

地震作用下高陡岩质斜坡动力响应规律研究

刘 铮^{1,2}, 李 滨^{1,2}, 贺 凯^{1,2}, 高 杨^{1,2}, 王晨辉³

LIU Zheng^{1,2}, LI Bin^{1,2}, HE Kai^{1,2}, GAO Yang^{1,2}, WANG Chenhui³

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 活动构造与地壳稳定性评价重点实验室, 北京 100081;
3. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071000

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Crustal Stability Assessment, Beijing 100081, China;*

3. *Geological Survey Center of Hydrogeology and Environment, China Geological Survey, Baoding 071000, Hebei, China*

LIU Z, LI B, HE K, et al., 2020. Research of dynamic response patterns of high steep rock slope under earthquake effects [J]. Journal of Geomechanics, 26 (1): 115 – 124 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.01.012

Abstract: Base on the research of single-sided high steep slopes in southwestern China, dynamic responses of double-sided slopes are analysed which include changes of height, angle and width. Results show that predominant frequencies of slopes mainly concentrate in 1~4 Hz when inputting Ricker waves with varying center frequencies and the results alter in different parts of the slope. Dynamic response patterns mainly depend on slope height, contours of amplification coefficients parallel to the bottom of slope at lower heights while distribute as closed regions near surface when height increases. This means numerical value of amplification linearly increase with the height of the slope at a relatively low height but fluctuate at a great height. In addition, slope angle changes the direction of contours and makes amplification factors greater in steep slope, but dynamic patterns of slope are unaffected by those changes. Double-sided slopes show similar dynamic pattern with the single ones, but reflection and refraction of quake waves caused by slope shape make the amplification greater in double-sided slopes, which manifest as intensified contours and multiplied acceleration.

Key words: earthquake; high steep rock slopes; topography; dynamic response; amplification effect; numerical simulation

摘 要: 在西南山区高陡单面斜坡研究基础上运用 FLAC^{3D} 有限差分法对双面斜坡的动力响应规律进行分析, 研究了斜坡坡高、坡角及顶宽变化对响应规律的影响, 结果发现: 对斜坡输入不同中心频率 Ricker 子波时, 坡体卓越频率整体处于 1~4 Hz 之间, 且斜坡不同部位卓越频率不尽相同。从规律上看, 坡高决定了斜坡动力响应的表现形式, 体现在坡高较低时加速度放大系数等值线平行于坡底而增大后变为平行于坡面展布的闭合区域, 反映在放大效果上即为加速度随坡高线性增加 (坡高较低时), 而后呈现增减反复出现的情况 (坡高较高时); 另外, 坡角增大未影响斜坡动力响应的表现形式, 仅改变了斜坡内部放大系数等值线的走向, 使得陡倾斜坡加速度水平及竖向放大效果均大于缓倾斜坡。双面斜坡随坡形变化的动力响应规律与单面坡近乎相同, 但由坡形改变所致地震波反射与折射现象使得双面坡对地震波的放大

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1504806); 国家自然科学基金 (41702342)

第一作者简介: 刘铮 (1994-), 男, 在读硕士, 主要从事地质灾害研究工作。E-mail: 2026786929@qq.com

通讯作者: 李滨 (1980-), 男, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害防治研究工作。E-mail: libin1102@163.com

收稿日期: 2019-03-27; **修回日期:** 2019-11-23; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 刘铮, 李滨, 贺凯, 等. 2020. 地震作用下高陡岩质斜坡动力响应规律研究 [J]. 地质力学学报, 26 (1): 115-124 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.01.012

效果更加明显, 表现为放大系数等值线密集程度增大, 加速度较相同单面斜坡成倍增加。

关键词: 地震; 高陡斜坡; 地形地貌; 动力响应; 放大效应; 数值模拟

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A

0 引言

目前, 斜坡坡高、坡角等地形特征改变对地震波放大效应的研究是斜坡动力响应规律分析的重点内容, 其研究结果对把握强震区山体破坏特征、分析斜坡动力响应规律至关重要。但由于地震的动力特性本质及复杂地形地貌与地震动的耦合作用, 使得斜坡地震动力响应问题成为防灾减灾领域较为复杂的难题。因此, 文章在原有工作基础上进一步开展斜坡动力响应规律分析, 对解决此类问题及推进防灾减灾工作均有重要意义。

斜坡动力响应规律研究自 20 世纪 70 年代以来得到极大程度的发展, 各类研究方法层出不穷: Boore (1972) 采用有限差分方法分析地形效应对入射 SH 波的影响, 得到地形对地震动加速度在山体内部分布起到重要作用的结论; 1985 年智利 8.0 级地震后, Çelebi (1987) 采用频谱分析法对比格尔海峡地形对地震波的放大效应进行分析, 印证了山脊处的放大效应所导致的严重破坏现象; 1997 年 Ashford et al. (1998) 通过有限元分析, 将斜坡高度与输入地震波频率建立函数关系, 得到该函数数值为 0.2 时斜坡放大效应将达到最大的结论; Geli et al. (1998) 在原有研究成果的基础上, 提出地形地貌对地震波放大效应的新结论, 山顶相对山底存在明显的放大现象, 但山体的放大模式及震动过程 (特别是在山顶部位) 十分复杂; Harp and Jibson (2002) 在研究 1971 年圣费尔南多地震帕克玛峡谷岩崩灾害成因时发现, 由于峡谷较深且狭窄陡峭, 使得地震动放大效果极为明显, 从而诱发众多崩塌灾害; Meunier et al. (2008) 对美国加利福尼亚、中国台湾及巴布新几内亚震中区域地震诱发滑坡分布图分析后发现, 地震诱发滑坡大多集中于坡肩部位; Bourdeau and Havenith (2008) 采用 FLAC 有限差分法对 1992 年吉尔吉斯斯坦地震 Suusamyр 盆地滑坡成因机理进行了分析, 发现滑坡发生是地震动放大效应所致孔隙水压力上升的结果; Di Fiore (2010) 基于有限元分析方法, 对试验坡体输入 4~16 Hz 地震波时得到了放

