

地震作用下黄土边坡动力响应数值分析

言志信^{1,2}, 曹小红^{1,2}, 张刘平^{1,2}, 张海东^{1,2}

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000; 2. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 利用 FLAC^{3D} 软件对某三级黄土边坡进行了动力反应分析。首先分析了静力作用下该黄土边坡剪应变增量和坡面、坡内、坡顶不同监测点的位移; 在此基础上进行动力分析, 得出黄土边坡地震动力响应规律。研究结果表明, 静力作用下坡面上水平向位移明显大于垂直向位移, 水平向位移从坡底向上逐渐减小; 坡面处位移较大, 位移在每级坡脚稍向上一定范围内达到最大值; 地震作用下黄土边坡剪应变增量由坡脚稍向上部位开始向周围扩展, 范围明显增大, 且随地震持时的增加剪应变增量增幅较大; 塑性区变化显示该黄土边坡坡顶以拉破坏为主, 坡脚稍向上开始以剪破坏为主并伴有拉破坏。黄土边坡对地震波具有临空面放大效应, 地震波在坡体内传播过程中还具有滞后效应。

关 键 词: FLAC^{3D}; 黄土边坡; 地震作用; 动力响应

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

Numerical analysis of loess slope dynamic response under earthquake

YAN Zhi-xin^{1,2}, CAO Xiao-hong^{1,2}, ZHANG Liu-ping^{1,2}, ZHANG Hai-dong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;)

Abstract: Using the fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions (FLAC^{3D}) software, the dynamic response of a three terrace loess slope was analyzed. First, the shear strain of the loess slope, and the displacement of different monitoring points in the surface, inside and upside of the slope were analyzed under the static action. On this basis, the dynamic analysis was made; and the seismic response of loess slope was obtained. The results showed: under the static action, the horizontal displacement of monitoring points in the surface was significantly larger than the vertical displacement and decreased upward from the base of the slope; the larger displacement of the slope was in the surface and the displacement upward each terrace at the base slope slightly reached a maximum value within a certain range of the slope; under earthquake shear strain increment of loess slope began to expand from slightly upward the foot of the surrounding area, the scope of it significantly increased, and shear strain increment increased rapidly with the increase of duration; changes of the plastic zone indicated that the top of slope dominated by tensile failure, while the failure of the base slightly upward the foot of slope was shear failure, which was associated with tensile failure. Seismic wave has an amplification effect on the free surface of loess slope and a lag effect in the dissemination process.

Keywords: FLAC^{3D}; loess slope; earthquake; dynamic response

1 引 言

我国黄土分布面积为 63.53 万 km², 占全国陆地总面积的 6.63%, 其成因类型复杂、不同区域黄土差异性较大^[1]。我国又处于世界上两条最活跃的地震带之间, 往东为西太平洋地震带, 西南为地中海—喜马拉雅地震带, 新构造活动强烈。独特的地

理、地质条件和脆弱的地质环境决定了边坡稳定问题在我国特别突出。黄土地区城市、交通、能源、矿山和水利水电等工程建设得到迅速发展, 这些工程不同程度地涉及到与黄土相关的边坡问题。我国黄土地区大多处于地震区划的高烈度区, 地质条件复杂、经济落后。因此, 黄土边坡动力响应研究具有重要性、迫切性。

收稿日期: 2011-06-02

基金项目: 西部灾害与环境力学教育部重点实验室开放课题 (No. klmwde201005)。

第一作者简介: 言志信, 男, 1961 年生, 教授, 博导, 主要从事地质工程、边坡及地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: yzx10@163.com

通讯作者: 曹小红, 女, 1985 年生, 硕士, 主要从事边坡工程的研究工作。E-mail: cxhong09@163.com

目前,前人已经取得了一些边坡动力特性及地震动力响应的研究成果^[2-4],但对黄土边坡动力响应的研究则很少涉及^[5-8]。已有关于黄土边坡动力变形、破坏方面的研究中,动力多为循环荷载^[7-8],对地震作用下黄土边坡动力响应的研究尚不多见。本文对某三级黄土边坡,分析其地震动力响应。

