

doi:10.3799/dqkx.2011.121

汶川震中岩浆岩高边坡破坏模式与崩塌机理

胡新丽, 唐辉明, 朱丽霞

中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 汶川 8.0 级大地震触发了大量岩石边坡崩塌次生地质灾害, 不同岩性及结构的岩质高边坡, 强震作用下的破坏机理不同, 震中映秀岩浆岩高边坡在强震中破坏严重, 因此急需开展其破坏机理的研究。以震中映秀典型高边坡崩塌—虎嘴崩塌为研究对象, 在工程地质条件研究的基础上, 采用结构面统计模拟方法, 深入分析岩浆岩边坡的结构面组合特征, 通过赤平投影法初步确定了该类边坡的破坏模式: 由 3 组主控结构面相互贯通的双平面滑动。恢复老虎嘴岩质边坡在地震前的原始坡形, 采用 2DUDEC 再现地震作用下老虎嘴岩质高边坡的破坏过程, 得出在地震作用下的破坏规律: 老虎嘴边坡在地震作用下的渐进破坏过程主要表现为边坡前缘岩体首先破坏, 坡顶岩体沿着 3 组结构面的切割贯通面也产生拉裂破坏发生崩塌, 最终整个边坡溃塌。在重力和地震的双重作用下坡顶破坏呈现出抛射状。

关键词: 汶川地震; 岩浆岩高边坡; 崩塌破坏机理; 离散单元法; 工程地质。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2011)06-1149-06

收稿日期: 2011-09-02

Collapse Mode and Mechanism of High Magmatite Rock Slope in Wenchuan Epicentral Area

HU Xin-li, TANG Hui-ming, ZHU Li-xia

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Wenchuan earthquake of magnitude of 8.0 triggered a large amount of rock slope collapse. In Yingxiu, many high magmatite rock slopes collapsed when Wenchuan earthquake struck, which resulted in huge damage. So it is urgent to study the collapse mechanism. This study takes Laohuzui collapse, a typical high slope collapse located at Yingxiu, the Wenchuan earthquake epicenter, as the object of this research. The engineering geological condition was investigated and the physical and mechanical parameters of rockmass and structural plane was determined. With the stereographic projection method using the discontinuity network simulation results, the basic failure modes of the slope was obtained, which is dual-plane sliding mainly due to the interconnected three group joints. Re-establishing the Laohuzui high slope model before earthquake, the process of dynamic response on the rock slope under earthquake was simulated by using 2DUDEC, and the destruction and collapse mechanism was analyzed. The main conclusion is that the Laohuzui slope collapse is a progressive failure. At first, the tensile failure took place in the slope toe, then the slope top would be subject to tensile failure followed by the front surface failure along the cut-through plane by three group joints, which resulted in the whole slope collapse. The slinging failure took place at the slope top under the seismic and gravity action condition.

Key words: Wenchuan earthquake; high magmatite rock slope; collapse mechanism; discrete element method; engineering geology.

强震作用下的边坡崩塌破坏机理动力学过程复杂, 与一般的边坡破坏不同。吴其伟(1983)、Keefers(1984)、Ling and Cheng(1997)、陶连金等(2001)、Siad(2003)、许向宁和王兰生(2005)对地震作用下

斜坡的崩塌机理和动力稳定性先后进行了研究。刘汉龙等(2003)、祁生文(2004)、陈玲玲等(2004)、秋仁东等(2007)和杨庆华等(2008)对岩质边坡地震动力特征、动力响应过程的分析方法、理论和动力规律

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40872175); 国家重点基础研究发展计划“973”课题(No. 2011CB710604); 中国地质调查局项目(No. 1212010914036)。

作者简介: 胡新丽(1968—), 女, 博士, 教授, 从事岩土工程稳定性评价、地质灾害防治设计教学与科研工作。E-mail: huxinli@cug.edu.cn

进行了探索和总结.

