

# 地震作用下三峡库区典型堆积层滑坡变形特性研究<sup>①</sup>

江洎洧, 潘家军, 张 伟

(长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**选取三峡水库区地震频发的兴山县一典型厚层堆积型滑坡为研究对象,以实测库水位波动与地震发生时间点关系为基础,并参照 V 度地震烈度,采用静力-渗流-动力多场耦合 3D 数值模拟方法,对滑坡变形机理进行研究。结果表明:(1)地震作用与库水位波动密切相关,不利的渗流条件和地震动荷载作用相互叠加,渗流场-动力场耦合作用共同导致滑坡体发生变形;(2)堆积层滑坡体结构相对均质,无显著不良地质单元,除堆积体临空面附近外,其对地震波几乎无放大效应;(3)V 度地震烈度条件下,连续地震对堆积层滑坡变形量的影响有限且收敛,但仍有必要对滑坡体变形进行长期监测。

**关键词:**三峡库区;地震;堆积型滑坡;多场耦合数值模拟;变形特性

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 2-0142-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.增刊 2.0142

## Research on the Deformation Characteristics of Typical Accumulative Landslides in the Three Gorges Reservoir under Earthquakes

JIANG Ji-wei, PAN Jia-jun, ZHANG Wei

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, Hubei, China)

**Abstract:** Seismic actions in the head region of the Three Gorges Reservoir (TGR) have increased significantly since the beginning of dam impoundment. Coupled with cyclical water level fluctuation, the deformation mechanism of landslides beside TGR are worthy of research. A typical accumulative landslide located in Xingshan County was selected as a case study in this paper. Three typical adverse conditions were determined by monitoring relationship between the water level fluctuation and time of seismic occurrence. Then, using a seismic intensity of V degree, a multi-field coupling numerical simulation was conducted to determine the deformation mechanism of the landslide. The results of the simulation afford the following conclusions: (1) Seismic action is closely related to water fluctuation, while superposition of adverse flow conditions and seismic load, the coupling effect of the seepage field and dynamic field causes a landslide deformation. (2) The structure of the debris landslide is relatively homogeneous, except for the region close to the free face of body of debris. There are no significant undesirable geologic elements and seismic amplification is not reflected in the debris. Furthermore, the mechanical parameters of debris and bedrock are quite different, thus the boundary of debris and bedrock is also a deformation border. (3) When the seismic intensity attains the V degree, a deformation landslide caused by continual earthquakes is limited and convergent, but long-term deformation monitoring for landslides is

① 收稿日期: 2015-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309029, 51109013); 中央级公益性科研院所基本科研业务(20140620164601)

作者简介: 江洎洧(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事土的工程性质试验研究及数值仿真分析。E-mail: jiangjw1023@163.com。

necessary.

**Key words:** the Three Gorges Reservoir; earthquake; accumulative landslide; multi-field coupling numerical simulation; deformation characteristics

## 0 引言

自三峡库区 2003 年蓄水以来,库区地震频次增加了 10 倍以上,特别是坝址至秭归、巴东一线的库首段区域<sup>[1]</sup>。三峡库区作为我国地质灾害最为多发的区域之一,频发微地震作用加之库水位周期性的大幅波动对库岸滑坡变形的影响巨大,值得深入研究。

水库诱发地震与库水位的波动、库区水文地质条件以及水库的规模有着密切联系<sup>[2-3]</sup>。具体到三峡库区,诱发地震可能引起的地表最大烈度高达 V 度<sup>[4-5]</sup>;而基于对工程地质类比分析,三峡库区诱发地震引起的地表烈度可达到 IV 度,特别是秭归、巴东一带<sup>[6]</sup>。

堆积层滑坡在库区分布较为广泛,例如秭归峡口集镇滑坡,其在库区蓄水后变形有显著增加趋势。本文以该滑坡为研究对象,在搜集库水位波动和库首段诱发地震数据的前提下,基于堆积层工程地质特性实测剖面,建立滑坡 3D 数值模型,研究在静力-渗流-动力多场耦合条件下,滑坡体在频繁微地震作用下的变形特性。

## 1 三峡库首段诱发地震特征

据笔者不完全统计,2008—2013 年库首段至少发生了 71 次 2.0 级以上地震。这些地震的特征总结如下:

(1) 地震震中在部分区域十分集中。

(2) 地震震源深度很浅,基本都小于 10 km,震级较大的地震其震源深度甚至在 5 km 以内。震级虽不大,但震中附近地表烈度较大,最大地震烈度可达到 IV~V 度。

