

景鹏旭,李丽.湖北秭归千将坪滑坡微破裂过程震动分析[J].地震工程学报,2017,39(5):951-956.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.951

JING Pengxu,LI Li.Vibration Analysis of Micro-rupture Process in the Qianjiangping Landslide in Zigui, Hubei Province[J]. China Earthquake Engineering Journal,2017,39(5):951-956.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.951

湖北秭归千将坪滑坡微破裂过程震动分析^①

景鹏旭¹, 李 丽²

(1.中铁工程设计咨询集团有限公司,北京 100055; 2.中国地震台网中心,北京 100045)

摘要:基于湖北秭归千将坪岩质滑坡地形、地质、水文特征,运用 GeoStudio 软件中的 QUAKEW 模块建立滑坡震动分析模型。通过设置土层、岩层动弹性模量和泊松比,处理并加载卢家山台记录的四次破裂事件数据,并进行动力学分析,模拟千将坪滑坡的破裂蠕滑滑动过程。结果表明,千将坪滑坡不单受自身静力作用,还经历了微破裂—蠕滑—再破裂—蠕滑—滑动的微破裂动力过程,为岩质滑坡预警的可行性提出了新的探索思路。

关键词:千将坪滑坡;微破裂;蠕滑;震动;岩桥

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2017)05-0951-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.0951

Vibration Analysis of Micro-rupture Process in the Qianjiangping Landslide in Zigui, Hubei Province

JING Pengxu¹, LI Li²

(1.China Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd, Beijing 100055, China;

2.China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract: In this study, based on the topographic, geological, and hydrological characteristics of the Qianjiangping landslide, we have built a vibration analysis model using the QUAKEW module of GeoStudio software. We set the dynamic elastic modulus and Poisson's ratio of the soil and rock; further, we processed and loaded the data of four rupture events recorded by Lujiashan seismic station. Then, we used the model to simulate the landslide creep and slide processes. The results show that the Qianjiangping landslide was under static load and also experienced a micro-rupturing process that involved following sub-processes in sequence: micro-rupture, creep slip, re-rupture, creep slip, and landslide. This model could provide some new ideas for feasibility studies on rock landslide forecasts.

Key words: Qianjiangping landslide; micro-rupture; creep slip; vibration; rock bridge

① 收稿日期:2017-06-27

基金项目:地震科学专业知识服务系统(204162201)

作者简介:景鹏旭(1990—),男,山西太原人,硕士,主要从事岩土地震工程、边坡工程及隧道工程等方面的科研工作。

E-mail:18813119015@163.com。

通信作者:李 丽,硕士,主要从事防灾减灾工程、地震工程、数据共享等方面的科研工作。E-mail:lili@seis.ac.cn。

0 引言

2003年7月13日,位于长江支流青干河左岸的秭归县千将坪村发生大型基岩滑坡。该滑坡自发生以来一直受到业界重视,诸多机构和学者先后对其进行了研究,并取得了一系列研究成果。如廖秋林、王德咏等从地质学角度分析了千将坪滑坡地形、地貌、水文、地质特征和滑坡触发机制^[1-3]。肖诗荣、邬爱清等分别用数值模拟和室内模拟实验研究了滑坡地质力学特征^[4-5]。

从前人研究结果来看,千将坪滑坡地质特征、水文状况和静力学特征已得到充分认识。本文在此基础上,利用三峡数字遥测地震台网记录的主滑前四次微震事件信号,运用 GeoStudio 软件中 QUAKEW 模块,建立千将坪滑坡微破裂过程震动分析模型,模拟分析该滑坡的微破裂蠕滑过程。

1 滑坡地质状况

千将坪滑坡位于湖北省宜昌市秭归县沙镇溪镇,为典型单面顺层斜坡,走向 NE40°,倾向青干河。斜坡顶部远眺呈弧形,高程 400~500 m,前缘直抵

青干河河床。滑坡区出露地层为侏罗系聂家山组(J_{1-2n})地层、第四系残坡积层(Q_{d1+e1})及河床冲积层(Q_{a1})。聂家山组(J_{1-2n})岩层主要为灰绿色厚~巨厚层长石石英砂岩、粉细砂岩夹少量紫红色粉砂质黏土岩、泥岩。滑坡区具有顺向坡地质结构,其岩层产状为 130°∠15°~33°。岩层倾角坡顶至坡脚由陡变缓,后缘山体斜坡段地层倾角约为 30°,至青干河边地层倾角渐变为 10°~15°。滑坡岩性软硬相间,层间剪切带发育,坡体岩层破碎,剪切带充填大量泥质,滑坡床基岩整体性较好,断裂不发育。

