

某岩质矿山边坡的稳定性评价 及加固治理研究

Study on Slope Stability and Reinforcement Measure of a Rock Mine

王小鹏(中冀建勘集团有限公司,河北石家庄 050227)

摘要:为研究岩质矿山边坡开挖稳定性和加固措施治理,本文以河北某大型石灰岩矿山建设工程为基础,利用FLAC模拟软件,对该矿山的开采坡面加以建模计算,以期在实际矿山工程提供一定的现实价值和指导作用。研究表明:边坡在自然工况下,随台阶的开挖,矿山边坡的岩体开始出现越来越明显的位移现象,对矿山的建设施工带来越来越大安全隐患;由于弱夹层稳定性较差,直接影响到矿山边坡的坚固和稳定性,比较容易出现弯曲型滑移性山体滑坡,导致岩体产生溃屈性的破坏。为了加强坡体防护安全,采用抗滑桩进行支护取得较好的效果,对矿山边坡出现的塑型区有较好的控制作用,可以有效减少边坡山体不断增加的位移量及剪应力,使岩体安全性得到有效提升,也使边坡岩体的稳定性进一步得到增强。

关键词:岩质矿山边坡;稳定性分析;加固;抗滑桩

中图分类号:TD213.1⁺58

文献标志码:A

文章编号:1672-609X(2021)05-0007-06

Abstract: This paper is based on a large limestone mine construction project in Hebei Province. In order to study the excavation stability and reinforcement measure of the mine slope, FLAC (a 3D digital simulation software) is used for modeling and calculation of the mining slope, with the expectation to provide some practical value and guidance for actual mining projects. The study results show that under normal working conditions, as the excavation of benches, more and more obvious displacement occurs to the slope rockmass, which brings more and more safety risks to the mine construction. The poor stability of soft rock strata directly influences the firmness and stability of the mine slope and makes it easy to occur curved landslides, further leading to the buckling failure of rockmass. To strengthen the slope protection and safety, anti-slide piles are used for reinforcement. This measure has played a good effect in controlling the plastic zone of the slope and reducing the increasing displacement and shear stress of the slope. Meanwhile, the safety of rockmass has been improved and the stability of rockmass has been further enhanced.

Key words: rock mine slope; stability analysis; reinforcement; anti-slide pile

1 前言

矿产资源从古至今一直都是人类生产发展中不可或缺的重要原料,在国内经济得到快速发展的情况下,我国针对矿业开采及建设的相关法规做了适当调整和修改,矿业发展态势良好。在矿业的开采建设当中,安全生产始终是行业发展的重要方向,矿山在开挖后形成的高陡边坡稳定性成为重点关注的对象,引起了诸多研究人员的研究投入^[1-6]。岳西蒙等^[7]基于三维点云建模对某矿山边坡稳定性进行了分析;郭夏飞等^[8]以伊敏露天矿三采区端帮边

坡为研究对象,建立相似材料模型并结合数值模拟,对渗流作用下含断层边坡稳定性进行模拟研究;陈毓^[9]通过建立复合边坡的二维理论模型,使用FLAC^{3D}软件建立三维数值分析模型,对外排土场与矿坑边帮复合边坡进行了边坡稳定性分析;王天龙采用有限差分程序FLAC^{2D}和极限平衡法对某排土场的边坡结构参数在天然、地震、降雨三种工况条件下进行稳定性计算。

综上所述,目前对于矿山边坡稳定性已引起了足够的重视,但是由于矿山开挖后地质条件和开挖形态不一,造成相关研究不可推广,因此本文以河北某大型露天石灰岩矿山作为工程建设依托,采用FLAC数值模拟软件,对该矿山的开采坡面建模并对各项参数进行计算以及进行边坡稳定性综合分析和加固措施研究,以期在实际矿山工程提供一定的现实价值和指导作用。

[作者简介] 王小鹏(1980-),河北沙河人,本科,工程师,主要研究方向为岩土工程勘察设计。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(71573274)

[引用格式] 王小鹏. 某岩质矿山边坡的稳定性评价及加固治理研究[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(5): 7-12.

