

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.04.031

基于数值仿真的顺层岩质边坡支护稳定性分析

林一夫

(中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以长沙某矿坑顺层岩质边坡为研究对象,结合有限元数值分析软件 Phase2 对边坡开挖应力状态变化与潜在变形破坏模式进行仿真模拟,分析其支护效果,确定合理可靠的治理措施方案,并采用极限平衡法进一步验证。结果表明:该顺层岩质边坡应力松弛区位于坡面中上部,由坡面向坡体内部呈现出显著变化、渐变和基本不变的分布特征;该顺层岩质边坡的潜在变形破坏模式为顺层滑移-弯曲破坏;采用预应力锚杆对该顺层岩质边坡进行支护,能有效提高边坡的稳定性。

关键词:岩质边坡;强度折减法;稳定性分析;应力松弛

中图分类号: TD12

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)04-0160-04

Stability Analysis of Bedding Rock Slope Support Based on Numerical Simulation

LIN Yifu

(Northwest Research Institute of China Railway Group Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: By taking the bedding rock slope in a mine in Changsha as an example, Phase2 which is a numerical analysis software for finite element analysis is adopted to simulate the potential deformation failure mode of the slope, and analyze the supporting effects. The reasonable and reliable control measures and limit equilibrium method is adopted to make further efforts to validate the result. The results showed that the stress relaxation zone of the bedding rock slope is located in the middle and upper part of the slope, and has a significant change, gradual change and basically invariable distribution characteristics from the slope surface to the internal slope. The potential deformation failure mode of the bedding rock slope is bedding slip-curvature failure. The use of prestressed anchors to support the bedding rock slope can effectively improve the stability of the slope.

Keywords: rock slope; strength reduction method; stability analysis; stress relaxation

随着人类工程建设活动的日益增加,顺层岩质边坡治理问题已成为矿坑治理工程中常见的工程地质问题。由于岩质边坡稳定性受岩体岩性、结构面、层面和地下水等相关因素控制,同时岩质边坡岩体中含大量产状和特性复杂的不连续面,如层面、节理、裂隙、软弱夹层、岩脉和断层破碎带等,造成岩质边坡稳定性计算的困难^[1]。因此,合理判辨这些相关因素成为岩质边坡稳定性分析的重难点。

目前,业内对于岩质边坡的稳定性分析主要采用理论计算和工程地质类比法。采用传统的极限平衡法,对于岩质边坡难以合理判定坡体的松弛区域、滑动面位置、及确定结构面抗剪强度参数,总之,对岩质边坡的稳定性分析存在一定局限性^[2]。

而采用强度折减法对岩质边坡的稳定性分析可以取得理想的效果。早期郑颖人等^[3],赵尚毅等^[4-6]采用强度折减法对岩质边坡变形破坏机制进行了研究分析,并证明方法的可行性。许多学者^[7-13]结合此方法对岩质边坡稳定性评价开展了进一步研究,如李大茂等^[7]对全强风化岩质边坡失稳破坏机制进行了研究。卜林等^[8]对含软弱结构面岩坡稳定性进行了分析。江学良等^[9]对层状岩质边坡开挖过程的岩体的变形和应力状态及屈服状态进行了模拟分析,皆取得了一定成果。该方法通过对岩土体的物理力学参数进行折减,直至结构达到极限状态,即为边坡的安全系数^[14]。结果可以反映出岩质边坡的松弛区域,判定边坡的潜在滑移面,为岩

质边坡的稳定性分析提供有力的判断依据。

本文以长沙某矿坑顺层岩质边坡为研究对象,利用强度折减法的有限元数值分析软件 Phase2 对顺层岩质边坡潜在变形破坏模式与支护稳定性进行分析。文中对岩质边坡稳定性的分析方法、步骤和结果可为类似工程边坡的稳定性评价提供借鉴。

1 强度折减法计算原理

强度折减法最早是 Zienkiewize 在二十世纪七十年代提出运用计算,结合有限元分析手段,采用降低岩土强度的方法来计算边坡的安全系数,对边坡稳定性进行评价。

在理想的弹塑性有限元计算中,按照一定的强度准则判断岩土体的屈服破坏情况,从岩土体实际的物理力学性状出发,将边坡的岩土体强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 以系数 F 进行折减,如下所示:

$$c' = c/F_s \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan(\tan\varphi/F_s) \quad (2)$$

将 c' 和 φ' 带入程序中计算,直至边坡达到极限平衡状态,发生失稳破坏,破坏时对应的折减系数 F_s 本质上即为边坡的传统意义上的稳定性系数,其代表实际工程岩土体的安全稳定程度。

