

黄土斜坡震害面波勘探调查及其动力稳定性分析 ——以甘肃岷县、漳县 $M_s6.6$ 地震为例

车爱兰¹, 吴志坚^{2,3,4}, 彭冬¹, 雷天^{2,3,4}, 陈拓⁵

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;

2. 甘肃省地震局 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 4. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000;

5. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:2013年7月22日, 甘肃省定西市岷县、漳县交界处发生6.6级地震, 地震诱发了约600余处地质灾害(隐患点), 其中规模最大的是岷县梅川镇永光村四社西的两个相邻滑坡。本文对永光村西侧滑坡进行了多种手段的现场勘测, 特别是在坡顶及坡底开展了高密度面波勘探, 分析了该黄土滑坡成因及滑坡附近的地形、地层等因素。采用动力有限元法和强度折减法结合的方法分析该滑坡在地震荷载作用下的动力响应、滑坡动力稳定性的影响因素以及地震荷载与滑坡失稳状态之间的关系。结果表明, 由于地震前的强降雨导致表层黄土的抗剪强度降低, 在地震荷载作用下黄土层之间存在拉应力效应并导致崩塌滑动。

关键词: 黄土斜坡; 地震滑坡; 面波勘探; 动力稳定性

中图分类号: P631.4; P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)04-0724-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.0724

Surface Wave Investigation and Dynamic Stability Analysis for Earthquake-Induced Loess Landslides

CHE Ai-lan¹, WU Zhi-jian^{2,3,4}, PENG Dong¹, LEI Tian^{2,3,4}, CHEN Tuo⁵

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of CEA, Lanzhou Gansu 730000, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China;

4. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou Gansu 730000, China;

5. Key State laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Institute, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: The sliding and collapse of a slope during an earthquake are the main types of slope-related geological disasters, and the dynamic stability of slopes has been one of the most important topics in geotechnical engineering and seismic engineering. About 600 instances of landslides, collapses, and other geological disasters such as collapses, debris flow, and shattered mountains were induced by the Minxian and Zhangxian $M_s6.6$ earthquake on July 22, 2013, in Dingxi area in Gansu province; this earthquake damaged many towns and killed 95 people. Furthermore, it resulted in a very high death toll and economic loss in China. The largest and most serious and damaging landslides post this earthquake were the two neighboring landslides in Yongguang village in Meichuan town, Minxian. The western landslide had a length of 1 500

收稿日期: 2013-09-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB013505); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2012IESLZ01);

国家自然科学基金项目(11372180; 40902094)

作者简介: 车爱兰(1969-), 女, 副教授, 博士, 吉林市人, 主要从事岩土动力特性及相关测试分析技术研究。E-mail: alche@sju.edu.cn

m, average width of 28 m, and area of about 42 000 m². The landslide occurred from an elevation of 2 700 m to 2 545 m, i. e., a distance of 155 m. It can be considered as being a crushed-debris flow, remote landslide, resulting in 12 deaths. The area of the eastern landslide was about 33 000 m². A field survey on geological disasters is very helpful to gain a better understanding of mechanisms of earthquake-induced disasters, particularly of dynamic slope stability. Such geological disasters associated with earthquakes (e.g., landslides, collapses, debris flow, and shattered mountain) can be subsequent potential geological hazards with long-term, hidden, and unexpected features. According to a variety of survey methods, especially Rayleigh-wave exploration conducted on both of the top and bottom of the landslide in detail, the status of the loess landslide and the topography, stratigraphy and other factors are investigated and the sliding mechanism is analyzed. Based on it, a dynamic numerical analysis method was used to evaluate the dynamic response of the slide, and the factors influencing the stability of the slide and the relationship between instability failure and earthquake motions were identified. The dynamic stability of the slide was analyzed by the dynamic finite element method and a strength reduction method. As a result, it was found that the shear strength of the loess on the slope surface reduced because of heavy rain before the earthquake, and tensile stress occurred, which led to the collapse of seabed slides.