2 工程概况

2.1 地形地貌

本文针对河北省某大型石灰岩矿山进行分析和研究,该矿区的地形特点呈中低山分布,地貌为中等山脉切割类型,具体来说矿山海拔高度 758 ~ 1 508 m,其高差为 750 m,山势较为陡峻,山体走势为北东 ~ 南西;微地貌表现的不够发育,地面坡角 $10^{\circ} \sim 40^{\circ}$,局部大于 45% 。矿山开采示意图如图 1 所示。

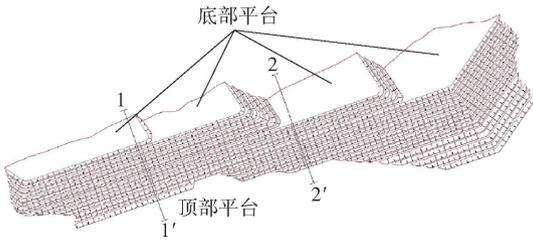


图 1 矿山开采示意图

2.2 水文条件

该矿山整个山体呈中部较高,南部和北部较低,这种地形对自然降雨后的积水排泄有利,在矿区中部地区枯水期内的河流排泄量是 0.2 L/s ,而在丰水期内河流排泄量是 0.8 L/s ,基本不会影响矿山的施工作业;在资源量开采范围之内没有发现含矿层的地表出现溶洞,可见矿山岩溶不够发育;最低矿床预测资源的量标要比最低当地侵蚀地质基准面高些,在对资源量进行预测时不含矿山地下水,该矿区的地质水文环境比较简单。

3 分层开挖下高陡边坡稳定性研究

3.1 计算模型的建立

通过 MIDAS/GTS 分析软件对典型岩层剖面地形线进行生成,利用 FLAC3D 端前应用软件导入各项信息参数并创建模型。为了避免边界产生的效应干扰,对模型相对应的计算范围进行确定:其中 X 轴与 Z 轴所对应的计算区域是 $380 \text{ m} \times 236 \text{ m}$,而 Y 轴正常垂直在 XZ 的平面向内,其长度是 8 m 。该创建模型重点对开采效应中涉及软夹层或弱夹层的边坡坚固性和稳定性进行研究,因此要对开采区域、软夹层、弱夹层、邻近范围使用密度较高的小单元式网格加以高精度、高敏感计算,其他区域选择适合网格加以过渡。共将模型划分成 99 160 个单元,61 293 个节点,具体计算的模型图如图 2 所示。

对边坡进行计算的限制条件包括:与 X 轴相垂直的最左端以及最右端、与 Z 轴相垂直的最上端以

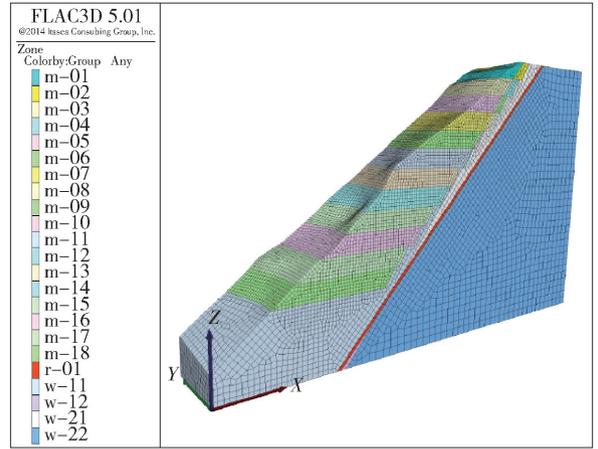


图 2 计算模型图

及最下端选择的都是法向限制,对模型整体 Y 方向选择全局限制。对矿山边坡仿真模型按照分步开采计算,分析借鉴模拟边坡的安全信息、信移、塑性区、剪应增量等相关信息,与其云图给出的参数信息及方向等数据相结合对边坡具有的稳定性加以评定。

