

抚顺西露天矿弱层强度衰减特性及边坡滑移大变形规律

陶 泽, 孙 闯, 金淳哲, 刘晓龙, 李 东

Characteristics of strength reduction in the weak layer and large-slip displacement of the cut slope on the Fushun west open-pit mining area

TAO Ze, SUN Chuang, JIN Chunzhe, LIU Xiaolong, and LI Dong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205016>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于离散元的含软弱夹层岩质边坡滑移机理分析

`\${suggestArticle.titleEn}`

范昊天, 孙少锐, 王亚山, 张纪星, 刘宝生 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(3): 12-17

地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应

Dynamic response of down-dip multi-weak-layer rock slope under earthquake

王来贵, 向丽, 赵娜, 刘向峰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 18-25

辽宁抚顺西露天矿南帮滑坡应力变化规律及影响因素分析

`\${suggestArticle.titleEn}`

滕超, 王雷, 刘宝华, 崔原, 贺鑫, 唐浩 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(2): 35-42

结构性土坡变形破坏数值模拟方法的对比分析

`\${suggestArticle.titleEn}`

汪儒鸿, 周海清, 彭国园 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(3): 47-52

川南红层区黄子树滑坡形成过程与运动特征

`\${suggestArticle.titleEn}`

王家柱, 葛华, 高延超, 徐伟, 白永健, 刘立勋 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(2): 9-17

土质滑坡地表倾斜变形特征与基于MEMS的倾斜变形监测技术初探

Evolution of deformation and monitoring techniques of surface tilt for soil landslides using MEMS technique

刘晓宇, 樊智勇, 吴疆 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 69-77



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205016

陶泽, 孙闯, 金淳哲, 等. 抚顺西露天矿弱层强度衰减特性及边坡滑移大变形规律 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 31-39.

TAO Ze, SUN Chuang, JIN Chunzhe, et al. Characteristics of strength reduction in the weak layer and large-slip displacement of the cut slope on the Fushun west open-pit mining area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 31-39.

抚顺西露天矿弱层强度衰减特性及 边坡滑移大变形规律

陶泽, 孙闯, 金淳哲, 刘晓龙, 李东

(辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 软弱夹层的强度衰减特性是顺层岩质边坡失稳的关键因素之一。选取抚顺西露天矿南帮边坡为研究对象, 通过 UDEC 数值模拟方法, 结合离散元理论, 建立南帮顺层边坡二维离散元模型, 开展南帮边坡弱层强度衰减特性及滑移大变形规律研究。通过不同围压下的三轴试验, 拟合得到弱层残余强度随时间衰减曲线, 并通过 FISH 语言实现数值计算过程中弱层强度随拟合方程进行衰减。数值模拟结果表明: 坡脚处最先产生变形, 随着开挖的不断进行, 弱层强度逐渐衰减, 坡顶后缘被拉裂, 原有应力平衡被破坏, 滑坡体沿弱层产生滑动。通过建立回填数值模型进行边坡稳定性得知, 采取压脚回填 100 m 以后, 边坡稳定系数得到了明显的提高, 边坡处于基本稳定状态。

关键词: 顺层边坡; 数值模拟; 离散元; 软弱夹层; 应变软化

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)03-0031-09

Characteristics of strength reduction in the weak layer and large-slip displacement of the cut slope on the Fushun west open-pit mining area

TAO Ze, SUN Chuang, JIN Chunzhe, LIU Xiaolong, LI Dong

(School of Civil Engineering, Liaoning University of Engineering and Technology, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: The strength attenuation characteristics of the weak interlayers are one of the key factors leading to instability of the bedding rock slopes. In this study, the Nanbang slope of Fushun west open-pit mine was selected as the research object. A two-dimensional discrete element model of the Nanbang bedding slope was established using the UDEC numerical simulation method in combination with the discrete element theory, and the strength attenuation characteristics and large deformation law of the weak layer were studied. The residual strength decay curve of the weak layer over time was obtained by fitting the results of triaxial tests conducted under different confining pressures, and the FISH language was used to implement the attenuation of weak layer strength during numerical calculations according to the fitting equation. The numerical simulation results showed that deformation first occurred at the toe of the slope. As excavation continued, the strength of the weak layer gradually decreased, resulting in the trailing edge of the slope top being pulled apart, and the original stress balance being destroyed. Eventually, the landslide body slides along the weak layer. By establishing a backfilling numerical model for slope stability, it was found that after backfilling with a presser foot for 100 m, the slope stability coefficient had significantly improved, and the

收稿日期: 2022-05-13; 修订日期: 2022-07-23

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1503101)

第一作者: 陶泽(1996-), 男, 硕士, 主要从事岩土力学数值模拟方面的研究工作。E-mail: 2627137567@qq.com

通讯作者: 孙闯(1983-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩石力学试验与数值计算方面的研究工作。E-mail: sunchuang88@163.com

slope was in a basically stable state.