汶川地震发生后,郑颖人等(2009)运用FLAC3D软件对地震边坡破坏机制进行数值分析,结果表明地震边坡的破坏由边坡潜在破裂区上部拉裂破坏与下部剪切破坏共同组成,而不是剪切滑坡破坏.陈建君(2009)对汶川地震山区的斜坡进行Flac3D地震动力响应分析,结合一定的物理振动试验,认为地震作用下斜坡的破坏主要是由于斜坡体首先产生拉裂破坏,带动变形体沿水平方向运动,产生倾向与运动方向一致的拉、剪裂缝,这些拉、剪裂缝不断发展贯通导致崩塌.

汶川地震区岩性多样、斜坡结构复杂,地质构造复杂,地震作用下岩质高边坡崩塌机理复杂多样.在汶川震中映秀,广泛分布俗称“彭灌杂岩”的岩体,该岩层体系由细粒黑云二长花岗闪长岩和油桌坪单元细粒辉长岩岩脉侵入体构成,杂岩形成于晚太古代—元古代.汶川地震的震中位于“彭灌杂岩”内,龙门山最高的九顶山主峰也由“彭灌杂岩”组成.汶川强震作用下,该地层中发育的高边坡发生强烈崩塌破坏,阻断了都汶公路,危害极大,由于岩质高边坡主要由结构面控制,其破坏机理不同于受层面控制的沉积岩边坡,因此,急需开展该类高边坡典型破坏模式和崩塌机理的研究.

本文以震中映秀典型岩质高边坡崩塌—虎嘴崩塌为研究对象,在工程地质条件研究的基础上,确定边坡岩石、结构面物理力学性质;依据岩质结构面统计模拟结果,通过赤平投影法初步分析了边坡的破坏模式.恢复老虎嘴岩质边坡在地震前的原始坡形,采用2DUDEC对地震作用下老虎嘴岩质高边坡的破坏过程,得出老虎嘴在地震作用下的破坏规律及形成机理,为地震灾区类似的边坡破坏研究提供参考依据.

1 岩质老虎嘴崩塌工程地质条件

老虎嘴崩塌体位于震中映秀镇以北约 2.8 km 的岷江左岸都汶路 K28+290~K29+020 处,汶川“5·12”大地震中,由于高烈度的地震作用,老虎嘴岩质高边坡产生崩塌,方量巨大,曾一度堵塞岷江,产生堰塞湖,给下游的渔子溪水电站造成巨大的威胁.老虎嘴崩塌体呈半锥形体状,垂直于公路走向延伸,其延伸长度约为 450 m,宽约 260 m.

崩塌体规模巨大,横切河谷,据不完全统计,仅河谷内的堆积体规模就高达 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$.堆积体主要

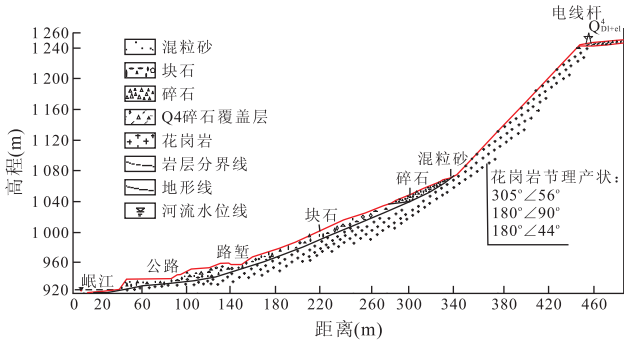


图 1 老虎嘴崩塌体工程地质剖面
Fig. 1 Laohuzui collapse profile

由大小形状各异的石块及细砂构成,其表面呈层状分布,由崖壁至河谷,崩塌体表面坡体物质粒径呈增大趋势,粒径最小的约 2 mm,最大的高达 2 m,其中还可见大体积巨石堆积.老虎嘴岩质高边坡的崩塌体堆积区依次分为混粒砂堆积区、碎石堆积区、块石堆积区及大块石堆积区.老虎嘴主崩滑方向 84°,坡体岩性主要为花岗闪长岩,坡面有崩塌堆积体覆盖,覆盖层厚度较大,且坡面倾角陡倾.