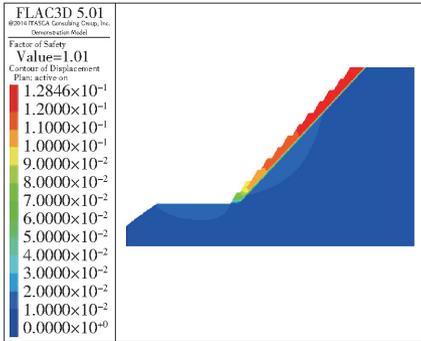
3.2 计算结果分析

1) 关键云图分析

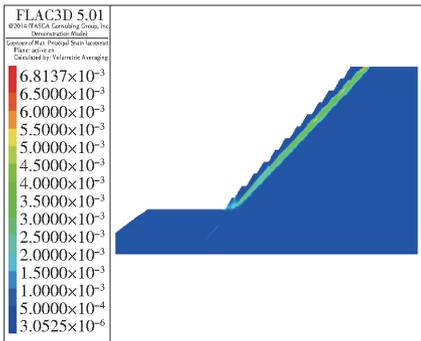
由图 3(a)可知,矿山的边坡评判安全性指标系数已经降至 1.01,由此测评坡脚处实际临界处产生位移值大约是 6.8 cm ,小于允许安全系数,边坡处于不稳定状态特征。

由图 3(b)可知,开挖完成边坡的最大剪应变增量为 1.41×10^{-2} ,其剪应力所在位置处于坡顶的软夹层,这表明软夹层因为强度太低,容易出现剪切性的破坏,因此它是边坡最危险处。同时开挖到最后台阶的时候,剪切应力的最大区域将会从坡顶的软夹层延伸到坡脚,其形成了贯通趋势,这说明边坡已经达到了滑坡的条件,随时会发生滑塌情况的出现。为了能够直观的看到边坡发生塑性区变化的过程,本文通过三维模型对塑性区的变化分布进行展示,如图 3(c)所示;同时绘制出塑性区逐步开挖时的变化图,具体如图 4 所示。通过上述两图分析可以得出没有进行开挖时,因为模型在运行前实行位移和速度以及状态的归零,所以塑性区的状态显现成 0, tension-p 单元的体积在进行开挖的全部过程里,都显现平稳的增长,但是 shear-p 单元的体积在出现突然加大以后在进行缓慢的增长,对于边坡起到稳定作用的 shear-n 与 tension-n,在前期始终处在较低的水平,在第 6 步才开始增长,可是它的增长不是很大,直到挖至后两层的时候,特别是 12 层的时候,剪切力对岩体的破坏迅速升高,从 $3\ 966.15 \text{ m}^3$ 快

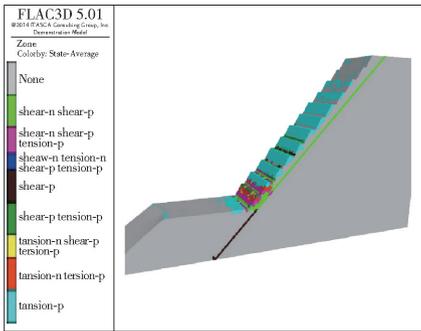
速增加到 52 866.40 m³, 张拉出现的破坏体积从 680.01 m³ 升高到 8 370.41 m³, 这表明挖至 12 层的时候, 边坡出现的破坏非常严重, 并且它的稳定性出现快速下降。



