

龚凯, 苏欣, 杨笑梅. 土层分层参数不确定时对二维工程场址地震动影响分析[J]. 华南地震, 2014, 34 (4): 27-34. [GONG Kai, SU Xin, YANG Xiaomei. The Influence Analysis of the 2D Engineering Site on the Designed Ground Motion Under the Uncertain Soil Layer Parameters[J]. South china journal of seismology, 2014, 34(4): 27-34.]

土层分层参数不确定时对二维工程场址 地震动影响分析

龚凯, 苏欣, 杨笑梅

(广东工业大学土木与交通工程学院, 广州 510006)

摘要: 工程场地地震安全性评价中计算二维复杂场地地震反应分析时, 如采用一维等效线性化分析模型会带来较大的误差, 而直接采用二维的非线性模型在技术上还存在一定的困难和不合理性。目前工程中多采用对一维分析结果进行二维修正的思想给出设计地震动及反应谱。然而在建立二维分析模型时, 由于勘测条件的限制使模型建立出现很多不确定性。基于以往提出的二维复杂工程场址设计地震动的修正分析思想, 建立了几种可能且工程认可的二维复杂场地模型, 主要研究不同分层特征模型及土层剪切波速这一物理参数不确定时对设计地震动的影响, 进一步考虑不同场地类别下, 不同二维分层模型及土体物理参数对地震动的影响。根据分析结果提出了不同类别场地下, 方便且合理建立二维复杂场地地震动分析模型的方法, 为实际工程中模型的建立及参数的选取提供一些参考。

关键词: 复杂场地; 设计地震动; 等效线性化

中图分类号: P315.9; TU352.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2014) 04-0027-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.04.05

The Influence Analysis of the 2D Engineering Site on the Designed Ground Motion Under the Uncertain Soil Layer Parameters

GONG Kai, SU Xin, YANG Xiaomei

(Faculty of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou 510006, China)

Abstract: The one dimension equivalent linear layer model will bring about significant error used for the typical 2D engineering site under evaluating the safety in earthquake. It is difficult and unreasonable to considering the two-dimension nonlinear model in engineering analysis. The revised methods are often used to take account into 2D ground motion under complex site conditions. When the 2D FEM model is founded, the soil parameters are determined by the test and the shear wave velocity report of boreholes. Due to restrictions of surveying level, the computational FEM models exists a lot of uncertain factors. Based on the presented revised method for the

收稿日期: 2014-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178123); 广东省科技计划项目(2013B020200014)

作者简介: 龚凯 (1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事工程力学研究。

E-mail: 1572512807@qq.com.

engineering site under the 2D complex site conditions, several reasonable and approval models are established for 2D complex site in engineering. The influences on the design ground motion are discussed, considering the model of different hierarchical features and the physical parameters of soil shear wave velocity. Moreover, the influences on the design ground motion are discussed, considering the above factors under the different site category cases. Based on the computational results, some reasonable suggestions on establishment of 2D complex site models under different site category cases are proposed. Some significant references are provided for choosing the design parameters of ground motion in 2D engineering sites.

Keywords: Complex site; Designed seismic motion; Equivalent linear layer model

0 前言

对于重大工程场地的地震安全性评价,《工程场地地震安全性评价技术规范》^[1](GB17741-2005)规定:“I级、II级工作和地震小区划,地面,土层界面及基岩面均较平坦时,可采用一维分析模型;土层界面、基岩面或地表起伏较大时,宜采用二维或三维分析模型。”直接建立二维的非线性模型需要给出合理的土体二维本构模型,而目前的弹塑性模型及二维等效线性化模型用于工程还存在一定的技术困难。因此当土层界面、基岩面或地表起伏较大时,设计地震动的分析仍要基于一维等效线性化的模型^[2-3],这一思想也被各国规范所认可,对二维效应的影响多采用经验修正或修正方法^[4-5]。文[6]中提出了工程场址设计地震动的修正分析方法,并在多个二维复杂工程场地的地震安全性评价^[7]及地震小区划工作中得以应用。工程应用表明,相较于一维模型场地,二维分析模型的场地一般地表或介质层起伏变化较大,介质层数较多,且存在两钻孔之间介质参数及分层情况不明确的现象,这为二维模型的建立带来很多不确定因素。另外根据规范^[8]的要求,实际工程场地地震工程地质条件勘测编制的钻孔分布图及柱状图和场地岩土力学性能测定报告中,对于