老虎嘴岩质高边坡(图 1)基岩由坚硬岩浆岩组成,主要为关山沟单元中的细粒黑云二长花岗闪长岩构成,边坡下部沿 213 国道的公路内侧及崩塌堆积体的上部可见少量的油桌坪单元细粒辉长岩岩脉侵入体.在山顶有第四系残坡积物的堆积,厚度约 1~2 m,植被发育,而在山脚靠近岷江边上也发育有冲洪积物的堆积体.

2 岩质高边坡破坏模式

2.1 结构面发育特征

根据野外测得 201 条结构面,使用结构面分析软件 DIPS 生成砂岩结构面极点图(图 2).

老虎嘴岩质高边坡结构面的极点图表明,该边坡主要发育 3 组优势结构面,其产状分别为 I 组 286°∠52°、II 组 17°∠31°、III 组 106°∠19°.

2.2 边坡破坏模式分析

对于强烈地震岩质高边坡的破坏模式,依据复原的震前边坡临空面与结构面产状的赤平投影图进行初步判断.投影图采用下半球等面积投影法.震前临空面产状为 84°∠20°,与 3 组结构面的赤平投影关系见图 3.第 1 组主控结构面倾向与坡面倾向一致,而第 2 组及第 3 组倾向与坡面倾向相反.

老虎嘴斜坡体存在 2 组潜在滑动面:一是结构

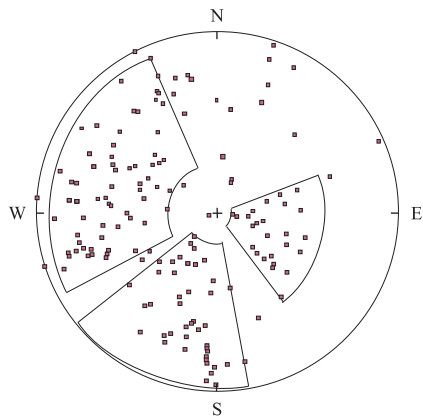


图 2 结构面极点
Fig. 2 Pole graph of rockmass structure

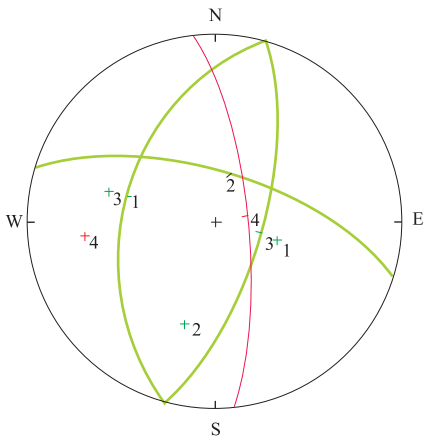


图 3 坡面与结构面赤平投影
Fig. 3 Stereographic projection of slope and structures

面Ⅰ组和Ⅲ组组成的滑动面,二是结构面Ⅱ和结构面Ⅲ组成的滑动面.其共同特征是结构面交点与坡面处于同侧,最不利的是结构面Ⅱ和结构面Ⅲ组成的滑动面,其交线倾向与坡面倾向一致,且倾角小于坡脚,构成双平面滑动的有利条件,加上地震力的诱导,形成双平面滑动.因此,岩浆岩组成的老虎嘴边坡的破坏模式为内部结构面相互贯通的双平面滑动.