Key words: loess slope; earthquake-induced landslide; surface wave survey; dynamic stability

0 引言

2013年7月22日7时45分许甘肃省定西市岷县、漳县交界处(北纬34.5°,东经104.2°)发生 $M_s6.6$ 地震,9时12分又发生 $M_s5.6$ 级强余震,震源深度20 km。此次地震诱发了约600余处地质灾害(隐患点),其中以小型黄土崩塌和滑坡为主,中型、大型的深层滑坡灾害有3处。其中规模最大、危害最严重的是岷县梅川镇永光村(北纬34°31′28″,东经104°08′59″)四社的挖木池的两个相邻滑坡。西侧滑坡长1 500 m,均宽约28 m,滑体面积约4.2万m²,该滑坡后缘高程2 700 m,前缘高程2 545 m,为远程滑坡一碎屑流;东侧滑坡位于前滑坡的东侧,也是滑坡一碎屑流滑体,面积约3.3万m²。另外一处典型黄土滑坡位于岷县维新乡的堡子村滑坡,该滑坡由 $M_s5.6$ 强余震诱发,造成2人死亡,滑坡方量约100万m³[1]。

黄土地震滑坡是黄土地区的主要地震灾害,不仅规模巨大,而且还具有滑速高、滑程远、受灾范围广的特点。诱发黄土滑坡的原因主要有以下几种:(1)黄土高原内部沟壑的深切或河流对源与高阶地的侧蚀;(2)持续降雨或暴雨及经常的大面积灌溉;(3)各种水利、公路、铁路、采矿、地下建设等工程活动;(4)地震滑坡[2]。本次地震可以认为是在强降雨及地震力同时作用下诱发的。

1 永光村滑坡现场考察

位于梅川镇的永光村是地震的重灾区,属于Ⅷ度区。永光村的滑坡分为东西两部分,向东侧的滑坡面积约3.3万m²,掩埋6户人家。向西方向滑体面积约4.2万m²,形成了远程土流,掩埋8户人家,造成了12人遇难(图1)[1]。

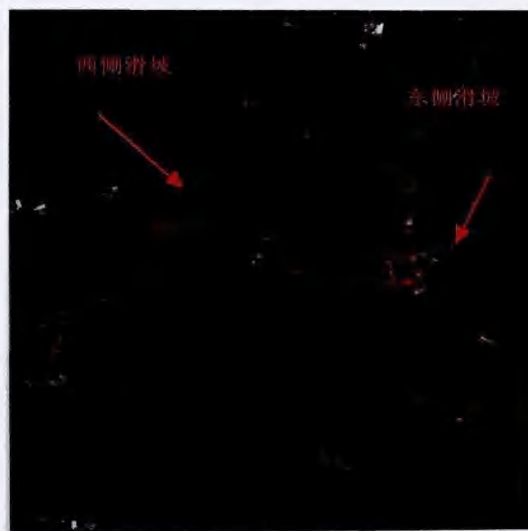


图1 永光村滑坡航拍图

Fig.1 Aerial photography of landslide at Yongguang village

以西侧滑坡为研究对象,对其展布形态、滑动过程以及诱因分析如下。

(1) 滑坡体展布形态

西侧泥流状滑坡在平面上近似呈现L型,大致南北走向。该泥流状滑坡体在滑坡后缘滑移起始位置至前缘终止部位的范围内呈现连续分布,由土体形态上能够看出该滑坡在滑移时具有相当的流动特性;滑坡后缘宽约100 m,高度30 m左右;滑坡体前缘在冲沟出口位置的宽度约为13 m,最大滑移距离约为1 km。终端止于冲沟出口的桥梁位置,距离桥基约0.5 m。滑坡整体落差约为253 m,平均坡度18°,土方量约为40万m³。

(2) 滑动过程分析

西侧滑坡体失稳之后,冲破原有前端凹形地势,滑移进入与之交角约 30° 的大型冲沟(在永光村和永星村范围内其长度与宽度最大),顺沟向下游滑冲,止于永光村和永星村分叉路口北侧的拱桥前。该泥流状滑坡在进入冲沟的位置,可明显看到滑体受阻形成的土堆,并且有部分泥流回溯入该冲沟上游,最大距离约为20 m。泥流回溯与泥流及冲沟上游底部的落差有关,回溯泥流规模不大,表明泥流运移速度较快,这与现场考察过程中由当地居民处了解的情况相一致。

