

Analysis of Stability of Xiari Landslide Based on FLAC^{3D}

Liang Chen, Jingqing Lv, Fei Yin

Fujian Huadong Geotechnical Engineering Corporation Limited, Fuzhou Fujian
Email: 58908817@qq.com

Received: Aug. 29th, 2018; accepted: Sep. 19th, 2018; published: Sep. 26th, 2018

Abstract

The bank slope instability is a common engineering geological disaster in the process of construction and operation of reservoir. Once the slope of reservoir is unstable, it will cause huge loss of economic property directly. Based on the results of geological survey and exploration of Xiari landslide, the potential sliding surface was determined, and the calculation model of fast Lagrange analysis method based on FLAC^{3D} was established, and the stability and failure mode were calculated. The results show that there are two sets of potential sliding surfaces in Xiari landslides, and they can meet the stability requirements under natural, water storage and earthquake conditions.

Keywords

Bank Slope, FLAC^{3D}, Analysis of Stability, Water Storage, Earthquake

基于FLAC^{3D}的夏日滑坡稳定性研究分析

陈 梁, 吕敬清, 尹 飞

福建华东岩土工程有限公司, 福建 福州
Email: 58908817@qq.com

收稿日期: 2018年8月29日; 录用日期: 2018年9月19日; 发布日期: 2018年9月26日

摘 要

库岸边坡失稳是水库在修建和运行过程中常见的工程地质灾害, 水库边坡一旦失稳将直接对整个工程造成巨大的经济财产损失。本文通过对夏日滑坡现场地质调查及勘探揭示的成果, 确定其潜在滑动面, 建立基于快速拉格朗日差分法的FLAC^{3D}计算模型, 计算其稳定性并分析其破坏模式。结果表明, 夏日滑坡存在两组潜在滑动面, 并且在天然、蓄水、地震工况下都能满足稳定性要求。

关键词

库岸边坡, FLAC3D, 稳定性评价, 蓄水, 地震

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国内外各种大型水电站的修建, 水库库区库岸边坡的稳定性分析越来越受到人们的关注。赵永辉[1]通过 FLAC^{3D} 对澜沧江古水水电站争岗滑坡堆积体进行稳定性分析, 指出堆积体后缘变形破坏严重, 容易形成推移式滑坡。慕洪生[2]基于 FLAC^{3D} 对万家口子水电站滑坡体进行三维建模, 分析其在地震荷载作用下的稳定性。张艳阳[3]通过 FLAC^{3D} 对库水位变化对滑坡的稳定性进行分析, 得出随着水位上升滑坡变形加剧。夏敏[4]对白龙江某滑坡进行地震研究分析, 指出滑坡对地震波具有放大效应以及滑坡体对地震更加敏感。Wright 和 Rathje [5]通过模型试验研究了地震触发边坡失稳的力学机理。国内外对滑坡的研究内容十分丰富, 成果显著。

2. 研究区概况

楞古水电站地处我国西南, 位于四川省康定县雅砻江上, 雅砻江是金沙江的最大支流, 流域面积大约 13.6 万 km², 干流全长大约 1570 km。夏日滑坡位于雅砻江力丘河至蒙古山河段, 两岸具有雄厚山体, 河谷下切, 谷坡陡峭, 临江坡高大, 是典型的高山峡谷地区, 该滑坡体发育在右岸, 总方量约 2100 万 m³。该边坡稳定直接影响到水电工程项目的全过程, 研究其稳定性具有重要的意义[6], 其物质组成主要为冰水堆积物, 胶结角紧密, 但受地震、降雨、蓄水及下部基岩风化和浅表部堆积体破碎等因素影响, 前缘和两侧陡坎局部出现塌滑和拉裂破坏。该堆积体规模巨大, 一旦失稳将直接威胁到人的生命财产安全以及水库的施工运行, 本文通过对现场工程地质勘察研究, 将基岩与覆盖层的接触带和强风化变质砂岩带作为两个潜在的滑动面, 采用拉格朗日差分法计算其稳定性并分析其破坏模式[7]。