3 岩浆岩高边坡崩塌破坏过程模拟

3.1 力学模型与参数

依据震前原始地形图和崩塌堆积体体积及其松散系数,对地震前老虎嘴原始地形坡面进行了恢复,模型底部长 491.2 m、高度 426.2 m.将 3 组主控结构面投影到主剖面图中,1 组倾角为 50°,而另外两组倾角分别为 13°与 17°,由于两组节理倾角比较接

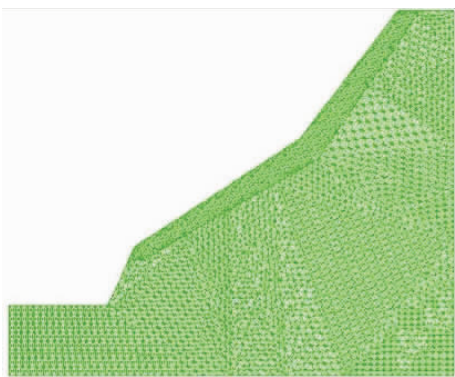


图 4 网格剖分
Fig. 4 2D numerical simulation meshes

近,为了便于计算,笔者选取其中的 1 组作为模拟参数,取倾角为-20°(图 4).

底部设置为粘性边界、两侧为自由边界.采用莫尔库伦塑性本构模型进行计算.数值模拟力学参数见表 1 和 2.

根据国家地震局成都台(CD2)的地震监测记录,选取其中的 40~70 s 区间的地震波记录作为此次地震动态模拟的地震波输入.采用 Seismosignal 软件进行滤波和线性基线校准,滤波范围为 0.1~10 Hz,最终得到所需的地震波形.地震波主要分 3 个方向,分别为水平东西向、水平南北向及垂直向 3 个方向地震波.水平东西向加速度谱、垂直向速度谱如图 5 所示.

将 3 个方向的加速度、速度及位移时程曲线投影至边坡剖面方向,对于二维模拟,忽略剖面纵切方向的地震波时程,选取投影后的横向 x 方向和竖直 y 方向地震波进行地震输入.对于粘性边界,先将地震荷载的速度时程进行速度—应力时程转换,然后施加在底部粘性边界上.水平和垂直应力时程输入见图 6.

表 1 岩石力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock							
岩性	密度 (g/cm ³)	变形模 量(GPa)	体积模 量(GPa)	内摩擦 角(°)	内聚力 (MPa)	剪胀 角(°)	拉伸强 度(MPa)
蚀变细粒 闪长岩	2.88	35.53	21.32	55	25	10	8

表 2 结构面强度参数

Table 2 Mechanical parameters of structural surface						
岩性	法向刚度 (MPa/cm)	切向刚度 (MPa/cm)	内摩擦角 (°)	内聚力 (MPa)	剪胀角 (°)	拉伸强度 (MPa)
结构面	51	46	38	0.06	0	0