(3) 滑坡诱因分析

根据本次现场考察结果,可以认定永光村西侧泥流状滑坡是降雨与地震耦合作用下的产物。由该滑坡展布形态容易推测,滑坡体内部含水量较高。现场考察中进行的初步含水量测试证实该滑坡土体含水量高于塑限,低于液限。同时在滑坡后缘遗留土体中局部土体表面能够观察到明显水渍;某些车辆碾压痕迹中,明显观察到土体软化现象,其内部可能出现似液化行为。据当地村民介绍,岷县6.6级地震前夕当地连续几天遭受中雨,并在地震前一天晚上遭遇暴雨。与前2~3年相比,今年的雨量相对较少,村民本以为不会有什么问题,但没料想地震的发生。需要注意的是,该滑坡后缘原址有山泉出露,山泉的发育可能是诱发该侧滑移的不可忽视的因素。

2 滑坡体地质构造调查

2.1 高密度面波法

高密度面波勘探又称为二维面波勘探,是由普通的单点式面波勘探扩展而来的,利用的基本原理相同。面波最常见的有瑞雷面波和勒夫面波。基于瑞雷面波和勒夫面波的质点振动轨迹,瑞雷面波有垂直和水平两种成分,勒夫面波则只有水平成分而无垂直成分。高密度面波法通常利用瑞雷面波,而且通过使用垂直检波器接收瑞雷面波的垂直成分而避开勒夫面波的干扰。理论和实践都证明,在一次冲击产生的波能中,瑞雷面波最强,约占波动总能量的60%以上。在瑞雷面波传播过程中,能量大部分集中在半个波长的深度范围内。改变激振力的频率 f ,也就改变了瑞雷面波的波长和穿透深度。这样,简谐激振力的频率由高往低变化,分别测试出各个频率的瑞雷面波传播速度,就实现了由浅向深的探测^[3-5]。

2.2 高密度面波现场试验

高密度面波测线分别布设于永光村西侧滑坡顶部和坡脚,共2条测线,如图2所示。面波数据采集使用24道检波器,采样间隔1 ms,记录长度2.048 s,对每一检波器排列,分别在偏移距10 m、15 m和20 m处各激发一次,排列移动间距为12道,如图3所示。

高密度面波的传感器都采用固有频率4.5 Hz动圈式垂直分量速度型地震检波器,记录设备采用高精度宽频带地震仪。面波勘探的振源采用锤击方式。设备详细指标见表1。

表1 勘探所用仪器一览表

Table 1 Instruments for measurement

设备名称	型号	主要技术指标
地震仪	Geode数字型	高截频20 000 Hz,低截频1.75 Hz
检波器	动圈式垂直成分速度型	固有频率4.5 Hz



图2 永光村西侧滑坡现场和测试位置

Fig.2 Site of landslide in west side at Yongguang village and the survey lines

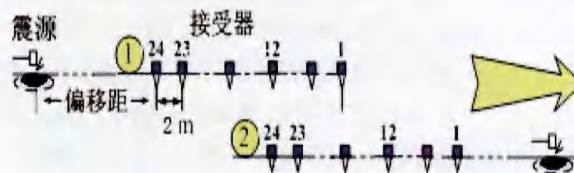


图3 现场测线布置

Fig.3 Layout of survey lines

2.3 数据处理方法

高密度面波法使用锤击作为震源,采集数道等间距垂直速度波形记录,从波形记录中提取频散曲线。从多道波形记录(共激发点道集)中提取频散曲线有多种方法,最常用的方法有频率-波数法(F-K法)及速度扫描法^[6]。本文采用速度扫描法,首先是利用个检波器排列间重合的检波器的数据作关联,通过叠加处理生成一个能够覆盖整条测线的共震源数据道集合,然后沿测线从12.5 m开始,每隔2 m,前后各取12道数据组成一个共震源数据道分集合,利用速度扫描法做频散分析,并把获得的频散曲线作为该点(共震源数据道分集合中心点)的频散曲线。

频散曲线反演分析采用最小二乘法和遗传算法相结合的混合算法,遗传算法的参数为:个体数30个,进化代

20个,进化20代后把得到的最佳模型作为最小二乘法的初始模型,进行加快收敛计算。计算结束时频散曲线近似误差约2%。

2.4 构造反演结果

高密度面波频散曲线的反演采用了分段多点联合反演,即取相邻3条频散曲线进行3点联合反演,可以最大限度地反映地层横向上的连续性。图4为坡顶处面波数据频散分析结果。可以看出,频散曲线光滑度高、较平滑,数据的采集率高,采集的数据质量较好。