不同级别的工作会规定相应深度的钻孔也存在不同,如一般较均匀的场地都会编制有10几种介质层,对于一些较复杂的场地可能会达到20几种或更多的介质层,这就进一步加大了建立二维分析模型的难度,工程应用也带来了许多不便。

鉴于上述原因,本文选取两个工程中典型的二维场地,根据工程场地土体特征,建立不同分层类型的二维计算模型,进一步通过选取工程中有代表性的土层介质参数,设定不同类别场地模型,模型均采用7度区超越概率为10%的实际地震动时程作为地震动输入,计算场地地表地震动反应。通过比较各模型地表反应谱及二维场地对一维场地幅值谱比的差异,研究土层分层特征及土层剪切波速对地震动的影响,进一步在满足工程精度的前提下,总结出建立不同类别场地设计地震动分析的合理简化模型的方法,为工程应用提供帮助和指导。

1 计算模型及参数

选择陡坎及V型谷地2个典型二维复杂场地剖面(图1)。图中分别绘出了剖面的地表标高和计算输出点zk101、zk102及zk201、zk202、zk203位置。

为了分析场地类型的影响,本文在计算如上

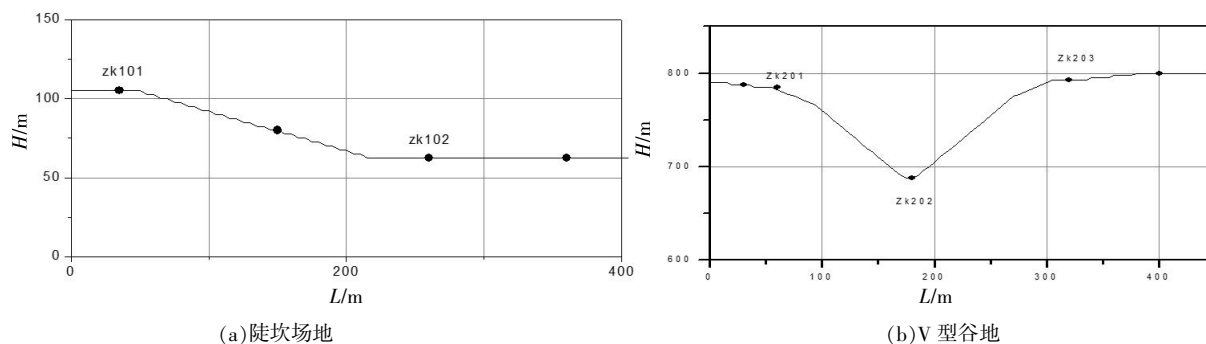


图1 典型的二维复杂场地轮廓图

Fig.1 The typical two-dimensional complex field contour map

两个剖面时，地表以下，基岩面以上覆盖层分两层，基岩深度取到剪切波速 843 m/s 处，两层覆盖层的厚度是随着两个剖面地形的变化而变化。根据工程特征，各土层再分层构造Ⅰ、Ⅱ及Ⅲ类场地，土层介质参数均取为 11 类。表 1 给出了五种计算模型的描述，图 2 以 V 型谷地为例，给出各

类分析有限元计算模型。
计算用的剪切波速(含基岩)见表 2 内。由于未考虑其它参数的影响，表中未列出其它物理参数。
取超越概率为 10%的实际地震动加速度时程作为地震输入，其加速度时程如下图 3 所示。

表 1 五类计算模型描述
Table 1 The description of the five types of calculation model

模型类型	描述
分层波速模型	根据 3 层共 11 类土层介质相应建立 11 种介质层参数的模型，如图 2(a)所示。
平均波速模型	以 3 层中各再分层的剪切波速平均值代替各分层剪切波速，如图 2(b)所示。
上层波速均匀模型	以上层再分层的剪切波速平均值代替整个模型的剪切波速，如图 2(c)所示。
中层波速均匀模型	以中层再分层的剪切波速平均值代替整个模型的剪切波速，如图 2(c)所示。
下层波速均匀模型	以下层再分层的剪切波速平均值代替整个模型的剪切波速，如图 2(c)所示。