2 滑坡滑动过程破裂事件分析

三峡数字遥测地震台网由 24 个地震台组成,清晰完整地记录下了此次滑坡主滑及前期四次微破裂事件^[6-7]。波形整体可分为两个波段(图 1)。第一波段初动不清,振幅小,峰值加速度由 0.13g 逐渐变大为 0.20g;第二波段振幅相对较大,波形清晰,波持续性延长并伴有较长尾波,纺锤状波形减弱表明此时滑坡整体小破裂持续不断。7月13日为滑坡发生时的主滑动事件。

图 1 为距离千将坪滑坡最近的卢家山地震台记

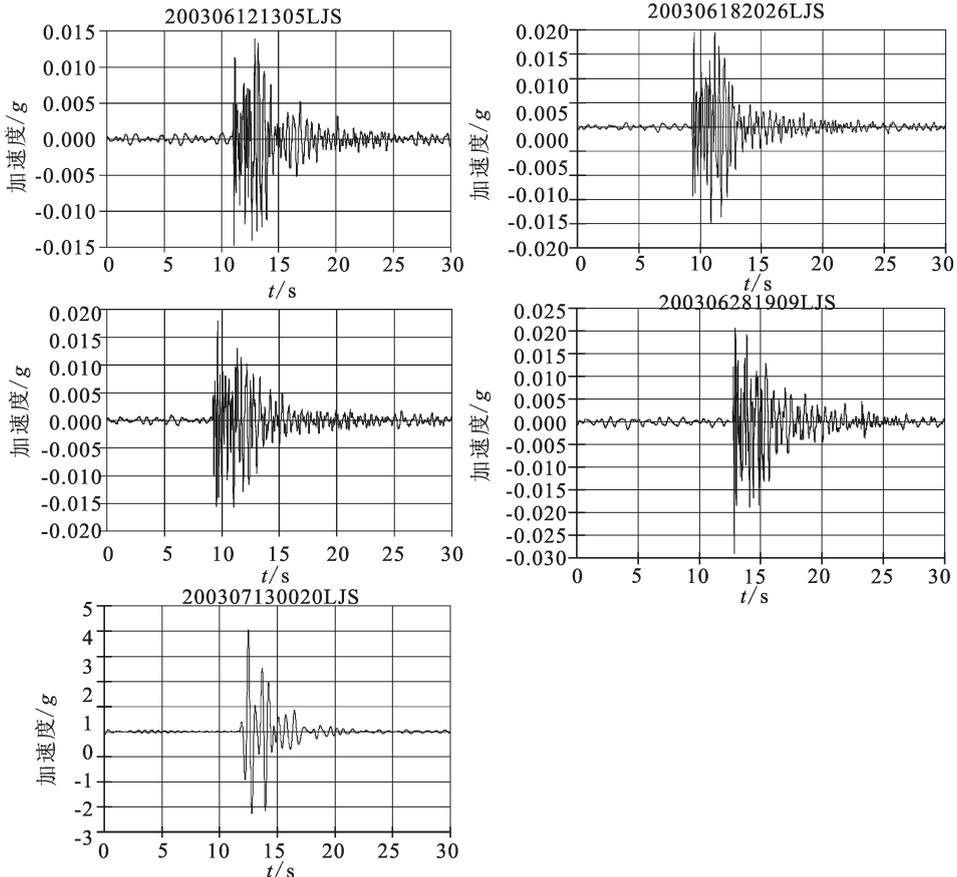


图 1 卢家山台记录的五次破裂事件波形

Fig.1 Waveforms of five rupture events recorded by Lujiashan seismic station

录的 5 次事件波形,其中记录最早的微破裂事件信号来自于滑坡体内的 6 月 12 日波形,随后又记录到三次微破裂波和一次主滑事件波。

3 滑坡震动模拟分析

3.1 模型建立与参数选取

3.1.1 模型建立

GeoStudio 是加拿大 GEO-SLOPE 国际公司开

发的软件,目前已经在相关研究领域得到广泛应用。本文结合滑坡基础地质、水文资料,采用 GeoStudio 软件中 QUAKEW 模块,建立千将坪滑坡震动分析模型[图 2(a)]。

