

FLAC3D 在某古滑坡稳定性分析中的应用

许容¹,张发明¹,张加家¹,睦敏磊¹

(河海大学 地球科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:以西南某水电站左岸古滑坡为研究对象,利用 FLAC3D 通过强度折减法对古滑坡堆积体变形和稳定性情况进行了三维数值仿真。研究表明,滑坡体在天然状态下稳定性良好,这一计算结果与现场地质勘察分析结果一致,说明所建立模型及参数取值是符合实际的,建立的三维计算模型是可靠的。

关键词:FLAC3D;强度折减法;数值模拟;稳定性

中图分类号:P642.22

文献标识码:A

Application of FLAC3D in stability analysis of the ancient landslide body

XU Rong¹, ZHANG Fa-ming¹, ZHANG Jia-jia¹, SUI Min-lei¹

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing, 210098)

Abstract: The paper take the landslide in the left bank of a hydropower station in Southwest of China as the research object. A 3D numerical simulation model is developed to analyze the deformation features and stability of the accumulation body on the theory of The strength reduction method by FLAC3D. The research results show that the accumulation body is stable under natural conditions. The results are also consistent with the spot geological surveys which prove the appropriateness of parameters choosing and the reliability of 3D calculation model.

Key words: FLAC3D; strength reduction method; numerical simulation; stability

对于岩土工程中的边坡稳定性问题,人们一般会采用安全系数作为这类问题的评价标准。在水电工程施工等领域中,大多情况下安全系数是通过极限平衡分析法来求解的。该方法方便快捷,原理简单完善,但是不能解决滑坡的应力-应变问题,然而数值模拟的方法侧重岩土体应力-应变破坏机理的分析。所以本文针对滑坡发生后形成的堆积体变形及稳定这一问题,采用三维 Flac3D 数值模拟的方法对某水电站左岸古滑坡体的变形和稳定性进行分析评价,安全系数运用强度折减法,并且重点从主应力场规律分析、塑性区分布规律分析、剪应力(剪应变增量)规律分析、位移场规律分析这四个进行研究,以期对滑坡体的处理设计与施工提供一些参考依据。

1 计算理论

由于 FLAC3D 采用显示差分法求解微分方

程,具有模拟材料的塑性破坏和塑性流动方面的优势。但是由于 FLAC3D 较弱的前处理功能,创建一个复杂的三维模型相对比较困难。故选用 ANSYS 进行模型建立并划分计算网格,最后导入 FLAC3D 程序,这样能够充分利用两者的优点,优化分析过程。本项目通过有限差分软件 FLAC3D,采用了强度折减法,对模型进行分析计算,得出滑坡体的安全系数以及应力、应变、位移等云图,从而对滑坡的稳定性进行有效分析,综合判断。

强度折减法的安全系数定义如下:在边坡刚好达到临界破坏状态时,对岩、土体的抗剪强度进行折减的程度,即岩土体的实际抗剪强度与临界破坏时折减后剪切强度的比值。强度折减法主要利用式(1)和式(2)来调整岩土体的强度指标 C 和 Φ ,然后对边坡稳定性的系数进行数值分析,不断地增大折减系数,经过反复循环计算直至达到临界破坏状态时,所得到的折减系数即为安全系数 F_s 。

表 1 三维数值计算参数

Tab. 1 Parameter list of three - dimensional numerical calculation

类别	C/kPa	Φ/°	γ/kN · m ⁻³			E /MPa	μ	抗拉强度 /kPa
			天然容重	饱和容重	浮容重			
滑坡体	18	19	20.6	22	12	1 000	0.35	30
下伏基岩	54	1 500	26.2	27	17	35 000	0.23	450

$$C_f = \frac{c}{F_{trial}} \quad (1)$$

$$\Phi_f = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \Phi}{F_{trial}} \right) \quad (2)$$