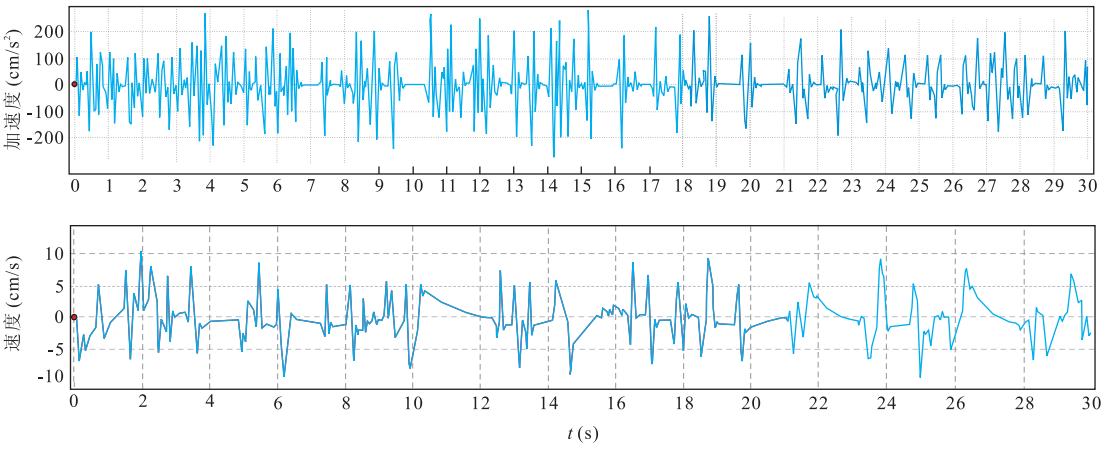


图 5 地震波加速度谱和速度谱

Fig. 5 Accelerated velocity curve and velocity curve of earthquake wave

a. 东西向地震波 0.1~10 Hz 滤波、线性基线校准后加速度谱;b. 竖向地震波 0.1~10 Hz 滤波、线性基线校准后速度谱

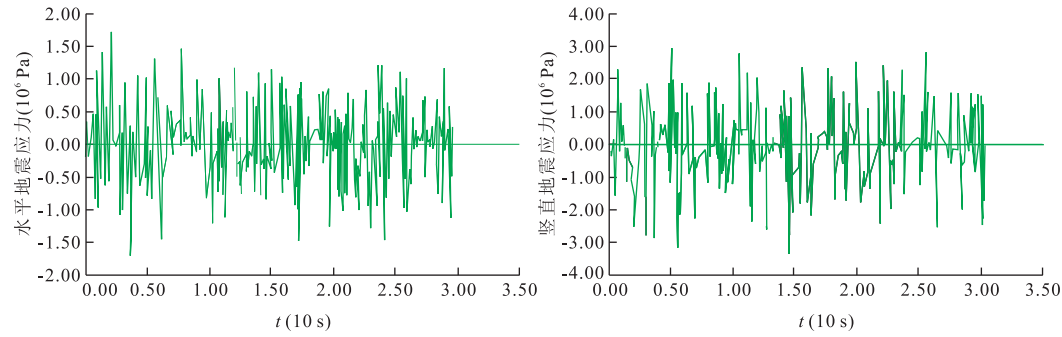


图 6 水平和竖直地震应力时程输入

Fig. 6 Horizontal and vertical seismic stress process input

3.2 边坡位移时程分析

选取地震作用时,坡顶、坡脚 x 、 y 方向位移变化见图 7。

从图 7a 和图 7b 可以看出,坡脚 x 向位移与 y 向位移都是先朝着坐标的正方向运动,然后逐渐都趋向于向负向运动,说明坡脚的岩体向着坡体的正前下方运动,破坏趋势明显。

从图 7c 和图 7d,可以看出,坡顶 x 向位移先是趋于其坡体内部运动,在地震力的长时间作用下,在 $t=24\text{ s}$ 附近时转向,说明此时的坡顶岩体开始产生破坏,向着临空面发生位移;坡顶 y 向的位移则呈向上增大,说明地震力对坡顶岩体的作用表现为坡顶岩体向上运动。因此,根据 x 向与 y 向位移的发展趋势,说明坡顶岩体可能会发生向着临空面抛射的现象,导致坡体崩塌破坏。

岩浆岩高边坡的破坏主要表现为结构面控制的坡脚与坡顶附近岩体的破坏,坡顶岩石的破坏呈抛射状。

3.3 边坡破坏分析

地震荷载输入后不同时段边坡破坏形式分布见图 8。

当 $t=10\text{ s}$ 时(图 8a)边坡表面出现拉裂破坏,并逐渐由边坡底边界向坡顶延伸,此时为地震作用的初期,主要是由于地震作用施加于模型底部边界上,所以底部边界首先遭受到地震对其的拉伸、剪切作用。

当底部边界上的岩体达到屈服极限,逐步趋于稳定时,这种拉伸、剪切作用伴随着地震波在边坡内部的传播向边坡顶部或坡面和潜在滑动面过渡,如图 8b 所示,边坡此时表现为前缘有强烈的拉裂破坏作用,在边坡顶部也存在这种拉裂作用,但是幅度较小。

