

地震场地的综合评定方法

刘曾武

(国家地震局工程力学研究所, 哈尔滨, 150080)

文 摘 本文给出了一个考虑场地土层的刚度、覆盖土层厚度及软弱夹层、液化土层等因素对场地地震动影响的综合评定方法。该方法根据场地土层的刚度和覆盖土层的厚度, 按模糊评判方法确定场地指数 μ 值, 并建立 μ 值与设计地震反应谱的关系 $T_p=0.65-0.45\mu^{0.4}$ 。当场地指数确定时, 就可确定用于抗震设计的反应谱。对于场地土层中含有软弱夹层或液化土层的情况, 本文还给出了考虑这些影响因素, 对场地指数或设计地震动参数进行修正的方法。

关键词 场地指数, 软弱土层, 液化土层, 综合评定, 设计地震动参数。

1. 前 言

大量的震害调查和强震观测结果都表明, 场地条件对地震动特性有明显影响。如何考虑这种影响, 正确地评价场地, 是工程地震学科中的一个重要课题。由于场地条件本身很复杂, 它包含诸如土的物理力学性质、土层的构造、覆盖土的厚度、地形等许多因素, 因此正确认识这些因素在地震影响中所起的作用, 并以适当形式表示是问题的关键。

在进行地震场地评定时, 最好能根据大量强震观测资料, 选取对地震动特性有主要影响的土层物理参数作为评定指标进行评定。但是, 这种途径目前尚难实现。当前比较现实的做法是利用大量震害资料, 选取与震害相关的场地参数作为指标进行评定, 场地指数*就是这样的指标。

2. 场地指数的含义和确定方法

用场地指数评价场地时主要考虑了二个因素, 即土层的平均剪切模量 G (代表土层的刚度) 和覆盖土层的厚度 H_0 。场地土层的平均剪切模量 G 可以表示为

$$G = \frac{\sum h_i \rho_i V_{is}^2}{H} \quad (1)$$

式中 ρ_i 为第 i 层土的密度(t/m^3); V_{is} 为土层(i 层)的剪切波传播速度(m/s); h_i 为分层土的厚度(m); $H = \sum h_i$ 为场地土的影响厚度。若覆盖土层的厚度 H 大于或等于 $20m$ 时, 取 $H =$

*场地指数已被国家标准《构筑物抗震设计规范》(报批稿)和《电力设施抗震规范》(报批稿)作为场地评定指标采用。

到稿日期: 1992-06-12.

20m; 当覆盖土层的厚度 H 小于20m时, 取实际覆盖土层的厚度作为影响厚度。场地覆盖土层的厚度 H_0 。一般从真正的基岩面或坚硬土层($V_s > 500\text{m/s}$)算起。

场地指数 μ 按下式计算:

$$\mu = a_1 \mu(G) + a_2 \mu(H_0) \quad (2)$$

式中 $\mu(G)$ 和 $\mu(H_0)$ 分别为平均剪切模量 G 和覆盖土层厚度 H_0 相对于坚硬场地的隶属函数;
 a_1 , a_2 为权系数, 分别代表 G 与 H_0 在场地指数 μ 的评定中所具有的权, 系来源于经验, 在此, 我们取 $a_1=0.7$, $a_2=0.3$ 。

在计算场地的场地指数时, 是以坚硬场地(相当于建筑抗震设计规范的I类)为标准场地, 然后分别计算场地的平均剪切模量 G 和覆盖土层厚度 H_0 这二个因素对于标准场地的隶属度。

按照平均剪切模量 G 评定属于坚硬场地的隶属度 $\mu(G)$ 依下式计算:

$$\mu(G) = \begin{cases} 0 & G \leq G_0 \\ 1 - e^{-K_1(G-G_0)} & G_1 \geq G > G_0 \\ 1 & G \geq G_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中的常数值为: $K_1=6.6 \times 10^{-3}\text{MPa}$; $G_0=30\text{MPa}$; $G_1=500\text{MPa}$ 。

按照覆盖土层厚度 H_0 评定属于坚硬场地的隶属度 $\mu(H_0)$ 值依下式计算:

$$\mu(H_0) = \begin{cases} 1 & H_0 \leq h_1 \\ e^{-K_2(H_0-h_1)^2} & h_2 > H_0 > h_1 \\ 0 & H_0 \geq h_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中的常数值为: $K_2=0.5 \times 10^{-3}\text{m}^{-1}$; $h_1=5.0\text{m}$; $h_2=80\text{m}$ 。

根据式(2)计算的场地指数 μ 能反映场地在 earthquake 情况下的抗震性能, 其值在1.0~0之间变化。场地指数越接近1.0说明该场地越接近坚硬场地(相当于我国建筑抗震设计规范的I类), 其抗震性能好; 场地指数 μ 值越接近0, 说明越接近软弱场地(相当于我国建筑抗震规范的IV类), 抗震性能越差。

