

# FLAC3D 在边坡数值分析及位移监测中的应用

张 颖, 孙兆涛, 裴仲文

(辽宁有色勘察研究院, 辽宁 沈阳 110013)

**摘要:**以辽宁省岫岩县某山头边坡为例,通过槽探、钻探、大型剪切试验等多种手段,找出合理潜在滑动面。利用 FLAC3D 软件对该边坡进行三维数值模拟,分析应力应变关系,得出变形较大及应力集中区域,同时利用强度折减法得出边坡的安全系数,评价其稳定性。将从边坡后缘张拉裂隙上布设的位移监测点采集到的数据,与数值模拟结果进行对比分析,验证数值模拟的可靠性,为边坡抗滑设计提供依据。

**关键词:**FLAC3D;边坡;数值模拟;位移监测

**中图分类号:**P642.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)03-0057-05

**Application of FLAC3D in Landslide Numerical Analysis and Displacement Monitoring/ZHANG Ying, SUN Zhao-tao, PEI Zhong-wen** (Shenyang Design and Research Institute, Sino-coal Engineering Group, Shenyang Liaoning 110013, China)

**Abstract:** Take a mountain side slope in Xiuyan County of Liaoning Province as an example, the potential sliding surface is found out with trenching, drilling and large-scale shear tests. 3D numerical simulation is made on the side slope with FLAC3D software to analyze the relationship between stress and strain in order to determine the area with large deformation and stress concentration; meanwhile by using strength reduction method to draw safety factor of the landslide and evaluate its stability. Comparing the data obtained in the deformation monitoring points arranged at the tensioning fractures on the back edge of the slope with the numerical simulation results, the reliability of the numerical simulation can be verified to provide the basis for the anti-sliding design of the side slope.

**Key words:** FLAC3D; side slope; numerical simulation; displacement monitoring

## 0 引言

边坡稳定性评价一直是我国岩土工程领域中的热点关注课题,通常用安全系数评价坡体稳定性,目前计算坡体安全系数的方法有很多,包括极限平衡法、有限元法、离散元法等<sup>[1]</sup>,FLAC3D 作为有限差分法,适用于多种不同本构关系材料<sup>[2]</sup>,对连续介质可进行非线性大变形分析,应用效果良好。

通过数值模拟对边坡变形机制及稳定性进行评价,大多数的研究方法将边坡变形机制简化为平面应变问题。但边坡变形破坏是一种复杂的三维应力状态机制,本文拟对岫岩县某边坡变形破坏效应采用三维模型进行分析,使模拟条件更接近工程实际<sup>[3]</sup>。将数值模拟结果与实际监测效果对比,进行有效的方法验证,为边坡的进一步抗滑设计提供理论依据。

## 1 工程地质概况

勘察边坡位于岫岩满族自治县东南方向的小虎

岭社区口子街老山头,在新建兴雅线公路东侧,交通较为便利。边坡所处地貌单元属低山丘陵地貌,地形起伏较大。场地边坡南北走向长约 750 m,坡面最高 50~55 m,见图 1。滑坡山体最高处与公路高差 69 m,滑坡山体顶部坡角约 10°的平台上,形成了 3~4 条平行弧状地表裂缝,裂缝最大宽度约 30 cm,深度 > 1.0 m,向下错动最大错距 0.6~0.7 m。边坡倾向西,坡角多在 35°~42°。场地边坡坡脚下为新建兴雅线公路,公路外侧为大洋河,场地及其周围无其他地表水体。大洋河流向由北向南,河流量



图 1 岫岩县小虎岭社区口子街老山头边坡全貌

收稿日期:2017-12-22; 修回日期:2018-01-31

作者简介:张颖,女,汉族,1986 年生,工程师,地质工程专业,硕士,主要从事岩土工程勘察、设计工作,辽宁省沈阳市沈河区北京街 7 号,364253229@qq.com。