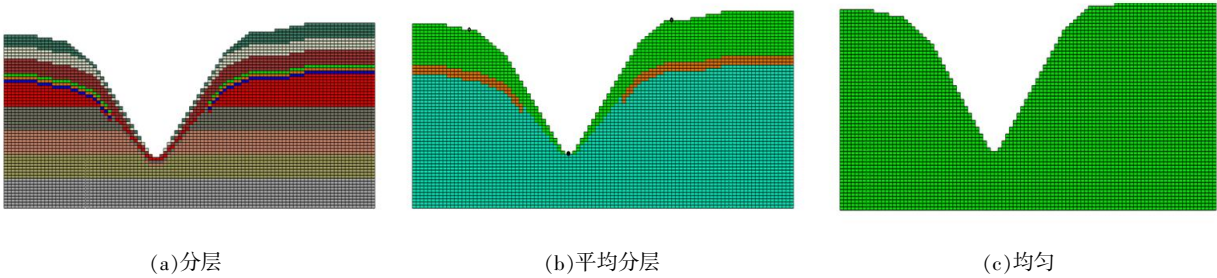


图 2 V 型谷地二维计算模型
Fig.2 Two-dimensional calculation model of V-shaped valley

表 2 Ⅰ、Ⅱ及Ⅲ类场地模型地表下剪切波速(m/s)分布
Table 2 The shear wave velocity (m/s) distribution under the surface of classⅠ、Ⅱ andⅢ site

介质编号	土类名称	Ⅰ类场地剪切波速(m/s)	Ⅱ类场地剪切波速(m/s)	Ⅲ类场地剪切波速(m/s)
1	上层	389.7	389.7	179.5
2		466.5	466.5	171.8
3		496.0	496.0	308.3
4	中层	554.0	287.4	208.3
5		620.0	332.2	206.3
6		690.0	341.3	217.4
7	下层	750.0	750.0	750.0
8		775.0	775.0	775.0
9		775.0	775.0	775.0
10		813.0	813.0	813.0
11		843.0	843.0	843.0

2 计算方法

本文采用文献[6]提出的二维修正思想，其修正过程如图 4 所示。若采用同一输入地震波加速度时程，一、二维模型同一输出点*i*处的地表地震

反应加速度时程分别为 $c_i(t)$ 和 $b_i(t)$ ，通过对其加速度时程 $b_i(t)$ 和 $c_i(t)$ 分别作富氏谱变换，可得 i 点二维反应对一维反应的富氏谱比：

$$TR_i(\omega) = \frac{TB_i(\omega)}{OC_i(\omega)}$$

(1)