3. 用场地指数确定设计地震动参数的方法

对场地评定的最终结果应该给出可供建筑物抗震设计应用的设计地震反应谱, 利用场地指数可以给出随场地条件而定的连续变化的反应谱。

在我国建筑抗震设计规范里, 采用的设计地震动反应谱是以标准水平地震影响系数曲线形式表示的, 其形状如图1所示。图中 T 为结构自振周期(s); $\alpha_{\max}$ 是水平地震影响系数最大值, 它取决于地震烈度; T_v 为低频拐点周期。

如果用场地指数代替场地分类, 则可以用下式确定图1的地震影响系数曲线的低频拐点周期:

$$T_v = f(\mu) = 0.65 - 0.45\mu^{0.4} \quad (5)$$

很显然, 当 $\mu=1.0$ 时, $T_v=0.20\text{s}$, 相当于建筑抗震规范的I类坚硬场地; 当 $\mu=0$ 时, $T_v=0.65\text{s}$, 相应于建筑抗震规范的IV类软弱场地, μ 由1.0变化到0, T_v 值则在0.2s~0.65s之间取值。

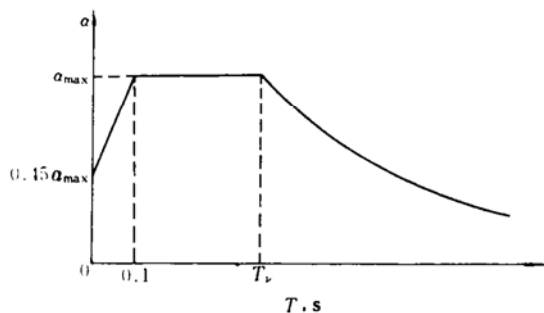


图1

4. 软弱夹层的影响

当土层中存在软弱层时, 会对场地的地震动特性产生明显的影响。软弱土层的存在可以改变地震动幅值(加速度、速度、位移)的大小, 反应谱的形状及反应谱峰值周期等地面运动参数。尽管其影响很复杂, 但是它使反应谱峰点周期往长周期移动的特性是确定的和明显的。从土层模型的地震反应分析可知, 地面加速度反应谱不仅受地震输入参数的影响, 而且还受场地土层的周期特性制约。尤其在输入地震幅值较小的情况下(一般 $a_{\max} < 0.2g$), 反应谱的峰点周期往往在很大程度上受该场地土层固有周期的控制。

根据波传播理论, 水平单层均匀场地的固有振动周期可以由下列公式计算:

$$T_0 = \frac{4H}{V_s} \quad (6)$$

式中 V_s 为场地土的平均剪切波速(m/s); H 为场地土层的厚度(m)。

但是, 对于含有软弱层的场地, 如果再作为均匀场地, 应用公式(6), 估算周期就会有较大的误差, 笔者等曾经通过场地模型的地震反应分析, 研究了软弱夹层对场地地震动周期特性的影响, 并给出了含有软弱夹层(图2)的固有周期的经验计算公式如下:

$$T_1 = \frac{4H}{V_s} + \beta^2 \frac{d}{V_s} + \frac{h}{V'_s} \quad (7)$$

式中 H 为场地土层的厚度(m); d 为软弱夹层的厚度(m); h 为软弱层中心与地表面的距离(m); V_s 为场地土的平均剪切波速(m/s); V'_s 为软弱异性土的剪切波速(m/s); $\beta = \frac{V_s}{V'_s}$ 为波速比。

对比式(6)和式(7), 当土层中含有软弱夹层时, 土层固有周期的改变为

$$\Delta T = T_1 - T_0 = \beta^2 \frac{d}{V_s} + \frac{h}{V'_s}$$

与均匀场地相比, 含有软弱层的场地周期的改变率为

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{\beta^2 \frac{d}{V_s} + \frac{h}{V'_s}}{\frac{4H}{V_s}} = \frac{\beta^2 d}{4H} + \frac{\beta h}{4H} = \frac{\beta}{4H} (\beta d + h)$$

$$\Delta T = \frac{\beta}{4H}(\beta d + h)T_0$$

因此, 含有软弱夹层的土层的固有周期 T_1 可以表示为

$$T_1 = T_0 + \Delta T = \left[1 + \frac{\beta}{4H}(\beta d + h) \right] T_0 = \eta_1 T_0 \quad (8)$$

其中 $\eta_1 = 1 + \frac{\beta}{4H}(\beta d + h) \quad (9)$

为软弱夹层的周期影响系数。

根据文献[4]的研究结果, 地震反应(加速度)谱的峰点周期与场地土层的固有周期有一定的关系(图3)。可以近似地假定, 反应谱峰点周期一般随土层固有周期成比例变化。这样, 场地土层固有周期的变化也就近似反映了反应谱低频拐点周期的变化。