(a) 边坡总位移云图



(b) 边坡最大剪应变增量云图



(c) 边坡塑性区状态图

图3 开挖完成后边坡关键位移云图

2) 安全系数分析

把开挖的时步存在的安全上的系数, 绘制成相应的曲线图, 具体如图 5 所示, 同时根据图形进行分析: 在开挖时的 1 步到 5 步之间, 安全的整体系数提升了 13.29%, 这主要是由于上台阶进行开挖, 能够减轻软夹层载荷, 致使边坡承受的载荷得到降低, 这非常有利边坡的稳定性能, 另外因为开挖台阶改善了边坡原有的形状, 减少了边坡的角度, 从而提升了边坡抗滑性能, 同时也起到了消减载荷的目的。当开挖 6 层以后, 安全的系数比先前出现了降低, 这主

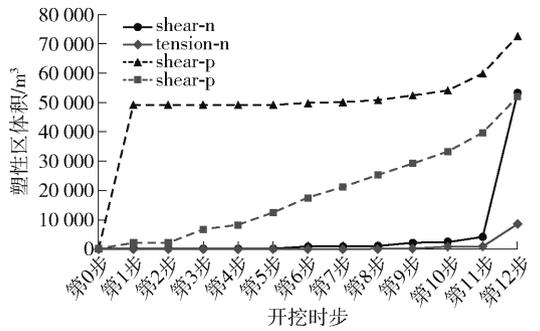


图4 塑性区体积随开挖时步变化图

要是因为软夹层岩层具有潜在的滑移趋势, 在进行后面台阶的挖掘过程, 滑移实时影响边坡稳定的性能, 直到开挖最后的台阶时, 滑体就决定了边坡的稳定性能。

对整体进行分析, 随着挖掘的不断进行, 其安全上的系数显现出先升高随后再降低的态势, 在第 5 步开挖时安全的系数最大, 可达 1.96, 它已经远大于设计的要求; 在 6 步到 12 步的时候, 安全系数逐步降低, 最后的终了边坡安全系数稳定在 1.01, 为极不稳定状态。

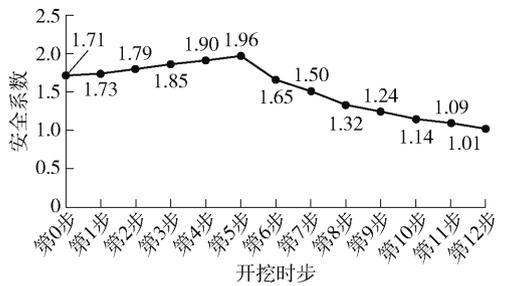


图5 分步开挖下安全系数走势图

4 抗滑桩支护形式的探究

4.1 桩参数选择

本方式是使用全埋的方式, 利用防滑桩加固边坡, 为了更加方便的进行施工, 防滑桩设计成圆形的截面, 其直径 2 m。因为矿山边坡的安全宽度非常窄, 因此加固的方案设计于清扫的平台处。

各桩的间距: 各桩之间的距离设计在 6 ~ 10 m 的位置为最佳, 本文在设计前, 进行了大量实验, 各桩之间的距离选择过大, 其防滑桩加固的效果也相应的变差, 选择桩距较小的时候, 加固的效果得到提高, 但是其经济性能变差, 为了达到及经济有使用的效果, 经过试验本文选取防滑桩之间的距离为 8 m。

桩长: 当边坡结构是软岩体的时候, 防滑桩固定锚的深度要达到防滑桩全长的 1/3 ~ 1/2。当边坡是坚硬而且整岩体的时候, 防滑桩固定锚的深度要

达到防滑桩全长的 1/3 ~ 1/4, 依据该矿山实际的地质情况, 以及为了能够方便对防滑桩应用到边坡中的最佳位置研究, 本论文统一了各种台阶防滑桩的相应参数, 把桩长设定在 35 m。