滑坡上部滑体为一强风化层,整体受风化剥蚀较为严重,岩石裂隙十分发育,且充填有大量泥沙。滑坡区中间滑带为一泥化软弱层,顺着下部岩层面展布。滑带大致分成顺层滑带和切层滑带,顺

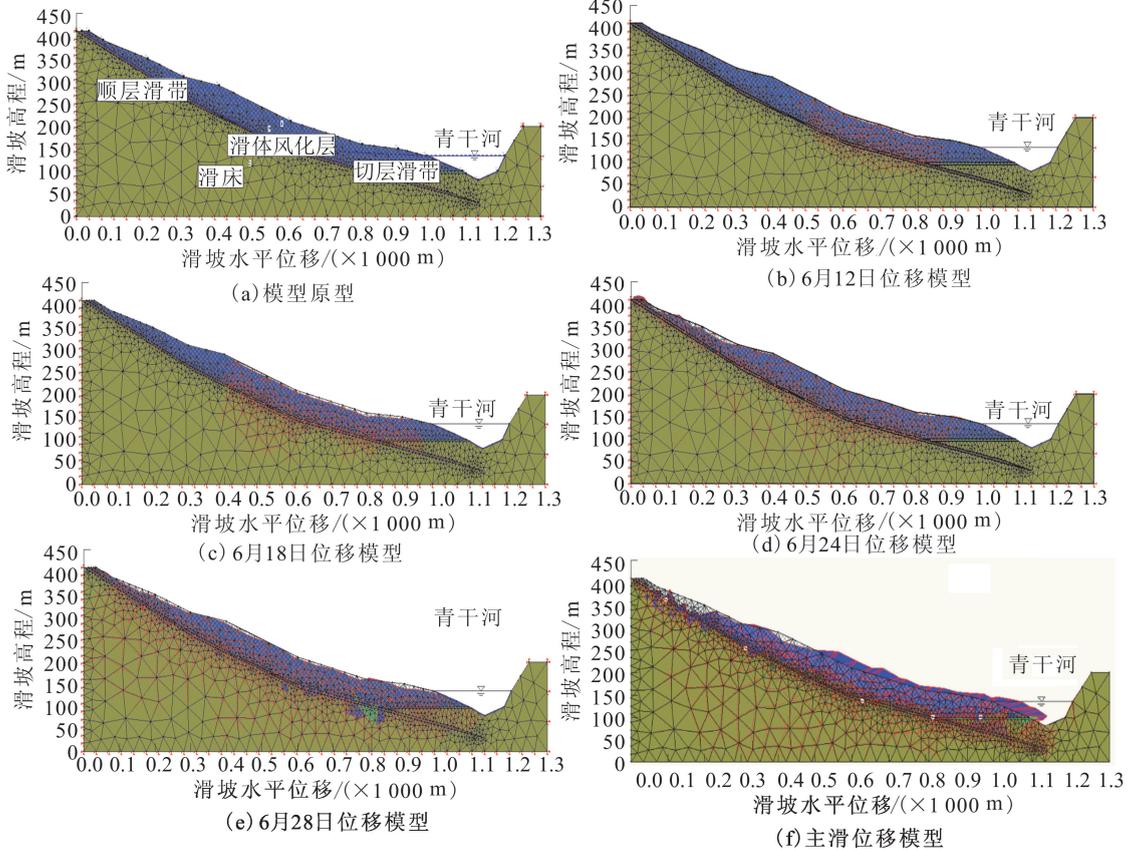


图 2 千将坪滑坡震动模型及输入记录波形数据后的水平破裂位移图

Fig.2 The quake model of Qianjiangping landslide and horizontal rupture displacements under the input of recorded waveforms