式中 C_f - 折减后的粘结力; Φ_f - 折减后的摩擦角; F_{trial} - 折减系数。

FLAC3D 在计算稳定系数时, 单次稳定系数的计算过程主要通过采用以数值计算的收敛性作为失稳判断依据。

2 滑坡工程地质概况

该滑坡位于澜沧江左岸, 滑坡沿河长度为 150 m, 滑坡所临澜沧江走向为 30°, 岸坡为阳坡, 对岸几何形态为凸岸。滑坡形态明显, 岩性为 T2m 粉砂质泥岩, 夹钙质泥岩、砂岩。滑面为基岩覆盖面, 滑坡的主滑方向为 300°, 滑向河床略偏上游, 主滑方向长度为 500 m。滑坡前缘高程 660 m, 后缘高程 870 m, 高差约 210 m。滑坡边界清楚, 两次活动迹象明显, 一级平台仅局部保留, 第二次坍塌物质已滑入江中, 滑坡物质保留较少, 滑体中小冲沟发育, 坡度较缓, 20 ~ 25°, 但前缘较陡, 一般大于 30°, 滑坡体厚度约 20 m, 方量约 335 × 104 m³。从力学性质上来看为牵引式滑坡。滑坡前缘离现澜沧江水位 2 m。

3 FLAC3D 数值模拟

3.1 几何模型

滑坡以澜沧江指向下游方向为 X 轴正方向, 以铅垂向上为 Y 轴正方向, 以指向河流方向为 Z 轴正方向, 建立直角坐标系。依据现场提供的地质资料, 模型选取了 5 个剖面, 分别是 X = 0, X = 320, X = 640, X = 980, X = 1 280。根据滑坡体所在区域的 CAD 图, 利用 Surfer 软件生成与实际相符的坡面模型, 导入 ANSYS 中, 滑坡几何模型的生产均在 ANSYS 中完成, 网格划分后保存单元和节点几何信息, 然后通过接口程序转换为 FLAC3D 的前处理数据格式。建立三维坡体模型, 划分网格后再导入 FLAC3D。

如图 1 所示, 坡体三维模型底面高程为 500 m, Z 方向长 989 m, X 方向长 886 m。模型分为两部分, 图中蓝色部分 I 为滑坡体, 红色部分 II 为下伏基岩。模型共划分为 1 474 个节点和 7 077 个单元。计算模型边界约束形式为: 侧边界只对水平方向进行约束, 底边界在水平和竖直方向都进行约束, 模型的上部边界取为自由面。FLAC 程序中, 节点速度是主要变量, 所以选取模型的边界条件是通过约束模型边界的节点速度实现的, 即模型底部边界的水平、竖直方向的速度约束和四周边界水平方向的速度约束。

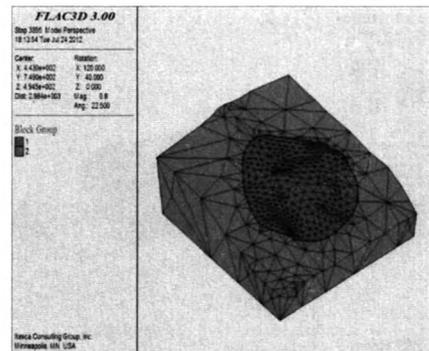


图 1 三维模型网格图

Fig. 1 Three-dimensional block group model

滑坡稳定性计算采用的参数见表 1。

3.2 计算结果分析

根据工程实际分七种工况分别计算分析, 具体工况见表 2。

表 2 三维数值计算工况表

Tab. 2 Work condition of three - dimensional numerical calculation

工况 1	天然状态
工况 2	蓄水至 672.5 m
工况 3	蓄水至 765 m
工况 4	正常蓄水位 812 m
工况 5	正常蓄水位 812 m 骤降至 765 m
工况 6	现水位 708 m
工况 7	正常蓄水位 812 m 遭遇地震

根据计算结果, 除地震工况外, 坡体稳定系数均大于 1.5, 滑坡处于稳定状态, 而地震工况下坡

体稳定系数为 0.9。本文着重分析正常蓄水位 812 m 遭遇地震时的工况。

1) 主应力场规律分析。工况 7 下坡体的最大主应力为层状分布,具体应力分布见图 2,主应力分布较为平滑,但在滑坡体周围边界附近产生应力集中效应,同时坡体应力出现极大值,对坡体稳定不利。从剖面 $X = 300\text{ m}$ 的应力分布云图(图 3)可以看出,剖面附近的最大主应力(压应力)基本顺着坡面方向,并延伸到坡脚;往边坡内部,最大主应力方向与水平轴的夹角逐渐增大,直至铅直;而滑坡体中部和后缘连续分布张应力,不利于坡体稳定。

这些说明边坡深部土体主要受铅垂方向的压应力作用,表现为受压屈服;边坡前部岩土体受平行于坡面的大主应力作用,表现为两侧剪切屈服和前缘的受压屈服;滑坡体中部和后缘受张应力作用,表现为拉张破坏。

