不同厚度层状边坡动力响应的模型试验研究∞

王丽丽^{1,2},梁庆国^{1,2},孙 文^{1,2},刘贵应³

(1.甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室,甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学土木工程学院,甘肃 兰州 730070;3.中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司,重庆 400023)

摘要:采用振动台物理模拟试验方法,以4种不同覆土厚度的层状边坡模型为研究对象,水平输入 振幅逐渐增大的正弦波加速度,分析了结构面上覆不同厚度土层对动力作用下边坡的稳定影响。 研究了在动力作用下边坡的破坏位置和性质、破坏形式及最危险覆土厚度,验证了坡面放大效应与 高程的关系,采用 MIDAS/GTS 软件对模型试验进行振型分析,分析了模型边坡的自振频率与覆 土厚度的变化关系。试验结果表明:①模型破坏时最先出现的裂缝在边坡的中上部,且6 cm 覆土 厚度的模型对振动的响应最大,对应到实际工程中时 12 m 厚度土层覆盖的边坡是最应该注意防 护的。②不同厚度的土层破坏的形式不同:当土层厚度较薄时模型破坏较迅速,基本沿结构面发生 整体滑动破坏,且滑动呈现一定的流体特性;当覆土较厚时裂缝先在模型中上部出现,随着振动的 持续裂缝继续发展,最后发生整体性崩塌。③随着高程的增加峰值加速度总体呈放大趋势,但最大 值出现在边坡中上部而非坡顶,说明不仅均质边坡有加速度的高程放大效应,层状边坡也具有加速 度的高程放大效应。

关键词: 层状边坡; 模型试验; 加速度; 放大效应 中图分类号: TU435 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2013)03-0590-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0590

Model Test on Dynamic Response of Layered Slopes with Different Thicknesses

WANG Li-li^{1, 2}, LIANG Qing-guo^{1, 2}, SUN Wen^{1, 2}, LIU Gui-ying³

(1. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University,
 Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
 3. Chongqing Survey & Design Institute, China Railway Eryuan Engineering Group Co. LTD, Chongqing 400023, China)

Abstract: Using shaking table tests, we studied four layered slopes with different overburdened soils by increasing the horizontal sine acceleration time history as the input to analyze the impact of the thickness of the overburdened soils on the stability of the layered slopes. The failure position, property, pattern, and disadvantageous thickness of the overburdened soil were thoroughly investigated, and the relationship between the slope magnifying effect and the altitude was verified. A mode analysis was conducted for the test model using MIDAS/GTS to study the relationship between the self-vibration frequency and the thickness of the overburdened soil. The test results indicated the following: (1) The first failure plane was observed in the middle and the upper parts of the slope where the maximum response was found to be in the model slope in the case of

① 收稿日期:2013-04-06

基金项目:长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1139);中铁二院"西南地区铁路层状岩石边坡抗震优化技术研究"项目;兰州交通 大学"青蓝"人才工程(QL-08-19A)

作者简介:王丽丽(1989-),女,山东潍坊人,在读硕士,现主要从事岩土工程、地下工程等领域的科研工作. Email: wll_11539@163. com

the 6-cm-thick overburdened soil. (2) The failure patterns were different for the slopes with different thicknesses of the overburdened soil. In the case of the slope of a relatively thick overburdened soil, the fissures occurred first on the higher part of the slope and kept spreading until the entire slope collapsed in the avalanche mode. (3) With an increase in the altitude, the peak acceleration tended to increase as well, but the maximum value was observed in the middle and the upper parts instead of at the crest of the slope, which implied that the altitude magnifying effect occurred not only in the homogenous slope but also in the layered slope.