层滑带岩石破碎且有大量泥质充填,此滑带对滑坡的发生起到了至关重要的作用,而切层滑带至青干河边倾角逐渐变缓。滑坡下部为滑床,滑床整体稳定性较好,且受风化剥蚀程度较轻。由于 6—7 月持续的降雨,青干河水位上升至 135 m,滑坡区岩石、土层中含水位也猛然上升,故此模型选取的水位线基本与滑带一致。

3.1.2 模型参数选取

模型引用罗先启等的滑坡区土层和岩层静力学数据^[3-4],同时还结合动力学模型分析特点采用动弹性模量。资料表明^[8]:无论是岩体还是岩块,其动弹

性模量普遍大于静弹性模量,两者比值对坚硬完整岩体约为 1.2~2.0,而对于风化裂隙岩体等软弱岩体一般为 10 左右,大者可超过 20。本模型取两者比值 10。

表 1 千将坪滑坡震动模型参数表^[3]

Table 1 Parameters of the quake model of Qianjiangping landslide^[3]

岩、土层	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	静弹性模 量/kPa	动弹性模 量/kPa	泊松比
滑体风化层	25	5 000	50 000	0.32
顺层滑带	20	3 500	35 000	0.3
切层滑带	25	4 500	45 000	0.3
滑床	25	20 000	200 000	0.26

3.2 模型震动分析及滑坡微破裂过程

利用卢家山地震台记录的主滑事件及主滑前的微破裂事件数据进行模型震动分析,模拟滑坡从微破裂—蠕滑—再破裂—蠕滑—滑动的整个微破裂动力过程所造成的滑坡蠕滑滑动位移特征和应力分布特征。

3.2.1 滑坡破裂位移分布特征和微破裂过程分析

图2模型选取5个测试点,坐标依次为:(95,360)、(310,225)、(630,135)、(820,100)、(950,100)。输入上述6月12日、18日、24日、28日微破裂数据和7月13日主滑数据,得出相应滑坡破裂位移图[图2(b)~(f)]。

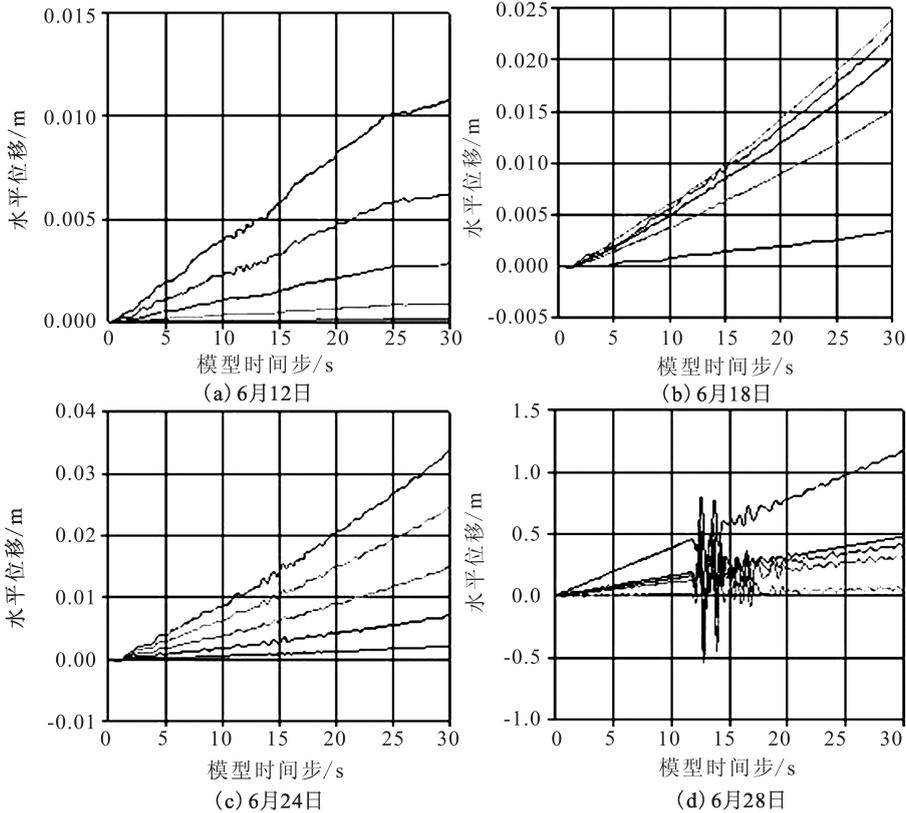


图3 滑坡主滑发生前滑带处四次微破裂位移图

Fig.3 Displacements of four micro-ruptures in the slip zone before the main landslide

