

影响边坡稳定性因素数值研究

罗世林¹, 万文^{1*}, 唐劲舟¹, 廖美中², 刘天宇¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 建筑与城乡规划学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:为综合研究内摩擦角和内聚力2个因素对边坡安全系数的影响规律,利用控制变量法原则开展了一系列数值试验,数值试验表明:岩石内聚力较小时,边坡安全系数也较小,同时变化不大,当内聚力增大时,边坡安全系数也相应增大且与内聚力呈现三次函数关系;内摩擦角对边坡安全系数的影响类似于内聚力对边坡安全系数的影响,利用后处理软件Tecplot对数据进行进一步处理可知:内摩擦角越小边坡的滑动面越表现深层滑动,当内摩擦角增大时,边坡的滑动面由深层滑动转为浅层滑动。

关键词:边坡;数值试验;内聚力;内摩擦角;安全系数

中图分类号:TD824.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2016)04-0037-04

Numerical study of factors influencing slope stability

LUO Shilin¹, WAN Wen¹, TANG Jinzhou², LIAO Meizhong¹, LIU Tianyu¹

(1. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Architecture and Urban Planning, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To study the relationship of friction and cohesion of the two factors on slope safety factor, this paper uses the principle of the control variable method to conduct a series of numerical experiments. Experiment shows that the change of slope safety factor is the same to rock mass cohesive but little changes. When the cohesion increases, the safety factor also increases and the cohesion presents three functions; the effect of rock mass friction to slope safety factor is similar to cohesion on the impact of slope safety factor. By using the post-processing software Tecplot for further processing of the data, it shows that sliding surface presents deep slide when the friction is small. When the friction increases, the slope of the sliding surface goes from the deep slide into the shallow one.

Key words: slope; numerical experiments; cohesive; friction; safety factors

在边坡稳定性分析中,由于岩土体可视为由多种颗粒类物质组成,同时其所处的环境也相当复杂,因此采用定性分析和定量计算相结合的方法是非常有必要的^[1].而边坡稳定性可以通过边坡安全系数来间接反映,影响边坡安全系数的因素有很多,诸如内聚力、内摩擦角、抗拉强度、剪胀角等等,前人也对各类因素做了大量的研究.邵龙潭^[2]从填土的内摩擦角、重度等方面研究了挡土墙结构和整体抗滑稳定性;徐林春等^[3]利用 Bishop 的边坡稳定性分析方法研究了内聚力、土体材料等四个因素对边坡抗滑安全系数的影响;肖欣欣、李夕兵^[4]利用 FLAC^{3D} 软件模拟新疆东戈壁钨矿得出内聚力变大,该矿的边坡安全系数也相应的增大,同时优化给出了边坡角、内聚力以及内摩擦角3个参数;王旭春等^[5]研究了岩体内聚力、内摩擦角

收稿日期:2015-12-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274097,51174088);湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2067);湖南省教育厅资助项目(13A020)

*通信作者, E-mail: wanwen68@163.com

和容重 3 个参数对边坡稳定性影响你敏感性,并探讨了边坡稳定性规律,在此基础上提出了相应的加固措施;汪益敏等^[6]探讨了土在不同排水条件时抗剪强度指标对边坡稳定安全系数计算的影响;郭明伟等^[7]滑动面形式的确定,按实际情况合理地取用土的抗剪强度参数,土的非均匀性及土坡内有水渗流时的影响;郑宏等^[8]提出了三维准严格、无条分法和严格极限平衡法冯国栋等^[9]认为填土材料和孔隙水压力亦是影响土坡稳定的重要因.本文在前人研究的基础上基于强度折减法分析边坡稳定性,同时利用“二分法”分析研究内聚力和内摩擦角对边坡安全系数和滑动面的影响.