夏日滑坡区地形较为复杂, 由多种不同的地表形态组成, 其工程地质剖面简图如图 1 所示。在夏日滑坡体上游, 有大型冲沟切割, 在 2600 m 高程以上, 由 3 条走向分别为: S10°W, S35°E, S60°E 的冲沟将上游坡体切割成独立的小块, 钻孔资料显示沟间坡体基岩较完整。在高程 2600 m 以下, 冲沟交汇成一条, 冲沟切割深度较大, 沟底见基岩, 将此冲沟定为分析区上游边界。前缘中部为崩塌滑坡体, 下游部分为一突出坡体, 在崩塌滑坡体和突出坡体之间, 有一深切冲沟, 切割深度最深十余米, 将此定为分析区下游边界。前缘边界为雅砻江所围限。夏日滑坡地形上相对独立, 呈舌状分布, 是典型的圈椅形地貌。

前缘高程 2400 m, 后缘高程 2950 m。在 2750~2900 m 之间, 边坡较缓, 形成较大平台, 坡度在 20°~25°, 平台前缘发育多个小型的崩塌滑坡体, 并有大量有拉裂缝和坍塌台阶, 主要为碎块石崩塌堆积物组成; 2750 m 以下边坡坡度较陡, 在 40°~50° 之间。堆积体主要有冰水堆积物组成, 冰水堆积物主要分布 2600~2750 m 高程。夏日滑坡区发育一条 NNE 向断层, 主断层为逆-左旋平移断层, 断面两侧花岗岩岩劈理化严重, 并有断层泥和断层角砾带, 主断面附近有多个次级断面。

夏日边坡在 2900 m 以上高程为三叠系上统侏罗组变质砂岩和印支-燕山期花岗岩伟晶岩脉, 在 2900 m 高程以下为砂岩反倾边坡。边坡区主要岩层产状为: N50°~70°W/NE∠45°~55°, 节理组数较多, 主要有

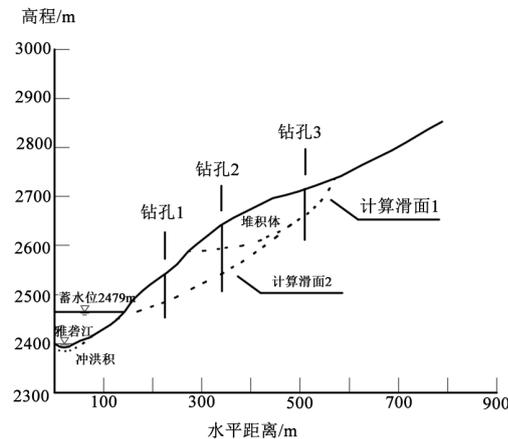


Figure 1. Typical geological profile of Xiari landslide slope
图 1. 夏日滑坡体边坡典型地质剖面图

三组，分别为：1) $S30^{\circ}\sim 40^{\circ}W/NE\angle 70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ，与江斜交，很发育，倾下游，陡倾节理。2) $N40^{\circ}\sim 60^{\circ}E/NE\angle 50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ，顺坡向，很发育，走向与江近平行，中倾 - 陡倾节理。3) $N40^{\circ}\sim 60^{\circ}E/NE\angle 45^{\circ}\sim 55^{\circ}$ ，与江斜交，发育，倾上游，中倾节理。各种结构面切割组合易形成潜在不稳定块体，坡表临空部位岩体滑移 - 拉裂变形、倾倒变形明显。水平深度 40~50 m 范围发育松动变形岩体，呈碎裂结构，弱风化状态，变形较强烈。