滑坡中上部滑带处、蓝线(630,135)位于滑坡中部滑带处、绿线(820,100)为滑带转折点处、蓝绿线(950,100)为滑坡前部滑带处。

4次微破裂位移结果显示了千将坪滑坡水平位移逐渐加大的过程。其中位于滑坡中上部、中部和转折点处的水平位移扩展速率最大,且滑坡阻力由顺层滑带带逐渐向切层滑带带转移。滑坡后缘已经发生较大破裂位移,滑体整体不稳定,位移扩展只是在坡前还未明显表现出来而已,此时应力发展状态

图2(b)即6月12日波形为滑坡第一个破裂事件,发生在岩质滑带顺层滑带和切层滑带的转折端处,其性质为脆性破裂,可能由于此处应力相对集中导致岩桥剪断,此次微破裂后滑坡开始整体蠕滑。6月24日结果显示了横向裂隙扩展过程,且滑坡后缘发生拉裂下陷,随着破裂演变滑坡蠕滑逐渐加深,此时滑坡中前部破裂扩展最为迅速,可见滑坡已经破裂贯通,濒临滑动状态。

图3显示了卢家山记录6月12日、18日、24日和28日4次输入震动参数得出的5个测试点水平位移量。以6月12日为例,从上到下依次为:黑线(95,360)位于滑坡上部滑带处、红线(310,225)位于

为应力转变和集中过程。

综合图2和图3可以看出:(1)5个点破裂位移都在扩展,且各点处扩展程度不一;(2)6月12—18日破裂幅度很小,仅为0.15~0.25 m,属于微破裂之后浅层松散体的蠕滑状态;6月24—28日破裂发展较为迅速,为0.04~1.5 m,此时滑坡整体已经濒临极限平衡状态,属于部分岩桥剪断到蠕滑加剧破裂的剪切错动状态;(3)滑坡转折端岩桥被剪断后最大位移变化逐渐发生在中上部,然后则转变为中部和

转折端处,滑坡阻力也发生转移,最后随着坡前破裂贯通,坡前水平位移发展迅速直至滑坡发生。

图 2(f)显示了主滑发生时的模型状态,此时滑带区水平位移显著,滑坡从 100 m 高程剪出口处横向剪出。滑坡上部风化层明显下陷,坡前水平位移在 125 m 左右,垂直位移在 50 m 左右。李会中等^[9]依据滑坡上 3 处公路标志实际量测得断开平距分别为 142.9 m、147.0 m 和 159.4 m,下错高差分别为 38.5 m、49.7 m 及 51.0 m,并量出水平滑距为 148 m、155 m 和 167.4 m。李守定等^[10]得出的滑坡

平均空间滑距为 147 m,垂直平均滑距 46 m。

3.2.2 滑坡破裂应力分布特征

从模型的滑坡滑带处 XY 方向上剪切力分布图(图 4)中可以看出:(1)滑坡在输入地震动参数下剪切力变化较大,且其在逐渐增大;(2)滑带各个点处剪切力受震动影响较大,甚至位于滑坡转折点处剪切力方向前后发生了改变。这是由于随着破裂扩展,阻力由顺层滑带逐渐向切层滑带转移,但转移量并不多,滑坡稳定性主要还是由顺层滑带控制,切层只是分担了一部分剪切力;(3)剪切力同样显示