地下构造反演结果如图5所示。永光村西侧滑坡的地下构造大体可分为4层,即地表附近 $V_s \approx 160 \sim 200$ m/s 的软弱覆土层,厚度约为5~10 m;其下为 $V_s \approx 200 \sim 300$ m/s 的土层,厚度约为7~10 m; $V_s \approx 300 \sim 400$ m/s 的土层,厚度约为17~25 m,和 $V_s \geq 400$ m/s 的基础层。根据该地区附近的钻孔资料,这四个层可分别解释为Q₃马兰黄土层、Q₃黄土层和黄土状粉砂土层。综合坡顶及坡脚勘探结果可以发现,土层分布沿坡面呈近均匀分布,起伏不大,坚硬黄土的顶面呈谷状,与现地貌相符。

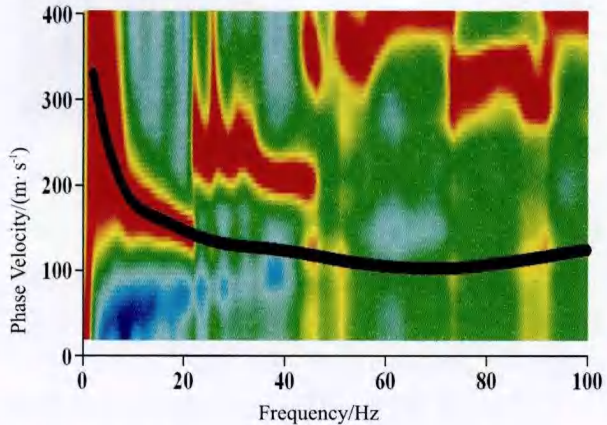
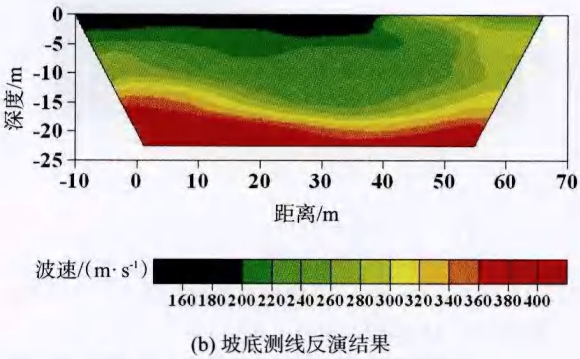
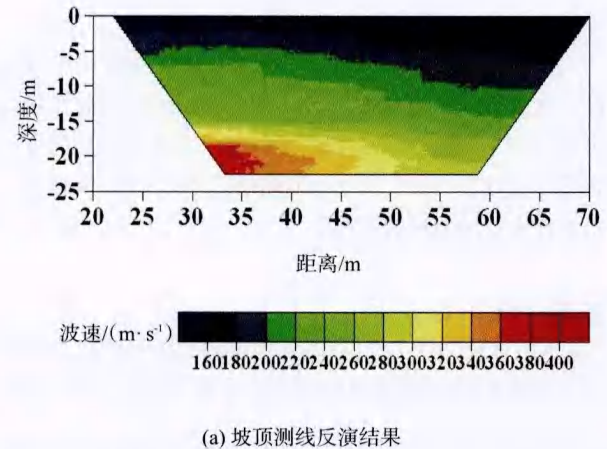


图4 高密度面波频散曲分析结果(坡顶处)
Fig.4 Result of dispersion analysis for HDSWS on the top of slope



(b) 坡底测线反演结果
图5 面波测线地下横波速度分布
Fig.5 The Shear wave velocity distribution along the survey lines

3 地震力作用下黄土边坡稳定性评价

3.1 评价方法

采用强度折减法与有限元动力分析相结合的方法进行边坡稳定性分析^[7-9]。首先,在模型底部施加水平地震力,计算边坡在动力作用下加速度、位移和应力的响应。假定边坡内所有岩土抗剪强度发挥程度相同,边坡岩土的黏聚力和摩擦角降低,弹性模量和泊松比为常数,即除以一个折减系数 R ,得到一组新的 c' 和 φ' 值,并作为材料力学性能参数而重新进行试算分析,直到有限元计算不收敛。此时定义边坡处于稳定极限状态。其中, c' 和 φ' 值由下式求得^[5]:

$$c' = \frac{c}{R} \tag{1}$$

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{R}\right) \tag{2}$$

将边坡处于稳定极限状态下的折减系数 R 定义为动力稳定安全系数 F_s 。

3.2 永光村黄土边坡有限元模型及参数

有限元计算分析采用 Abaqus 商用有限元计算软件。根据现场考察及面波勘探结果建立二维有限元计算模型,模型网格划分如图6所示。其中,左右边界均为无限元网格,模型的边界尺寸为:水平方向1 100 m;模型高度310 m;边坡坡面垂直高度160 m;坡脚角度约18°。