桩位: 经过前期模拟测算, 抗滑桩的最优加固位置为 5 号台阶的清扫平台, 即坡中偏上的部位。

参照有关防滑桩技术文献以及实际施工的经验, 同时结合本文的模拟参数数值, 本文所使用的防滑桩参数见表 1。

表 1 抗滑桩设计力学参数

抗滑桩参数	参数值
弹性模量/Pa	2.6×10^{10}
泊松比	0.23
截面面积/m ²	3.14
极惯性矩/m ⁴	1.57
外圈周长/m	6.28
剪切耦合弹簧单位长度上刚度/N·m ⁻²	5.2×10^6
剪切耦合弹簧单位长度上内聚力/N·m ⁻¹	1×10^7
剪切耦合弹簧的摩擦角/(°)	23
法向耦合弹簧单位长度上刚度/N·m ⁻²	5.2×10^6
法向耦合弹簧单位长度上内聚力/N·m ⁻¹	1×10^7
法向耦合弹簧的摩擦角/(°)	23

4.2 桩单元模拟

FLAC^{3D} 软件本身带有 pile 的结构模拟的功能。利用软件进行建立防滑桩模拟的受力, 具体如图 6 所示, 利用软件里 pile 模拟防滑桩的顶部与底部坐标值和防滑桩的件数, 同时模拟防滑桩和岩层网络连接, 从而达到桩体和岩体之间进行相互的作用, 本方法是通过抽象的模拟替代复杂实体, 使模型更容易建立并且能通过计算得到更多的数据。