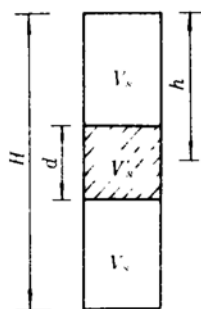


图2

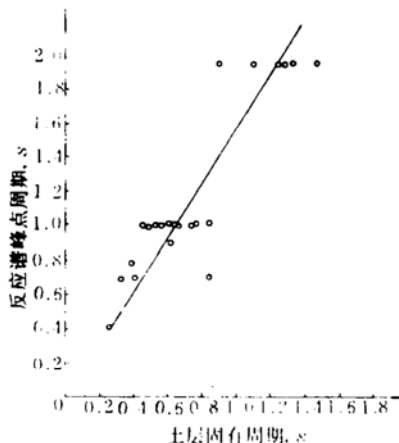


图3

因此, 含有软弱夹层场地的反应谱低频拐点周期就可以估计为

$$T \approx \eta_1 T_v \approx \eta_1 [0.65 - 0.45\mu^{0.4}] \quad (10)$$

式中 T_v 为不考虑软弱夹层影响, 由场地指数直接确定的低频拐点周期。

很显然, 当场地土层中无软弱夹层时, $\eta_1 = 1.0$ 。

5. 土层液化的影响

地震时, 土层液化形成震害的原因主要有二方面: 一是地表土层产生破坏变形导致建筑物地基破坏; 二是由于液化土层的结构突然变化, 使整个场地土层的刚度下降, 引起土层的地震动特性改变。对于前一原因, 用地基处理办法解决。对于后一原因, 则应在建筑物的抗震设计中予以考虑。文献[5]对唐山地震时宁河的轻亚粘土液化与震害关系进行了研究, 并提出考虑土层液化对场地土层平均剪切模量进行修正的经验公式如下:

$$G' = \eta_2 \cdot G = (0.45 + 0.055d_s)G \quad (d_s \leq 15\text{m}) \quad (11)$$

式中 G 为场地土层的平均剪切模量; G' 为考虑土层液化修正后的平均剪切模量; η_2 为液化影响修正系数, d_s 为液化土层的埋深。

当土层中含有可液化土层时, 首先利用式(11)对 G 进行修正, 然后再根据式(2)与式(5)确定有液化影响的场地的反应谱低频拐点周期:

$$T_v = 0.65 - 0.45\mu(G')^{0.4} = 0.65 - 0.45\mu(\eta_s G)^{0.4} \quad (12)$$

6. 结 语

考虑多种因素对场地进行综合评定是一个十分复杂的问题, 本文提出的方法是在总结震害资料和土层地震反应分析研究结果基础上得到的半经验半理论方法。由于研究问题的复杂性和受到资料的限制, 这种方法的合理性和实用性仍需进一步补充和论证, 尤其需要强震观测和实际震害资料反复验证。

参 考 文 献

1. Liu Zeng-wu, Guo Yu-xue. Selection of the Site Index and Site Assessment. *Earthquake Research in China*. 1989, 3(2): 173~186.
2. 刘曾武, 朱镜清, 陶夏新, 首培杰. 场地土层的某些参数对地面振动反应的影响. 中国科学院工程力学研究所地震工程研究报告集第四集. 北京: 科学出版社, 1981: 58~78.
3. 刘曾武, 首培杰, 李云林, 陶夏新. 场地土层的周期特性. 中国科学院工程力学研究所地震工程研究报告集第四集. 北京: 科学出版社, 1981: 79~86.
4. 刘曾武等. 软弱土层对场地震动特性的影响. 中国科学院工程力学研究所报告. 1983.
5. 刘曾武等. 唐山地震宁河烈度异常区场地影响的研究. 第二届全国地震工程会议论文集. 1987: 38~43.
6. GBJ11-89建筑抗震设计规范. 北京: 建筑出版社, 1989.

Method of Synthetic Assesment of Earthquake Site

Liu Zeng-wu

(Institute of Engineering Mechanics BBS, Harbin)

Abstract A method of synthetic assessment for earthquake site with considerations of the effects of stiffness of site soil, depth of overlying soil, soft interbedded layer and liquefaction layer is presented. Site index μ is firstly determined by synthetic assessment with fuzzy inference according to the stiffness of site soil (the average shear modulus G) and depth of overlying soil (H_0). Value of μ is defined as the basic index of measurement of the earthquake site effect. Relationship between μ and the low frequency turning period T_v , and hence the design earthquake response spectrum can be shown by the formula $T_v = 0.65 - 0.45\mu^{0.4}$. Amending method with consideration of effects of soft interbedded layer and liquefaction layer on site index and design earthquake response spectrum is also presented.

Key words site index, soft layer, Liquefaction layer, synthetical assessment, design earthquake motion parameter.