当 $t=30\text{ s}$ 时(图 8c),边坡表现为坡面的强烈拉裂作用,在边坡内部也存在着局部的拉裂作用。

结合位移时程分析,我们可以判断,老虎嘴边坡的破坏是由于内部结构面在地震往返荷载作用下相

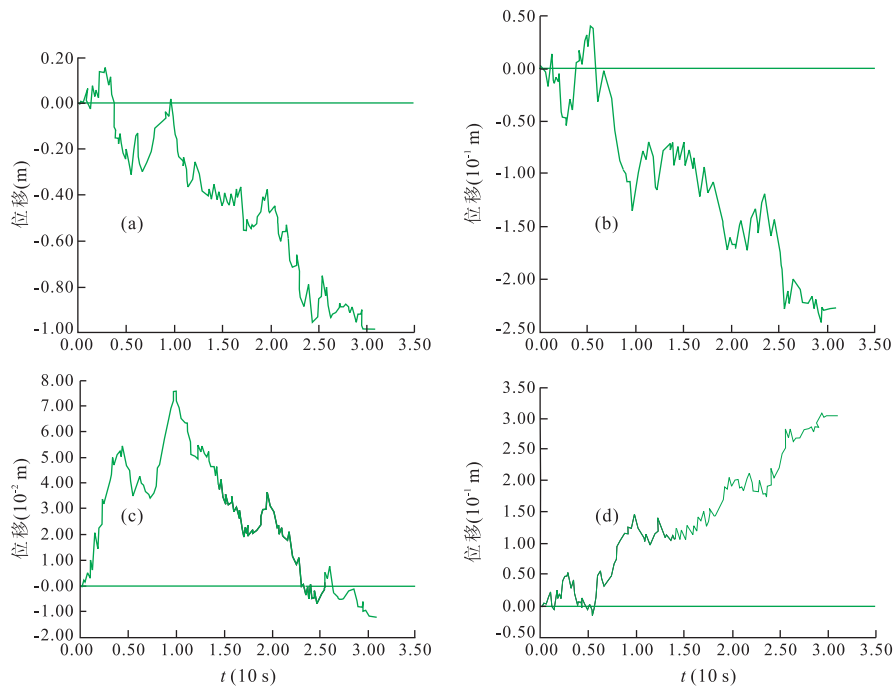


图 7 坡脚和坡顶位移变化

Fig. 7 Displacement curve with time at slope bottom and slope top
a. 坡脚 x 方向; b. 坡脚 y 方向; c. 坡顶 x 方向; d. 坡顶 y 方向

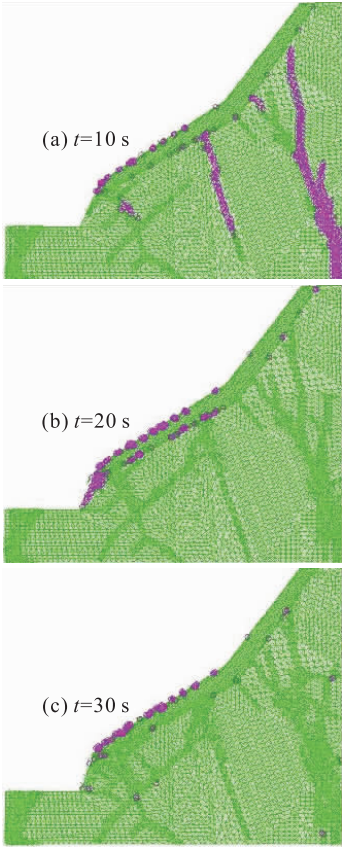


图 8 边坡破坏分布

Fig. 8 Destruction distribution in slope

互贯通切割岩石块体,在地震作用的驱使下,由于边坡前缘遭受拉裂作用导致前缘坡面首先遭到破坏,在前缘失稳的情况下,边坡顶部随之也发生破坏,并发生抛射现象.最终破碎岩体在地震作用下向临空面产生双平面滑动,导致崩塌灾害产生的.

4 结论

(1)根据结构面的赤平投影图,分析岩浆岩老虎嘴高边坡的 3 组主控结构面走向与坡向的关系,研究表明岩浆岩高边坡的破坏是由内部的 3 组主控结构面相互贯通,从而发生双平面滑动导致的.岩浆岩高边坡的破坏模式是双平面滑动.