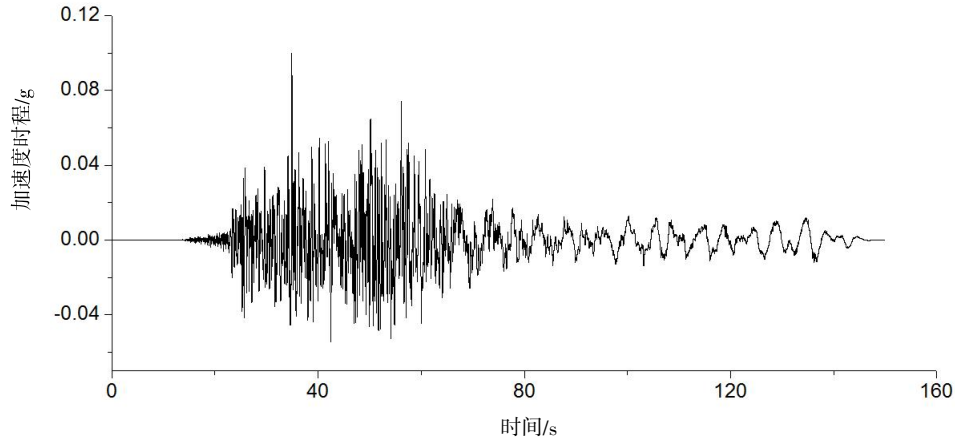


图3 输入加速度时程记录

Fig.3 The time history record input acceleration

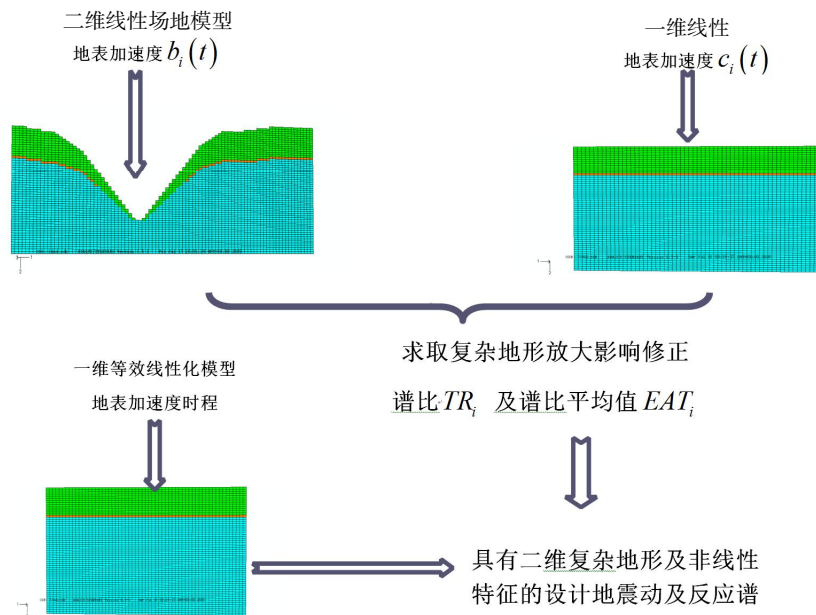


图4 二维复杂场地设计地震动修正过程

Fig.4 The modification process of two-dimensional complex field design ground motions

文中指出,当计算模型和数值计算结果能完全真实的模拟场地地震反应,可用(1)式求出的谱比,修正一维的计算结果。

然而考虑到计算用的数值模型和真实场地情况往往相差很多,复杂的地质构造有很多不确定性,很难真实模拟,且工程上采用取平均效果更能体现真实情况,所以本文对各钻孔点设计地震动时程和反应谱作修正时,还采用文中提到的一、二维计算结果幅值谱比在工程适用频段(0~12 Hz)内的取平均比值的思想作修正。即由公式(1)得到的 $TR_i(\omega)$,求它幅值谱 $AT_i(\omega)$ 在(0~12 Hz)频段内求取平均值如下:

$$EAT_i = \sum_{k=1}^N AT_i(\omega_k) / N \quad (2)$$

为适应工程问题的大计算量及高效率的需求,图中一、二维计算采用显式有限元方法。计算在时域进行。除人工边界上节点以外的内点,内域结点用下式做逐步递推^[8]:

$$u_i^{p+1} = 2u_i^p - u_i^{p-1} - \frac{\Delta t^2}{M_i} \left[k_{ij} u_j^p + c_{ij} \dot{u}_j^p \right] \quad (3)$$

式(3)中 u_i^p 、 \dot{u}_j^p 为 i 点在 $P\Delta t$ ($P=1, 2, \dots$) 时刻位移和速度向量, Δt 为时步递推的时间步距, M_i 为 i 点的集中质量, c_{ij} 为相应的阻尼矩阵。人工边界上外行波 $(p+1)\Delta t$ 时刻的节点位移向量由下式递推得到^[8]:

$$u_B^{p+1} = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N u_j^{p-j+1} \quad (4)$$

式中, $u_j^p = (-jC_a\Delta t, p\Delta t)$, C_a 为人工波速, N 为透射次数。

3 计算结果与分析

我们基于 I、II 及 III 类场地类型, 将两个剖面分别考虑 5 种不同的二维模型, 研究介质参数设定方法(如表 1)对计算结果的影响。其中, 分层波速模型是最能反映工程场地真实情况的计算模型, 为此, 我们可以认为分层波速模型的计算结果为最合理的计算结果, 并将其作为其它几种模型计算结果合理与否的标准。根据上节计算方法的描述, 通过各模型二维计算结果与相应的一维计算结果, 可得到各计算模型的各输出点在 0~12 Hz 范围内的幅值谱比, 再根据公式(2), 可求出计算输出点处二维模型对一维模型的修正系数平均值。图 5~7 分别为 3 类场地类型的两个典型剖面

的不同输出点处的幅值谱比曲线, 表 3~5 分别为其二维修正系数平均值。

从 I 类场地的幅值谱比曲线及谱比平均值可以看出, 陡坎剖面和 V 型谷地剖面的不同地表输出点, 在有的频率处, 其谱比值有明显的放大, 而有的频率处有明显的缩小, 但总体趋势在直线 1 上下摆动, 这一方面体现了场地地形对地表地震动放大与缩小的影响, 另一方面也体现了二维模型与一维模型的差异。从剖面的不同模型之间的差异可以看出, 分层波速模型和平均波速模型的幅值谱比曲线和谱比平均值都相差较小, 这在实际工程中是完全可以接受的; 而上层、中层及下层波速模型与分层波速模型的差异相较于平均波速模型偏大, 尤其是采用基岩的下层波速模型时差异有很明显的偏大, 这就为实际工程中若想采用均匀介质的更简化模型, 宜优先选用上层波速模型或中层波速模型。