3. 变形破坏现象及滑面确定

3.1. 已有变形破坏现象

在夏日边坡中部平台前缘发育多个小型的滑坡体，并有大量有拉裂缝和拉裂台阶，台阶的宽度 1.0~2.0 m，各级台阶之间的高差 30.0~80.0 cm，有的台阶之间存在拉裂缝，裂缝延伸 10.0~40.0 m，宽度 3.0~15.0 cm。在夏日边坡上游滑坡体前缘有 9 个出水点，基本在同一高程，连成一排，出水量较大，局部形成沼泽，显示了滑坡前缘的所在。在夏日边坡平台前缘，基岩由于卸荷而产生较多的拉裂变形现象，局部形成崩塌堆积体和危岩体。基岩反倾岩层，由于卸荷变形，产生顺层劈理和切层的张节理，导致上部基岩破碎，由于前缘基岩较完整，层厚较大，倾角较陡，对边坡稳定性有利，目前主要破坏模式为卸荷 - 拉裂 - 倾倒破坏。从节理产状看，具备产生底滑面、后缘切割面、上下游切割面条件。根据钻孔资料，显示存在底滑面的可能，因此在一定的工况条件下，破坏模式可能转化为拉裂 - 滑移模式[7]。

3.2. 滑面确定

第一种滑移模式为表层堆积体的滑移，底滑面为堆积体与强卸荷变形岩体的接触界面；第二种滑移模式为边坡的整个滑面基本都处于强卸荷变形岩体中，滑坡贯穿整个滑坡体，其中切穿前震旦纪强(全)风化花岗伟晶岩和印支 - 燕山期花岗闪长岩(黑云母花岗岩)，滑坡体积较大。

4. 稳定性分析

4.1. 软件介绍

FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua)由美国 ITASCA 公司开发的仿真计算软件。能够进行土质、岩石和其它材料的三维结构受力特性模拟和塑性流动分析。通过调整三维网格中的多面体单元来拟合实际的结构。单元材料可采用线性或非线性本构模型，在外力作用下，当材料发生屈服流动后，网格能够相应发生变形和移动(大变形模式)。FLAC^{3D} 采用了显式拉格朗日算法和混合 - 离散分区技术，能够

非常准确地模拟材料的塑性破坏和流动。

4.2. 模型构建

根据现场勘察划分的边界条件, 为了不影响计算的精度, 模型下游边界取到夏日堆积体下游沟侧山梁, 上游边界取到上游变形体, 前缘为雅砻江右岸, 后缘边界高程最高处约 2950.0 m 处。其中上游边界离滑坡体最近距离为 100.0 m, 下游边界离滑坡体距离为 100.0 m。模型取坐标原点为模型下游与后边界交点, X 向为垂直雅砻江方向, 指向江的方向为正方向, 取长度 900.0 m, Y 坐标轴为顺雅砻江方向, 指向上游为正方向, 取宽度 600.0 m, Z 坐标轴为重力加速度方向, 底部取高程 2000.0 m, 向上为正。由于边坡只受到重力场作用, 因此模型边界设定为固定边界约束[8]。模型假定边坡岩体应力、应变之间的本构关系为弹塑性[9], 岩体的破坏服从摩尔-库仑准则[10]。

为了适应地表的复杂起伏状况, 计算模型靠近地表部分采用四面体自由剖分, 选用较密的网格。模型的下部基岩采用六面体映射剖分。共剖分节点 5641 个, 单元 21,399 个(图 2-计算模型)。

当滑体为地表覆盖层时, 滑体采用四面体剖分, 共剖分 288 个节点, 698 个单元(图 2-滑体 1), 滑体和变形基岩之间设置接触面模拟滑坡面, 接触面剖分为 183 个节点(图 2-滑面 1)。

当滑坡发生在强风化变质砂岩中, 滑体为两层, 第一层为覆盖层, 第二层为强风化变质砂岩, 滑体共剖分为 1227 个节点, 4386 个单元(图 2-滑体 2), 滑面剖分为 771 个节点(图 2-滑面 2)。

4.3. 计算工况

由于滑体 1 的滑面高于正常蓄水位, 稳定性分析中不考虑蓄水的影响, 主要考虑天然、地震两种工况; 滑体 2 变形岩体考虑天然、蓄水、地震、地震+蓄水四种工况。地震工况采用动力水平向峰值加速度采用 50 年超越概率 10%的峰值加速度 0.167 g [11] [12]。