2 黄土边坡地震动力响应数值模拟

2.1 数值模型建立

选取某三级黄土边坡,坡高为 20 m,从坡底向上坡比为 1:0.75、1:0.75、1:1,从坡脚至坡顶分级坡高依次为 8、8、4 m,中间设 2 m 平台^[9],图 1 为边坡模型、监测点布设情况,表 1 为土体物理力学参数。

FLAC^{3D} 软件计算时,设置该黄土边坡土体材料为弹塑性材料,并采用 Mohr-Coulomb 强度准则。

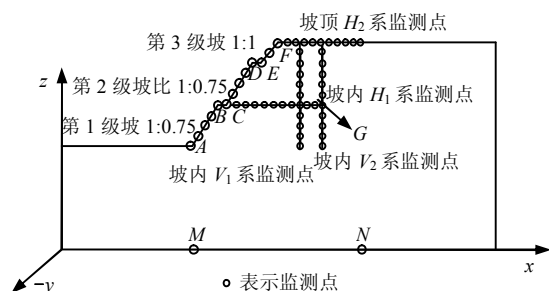


图 1 边坡模型及监测点示意图
Fig.1 Sketch of slope model and monitoring points

表 1 土体物理力学参数^[9]

密度 /(g/cm ³)	弹性模量 <i>E</i> /MPa	泊松比 μ	孔隙比 <i>e</i>	粘聚力 <i>c</i> /(kPa)	内摩擦角 φ /(°)
1.73	1.1	0.33	0.83	24.8	25

2.2 静力计算结果

坡面、坡顶、坡内监测点的设置如图 1 所示,与之对应的最大位移如表 2 所示,其中负值表示位移的方向与相应坐标轴的正方向相反,边坡土体向临空面方向移动。由图 2 可知,静力作用下下坡的剪应变增量最大值在第 1 级坡的坡脚稍向上部位,为 1.745×10^{-5} 。

从图 3 中可以看出,该黄土边坡 *X* 方向位移在靠近坡脚处最大。图 4 为坡面监测点 *X*、*Z* 方向位移沿坡高的变化曲线,从图中可以看出, *X* 方向位移明显大于 *Z* 方向位移; *X* 方向最大位移出现在每一级坡的坡脚稍向上部位,且第 1 级坡坡脚稍向上 1.5 m 左右及向坡内 2 m 左右的范围内位移较大; *X*

方向位移最大为 3.1 mm;该边坡第 1 级坡面 *X* 方向位移最大,第 2 级坡坡脚向上 2 m 监测点位移突然变大,即边坡最大位移出现在坡脚稍向上一定范围内。第 1 级坡坡面监测点 *X* 方向位移大于其上部两级坡面监测点的位移,而 *Z* 方向位移则是第 1 级坡面位移小于上面两级坡面位移。该黄土边坡土体孔隙比为 0.83,黄土本身的大孔隙性导致第 1 级坡面监测点 *Z* 方向位移向上有逐渐增大的趋势,而上面两级有减小的趋势;每级坡面监测点 *X* 方向位移从坡脚向上有减小的趋势。结合坡面位移和剪应变增量分析,静力作用下由于黄土颗粒空间排列结构发生变化或局部一些大孔隙被充填,整个坡体表现出毫米级位移,安全系数为 1.17,边坡稳定。

表 2 静力作用下坡面、坡顶、坡内监测点最大位移(单位: mm)

Table 2 The monitoring points maximum displacements within slope, slope surface and top of slope under static load (unit: mm)

方向	坡面			坡顶		坡内	
	1 级	2 级	3 级	<i>H</i> ₂ 系	<i>H</i> ₁ 系	<i>V</i> ₁ 系	<i>V</i> ₂ 系
<i>X</i> 方向	-3.1	-1.6	-1.2	-1.1	-1.1	-1.0	-0.8
<i>Z</i> 方向	-1.2	-1.3	-0.7	-0.5	-1.1	-0.3	-0.1

