

坡面角度对岩质边坡加速度高程放大效应的影响^①

韩宜康¹, 杨长卫², 张建经², 毕俊伟², 高洪波³

(1.南京铁道职业技术学院,江苏 南京 210031; 2.西南交通大学土木工程学院,四川 成都 610031;

3.信阳师范学院,河南 信阳 464000)

摘要:基于现场调查、振动台试验及理论计算等结果,由宏观现象定性的分析到理论求解的定量计算,全面、系统地研究坡面角度对岩质高陡边坡的加速度高程放大效应的影响。现场调查结果表明,边坡的失稳破坏主要发生在45°及以上的斜坡,从宏观现象上间接说明了随着坡面角度的增大,边坡的加速度放大效应会逐渐增强;振动台试验和理论计算结果从半定量和定量的角度揭示随着坡面角度的增大,临空面方向、竖直方向峰值加速度的高程放大效应逐渐增强,而在增强的过程中同时存在突然增大的拐点45°和渐趋平缓的拐点50°,即在45°以下加速度放大效应的增长较为缓慢,在45°~50°之间突然增大,在50°以上增长又逐渐变缓,这充分解释了“滑坡灾害主要发生在45°以上的斜坡”这一汶川地震震害现象。边坡走向方向的峰值加速度高程放大效应基本上不随坡面角度的增大而变化,其台阶也相对较为平缓。

关键词:岩质边坡; 动力响应; 振动台试验; 地震动参数

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0874-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0874

The Influence of Slope Angle on the Elevation Amplification Effect of Rock Slope Acceleration

HAN Yi-kang¹, YANG Chang-wei¹, ZHANG Jian-jing², BI Jun-wei², GAO Hong-bo³

(1.Nanjing Institute of Railway Technology, Nanjing, Jiangsu 210031, China;

2.School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

3.Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: A large-scale shaking table model test of a slope with a scale of 1:10 was introduced. The model slope was composed of soil with a height of 1.8 m, length of 4.4 m, and width of 4.4 m and included four slope angles of 30°, 45°, 50°, and 60°. The materials of the model test were blanc fixe, river sand, gypsum, clay, and water in various ratios. A series of tests was performed with various input seismic wave types, amplitudes, and frequencies. On the basis of field investigation results, shaking table test results, and theoretical analysis results, the influence of slope angle on the elevation amplification effect of rock slope acceleration was discussed. The results indicate that the amplifications of peak accelerations gradually increased with increases in slope angles. In addition, two inflection points were noted at slope angles of 45° and 50°, respectively, which suggests landslide hazards mainly occur on slopes with angles greater than 45°. Moreover, the amplification a-

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金,青年基金(编号:51408510);江苏省高等职业院校高级访问工程师计划项目(2013);黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放课题和黄土地区公路建设与养护技术山西省重点实验室开放课题(编号:KLTLR-Y13-12);河南省科技发展计划项目(编号:142300410200)

作者简介:韩宜康(1981—),男,江苏沛县人,讲师,主要从事高速铁路路基、基础工程方面的研究。

通讯作者:杨长卫(1987—)男,讲师,主要从事岩土动力学方面的研究。E-mail:1209732335@qq.com

long the slope strike direction was essentially consistent, and the step was smooth.

Key words: rock slope; dynamic response; shaking table test; ground motion parameters

0 引言

5·12汶川特大地震诱发了成千上万处滑坡、泥石流等地质灾害,仅四川省39个重灾县就新增10 000处灾害点,而滑坡灾害点约占总数的41%,这给国家和人民造成了巨大的损失^[1]。笔者所在的课题组在汶川地震发生后迅速赶赴地震灾区,对灾区内部崩塌滑坡的分布规律、发生规模、支护结构的抗震性能等进行了一系列的调查研究,获得了大量的第一手调查资料^[2-4]。在整理分析边坡滑塌数量与坡面角度关系时发现“汶川地震中的大多数滑坡是发生在坡面角度为45°以上的斜坡”,这与其他学者的调查分析结果基本一致^[5-6]。尽管目前针对此现象已经开展了大量的科研工作,取得了丰硕的研究成果^[7-13],但是大多数的研究成果仅仅是停留在对其表象或定性的分析,并没有开展定量的研究,缺乏系统的解释。

