

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202001026

SV波入射下斜坡地形对上覆土层地震动放大的影响研究*

刘启方¹, 李家祥², 温瑞智²

(1. 苏州科技大学, 江苏省结构工程重点实验室, 江苏 苏州 215009;
2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对上覆土层斜坡场, 利用显式有限元方法, 定量分析SV波入射下地震动的放大与斜坡角度、覆盖层的厚度以及覆盖层与下卧基岩阻抗比的关系。研究表明, 当斜坡角度大于 60° 、覆盖土层厚度大于 $1/4$ 斜坡高度时, 在离坡顶点两倍斜坡高度以内, 存在一个较一维土层明显的放大区域。在这一区域内, 放大倍数最大值位于坡顶点, 放大倍数随斜坡角度和土层厚度的增加而增大, 随到坡顶点距离的增大和土层与基岩阻抗比的增大而减少。当土层与基岩阻抗比较低时, 最大放大倍数可达一维土层的2.3倍。在这一区域内, 斜坡地形土层基本频率约为一维土层的0.8~0.95倍。当斜坡角度 $<45^\circ$ 或覆盖层厚度小于斜坡高度的 $1/4$ 时, 斜坡对一维土层放大的影响显著下降。还利用最小二乘法和数值模拟结果拟合了显著放大区域的放大倍数与斜坡角度、覆盖层的厚度以及阻抗比的简单估计关系式。结果可为上覆土层的斜坡场地地震动参数的选择提供一定的参考。

关键词: 土层; 斜坡地形; 基本频率; 放大倍数; 放大区域

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0092-08

Study on the Effect of Ground Motion Amplification of Slope Topography to Overlying Soil Layer under Incident SV Waves

LIU Qifang¹, LI Jiexiang², WEN Ruizhi²

(1. Suzhou University of Science and Technology, Key Laboratory of Structure Engineering of Jiangsu Province, Suzhou 215009, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: The relationships between the amplification of ground motion and the slope angle, the thickness of soil layer and the impedance ratio between soil and bedrock under inclined SV waves for a slope topography site are analyzed in this paper by the explicit finite element method. The study shows that when the slope angle was larger than 60° , and the soil depth larger than one-quarter of the slope height, within twice the height of the slope from the slope crest, there exists an obvious amplification area compared with the one-dimensional soil layer. In this region, the amplification factor increases with the increase in slope angle and soil layer thickness, but decreases with the increase in distance to the crest of the slope and the increase in impedance ratio between soil layer and bedrock. In this region, the basic frequency of topographical slope soil is between 0.8 and 0.95 times that of one-dimen-

* 收稿日期:2020-01-15;修回日期:2020-05-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51978434)资助

作者简介:刘启方(1969—),男,研究员,博导,博士。主要从事地震工程方面的研究。E-mail: Qifang_liu@126.com

sional soil. When the slope angle was smaller than 45° , or the soil depth was smaller than one-quarter of the slope height, the effect of the slope topography on soil amplification decreased significantly. At the same time, an estimated relation between amplification factor and slope angle, thickness of soil layer and impedance ratio in this area is fitted by the least square method using the numerical simulation results. The results of this paper can provide some references for the selection of ground motion parameters of the slope topography with the overlying soil layer.

Keywords: soil layer; slope topographic; basic frequency; amplification factor; amplification area

引言

局部场地效应对地震动的影响是地震工程研究中的热点问题。大量观测记录表明地形对地震波有着非常显著的放大作用。如:1971年圣费尔南多地震^[1]、1985年智利地震^[2]、1994年北岭地震^[3]、2008年汶川地震中的自贡地形台阵^[4-5]、芦山地震宝兴县防震减灾局的强震台^[6]。基于观测记录分析和数值模拟方法,国内外学者们针对地形对地震动的影响开展了大量的研究^[7-12],L. Geli等^[13]和P. Y. Bard^[14]对其做了系统的综述。总体而言,定性模拟结果和观测结果较为一致,但定量上大多数观测记录中的地形放大效应大于模拟结果。

斜坡是一种常见地形,相关研究表明,斜坡的地质条件与地形地貌均对其动力响应有着显著的影响,其中地质条件更是起着明显的控制作用。D.M. Boore等^[15]基于有限差分法分析了P波和SV波作用下均匀弹性半空间上的陡坡对地震波的散射作用,研究表明次生Rayleigh面波的振幅约为入射波的0.4倍;S.A. Ashford等^[16]利用广义一致边界法对SH和SV波入射下均匀弹性半空间内斜坡顶部的放大作用进行了研究,发现与自由地表相比,当入射地震波长约为斜坡高度的5倍时,坡顶点对地震波的放大效应最显著,但放大倍数小于2倍。丁海平等^[17]研究了P波斜入射陡坎地形对地面运动的影响;D. Assimaki等^[18]在对1999年Athens地震中某谷地地形的地震动放大研究中,考虑了包含土层的斜坡地形效应,分析了土层对斜坡地形地面峰值加速度的影响。