Key words: Layered slope; Model test; Acceleration; Amplification effect

0 引言

震后灾害调查表明,在基岩山区,边坡滑塌主要 发育在强度相对较大、节理发育的厚层(块状)岩体 中^[1]。而导致边坡滑塌的力主要可分为静力和动 力。其中动力比较复杂,包括爆破、地震、机械振动 等^[2],是造成边坡失稳破坏的重要因素。研究边坡 在地震作用下的动力响应特性对防灾减灾及灾后重 建工作具有重要意义^[3]。目前边坡地震稳定性分析 的常用方法有规范推荐的拟静力法、滑块分析法及 动力有限元法。其中动力有限元法能够反应地震作 用过程中的边坡受力变形特点,因而已经且逐渐成 为将来边坡动力稳定研究的主要手段。尽管在相似 关系和边界条件模拟等方面,振动台模型试验仍然 存在一些不足,但仍以其试验规模较大、可重复性和 可操作性强等方面的优势为广大研究人员所采用。

岩石结构面具有的非均一性、各向异性和尺寸 效应的特性决定了以上方法还不能准确地描述含结 构面岩质边坡在动力作用下的响应特征。边坡中不 可避免地存在软弱夹层或结构面,必然对边坡的受 力性能产生影响,在动力作用下这种影响更为明显。 尽管在地震动力作用下边坡崩滑研究上国内许多学 者取得了较多的研究成果[4-10],但目前针对含结构 面边坡的动力作用研究工作开展得比较少[11]。对 于同一边坡,坡面不同高程部位随着振动的增强其 加速度变化规律的研究做的也相对较少。刘汉香 等^[3]利用大型地震台采用上硬下软和上软下硬边坡 模型,研究了地震动强度对斜坡动力响应规律的影 响;祁生文等^[12]进行了边坡动力响应分析及其应用 的研究;梁庆国等[13-14]研究了强地震动作用下层状 岩体的变形破坏问题。这些研究都是以单一覆土厚 度的边坡为模型,并未研究不同覆土厚度边坡的破 坏规律和覆土厚度对边坡动力响应规律的影响。本 文以存在岩石和粘土的结构面的边坡为研究对象, 利用北京波谱世纪科技发展公司的 WS-Z30 振动 台,设计了对结构面上覆不同厚度土层的边坡模型 试验,研究结构面上覆土层厚度对边坡动力稳定性 的影响。具体分析在地震作用下边坡的破坏位置, 破坏形式及最危险覆土厚度,验证坡面放大效应与 高程的关系,采用 MIDAS/GTS 软件将模型试验进 行振型分析,分析模型边坡的自振频率与覆土厚度 的变化关系。

1 模型试验设计

模型试验的原型是一个坡高 30 m, 坡角 30°的 边坡。基岩为白云岩,上层分别覆盖4m、8m、12 m、16 m 红粘土的 4 个工况。根据相似常数计算, 模型的土层厚度应为 2 cm、4 cm、6 cm、8 cm,有效 粘距力的相似常数为 290。经过配比实验,模型试 验材料采用粘聚力较小的砂质粉土。试验输入波的 卓越频率首先应该在有效频率范围以内,天然地震 波的有效频率范围小于 10 Hz, 且为了避免模型在 试验过程中出现共振破坏,输入波的卓越频率应该 避免与模型的自振频率相同[3],为此,本文利用有限 元软件 MIDAS/GTS 的模态分析功能对模型的自 振频率进行了分析,结果表明模型第一振型的自震 频率在 57.8~67.6 Hz。综上所述,试验选取的正 弦波频率为 10 Hz,以确保不会产生共振现象。振 动台系统由功率放大器、激振器、振动台控制和采集 仪、加速度传感器放大器组成。振动台尺寸为 48 cm×34 cm,最大载重 30 kg。正弦波频率为 10 Hz, 每组持时为 20 s,水平入射。

1.1 相似理论

模型试验的重要目标之一是将原型在静、动力 荷载作用下的力学现象在模型上进行相似模拟,测 量模型中的应力、位移和加速度等物理量,再通过一 定的相似关系推算到原型上,这种关系就是模型的 相似率^[15]。根据相似理论,模型的主要相似常数见 表1。

1.2 模型设计

模型箱尺寸为 44 cm×10 cm×30 cm,用 8 个

螺丝固定在振动台上。为了更好地观察边坡在动荷 载作用下的破坏机理及破坏过程,模型箱采用1 cm 厚透明的有机玻璃制作,由于模型尺寸较小,因此有 机玻璃的强度完全可以达到试验要求。综合考虑振 动台承载力,材料相似比,模型边坡坡角取 30°,岩 石部分坡高取 15 cm。