(2)依据边坡在地震过程中的位移、破坏区变化,详细分析了岩浆岩岩质高边坡在地震作用下的破坏过程.根据其变化趋势,得出老虎嘴边坡在地震作用下的破坏主要表现为坡脚附近岩体和坡顶岩体的拉裂破坏,尤其是坡顶岩体,在破坏时呈现出抛射状.

References

Chen, J. J., 2009. The analysis of seismic dynamic response of slopes in mountains with complex geological back-

- grounds (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Chen, L. L., Chen, M. Z., Qian, S. G., 2004. Stability analysis of high-steep rocky slope under earthquake loads. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 21(1): 33—35 (in Chinese with English abstract).
- Keefer, D. K., 1984. Landslides caused by earthquake. *Geological Society of America Bulletin*, 95(4): 406—421.
- Ling, H. I., Cheng, A. D., 1997. Rock sliding induced by seismic force. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(6): 1021—1029.
- Liu, H. L., Fei, K., Gao, Y. F., 2003. Time history analysis method of slope seismic stability. *Rock and Soil Mechanics*, 24(4): 553—556, 560 (in Chinese with English abstract).
- Qi, S. W., 2004. Slope dynamic responses analysis (Dissertation). Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Qiu, R. D., Shi, Y. C., Fu, C. H., 2007. General laws of dynamic responses of the high slopes under horizontal dynamic input. *World Earthquake Engineering*, 23(2): 131—138 (in Chinese with English abstract).
- Siad, L., 2003. Seismic stability analysis of fractured rock slopes by yield design theory. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(3): 203—212.
- Tao, L. J., Su, S. R., Zhang, Z. Y., 2001. Dynamic stability analysis of jointed rock slope. *Journal of Engineering Geology*, 9(1): 32—38 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Q. W., 1983. The influence of earthquake on the natural slope stability in mountainous regions. *Journal of Mountain Research*, 1(1): 27—34 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. N., Wang, L. S., 2005. On the mechanism of slope deformation-failures and their distribution characteristics in a high earthquake-intensity area. *Journal of Engineering Geology*, 13(1): 68—75 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q. H., Yao, L. K., Ren, Z. M., et al., 2008. Centrifugal model test on dynamical characteristics of landslides of loose slope under seismic loading. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(2): 368—374 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. R., Ye, H. L., Huang, R. Q., 2009. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(8): 1714—1723 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈建君, 2009. 复杂山区斜坡的地震动力响应分析 (硕士论文). 成都: 成都理工大学.
- 陈玲玲, 陈敏中, 钱胜国, 2004. 岩质陡高边坡地震动力稳定分析. 长江科学院院报, 21(1): 33—35.
- 刘汉龙, 费康, 高玉峰, 2003. 边坡地震稳定性时程分析方法. 岩土力学, 24(4): 553—556, 560.
- 祁生文, 2004. 边坡动力反应分析 (博士后论文). 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 秋仁东, 石玉成, 付长华, 2007. 高边坡在水平动荷载作用下的动力响应规律研究. 世界地震工程, 23(2): 131—138.
- 陶连金, 苏生瑞, 张倬元, 2001. 节理岩体边坡的动力稳定性分析. 工程地质学报, 9(1): 32—38.
- 吴其伟, 1983. 地震对山区自然斜坡稳定性的影响. 山地研究, 1(1): 27—34.
- 许向宁, 王兰生, 2005. 岷江上游叠溪地震区斜坡变形破坏分区特征及其成因机制分析. 工程地质学报, 13(1): 68—75.
- 杨庆华, 姚令侃, 任自铭, 等, 2008. 地震作用下松散体斜坡崩塌动力学特性离心模型试验研究. 岩石力学与工程学报, 27(2): 368—374.
- 郑颖人, 叶海林, 黄润秋, 2009. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨. 岩石力学与工程学报, 28(8): 1714—1723.