对于包含土层的斜坡地形,工程抗震更关心由于斜坡的存在,其地震动与一维土层的差异。具体而言,较一维土层斜坡地形引起的地震动放大区域、放大倍数,土层自振周期等的改变,目前这方面缺乏定量研究。

本文针对上覆土层斜坡场地的地震动放大效应展开研究,利用显式有限元方法定量分析SV波垂直入射下,上覆土层斜坡地形的地震动放大区域、放大倍数及最大放大倍数对应的基本频率与斜坡角度、覆盖层的厚度以及覆盖层与下卧基岩的阻抗比的关系。通过比较其与一维土层的差异,探索覆盖土层与斜坡地形共同作用下的地震动放大规律,为工程抗震中建筑选址和地震动参数的选择提供一定的参考依据。

1 分析方法

1.1 计算模型

本文利用显式有限元计算SV波垂直入射下二维上覆土层斜坡场地的地震动响应^[18]。计算模型如图1所示。图中, α 为斜坡角度, H 为斜坡高度, h 为土层厚度, L 为观测点与坡顶点(Crest)之间的距离。当 $h=0$ 时,模型将退化为基岩斜坡。为了研究不同斜坡角度和不同土层厚度对地震动放大的影响,设置斜坡角度分别为 20° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° ,土层厚度分别为 0 、 $H/4$ 、 $H/2$ 、 $3H/4$ 和 H ,具体模型材料参数见表1。为了分析阻抗比的影响,表1中给出了两种不同的土层参数,阻抗比定义为土层介质的波阻抗与基岩介质波阻抗之比。

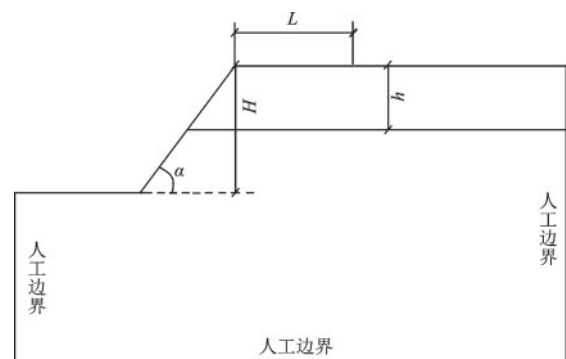


图1 计算模型

Fig.1 Computational model

表1 模型参数
Table 1 Model parameters

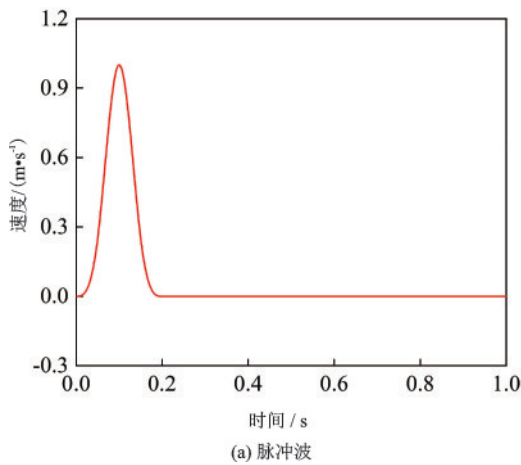
介质	密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	剪切波速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	阻尼比	阻抗比
土层	1 840	0.33	300	0.017	0.28
	1 840	0.30	500	0.015	0.46
基岩	2 000	0.25	1 000	0.050	

1.2 数值模拟方法

计算区域分为内域和人工边界区域,如图1所示。模型的左右两边及底边为人工边界,斜坡及水平地表为自由表面,人工边界和自由地表包围的区域为内域。内域中的有限元节点为内节点,内节点的运动方程为^[19]:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P \quad (1)$$

式中, M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; u 为位移矢量; P 为外力矢量。对于本文计算模型, $P=0$ 。采用中心差分和平均近似相结合的格式^[18](公式(2)、(3)),递推内节点任意时刻的位移和速度。



$$u^{p+1} = \left(I - \frac{\Delta t^2 M^{-1} K}{2}\right) u^p + \left(I - \frac{\Delta t M^{-1} C}{2}\right) \Delta t \dot{u}^p \quad (2)$$

$$\dot{u}^{p+1} = \frac{2}{\Delta t} (u^{p+1} - u^p) - \dot{u}^p \quad (3)$$

对于人工边界点,采用多次透射公式:

$$u_0^{p+1} = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N u_j^{p+1-j} \quad (4)$$

$$C_j^N = \frac{N!}{j!(N-j)!} \quad (5)$$

式中, N 为透射阶数; 0 为人工边界点; j 为与节点 0 相邻的内节点。本文采用具有2阶精度的2次透射公式。需要注意的是,多次透射公式仅透射外行散射波场,散射波场等于全波场减去入射波场。