基于此,本文将基于现场调查结果、振动台试验结果和理论推导结果对上述震害现象从定性到定量系统地开展研究,希望对充分了解地震作用下边坡地震动特性有所帮助。

1 现场调查

汶川地震过后,本课题组成员立即对震区的崩塌、滑坡灾害做了大量的调查工作,对震区崩塌、滑坡震害的总体分布情况及典型区域崩塌滑坡的分布规律进行了统计分析。共统计了462条实测的地震失稳断面,得出每个具体工点的坡面度数,计算不同坡度范围内的失稳数量,得出了统计图(图1)。根据统计数据计算,地震失稳区坡度在30°以上的共447个,占总数量的96.75%;在41°~45°及其以上的共399个,占总数量的83.36%。综上所述,调查区域内边坡的失稳破坏主要发生在45°及其以上的斜坡中,这就从宏观现象上间接说明了随着坡度的增加,边坡的加速度放大效应逐渐增强。针对此观点,本文将从半定量的振动台试验研究和定量的理论计算两个方面来开展进一步的说明。

2 振动台试验

振动台试验是在实验室模拟地震的重要手段,比较接近实际地震时地面的运动情况以及地震对结构物的作用情况,是研究结构物在地震作用下的破

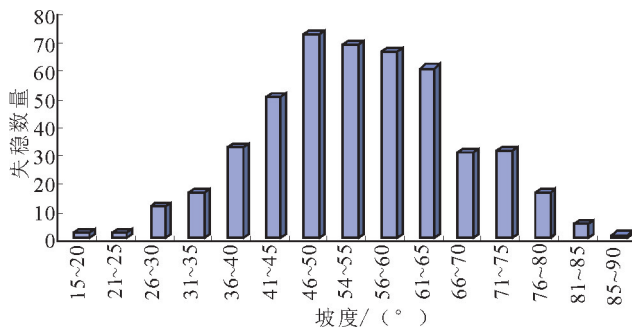


图1 滑坡失稳数量 vs 坡面坡度

Fig.1 The number of landslides vs slope gradient

坏机理和破坏模式、评价整体抗震能力的重要手段和方法,且具有针对性强、可重复性等优点,在地震工程的理论研究和工程实际中已经得到了广泛的应用^[14]。基于此,本课题组将针对现场调查结果开展大型振动台试验以研究岩质高陡边坡坡面角度对加速度高程放大效应的影响。

2.1 振动台试验简介

为了研究坡面角度对加速度高程放大效应的影响,本文基于现场调查结果,概化分析模型,建立了包含30°、45°、50°及60°四个坡面的振动台试验模型(图2)。整个模型高1.8 m,长4.4 m,宽4.4 m,下覆0.5 m厚的软岩和0.5 m厚的硬岩。其中斜坡模型高0.8 m,底部长3.53 m,宽1.55 m,上顶面长0.78 m,宽0.1 m。另外,岩质边坡的坡体采用软质岩体,以泥岩的岩体力学参数来模拟;基岩采用硬质岩体,以灰岩的岩体力学参数来模拟,具体的试验材料是基于试验所建立的相似体系,以重晶石粉、河砂、石膏、黏土和水作为原材料进行配制。同时,在每个坡面上自上而下均匀布设了四个三向加速度计,用于监测地震作用下坡面的加速度响应。另外,在自由场区域也布设了一组加速度测点,用以研究坡面加速度相对于自由场的高程放大效应,以45°坡面为例来加以说明,见图3。在试验过程中施加了按照相似体系调整后的Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度烈度的众值地震、设计地震、罕遇地震下汶川卧龙地震波、EL Centro地震波以及Kobe地震波的三向地震动加速度时程。值得注意的是本文所采用的振动台试验的详细情况已经在文献^[14]中进行了论述,本部分将不再予以叙述。