4.4. 物理力学参数取值

夏日滑坡物理力学参数根据物理力学试验结果、反演分析及工程地质类比[13]并参考《水利水电工程地质勘察规范(GB50287-99)》等规范提出, 具体参数值见表 1。

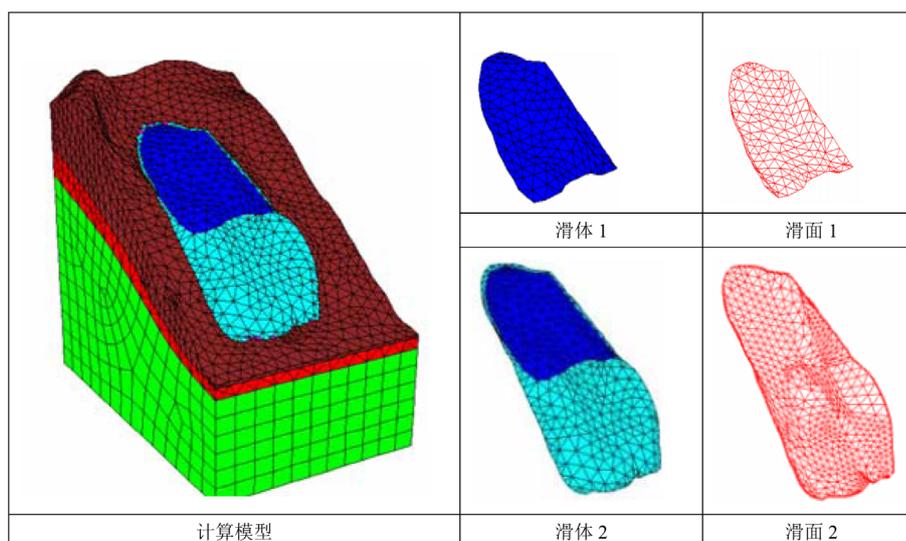


Figure 2. Numerical model
图 2. 数值模型

Table 1. Physical mechanics parameters of rock mass
表 1. 岩体物理力学参数

岩土体	弹性模量/GPa	泊松比/ μ	湿重度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	饱和重度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	粘聚力/kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$
堆积体	1.00	0.34	20.00	21.00	38.00	35.00
破碎砂岩	9.00	0.29	21.00	22.00	70.00	38.00
弱风化砂岩	36.00	0.23	26.00	27.00	300.00	45.00
微风化砂岩	44.00	0.22	27.00	28.00	800.00	50.00

4.5. 稳定性计算结果及评价

4.5.1. 安全系数

夏日滑坡稳定性计算成果见表 2。

由表 2 可知，在第一种表层堆积体滑移模式下，天然状态时安全系数为 1.20，地震工况时安全系数为 1.06，边坡在天然工况下处于稳定状态，在地震工况下处于极限平衡状态；由图 3~图 4 滑面上的安全系数分布可以看出，在地震作用下，安全系数降低了 11.7%，在滑面两侧和后缘，原来处于安全状态的区域，部分处于危险状态，同时在滑面前后缘边界，出现了一些的破坏区，由于堆积体的坡脚松动和后缘出现拉张作用，导致坡脚和后缘安全系数降低。

由表 2 可知，第二种强卸荷变形岩体滑移模式下，天然状态时安全系数为 1.36，地震工况时安全系数为 1.18，较天然状态降低了 13.2%，蓄水工况时安全系数为 1.28，较天然状态降低了 5.9%，蓄水+地震工况时安全系数为 1.10，滑体已接近极限平衡状态，较天然状态降低了 19.1%；蓄水+地震工况下安全系数降低幅度最大。安全系数如分布图 5~图 8。