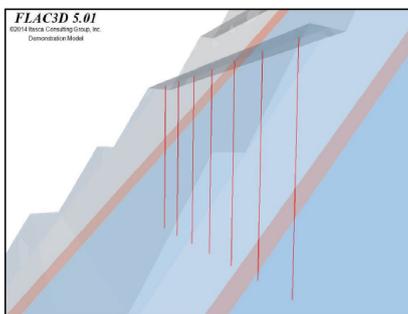


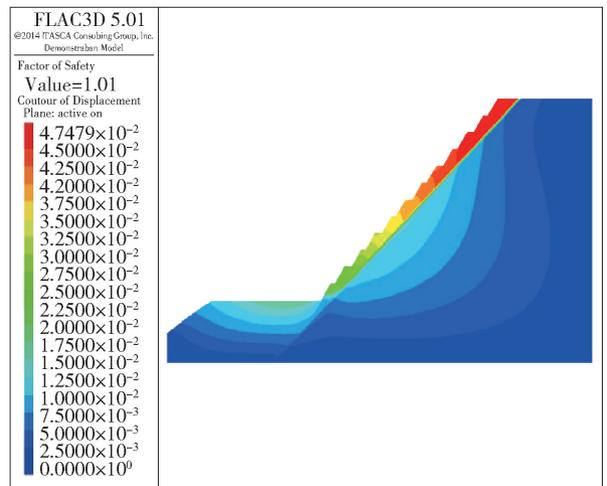
图 6 FLAC^{3D} 抗滑柱模拟简图

4.3 支护效果分析

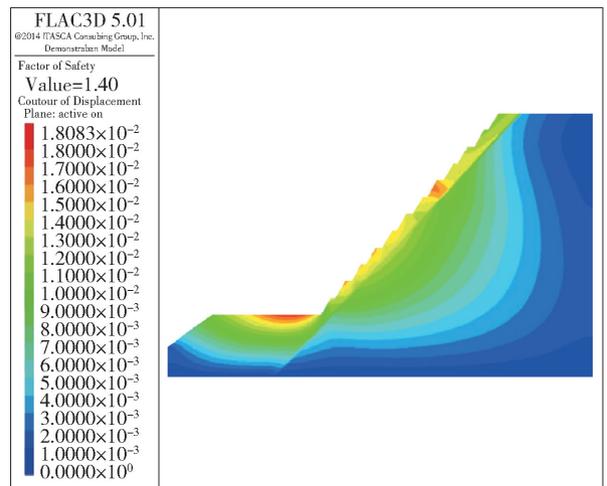
将抗滑桩支护模拟结果与未支护状态的参数进行数据上的分析对比如下。

1) 终了边坡岩体位移分析

防滑桩进行支护以前以及支护以后, 边坡出现位移和矢量情况如图 7、图 8 所示。从图上可以看出, 支护以前与支护以后, 其位移出现的变化, 在进行支护以后, 边坡出现的位移明显下降, 并且发生位移的位置从没有支护时的边坡顶移到边坡的底部, 而且最大位移量递减了 29.4 mm。另外, 软夹层两侧位移差得到减小, 其最大的差值是 0 mm, 比没有进行支护时的差值减小 35 mm。在防滑桩的加固位置, 其位移比其他处大的很多, 这主要是防滑桩隔断岩体滑动所致, 上面的岩体下滑力被防滑桩阻挡, 导致加固处位移加大。从支护以前以及支护以后的矢量图里可以得知, 在防滑桩的加固点以上的岩体存在下滑的形式, 但是在加固点之下, 其岩体下滑已经被削减, 此时主要存在的是卸荷时的回弹, 因此可以证明防滑桩能够有效阻断滑坡。