(3) 根据收集的库水位波动与地震发生时间的关系曲线(图 1),总结得到以下规律:库水位高位运行阶段,水荷载激增会引起诱发地震频次的显著增加;受卸荷滞后效应影响,当库水位快速下降至低水位初期,地震频次较高;汛期库水位快速而剧烈的波动会增加库区地震频次。

诱发地震并非孤立存在,其与水位变化关系密切,对于滑坡体而言,水位的变化则对应了不同的渗流模式。本文多组耦合 3D 数值模拟参照以上三条典型易震工况展开,使研究更具有实用性和针对性。

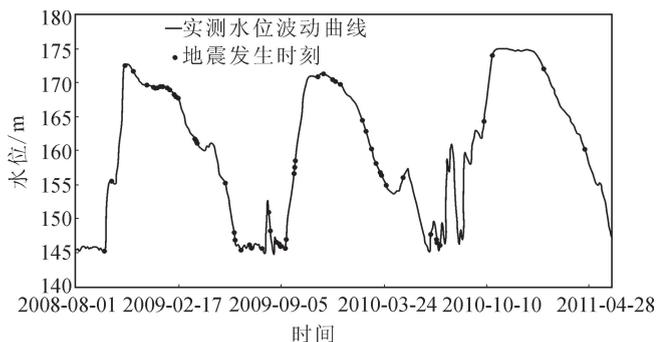


图 1 库水位波动与地震发生时刻关系

Fig.1 Relationship between the water level fluctuation and time of seismic occurrence

## 2 滑坡工程地质特性

桥头滑坡(31°7' N, 110°47' E)位于长江一级支流香溪河下游右岸,滑坡前缘高程 120 m 左右,后缘最高高程 270 m,滑坡平面面积达  $6.48 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,堆积体最大揭露深度为 47 m 左右,平均厚度为 25 m,属松散堆积物滑坡。堆积体由粉质黏土夹碎块石组成,结构较均质;堆积体下部有碎裂岩存在,应为早期上部岩体崩塌堆积而成;堆积体与基岩界面处具有滑面,分布有薄层的灰褐、黄褐色粉质黏土与碎石(角砾)土,厚度具有从后缘向滑体中部逐渐增厚的特点,具磨光镜面和擦痕,角砾具有定向排列现象,反映了堆积体变形自适应调整的过程。

图 2 为滑坡工程地质主剖面。据文献[7]中原位探坑渗透测试,滑体平均渗透系数  $2.87 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ,渗透性较强。

对采集的滑坡堆积体进行详细的物理力学测试,如表 1 所示。表中碎裂岩、卵石层以及泥质粉砂岩基岩的物理力学参数主要参考工程地质手册选取。

## 3 数值计算流程说明

### 3.1 3D 数值模型及计算边界条件

基于三条地质剖面及堆积层厚度等值线图,建立桥头滑坡三维几何模型并完成单元剖分(图 3)。计算模型共包含 13 743 个单元、3 116 个节点。

数值模拟在美国 ITASCA 公司 FLAC3D 有限差分软件上进行。静力场及渗流场计算中,模型底部节点位移全约束,模型外围四周节点的水平方向变形进行约束;动力场计算中,模型周边采用

表1 桥头滑坡岩土体物理力学参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock and soil in Qiaotou landslide

地质单元	天然密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	动弹模 量/MPa	弹性模 量/MPa	泊松比	黏聚力 /KPa	内摩擦角 / $^{\circ}$	阻尼比	渗透系数 / $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
堆积层	2 100	817.6	75	0.35	48	25	0.12	$5.8 \times 10^{-3}$
碎裂岩	2 300	13 000	600	0.25	0	32	0.08	$2.0 \times 10^{-2}$
卵石层	2 300	16 000	300	0.28	0	35	0.08	$1.5 \times 10^{-2}$
泥质粉砂岩	2 400	32 000	1 200	0.22	2 000	40	0.05	$1.0 \times 10^{-7}$