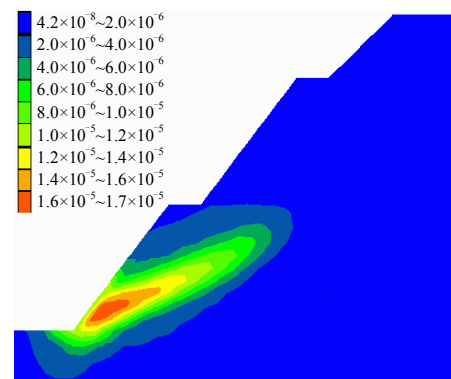


图 2 静力作用下剪应变增量云图
Fig.2 Shear-strain increment nephogram under static load

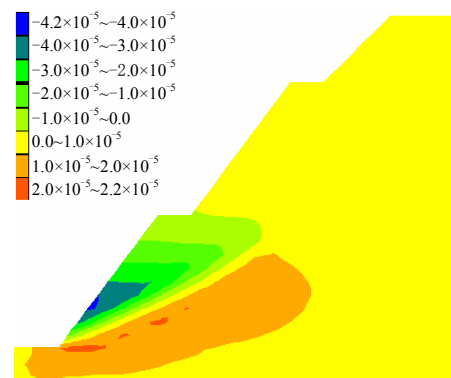


图 3 静力作用下边坡 *X* 方向位移云图
Fig.3 *X*-displacement nephogram of the slope under static load

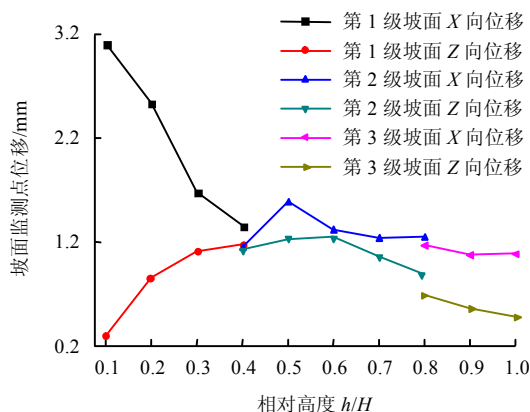


图4 坡面监测点X、Z方向位移

Fig.4 X and Z direction displacements of the surface slope monitoring points

注: h 为坡面监测点距 A 点的垂直距离 (m), H 为坡高 $H=20$ m。

2.3 地震动力输入

在静力计算的基础上进行动力分析, 模型侧边界设为自由场边界, 底面采用黏滞边界条件。设置局部阻尼, 阻尼系数为 0.15, 输入一余弦波, 加速度峰值为 $0.1g$, 输入的加速度时程曲线截取前 8 s, 如图 5 所示。坡底 M 、 N 监测点的加速度时程曲线与输入波形吻合良好, 说明地震波输入正确。

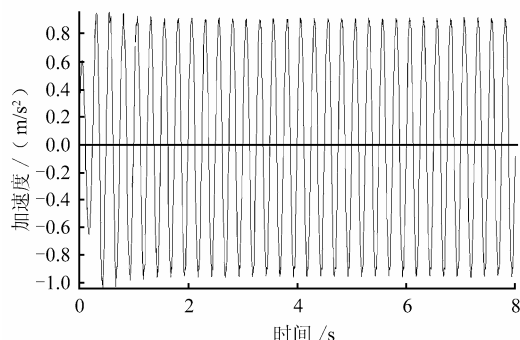


图5 输入波的加速度-时间曲线

Fig.5 Input wave acceleration-time curve

2.4 地震作用下黄土边坡破坏数值模拟分析

地震波在边坡中传播时, 土体介质、土体结构、坡面、自由面的存在会改变地震波的传播路径、频谱及振幅值, 导致坡面和坡顶的动力响应发生变化^[10]。不同坡角的坡面对地震波产生不同程度和不同方式的反射, 各种不同的地震波在岩土体中相互影响, 甚至波形叠加而导致应力场的变化^[11]。由塑性区中正在拉破坏、正在剪破坏、曾经拉破坏、曾经剪破坏、没有破坏等状态, 对比不同时刻该边坡塑性状态及剪应变增量, 可以得出边坡土体的破坏发展状况^[11-13]。

由图 6 不同时刻塑性区可知, 0.1、0.5、2 s 时坡顶曾经拉破坏、正在拉破坏区范围增大, 向坡前

临空面扩张; 到 2 s 时, 坡顶向下大范围显示曾经拉破坏, 2~4 s 时段内塑性区变化较为明显。在地震作用下该黄土边坡塑性区范围逐渐扩展, 坡顶的拉破坏范围扩大, 并逐渐向坡前临空面扩张; 地震作用起初每级坡脚以剪破坏为主, 并伴随有拉破坏, 随着地震作用时间的增长, 剪、拉破坏范围向坡顶和坡内扩大。由于黄土的地震易损性^[8], 起初稳定的黄土边坡在地震作用 4 s 后大部分区域已经发展成为曾经剪、拉破坏区。8 s 后的塑性状态只是各个状态的范围有所增大。