基于显式有限元和透射边界的数值模拟方法在复杂地形、盆地等介质的地震波模拟中得到广泛应用,文献[18]详细分析了该方法的可靠性。针对本文计算模型,我们取单元尺寸 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,时间步长为 $0.000\ 2\text{ s}$,根据计算精度的要求(有效计算的最短波长至少包含 $10 \sim 12$ 个单元),本文单元大小可以计算至 15 Hz 。

本文采用峰值为 1 m/s 、宽度为 0.2 s 的脉冲函数作为输入地震波,输入脉冲及傅里叶谱如图2所示。

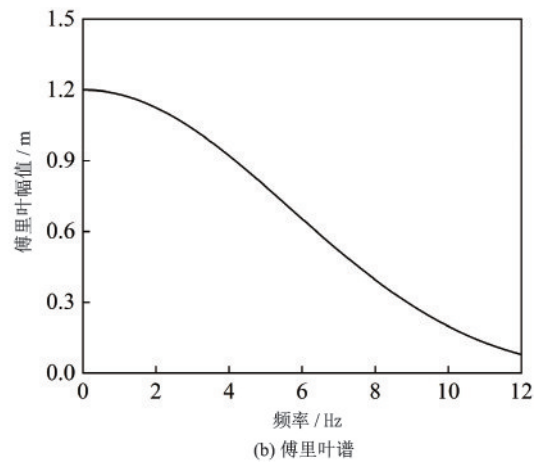


图2 输入脉冲波及其傅里叶谱

Fig.2 Incident pulse wave and its Fourier spectra

1.3 均质基岩斜坡地形的计算结果

首先取土层厚度为 0 ,模型退化为基岩斜坡。S.A.Ashford 等^[16]研究了这种均匀介质基岩斜坡地形的放大效应。图3为本文计算的SV波垂直入射下斜坡角度为 90° 时,坡顶点(Crest)和距离顶点 $1H$ 、 $2H$ 以及 $4H$ 的水平分量的传递函数与入射波长

的关系。对比 S.A.Ashford 等^[16]的结果,二者基本一致。如图3所示,在斜坡的顶点处,当 $H/\lambda=0.1 \sim 0.3$ 时,较均匀半空间有明显放大($1.4 \sim 1.8$ 倍),放大倍数最大值约在 $H/\lambda=0.2$,即 $\lambda=5H$ 处。这表明,当入射波的波长约等于斜坡高度的 $3.3 \sim 10$ 倍时,均质斜坡的地震响应将被明显放大,但放大倍数小于 2 。

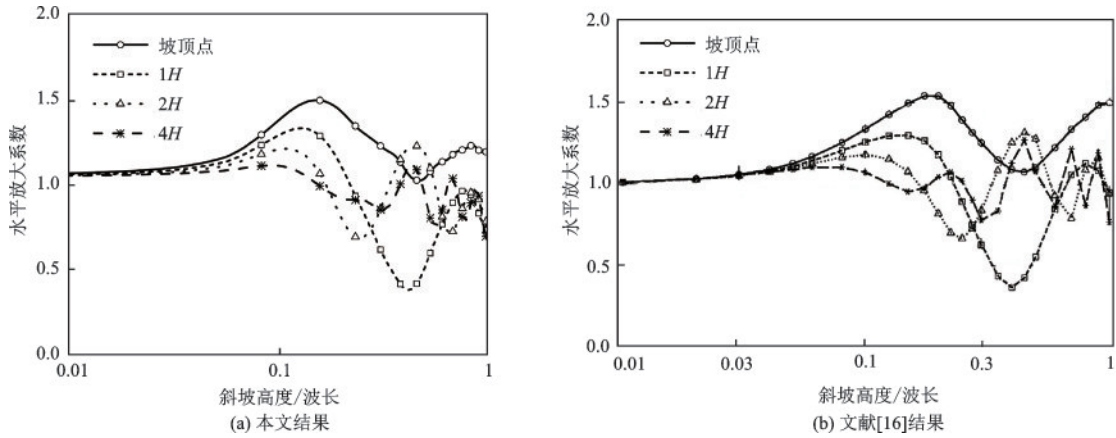


图3 斜坡角度90°下坡顶点和距离顶点1H、2H、4H点水平分量的放大倍数

Fig.3 Horizontal amplification of observation sites at the crest and with distance to the crest of 1H, 2H and 4H

2 结果分析与讨论

2.1 时程分析

图4给出土层波速为300 m/s时,地表点(包含

斜坡观测点)的水平分量时程。水平分量中可以看到一维土层引起的多次反射,以及沿着水平方向传播的次生Rayleigh面波。垂直分量则完全是斜坡产生的Rayleigh面波(一维土层在SV波垂直入射下,垂直分量为零)。斜坡产生的次生面波是造成斜坡场地与一维土层地震动差异的根本原因。

