

基于 FLAC3D 的浮托型推移式滑坡稳定性分析

易朋莹^{1,2}, 邓时义², 吕涛³, 吴韩⁴

(1. 重庆市高新工程勘察设计院有限公司, 重庆 401121; 2. 四川宏扬建筑集团有限公司, 四川 资阳 641500;
3. 重庆市交通规划勘察设计院, 重庆 401121; 4. 西北综合勘察设计院重庆分院, 重庆 400014)

摘要:基于三峡库区典型浮托型推移式滑坡——云阳凉水井滑坡地质特征,建立计算模型和计算工况,采用强度折减法运用 FLAC3D 求解稳定系数,计算成果与传递系数法较符合;结合条块自身稳定系数变化量,用剪应变增量分析滑坡在各种工况下的变形特征;滑坡在长江高水位下稳定性最差;水位下降时前缘的变形大,降雨时后缘变形较大,该滑坡类型为浮托型推移式滑坡。

关键词:浮托型推移式滑坡;滑坡稳定性;变形规律;数值模拟分析;成因机制

中图分类号:TU 457

文献标识码:A

凉水井滑坡位于云阳县水让村 8 组长江右岸,面积约 $11.82 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑体平均厚度约 34.5 m,总体积约 $407.79 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2008 年 11 月初,由于三峡库区蓄水至 175 m 影响,凉水井滑坡周边及滑体内已出现不同程度的地表裂缝、房屋裂缝,且有增长的趋势。如此大型的滑坡体,不仅严重威胁当地居民的出行与生命财产安全;同时,长江在该处航道较为狭窄,一旦失稳将快速下滑入江中,形成的涌浪较高,将直接威胁航道内过往船舶及乘客安全,经济损失和社会影响无法估量。由于滑坡受库水位升降变化和暴雨等复杂因素影响,采用传统计算方法难以准确判定对该滑坡变形特征^[1-4],本文采用 FLAC3D 数值结合传递系数法分析滑坡稳定性和变形特征,为滑坡有效防治提供理论依据。

1 凉水井滑坡概况

1.1 空间形态特征

滑坡区属构造剥蚀丘陵和河流阶地地貌,中部及后部地形较陡,前部地形较缓,为圈椅状地形。滑坡前缘高程约 100 m,后缘高程约 319.5 m,相对高差约 221.5 m,平面纵向长度约 434 m,横向宽 358 m,面积约 $11.82 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑体平均厚度约 34.5 m,总体积约 $407.79 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑带为堆积体与下伏基岩面的接触带,从后到前逐渐变缓,后部坡度 $35^\circ \sim 45^\circ$,前部坡度 $8^\circ \sim 15^\circ$,滑

动方向与现坡向基本一致。纵剖面上滑带形态呈折线形,横向两侧滑带成凹形。

1.2 滑坡物质组成

滑体为含角砾粉质粘土、粉质粘土夹碎块石、砂、泥岩块石和粉细砂,物质组成在竖向分布不均匀,上部以含角砾粉质粘土、碎块石土为主,下部以砂岩、泥岩块石为主。滑带为含角砾粉质粘土,粉质粘土处于软塑~可塑状;角砾直径 2~20 mm,含量约 15%,滑带厚度 3~5 cm。滑床为砂、泥岩互层基岩,其岩层产状在滑坡中部为 $340^\circ \angle 45 \sim 48^\circ$,后部为 $340^\circ \angle 51^\circ$ 。主要发育两组裂隙: L_1 产状 $295^\circ \angle 90^\circ$ 、 L_2 产状 $28^\circ \angle 87^\circ$ 。

1.3 滑坡成因

该滑坡前缓后陡,与后方基岩陡壁成脱离之势,为滑移提供了动力条件;在长江侵蚀、剥蚀作用下河床下切,滑坡前缘临空;长江水位升降变化和地表降雨影响,土体的抗剪强度降低,抗滑力减小,下滑力增大而滑塌失稳,为推移式浮托型滑坡。

2 凉水井滑坡的稳定性分析

2.1 FLAC3D 软件简介

FLAC3D^[5]是由美国 Masca Consulting Group Inc. 开发的三维显式有限差分法程序,通过物理网格和数学网

格节点之间的相互映射,将物理模型的力学分析转换为数值分析。该程序能较好地模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时,发生的破坏或塑性流动的三维力学行为,特别适用于分析渐进破坏和失稳以及模拟大变形问题^[4-5]。