较大,河道最宽约 150.0 m,水深 1.0~4.0 m。据工程地质钻探揭露,场区地层主要有第四系人工填土( $Q_4^{ml}$ ),坡洪积( $Q_4^{dl+pl}$ )碎石土,元古界辽河群盖县组( $P_1lhgx$ )绢云母片岩。

## 2 滑体破坏模式

经工程地质调查、测绘以及钻探、槽探等多种手段综合分析,主滑坡体位于边坡的中南部。边坡后缘出现明显圈椅状拉张裂隙,构成了整个滑体的后

缘边界。边坡前缘有破碎带夹层出露,距坡脚高度约在第一级平台顶面处,形成了滑体的前缘剪出口;从钻探和槽探结果来看,滑体下 20 余米处有一断裂破碎带,底部为断层泥,成分为粉质粘土,且石墨化强烈,多为强风化绢云母片岩角砾、构造角砾岩、断层角砾,泥质矿物已风化成土状,初见滑石化现象,形成了明显滑带;主滑坡的滑床主要为较完整的基岩,基岩的岩性主要为绢云母片岩,多为中风化状态。见图 2~图 4。

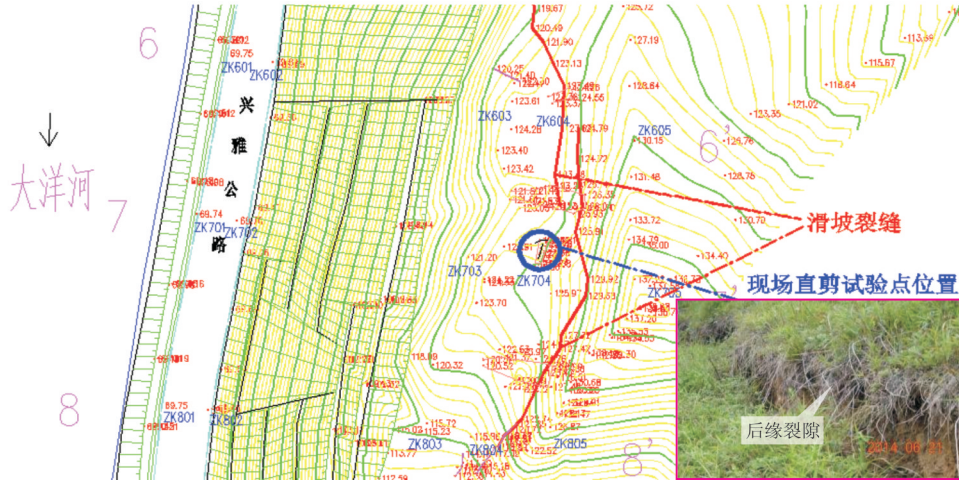


图 2 边坡地形全貌



图 3 坡体槽探确定滑面



图 4 滑带前缘剪出口

实现滑带岩土的下滑力大于极限抗滑强度时,主滑坡体会沿着滑面从坡底剪出口进行滑移<sup>[4]</sup>。

## 3 边坡稳定性三维数值模拟

### 3.1 模型建立及参数选取

本次边坡研究区域见图 5,模型选取滑坡中间部位且沿边坡走向 625 m 长作为研究对象,为防止边界效应对研究区域产生影响,模型尺寸应大于研究区域,尺寸设置为长坡体主轴方向长 330 m,高 200 m。对模型的两侧( $x$  方向)、前后( $z$  方向)施加水平约束,底面( $y$  方向)施加垂直约束。构建的模型及坐标方向如图 6 所示。对于岩土体采用摩尔-库伦