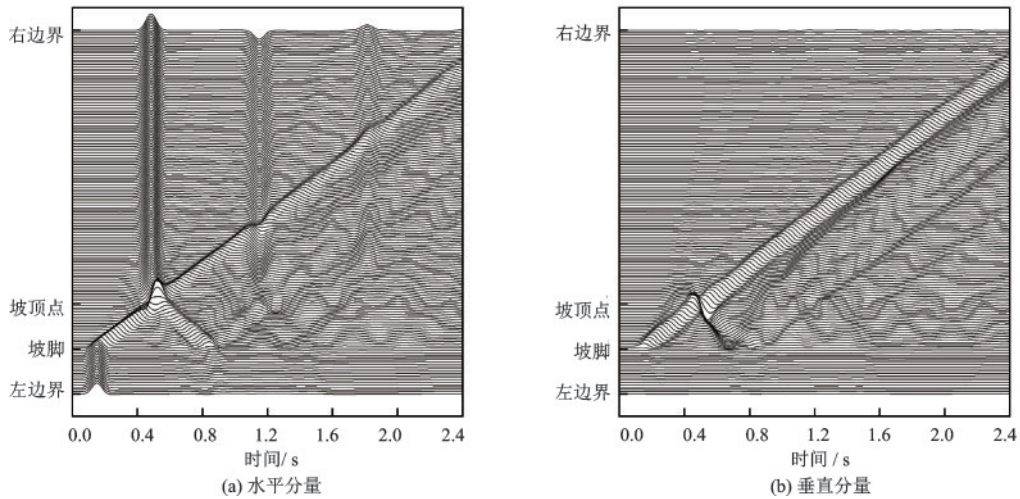


图4 脉冲波输入下地表各点的时程图

Fig.4 Time history of sites on ground surface under incident pulse wave

2.2 斜坡土层的传递函数

首先计算二维斜坡土层、均匀一维土层以及基岩半空间模型(参数见表1中基岩部分)中地表观测点的时程。再将时域转化为频域,计算两种土层模型下地表地震动与基岩半空间地震动的傅里叶谱比,所得谱比曲线即为传递函数。利用传递函数分析上覆土层斜坡地形与一维土层放大的差异。对于地表不同观测点,定义传递函数中第一个峰值对

应的频率为斜坡土层在该观测点的基本频率 f_{2d} ,该频率对应的值为该观测点的放大倍数 A_{2d} 。

图5分别给出了20°缓坡和90°陡坡在不同覆盖层厚度下,坡顶点和距离坡顶点H、2H、4H处各观测点的传递函数,同时给出一维土层的传递函数。一维土层的基阶自振频率 $f_1=V_s/4h$, V_s 为土层波速, h 为土层厚度,基阶频率对应的传递函数值为土层相对于基岩的场地放大倍数。

由图5可见,无论缓坡与陡坡,由于地形的存

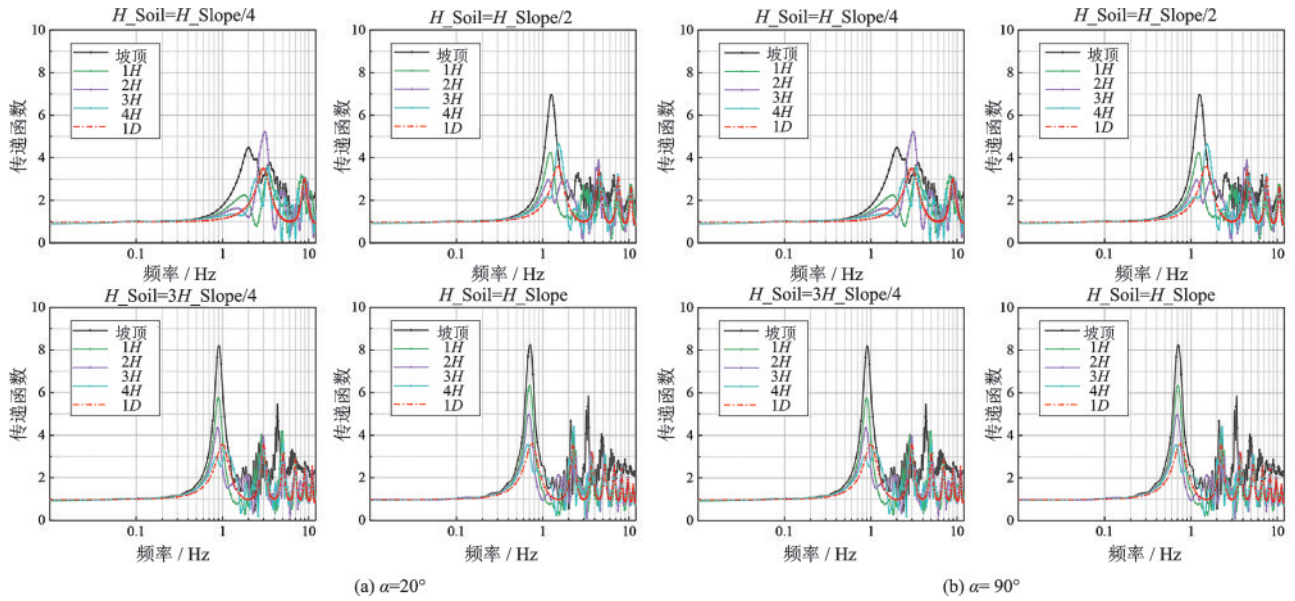


图5 20°和90°斜坡在不同覆盖层厚度为 $H/4$ 、 $H/2$ 、 $3H/4$ 和 H ，坡顶点及距离坡顶点 H 、 $2H$ 、 $4H$ 的观测点相对于基岩半空间的传递函数