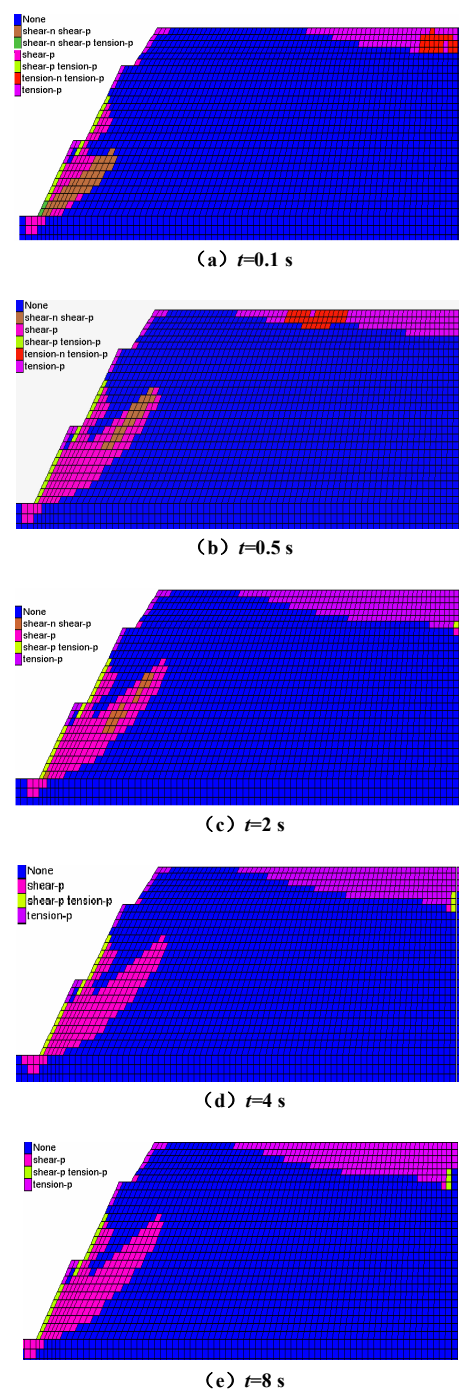


图6 不同时刻黄土边坡塑性区变化

Fig.6 Plastic zone changes at different times in loess slope

从图 7 可以看出,剪应变增量范围由坡脚逐渐向坡内、坡顶扩展,最大剪应变增幅较小。由图 8 可以看出,地震作用下,该黄土边坡剪应变增量范围随时间逐渐增大,增幅随时间增加而减小。不同时刻最大剪应变增量变化明显,增幅先快后慢,0.5 s 时为 1.568×10^{-3} , 32 s 时为 1.609×10^{-3} 。