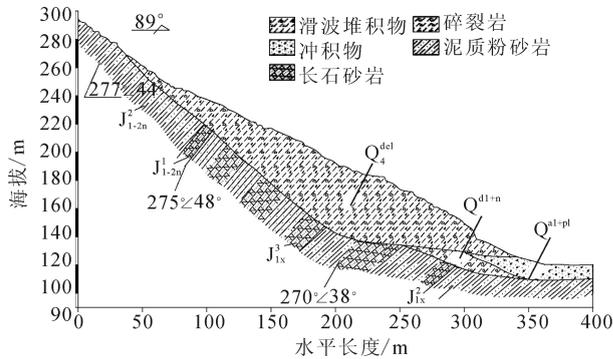


图2 桥头滑坡工程地质主剖面图

Fig.2 Engineering geological profile of Qiaotou landslide

FLAC3D特有的自由场边界条件,可很好地模拟地震波在模型边界处的传递特性,而在模型底部进行水平和垂直加速度时程的施加。

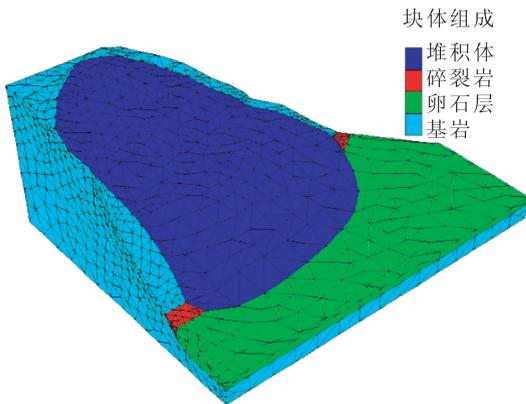


图3 桥头滑坡3D有限差分数值模型

Fig.3 The 3D finite difference numerical model of Qiaotou landslide

### 3.2 不利渗流工况的概化

据第1节诱发地震特征及图1实测水位波动情况,将三种最不利工况对应的渗流条件概化如下:

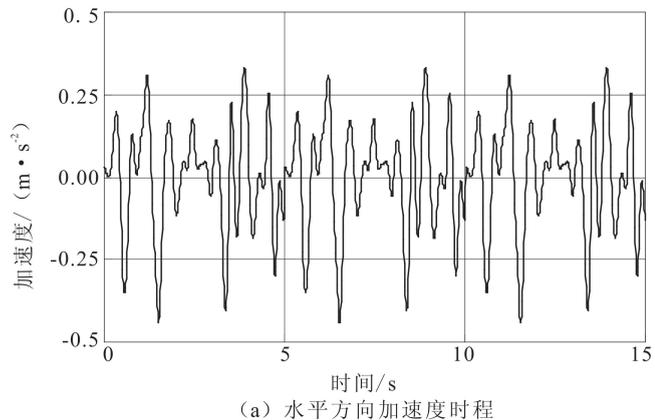
- (1) 60日内库水位由145 m升至175 m(工况1);
- (2) 30日内库水位由175 m降至145 m(工况2);
- (3) 30日内库水位由145 m升至165 m,后回落至145 m(工况3);

受篇幅限制,选取工况2为主要分析工况。

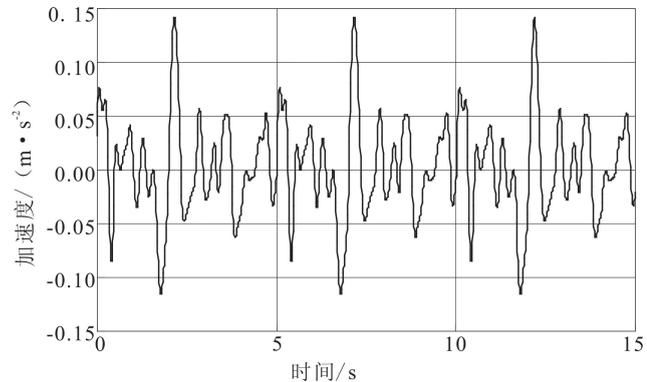
### 3.3 地震荷载时程曲线的选取

因缺乏库区地震实测加速度时程曲线,参照文

献[8]中阪神地震时程曲线波形,跳过前震和余震,直接选取主震阶段第3~8 s作为本研究一个时间序列中的一个循环波形单元。以水平向峰值加速度 $0.44 \text{ m/s}^2$ 为基准进行缩放,并依次完成三个循环地震波的拼接,5 Hz以上地震波的滤波以及加速度时程的基线校准(即消除“零漂”)。处理后的加速度时程曲线如图4所示。



(a) 水平方向加速度时程



(b) 垂直方向加速度时程

图4 校准后一个完整序列的地震加速度时程曲线

Fig.4 Corrected earthquake acceleration time-history curves in a complete time series