Fig. 5 Transfer functions of observation site at the crest and with distance to the slope crest of H , $2H$ and $4H$ for models of slope angle 20° and 90° with the soil depth of $H/4$, $H/2$, $3H/4$ and H

在，在一维土层基阶频率附近，斜坡地形对地震动均产生放大作用，且陡坡引起的放大现象明显大于缓坡。地形对地震动的影响主要表现为：(1)改变了一维土层的基本频率；(2)放大倍数较一维土层显著增加；(3)地形引起的放大效应主要集中于距离坡顶点一定范围内，当 $L > 4H$ 时，二维地形与一维土层的放大效应相差无几。陡坡的放大效应在坡顶点处($L=0$)最为明显，该点在一维土层基阶固有频率附近的传递函数明显大于一维土层。

由于一维土层自振频率对工程抗震有重要影响，因此，本文集中于研究在一维土层基阶频率附近($V_s/4h$)地形对一维土层反应的影响。

2.3 斜坡对一维土层基本频率的影响

图6给出了两种阻抗比下，土层厚度分别为 $1/4H$ 、 $1/2H$ 、 $3/4H$ 和 H ，斜坡角度分别为 20° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 时，斜坡顶点和距离顶点 $0.3H$ 、 $0.5H$ 、 $1H$ 、 $2H$ 及 $4H$ 处的斜坡土层基本频率与一维土层基本频率的比值 f_{2d}/f_{1d} 。该比值反应了地形的存在对场地基本频率的改变程度。

首先分析土层与基岩阻抗比较低(低波速土层)的情形(图6(a))。此时，在距离坡顶点 $2H$ 范围内，当斜坡角度等于 60° 时，各观测点基本频率与一维土层相差不大。当斜坡角度 $>60^\circ$ 时，各观测点基

本频率基本都小于一维土层，且随着坡角度的增加，基本频率呈下降趋势。随着离坡顶点距离增大，基本频率呈下降趋势。随着土层厚度的减少，基本频率也呈下降趋势。如土层厚度为 H 时， 90° 斜坡坡顶点处的基本频率为一维土层的 0.95 倍，土层厚度 $H/4$ 时，下降到 0.66 倍。当斜坡角度 $<60^\circ$ 时，不同观测点的基本频率略大于一维土层，但差别不大。

当离坡顶点距离 $>2H$ 后，斜坡土层基本频率的规律性不明显，特别是对于土层厚度 $H/4$ 的情形。但后文关于放大倍数的分析表明，在离坡顶点 $>2H$ 后，放大倍数较小，因此本文主要关注离坡顶点小于 $2H$ 范围的基本频率变化规律。

当阻抗比增加到 0.46 时(图6(b))，斜坡地形土层基本频率的变化趋势与低阻抗比一致，但同样的土层厚度下，不同斜坡角度的差别略有增加。

2.4 斜坡对一维土层放大倍数的影响

图7给出了与图6相同模型下，斜坡土层在基本频率处的放大倍数(A_{2d})与相应的一维土层基本频率的放大倍数(A_{1d})之比 A_{2d}/A_{1d} 。

图中可见，土层厚度 $>H/2$ 、斜坡角度 $>60^\circ$ 时，较一维土层有明显放大，且规律性较强。主要表现为：(1)放大的区域主要位于距离坡顶点 $2H$ 内。