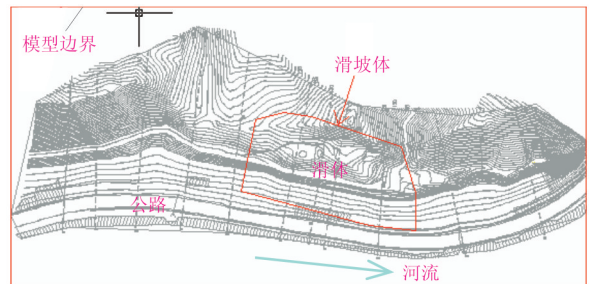


图 5 模型区域示意

主滑坡体在滑坡的牵引、推挤、扭转等作用下,

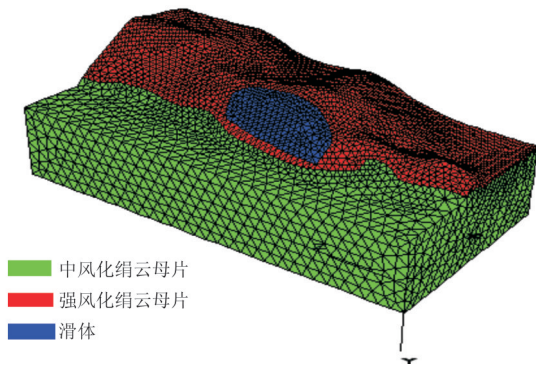


图 6 三维模型及网格剖分示意

模型。对于单元的划分,在强风化岩体及其内部的碎石土滑带区域进行更精细的划分,本次模型剖

表 1 模型参数统计

名称	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	弹性模量/MPa	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	抗拉强度/MPa
滑带	1890	0.30	70	58.3	45.6	18.00	15.70	0.0001
强风化绢云母片岩	2580	0.25	1200	800.0	750.0	38.88	27.80	0.0500
中风化绢云母片岩	2650	0.22	5000	2976.0	3050.0	35.00	35.00	0.5000

强度折减法的原理是利用公式(1)和式(2)来调整岩土体的强度指标  $c$  和  $\varphi$ , 然后对边坡稳定性进行数值分析,不断的增加折减系数,反复计算,直至其达到临界破坏,此时得到的折减系数为安全系数  $F_s$  [5]。

$$C_F = c / F_{tr} \quad (1)$$

$$\varphi_F = \tan^{-1}[(\tan\varphi)F_{tr}] \quad (2)$$

式中: $C_F$ ——折减后的粘聚力; $\varphi_F$ ——折减后的摩擦角; $F_{tr}$ ——折减系数。

本工程项项目 FLAC3D 采用“二分法”求解安全系数,前后典型步运算结束时的不平衡力比率  $R$  差值 < 10%。运行时步超过 10000 时作为终止条件。经过强度折减法在参数残余强度基础上计算,得出该边坡的安全系数为 1.22,三维数值模拟考虑边坡走向上应力作用,对下滑趋势的岩体提供了更大的抗滑力,因此该结果是可靠的 [6]。

### 3.3 边坡稳定性模拟结果分析

从图 7~图 9 可见,滑坡区形成一个中心位置位移最大且向四周逐渐减少的位移区域,这说明该区域是坡体容易发生滑坡破坏的地带,且在滑带与下层中风化岩层形成应力应变突变界限。 $x$  方向位移明显大于  $z$  方向位移,且主要向西侧坡外即  $-x$  轴方向产生位移,这与滑坡体沿着主轴方向产生位移的规律是一致的。坡体  $y$  方向位移分布与总体

分了 98353 个单元,18333 个节点。

本次采用平推法现场大型直剪试验,所有试体的推力方向与试验面垂直,且通过试面几何中心。试验面积为 2500 cm<sup>2</sup>。法向应力分别为 80、140、200、230、290 kPa 五个等级,通过堆重载荷用千斤顶加压。利用位移传感器和精密油压表实测试体的变形量和应力水平。本次针对不同岩性分别取 5 组试样,绘制剪应力与剪切位移关系曲线图,取曲线上剪应力的峰值为抗剪强度  $\tau$ ,利用图解法得出各岩土层的抗剪强度,其它具体参数结合原位试验、土工试验和理论计算取值(见表 1)。