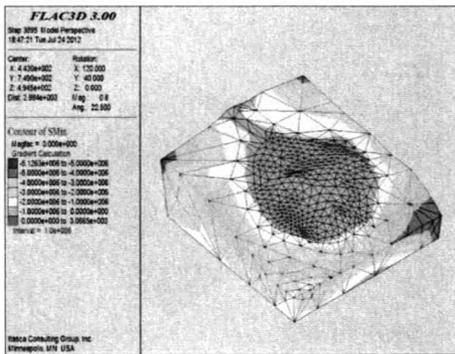


图2 坡体大主应力分布图
Fig. 2 Maximum principal stress on whole

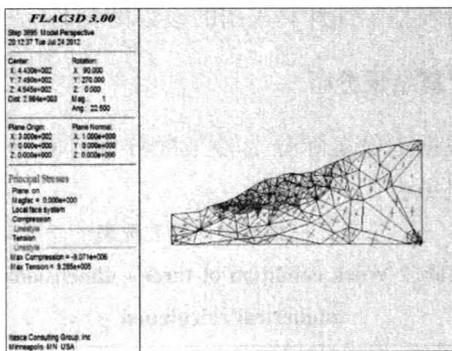


图3 $X=300\text{ m}$ 坡体主应力分布
Fig. 3 Principal stress zone distribution on $x=300\text{ m}$ plane

2) 塑性区分布规律分析。由于地震作用,工况七下滑坡体表面被塑性区完全覆盖,如图 4。从 $X = 455\text{ m}$ 塑性区剖面分布云图(图 5)可以看出,剖面内塑性区从前缘到后缘完全贯通,深度 $15 \sim 30\text{ m}$,局部发育拉张变形区。以上表明,工况 7 下

由于地震水平荷载的作用,滑坡体整体屈服进入塑性变形状态,同时前缘局部张拉区发育,可能产生张拉裂隙,滑坡体可能沿底滑面滑动,是否最终破坏要根据应力和位移特征综合判断。

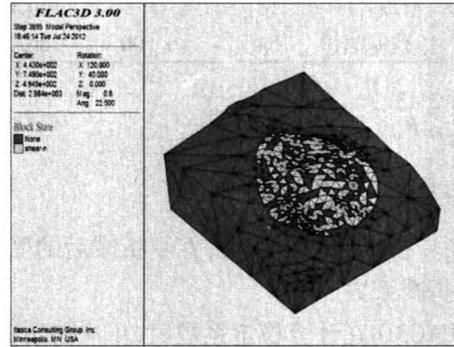


图4 坡体塑性区分布图
Fig. 4 Plastic zone distribution on whole

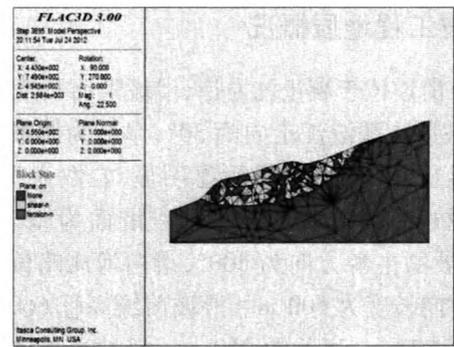


图5 $X=455\text{ m}$ 坡体塑性区分布图
Fig. 5 Plastic zone distribution on $x=455\text{ m}$ plane

3) 剪应力(剪应变增量)规律分析。根据其剪应力(应变增量)可以判断滑坡体的潜在滑动面;剪应力较为集中或剪应变增量较大(绝对值)的部位,则为其潜在滑动面;而剪应力分布较为分散的或者剪应变增量较小或基本上没发生变化的部位,一般不会有潜在滑动面产生,这些部位也不会发生较大的变形和破坏。

计算表明,工况 7 下坡体的稳定系数 F_s 为 0.90,处于失稳状态。剪应力集中带主要分布在滑坡体前缘附近,如图 6,为坡体最有可能发生破坏的部位,该处地形较陡,坡体可能在该处沿土层内部局部滑弧滑动或者坍塌。从 $X = 455\text{ m}$ 剖面剪应变增量云图(图 7)同样可以看出,应力集中带分布在整个滑坡体内,并在前缘达到极值,表明坡体的稳定性较差。