大系数的最大值, 并发现取得放大系数最大值的斜坡坡角在 28° ~ 42° 之间; 2003 年 Mitani et al. (2013) 通过 ABAQUS 有限元分析, 发现随坡高增加斜坡坡顶处放大系数不增反降, 其原因可能与坡体内部阻尼有关, 另外还发现, 当坡高不变增大坡角时, 斜坡坡肩处的放大系数也随之增大。

针对岩石边坡稳定性分析中地震力计算问题, 国内学者何蕴龙等 (1998a, 1998b) 通过有限元方法研究了地震动力系数的分布规律, 提出地震力的近似计算方法, 并在龙滩重力坝的动力特性研究中得到地震作用下坝体震动位移最大值出现在坝顶上游、应力分布坝体表面大于内部的规律。郭学彬等 (2001) 根据爆破振动引起坡面效应的实例分析了斜坡面对输入动力的响应作用, 并解释斜坡动力高程放大效应与坡面效应的相互作用关系。李楠等 (2018) 通过 ABAQUS 有限元分析方法对压力型锚杆支护下的斜坡动力响应特性进行了研究, 发现锚固后的斜坡对加速度响应更加强烈, 对地震波低频成分的放大效果更加明显。祁生文等 (2003, 2006) 采用有限差分软件 FLAC^{3D} 分析了简谐波作用下的斜坡边界、坡高、坡角变化对动力响应规律的影响, 得到位移、速度、加速度三量在坡体内的分布及变化规律, 并提出斜坡不同反映形式临界高度的表达式。王海云和谢礼立 (2010) 以不规则地形为研究对象, 利用传统谱比法分析了地形对地震动的放大效应, 发现山顶及附近山脊地震动放大效应更加明显。罗永红 (2011) 通过分析青川、绵竹等地震动实测记录, 并以数值模拟手段计算不同坡型动力响应规律, 发现地震作用下坡角约 30° 的斜坡易发育滑坡灾害, 坡角大于 45° 后多发育崩塌灾害的特点。杨国香等 (2012) 通过大型振动台试验, 模拟了不同类型输入波作用下的斜坡动力响应过程, 发现模型在地震波作用下存在明显的高程放大效应及坡面放大效应, 且斜坡中上部对水平加速度放大明显大于竖向加速度。周兴涛等 (2014) 在对斜坡坡高、坡角的研究基础上根据汶川灾区地震破坏现象进行双面斜坡不同形态下的动力响应特征分析, 发现坡顶形状对加速度的放大效应有

着明显的影响。

张永双等 (2008) 在对汶川地震次生灾害调查时发现, 地震滑坡、崩塌等灾害通常发育于斜坡中上部, 且体积规模通常较大。殷跃平等 (2008, 2014) 在对汶川地震灾害发育特征分析时得到相同的结论: 地震波在山顶处的放大作用总是十分明显; 在其《论滑坡地震力》一文中讨论地震力计算问题时也提到, 考虑不同高度下的放大系数值对准确计算地震惯性力是十分必要的。王文沛等 (2015, 2019) 通过输入 Ricker 子波对青川狮子梁及金沙江乌东德水电站高边坡进行了频谱特征分析, 得到斜坡坡面不同位置的卓越频率及其随坡形变化的规律, 进而得到斜坡在动力条件下的稳定性。张铎等 (2013) 综合分析国内外地震滑坡后发现, 斜坡坡度、坡向等地形场地因素是诱发地震滑坡的重要因素。

以上学者通过不同的研究方法均发现坡高、坡角等坡体地形地貌对斜坡动力响应规律存在显著影响, 研究结果增进了对该领域的认知, 但其内容大多针对仅有一个临空面的单面坡。反观中国西南山区, 山体多呈两面临空且顶部相对单薄的双面斜坡, 其数量众多的破坏现象与尚且较低的研究程度反差鲜明。基于此, 文章通过 FLAC^{3D} 有限差分方法在原有单面斜坡动力响应规律研究基础上对西南山区高陡双面斜坡动力响应特点及失稳破坏现象开展研究, 分析地形地貌改变对其动力响应规律的影响。

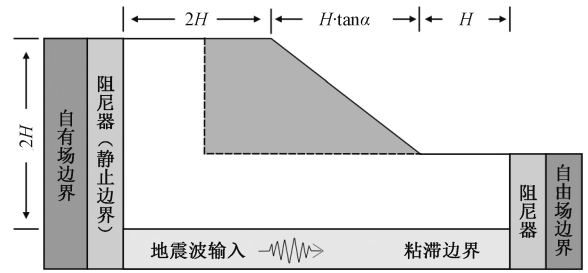
1 模型建立与输入动力选取

1.1 斜坡模型建立

动力响应规律研究主要依靠 FLAC^{3D} 软件非线性动力反应模块, 输入不同类型地震波对模型动力响应过程进行分析, 计算斜坡不同部位位移、速度、加速度等分量, 得到斜坡动力响应规律。

由于模型边界会对地震波产生反射等作用影响计算结果, 且过大的边界尺寸将带来较长的计算时间, 因此合理设置模型尺寸及边界条件对于避免此类问题极为重要。以单面斜坡为例 (图 1), 模型底部、坡脚前缘及坡顶后方均设置一个坡高距离为边界, 保证计算精度的同时减少计算时间。另外, 坡高 H 的选取范围为 50~900 m, 坡角 α 选取范围为 30°~80°, 斜坡体为一均质模型。

为减少地震波在模型边界上的反射, FLAC^{3D}



H —坡高; α —坡度

图 1 计算选用的斜坡模型尺寸及边界条件设置
Fig. 1 Scales and boundary conditions of the slope model

在动力反应分析模块中定义了两种边界条件: 自由场边界和静止 (粘滞) 边界 (Itasca Consulting Group Znc., 2005)。自由场边界条件主要设置在模型两侧, 通过阻尼器与模型相连, 用于模拟真实情况下斜坡体半无限空间的特性; 粘滞边界条件由 Lysmer 和 Kuhlemeyer (1969) 提出, 通过模型底部设置的阻尼器地震波可以得到较好地吸收, 但粘滞边界设置后, 地震动加速度时程则要变为应力时程输入:

$$\sigma_n = -2(\rho C_p)v_n \quad (1)$$

$$\sigma_s = -2(\rho C_s)v_s \quad (2)$$

式中, σ_n 为边界上的法向应力, σ_s 为切向应力, ρ 为模型密度, C_p 、 C_s 分别为 P 波与 S 波波速, v_n 为模型边界上法向速度, v_s 为切向速度。