## 4 计算结果分析

### 4.1 渗流作用下的滑坡变形分析

库水位快速下降以及库水位短时间内的剧烈波动往往对滑坡变形的影响要大于库水位上升的情

况<sup>[7,9]</sup>。以工况 2 为例, 得到图 5 所示堆积体孔压等值线分布及渗流引起的滑坡变形等值线, 分析可知: 堆积体中孔压等值线整体呈凹曲线形态, 即由堆积体后缘向临空面方向依然有不平衡孔压传递, 对滑坡变形趋势不利; 图 5 中变形较大区域集中在涉水部位, 等值线形态为长轴垂直于滑坡主滑方向的近似椭圆形, 变形主要由指向临空面的渗流矢量激增引起, 堆积体最大变形约 8.91 cm。

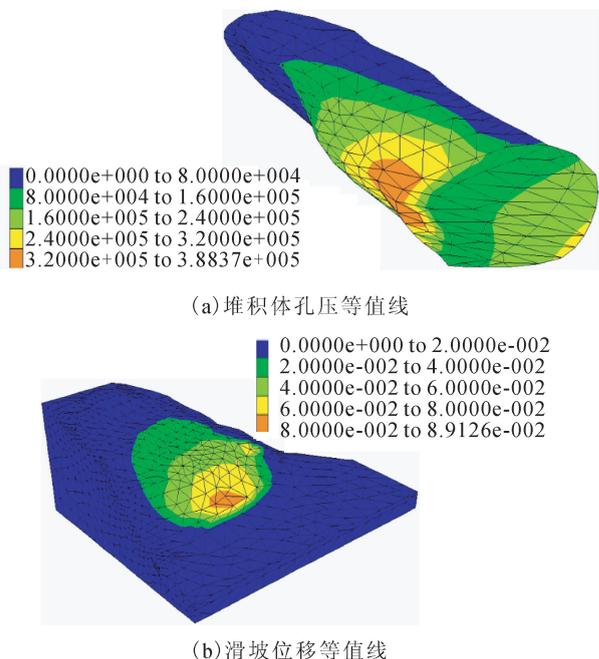


图 5 工况 2 下堆积体孔压及滑坡变形等值线

Fig.5 Pore pressure and displacement contours of landslide under the second condition

### 4.2 地震动力作用下的滑坡变形分析

渗流计算完毕后, 模型周边设置为自由场边界, 并在模型底部施加图 4 所示地震加速度时程, 得到滑坡变形等值线图(图 6), 分析可知: 一个序列 V 度地震引起的累积位移约为 18.54 cm。该工况下, 临空面的水位下降和后缘的地下水补给都会引起指向临空面涉水部位的渗流矢量增大。另据堆积体变形机制图(图 7), 涉水部位有较连贯的剪切塑性区分布, 在中上部形成了连续的圈椅状拉塑性破坏区。该工况下频发微地震对堆积体变形的影响有待进一步分析。

### 4.3 堆积体动力响应及典型节点变形时程

据以上分析, 工况 2 下频发地震对堆积体变形影响更大, 因此以工况 2 为例进行分析。

选取 175 m 高程处堆积体临空面及深部的两

个节点, 记录并对比节点动力响应曲线与加载地震加速度时程曲线之间的关系, 如图 8 所示。可以看出: 底层节点位于基岩与堆积体界面处, 因两种材料阻尼比的差异, 振动初期加速度响应频率偏大, 有个别加速度峰值异常, 之后与地震波时程高度吻合, 因基岩阻尼比很小, 底层节点加速度时程与地震波几乎无相位差; 表层临空面节点则不受岩土界面阻尼比突变的影响, 加速度响应曲线与地震波时程波形一致, 有微弱的滞后性特征, 且响应加速度略有放大, 放大系数约 1.3 倍。