有限元强度折减法考虑了岩土体内部的应力应变关系,可对任意几何形状或不均匀材料的边坡开展分析,因而此计算方法可得到更接近实际情况的危险滑移面及相应的稳定性系数,同时具有可根据塑性区的逐步发展观察边坡的渐进破坏过程等诸多优点^[14]。

本文岩土体材料的本构模型按照理想的弹塑性模型考虑,采用摩尔-库仑的强度屈服准则,运用有限元数值模拟分析软件 Phase2,基于强度折减法计算原理的方法,来求解岩质边坡的稳定性系数。

2 边坡计算模型与参数

工点边坡位于长沙某矿坑,该段边坡坡面裸露,坡长约 25 m,坡高 35 m~39 m,坡顶有植被覆盖,边坡总体倾向 211°,坡面上部(距坡脚 24 m 以上)坡角 73°~76°,下部坡角 55°~60°,无支护,无地表水及地下水渗出,坡面上无溶蚀沟槽,坡脚有采空区,宽度约 10 m,节理裂隙发育,层理面明显,容易发生顺层滑移破坏,见图 1。

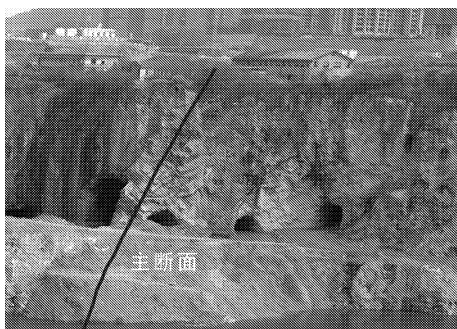


图 1 现状边坡影像图

边坡岩体类型为Ⅲ类,主要受两组裂隙控制,裂隙 L1 和裂隙 L2 结构面较粗糙,张开度 1 mm~2 mm,局部钙质胶结,延伸长度 5 m~8 m。结构面结合程度差,属硬性结构面。产状分别为 355°∠-53.4°和 92°∠-40.0°。岩层层面为外倾结构面,边坡层面产状为 210°∠48°,该段边坡可能产生沿岩层层面顺层滑移;裂隙 L1、裂隙 L2 与边坡大角度相交内倾,对边坡稳定性影响小。裂隙与层面在软件中按节理进行定义模拟,结果见图 2。

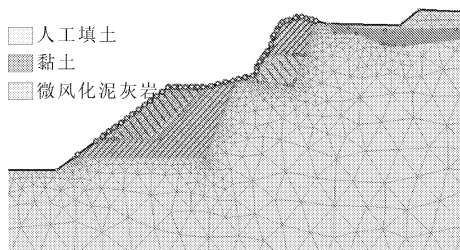


图 2 边坡工程地质模型图

边坡从上到下岩土层分别为人工填土、黏土层及微风化泥灰岩,对应岩土物理力学参数如表 1 所示。

结合现场踏勘调查及设计规划资料,如图 1 中所示,该段边坡坡顶为水泥厂厂房,后期将在该处建设游乐场建筑物,且坡脚为采空区。该段边坡周边环境显得较为复杂,故如何成功治理该段边坡显得十分重要。

表 1 岩土物理力学参数

岩土名称	弹性模量 /MPa	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)	抗拉强度 /kPa
人工填土	15.0	18.3	18	12.0	—
黏土	25.5	19.1	30	19.0	—
微风化泥灰岩	65000.0	27.0	5200	39.0	3170
裂隙 L1	—	—	70	22.0	—
裂隙 L2	—	—	72	22.5	—

3 数值模拟结果分析

本工点数值模拟边坡治理过程的主要思路是:

(1) 采用 Phase2 软件模拟原状矿坑场地开挖工况,判断现状边坡应力松弛区域;(2) 根据现状边坡稳定状态,推断其安全系数,并反演松弛区域层面与结构面参数;(3) 进行刷方卸载及施加锚固工程,使之安全系数满足现行规范要求 ≥ 1.35 。

3.1 边坡应力松弛区判定

采用数值模拟 Phase2 软件,分 11 步对原状矿坑场地开挖至现状边坡状态,对比现状边坡与原状场地主应力变化情况。

在分析边坡的稳定性时,假定采空区不存在,仅对采空区上部岩土层进行稳定性分析。数值模拟结果见图 3 所示,该边坡应力松弛区较为集中的区域,集中在边坡上部及坡脚平台外侧向下部区域。该边坡应力集中区域,集中在边坡坡脚下部。