模型尺寸及边界条件设置好后, 需要对其进行网格划分, 为保证计算精度, 模型网格尺寸必须满足:

$$\Delta l \leq (\lambda/10 - \lambda/8) \quad (3)$$

其中, Δl 为模型尺寸长度, λ 为输入波波长。

1.2 模型力学参数设置与输入动力选取

选用西南山区常见灰岩作为斜坡模型材料, 其物理力学参数如表 1 所示。

表 1 岩质斜坡计算选用的物理力学参数 (据王文沛等, 2019)

Table 1 Physical and mechanical parameters for the rock slope (Wang et al., 2019)

密度 ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量 G/GPa	剪切模量 G/GPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	粘聚力 C/MPa	抗拉强度 R_m/MPa
2690	23.3	14	40	1.8	5.56

由于概化模型为一均质体且坡型较为简单, 为方便计算, 模型选用局部阻尼, 阻尼比设为 0.1571^[10]。在输入动力方面, 考虑到中国西南山区时有强震发生, 且地震波波频多处于较低水平,

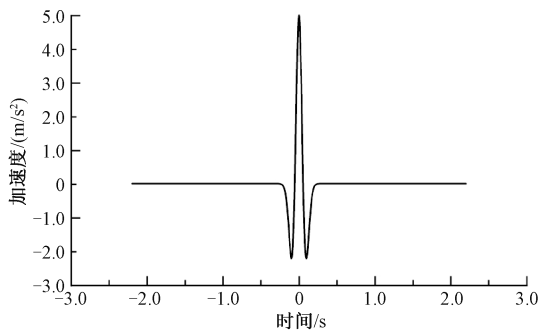
因此研究分别采用频率为 4 Hz 的 Ricker 子波与正弦波为输入波, 峰值加速度均为 0.5g (图 2): 由于 Ricker 子波与正弦波在反映斜坡动力响应规律方面等同于真实地震波, 且 Ricker 子波中心频率易于扩展, 相比于正弦波存在瞬时峰值, 可以较好地反映斜坡动力响应特性, 可用其进行斜坡频响特征分析。

为方便分析计算结果、减少计算偶然误差, 在祁生文等 (2003, 2006) 引入的无量纲放大系数基础上做简单修改, 以加速度放大系数为例:

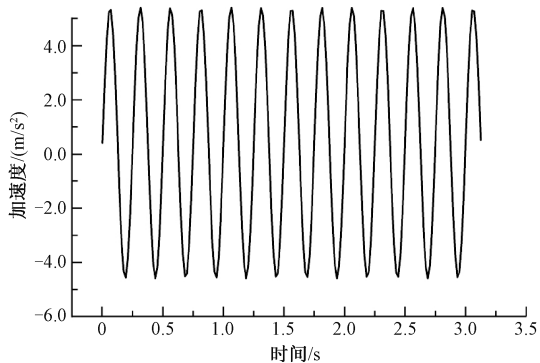
$$\beta = \frac{A_n}{(\sum A_i)/i} \quad (4)$$

式中: β 为加速度放大系数; A_n 为坡体内某一点加速度; i 为坡角 i 个加速度监测点; $\sum A_i$ 为坡角 i 处峰值加速度的和。

通过提取坡体内部监测点加速度峰值计算加速度放大系数, 可以绘制加速度放大系数曲线图及等值线图, 分析斜坡动力响应规律。



(a) Ricker子波



(b) 正弦波

图 2 计算选用的 Ricker 子波与正弦地震波

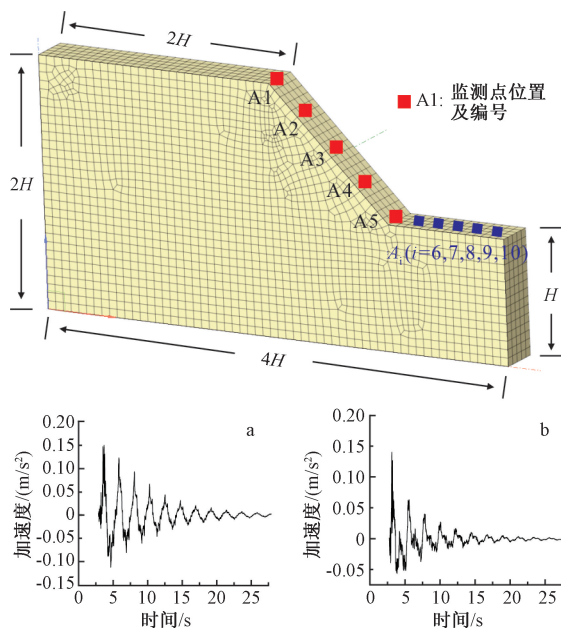
Fig. 2 Ricker wavelet and sinusoidal seismic wave for calculation

2 斜坡频响特征分析

对斜坡进行频响特征研究可掌握其场地条件

特征, 且对斜坡动力响应规律分析起到指导作用。利用 Ricker 子波波形复杂且中心频率易于扩展的特点, 分别将中心频率为 0.1 Hz、0.5 Hz、1 Hz、2 Hz、4 Hz、6 Hz 及 10 Hz 的 Ricker 子波输入模型, 监测斜坡坡顶、坡中及坡脚处加速度时程并绘制放大系数-中心频率曲线图, 分析斜坡卓越频率。

以坡高 50 m 斜坡为例 (图 3), 同种波形输入时坡面两处监测点加速度随时间变化曲线几乎相似且均在地震波输入后 4 s 达到峰值, 且随坡高增加时程曲线峰值也相应增加。达到峰值后监测点加速度迅速衰减, 之后呈波动形式逐渐减小为零。



a—坡肩 (A1) 加速度时程记录; b—坡脚 (A5) 加速度时程记录

图 3 斜坡计算模型设置及加速度记录

Fig. 3 The calculation model and acceleration records of the slope

绘制不同频率 Ricker 波输入时斜坡加速度-水平距离曲线, 可得坡体表面附近加速度整体变化: 在坡顶附近, 斜坡加速度呈现减小与增加交替出现的情况 (图 4a 段), 并在坡肩处 (A1 点) 达到最大值; 在坡面上, 坡脚至坡肩斜坡加速度值并非一直增大, 而是表现为先减小后增加 (图 4b 段)。从曲线数值上看, 斜坡加速度值随输入波频率增加而减小, 表明斜坡对地震波的低频成分放大更明显, 斜坡卓越频率处于较低值: 坡面及坡顶部分约为 0.5~1 Hz, 斜坡坡脚部位卓越频率约为 4 Hz。