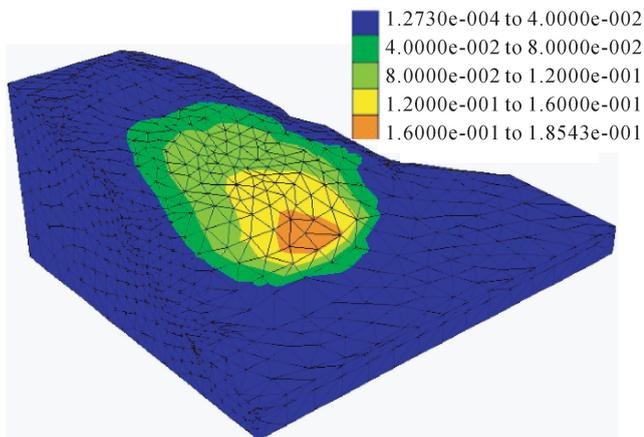


图 6 动荷载施加后滑坡变形等值线图

Fig.6 Displacement contour of landslide after dynamic load applied

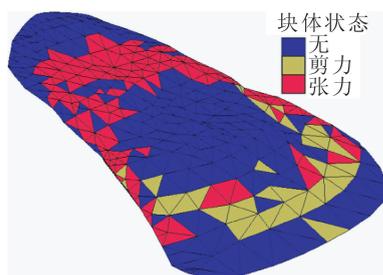


图 7 动荷载作用后堆积体变形机理图

Fig.7 Deformation mechanism of deposit after dynamic load applied

## 5 结论

基于三峡库区蓄水后地震频发的实际情况, 搜集了近年库水位波动实测数据以及地震发震数据, 分析发震与水位波动之间的规律, 归纳得到三类最易诱发地震的工况。以此为基础, 选取地震多发区附近典型厚层堆积体滑坡, 采用静力-渗流-动力多场耦合 3D 有限差分计算方法, 以 V 度地震烈度, 模拟并分析了不利工况下频发地震对堆积体滑坡变形的影响。结果表明:

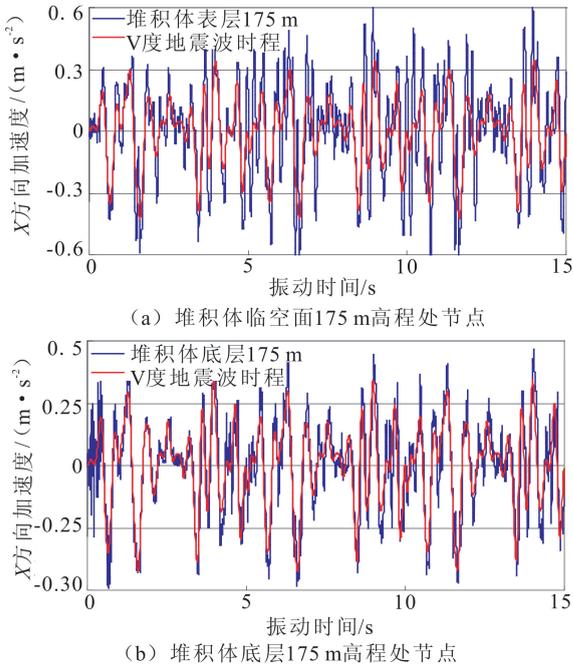


图8 典型单元节点水平方向加速度响应时程

Fig.8 Horizontal acceleration response time-history curves of typical nodes

(1) 地震作用与库水位波动密切相关,不利的渗流条件和地震动荷载作用相互叠加,渗流场-动力场耦合作用共同引起滑坡体发生变形。据临空面典型节点变形情况,地震荷载引起的变形占累积变形50%以上,略微占主导,但渗流变形因素同样不可忽略。

(2) 堆积层滑坡体结构相对均质,无显著不良地质单元,堆积体深部对地震波几乎无放大效应,临

空面则有约1.3倍的放大。

(3) 由于岩土力学参数的较大差异,本文研究工况下变形边界即堆积体与下伏岩层交界面。

(4) V度烈度仍属弱震范围,连续地震对堆积层滑坡变形量的影响有限且收敛,但频发地震引起的变形累积不可忽略,因此有必要对滑坡体变形进行长期监测。

## 参考文献

- [1] 韩晓光,饶扬誉.长江三峡水库巴东库段地震成因分析[J].大地测量与地球动力学,2004,24(2):74-77.
- [2] Baisch S, Voros R, Rotherth E, et al. A Numerical Model for Fluid Injection Induced Seismicity at Soultz-sous-Forets[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010,47:405-413.
- [3] Dura-Gomez, Talwani. Reservoir-induced Seismicity Associated with the Itoiz Reservoir, Spain; A Case Study[J]. Geophysical Journal International, 2010,181(1):343-356.
- [4] 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):287-294.
- [5] 王儒述.三峡水库诱发地震研究综述[J].三峡大学学报:自然科学版,2006,28(2):97-104.
- [6] 李珏,李愿军,杨美娥.长江三峡库区水库诱发地震的研究[J].中国工程科学,2005,7(6):14-20.
- [7] JIANG Ji-wei, Ehret Dominik, XIANG Wei, et al. Numerical Simulation of Qiaotou Landslide Deformation Caused by Drawdown of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011,62(2):411-419.
- [8] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [9] 罗红明,唐辉明,章广成,等.库水位涨落对库岸滑坡稳定性的影响[J].地球科学:中国地质大学学报,2008,33(5):687-692.