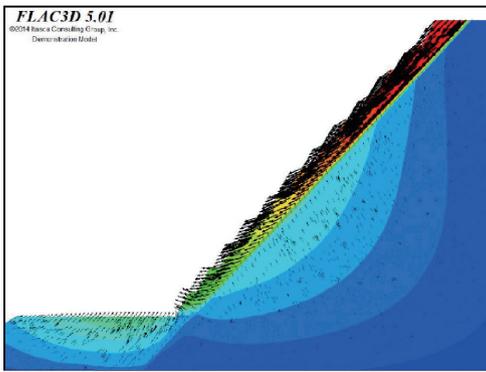


(a) 支护前

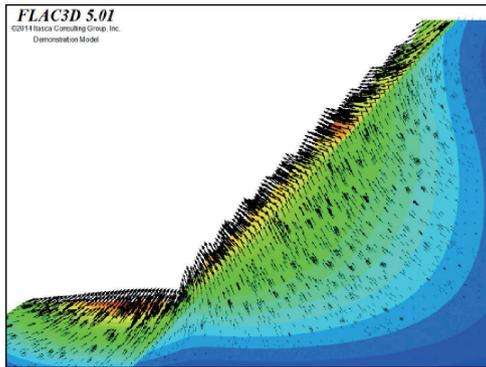


(b) 支护后

图 7 抗滑桩支护前后终了边坡位移云图



(a) 支护前



(b) 支护后

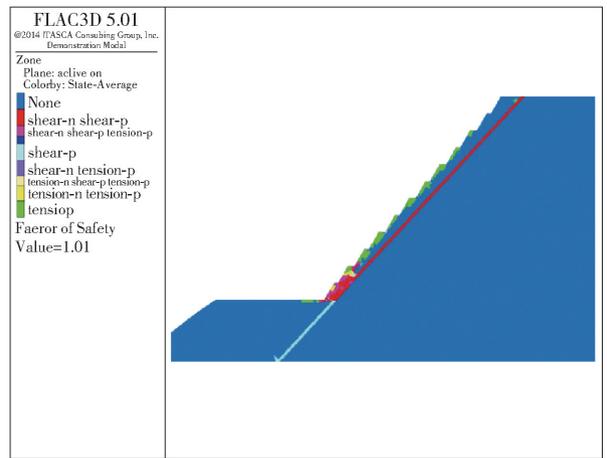
图8 抗滑桩支护前后终了边坡位移矢量图

2) 终了边坡塑性区分析

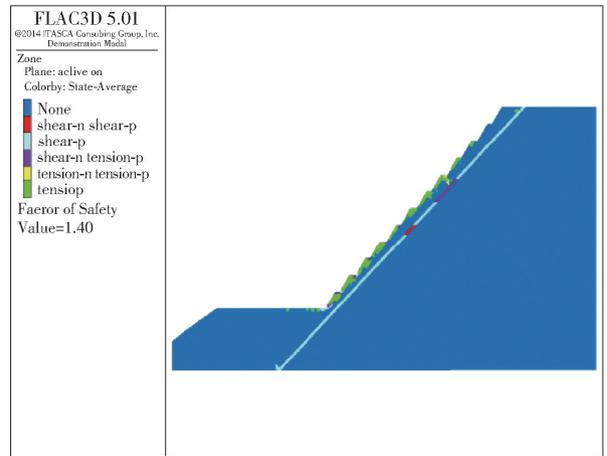
抗滑桩在进行支护前以及支护后,边坡存在的塑性区如图9所示。经过对支护以前以及支护以后的边坡塑性区对比不难发现,当抗滑桩进行支护以后,边坡存在的塑性区将会减少,在对比数据中,剪破坏体积变成 3 706. 77 m³,比没有支护时减少 49 159. 63 m³,张拉破坏的体积变成 2 822. 12 m³,比没有支护时减少 5 548. 29 m³。支护后原有的剪切力以及张拉产生的塑性都基本消失,只有抗滑桩附近位置有极少张拉的破坏存在。软夹层里也存在少量 shear,其他的剪切力和张拉的塑性在计算机的模拟里没有发生,并且非常容易从模拟中看到边坡中的塑区没有贯通。通过上述的分析可知,防滑桩在边坡中进行控制的效果非常出色,能够很好的加强边坡稳定的性能。

3) 终了边坡剪应变增量分析

防滑桩进行支护以前和支护以后的边坡剪切应力如图10所示。通过图10能够得出,在进行支护以后,剪切应力出现了很大的变化,剪切应力得到了很大程度的降低。在进行支护的前后,其最大的剪切应力的位置在坡顶软夹层,通过支护减轻了 3. 67 × 10⁻³,在坡脚处剪切应力减小而且没有和软夹层



(a) 支护前



(b) 支护后

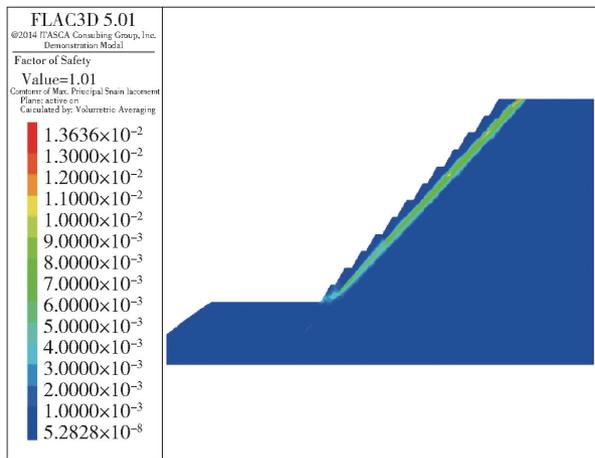
图9 抗滑桩支护前后终了边坡塑性区状态图

贯通,这表明防滑桩的支护作用减轻了边坡剪切应力,从而防止边坡由于剪切力的存在导致滑坡。

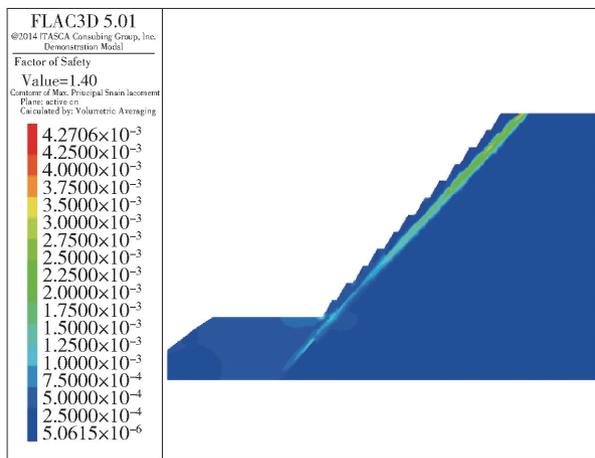
5 结论

本文通过河北省某露天的石灰岩工程为例,运用 FLAC 对工程矿山的坡面实施建模并进行计算,进行计算的主要目的是对边坡安全稳定性进行综合性分析,进而根据分析结果制定出对存在安全隐患的边坡进行相应的加固方案,为类似矿山的边坡稳定性分析提供参考。