4.5.2. 天然应力场

天然状态下边坡的最大主应力及最小主应力均为层状分布，大主应力 σ_1 最大值为 5.38 MPa，小主应力 σ_3 最大值为 11.57 MPa。最大主应力在坡脚位置有明显的应力集中现象，在坡表附近应力等值线几乎与坡面平行，随边坡深度的增加，最大主应力方向开始转变，最大主应力和水平方向的夹角逐渐增大，最终直至铅直，最大主应力值在地表附近趋近与零，并且随深度的增加其值不断变大，在边坡底部最大主应力值最大；最小主应力在边坡内呈渐变分布，靠近临空面最小主应力值趋近与零，从坡表堆积体到深部基岩最小主应力值逐渐变大，在底部出现最大值；从图中可以看出，坡体内的应力场分布特征主要受重力场的控制，坡内应力场的分布符合中国西南应力区斜坡应力场基本特征，该边坡整体处于受压状态，但在滑体边缘地表附近出现不连续的拉应力区，最大拉应力值为 0.4 MPa。

4.5.3. 天然工况

在天然工况下，夏日滑坡主要受重力场的影响，主应力沿坡面呈层状分布，最大主应力 0.82~5.38 MPa，边坡整体处于受压状态，只要在坡面小部分区域内出现拉应力区；在高程 2600 m 附近上覆堆积体与基岩接触面上出现轻微的应力集中现象，边坡整体未出现剪应力增量集中带，最大剪应力值为 3.84 MPa；塑性区零星的分布于高程 2600~2750 m 之间，整体处于弹性变形阶段，少量堆积体处于剪屈服阶段；堆积体水平方向上的位移最大值为 1.42 cm (见图 9)，发生变形的深度和范围都较小。因此，上覆堆积体与下伏基岩的界面为一潜在的滑动界面，但是天然状态下夏日滑坡处于稳定状态。

4.5.4. 蓄水工况

在蓄水至高程 2479 m 工况下，主应力仍呈层状分布，但最大主应力值增大为 1.08~5.96 MPa，最小主应力在堆积体内出现底应力区，但分布范围有限；在边坡的前缘和后缘开始出现剪应力集中带，最大值为 6.26 MPa；塑性区在高程 2450~2800 m 之间呈带状分布，但并未贯通，堆积体前缘处于剪屈服状态，

后缘处于拉屈服状态；边坡坡表位移增大，水平方向上的位移最大值为 3.07 cm (见图 10)，范围有明显的扩大，强卸荷的破碎砂岩也出现了微小的位移，所以强卸荷砂岩与上覆岩体的接触界面为一潜在滑动面，结合 3.5.1 的计算可知，在蓄水工况下夏日滑坡仍处于安全状态，但是局部会出现小范围的滑塌现象。

4.5.5. 地震工况

在地震工况下，夏日边坡主应力分布主要受控于地震动力作用，边坡最大主应力在坡脚和坡底都出现明显集中，最大主应力值为 1.12~8.46 MPa，最小主应力在坡脚出现应力降低区，在堆积体后缘出现拉应力区；剪应力在坡脚出现明显的应力集中，集中位置为滑体的剪出口，最大值为 8.75 MPa；塑性区分布范围明显增大，在高程 2400~2800 m 之间呈带状分布，其贯通率约为 80%，堆积体前缘处于剪屈服状态，中部处于拉剪屈服状态，后缘处于拉屈服状态；边坡坡表位移增大，水平方向上的位移最大值为 4.11 cm (见图 11)，位移主要发生在上覆堆积体和下伏强卸荷破碎砂岩中，且堆积体位移较大，处于极限平衡状态，发生失稳破坏的可能性较大。综合表明，地震工况下边坡的处于极限平衡状态，且地震对上覆堆积体的影响较大。