### 3.2 强度折减法基本原理

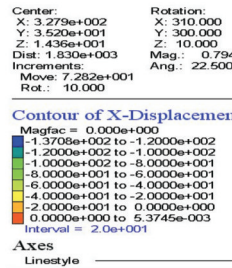


图 7 x 方向位移云图

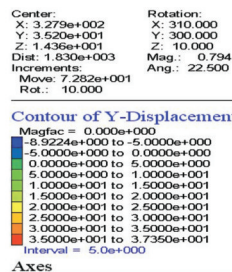


图 8 y 方向位移云图

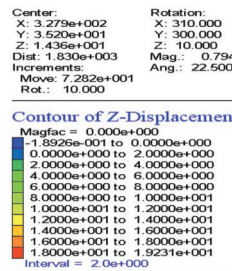


图 9 z 方向位移云图

位移分布规律大体一致。向下位移值逐渐减小,直至相对于上层滑带形成相对位移<sup>[7-10]</sup>。

从总体应力分布(图10、图11)可以看出,最大主应力区出现在坡体内部,表层临空面为最小主应力区,在强风化岩层中滑带出现局部拉应力区域,构成潜在滑移面。由于坡体向西,即x轴方向产生潜在滑移,导致x轴应力方向形成拉应力区。y轴方向由于重力压致拉裂,形成大范围压力区以及少部分拉力区,上覆岩体对下卧破碎滑带的挤压作用,而上部岩体的下沉又导致了坡体后缘拉应力带的形成,这与前述后缘拉张裂隙的形成机理相印证<sup>[11-13]</sup>。

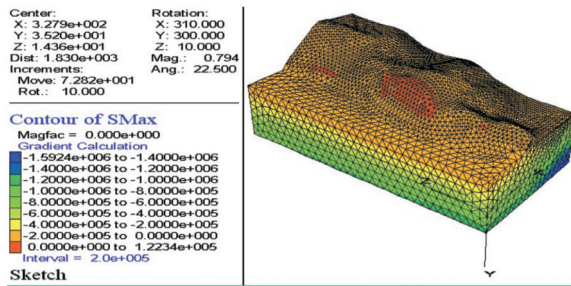


图10 最大主应力云图

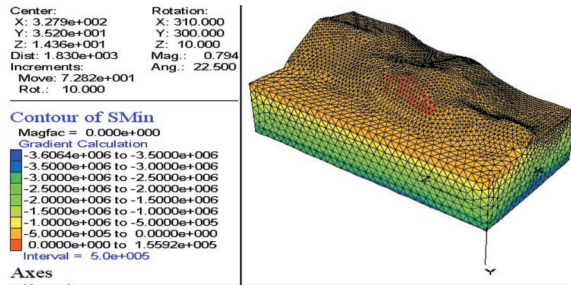


图11 最小主应力云图

从图12~图14看出,潜在滑动区域发生以剪切应变为主的塑性变形,且塑性区主要分布在坡体的临空面方向,滑面处为剪切应力集中区域,出现沿层面上的局部拉应力区域,当这些局部拉应力带全部贯通,总剪切力超过滑带极限抗剪强度,坡体会产生滑坡的可能。但目前坡体尚未形成连贯的破坏区<sup>[14-16]</sup>。