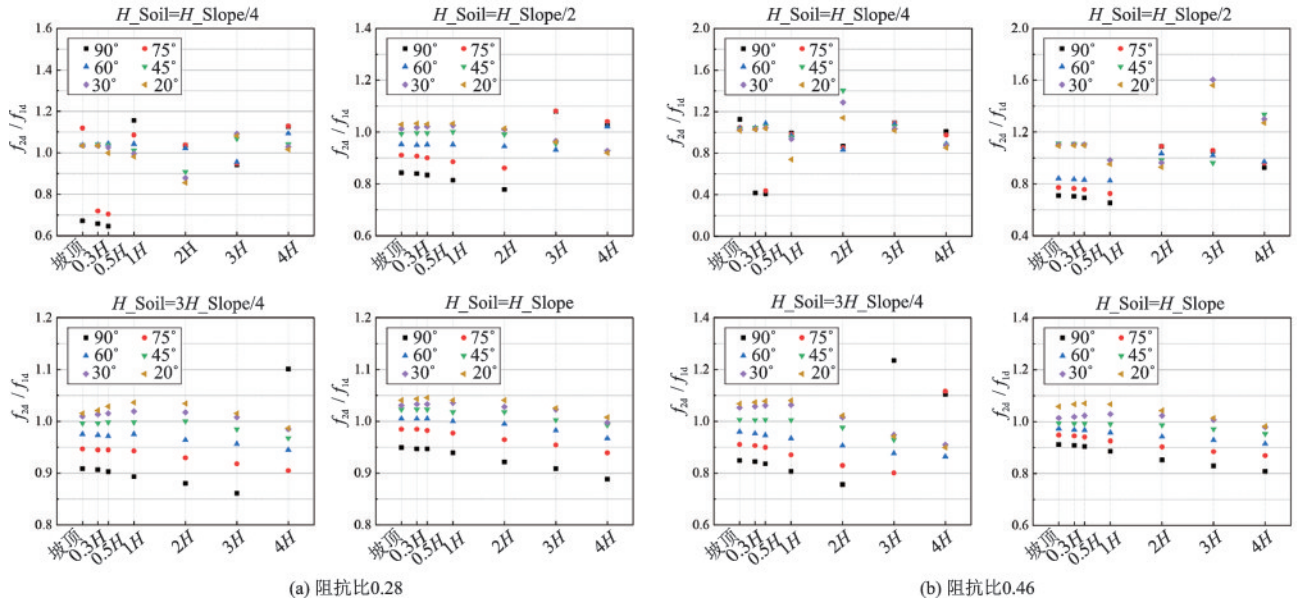


图6 不同斜坡角度、不同土层厚度下斜坡土层基阶频率和相应一维土层基阶频率之比

Fig.6 Ratios of the basic frequency of the slope topographic soil layer to that of one-dimensional soil layer under models of different slope angles and soil thickness

当土层厚度为 H 、阻抗比为0.28时,此区域的放大倍数为—维土层的1.2~2.3倍;该放大倍数大于基岩斜坡的放大倍数(小于2倍),表明斜坡对土层的影响大于对纯基岩地形的影响;(2)放大倍数最大值均出现在坡顶点,且随着到坡顶点距离的增大,放大倍数迅速降低。如土层厚度为 H 时,从坡顶点到离坡顶点 $2H$,放大倍数从2.3倍下降到1.2倍;(3)随土层厚度的降低,放大倍数下降。如 90° 陡坡的坡顶点,土层厚度为 H 时放大倍数2.3倍,土层厚度为 $H/2$ 时则下降到1.95倍;(4)随着坡度减少,放大倍数下降很快。如土层厚度为 H 时,坡顶点的放大倍数从坡角 90° 时的2.3倍下降到 60° 时的1.4倍。

当斜坡角度 $<45^\circ$ 时,放大倍数显著下降。在距离坡顶点 $2H$ 范围内,基本小于一维土层放大的1.3倍。同时,最大放大倍数均不在坡顶点,而转移到 $1H$ 附近。随着到坡顶点距离的增大,放大倍数先缓慢增加到 $1H$ 附近达到最大值(约1.2~1.3倍),然后

缓慢下降。

当覆盖层厚度较薄,为斜坡高度的 $1/4$ 时,斜坡土层放大规律较为复杂。其中,在距离坡顶点 $1H$ 范围内,斜坡角度 $>60^\circ$ 时,斜坡的放大倍数随到坡顶点距离的增大呈下降趋势,但其值基本小于1.3。斜坡角度 $<45^\circ$ 时,放大倍数随到坡顶点距离的增大,呈先增大后减少的趋势,且斜坡角度 20° 和 30° 的放大倍数大于斜坡角度 45° 。在 $0.3H\sim 1H$ 范围内,斜坡角度 20° 和 30° 的放大倍数大约在1.3~1.5之间。总体而言,土层厚度小于斜坡高度的 $1/4$,放大倍数较—维土层放大程度较低。

从以上分析看,放大倍数小于1.3的区域变化规律性不强。放大效应较强的区域主要位于离坡顶点 $2H$ 范围内,且斜坡角度大于 60° ,土层厚度 $>H/4$ 。从图6给出的斜坡土层基阶频率看,这一区域的频率大致在一维土层的0.8~0.95倍。

对该区域的放大效应,根据数值模拟结果基于最小二乘法拟合得出放大倍数的简单估计公式:

$$\beta_H = 0.4965 + 0.5805\alpha - 0.1773L + 0.6289\frac{h}{H} - 0.4798IC \quad (6)$$

$$(H/4 < h < H, 0.28 < IC < 0.46, 0 < L < 2H)$$

式中, β_H 为斜坡地形土层相对于—维土层的放大倍数; α 为斜坡角度(rad); H 为斜坡高度; h 为土层厚度; L 为观测点与坡顶点之间的距离; IC 为土层介质与基岩的阻抗比。上式表明放大倍数随着斜坡角