2.2 相似关系设计

模型试验结果的可靠性取决于试验模型是否真

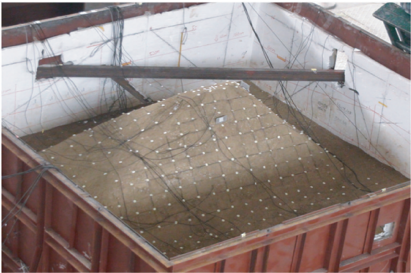


图 2 振动台试验模型

Fig.2 The model of shaking table test

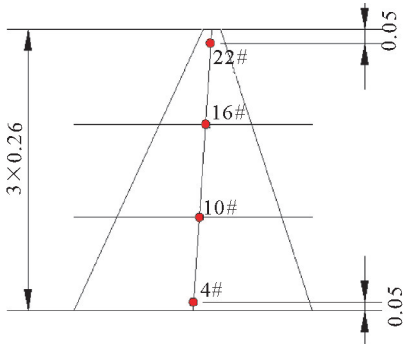


图 3 35°坡面的测点布置图

Fig.3 The arrangement of monitoring points on a slope of 35°

实地再现原型结构体系的实际工作状态。但是由于岩土体的物理力学性质十分复杂,在应变水平较低时就开始出现非线性,并且其力学特性随岩土体的组分、应力状态、荷载水平和加载频率、历时和历史等的不同而变化,很难找到一种能全面考虑这些特性和影响因素的模拟材料。另外本次试验的背景基础比较复杂,汶川地震诱发的滑坡、崩塌灾害等地形多较为复杂,规模也较大,难以做到模型与原型之间完全一致,只能针对本次模型试验的主要目的,就其中某一项或某几项指标,使其与原型参数相似或接近相似来进行试验。因此,本试验配制相似材料,以模型长度 L 、质量密度 M 和时间 T 为控制量,按 Buckingham π 定理导出了各物理量之间的相似关系。模型主要相似常数见表 1。

表 1 模型的主要相似常数

Table 1 The analogical constants of test model

序号	物理量	相似关系	相似常数	备注
1	几何尺寸 L	C_L	10	控制量
2	时间 T	$C_T=C_L$	3.16	控制量
3	土体重度 γ	$C_\gamma=1$	1	控制量
4	频率 ω	$C_\omega=C_L$	0.316	
5	速度 V	$C_V=C_L$	10	
6	位移 S	$C_S=C_L$	10	
7	黏聚力 c	$C_c=C_L$	10	
8	内摩擦角 φ	$C_\varphi=1$	1	
9	加速度 a	$C_a=1$	1	

2.3 振动台试验结果分析

为了能够清晰说明坡面角度对加速度峰值高程放大效应的影响,本节仅选取峰值加速度为 0.1、0.2 和 0.4 g 的汶川卧龙地震波作用下 30°、45°、50°以及 60°坡面上各个测点的 X、Y、Z 三向加速度的峰值进行分析。值得注意的是本次试验模型包含四个坡面的山体,如果按照常规的方法使用 X、Y、Z 三向整体坐标系进行分析,则会造成 30°面、45°面的临空面方向是 50°面、60°面边坡的走向方向,很难研究坡面角度对加速度高程放大效应影响方面研究。基于此,本节选取局部坐标系,即边坡的临空面方向 L 、边坡的走向 M ,竖直方向 N ,具体情况见图 4,具体试验结果见图 5。

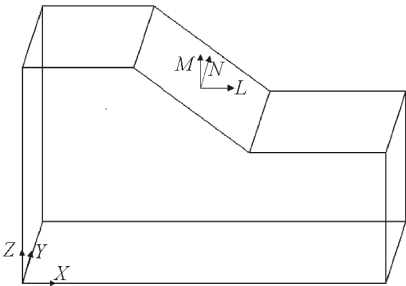


图 4 坐标系变换示意图

Fig.4 Coordinate system transformation

由图 5 可知,在 $PGA=0.1\text{ g}$ 、 0.2 g 及 0.4 g 的汶川卧龙地震波作用下 30°、45°、50°以及 60°面上边坡的临空面方向 L 、边坡的走向 M ,竖直方向 N 的峰值加速度沿高程均具有不同程度的放大。对于 L 方向的加速度讲,各个坡面的加速度放大规律如下: 60°面>50°面>45°面>30°面;对于 M 方向的加速度来讲,各个坡面的加速度放大规律如下: 60°面、50°面、45°面以及 30°面的加速度放大性基本一致;对于 N 向的加速度来讲,各个坡面的加速度放大规律如下: 60°面>50°面>45°面>30°面。