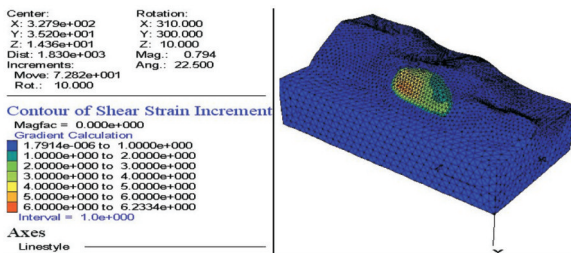


图12 剪应变云图

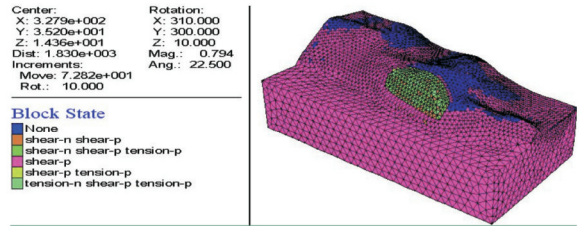


图13 塑性云图

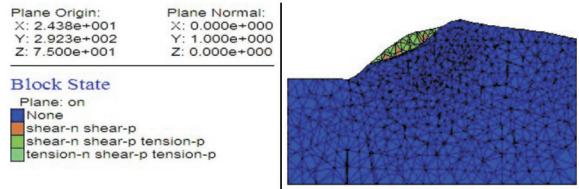


图14 剖面塑性区

### 4 监测数据对比

勘察期间在滑坡后缘裂缝处布设8个竖向位移监测点(GC1~GC8),进行为期约1个半月的监测,竖向相对位移距离在1~3 cm,见图15。代表性观测点GC2、GC3和GC4点位于模型x轴350、310、260 m所在剖面。绘制该3点监测竖向位移最终值与模拟对比图,见图16。

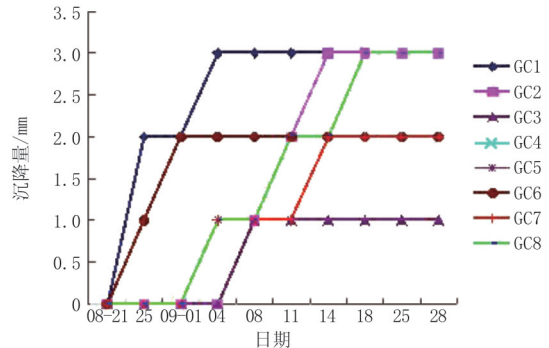


图15 GC1~GC8点竖向位移与时间关系

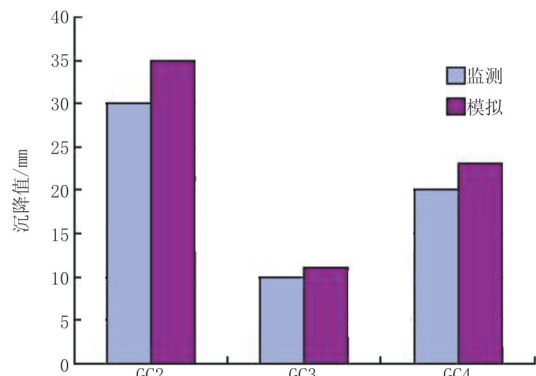


图16 GC2~GC4三点监测值与模拟值对比

综上,运用 FLAC3D 得到的位移变化范围为 10~30 cm,坡体后缘裂隙的 3 个监测点所得到的竖向位移量为 12~35 cm,且经过数值模拟计算的平均位移值均大于实际监测的竖向位移值,这是因为,FLAC3D 计算出的变形结果是在自重条件、天然状态下得出的,而实际监测结果是在自重应力平衡后,综合考虑降雨、风化、人类活动等因素引起的变形。

## 5 结论

(1)经过工程地质调查、测绘以及钻探、槽探等多种方式,查明了边坡的分布范围以及潜在滑动面。

(2)利用 FLAC3D 软件经过强度折减法在参数残余强度基础上对该边坡进行三维数值模拟,得出了应力应变规律,得出了该边坡的安全系数为 1.22,满足稳定性要求。

(3)通过模拟结果与实际监测结果的对比,分析了数值模拟的适用性与准确性。

## 参考文献:

- [1] 邓建辉,魏进兵,闽弘.基于强度折减概念的滑坡稳定性三维分析方法(I):滑带土抗剪强度参数反演分析[J].岩土力学,2003,24(6):896-900.
- [2] 王振勉,易武,孟召平,等.FLAC3D 在滑坡数值分析及监测预

(上接第 56 页)