1 数值模型与试验设计

1.1 数值模型介绍

利用 FLAC^{3D}有限差分软件对各影响边坡稳定性因素进行数值试验探究.以均质边坡作为数值探究对象,该边坡坡高为 10 m,坡脚为 45°,取坡脚到模型左侧边界距离为 2 m,坡顶到模型右侧边界距离 8 m,坡脚向下边界延伸 3 m.由于 Damson^[10]等人的示例为二维模型,故在本次 FLAC^{3D}数值探究中,若按照平面应变建立计算模型,须对模型中所有节点的 y 方向速度进行约束,以便等效地进行平面应变分析,并且 y 方向采用一个单元宽度(该方向厚度为 0.5 m).模型边界条件:模型底部固定,模型的左右两侧在水平方向没有位移,模型上部为自由边界.数值试验中网格疏密程度将会影响到计算结果,本模型由于对网格的划分要求较为严格,因此采用有限元软件 ANSYS 进行数值实验的模型建立以及网格划分,然后将划分好网格的模型导入 FLAC^{3D}进行数值计算.图 1 为分析模型在平面示意图.

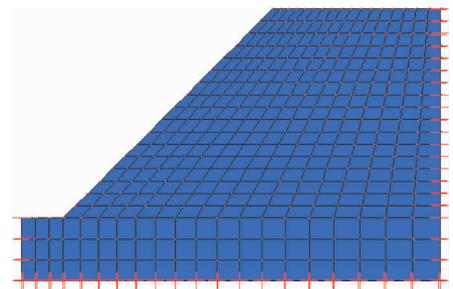


图 1 分析模型平面示意

由于本次数值试验采用的是均质边坡作为研究对象,故模型中所有非空区域采用 Mohr-Coulomb 本构模型,地应力场按照自重应力场考虑;当不平衡力比率达到 $1E-5$ 时即视为计算收敛,最多计算 30 000 step.模型参数:密度为 $2\ 000\ \text{kN/m}^3$,体积模量为 $1E2\ \text{MPa}$,剪切模量 $30\ \text{MPa}$,内聚力 $12.3\ \text{kPa}$,抗拉强度 $1.2\ \text{MPa}$,内摩擦角 20° ,膨胀角 20° .在 FLAC^{3D}中采用“二分法”^[11]求解边坡安全系数,可以有效的缩短求解时间.安全系数求解流程见图 2.

1.2 数值试验设计

影响边坡稳定性的因素有很多,其中包括内聚力、内摩擦角、抗拉强度等,其中内聚力和内摩擦角对其影响最大,因此本次数值试验是基于边坡失稳变形机理来确定滑动面,并且对影响边坡安全系数和滑动面最大的 2 个因素即内聚力和内摩擦角进行试验分析,采用控制变量法的思路来进行参数的改变和设计.其中内聚力 c 分别为 $1.23, 2.46, 4.92, 9.84, 19.78, 39.56, 79.12\ \text{kPa}$;内摩擦角分别为 $2.08^\circ, 4.16^\circ, 9.18^\circ, 17.93^\circ, 32.91^\circ, 52.31^\circ, 68.88^\circ$.

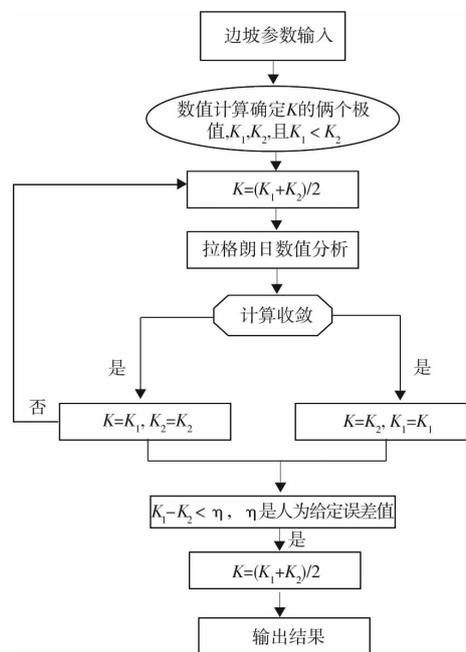


图 2 安全系数求解流程

2 试验结果分析

2.1 内聚力的影响

内聚力 c 的变化区间为 $1.23\sim 79.12\ \text{kPa}$,呈等比数列变化,公比为 2,即 $c_{i-1}/c_i = 2$,其中 c_i 和 c_{i-1} 为第 i 步变化对应的内聚力和第 $i-1$ 步变化对应的内聚力.按照预期的设计进行数值试验,采用 FLAC^{3D}内嵌 fish

语言编译相应程序,记录不同内聚力所计算出的边坡安全系数,为保证数值试验的可靠性,通过改变网格密度来对每一级内聚力下所得安全系数进行均值,经过42次数值模拟试验所得的安全系数随内聚力变化曲线见图3。