Keywords: layered slope; numerical simulation; discrete element; weak interlayer; strain softened

0 引言

岩质边坡内广泛存在由原生沉积、层间错动等作用产生的软弱夹层,这些弱层往往具有较低的力学强度和变形模量,比硬脆性岩石在同等应力条件下更容易产生较大变形。由于含弱层岩体易在开挖中受到扰动而削弱其承载能力,弱层边坡破坏过程的本质是滑坡体力学参数的弱化过程^[1],因此开展含弱层岩质边坡的大变形规律研究,了解软弱夹层的力学特性和破坏机制十分必要,对工程建设具有重要意义^[2]。

近年来各地学者都对含弱层岩质边坡稳定性问题进行了深入的研究。SLOAN^[3]将经典塑性极限定理与有限元相结合,结合精确误差估计和自适应网格划分程序,验证了控制边坡破坏的主要因素是软弱夹层。孔祥墨等^[4]、张家勇等^[5]、成浩等^[6]、宋子岭等^[7]通过数值模拟方法,结合强度折减法来对边坡稳定分析进行评价。Xue 等^[8]对含倾斜软弱层玄武岩滑坡的破坏机制进行研究,得出结论开挖和倾角软弱层的存在是岩石滑动的主要贡献因素。张社荣等^[9]对不同岩体参数下含多层弱层边坡的变形机理进行研究,结果表明岩层倾角和坡脚的改变对边坡稳定性的影响较大。Li 等^[10]通过 GTS 软件研究双层软弱夹层对边坡变形的影响,结果表明下部软弱夹层为边坡潜在滑动面,采用锚索加固后显著提高了边坡的稳定性。Tan 等^[11]从细观角度揭示了泥质结构面的剪切力学行为和渐进破坏机理,研究表明随着夹层厚度的增加,结构面峰值抗剪强度降低,应力-位移曲线呈现较强的非线性特征。Zheng 等^[12]对不同倾角的非连续节理泥岩试样进行一系列不同频率的循环三轴载荷试验,试验表明裂隙沿节理向试样的两端扩展导致泥岩试样产生损伤。Yang 等^[13]通过试验和二维颗粒流程序对不同损伤程度泥岩试样的力学行为进行模拟,揭示泥岩试样在多级三轴压缩下的损伤演化机制。Yang 等^[14]、王来贵等^[15]、李鹏等^[16]对顺倾弱层边坡的动力响应问题进行了研究,结果表明顺倾多弱层对边坡的动力响应影响与弱层的分布位置有关,并借此解释地震作用下边坡失稳机制。

上述研究在含弱层边坡稳定性以及弱层强度的应变软化方面取得丰硕成果,但较少考虑将二者结合起来进行弱层强度衰减下的边坡变形规律研究;三轴试验能够较好地反映弱层岩样的应变软化特征,部分学者^[17-20]

通过三轴试验对软弱夹层的强度和破坏形式进行了研究,但针对的都是夹层厚度较小的工况,而且在破坏模式分析中将弱层简化为直线缺乏一定的合理性,在现场开采过程中,弱层的强度与厚度都是不可忽视的。因此,基于上述原因,本文以抚顺西露天矿南帮边坡 E400 剖面为例,根据现场勘探,采集岩样,一方面通过不同围压下的三轴试验,分析西露天矿的弱层强度应变软化特征,拟合得到弱层强度衰减曲线,通过理论推导确定弱层强度衰减参数计算公式;另一方面利用 fish 函数实现模拟过程中弱层强度随拟合方程进行强度衰减,基于 UDEC 应变软化模型研究弱层强度衰减下边坡的大变形规律,最后对南帮边坡提出回填压脚的治理方案,并通过不同回填台阶下的边坡安全系数进行验证。研究成果可对含弱层边坡综合治理提供参考。