因此,随着坡面角度的增大,临空面方向、峰值加速度的高程放大效应逐渐增强,沿竖直方向边坡走向方向的峰值加速度高程放大效应则基本不变。为了方便解释上述现象,本节将边坡问题简化为平面应变问题,从地震波在坡面处的传播特性对上述现象进行解释。由弹性波动理论可知^[15],坡底部垂直入射的 SV 波传播至坡面时将产生波场分离现象,分解为同类型的反射 SV 波和新类型的反射 P 波(转换波),见图 6。输入 SV 波、反射 SV 波以及反射 P 波的势函数如下^[14-15]:输入 SV 波的势函数: $\phi_i = E_{se}^{i(\omega t - k_1 x + k_2 S x_3)}$; 反射 P 波的势函数: $\phi_r =$

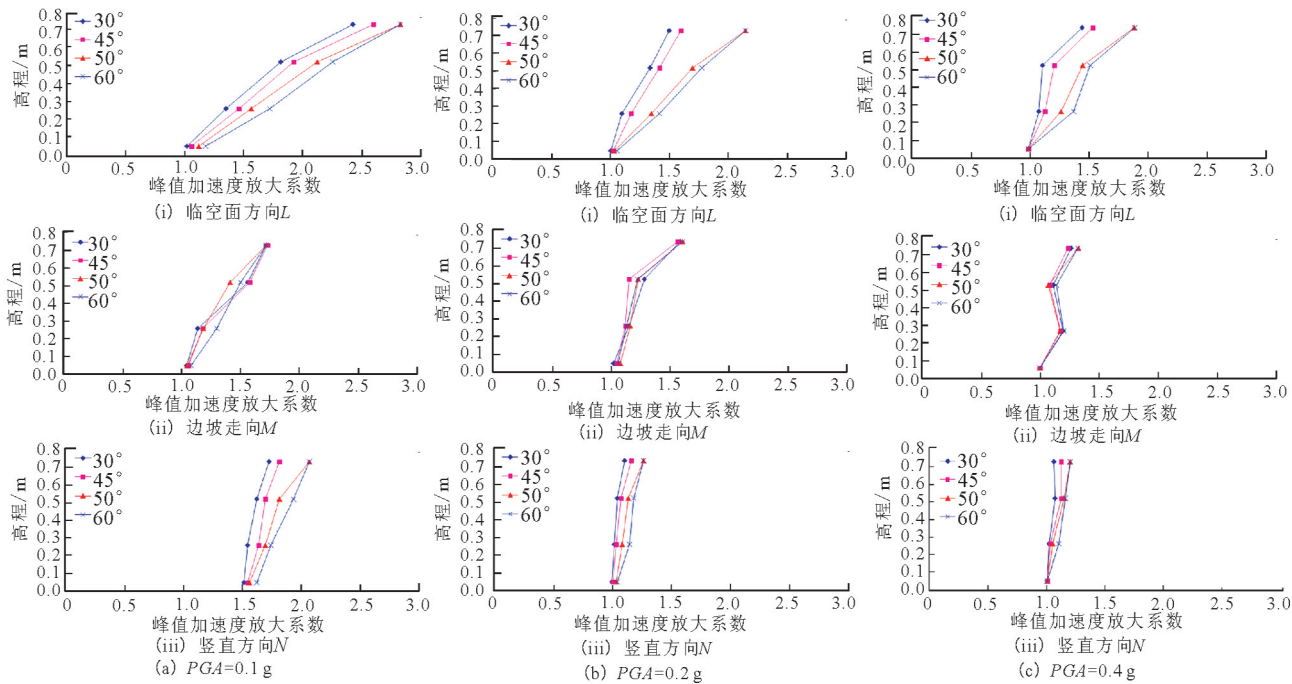


图 5 试验结果

Fig.5 Test result

$F_P e^{i(\omega t - k_1 x_1 - k_2 P x_3)}$; 反射 SV 波的势函数: $\phi = E_S e^{i(\omega t - k_1 x_1 + k_2 S x_3)} + F_S e^{i(\omega t - k_1 x_1 - k_2 S x_3)}$; ϕ 为入射角,

$$k_1 = \frac{\omega \sin \phi}{V_S}, k_{2S} = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{\omega}{V_S}\right)^2 - k_{1S}^2} & k_{1S} \leq \frac{\omega}{V_S} \\ -i \sqrt{\left(\frac{\omega}{V_S}\right)^2 - k_{1S}^2} & k_{1S} > \frac{\omega}{V_S} \end{cases}$$

