R.W., J.Penzien: Dynamics of Structures, 1975.

〔12〕王光远：建筑结构的振动，科学出版社 1978.