2.2 凉水井滑坡模型的建立

选择凉水井滑坡主滑剖面建立计算模型,应用 ANSYS 软件将二维模型按 1:1 建立单位厚度模型转化为 FLAC3D 模型,模型边界上部取至滑坡后缘以上 30 m (高程 310 m),前部取至滑坡下边界外 30 m(高程 0m),模型长 540 m,高 310 m。滑体和滑带为重点研究对象,其单元划分较细,基岩部分单元划分较粗。计算模型共由 4299 个单元 (Zone),8980 个节点 (Gridpoint) 组成。模型的四周为单向约束,底面为全约束,坡面为自由面,如图 1 所示。

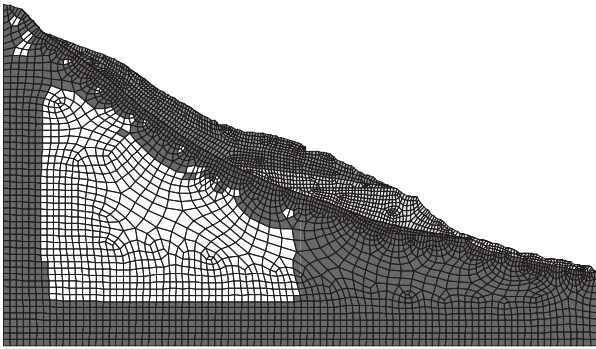


图 1 滑坡计算模型

2.3 计算参数

根据凉水井滑坡的地质结构及滑体、滑带和基岩的岩土体特性,将模型主要概化成 4 种材料。基岩为线弹性模型,滑体和堆积体为理想弹塑性模型,Mohr-Coulomb 屈服准则。滑坡重度和强度参数根据试验成果分析确定,见表 1。滑体、滑带弹性模量 3GPa,泊松比 0.4,基岩的弹性模量 20GPa,泊松比 0.25。由于滑坡应力场在当前已基本形成且构造应力在地表层已松弛殆尽,在模拟过程中不考虑水平构造应力的作用,只考虑自重应力、降雨及地下水位的影响。

表 1 滑坡物理力学参数

类别	重度 γ (kN/m ³)		粘结力 c (kPa)		内摩擦角 φ (°)	
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
滑体	23	23.8	21.48	19.29	34.83	27.68
滑带	23	23.8	19.17	13.68	25.03	24.81
砂土	23	23.8			3	25
基岩	25.3	25.8				

滑坡的稳定系数定义^[6-7]为实际抗剪强度指标与滑坡发生破坏临界状态时虚拟的折减强度指标的比值:

$$F_{st} = \frac{\int_0^l (c + \tan\varphi) dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (1)$$

稳定性数求解采用强度折减法,即在理想弹塑性有限元计算中将滑带的抗剪强度参数按照(2)和(3)式^[5-6]来调整岩土体的强度指标 c 和 φ 进行数值分析,反复计算至其达到临界破坏,此时得到的折减系数即为稳定系数 F_{st} 。

$$c_F = c/F_s \quad (2)$$

$$\varphi_F = \arctan((\tan\varphi)/F_s) \quad (3)$$

运用弹塑性理论和 FLAC3D 的内置 fish 语言按强度折减法编制的滑坡稳定系数计算程序以下述几种方法判定临界状态^[3-4,6-7]:限定求解迭代次数;限定节点不平衡力与外荷载的比值大小;形成贯通的剪切塑性区。稳定系数搜索采用“二分法”^[7],初步定义解初始上、下限值,通过如下 fish 函数:

```
if mech_ratio < 1.0e - 5
```

```
  Fs1 = Fs
```

```
  Fs2 = Fs2
```

```
else
```

```
  Fs2 = Fs
```

```
  Fs1 = Fs1
```

```
endif
```

```
  Fs = (Fs1 + Fs2)/2
```

```
endloop
```

按照收敛准则自动替换上下边界,当上下边界之差小于精度要求时可认为其平均值为稳定系数。

2.4 计算工况

根据三峡水位运营调节情况和滑坡外界环境变化,工况设置见表 2。

表 2 荷载组合工况

水位	工况编号	荷载组合
静止水位	1	自重 + 地表荷载 + 水库坝前 175m 静水位 + 非汛期 20 年一遇暴雨
	2	自重 + 地表荷载 + 水库坝前 162m 静水位 + 20 年一遇暴雨
水位降落	3	自重 + 地表荷载 + 坝前水位从 175m 降至 145m + 非汛期 20 年一遇暴雨
	4	自重 + 地表荷载 + 坝前水位从 162m 降至 145m + 20 年一遇暴雨