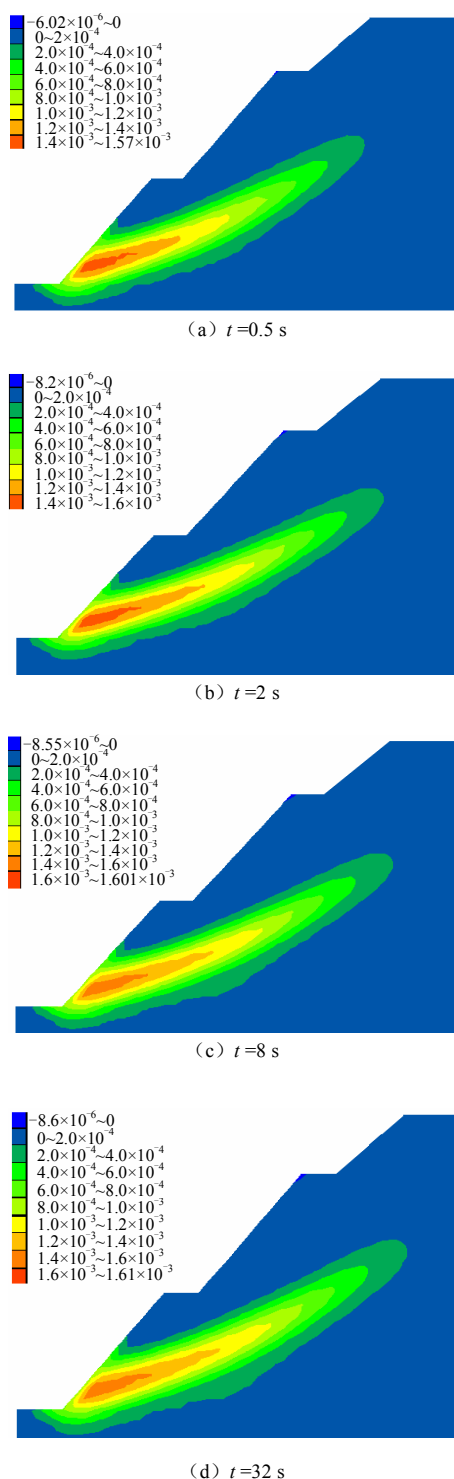


图 7 不同时刻黄土边坡剪应变增量云图
Fig.7 Shear strain increment nephogram of loess slope at different times

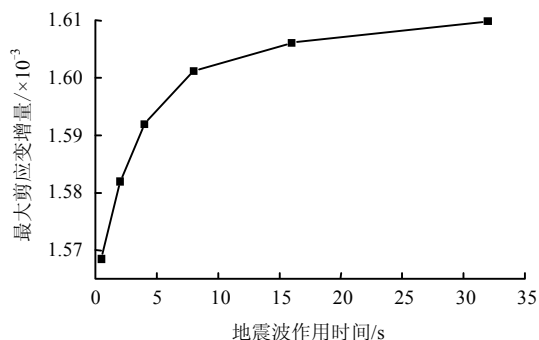


图 8 地震作用下不同时刻边坡最大剪应变增量
Fig.8 Maximum Shear strain increments under earthquake at different times

C 点(第 2 级坡脚)、G 点(第 2 级坡脚水平方向向坡内延伸 30 m 处)两监测点 X 方向加速度时程曲线如图 9 所示,可以看出,C 点加速度峰值明显大于 G 点,说明边坡临空面对地震波具有放大效应;C 点加速度峰值出现滞后于 G 点,4 s 以后 C 点周期基本是 G 点周期的两倍,随着时间增加滞后性越明显。

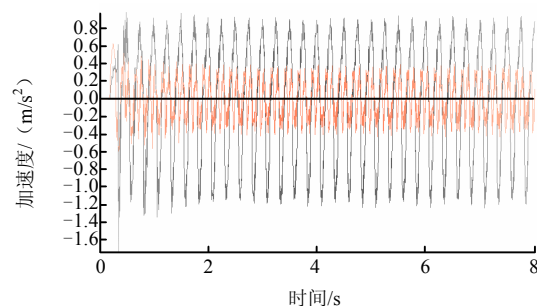


图 9 C、G 监测点 X 方向加速度时程曲线
Fig.9 X-Acceleration-time curve of monitoring points C and G

注:黑色线为 C 点加速度时程曲线;灰色为 G 点加速度时程曲线。

3 讨论与结论

3.1 讨论

文中并未验证该黄土边坡模型材料、强度准则的适应性,地震作用下模型底部采用局部阻尼,与实际情况更为接近。本文的重点是初步分析该黄土边坡地震动力反应,而并未探讨黄土边坡实际的弹性参数,这是本文的不足之处。

对于类似本文设定的三级黄土边坡,为减少黄土边坡变形、失稳、破坏造成的损失,可通过数值模拟手段来研究边坡的地震动力响应,进而揭示黄土边坡在地震作用下的变形、失稳规律,为黄土地区边坡工程的抗震设计及防震减灾工作提供参考。

3.2 结 论

(1) 静力作用下, 该黄土边坡坡面、坡顶、坡内各监测点的剪应变增量范围逐渐向坡内、坡顶扩展; 坡面监测点 X 方向位移明显大于 Z 方向位移, 每级坡靠近坡脚处 X 方向位移最大; 坡面各监测点 X 方向位移从坡脚开始向上递减, 而 Z 方向位移则是第 1 级坡面位移自坡脚向坡顶逐渐增大, 第 2、3 级坡面监测点 Z 方向位移向坡顶具有减小的趋势。