1 工程概况及问题

1.1 工程地质

抚顺西露天矿坐落于中国东北部,北临浑河,南倚千台山,矿坑横跨抚顺市新抚、望花两大区,矿区地貌类型为起伏较大的丘陵区。历经百年开采,矿区形成了东西跨度为 6.6 km,南北跨度为 2.2 km,最大开采深度为 420 m 的大型深凹露天煤矿^[21-22]。

根据地质资料,南帮边坡属于典型的顺层边坡构造,矿坑内各部分开挖程度不同,故上覆凝灰岩厚度有较大差别。在开挖作用下,表层土被剥离,玄武岩层逐渐暴露出来。根据钻探得知,弱层贯穿整个玄武岩,在其内部互相错动,将边坡切割为多个块体。南帮地质构造复杂,开挖卸荷强烈,受矿区主要断裂带影响,南帮边坡纵横断层、特殊背斜与褶皱较多,中部有东西断层构造和北西断层构造,边坡两侧边界多节理和南北向小断层,落差极小,有时仅有 1~2 m。玄武岩作为南帮边坡的主要岩层,由于其与下伏花岗片麻岩形成的不整合接触面的存在,在切坡及南侧边坡处均有出露。按照风化梯度,可将玄武岩分为未风化、弱风化和强风化三类,其中强风化玄武岩主要分布于南帮西侧,基岩层下 20 m 左右处,外部表现为浅黄色或锈红色,岩体内部裂隙较为发育,易于形成块体结构,由于地质构造形成的三组岩石楔形体易发生近 SN 向倾角 45°节理面的滑落,导致小规模局部滑坡现象的产生。部分风化玄武岩内部节理发育,节理面表现为黄褐色,其强度主要受到

节理间填充黏土所控制。未风化玄武岩主要分布于南帮玄武岩之间, 多为黑色结晶质地, 节理呈 30°摩擦角发育, 内部包含有 5 m 左右的软弱夹层, 其中软弱夹层在南北向贯通, 坡底处赋存数条次生软弱夹层, 对南帮边坡稳定性具有较大威胁。

1.2 南帮边坡滑移变形特征

西露天矿南帮边坡属于典型的顺层岩质边坡, 南帮矿区开采巨大, 弱层结构面在不断地开挖卸荷中逐渐发育完全。边坡应力重分布较为明显, 边坡内部裂隙结构面得到充分扩展, 加上长时间的蠕变作用下, 南帮坡体顶部形成一个巨大的滑坡体(图 1)。滑坡体位于 E1200 剖面与 W700 剖面之间, 逐渐显露于千台山后缘位置。滑坡体上缘处已经产生明显裂缝, 宏观破坏如图 1 所示。预估滑坡体积可达 $1\times10^8\text{ m}^3$ 。由于滑坡体范围广、倾角大, 其破坏形式为沿着弱层方向进行滑移, 在坡脚发生剪切破坏。后经治理边坡变形速度趋于稳定, 但仍有潜在滑移风险(图 2)。



图 1 抚顺西露天矿全景图
Fig. 1 Aerial panoramic view of Fushun west open-pit mine



图 2 千台山滑坡裂缝
Fig. 2 Development of landslide cracks in Qiantai Mountain

2 弱层泥岩强度衰减特性

2.1 基本力学试验

本次试验仪器采用英国 GDS 流变仪(图 3), 可以进

行静态三轴, 动态三轴, 剪切试验, 共振柱试验等一系列试验。其三轴系统不仅可以通过自适应控制固件来提高测试精度, 还可以用户定义的加载波形来达到模拟特定条件的目的。

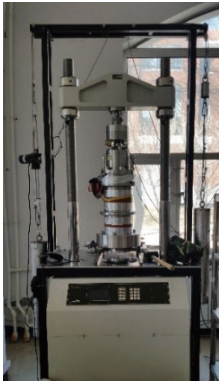


图 3 GDS 高精度软岩流变仪
Fig. 3 GDS high precision soft rock rheometer

试验所用岩石试样取自抚顺西露天矿南帮边坡 E400 剖面弱层, 在现场取得岩样后, 立即使用保鲜膜密封保存, 运送至实验室后, 在实验室进行加工, 通过岩石切割机沿垂直层理方面钻芯取样, 进行两端磨平处理, 处理后的试件如图 4 所示。