采用“二分法”求解安全系数时只改变内聚力大小,安全系数随内聚力的增大而增加。换言之内聚力越大,边坡的稳定性越高。边坡的破坏一般可以视为岩土体所受的剪切应力超过其抗剪强度而产生破坏,这种破坏必然造成一部分岩土体相对于另一部分发生无限制的滑移,从而造成边坡失稳破坏。当岩土体的内聚力增大时,根据库伦准则可知其抵抗剪切破坏的能力也会相应提高,边坡的稳定性也会越好。为进一步说明边坡安全系数与内聚力的关系,对两者进行曲线拟合(见图3)发现三次多项式能够很好表达两者之间的关系,且拟合相关系数达0.99。

2.2 内摩擦角的影响

将内摩擦角 φ 变化区间为 $2.08^\circ \sim 68.88^\circ$,相邻两摩擦角的关系为 $\varphi^i = \arctan[2\tan(\varphi^{i-1})]$,其中 φ^i 和 φ^{i-1} 为第 i 步对应的内摩擦角和第 $i-1$ 步变化对应的内摩擦角,得到边坡安全系数和内摩擦角的关系见图4。

由图4可知当内摩擦角较小时,边坡安全系数变化不大,这是因为岩土体中没有出现较大的起伏不平的突起,同时由于岩土体是由可压缩的粒状材料构成,当内摩擦角较小时,岩土体中的颗粒类物质突起咬合不充分,导致其安全系数变化不大;随着内摩擦角的增大,边坡安全系数的增大趋势也越明显。

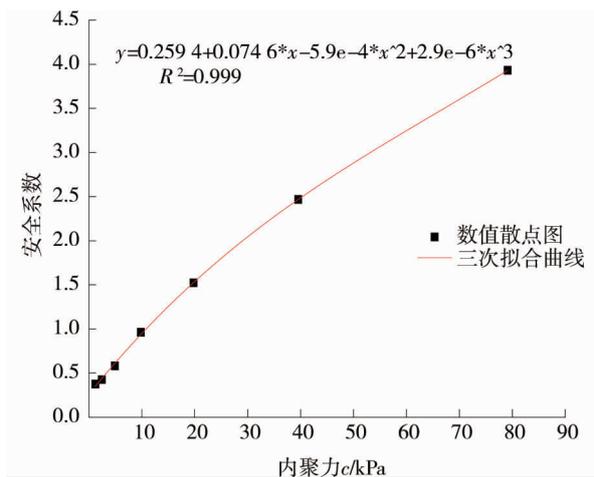


图3 边坡安全系数与内聚力的曲线拟合

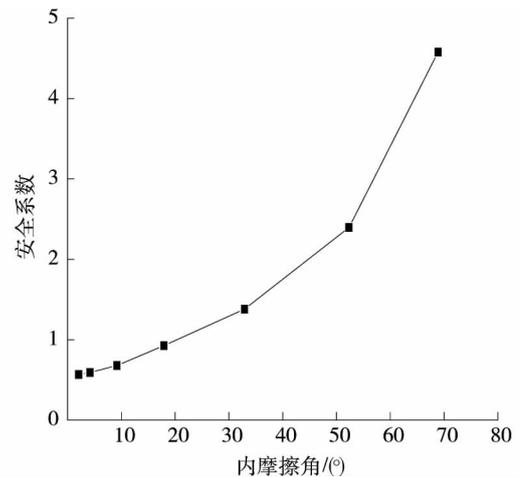


图4 内摩擦角对安全系数的影响

为进一步分析内摩擦角对边坡稳定性影响,采用边坡位移等值线对滑动面进行判断。众多工程实践和试验研究表明,当边坡出现失稳破坏时,边坡的局部化剪切变形会发生明显变化,这种现象一旦发生,变形会在相对集中在局部化变形区域内,滑坡体将沿某一滑动面滑出,且滑动面两侧沿滑动面方向的位移有明显差别,如图5(安全系数为2.3949的位移等值线)所示,利用FLAC^{3D}与Tecplot之间的转换接口,编译fish语言程序将各位移等值线的坐标以ASCII码写入text文件中,然后再将该text文档读入后处理软件Tecplot中。此坡体以位移值为10mm的等值线为界,被明显的分为2部分:滑体与稳定体。在滑移面附近,等值线最为密集,且越往临空面靠近位移值越大,说明该处发生了滑动;而滑体以外的稳定体,位移值均相同,且无其他等值线分布,从而说明该部分相对于滑体部分处于稳定状态,因此将2部分之间的分界面定义为滑动面。图5中等值线为5mm可视为分界面,最大位移等值线(x轴方向)发生在坡脚往上处即该处最易率先出现滑动。