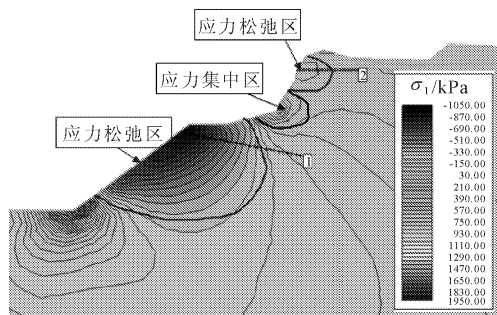


图 3 现状边坡应力松弛区分布图

提取图 3 中 1、2 号直线的应力 σ_1 变化量数值。以 2 号线为例,分布曲线如图 4 所示。2# 线的应力松弛区可分为两段:0~18 m 为应力松弛显著区,18 m~32 m 为应力松弛渐变区,32 m 之后应力基本不变。同样可得,1 号线的应力松弛区可分为两段:0~25 m 为应力松弛显著区,25 m~65 m 为应力松弛渐变区,65 m 之后应力基本不变。

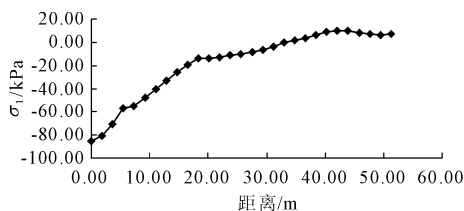


图 4 3 断面边坡 2 号线 $\Delta\sigma_1$ 曲线图

3.2 边坡潜在变形破坏模式分析

根据现场调查情况及勘察设计资料,初步判定该段边坡处于基本稳定状态。按现状边坡处于基本

稳定,即稳定性系数为 1.10 左右对结构面参数进行数值反演^[15]。

模拟过程,结构面参数按照表 1 参数进行折减计算直至接近 1.10 为止,数值模拟结果如图 5 所示,计算结果显示边坡稳定性系数为 1.09。反演主要结构面参数见表 2 所示。



图 5 3 断面边坡潜在破坏模式(总位移云图)

表 2 反演主要结构面参数表

岩土名称	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	法向刚度/kPa	剪切刚度/kPa	抗拉强度/kPa
上部裂隙 1	70	21.0	100000	10000	—
上部裂隙 2	70	21.5	100000	10000	—
上部层面	63	17.0	100000	10000	—
中部裂隙 1	65	20.0	100000	10000	—
中部裂隙 2	65	25.5	100000	10000	—
中部层面	45	17.0	100000	10000	—

岩质边坡潜在破坏模式为沿顺倾岩层层面滑移-弯曲破坏。结果与张倬元等^[16]提出的岩体变形破坏地质学基本模式一致。

结合边坡自然坡率、岩层产状,有限元数值模拟边坡松弛区结果,边坡现状变形状态分布,及工程经验对主断面进行综合分析,并判定潜在滑动面位置,如图 5 所示。

3.3 支护稳定性评价

参照数值模拟边坡现状可能发生的破坏模式和潜在滑动面,对边坡进行加固处理。由于本工点边坡破坏模式主要为沿顺层滑移-弯曲破坏,潜在滑动面位于坡体向内 10 m 范围内,故选择预应力锚杆进行加固支护,采用系统锚杆对浅表层岩体进行辅助加固,预应力锚杆的锚固段应深入至潜在滑面之下。

确定治理方案如下:对边坡岩土体按照 1:0.5 进行浅层刷方;预应力锚杆设计长度 15 m,锚固长度 5 m,垂直间距 4 m,设计荷载 250 kN;系统锚杆长度 5 m,抗拉强度 50 kN。

数值模拟结果见图 6~图 8,治理之后,边坡稳

定性系数为 1.71。支护前边坡最大变形为 142 mm, 支护后边坡最大变形为 6 mm, 比支护前减少了 95.8%。可见, 在增加预应力锚杆等措施治理之后, 有效的控制了坡体的滑移变形。

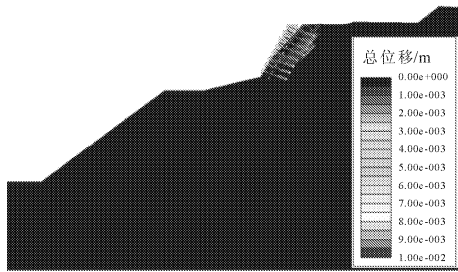


图6 3断面边坡潜在破坏模式(总位移云图)