$$k_{2P} = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{\omega}{V_P}\right)^2 - k_{1P}^2} & k_{1P} \leq \frac{\omega}{V_P} \\ -i \sqrt{\left(\frac{\omega}{V_P}\right)^2 - k_{1P}^2} & k_{1P} > \frac{\omega}{V_P} \end{cases}$$

$$\frac{F_P}{E_S} = \frac{-2V_P^2 \sin 2\phi \cos 2\phi}{V_S^2 \sin 2\theta \sin 2\phi + V_P^2 \cos 2\phi}$$

$$\frac{F_S}{E_S} = \frac{V_S^2 \sin 2\theta \sin 2\phi - V_P^2 \cos 2\phi}{V_S^2 \sin 2\theta \sin 2\phi + V_P^2 \cos 2\phi}$$

基于上述公式,将 30°、45°、50°及 60°面的相关参数带入上述公式中求解,得出 F_P/E_S 的比值均是负数,而 F_S/E_S 的比值均是正数,即输入 SV 波的相位与反射 SV 波的相位一致,而与反射 P 波的相位相反,进而造成输入 SV 波、反射 SV 波的振动在 L、N 方向的分量是一致的,而输入 SV 波、反射 P 波的振动在 L、N 方向则相反。另外,输入 SV 波在 L、N 方向的振动分量分别为 E_S 和 0,反射 SV 波在 L、N 方向的振动分量分别为 $(E_S + F_S) \sin(2\theta - 90^\circ)$ 和 $(E_S + F_S) \cos(2\theta - 90^\circ)$,反射 P 波在 L、N

方向的振动分量分别为 $F_P \cos(2\theta_1 - 90^\circ)$ 和 $F_P \sin(2\theta_1 - 90^\circ)$,则 L、N 方向总的振动为 $E_S + (E_S + F_S) \sin(2\theta - 90^\circ) + F_P \cos(2\theta_1 - 90^\circ)$ 和 $(E_S + F_S) \cos(2\theta - 90^\circ) + F_P \sin(2\theta_1 - 90^\circ)$ 。另外,随着入射角 θ 的增大,SV 波的反射角 θ 逐渐增大,其振动方向逐渐向 L 方向靠拢,而 P 波的反射角 θ_1 逐渐增大,在 L 方向的振动分量逐渐减小,即 $(E_S + F_S) \sin(2\theta - 90^\circ) + F_P \cos(2\theta_1 - 90^\circ)$ 和 $(E_S + F_S) \cos(2\theta - 90^\circ) + F_P \sin(2\theta_1 - 90^\circ)$ 均逐渐增大。因此,随着坡面角度的增大,临空面方向和竖直方向的峰值加速度高程放大效应逐渐增大。对于沿坡体走向方向的加速度高程放大效应,按照上述思路可以得到同样的结论。

为了能够更加清晰地揭示地震作用下坡度对 L、M、N 三向加速度峰值的影响程度,本节仅选取距离坡顶 $H/4$ 处的测点作为研究对象开展研究,具体结果见图 7。

由图 7 可知,随着坡面角度的增大,临空面方向、边坡走向及竖直方向的峰值加速度放大系数逐渐增大,并且呈“台阶状”分布,即坡面在 30°~45°、50°~60°两个范围内放大系数均略有增加,而在 45°~50°范围内放大系数则是突然增大。另外,峰值加速度放大系数台阶高度的变化规律如下:临空面方向>竖直方向>边坡走向,并且在峰值为 0.1 g、