图 4 岩石试样
Fig. 4 Rock samples

三轴压缩试验下试样破坏形式如图 5 所示。由图 5 可知, 三轴压缩条件, 试样的破坏形式为与轴向呈

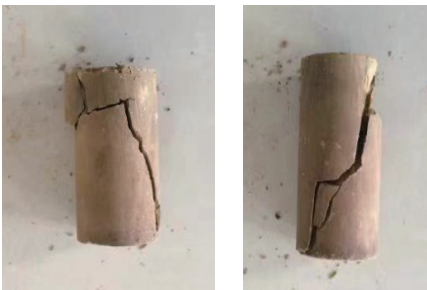


图 5 常规三轴压缩试验破坏岩样
Fig. 5 Damaged rock samples in conventional triaxial compression test

一定夹角的斜剪破坏。通过三轴试验得到的泥岩应力应变曲线如图 6 所示。试验围压分别设置为 0 MPa、1 MPa、3 MPa、7 MPa、10 MPa 5 个等级, 对比分析各围压条件下的试验曲线, 可以发现在不同围压条件下, 弱层的残余强度和峰值强度随围压的提高均有一定程度的提高。围压达到 10 MPa 时, 试件表现出明显的弹塑性特征。

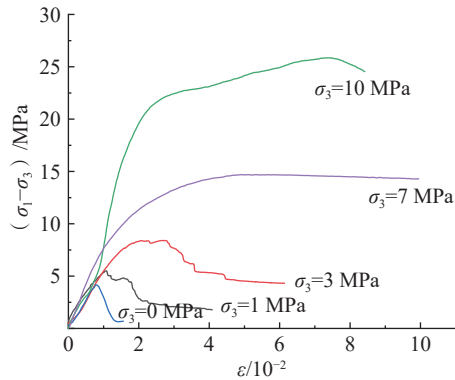


图 6 不同围压下应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain relationship curves under different confining pressures

通过对试验数据进行拟合得到试件的峰值强度与残余强度曲线如图 7 所示。拟合参数的 R^2 均在 0.95 以上, 说明具有较高的拟合精度。

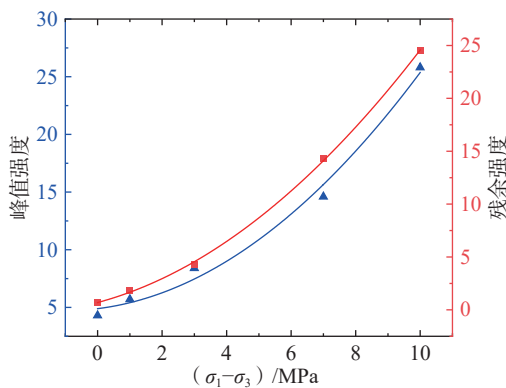


图 7 峰值强度与残余强度拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of peak and residual intensities

通过非线性拟合得到的弱层峰值强度与残余强度拟合方程如下:

$$Y = ax^2 + bx + c$$

拟合得到的 R^2 均在 0.95 以上, 具有较高的拟合精度。拟合参数如表 1 所示。

2.2 西露天边坡弱层强度衰减理论

本文采用塑性应变软化模型进行弱层强度计算时,

表 1 弱层强度拟合参数

Table 1 Fitting parameters for weak layer strength

目标参数	a	b	c	R^2
残余强度	0.157 36	0.814 46	0.693 1	0.999 69
峰值强度	0.170 03	0.347 14	4.895 17	0.991 55

核心在于构建弱化参数与塑性应变软化模型间的数学联系, 岩石弱化参数(η)的表达式如下:

$$f(\sigma_1, \sigma_3, \eta) = 0 \quad (1)$$

式中: σ_1 ——最大主应力/kPa;

σ_3 ——最小主应力/kPa。

考虑 η 后, Mohr-Coulomb 屈服准则可改写成下式:

$$f(\sigma_1, \sigma_3, \eta) = \sigma_1 - K_\phi(\eta)\sigma_3 - \sigma_c \quad (2)$$

式中: σ_c ——岩石单轴抗压强度。

其中,

$$\sigma_c = 2c(\eta)\sqrt{K_\phi(\eta)} \quad (3)$$

$$K_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4)$$

基于 Mohr-Coulomb 的应变软化模型中, 假设模型中的 c 、 ϕ 随软 η 线性衰减, 则应变软化表达式为:

$$\omega(\eta) = \begin{cases} \omega^p - \frac{\omega^p - \omega^r}{\eta^*} \eta, & 0 < \eta < \eta^* \\ \omega^r, & \eta \geq \eta^* \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω^p ——岩石峰值强度参数;