表1 主要相似常数

Table 1 Main similar constants

| | 几何 C ₁ | 容重 C_{ρ} | 加速度 C _g | 应力 C _σ | 固有频率 C _f | 应变 C _ε |
|------|-------------------|---------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| 相似常数 | 200 | 1.45 | 1 | 290 | 0.07 | 1 |

边坡模型材料分为两种:下部为砂、石膏、石灰 组成的相似材料,密度 1.724 g/cm³;上覆砂质粉 土,密度为 1.284 g/cm³,含水率 12%。岩石与砂质 粉土的交界面即边坡的结构面。根据前人大量的实 践经验,岩石相似材料应满足如下原则^[16]:(1)主 要的力学和变形性质与模拟的岩性或结构相似;(2) 试验过程中模拟材料的物理力学性能稳定,不易受 外界条件的影响;(3)可以通过改变材料的配比,调 整模拟材料的某些物理力学性质以适应相似条件的 要求;(4)制作方便,凝结快速,成型容易,凝固时没 有大的收缩;(5)模型表面易于粘贴测试元件;(6) 材料来源丰富,成本低。模型中岩石与砂质粉土相 似材料的配比与物理力学性质见表 2^[17]。

表 2 相似材料物理力学性质 Table 2 Physical and mechanical properties of similar material

| 材料配比 | 抗压强度 /(kN・m ⁻²) | 抗拉强度 /(kN・m ⁻²) | 密度 /(g・cm ⁻³) |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 砂:石膏:石灰 6:0.7:0.3 | 5 250 | 2 770 | 1.724 |
| 砂质粉土 | _ | _ | 1.284 |
| | | | |

1.3 测点布置

采用振动台厂家提供的加速度传感器,对模型 坡面不同高程的加速度时程进行监测,1、2、3、4 测 点的高程分别为 2.5 cm、7.5 cm、12.7 cm、17.5 cm。测点位置见图 1。



图 1 测点布置 Fig. 1 position of measuring points

2 试验结果

2.1 破裂面性质和位置分析

图 2 为不同覆盖厚度下边坡的振动实验,左侧 为破坏前情况,右侧为破坏后情况。对比试验照片 分析发现:

在覆土厚度为 2 cm 时,加速度达到 17.135 m/ s² 时,振动 5 s 即发生破坏。模型在振动作用下整 体沿结构面发生滑动破坏,滑动部分呈现流体特性。

在覆土厚度为 4 cm 时,加速度达到 16.420 m/ s² 时,振动 13 s 即发生破坏。在滑动过程中,坡脚 处出现了土体被抬高的现象,土体在坡脚堆积。与 液体的流动现象十分相似。

与 2 cm 和 4 cm 试验不同,6 cm 覆土厚度的模 型在台面加速度达到 12.238 m/s² 时达到破坏。首 先在 17 cm 高程处出现裂缝;随着振动的继续裂缝 处的土体结构发生松散破坏,裂缝随着土体的滑动 和破坏逐渐增大;边坡整体还是沿着结构面发生破 坏,但是在表层已有少量剥离现象发生。相比上覆 土层较薄的工况其破坏的过程较为缓慢。

8 cm 土层厚度边坡的破坏过程与前 3 组试验 不同:破坏时首先在 21 cm 高程处出现裂缝;随着振 动的进行随后在 12 cm 高程处也出现裂缝,两个裂 缝处的土体在振动的作用下逐渐破坏,松散,裂缝宽 度不断发展,最后发生整体性崩塌和剥离现象。说 明土体在达到一定厚度之后,在动力作用下并不一 定会沿着结构面破坏。此时应该考虑土体内部强度 与结构面强度的比较,破坏总是发生在土体最先达 到屈服强度的位置。

2.2 不同高程测点处加速度响应分析

不同覆土厚度的边坡模型各测点的加速度放大 倍数与台面加速度的关系曲线如图 3 所示。从中可 以分析发现:在破坏之前坡面上各点的加速度响应 与台面加速度成线性关系,坡面加速度会随着台面 加速度的增强而增强。当边坡发生破坏时,测点加 速度不再依照线性发展,而是突然增大和离散化,这 一现象与文献[2]相符。依照这一特性可以利用一 点加速度响应是否遵循线性发展来判断边坡是否发 生了失稳破坏。