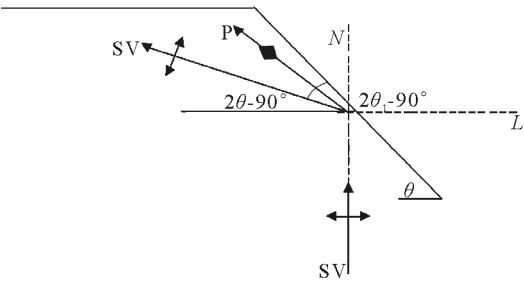


图 6 入射 SV 波的波场分裂现象

Fig.6 Wave field splitting of incident SV wave

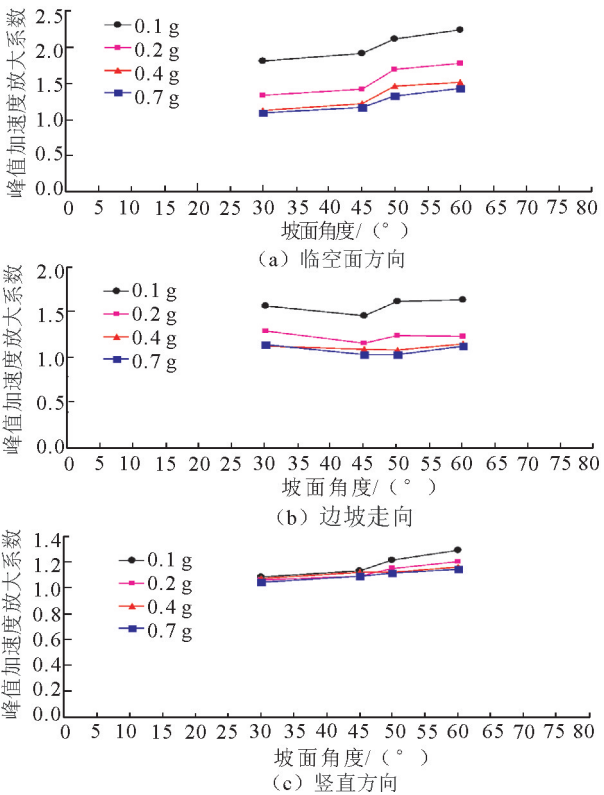


图 7 三向峰值加速度放大系数

Fig.7 The acceleration amplification coefficients on three directions

0.2 g、0.4 g 及 0.7 g 的汶川卧龙地震波作用下,50°坡面的临空面方向峰值加速度的放大系数较 45°坡面分别高出 42.3%、19.7%、19.7%以及 13.8%。上述分析结果说明了随着坡面角度的增大,峰值加速度的放大效应并不是一味的增大,而是存在两个拐点,即 45°坡面是峰值加速度放大效应突然增大的拐点,而 50°坡面是峰值加速度放大效应渐趋平缓的拐点。因此,坡面为 45°以上的岩质边坡的地震动响应将会明显高于 45°以下岩质边坡的动力响应,这与“滑坡灾害主要发生在 45°及其以上的斜坡”这一汶川地震震害调查结果吻合。

综上可知,随着坡面角度的增大,临空面方向、竖直方向峰值加速度的高程放大效应逐渐增强,而在增强的过程中同时存在突然增大的拐点 45°和渐趋平缓的拐点 50°,即在 45°以下加速度放大效应的增长较为缓慢,在 45°~50°之间突然增大,在 50°以上增长又逐渐变缓。然而边坡走向方向的峰值加速度高程放大效应基本上不随坡面角度的增大而变化,其台阶也相对较为平缓。

3 理论分析

针对第一部分提到的震害现象,通过前面开展的振动台试验工作已经从定性的角度对其进行了全面、深入的研究。然而在实际工程中,要想全面、系统地评价一个事物需要对其进行定性认识和定量的分析,两者相互补充,缺一不可。另外,大量的震害调查结果和研究成果表明,双面岩质边坡的地震动响应较单面岩质边坡更为强烈^[15]。基于此,本部分采用本人在岩质边坡加速度高程放大效应分析方法的最新研究成果—双面岩质高陡边坡加速度高程放大效应的时频分析方法^[16]来定量地研究坡面角度对加速度高程放大效应的影响。

3.1 双面岩质高陡边坡加速度高程放大效应分析方法的简介

双面岩质边坡加速度高程放大效应时频分析法是基于弹性波动理论,利用水平分层法,借助 Hilbert-Huang 变换,建立微元体的受力平衡微分方程,借助边界条件,应用振型分解法和正交理论推导的,具体的计算模型见图 8。该方法不仅能够很好地考虑地震波三要素(峰值加速度、频率以及持时)对双面岩质边坡加速度高程放大性的影响,而且能够从理论计算的角度解释坡体的“鞭梢效应”问题。