(2) 地震动力作用下该黄土边坡的剪应变增量随时间的增大而增大, 由坡脚开始向坡内和坡顶扩展, 且随着地震持时的增加, 剪应变增量范围明显扩展、增幅较大; 塑性区变化显示该黄土边坡坡顶以拉破坏为主, 坡脚以剪破坏为主, 并伴有拉破坏, 2~4 s 时段内该黄土边坡塑性状态发生明显变化; 黄土边坡在地震作用下的剪应变增量和塑性区发展在地震作用初期 (2~4 s) 表现出明显变化。

(3) 黄土边坡对地震波具有临空面放大效应, 地震波在坡体内传播过程中还具有滞后效应。

参 考 文 献

- [1] 严西华. 黄土高路堑边坡稳定性分析[D]. 西安: 长安大学, 2001.
- [2] 言志信, 蔡汉成, 王群敏, 等. 纵波作用下边坡动力响应规律研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 497—506.
YAN Zhi-xin, CAI Han-cheng, WANG Qun-min, et al. General law of dynamic response of slopes under seismic P-wave[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(4): 497—506.
- [3] 张学东, 言志信, 张森. ANSYS在岩质边坡动力响应分析中的应用[J]. 西北地震学报, 2010, 32(2): 117—121.
ZHANG Xue-dong, YAN Zhi-xin, ZHANG Sen. Numerical analysis of dynamic response of rock slope using ANSYS software[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 2010, 32(2): 117—121.
- [4] 蔡汉成, 言志信, 王群敏, 等. 交通荷载作用下边坡动力响应数值分析[J]. 西北地震学报, 2010, 32(3): 220—225.
CAI Han-cheng, YAN Zhi-xin, WANG Qun-min, et al. Numerical analysis of slope dynamic response under traffic loads[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 2010, 32(3): 220—225.
- [5] 王家鼎, 张倬元. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 670—674.
WANG Jia-ding, ZHANG Zhuo-yuan. A study of the mechanism of high speed loess landslide induced by earthquake[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 670—674.
- [6] 王家鼎, 白铭学, 肖树芳. 强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 445—449.
WANG Jia-ding, BAI Ming-xue, XIAO Shu-fang. A study of compound mechanism of earthquake-related sliding displacements on gently inclined loess slope[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 445—449.
- [7] 龙吉勇. Q3黄土的等效循环荷载及动力损伤变形特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [8] 谷天峰, 王家鼎, 任权, 等. 循环荷载作用下黄土边坡变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 3156—3162.
GU Tian-feng, WANG Jia-ding, REN Quan, et al. Study of deformation of loess slope under cyclic load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.1): 3156—3162.
- [9] 何丽君, 石玉成, 杨惠林, 等. 地震作用下黄土边坡稳定性分析[J]. 西北地震学报, 2009, 31(2): 142—147.
HE Li-jun, SHI Yu-cheng, YANG Hui-lin, et al. Analysis of stability of loess slope during different ground motion[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 2009, 31(2): 142—147.
- [10] YAN Z X, CAI H C, WANG Q M, et al. Finite difference numerical simulation of guided wave propagation in the full grouted rock bolt[J]. **Science China Technological Sciences**, 2011, 54: 1—8.
- [11] 祁生文, 伍法权, 孙进忠. 边坡动力响应规律研究[J]. 中国科学 E 辑技术, 2003, 33(增刊): 28—40.
QI Sheng-wen, WU Fa-quan, SUN Jin-zhong. Study of dynamic response of the slope[J]. **Science in China Series E**, 2003, 33(Supp.): 28—40.
- [12] 言志信, 蔡汉成, 王群敏, 等. 岩土体在地震作用下的破坏研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1621—1626.
YAN Zhi-xin, CAI Han-cheng, WANG Qun-min, et al. Research on failure of rock and soil mass under earthquake[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(10): 1621—1626.
- [13] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1714—1723.
ZHENG Ying-ren, YE Hai-lin, HUANG Run-qiu. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(8): 1714—1723.