Table 2. Calculation results of stability coefficient of Xiari landslide

表 2. 夏日滑坡稳定性系数计算结果

滑面	不同工况安全系数			
	天然	地震	蓄水	蓄水 + 地震
滑面 1	1.20	1.06	/	/
滑面 2	1.36	1.18	1.28	1.10

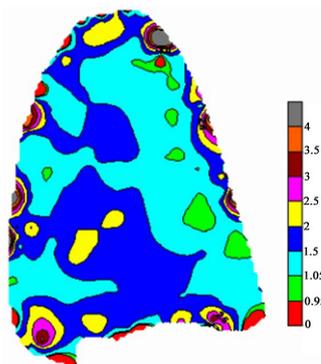


Figure 3. Safety factor distribution under natural condition

图 3. 天然工况下安全系数分布图

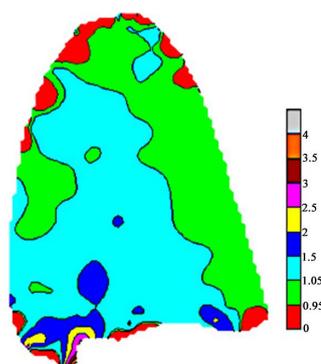


Figure 4. Safety factor distribution under earthquake condition

图 4. 地震工况下安全系数分布图

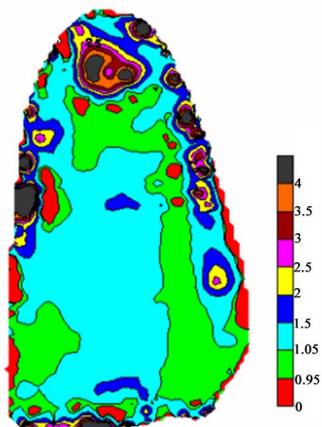


Figure 5. Safety factor distribution under natural condition
图 5. 天然工况下安全系数分布图

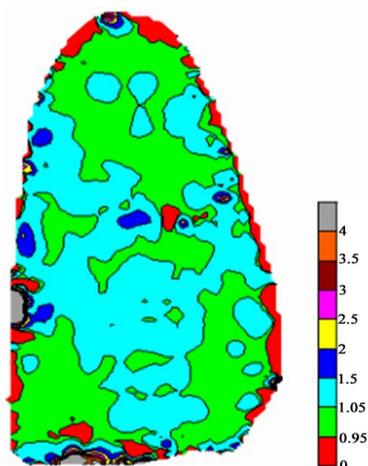


Figure 6. Safety factor distribution under earthquake condition
图 6. 地震工况下安全系数分布图

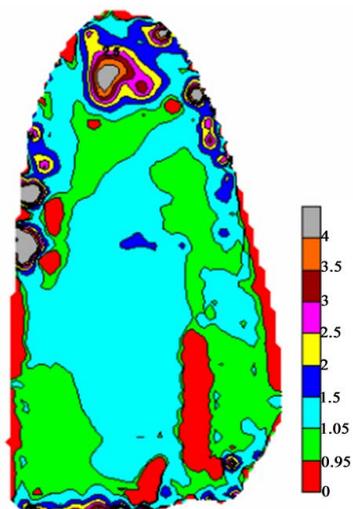


Figure 7. Safety factor distribution under water storage condition
图 7. 蓄水工况下安全系数分布图

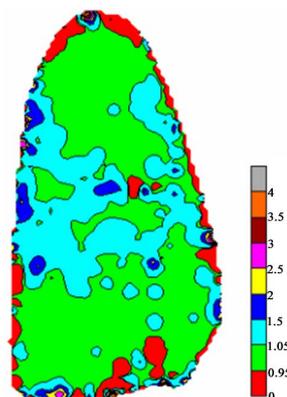


Figure 8. Safety factor distribution under earthquake and water storage condition
 图 8. 地震 + 蓄水工况下安全系数分布图