2.5 模拟结果分析

已有研究表明,滑坡的剪应变增量和最危险滑动面具有较好的一致性^[4,6],因此采用剪应变增量贯通

性来判定滑坡的稳定性,滑坡的剪应变增量如图2所示。

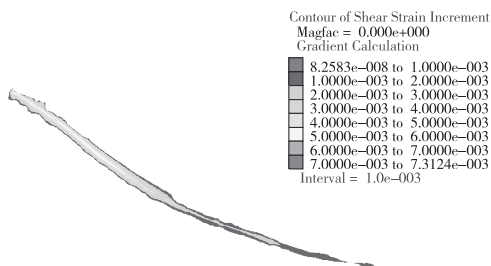


图2 剪应变增量云图

根据所处工况进行稳定性分析,计算方法采用传递系数法,为了研究各部位变形特征,分析了各剖面的稳定系数 K' 和各部分条块的自身稳定系数 F_i' (阻滑力除以下滑力)变化量 $\Delta F_i'$ (160 m 静水位且无降雨的 F_i' 与各工况 F_i' 之差),计算结果见表3。

表3 稳定性分析结果表

位置	工况1	工况2	工况3	工况4
稳定系数 K_s	1.022	1.007	1.043	1.048
后部 $\Delta F_i'$	0.002	0.048	0.002	0.048
中部 $\Delta F_i'$	0.041	0.050	0.032	0.030
前部 $\Delta F_i'$	0.259	0.260	0.262	0.262
稳定系数 K'	1.058	1.049	1.072	1.091

各种工况的剪应变增量云图分布表明,滑坡高剪应变增量主要分布中后部,分布厚度较大,滑面后部(0 ~ 140 m 段)剪应变增量逐渐增加但增速逐渐减小,表明该区段为下滑段,传递系数法揭示此段条块下滑力大于阻滑力;中部(140 ~ 290 m 段)滑坡的剪应变增量逐渐降低且降速逐渐增大,表明该段阻滑效果沿程增加,传递系数法揭示此段条块阻滑力大于下滑力;前部(290 m 以后)滑体大部分处于水下,其有效应力骤减,剪应变增量曲线出现陡降,传递系数法揭示此段条块阻滑力和下滑力明显减小且阻滑力大于下滑力,综合分析可定义滑坡为浮托型推移式滑坡。

各种工况的剪应变增量云图分布表明,滑坡高剪应变增量主要分布中后部,分布厚度较大,滑面后部(0 ~ 140 m 段)剪应变增量逐渐增加但增速逐渐减小,表明该区段为下滑段,传递系数法揭示此段条块下滑力大于阻滑力;中部(140 ~ 290 m 段)滑坡的剪应变增量逐渐降低且降速逐渐增大,表明该段阻滑效果沿程增加,传递系数法揭示此段条块阻滑力大于下滑力;前部(290 m 以后)滑体大部分处于水下,其有效应力骤减,剪应变增量曲线出现陡降,传递系数法揭示此段条块阻滑力和下滑