3.2 双面岩质高陡边坡加速度高程放大效应分析方法的算例

为了研究坡面角度对岩质边坡加速度高程放大效应影响方面的研究,现以具体算例来进行说明:山体高 1 000 m,阻尼比为 5%,弹性模量为 2 000 MPa,泊松比为 0.21,输入峰值地震动为 1.0 g 的正弦波,且正弦波的频率变化为 1.5 Hz,研究坡面角度为 30°、35°、40°、45°、50°、55°及 60°,具体计算结果见图 9。值得注意的是在图 9 中坡顶加速度的放大系数=坡频率顶加速度/坡底加速度。

综合分析图 9 可得出以下规律:随坡面角度的增加,坡顶的加速度放大系数逐渐增大,呈“台阶状”分布,即在 30°~45°、50°~60°两个范围内放大系数

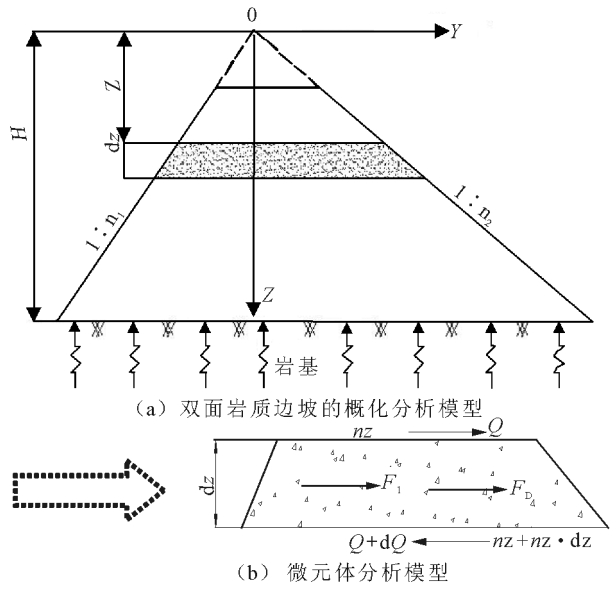


图 8 计算模型
Fig.8 Calculation mode

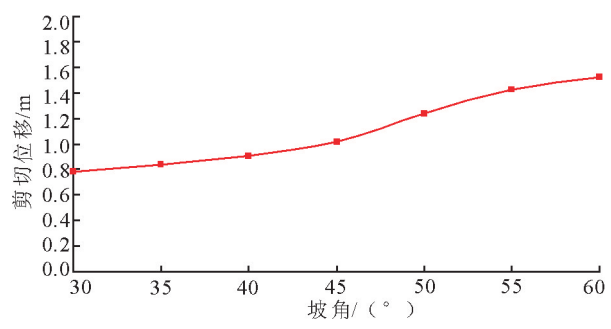


图 9 坡顶加速度放大系数 VS 输入波
Fig.9 The acceleration amplification coefficient of top of slope VS the input wave

均略有增加,而在 45°~50°的范围内则突然增大,这与振动台试验的分析结果是一致的,进而从理论计算的角度对震害现象进行了解释。

4 结论

本文从现场调查结果、振动台试验结果及理论计算结果三个方面系统地、由定性到定量地研究了坡面角度对加速度高程放大效应的影响,具体得出以下结论:

(1) 边坡的失稳破坏主要发生在 45°及其以上的斜坡中,建议在今后高陡边坡安全防护工作中对坡面角度在 45°左右及其以上的边坡给予重视。

(2) 随着坡面角度的增大,临空面方向、竖直方向峰值加速度的高程放大效应逐渐增强,而在增强的过程中同时存在突然增大的拐点 45°和渐趋平缓

的拐点 50°,即在 45°以下加速度放大效应的增长较为缓慢,在 45°~50°之间突然增大,在 50°以上增长又逐渐变缓,这也充分解释了“滑坡灾害主要发生在 45°以上的斜坡”这一汶川地震震害现象。

(3) 随着坡面角度的增大,边坡走向方向的峰值加速度高程放大效应基本上不随坡面角度的增大而变化,其台阶也相对较为平缓。

参考文献(References)

[1] ZHANG Jian-jing, LIAO Yi, QU Hong-lue, et al. Seismic Damage of Earth Structures of Road Engineering in the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65: 987-993.

[2] ZHANG Jian-jing, YANG Chang-wei, John Zhao, et al. Mc Verry. Empirical Models for Predicting Lateral Spreading with Considering the Effect of Region Seismicity[J]. Earthquake Engineering and Engineering V ibration, 2012, 11 (1): 121-131.