(1) 边坡在自然工况下,随着工程对台阶不断地掘进,边坡上的岩体将会发生位移,此时边坡的安全性会逐步显现下降的发展趋势,当掘进到最后台阶时,边坡出现最大位移处于最上面的台阶顶的位置,两岩层的软夹层出现的位移最大,并且移动方向正好相反,岩体最大的剪切力通过软夹层延伸到坡脚,此时的塑性区域面积会加大,安全性的系数会降到最低点。受到软夹层影响,此时的边坡存在稳定性非常差的情况,非常容易出现滑坡、滑坡的事故,



(a) 支护前



(b) 支护后

图 10 抗滑桩支护前后边坡最大剪应变增量云图

岩体出现溃决性的破坏。

(2)把坡道进行支护以后的情况和支护以前的

情况进行对比不难发现,支护产生的效果非常好,它可以很好的控制其边坡产生塑性区域,并且边坡出现剪应变以及位移的情况会减小,边坡的安全上的系数得以提升,边坡稳定性得到增强。

[参考文献]

- [1] 吴仕伟,陈庆发,孟霖霖,等. 开采扰动作用下寒区矿山边坡稳定性研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(11): 125-130.
- [2] 黄志坚,张绍江,李永利,等. 露天灰岩矿在岩溶区域边坡爆破的振动规律研究[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(1): 76-78.
- [3] 冯德润,黄今,孙宇超,等. 露天矿边坡岩体强度参数影响因子敏感性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S2): 1017-1021, 1029.
- [4] 陈康力. 露天石灰岩矿顺层高边坡环境治理措施研究[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(2): 62-65.
- [5] 蒋魁,王帆,蒋兴中,等. 地震作用下矿山边坡永久位移非线性分析[J]. 中国矿业, 2020, 29(10): 152-157.
- [6] 金爱兵,陈帅军,赵安宇,等. 基于无人机摄影测量的露天矿边坡数值模拟[J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 255-264.
- [7] 岳西蒙,伍法权,沙鹏,等. 基于三维点云建模的矿山边坡稳定性分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(4): 89-95, 114.
- [8] 郭夏飞,张彬,李伟,等. 渗流作用下含断层边坡稳定性模拟分析[J]. 煤矿安全, 2021, 52(1): 226-231.
- [9] 陈毓. 露天矿外排土场分布对复合边坡稳定性影响机理[J]. 煤矿安全, 2020, 51(12): 288-291.

中国恩菲中标德兴铜矿采场铁运无人驾驶智能化改造项目

10月9日,中国恩菲中标江西铜业股份有限公司德兴铜矿采场铁运无人驾驶智能化改造项目。

项目拟采用公司核心专长的有轨运输无人驾驶技术、自主研发的自动装矿技术以及翻笼自动卸矿技术,并结合5G通信技术,对电机车、装矿站、卸载站及相关辅助系统进行智能化升级,从而打造5G通信网络、集控中心、安全保障系统、智能调度系统、生产设备信息系统及视频监控系统。项目建成后,能够实现现场操作、电机车编组运行、放矿和卸矿无人驾驶运输全流程的自动化、无人化,提升生产效率和经济性,同时提升运矿铁路的安全性,改善现场操作环境。该项目是中国恩菲围绕行业数字化、智能化转型需求,大力推进MIM+一体化解决方案关键技术落地的重要成果,也是中国五矿首批科创基金项目——“有轨运输无人驾驶技术”的工程实践。

本次中标对于公司提升品牌影响力、巩固在有轨运输无人驾驶技术领域的行业领先地位具有积极意义。公司将组织专业高效的团队,为业主提供专业、全面、优质的服务,确保项目建设目标顺利实现。