ω^r ——岩石残余强度参数;

η^* ——岩石临界软化参数值。

岩石的软化模量(M)可由岩石应力-应变曲线峰后阶段的斜率表示, 如图 8 所示^[23]。

对于 η^* , 可由岩石的塑性剪切应变进行表征, 可定义为岩石最大主塑性应变与最小主塑性应变的差值, 表达式为^[24]:

$$\gamma^p = \eta^* = \varepsilon_1^p - \varepsilon_3^p \quad (6)$$

式中: γ^p ——岩石的塑性剪切应变;

ε_1^p ——岩石的最大塑性应变;

ε_3^p ——岩石的最小塑性应变。

最大主塑性应变可表示为:

$$\varepsilon_1^p = \varepsilon_1^{\text{peak}, e} + \varepsilon_1^{\Delta, \text{drop}} - \varepsilon_1^e \quad (7)$$

式中: $\varepsilon_1^{\text{peak}, e}$ ——岩石在达到峰值强度弹性阶段产生的最大主应变;

$\varepsilon_1^{\Delta, \text{drop}}$ ——岩石在达到峰值强度后进入软化阶段的应变;

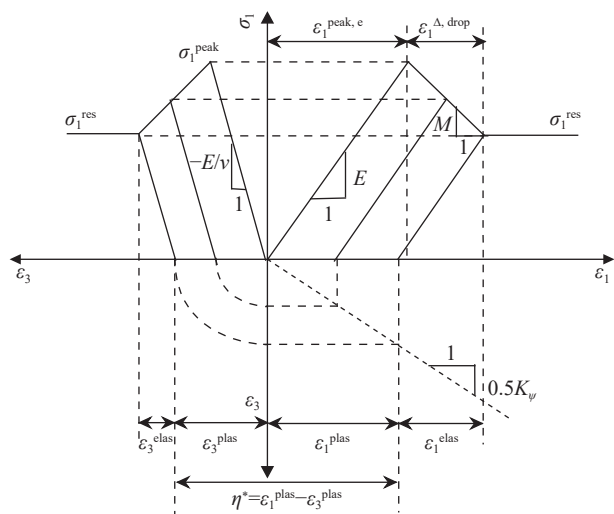


图 8 岩石峰后变形简化曲线

Fig. 8 Simplified curve of post-peak deformation of rocks

ε_1^e ——岩石弹性阶段产生的最大主应变。
当岩石所受围压 σ_3 为某一定值时, 各应变参数可通过下式求得:

$$\begin{cases} \varepsilon_1^{\text{peak}, e} = \frac{\sigma_1^p(\sigma_3)}{E} \\ \varepsilon_1^{\text{drop}} = \frac{\sigma_1^p(\sigma_3) - \sigma_1^r(\sigma_3)}{-M} \\ \varepsilon_1^e = \frac{\sigma_1^r(\sigma_3)}{E} \end{cases} \quad (8)$$

式中: σ_1^p ——岩石峰值强度下的主应力;
 σ_1^r ——岩石残余阶段下的主应力。
针对岩石受力变形过程中的剪胀行为, 岩石的剪胀角可根据下式表示:

$$\sin \psi = \frac{\dot{\varepsilon}_1^p + 2\dot{\varepsilon}_3^p}{-\dot{\varepsilon}_1^p + 2\dot{\varepsilon}_3^p} \quad (9)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_1^p$ 、 $\dot{\varepsilon}_3^p$ ——塑性主应变速率。

式(2)(9)可变换为:

$$\dot{\varepsilon}_3^p = -\frac{1}{2} N_\psi \cdot \dot{\varepsilon}_1^p \quad (10)$$

其中,

$$N_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (11)$$

岩石在受静力作用时, 剪胀角也为恒定值, 此时 ε_3^p 与 ε_1^p 的关系可表示为:

$$\varepsilon_3^p = -\frac{1}{2} N_\psi \cdot \varepsilon_1^p \quad (12)$$

联立上述式(6)—(8)以及式(12), 基于岩石剪胀角和围压的塑性参数的计算式为:

$$\eta^* = \frac{\sigma_1^p(\sigma_3) - \sigma_1^r(\sigma_3)}{E} \frac{\xi + 1}{\xi} \left(1 + \frac{N_\psi}{2}\right) \quad (13)$$