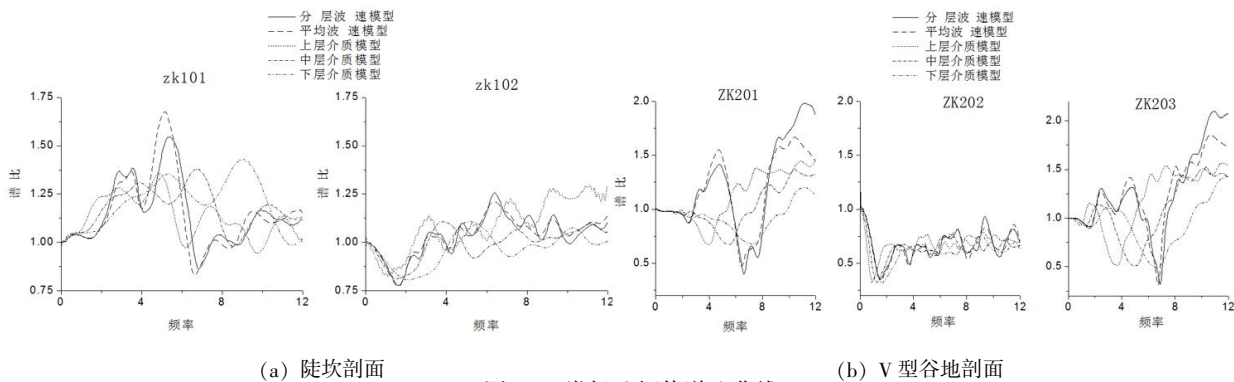


图 5 I 类场地幅值谱比曲线
Fig.5 The amplitude spectrum ratio curve of class I site

表3 I 类场地谱比平均值
Table 3 The spectral ratio average value of class I site

介质编号	陡坎剖面		V 型谷地剖面		
	zk101	zk102	zk201	zk202	zk203
分层波速模型	1.144 006	1.032 453	1.206 869	0.665 236 9	1.269 262
平均波速模型	1.147 824	1.035 562	1.168 744	0.664 290 9	1.254 148
上层波速模型	1.129 891	1.087 925	1.129 772	0.670 243 0	1.190 077
中层波速模型	1.173 976	0.993 046 8	1.025 737	0.643 833 5	1.077 243
下层波速模型	1.199 231	0.967 952 0	0.928 813	0.630 583 5	0.944 859

从 II 类场地的幅值谱比曲线及谱比平均值也可以看出, 场地地形对地表地震动放大与缩小的影响及二维模型与一维模型的差异。从表 2 可以看出, 此 II 类场地模型采用的是含有中间软夹层。但从剖面的不同模型之间的差异可以看出, 分层波速模型和平均波速模型的幅值谱比曲线和谱比平均值仍然相差较小, 不会因为中间层的软夹层而受到影响,

在实际工程中, 为简化模型, 完全可以以平均波速模型代替分层波速模型, 而上层、中层及下层波速模型与分层波速模型的差异同样相较于平均波速模型偏大, 尤其是采用基岩的下层波速模型时差异有很明显的偏大, 实际工程中应尽量选用平均波速模型来简化场地模型, 或选用上层、中层及下层这种均匀波速模型, 不要采用基岩参数的下层波速模型。