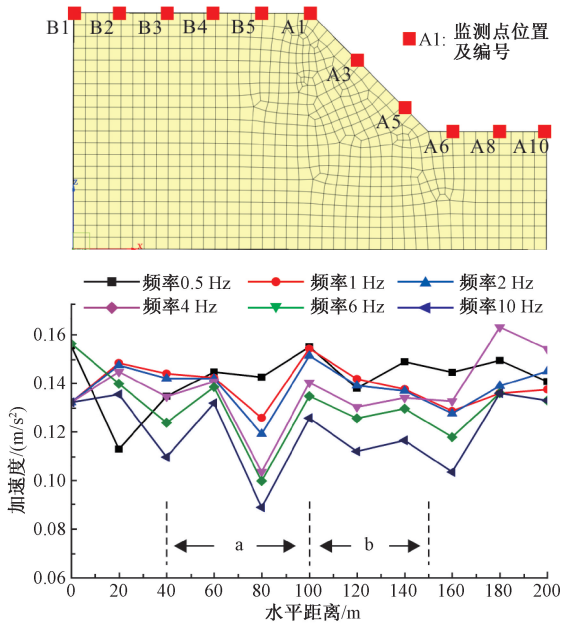


图 4 Ricker 波作用下斜坡坡面加速度监测曲线
Fig. 4 Monitoring curves of the slope surface acceleration under the action of Ricker wave

3 单面斜坡动力响应规律分析

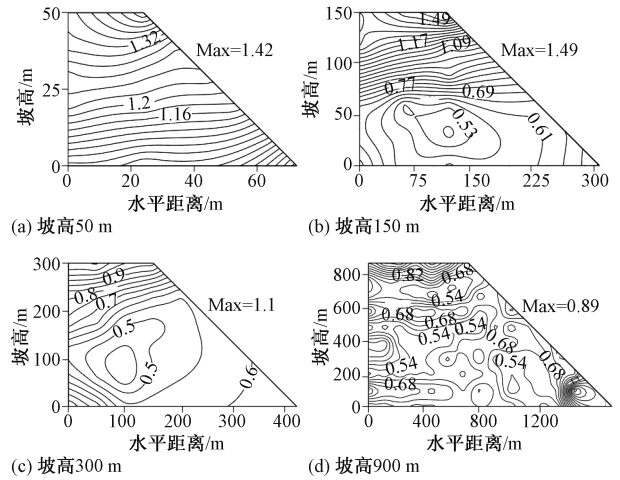
斜坡频响特征分析结果表明斜坡坡高对地震波存在着明显的放大现象, 特别是在坡肩部位, 其放大值约为坡脚处 1.3 倍。在此规律基础上, 将斜坡高度由 50 m 扩展至 900 m、坡度由 30° 扩展至 80° 并输入加速度时程 $a = 0.5g\sin(8\pi t)$ 正弦地震波, 绘制其加速度放大系数等值线图, 分析斜坡在坡高及坡角改变条件下的动力响应规律。

3.1 坡高变化对动力响应规律的影响

坡高对斜坡动力响应规律的影响主要体现在高度对斜坡加速度放大效果的变化, 图中即为等值线分布形式的变化 (图 5)。其规律可概括为在一定坡高范围内等值线分布稀疏且均匀, 此时加速度随坡高线性增加; 坡高较大后加速度呈现增减交替出现的复杂变化。

(1) 斜坡对地震波存在放大作用, 体现在坡顶及坡面附近加速度值较输入波有明显增加, 且这种放大现象随坡高增加而改变并受斜坡岩土体物理学性质及输入地震波波频等的影响。

高度放大效应表现为斜坡高度较小时 (如 50 m), 其加速度放大系数等值线随斜坡高度近乎呈线性增加, 图中表现为放大系数等值线垂直于坡面, 此时加速度放大系数在坡顶附近达到最大值



Max-加速度放大系数最大值

图 5 不同高度斜坡加速度放大系数等值线图
Fig. 5 Contours of slope acceleration amplification coefficients with different slope heights

(图 5a); 当斜坡高度增加 (如 150 m、300 m), 加速度放大系数等值线图不再呈线性变化, 而是由坡脚向坡顶先减后增, 此时坡体内部出现一个极小值区域, 坡脚附近的等值线也从与坡面垂直转变为斜交; 当斜坡高度进一步增大 (如 900 m), 坡面附近放大系数等值线表现为平行于坡面, 坡体内部出现数量众多的闭合区域。闭合区域在坡内平行于底面方向, 坡面附近则变为平行于坡面展布 (图 5d)。此时沿坡面向上加速度变化规律也更为复杂, 呈增减反复出现的节律性变化。

坡面的放大效应主要是坡面加速度值明显大于坡内, 且该效应仅表现在坡高较高时。从图中可以看出, 其主要原因是等值线在斜坡高度较低时平行于坡底面而高度较大时转为平行于坡面造成的 (图 5a、5d)。

(2) 分析坡面监测点数据后可以发现 (图 6), 相对于坡中与坡脚, 坡顶的放大效果几乎一直存在, 表现为坡顶放大系数曲线几乎一直位于坡中及坡脚曲线之上, 与先前斜坡频响特征分析结果一致; 另外, 随着坡高增加, 三条放大系数曲线先表现出减小的趋势, 达到最低值之后三条曲线数值均有增加且坡顶曲线在 200 m 附近达到峰值 (图 6a 段), 此时的峰值即为坡体放大系数峰值 (图 6b 点); 当坡高超过 200 m 后三条曲线表现为先减小后在 400 m 到 600 m 之间重新放大的变化 (图 6c 段)。