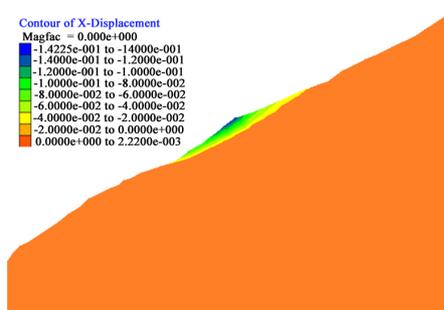


Figure 9. Horizontal displacement contour
 图 9. 水平方向位移云图

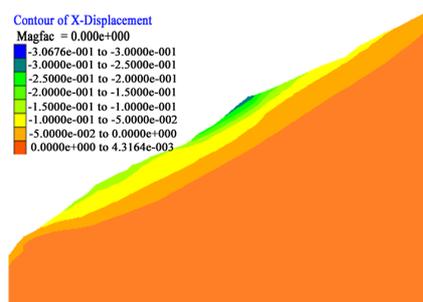


Figure 10. Horizontal displacement contour
 图 10. 水平方向位移云图

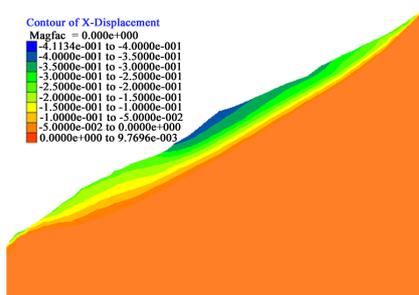


Figure 11. Horizontal displacement contour
 图 11. 水平方向位移云图

5. 结论

通过对夏日滑坡的现场勘查研究,分析其工程地质条件,得出岩体物理力学参数,确定潜在滑动面;利用 FLAC^{3D} 建立数值模拟模型,运用快速拉格朗日差分法计算边坡稳定性,得到以下结论:

1) 夏日滑坡存在两个潜在滑动面,滑面 1 为上覆堆积体与强卸荷变形岩体的接触界面,滑面 2 为处于强卸荷变形岩体中并且贯穿整个滑坡体,通过计算得出两个滑面在不同工况下的安全系数分布云。

2) 在天然工况下,应力场符合天然重力场的分布,无明显的应力集中现象,水平方向上的位移最大值为 1.42 cm,边坡在两种滑面下的稳定系数分别为 1.20 和 1.36,都处于稳定状态。

3) 在蓄水工况下,由于水位的抬升,使岩体的物理力学参数降低,以及水对节理的软化作用,边坡的稳定系数下降,水平方向上的位移最大值为 3.07 cm,但边坡仍处于稳定状态,只有局部会有小范围的塌滑现象。

4) 在地震工况下,应力场分布主要受地震动力影响,边坡前缘和后缘都出现应力集中,并且出现剪应力集中带,塑性区呈带状分布且贯通率达到 80%,水平方向上的位移最大值为 4.11 cm,两种滑面下的稳定系数分别为 1.06 和 1.18,上覆堆积体处于危险状态。

基金项目

华能澜沧江集团科技项目(20158101216)。

参考文献

- [1] 赵永辉,涂国祥,董劲,等. 基于 FLAC3D 的澜沧江古水电站争岗滑坡堆积体稳定性分析[J]. 路基工程, 2016(1): 182-185.
- [2] 慕洪生,张宪雷,姜震. 基于 FLAC3D 万家口子水电站滑坡体三维模型计算分析[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2013, 14(2): 47-49.
- [3] 张艳阳,任光明. 某滑坡稳定性的 FLAC-3D 数值模拟研究[J]. 四川理工学院学报(自科版), 2015, 28(6): 83-86.
- [4] 夏敏,任光明,郭亚莎,吕生弟,刘荣清. 地震诱发滑坡复活机制的 FLAC3D 数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 305-311.
- [5] Wright, S.G. and Rathje, E.M. (2003) Triggering Mechanisms of Slope Instability and their Relationship to Earthquakes and Tsunamis. *Pure & Applied Geophysics*, **160**, 1865-1877. <https://doi.org/10.1007/s00024-003-2410-4>
- [6] 孙广忠. 中国典型滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [7] 周永利. 基于 AutoCAD 与 ANSYS 建立 FLAC3D 模型的边坡稳定性分析[J]. 中国科技信息, 2009(19): 90-92.
- [8] 张廷国. 基于 FLAC3D 的库岸路基边坡稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2013
- [9] 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, 2008.
- [10] 彭文斌. FLAC3D 实用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [11] 刘红帅,薄景山,等. 岩土边坡地震稳定性评价方法新进展[J]. 防灾科技学院学报, 2007(3): 20-26.
- [12] 刘春玲,祁生文,童立强,赵法锁. 利用 FLAC3D 分析某边坡地震稳定性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2730-2733.
- [13] 言志信,张森,张学东,张刘平. 顺层岩质边坡地震动力响应及地震动参数影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(s2): 3522-3528.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org