## 5 结语

(1)本井取心井段地质构造复杂,岩性以石膏、盐岩、灰岩为主,岩性较软、塑性较大,较大层段的石膏及盐岩,给取心作业带来很大困难,因此,合理进行取心筒、取心钻头的选择,优化钻进参数尤为重要。

(2)必须严格按照取心技术要求和取心操作规范进行。在树心、割心等重要取心环节进行重点把关。采用合理取心工艺措施,实时掌握取心情况并及时调整钻进参数。注意取心参数的变化,判断好卡心、堵心等情况并及时采取相应措施进行处理,确保岩心收获率。

(3)取心之前,根据地层情况和取心要求调整好泥浆性能,控制好泥浆失水、泥饼韧性和厚度、氯根含量。在取心过程中,随时测试泥浆性能并加以维护,保持泥浆性能稳定。

(4)本井成功完成了长裸眼、小井眼的取心作业,给该地质构造区块实施深部钻探取心提供了经

验,也为黄岭矿区盐岩开发提供了科学依据。

- [3] 许鹏,汪延公路膨胀性软岩滑坡抗滑桩土效应研究[D].吉林长春:吉林大学,2013.
- [4] 郑颖人,赵尚毅,邓卫东.岩质边坡破坏机制有限元数值模拟分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(12):1943-1952.
- [5] 陈国庆,黄润秋,石豫川,等.基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2014,(2):243-256.
- [6] 许德智,陈剑平,李严严,等.新岩膨胀土滑坡特征及成因分析[J].金属矿山,2012,(10):25-32.
- [7] 谷宪明,王清,冯志仁,等.延边地区公路沿线边坡失稳试验分析[J].自然灾害学报,2005,14(3):149-154.
- [8] 陶宏亮,陈国金,陈松,等.巴东赵树岭滑坡特征与稳定性评价[J].武汉工程大学学报,2008,(2):62-64.
- [9] 张电吉,汤平.岩质边坡滑坡机理与稳定性研究[J].武汉化工学院学报,2003,25(2):37-40.
- [10] 张颖.大前石岭隧道进口岩堆体的稳定性分析评价[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(7):90-92,89.
- [11] 张志沛,武素琴,彭惠.芜铜高速公路上马村滑坡稳定性分析与研究[J].路基工程,2011,(3):227-230.
- [12] 张玉灯.FLAC3D 在岩质边坡稳定分析中的应用[J].路基工程,2008,(6):164-165.
- [13] 刘天革,李世海,刘晓宇.节理化岩质边坡随机结构面有限元和离散元耦合计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S1):3114-3122.
- [14] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343-346.
- [15] 宋桂林,肖诗荣,明成涛,等.三峡库区黄莲树滑坡启动变形监测分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2014,36(4):32-36.
- [16] 沈军辉,孙宝俊,靳晓光,等.位移监测在滑坡评价预测中的应用[J].东南大学学报:自然科学版,2002,32(5):813-817.

## 参考文献:

- [1] 编写组.钻井手册(第二版)[M].北京:石油工业出版社,2013,1289-1309.
- [2] 景龙,徐树,常林祯,等.沧州深部盐矿钻探施工关键技术探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(5):8-12.
- [3] 曾涛,焦页 60-5HF 井钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):52,56-58.
- [4] 蒋希文.钻井事故与复杂问题[M].北京:石油工业出版社,2006.
- [5] 张金昌.深部找矿关键钻探技术与对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(11):1-6.
- [6] 张培丰.深孔岩心钻探问题探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(8):6-11.
- [7] 景龙,李伟,崔国树.“双孔方案”在沧州盐矿深部取心钻探的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(11):16-20.
- [8] 张鸿飞.深部找矿钻探施工工艺与方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(10):26-31.
- [9] 赵岩,仲玉芳,王卫民,等.S/D-2 井欠饱和盐水钻井液技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(3):41-43.
- [10] 王建华.油田盐膏层钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(4):47-49.
- [11] 张所邦,谭建国,王爱军,等.宜昌磷矿北部整装勘查项目深孔复杂地层钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):23-27.