除边界外,模型内部均采用四边形四节点平面应变单元划分,节点总个数为12 128,单元总个数为11 857。模型中所有单元均采用 Mohr–Column 屈服准则。模型参数采用表2中的参数。其中第一层考虑地震前连续暴雨,含水率考虑为20%~25%。第二层含水率为7%~8%。

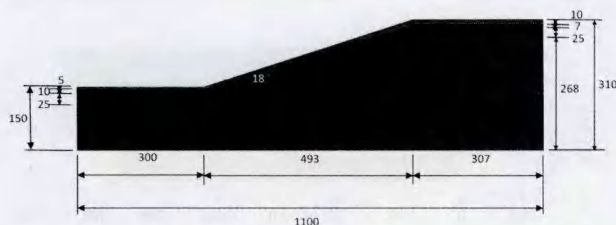


图6 简化模型的网格划分(单位:m)

Fig.6 Simplified finite element model of the slope

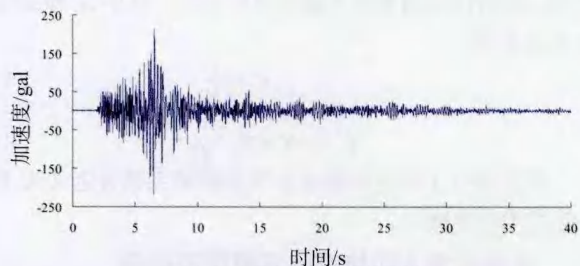
表2 各层材料参数

Table 2 Material parametrs of each layer

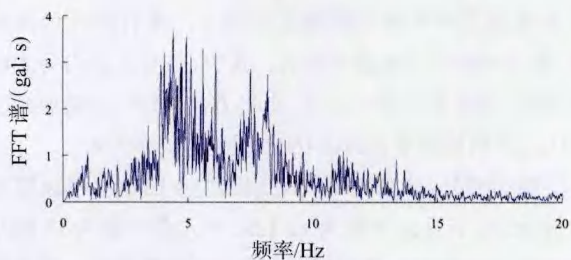
层数	密度 /g·m ⁻³	弹性模量/GPa	泊松比	剪切波速/ (m·s ⁻¹)	c kPa	φ/(°)
1	1 380	0.14	0.28	200	16.8	14.4
2	1 380	0.32	0.28	300	21	18
3	1 380	0.56	0.28	400	25.2	21.6
4	1 800	2.95	0.28	800		

3.3 地震波

计算中采用岷县漳县 6.6 级地震中位于距震中 18 km 的岷县台采集到的地震波。记录时间为 2013 年 7 月 22 日 7 时 45 分。地震峰值加速度为 220 gal, 地震波的卓越频谱在 4.5~5.5 Hz 之间, 如图 7 所示, 输入地震动作用时间为 40 s。



(a) 地震波加速度时程曲线



(b) 地震波加速度时程频谱特征

图7 地震荷载及频谱特征

Fig.7 Seismic loads and its spectral characteristics

3.4 边坡在地震荷载作用下的动态响应

图8为边坡在地震荷载作用下最大位移分布,虚线为边坡初始状态。可以看到,在地震力作用下边坡产生较大水平位移,整体边坡的位移呈现出剪切响应。最大位移集中在边坡坡面,坡顶和坡底的最大位移差可达 80