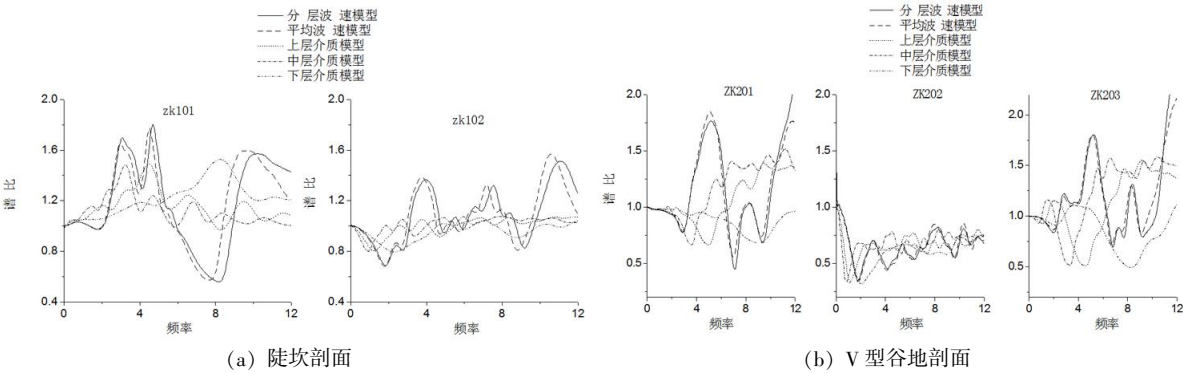


图 6 II类场地幅值谱比曲线
Fig.6 The amplitude spectrum ratio curve of class II site

表 4 II类场地谱比平均值

Table 4 The spectral ratio average value of class II site

介质编号	陡坎剖面		V 型谷地剖面		
	zk101	zk102	zk201	zk202	zk203
分层波速模型	1.182 862	1.086 417	1.153 489	0.649 483 3	1.198 958
平均波速模型	1.189 445	1.084 131	1.155 974	0.648 557 4	1.197 129
上层波速模型	1.152 089	0.996 663 3	1.062 974	0.657 504 5	1.116 729
中层波速模型	1.116 207	1.011 375	1.166 415	0.681 500 9	1.230 910
下层波速模型	1.217 420	0.950 047 1	0.880 261 5	0.627 607 3	0.862 435

同 I、II 类场地模型，从 III 类场地的幅值谱比曲线及谱比平均值同样可以看出，场地地形对地表地震动放大与缩小的影响及二维模型与一维模型的差异。III 类场地与 I、II 类场地模型也存在一些差别，由于 III 类场地是由更软的覆盖层构成，其对地表地震动的放大和缩小更显著；而

从剖面的不同模型之间的差异可以看出，采用平均波速模型仍能较好的与分层波速模型吻合，而若采用上层、中层及下层这种均匀波速模型时，从幅值谱曲线可以看出，其差别已超过了实际允许值，所以，对于 III 类场地而言，应采用均匀波速模型来简化场地模型。

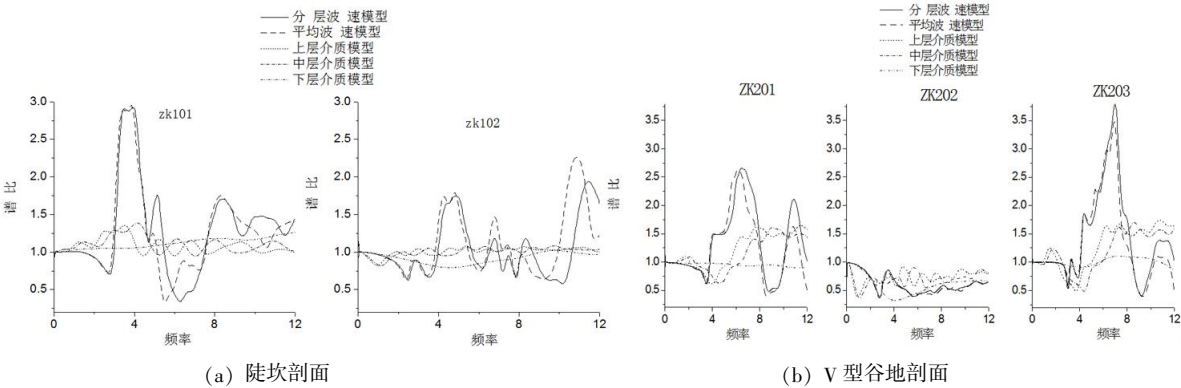


图 7 III类场地幅值谱比曲线
Fig.7 The amplitude spectrum ratio curve of class III site

表 5 III类场地谱比平均值

Table 5 The spectral ratio average value of class III site

介质编号	陡坎剖面		V 型谷地剖面		
	zk101	zk102	zk201	zk202	zk203
分层波速模型	1.283 393	1.035 393	1.346 251	0.615 993 2	1.433 337
平均波速模型	1.266 340	1.107 370	1.245 910	0.602 194 0	1.336 165
上层波速模型	1.084 849	1.008 183	1.214 941	0.722 479 6	1.268 327
中层波速模型	1.104 718	1.003 443	1.147 218	0.702 404 7	1.191 833
下层波速模型	1.114 934	0.915 827 2	0.950 289 3	0.600 769 8	1.003 676