上述坡面加速度放大倍数随着坡面高程的增加 呈现增大趋势。是因为坡顶处的岩土体上部临空, 没有岩土体对其施加向下的推力,且在动力作用下, 正弦波在岩土体中传播叠加的最大处为坡面的中上 部。与祁生文关于均质边坡动力反应分析的结果类 似^[12]。



(a) 2 cm覆土





(b) 4 cm覆上





(c) 6 cm 袯土



(d) 8 cm覆土

图 2 不同覆土厚度边坡振动破坏情况 Fig. 2 The slope damage of covering different thicknesses soil



图 3 不同覆土厚度模型测点加速度峰值与台面加速度关系曲线

Fig. 3 The relation curves between measuring point acceleration peak values and jolt table surface accelerations

3 边坡破坏机理分析

(1)利用有限元软件 MIDAS/GTS 模块分析 了不同厚度土层下模型边坡的自振频率(图4)。分 析图4可知,随着土层厚度的增加,模型的自振频率 趋于下降,这是因为随着厚度的增加,模型质量也随 之增大,导致自振周期增大,所以自振频率也就趋于 下降,与张学东,言志信等人的研究相似^[18]。由图4 还可知,随着自振频率的降低,土层厚度的增加,模 型破坏时的台面加速度也趋于减小,达到6 cm 厚度 时加速度峰值趋于稳定。



图 4 模型自振频率、破坏加速度与土层厚度 关系曲线

Fig. 4 The relation curves between natural frequency, damage acceleration and soil thickness

(2) 取台面加速度为 5 m/s² 时,不同覆土厚度 下对应测点加速度的放大倍数如图 5 所示。这里定 义坡面加速度放大倍数为:坡面加速度(m/s²)/台 面加速度(m/s²)。由图 5 知,随着土层厚度的增 加,坡面加速度放大倍数在 6 cm 时达到峰值,综合 图 4 和图 5 知,模型坡面土层在 6 cm 左右时对振动 的响应最大。



图 5 土层厚度与坡面加速度放大倍数关系曲线

Fig. 5 The relation curves between slope magnification of acceleration and soil thickness



图 6 土层厚度与初始破坏时位置关系曲线



(3) 从图 6 知,随着土层厚度的增加,边坡初始 破坏时的高程趋于增大,且实验结果表明测点 2 处 的坡面加速度放大效应最大。土层为 2 cm、4 cm、6 cm、8 cm 时初始破坏位置高程分别为 13 cm、17 cm、15 cm、20 cm,分别是坡高的 76%、89%、71%、 87%。可见边坡在水平输入的振动作用下初始破坏 位置都发生在边坡的中上部或上部,中上部的动力 放大反应较为强烈,这与文献[3] 和文献[19]得到

第35卷第3期

的结果类似,验证了伍法权"非线性趋高放大效应"。 也与很多地震中的实际震害情况符合,例如汶川地 震后发现一系列特殊现象,包括"鬼剃头"现象^[20] (鬼剃头则是指山体的破坏在坡顶表现更强烈^[17])。 上覆土层厚度较薄时易于产生沿着土岩交界面的剥 落式滑塌,这与 1976 年龙陵地震时大范围地表剥落 的震害现象有类似之处^[21]。其原因可能与地震波 在土层内多次反射与折射的会聚效应有关。破坏位 置的逐渐上升也揭示了二元结构边坡动力破坏的高 程放大效应。以上结论启示我们在边坡防护时应对 中上部重点处理。

(4)总结不同厚度的边坡模型破裂面性质和位 置发现,当基岩上覆软弱岩土体较薄时边坡动力破 坏较为迅速,岩土体滑动呈现液性,坡脚处岩土体被 抬高;而当基岩上覆软弱岩土体较厚时边坡破坏速 度有所减缓,滑动面不一定沿结构面发生。分析原 因,边坡基岩上覆土层在一定厚度内稳定性会受结 构面的影响,土层厚度增加,土体自重增大,动力荷 载作用下结构面无法提供足够的抗滑力,会出现沿 结构面与临空面距离增大,振动波的反射及折射效 应对边坡临空面的影响不再显著,同时过大自重使 结构面上抗剪能力增强,且厚度的增加使土体自身 在坡脚处面积增大,对上部结构的支撑能力增强。 随着土层厚度增加,稳定性会继续增加,直到由岩质 边坡过度为土质边坡。