对于加速度放大系数峰值而言, 其变化过程

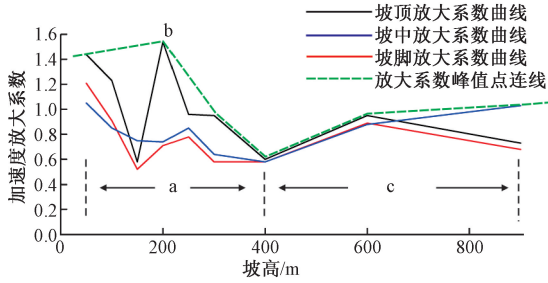


图 6 高陡斜坡不同位置加速度放大系数拟合曲线
Fig. 6 Fitting curves of acceleration amplification coefficients in different places of the high steep slope

并非随坡高恒定增加，而是随坡高增加达到峰值后（约 200 m）后转为减小并在 400 m 附近达到最低值；400 m 后加速度放大系数峰值随坡高重新增大（图 6c 段），但受模型材料阻尼影响，此后斜坡放大系数峰值将出现在坡中位置。数值上看，各点放大系数峰值存在以下关系：坡高 200 m (1.54) > 坡高 50 m (1.44) > 坡高 100 m (1.23)

> 坡高 300 m (0.95) > 坡高 600 m (0.95) > 坡高 900 m (0.73) > 坡高 400 m (0.6) > 坡高 150 m (0.58)。

3.2 坡角变化对动力响应规律的影响

对斜坡地震动力破坏的研究结果已经表明，坡角对斜坡失稳过程起到十分重要的作用。Parise and Jibson (2000) 通过对 1994 年加利福尼亚地震滑坡特征分析时发现，四分之三的斜坡破坏集中于坡角 30°~45°之间；王文沛等 (2015) 结合青川狮子梁斜坡地震动监测结果对斜坡动力响应特征进行了研究，发现斜坡顶加速度放大系数随坡角增加而增加。以上研究成果推进了坡角改变对斜坡动力响应影响的认识，但其影响的规律仍需进一步探究。

选取高度不同的两组斜坡（坡高分别为 100 m 和 900 m）并将其坡角由 30°扩展至 80°，绘制加速度放大系数等值线图（图 7）。

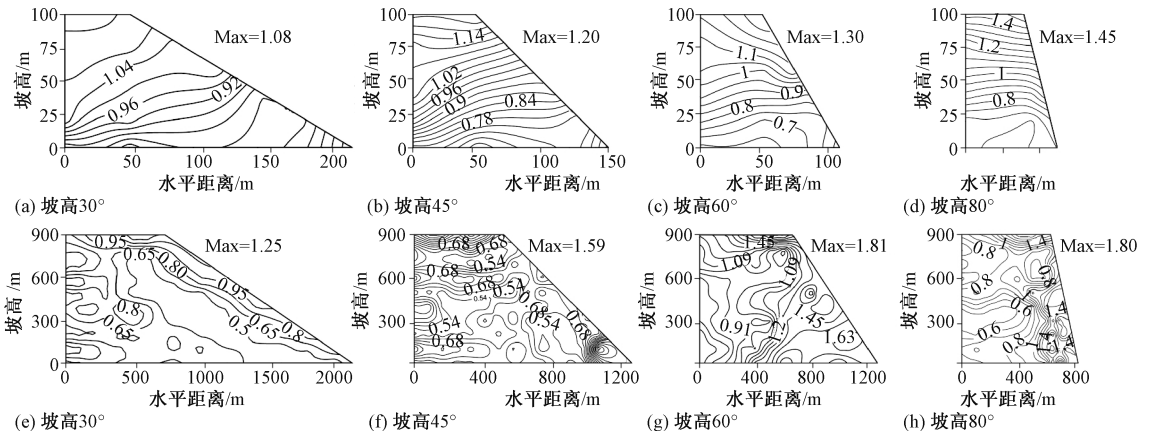


图 7 不同坡角下高陡斜坡加速度放大系数等值线图

Fig. 7 Contours of acceleration amplification coefficients at different angles of the high steep slopes

(1) 不论坡角如何变化，斜坡加速度放大系数等值线始终表现为平行于坡底面，沿坡面向上其放大系数值线性增加；而高度较大斜坡其放大系数等值线均呈坡面附近平行于坡面，坡内平行于坡底展布的闭合区域，如图 7a、7e。这表明，坡角改变并不影响斜坡动力响应的表现形式，仅在一定程度上影响加速度放大效应。

(2) 由于加速度放大系数等值线在不同坡角下的分布存在差异，对于 100 m 左右的斜坡，平行展部的等值线使其放大系数在水平方向上放大效果不明显。但在大于 100 m 的斜坡中，等值线分布形式发生改变，加速度水平放大现象逐步显现且坡角越大斜坡水平方向放大效果越强烈，表

现在坡角 30°时水平放大系数坡面与坡内仅相差 0.15 左右，但坡角 80°时该差值最大为 1.0（图 7e、7h）。

4 双面斜坡的动力响应规律分析

分析单面斜坡动力响应规律后发现，斜坡坡高和坡角变化对其动力响应结果影响显著，坡高的影响表现为斜坡动力响应表现形式的改变，坡角的影响使得斜坡对地震波的放大效果不同。文章以上述研究结果为基础，对双面坡的动力响应规律进行分析，结合西南山区双面斜坡失稳破坏现象，探究双面斜坡动力破坏机理。

4.1 双面斜坡动力响应规律分析

与单面斜坡模型设置方法一致, 坡高对斜坡动力响应规律影响研究以坡角 45° 、坡高 100 ~ 400 m、顶宽 0 ~ 坡高扩展的双面斜坡为对象, 坡角响应的研究则选取坡高 200 m、坡角 $30^\circ \sim 75^\circ$ 、顶宽为 0.1 倍坡高的双面坡为对象, 模型设置及监测点布置情况如图 8。输入波均选择上述频率为 4 Hz 的正弦波, 相关参数计算方法同上述单面斜坡。