度、土层厚度的增大而增大,随到坡顶点距离的增大和土层与基岩阻抗比的增大而减少。

《建筑抗震设计规范》^[20]针对局部突出地形对地震动的放大作用,分岩质和非岩质边坡给出了调

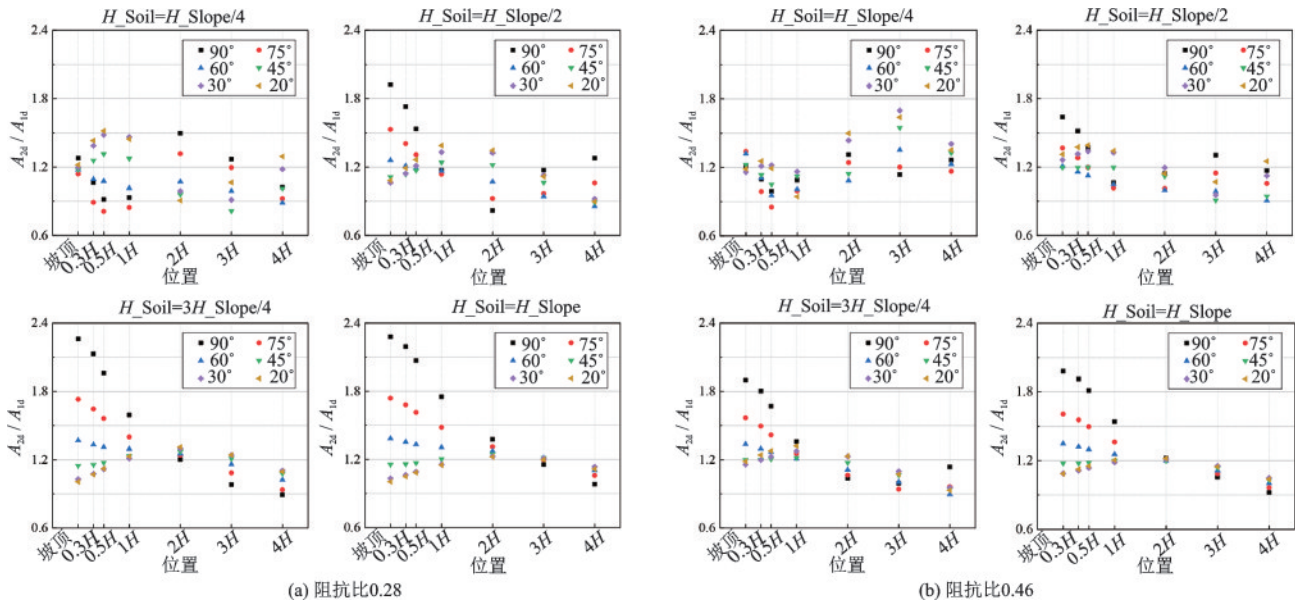


图7 不同斜坡角度、不同土层厚度下斜坡土层放大倍数与和相应一维土层放大倍数之比

Fig.7 Ratios of the amplification factors of the slope topographic soil layer to that of one-dimensional soil layer under models of different slope angles and soil thickness

整系数。规范中考虑了三个重要的参数,即坡高、坡降角度的正切(对应于本文的斜坡角度)以及距离突出地形边缘的距离(对应于本文的到坡顶点距离)。对于斜坡土层,其调整系数最大区域为坡降角度正切大于1(斜坡角度大于 45°),且距离坡顶点 $<2.5H$ 范围内,最大放大倍数为1.6。

需要注意的是,规范是针对均质斜坡的,而本文侧重研究存在下卧基岩的土层斜坡的放大作用,此种情况下,得到的最大放大区域为斜坡角度 $>60^\circ$ 且距离坡顶点 $<2H$ 范围内,这与规范中均质斜坡最大放大区域较为接近,但此时最大放大倍数可达一维土层的2.3倍左右。这表明,存在下卧基岩的土层斜坡的放大更显著,在抗震设计时,需慎重考虑。如将规范中关于均质斜坡的放大调整系数直接推广到存在下卧基岩的土层斜坡,是偏于危险的。

3 结论

基于显式有限元方法,定量分析SV波垂直入射下,上覆土层斜坡场地的地震动放大规律,研究表明:

(1)当斜坡角度 $>60^\circ$ 时,土层厚度 $>H/4$,在离坡顶点 $2H$ 内,存在一个较一维土层明显放大的区域,放大倍数最大值位于坡顶点,当土层与基岩的阻抗比较低时,坡顶点放大倍数可达一维土层的2.3

倍左右。该放大倍数大于基岩斜坡的放大倍数,表明斜坡对土层的影响大于对纯基岩地形的影响。这一区域内,放大倍数随斜坡角度和土层厚度的增大而增大,随到坡顶点距离的增大和土层与基岩阻抗比的增大而减少。相对于放大倍数的显著变化,斜坡地形土层基本频率与一维土层相比变化不大,约为一维土层的0.8~0.95倍。