[3] 杨长卫, 张建经. SV 波作用下岩质边坡地震稳定性的时频分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 483-491.

YANG Chang-wei, ZHANG Jian-jing. Research on Time-frequency Analysis Method for Seismic Stability of Rock Slope Subjected to SV Wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(3): 483-491. (in Chinese)

[4] 杨长卫, 张建经. 双面高陡边坡地震崩滑效应分析[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(3): 415-422.

YANG Chang-wei, ZHANG Jian-jing. Landslide Responses of High Steep Hill with Two-side Slopes under Ground Shaking [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48 (3): 415-422. (in Chinese)

[5] YANG Chang-wei, ZHANG Jian-jing. A Prediction Model for Horizontal Run-out Distance of Landslides Triggered by Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 12(2): 201-208.

[6] 许强, 李为乐. 汶川地震诱发滑坡方向效应研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(增 1): 7-14.

XU Qiang, LI Wei-le. Study on the Direction Effects of Landslides Triggered by Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(Suppl.1): 7-14. (in Chinese)

[7] 曹琰波, 戴福初. 唐家山滑坡变形运动机制的离散元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增 1): 2878-2887.

CAO Yan-bo, DAI Fu-chu, XU Chong, et al. Discrete Element Simulation of Deformation and Movement Mechanism for Tangjiaoshan Landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Suppl.1): 2878-2887. (in Chinese)

[8] 杨长卫, 张建经. 双面高陡边坡的地震滑坡响应分析[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(3): 417-422.

YANG Chang-wei, ZHANG Jian-jing. Landslide Responses of High Steep Hill with Two-side Slopes under Ground Shaking

- [J].Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(3): 415-422.(in Chinese)
- [9] 杨长卫,高洪波,张建经.岩质高陡边坡地震动力响应共性和差异性的研究[J].四川大学学报:工科版,2013,45(3):18-26.
YANG Chang-wei,GAO Hong-bo ZHANG Jian-jing,Research on the Generality and Otherness of Seismic Responses of the Steep Rock Slope [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition,2013,45(3):18-26. (in Chinese)
- [10] 杨长卫,张建经.汶川地震中国道 G213 左侧某典型高山河谷场地地震滑坡响应研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1467-1475.
YANG Chang-wei,ZHANG Jian-jing. Analysis of Landslide Responses of a Typical High Hill-river Valley Field near National Road G213 during Wenchuan Earthquake[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1467-1475.(in Chinese)
- [11] 杨长卫,张建经.双面高陡岩质边坡地震滑坡机理的研究[J].岩土力学,2013,23(11):1-9.
YANG Chang-wei,ZHANG Jian-jing. Analysis of Landslide Mechanisms of a High Steep Rock Hill with Two-side Slopes under Ground Shaking[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,23(11):1-9.(in Chinese)
- [12] 冯文凯,许强,黄润秋.斜坡震裂变形力学机制初探[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):3124-3129.
FENG Wen-kai,XU Qiang,HUANG Run-qiu. Preliminary Study on Mechanical Mechanism of Slope Earthquake-induced Deformation[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 3124-3129. (in Chinese)
- [13] 毛彦龙,胡广韬,毛新虎,等.地震滑坡启程剧动的机制研究及离散元模拟[J].工程地质报,2001,9(1):74-80.
MAO Yan-long,HU Guang-tao,MAO Xin-hu, et al. Mechanism of Set-out Violent-slide of Slope Mass during Earthquake and its Smulation by Using Discrete Element Method [J].Journal of Engineering Geology, 2001, 9(1): 74-80. (in Chinese)
- [14] YANG Chang-wei,LIU Xin-min,ZHANG Jian-jing, et al. Analysis on Mechanism of Landslides Under Ground Shaking: a Typical Landslide in the Wenchuan Earthquake[J].Environ Earth Science,2014,72(9):3457-3466.
- [15] 杜修力.工程波动理论与方法[M].北京:科学出版社,2009.
DU Xiu-li.Theories and Methods of Wave Motion for Engineering[M].Beijing: Science Press,2009.(in Chinese)
- [16] YANG Chang-wei,SU Tian-bao,ZHANG Jian-jing, et al. New Developments in Geotechnical Earthquake Engineering [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2014: 1-7.