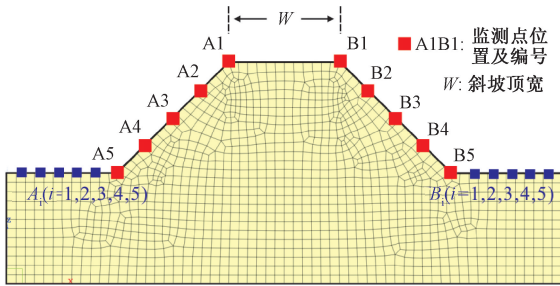


图 8 双面高陡斜坡计算模型及监测点布置
Fig. 8 The model and monitoring points of the double-sided high steep slope

通过斜坡加速度放大系数等值线图可以发现双面斜坡等值线分布规律与单面斜坡基本相似: 坡高较小时等值线分布均匀且稀疏, 其延伸方向近乎平行于坡底面, 如图 9a、9b; 当坡高增大后放大系数等值线走向略微改变, 尤其是在坡面附近, 放大系数等值线表现为近乎垂直于坡面, 此时双面坡坡肩部位开始出现等值线密集区且密集区加速度放大系数变化较快, 如图 9c、9d; 当斜坡高度继续增大后, 双面斜坡动力响应表现形式发生完全变化, 图中开始出现闭合区域 (极值区), 等值线也不再沿坡底面方向展布, 而是从坡脚沿坡面向上以极值区的形式交替出现, 坡肩和坡顶处等值线的密集程度进一步增大。

对坡角变化分析可以发现, 坡高恒定情况下, 不论坡角如何变化斜坡均表现为相同的放大形式, 即随坡高增大放大系数线性增加 (图 10); 但在坡角不断增大的过程中, 斜坡放大系数等值线由坡内均匀分布变为坡体上部密集下部稀疏, 且密集程度随坡角迅速增加, 表明坡角改变虽不影响斜坡的放大形式, 但斜坡对地震波的放大程度却发生了明显变化。从数值上可知 (图 11), 在所计算的坡角范围内 ($30^\circ \sim 75^\circ$), 坡顶加速度放大系数受坡角变化影响程度最大并在 75° 时取得最大值 4.64。

通过以上分析可知, 双面斜坡在坡体形态改

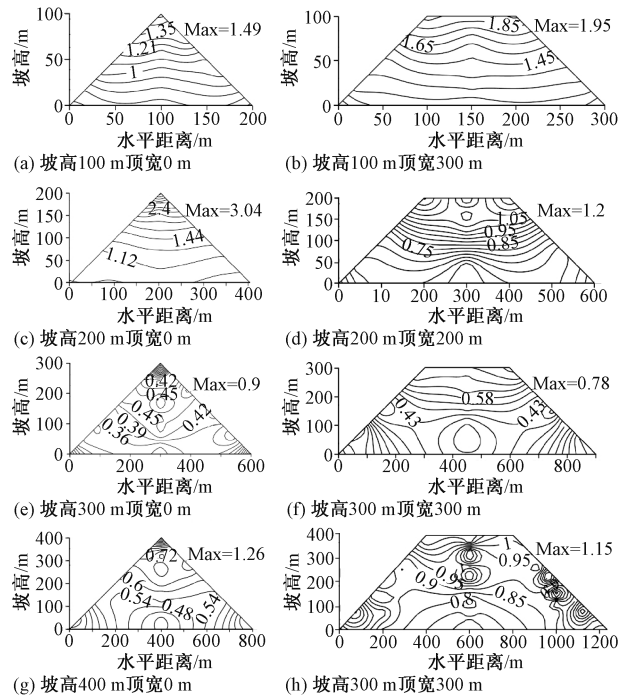


图 9 不同坡高及顶宽双面斜坡加速度放大系数等值线图
Fig. 9 Contours of acceleration amplification coefficients of double-sided slopes with different heights and widths

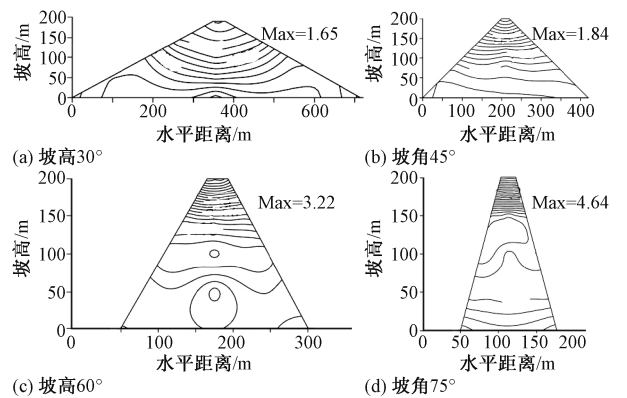


图 10 不同坡角双面斜坡加速度放大系数等值线图
Fig. 10 Contours of acceleration amplification factors of double-sided slopes with different angles

变情况下的动力响应规律与单面斜坡极为相似, 但双面斜坡在坡角改变时的响应程度较单面坡更大, 其坡顶处的放大程度也更加明显。这种明显的放大现象与斜坡坡形有着密切联系: 地震波传入坡体后将在边界部位发生折射、反射现象, 而坡角增大后坡顶部位空间变小, 地震波在狭小区域内的反复折射叠加使其充分震荡, 导致加速度明显大于斜坡其他部位, 表现在等值线图中即为

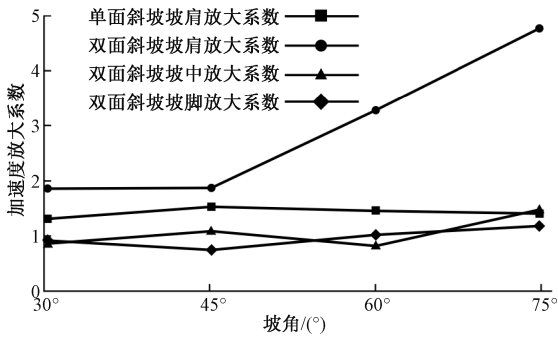


图 11 双面及单面斜坡加速度放大系数随坡角变化拟合曲线

Fig. 11 Fitting curves of acceleration amplification coefficients with the change of slope angles of double and single-sided slopes