(2)当斜坡角度 $<45^\circ$ 或覆盖层厚小于斜坡高度的 $1/4$ 时,斜坡对一维土层放大的影响显著下降,放大倍数基本小于一维土层放大倍数的1.3倍。

(3)基于数值模拟结果和最小二乘法,本文拟合了斜坡角度 $>60^\circ$ 、土层厚度大于斜坡高度 $1/4$,距离坡顶点2倍坡高范围内的放大倍数与斜坡角度、覆盖层厚度以及阻抗比的估计关系式,可为上覆土层斜坡场地的地震动参数选择提供一定的参考依据。

参考文献:

- [1] Boore D M. Note on the effect of topography on seismic SH waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1972, 62: 275-284.
- [2] Celebi M. Topographical and geological amplifications determined from strong - motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77:

- 1147-1157.
- [3] Ashford S A, Sitar N. Seismic response of steep natural slopes [R]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1994.
- [4] 唐晖, 李小军, 李亚琦. 自贡西山公园山脊地形场地效应分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(8): 74-79.
Tang H, Li X J, Li Y Q. Site effect of topography on ground motions of Xishan Park of Zigong City [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(8): 74-79. (in Chinese)
- [5] 杨宇, 李小军, 贺秋梅. 自贡西山公园山脊场地地形和土层效应数值模拟[J]. 震灾防御技术, 2011, 6(4): 436-447.
Yang Y, Li X J, He Q M. Numerical simulation for site effect of ridge terrain and overlaying soil in Zigong Xishan Park [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2011, 6(4): 436-447. (in Chinese)
- [6] 温瑞智, 任叶飞, 齐文浩, 等. 2013年4月20日芦山地震最大加速度记录分析[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(5): 783-791.
Wen R Z, Ren Y F, Qi W H, et al. Maximum acceleration recording from Lushan earthquake on April 20, 2013 [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(5): 783-791. (in Chinese)
- [7] 刘晶波. 局部不规则地形对地震地面运动的影响[J]. 地震学报, 1996, 18(2): 239-245.
Liu J B. The effect of local irregular topography on the seismic ground motion [J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(2): 239-245. (in Chinese)
- [8] 荣棉水, 李小军, 吕悦军, 等. 平台地形对地震地面运动特征频率值的影响[J]. 中国地震, 2009, 25(2): 178-185.
Rong M S, Li X J, Lyu Y J, et al. Effect of protruding topography on characteristic period of ground motion [J]. Earthquake Research in China, 2009, 25(2): 178-185. (in Chinese)
- [9] 周红, 高孟潭, 俞言祥. SH波地形效应特征的研究[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 775-782.
Zhou H, Gao M T, Yu Y X. A study of topographical effect on SH waves [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(3): 775-782. (in Chinese)
- [10] 张建毅, 薄景山, 王振宇, 等. 汶川地震局部地形对地震动的影响[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(3): 164-169.
Zhang J Y, Bo J S, Wang Z Y, et al. Influence of local topography on seismic ground motion in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(3): 164-169. (in Chinese)
- [11] 郝明辉, 张郁山. 凸起地形对地震动特性的影响[J]. 地震学报, 2014, 36(5): 883-894.
Hao M H, Zhang Y S. Analysis of terrain effect on the properties of ground motion [J]. Acta Seismologica Sinica, 2014, 36(5): 883-894. (in Chinese)
- [12] 张宁, 高玉峰, 代登辉, 等. 风化半圆形河谷引起的土层与地形放大效应[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
Zhang N, Gao Y F, Dai D H, et al. Soil and topography amplification effects by a weathered semi-circular canyon [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering. 2017, 37(1): 1-8. (in Chinese)
- [13] Geli L, Bard P Y, Jullien B. The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988, 78: 42-63.
- [14] Bard P Y. Local effects on strong ground motion: physical basis and estimation methods in view of microzoning studies [C] // Proceeding of Advanced Study Course "Seismotectonic and Microzonation Techniques in Earthquake Engineering", Kefallinia, Greece: [s.n.], 1999: 127-218.
- [15] Boore D M, Harmsen S C, Harding S T. Wave scattering from a step change in surface topography [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, 71(1): 117-125.
- [16] Ashford S A, Sitar N, Lysmer J, et al. Topographic effects on the seismic response of steep slopes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(3), 701-709.
- [17] 丁海平, 于彦彦, 郑志法. P波斜入射陡坎地形对地面运动的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1716-1724.
Ding H P, Yu Y Y, Zheng Z F. Effects of scarp topography on seismic ground motion under inclined P wave [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1716-1724. (in Chinese)
- [18] Assimaki D, Kansel E. Effects of local soil conditions on the topographic aggravation of seismic motion: parametric investigation and recorded field evidence from the 1999 Athens Earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95(3): 1059-1089.
- [19] 廖振鹏. 工程波动理论导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Liao Z P. Introduction to wave motion theories for engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [20] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(本文责编: 赵霞)