根据内摩擦角对滑动面位置的影响图可知,当内摩擦角变化于 $2.08^\circ \sim 4.16^\circ$ 的时候,滑动面穿出了坡脚左侧的水平面,且内摩擦角越小穿出的深度越深,滑动面的位置越靠后,出现深层滑动;当内摩擦角变化于 $17.93^\circ \sim 68.88^\circ$ 时,在坡脚以上的倾斜坡面出现滑动面剪出口,并且随着内摩擦角的增大,边坡的滑动变为由深层滑动转为浅层滑动,滑动面比较陡,且滑出体的体积减少,滑动面上缘越来越靠近坡顶。

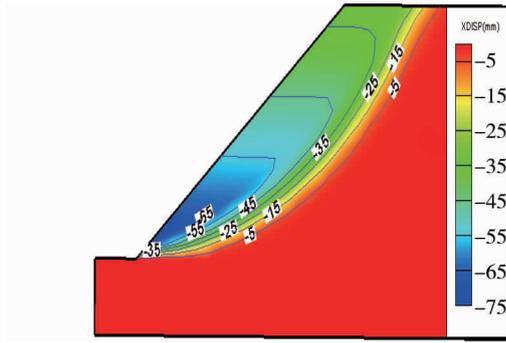


图5 边坡位置等值线图

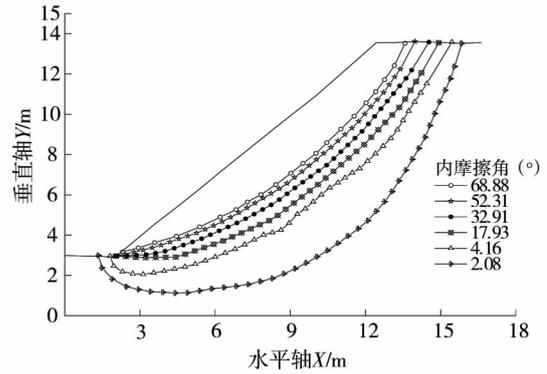


图6 内摩擦角对滑动面位置的影响

3 结论

1) 内聚力越大, 边坡安全系数越高, 换言之边坡稳定性越好, 且内聚力与边坡安全系数呈先三次函数的关系。

2) 当内摩擦角较小时, 边坡安全系数变化不大; 当内摩擦角增大时, 边坡安全系数也相应增大。

3) 内摩擦角越小边坡的滑动面越表现深层滑动, 当内摩擦角增大时, 边坡的滑动面由深层滑动转为浅层滑动。

参考文献:

- [1] 李同录, 刘超, 李萍. 甘肃天水地区黄土极限状态边坡的统计分析[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(2): 107-114.
- [2] 邵龙潭. 基于有限元滑面应力法重力式挡土墙结构抗滑稳定分析[J]. 水利学报, 2011(5): 602-608.
- [3] 徐林春, 赵明登, 黄东, 等. 单一土层边坡抗滑稳定的影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(7): 142-145.
- [4] 肖欣欣, 李夕兵. FLAC^{3D}在露天矿边坡参数优化中的应用[J]. 采矿技术, 2012, 12(2): 73-75.
- [5] 王旭春, 管晓明, 王晓磊, 等. 露天矿边坡稳定性与岩体参数敏感性研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 1806-1811.
- [6] 汪益敏, 苏卫国. 土的抗剪强度指标对边坡稳定分析的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2001, 29(1): 22-25.
- [7] 郭明伟. 边坡和坝基抗滑稳定分析的三维矢量和法及其工程应用[J]. 岩土力学与工程学报, 2010, (29): 8-20.
- [8] 郑宏, 谭国焕, 刘德福. 边坡稳定性分析无条分法[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1285-1291.
- [9] 冯国栋. 土力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [10] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 835-840.
- [11] 颜庆津. 数值分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.