等值线的密集分布, 放大系数值异常增大。因此相比于单面坡, 陡倾的双面斜坡在地震作用下响应更剧烈, 从而更易失稳破坏。

4.2 斜坡顶宽对动力响应的影响

在以往对斜坡动力破坏研究过程中, 除上述“陡峭斜坡”失稳破坏外, 单薄山脊破坏也是极为常见的斜坡动力破坏现象。基于这种现象, 以 200 m 双面斜坡顶宽为对象设置一系列对照组, 模拟顶宽变化对动力响应规律的影响并绘制坡面不同部位放大系数随坡顶宽变化曲线。

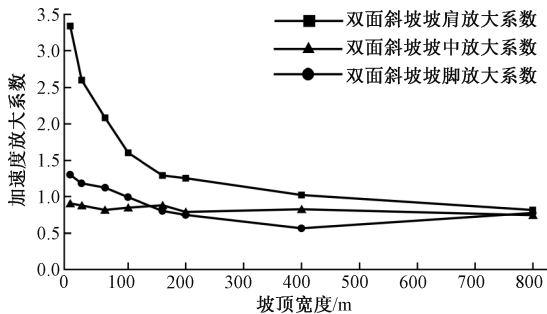


图 12 坡面加速度放大系数随顶宽变化拟合曲线 (以坡高 200 m 为例)

Fig. 12 Fitting curves of acceleration amplification coefficients with the change of crest widths of slope surface (Taking 200 m slope as an example)

由图 12 中斜坡坡肩、坡中及坡脚三条曲线可以看出, 当坡顶宽度为 0 时, 斜坡坡肩放大系数达到 3.34, 为坡中放大系数的 2.6 倍、坡脚的 3.8 倍; 另外, 放大系数随斜坡顶宽增加整体表现为减小趋势, 且从数值上看坡肩附近放大系数及其减小幅度远大于坡中与坡脚, 表明斜坡坡肩部位对地震波放大效果更加显著, 受地形变化影响更敏感, 因而更易诱发失稳破坏。

当高度进一步增加后, 地震波在坡内传播过程中衰减作用增强, 斜坡加速度放大系数曲线趋于稳定, 不同部位加速度值逐渐接近, 高度及顶宽变化对斜坡加速度的影响不再明显。

文中研究内容仅针对均质斜坡, 斜坡岩性单一且未考虑岩层面、岩体结构面等软弱面, 研究对象与现实情况存在一定出入; 其次, 地震波输入方向在文中也未做充分考虑, 仅选取了水平向输入波, 无法解释现场调查中诸多竖向地震破坏现象。另外, 与已有研究结果相一致, 斜坡加速度放大系数并非随坡高一直增大, 而是在某一高度达到峰值后逐渐减小, 其原因可能与模型不断扩大所致的能量衰减有关。因此, 未来工作将弥补现有成果的不足, 针对不同岩性组合、不同结构面控制及不同方向输入波作用下的斜坡进行动力响应规律分析, 研究放大系数值的变化规律及机制, 完善该方面的研究内容。

5 结论

文章通过 FLAC^{3D} 有限差分方法分析了斜坡频响特征, 并对其进行不同坡面形态的动力响应规律研究, 最后以此为基础探究了西南山区典型双面斜坡失稳破坏的动力响应特点, 得到以下结论:

(1) 通过扩展不同频率 Ricker 子波输入坡体, 坡肩部位加速度值较坡脚产生明显放大, 但自坡脚到坡肩其变化过程为先减小后增加; 坡面附近加速度随输入波波频增加呈整体减小趋势, 说明坡面整体卓越频率处于较低水平, 为 1~4 Hz。

(2) 单面斜坡动力响应规律研究表明坡高决定斜坡动力响应形式, 体现在坡高增加使得斜坡加速度放大系数等值线由平行于坡底面的直线变为坡内的闭合极值区, 在数值上则是放大系数沿坡面向上线性增加变为增减重复出现的情况; 另外, 坡高增加使得斜坡在水平方向上的放大效果逐步显现, 主要是放大系数等值线走向随坡高增加发生改变; 从数值上看, 放大系数并非随坡高一直增加, 而是在某一高度达到峰值后逐渐减小, 可能与模型不断扩大所致的能量衰减有关。

(3) 坡角的变化并未导致斜坡动力响应形式的变化, 表现在对同等高度斜坡变换坡角其等值线走向及分布基本不变; 但坡角改变极大影响斜坡加速度放大效应, 使高度的放大系数值随坡角

增加而增大; 其次, 陡倾斜坡在水平方向上的放大程度更加明显, 尤其对于高陡斜坡, 其水平放大程度较低缓斜坡将有成倍增加。

(4) 对于双面斜坡, 其动力响应规律与单面斜坡基本相似。受控于坡体形态, 地震波在双面斜坡坡顶及坡肩附近更易发生反射及折射现象, 导致这些位置常常形成应力集中区, 出现更大程度的放大现象; 同时, 双面斜坡顶宽变化研究也说明, 山体顶宽越小, 其放大系数增加幅度越大, 单薄的山体加之成倍增大的加速度将是该类型双面斜坡失稳破坏的重要因素。