图6为主断面边坡治理后的总位移云图, 由图6可见, 边坡潜在滑动面明显向深部转移, 治理措施效果十分明显。

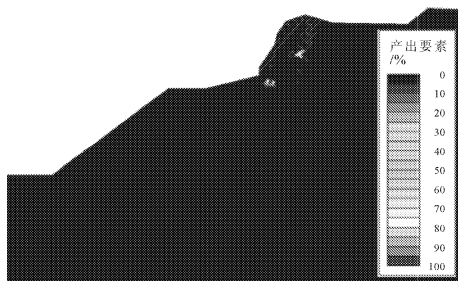


图7 3断面边坡现状塑性区分布云图

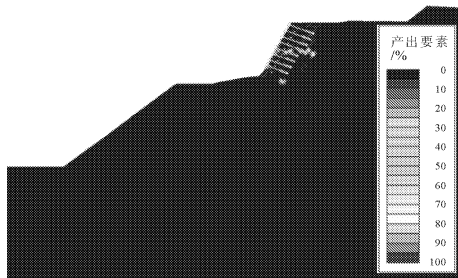


图8 3断面边坡加固后塑性区分布削减云图

图7、图8为边坡治理前后塑性分布区云图, 由两图对比可知, 治理之后的边坡塑性屈服变形明显改善, 加固后的边坡处于稳定状态。

3.4 极限平衡法计算与对比验证

用极限平衡软件 Slide 对现状边坡与加固后的边坡进行计算。结合判定的潜在滑动面, 在模型中定义 5 cm 的滑动带薄层, 用指定非圆弧滑面进行计算, 对现状边坡按照稳定性系数 1.10 左右进行反算。

计算结果如表3所示, 边坡治理后稳定性系数 $F_s = 1.392$, 满足《建筑边坡工程技术规范》^[15](GB

50330—2013)稳定安全系数 ≥ 1.35 的要求。通过极限平衡法的计算, 进一步验证支护方案有效性。

表3 数值计算和极限平衡计算结果对比

计算类型	稳定系数 F_s	
	现状边坡	治理后边坡
Phase2	1.090	1.710
Slide	1.096	1.392

4 结论

本文基于数值仿真技术, 采用强度折减安全系数的非线性有限元数值极限分析法, 对长沙某矿坑顺层岩质边坡潜在变形破坏模式与支护稳定性进行分析评价。分析了矿坑岩质边坡的应力松弛变化特征, 根据现场变形迹象与数值模拟结果判定岩质边坡潜在变形破坏模式, 选择合理支护措施进行边坡治理, 并对其支护后边坡稳定性进行分析评价, 最后结合极限平衡软件 Slide 进一步验证支护的有效性。

参考文献:

- [1] 管旭东, 孙进忠, 白英, 等. 基于强度折减法的岩质边坡稳定性二维有限元分析[J]. 工程地质学报, 2007, 15(S1): 344-348.
- [2] 周太全, 华渊, 宿树波. 基于强度折减法的节理岩质边坡支护稳定性分析[J]. 金属矿山, 2009, 39(1): 37-40.
- [3] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 254-260.
- [4] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388.
- [5] 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): 1943-1954.
- [6] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 57-61.
- [7] 李大茂, 张国辉, 袁从华. 基于数值仿真的全强风化岩质边坡失稳机制研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 205-209.
- [8] 卜林, 徐涛, 张云杰. 强度折减法在含软弱结构面岩坡稳定性分析中的应用[J]. 有色金属, 2014, 66(3): 90-94.
- [9] 江学良, 曹平, 杨慧. 层状岩质边坡开挖过程的有限元模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1935-1940.
- [10] 罗青海. 比较两种折减法在岩质边坡稳定性分析中的差异[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(3): 213-216.

(上接第 163 页)

- [11] 刘俊雄,张大军,刘锦伟,等.某岩质边坡稳定性分析及支护方案优化设计[J].水利与建筑工程学报,2013,11(6):94-98.
- [12] 杜朋召,刘建,韩志强,等.基于复杂结构精细描述的岩质高边坡稳定性分析[J].岩土力学,2013,34(S1):393-398.
- [13] 刘强,胡斌,蒋海飞,等.基于强度折减法的露采边坡稳定性分析[J].金属矿山,2013(5):49-52.
- [14] 郑颖人,赵尚毅,李安洪,等.编著.有限元极限分析法及其在边坡中的应用[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013:24-26.
- [16] 张倬元,王士天,王兰生,编著.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,2016.