4 结论

对 4 组试验的结果进行对比分析,得到以下结论:

(1)对于岩质组成较为简单的边坡,在动力作 用下,坡面上的加速度响应与输入的动力强度在模型未破坏前呈线性关系,坡面加速度响应随着输入 动力的增强而变大。达到破坏后测点加速度不再依 照线性发展,而是突然增大和离散化,可据此来判断 边坡是否达到破坏。

(2) 坡面加速度放大效应随着坡面高程的增加 呈现增大趋势,加速度放大效应最大处在坡面中上 部,且都在测点 2(高程为 7.5 cm)处达到最大。且 模型覆土厚度在 6 cm 左右时对振动的响应最大。 启示我们在实际工程中对 12 m 厚度土层覆盖的边 坡是最应该注意防护的。

(3)总结四种不同厚度的边坡模型的破坏原因,启示我们在边坡加固中,不单要注意结构面,软

弱夹层,还应将结构面,软弱夹层的性质和岩土体作 对比,不可忽略破坏首先在岩土体中发生的可能性。

本次模型试验得到的规律为层状岩质边坡的抗 震分析和工程设计提供了一些有价值的经验和资 料。

参考文献(References)

- [1] 滕光亮,陈永明,石玉成,等. 地震作用下节理岩质边坡稳定性 影响因素研究[J]. 地震工程学报,2013,35(1):119-125.
 TENG Guang-liang, CHEN Yong-ming, SHI Yu-cheng, et al. A Study on the Influencing Factors of Joint Rock Slope Stability under Earthquake Activity[J]. Northwestern Seismological Journal,35(1):119-125. (in Chinese)
- [2] 郝建斌,门玉明,彭建兵,等. 层状岩体边坡动力稳定性模型试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(6): 72-75.
 HAO Jian-bin, MEN Yu-ming, PENG Jian-bing, et al. Research on Dynamic Stability of Layered Rocky Slope with Model test[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005,22(6):72-75. (in Chinese)
- [3] 刘汉香,许强,范宣梅,等. 地震动强度对斜坡加速度动力响应规律的影响[J]. 岩土力学,2012,33(5):1357-1365.
 LIU Han-xiang, XU Qiang, FAN Xuan-mei, et al. Influence of Ground Motion Intensity on Dynamic Response Laws of Slope Accelerations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (5):1357-1365. (in Chinese)
- [4] 杨庆华,姚令侃,邱燕玲,等. 高烈度地震区岩土体边坡崩塌动 力学特性研究[J]. 西北地震学报, 2011,33(1);33-39.
 YANG Qing-hua, YAO Ling-kan, QIU Yan-ling, et al. Research on Dynamical Characteristics of Collapse of Rock and Soil Slope in High Seismic Intensity Areas[J]. Northwestern Seismological Journal,2011,33(1);33-39. (in Chinese)
- [5] 龚文俊,李明永,吴志坚. 降雨和地震耦合作用对滑坡稳定性 的影响-以甘肃西和Ⅲ号滑坡为例[J]. 西北地震学报,2012, 34(2):161-166.

GONG Wen-jun, LI Ming-yong, WU Zhi-jian. Stability Analysis of Landslide under Coupling Action of Earthquake and Rainfall—Taking the No. [] Landslide of Xihe County, Gansu Province as An Example [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 61-166. (in Chinese)

[6] 郑颖人,叶海林,黄润秋,等. 边坡地震稳定性分析探讨[J]. 地 震工程与工程振动,2010,30(2):173-180.
ZHENG Ying-ren, YE Hai-lin, HUANG Run-qiu, et al. Study on the Seismic Stability Analysis of A Slope[J]. Earthquake Engineering And Engineering Vibrating, 2010, 30(2): 173-180. (in Chinese)

 [7] 梁庆国,韩文峰,赵士耀. 垂直向地震作用对节理岩体失稳破 坏的影响[J]. 西北地震学报,2007,29(4):307-313.
 LIANG Qing-guo, HAN Wen-feng, ZHAO Shi-yao. Influence of Vertical Seismic Action on Seismic Dynamic Failure of Jointed Rock Mass[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(4):307-313. (in Chinese) [8] 卢育霞,石玉成,陈永明,等. 地震诱发黄土滑坡的滑距估测[J]. 西北地震学报,2006,28(3):248-251.