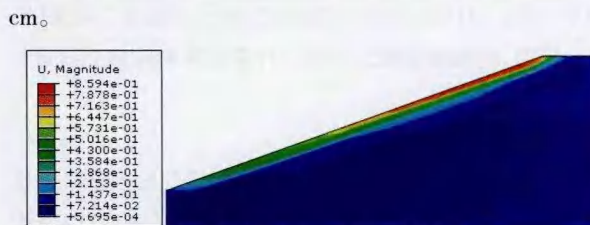


图8 地震力作用下边坡最大位移分布

Fig.8 Distribution of maximum displacement under seismic loading on the slope

将土体边坡材料的抗剪强度参数同时折减,并依次采用动力有限元法计算边坡在地震荷载作用下的动力响应,直至计算不收敛,所得 $F=1.00$ 。通过后处理可以获得图9所示的地震荷载作用下边坡的等效塑性应变区。可见,地震作用下边坡土体的等效塑性应变特征与其动态响应下的特征一致,滑动面贯通于表层马兰黄土和下部较硬土体交界面,大部分位于黄土层中,该结果与现场考察结果一致。

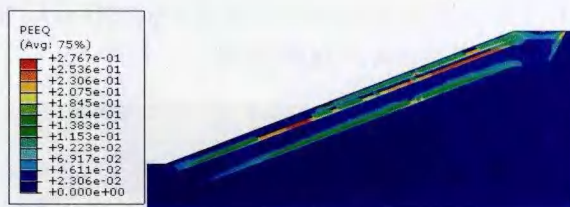


图9 动力稳定极限状态下的边坡塑性区

Fig.9 Plastic zone of the slope under dynamic critical condition

4 结论

(1) 位于梅川镇的永光村属于Ⅷ度区,永光村西侧泥流状滑坡被认为是降雨与地震共同作用的结果,是内部地层不稳定性在外力作用下所产生的。

(2) 基于面波的地基勘探手法,简便高效,抗干扰性强,使用 10 kg 左右的锤头做震源,对环境无任何影响,特别适合灾后地质调查,能够快速掌握地质构造,为分析成灾机理及地震响应分析建模提供了地下构造模型,取得了良好效果。

(3) 采用动力有限元法和强度折减法相结合并以计算不收敛为判据的方法,分析了黄土滑坡的地震整体稳定性。由于地震前的强降雨,导致表层黄土的抗剪强度降低,当地震作用时,永光村西侧滑坡整体失稳,验证了本次地震中的崩塌滑动现象。

参考文献(References)

- [1] 中国地震局岷县漳县 6.6 级地震现场工作队应急科考组.2013 年岷县漳县 M_s6.6 地震应急科学考察报告[R].2013 年 7 月.
- [2] 徐张建,林在贯,张茂省.中国黄土与黄土滑坡[J].岩石力学

- 与工程学报,2007,26(7):1297-1312.
- XU Zhang-jian, LIN Zai-guan, ZHANG Mao-sheng. Loess in China and Loess Landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(7):1297-1312. (in Chinese)
- [3] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京:地质出版社,1993.
- YANG Cheng-lin. Rayleigh Wave Exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. (in Chinese)
- [4] 胡志旭, 姚令侃, 王建, 等. 面波测试在汶川强震区土体损伤调查中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2010,30(4):466-470.
- HU Zhi-xu, YAO Ling-kan, WANG Jian, et al. Application of Surface Wave Testing in Survey of Mountain Soil Damage in Wenchuan Strong Earthquake Area[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010,30(4):466-470. (in Chinese)
- [5] Yamanaka H, Ishida H. Application of Genetic Algorithms to an Inversion of Surface Wave Dispersion Data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996,86(2):436-444.
- [6] Capon J. High Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Anal Ysis [J]. Proc. IEEE, 1969,(57): 1408-1418.
- [7] Bromhead E N. The Stability of Slopes. (2nd ed) [M]. USA: Surrey University Press, 1994.
- [8] 李荣建, 郑文, 王莉平, 等. 非饱和土边坡稳定性分析方法研究进展[J]. 西北地震学报, 2011,33(增):2-9.
- LI Rong-jian, ZHENG Wen, WANG Li-ping, et al. Progress and Developing Trend on Stability Analyses of Unsaturated Soil Slope[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(S): 2-9, 2011. (in Chinese)
- [9] 吴志坚, 车爱兰, 陈拓, 等. 青藏铁路多年冻土区桥梁桩基础地震响应的试验研究与数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11):3516-3524.
- WU Zhi-jian, CHE Ai-lan, CHEN Tuo, et al. Test Study and Numerical Analysis of Seismic Response of Pile Foundation of Bridge at Permafrost Regions along Qinghai-Tibet Railroad[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3516-3524. (in Chinese)