基于三类场地的两个剖面的幅值谱比,依据3节所述方法来修正三条超越概率10%的实际地震

时程,对修正后的时程分别求反应谱。图8~10分别为三类场地的修正后反应谱。

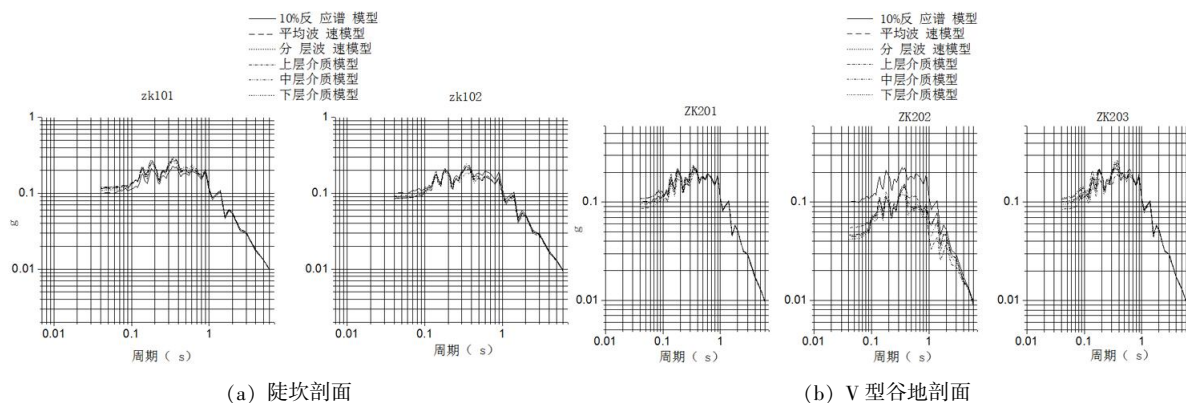


图8 I类场地修正后反应谱

Fig.8 The revised response spectrum of class I site

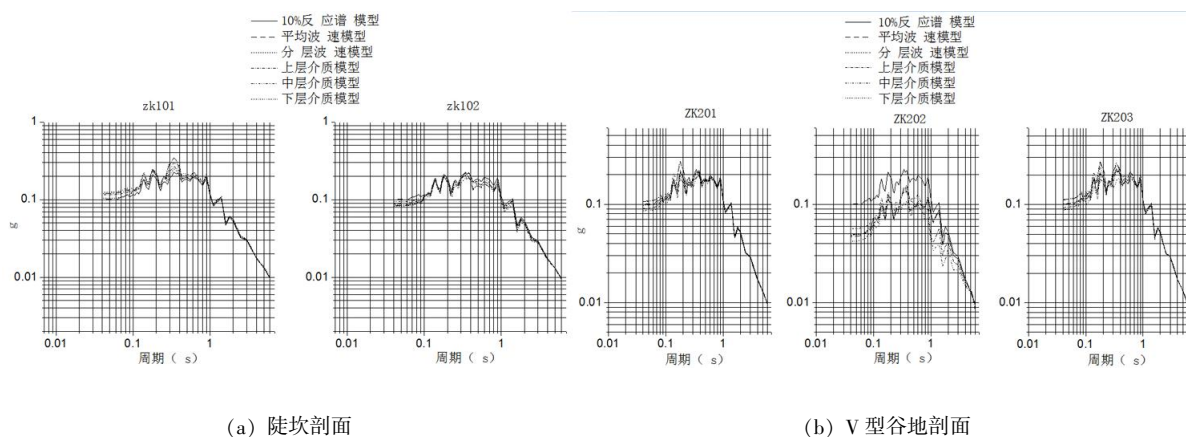


图9 II类场地修正后反应谱

Fig.9 The revised response spectrum of class II site

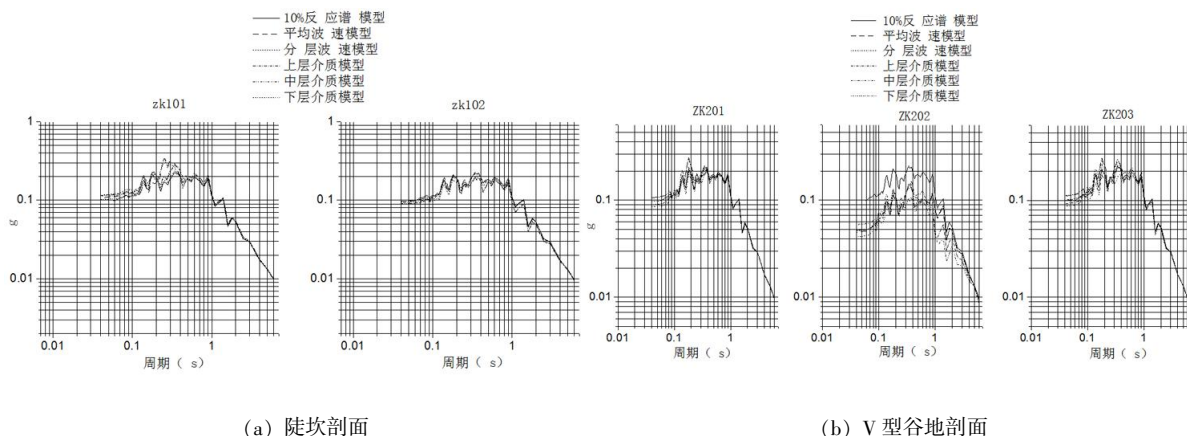


图10 III类场地修正后反应谱

Fig. 10 The revised response spectrum of class III site

从反应谱特征来看: V型谷地剖面的 zk202 点有明显的缩小,而陡坎剖面的 zk101 和 zk102 及 V型谷地剖面的 zk201 和 zk203 点总体来说有一定的放大。从工程安全出发,对于修正后反应谱有缩小的点,我们建议不修正,而只修正反应谱有放

大的点。从3种场地类型修正后反应谱之间的差别也可以看出,III类场地的放大作用或缩小作用都较I、II类场地大,而且III类场地不同模型之间的反应谱有较大的差别。I类及II类场地各模型之间差别较小,特别是平均波速模型与分层波

速模型能很好的重合,这也反映了采用不同简化模型方法后得到不同精确度的结果。

4 结论

本文基于二维复杂工程场址设计地震动的修正分析方法,以两个实际工程场地剖面为研究对象,分别讨论了三类场地类型,对比分析上述方案模型的加速度幅值谱比曲线及修正后的反应谱曲线可得出如下结论:

(1) 实际工程中,以各层土类分别求各参数的平均值来代替实际的各层土类中的多层不同参数是可行的,这样处理得到的结果与实际的多层土类介质得到的结果相差无几,完全可以满足工程设计的精度要求,但却能很大程度上的减少实际操作中的建模及计算时间,大大提高工作效率。

(2) 为进一步简化模型而采用均匀波速模型时,对于Ⅰ、Ⅱ类场地,应尽量选用上层波速模型或中层波速模型,而不要选用基岩的下层波速模型,而对于Ⅲ类场地模型,三种均匀波速模型都有较大的差别,实际工程应不要采用均匀波速模型。

(3) 结论(1)和(2)对于含有软夹层的特殊场地也是同样适用的。

(4) 场地地形对地表地震动有显著的影响,从幅值谱曲线可以看出,不同地形的不同位置输出点会有不同大小的放大和缩小作用,而且对于不同的场地,场地土覆盖层越软,其放大和缩小作用越显著。

参考文献:

- [1] 中国地震局. GB17741-2005 工程场地地震安全性评价技术规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.
- [2] 廖振鹏, 李小军. 地表土层地震反应的等效线性化解法[M]//地震小区划理论与实践. 北京:地震出版社. 1989, 989.
- [3] 金星, 孔戈, 丁海平. 水平成层场地地震反应非线性分析[J]. 地震工程与工程振动. 2004, 24 (3): 38-43.
- [4] 杨柏坡, 杨笑梅. 二维不均匀场地地震地面运动的估算[J]. 华南地震. 1996, 16 (02): 1-9.
- [5] 杨柏坡, 陈庆彬, 袁一凡. 地震小区划中复杂场地影响的修正方法[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11 (4): 19-27.
- [6] 杨笑梅, 周克森, 郭钦华. 广东省阳江抽水蓄能电站二维工程场址对设计地震动的影响分析[J]. 华南地震, 2007, 27 (01): 45-50.
- [7] 廖振鹏. 工程波动理论导引[M]. 北京:科学出版社, 1996.