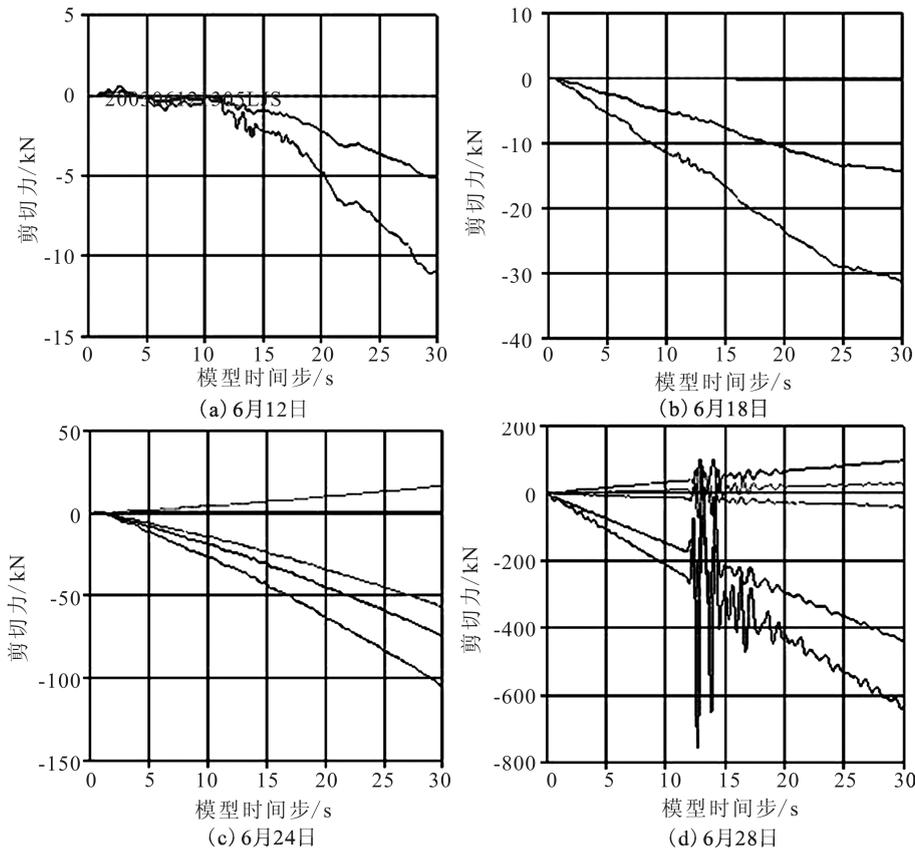


图 4 XY 向剪切力

Fig.4 The shear stress in XY direction

了两个层次的破裂扩展,第一层次幅度小,反映了浅层松散体蠕滑到破裂慢速滑动状态;第二层次幅度很大,反映了部分基岩蠕滑到破裂的剪切错动状态。

3.3 利用台站记录数据监测预警滑坡的可能

千将坪为大型岩质滑坡,在很大程度上具有前期微破裂、蠕滑、再破裂的过程。坡体在微破裂和蠕滑中会伴随有很多破裂波(可称其为微震),在距离滑坡不远的地震台站或地震观测台网能捕捉到这些微破裂信息。充分研究这类岩质滑坡可能发生滑动区的地形、地质、水文状况后,可以有效运用这些微

破裂数据来计算滑坡内部应力分布,判断其内部破裂位移发展情况,从而宏观把握并预警滑坡的发生。如果采用重点防御措施,如在合适位置增加流动地震台网加密观测并精确定位,则效果会更好。

4 结语

在前人研究的千将坪滑坡地形、地质、水文等基本特征基础上,综合静力作用和破裂动力作用,运用 GeoStudio 软件中 QUAKEW 模块建立该滑坡震动分析模型。结果表明千将坪滑坡的形成不单受静力

作用,还经历了微破裂—蠕滑—再破裂—蠕滑—滑动的微破裂动力过程。

从量的角度分析了千将坪滑坡微破裂滑动位移和应力分布特征:(1)滑坡水平滑动位移和剪切力逐渐增大;(2)水平滑动位移和剪切力特征都显示微破裂滑动状态明显分两个层次:第一层次幅度小,反映了转折端岩桥剪断后浅层松散体蠕滑到破裂的慢速滑动状态;第二层次幅度很大,反映了部分基岩体蠕滑到破裂的剪切错动状态;(3)滑坡应力特征还显示随着破裂扩展,阻力由顺层滑坡带逐渐向切层滑坡带转移,但其转移量并不多,滑坡稳定性主要还是由顺层滑带控制,切层只是分担了一部分剪切力;(4)滑坡在发生前经历了微破裂—蠕滑—再破裂—蠕滑—滑动的微破裂动力过程,为及时发现此类岩质滑坡发生滑动提供了一定的鉴定方法和辨别手段。