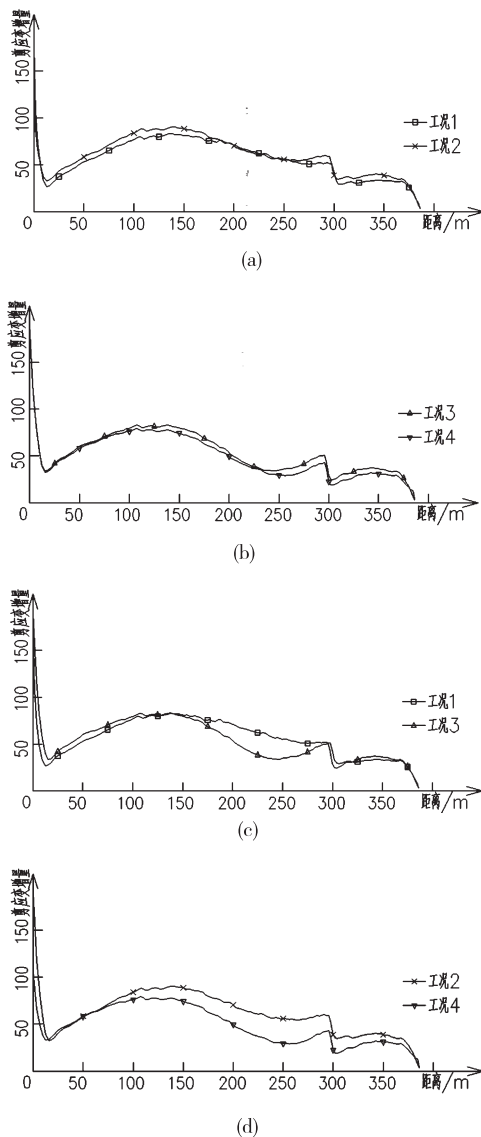


图3 剪应变增量对比

力明显减小且阻滑力大于下滑力,综合分析可定义滑坡为浮托型推移式滑坡。

通过剪应变增量及表3对比,图3(a)中工况2后部和前部剪应变增量和自身稳定系数变化量大于工况1,与相应区段滑面强度参数降低而导致稳定性降低相符合,工况2稳定系数低于工况1,但在水位162 ~ 175 m 影响带工况1的剪应变增量大于工况2,由于此段在长江静水位的浮托力作用下,滑体有效重度降低,减小了滑坡的摩阻力增大了滑带的屈服范围增加。图3(b)中工况3中部和前部剪应变增量和自身稳定系数变化量大于工况4,与相应区段水位降落带的特征相符合,工况3稳定系数低于工况4。图3(c)、(d)中静水位工况1、2剪应变增量和自身稳定系数变化量在后部和前部与水位降落工况3、4相近,但在中部明显和大于水位降落工况,静水浮托比水位降落带对滑坡稳定性影响大,工况

1、2 稳定系数低于工况 3、4。采用传递系数法与 FLAC 数值分析成果基本吻合,由于传递系数法采用了显式计算法,其传递系数法的稳定系数略高。

3 结 论

综上所述,数值模拟分析结果与现场滑坡变形特征及传递系数法计算成果的对,可以得出:

(1) 以强度折减法对滑坡的稳定性计算分析成果与传递系数法计算成果较为符合,计算方法较为可靠,采用剪应变增量对滑坡变形特征的评价合理。

(2) 据滑面剪应变增量变化关系将滑坡定性为浮托型推移式滑坡。

(3) 根据 4 种工况对比分析,本滑坡在长江静水位作用下,水位越高,滑坡的稳定性越差;在长江水位下降作用下,水位下降高度越大,滑坡体前缘的变形越大,滑坡的稳定性越差;蓄水、水位下降及高水位运行时,滑坡体前缘的变形较大,而在水位稳定期间,滑坡体后缘的变形较大,这也与现场的监测数据相吻合。

参 考 文 献:

[1] 白俊光,吕生弟,韩建设.李家峡水电站坝前水库滑坡蓄水前后稳定性预测[J].岩土力学,2008,29(7):

1723-1731.

[2] 祝建,蔡庆娥,姜海波.西藏樟木口岸古滑坡变形监测分析[J].工程地质学报,2010,18(1):66-71.

[3] 朱继良,黄润秋.某大型水电站水文站滑坡蓄水后的稳定性三维数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1384-1389.

[4] 李新平,郭运华,彭元平.基于 FLAC3D 的改进边坡极限状态确定方法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(增 2):5287-5291.

[5] 彭文斌.FLAC3D 实用教程[M].北京:机械工业出版社,2007.

[6] 李红卫,马惠民,张忠平.强度折减法在高含水滑坡稳定性分析中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2009,20(3):27-30.

[7] 赵尚毅,郑颖人,时卫民.用有限元强度折减法求滑坡稳定性安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):334-336.

[8] 薛星桥,金泉豪,王刚.三峡库区塘角村 1 号滑坡变形特征分析[J].水文地质工程地质,2010,37(2):125-129.

Analysis of Stability for Floated-pushed Landslide Based on FLAC3D

YI Peng-ying¹, DENG Shi-yi², LV Tao³, WU Han⁴

(1. Chongqing Hi-Tech Engineering Reconnaissance & Design Institute, Chongqing 401121, China;

2. Sichuan Hong-yang Construction Clan Company, Ziyang 641500, China;

3. Chongqing Communications Planning Survey & Design Institute, Chongqing 401121, China; 4. Chongqing Branch Institute, Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design, Chongqing 400014, China)

Abstract: On the basis of geological characteristics of Yunyang Liangshuijing landslide, which is a typical floated - pushed landslide in the reservoir of Three Gorges, calculation model and calculation conditions are established. Meanwhile, the method of strength reduction and FLAC3D are adopted to solve stability coefficients. The calculation results fit the transfer coefficient method quite well. Combining with the variation of stability coefficient of compartmentalization itself, the increment of shear strain is used to analyze the deformation characteristics of landslide under various conditions. The stability of landslide, which is under high water level in the Yangtze River, is the worst. When the water level drops, the front edge of the landslide has large deformation, and while it is raining, the back edge of the landslide has quite large deformation, so this type of landslide is called floated-pushed landslide.

Key words: floated-pushed landslide; landslide stability; deformation law; analysis of numerical simulation; formation mechanism