LU Yu-xia, SHI Yu-cheng, CHEN Yong-ming et al. Slippage Estimation of the Loess Landslide Triggered by Earthquake [J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(3); 248-251. (in Chinese)

- [9] 刘红帅,薄景山,刘德东. 岩土边坡地震稳定性分析研究评述
 [J]. 地震工程与工程振动,2005,25(1):164-171.
 LIU Hong-shuai, BO Jing-shan, LIU De-dong. Review on Study of Seismic Stability Analysis of Rock-soil Slopes[J].
 Earthquake Engineering And Engineering Vibrating,2005,25 (1):164-171. (in Chinese)
- [10] 刘汉龙,费康,高玉峰. 边坡地震稳定性时程分析方法[J]. 岩 土力学,2003,24(4):553-556.
 LIU Han-long, FEI Kang, GAO Yu-feng. Time History Analysis Method of Slope Seismic Stability[J]. Rock and Soil Mechanics.2003.24(4):553-556. (in Chinese)
- [11] 刘立平,杨实君,李英民. 软夹层参数对边坡动力特性的影响 分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2007,30(5):31-34.
 LIU Li-ping, YANG Shi-jun, LI Ying-min. Influence of Soft Soil Sayer on Synamic Characte Ristic of the Slope[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(5):31-34. (in Chinese)
- [12] 祁生文,伍法权,严福章,等. 岩质边坡动力反应分析[M]. 北京:科学出版社, 2007:41-46.
 QI Sheng-wen, WU Fa-quan, YAN Fu-zhang, et al. Rock Slope Dynamic Response Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2007:41-46. (in Chinese)
- [13] 梁庆国,韩文峰. 强震区岩体地震动力破坏特征[J]. 西北地 震学报, 2009, 31(1):15-20.
 LIANG Qing-guo, HAN Wen-feng. Characteristics of Rock Mass Failure under Seismic Loads at Strong Earthquake Areas[J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31(1):15-20. (in Chinese)
- [14] 梁庆国,韩文峰,马润勇,等. 强地震动作用下层状岩体破坏
 的物理模拟研究[J]. 岩土力学,2005,26(8):1307-1311.
 LIANG Qing-guo, HAN Wen-feng, MA Run-yong, et al.

Physical Simulation Study on Dynamic Failures of Layeredrock Masses under Strong Ground Motion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1307–1311. (in Chinese)

- [15] 刘小生,王钟宁,汪小刚,等. 面板坝大型振动台模型试验与 动力分析[M]. 北京:中国水利水电出版社,知识产权出版 社,2005.
- [16] 左保成,陈从新,刘才华,等. 相似材料试验研究[J]. 岩土力 学, 2004, 25(11):1805-1808.
 ZUO Bao-cheng, CHEN Cong-xin, LIU Cai-hua, et al. Research on Similar Material of Slope Simulation Experiment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11):1805-1808. (in Chinese)
- [17] 林韵海. 实验岩石力学模拟研究[M]. 北京: 煤炭工业出版 社,1984.
- [18] 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 on Dynamic Response of Rock Slope Using ANSYS Software[J]. Northwestern Seismological Journal,2010,32 (2):117-121. (in Chinese)
- [19] 许强,刘汉香,邹威,等. 斜坡加速度动力响应特性的大型振 动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(12): 2420-2428.

XU Qiang, LIU Han-xiang, ZOU Wei, et al. Study Onslope Dynamic Responses of Accelerations by Large-scaleshaking Table test[J]. Chinese Journal of RockMechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2420-2428. (in Chinese)

[20] **伍法权. 岩体工程地质动力学基本原理[J]. 工程地质学报**, 2011,19(3):304-313.

WU Fa-quan. Principles of Engineering Geological Dynamics of Rockmass[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19 (3):304-313. (in Chinese)

[21] 陈立德,赵维城,阚荣举,等. 一九七六年龙陵地震[M]. 北京:地震出版社, 1979.
 CHEN Li-de,ZHAO Wei-cheng, KAN Rong-qu, et al. [M].
 Beijing;Earthquake Press, 1979. (in Chinese)