最后本文根据滑坡这一微破裂蠕滑过程提出了利用加密地震台(网)监测预警滑坡的可能。

参考文献(References)

- [1] 廖秋林,李晓,李守定,等.三峡库区千将坪滑坡的发生、地貌特征、成因及滑坡判据研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):3146-3153.
LIAO Qiulin, LI Xiao, LI Shouding, et al. Occurrence, Geology and Geomorphic Characteristics and Origin of Qianjiangping Landslide in Three Gorges Reservoir Area and Study of Ancient Landslide Criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3146-3153.
- [2] 王德咏,李科.库水位上升对千将坪滑坡的影响研究[J].灾害与防治工程,2007(2):15-19.
WANG Deyong, LI Ke. Study on Qianjiangping Landslide due to Reservoir Water Level Rise[J]. Disaster and Control Engineering, 2007(2): 15-19.
- [3] 罗先启,肖诗荣.三峡库区千将坪滑坡形成机制研究[R].2007.
LUO Xianqi, XIAO Shirong. Mechanism Research on Qianjiangping Landslide in Three Gorges Reservoir Area[R]. 2007.
- [4] 肖诗荣,刘德富,姜福兴,等.三峡库区千将坪滑坡地质力学模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):1023-1029.
XIAO Shirong, LIU Defu, JIANG Fuxing, et al. Geo-mechanical Model Experiment on Qianjiangping Landslide in Three Gorges Reservoir Area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 1023-1029.
- [5] 邹爱清,丁秀丽,李会中,等.非连续变形分析方法模拟千将坪滑坡启动与滑坡全过程[J].岩石力学与工程学报,2006,25(7):1297-1303.
WU Aiqing, DING Xiuli, LI Huizhong, et al. Numerical Simulation of Startup and Whole Failure Process of Qianjiangping Landslide Using Discontinuous Deformation Analysis Method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1297-1303.
- [6] 王秋良,申学林,王墩,等.三峡水库千将坪滑坡地震记录的波形特征研究[C]//中国地震学会成立三十年学术研讨会论文摘要集,2009.
WANG Qiuliang, SHENG Xuelin, WANG Dun, et al. Study on Waveform Characteristics of Earthquake Records in Three Gorges Reservoir Area [C]//China Earthquake Association Established 30 Years International Symposium, 2009.
- [7] 王秋良,姚运生,夏金梧,等.统计预测模型对三峡库区诱发地震预测的应用[J].地震地质,2009,31(2):287-292.
WANG Qiuliang, YAO Yunsheng, XIA Jinwu, et al. Application of Statistical Forecasting Model to the Prediction of the Three Gorges Reservoir Induced Seismicity[J]. Seismology and Geology, 2009, 31(2): 287-292.
- [8] 刘飞禹,蔡袁强,徐长节,等.循环荷载下软土动弹性模量衰减规律研究[J].浙江大学学报:工学版,2008,42(9):1479-1483.
LIU Feiyu, CAI Yuanqiang, XU Changjie, et al. Degradation of Dynamic Elastic Modulus of Soft Clay under Cyclic Loading [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(9): 1479-1483.
- [9] 李会中,潘玉珍,王团乐.三峡库区干将坪滑坡成因与机制分析[J].人民长江,2006,37(7):12-20.
LI Huizhong, PAN Yuzhen, WANG Tuanle. Analysis of Qianjiangping landslide Cause and Mechanism in Three Gorges Reservoir Area[J]. Yangtze River, 2006, 37(7): 12-20.
- [10] 李守定,李晓,刘艳辉,等.千将坪滑坡滑带地质演化过程研究[J].水文地质工程地质,2008,35(2):18-23.
LI Shouding, LI Xiao, LIU Yanhui, et al. Geological Evolution Process of Sliding Zone in Qianjiangping Landslide[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(2): 18-23.