References

- ASHFORD S A, SITA N, LYSMER J, et al., 1997. Topographic Effects on the Seismic Response of Steep Slopes [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87 (3): 701-709.
- BOORE D M, 1972. A note on the effect of simple topography on seismic SH waves [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62 (1): 275-284.
- BOURDEAU C, HAVENITH H B, 2008. Site effects modelling applied to the slope affected by the Suusamy earthquake (Kyrgyzstan, 1992) [J]. *Engineering Geology*, 97 (3-4): 126-145.
- ÇELEBI M, 1987. 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*, 77 (4): 1147-1167.
- DI FIORE V. 2010. Seismic site amplification induced by topographic irregularity: results of a numerical analysis on 2D synthetic models [J]. *Engineering Geology*, 114 (3-4): 109-115.
- GELI L, BARD P Y, JULLIEN B, 1998. The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78 (1): 42-63.
- GUO X B, XIAO Z X, ZHANG Z C, 2001. Slope effect of blasting vibration [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 20 (1): 83-87. (in Chinese with English abstract)
- HARP E L, JIBSON R W, 2002. Anomalous concentrations of seismically triggered rock falls in Pacoima canyon: are they caused by highly susceptible slopes or local amplification of seismic shaking? [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92 (8): 3180-3189.
- HE Y L, LU S Y, 1998. A method for calculating the seismic action in rock slope [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 20 (2): 66-68. (in Chinese with English abstract).
- HE Y L, LU S Y, DUAN Y H, 1998. Seismic response analysis of gravity dam [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 14 (3): 32-36. (in Chinese with English abstract)
- Itasca Consulting Group Inc., 2005. *FLAC (fast Lagrange analysis of continua) slope user's guide (Version 5. 0)* [Z]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group Inc.
- LI N, WANG B Q, MEN Y M, et al., 2018. Study on dynamic response of landslide supported by pressure-type anchor under earthquake [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (4): 490-497. (in Chinese with English abstract)
- LUO Y H, 2011. Study on complex slopes response law under earthquake action [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- LYSMER J, KUHLEMEYER R L, 1969. Finite dynamic model for infinite media [J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 95 (4): 859-878.
- MEUNIER P, HOVIUS N, HAINES A J, 2007. Regional patterns of earthquake-triggered landslides and their relation to ground motion [J]. *Geophysical Research Letters*, 34 (20): L20408.
- MITANI Y, WANG F W, OKEKE A C, et al., 2013. Dynamic analysis of earthquake amplification effect of slopes in different topographic and geological conditions by using ABAQUS [M] //WANG F W, MIYAJIMA M, LI T D, et al. *Progress of Geo-Disaster Mitigation Technology in Asia*. Berlin: Springer, 469-489.
- PARISE M, JIBSON R W, 2000. A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake [J]. *Engineering Geology*, 58 (3-4): 251-270.
- QI S W, 2006. Two patterns of dynamic responses of single-free-surface slopes and their threshold height [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49 (2): 518-523. (in Chinese with English abstract)
- QI S W, WU F Q, SUN J Z, 2003. General regularity of dynamic responses of slopes under dynamic input [J]. *Science in China Series E Technological Sciences*, 33 (S1): 28-40. (in Chinese)
- WANG H Y, XIE L L, 2010. Effects of topography on ground motion in the Xishan park, Zigong city [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53 (7): 1631-1638. (in Chinese with English abstract)
- WANG W P, LI B, FENG Z, et al., 2019. Failure mechanism of a high-steep rock slope considering site effect [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 40 (1): 297-304, 314. (in Chinese with English abstract)
- WANG W P, YIN Y P, LI B, et al., 2015. Spectral characteristics of dynamic response of slope with different angles of inclination [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34 (1): 121-128. (in Chinese with English abstract)
- YANG G X, WU F Q, DONG J Y, et al., 2012. Study of dynamic response characters and failure mechanism of rock slope under earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31 (4): 696-702. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, 2008. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan [J]. *Journal of Engineering Geology*, 16 (4): 433-444. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, WANG W P, 2014. Researches on seismic landslide stability analysis [J]. *Journal of Engineering Geology*, 22 (4): 586-600. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG D, WU Z H, LI J C, et al., 2013. An overview on earthquake-induced landslide research [J]. *Journal of Geomechanics*, 19 (3): 225-241. (in Chinese with English abstract)

- ZHANG Y S, LEI W Z, SHI J S, et al., 2008. General characteristics of 5. 12 earthquake-induced geohazards in Sichuan [J]. *Journal of Geomechanics*, 14 (2): 109-119. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU X T, HAN J L, SHI F G, et al., 2014. Numerical simulation for amplification effect of topography and geomorphology to seismic waves [J]. *Journal of Engineering Geology*, 22 (6): 1211-1220. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 郭学彬, 肖正学, 张志呈. 2001. 爆破振动作用的坡面效应 [J]. *岩石力学与工程学报*, 20 (1): 83-87.
- 何蕴龙, 陆述远. 1998. 岩石边坡地震作用近似计算方法 [J]. *岩土工程学报*, 20 (2): 66-68.
- 何蕴龙, 陆述远, 段亚辉. 1998. 重力坝地震动力响应分析 [J]. *世界地震工程*, 14 (3): 32-36.
- 李楠, 汪班桥, 门玉明, 等. 2018. 压力型锚杆支护滑坡的地震动力响应特性研究 [J]. *地质力学学报*, 24 (4): 490-497.
- 罗永红. 2011. 地震作用下复杂斜坡响应规律研究 [D]. 成都: 成都理工大学.
- 祁生文, 伍法权, 孙进忠. 2003. 边坡动力响应规律研究 [J]. *中国科学 E 辑 技术科学*, 33 (S1): 28-40.
- 祁生文. 2006. 单面边坡的两种动力反应形式及其临界高度 [J]. *地球物理学报*, 49 (2): 518-523.
- 王海云, 谢礼立. 2010. 自贡市西山公园地形对地震动的影响 [J]. *地球物理学报*, 53 (7): 1631-1638.
- 王文沛, 殷跃平, 李滨, 等. 2015. 不同坡角斜坡动力响应频谱特征研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 34 (1): 121-128.
- 王文沛, 李滨, 冯振, 等. 2019. 考虑场地效应的高陡岩质斜坡地震失稳机制 [J]. *岩土力学*, 40 (1): 297-304, 314.
- 杨国香, 伍法权, 董金玉, 等. 2012. 地震作用下岩质边坡动力响应特性及变形破坏机制研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 31 (4): 696-702.
- 殷跃平. 2008. 汶川八级地震地质灾害研究 [J]. *工程地质学报*, 16 (4): 433-444.
- 殷跃平, 王文沛. 2014. 论滑坡地震力 [J]. *工程地质学报*, 22 (4): 586-600.
- 张铎, 吴中海, 李家存, 等. 2013. 国内外地震滑坡研究综述 [J]. *地质力学学报*, 19 (3): 225-241.
- 张永双, 雷伟志, 石菊松, 等. 2008. 四川 5.12 地震次生地质灾害的基本特征初析 [J]. *地质力学学报*, 14 (2): 109-116.
- 周兴涛, 韩金良, 施凤根, 等. 2014. 地形地貌对地震波放大效应数值模拟研究 [J]. *工程地质学报*, 22 (6): 1211-1220.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