4) 位移场规律分析。相较于前 6 个工况,工况 7 的滑坡体位移急剧增大,呈现失稳趋势。 Y 方向位移总体表现为后缘下沉和前缘抬升,后缘局部沉降量最大值为 19.90 mm ,其他部位下沉量多

在10~30 mm之间,如图8。滑坡体前部发生隆起,最大量为86.60 mm。Z方向局部最大位移量为106.74 mm,出现在滑坡体前缘中轴线附近,坡体其他部位的Z方向位移量值大都在20 mm以上,如图9。坡体最大变形区位置与剪应力集中带分布位置吻合。综合位移剧增、塑性区贯通和剪应力集中等力学特征,判断滑坡体将发生破坏。

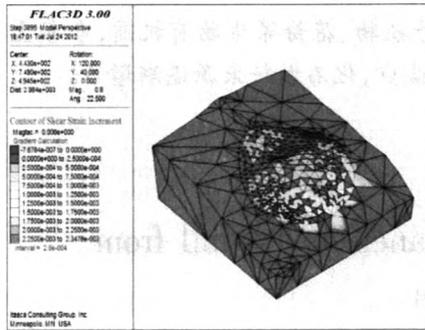


图6 滑坡体剪应变增量分布图
Fig.6 Shear strain increment on whole

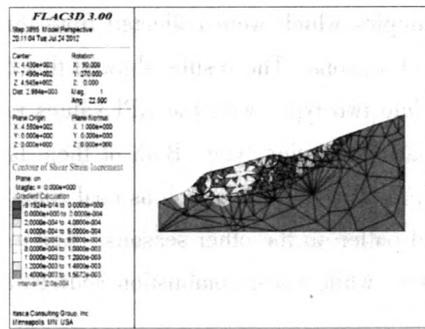


图7 X=455m剖面剪应变增量云图
Fig.7 Shear strain increment on x=455 m plane

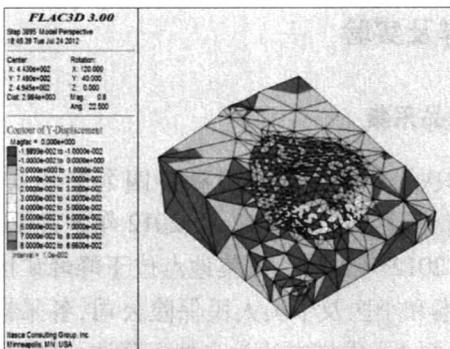


图8 滑坡体Y方向位移云图
Fig.8 Vertical displacement contour on whole

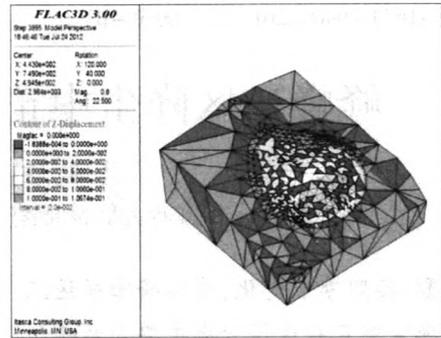


图9 滑坡体X方向位移云图
Fig.9 Horizontal displacement contour on whole

4 结论

- 1)天然状态下滑坡是稳定的,这一计算结果与现场地质勘察分析结果一致,说明所建立模型及参数取值是符合实际的,建立的三维计算模型是可靠的。
- 2)滑坡体前缘和后缘是最大位移处,最大位移主要出现在前缘坡脚位置。
- 3)主应力基本为层状分布,以压应力为主。
- 4)塑性区主要集中在坡体靠近上下游边界附近,没有在坡体内形成连续的贯通区,坡体整体稳定。
- 5)剪应力集中带与塑性区分布位置基本吻合。
- 6)除地震工况坡体稳定系数为0.9,其它工况下坡体稳定系数均大于1.5,滑坡处于稳定状态。

参考文献:

- [1] HOEK E, BARY J. Rock slope engineering [M]. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1981.
- [2] 赵尚毅,郑颖人,时卫民. 用有限元强度法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):343-346.
- [3] 陈祖煜,汪小刚,杨健,等. 岩质边坡稳定性分析-原理·方法·程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [4] 迟世春,关立军. 基于强度折减的拉格朗日差分方法分析土坡稳定性[J]. 岩土工程学报,2005,26(1):42-46.
- [5] 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.
- [6] 刘金龙,栾茂田,赵少飞,等. 关于强度折减有限元法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土力学,2005,26(8):1345-1348.

(责任编辑 刘存英)