其中,

$$\xi = -M/E \quad (14)$$

3 南帮滑移大变形规律

3.1 数值模型

西露天矿南帮边坡为非工作帮, 选取南帮典型剖面 E400 作为分析对象, 根据辽宁第十地质大队提供的地质资料来确定边坡地形、岩层分布以及地质构造。图 9 为 E400 剖面数值计算模型岩性分布以及主要弱层分布, 横向为 2 000 m, 纵向高程 900 m, 数值计算模型两侧施加 x 向约束, 底部施加 x 、 y 向约束。模型采用 Mohr-Coulomb 本构进行计算。由于软弱夹层是控制边坡破坏的主要因素, 且弱层在边坡变形过程中的强度具有时效性, 具体表现为随时间不断劣化的特征, 因此模型中弱层采用 Mohr-Coulomb 应变软化模型, 通过 fish 函数来实现弱层强度随拟合方程进行强度衰减, 模拟所采用参数如表 2、表 3 所示。

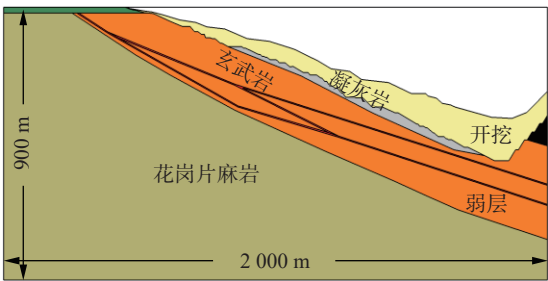


图 9 E400 剖面数值模型

Fig. 9 Numerical Model of cross-section diagram for E400 Section

表 2 岩体力学参数

Table 2 Summary table of rock mechanical parameters

岩性	密度 (/kg·m ⁻³)	弹性模量 (/GPa)	泊松比	抗剪断强度	
				内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
玄武岩	2 800	7	0.14	42	0.300
花岗岩片麻岩	2 800	8	0.2	45	0.400
弱层	2 300	0.1	0.4	16.9	0.075
煤层	1 300	1.2	0.24	35	0.140
油母页岩	2 300	3.4	0.26	35	0.200
断层	2 300	0.1	0.4	16.9	0.075
杂填土	1 800	0.1	0.4	18	0.100
凝灰岩	2 600	8	0.25	39	0.250

3.2 数值计算结果与分析

根据试算得到与实际较为符合的初始地应力平衡,

表 3 节理力学参数

Table 3 Summary table of joint mechanical parameters

岩性	刚度参数		抗剪断强度	
	法向刚度 /(GPa·m ⁻¹)	切向刚度 /(GPa·m ⁻¹)	节理面 摩擦角/(°)	节理面黏聚力 /kPa
玄武岩	3.33	3.33	25	90
花岗片麻岩	5.93	5.93	45	150
弱层	1.81	1.81	20	10
煤层	2.43	2.43	25	40
油母页岩	2.77	2.77	25	40
断层	1.81	1.81	20	10
凝灰岩	3.67	3.67	28	100

然后获得分级开挖下的边坡的受力特征与变形特征。根据边坡的位移云图可知,位移主要发生在玄武岩层内部的软弱夹层附近。图 10(a)(b)为第一级开挖下边坡位移云图,由图可知,随着开挖的进行,坡顶未产生位移,最大位移发生在坡角处,达到 1.58 m,坡脚处出现应力集中,水平位移较小,弱层强度达到峰值。在第二级开挖下,如图 10(c)(d)坡脚弱层在层间错动下出露,边坡下部位移加剧,最大位移增至 5.97 m,裂缝不断从坡脚向边坡上部进行扩展,边坡上部位移开始增大,弱层强度发生衰减,滑坡体整体向下滑动趋势增加。如图 10(e)(f)为第三级开挖下的位移云图,边坡开挖完成,弱层强度进一步衰减,衰减至残余强度,滑坡体发育完全,弱层发生剪切破坏,坡角处最大位移可达 10.8 m,滑坡体整体沿弱层向下发生滑动。

综上可知南帮矿区多年开采,导致南帮边坡临空面增大,坡体应力场二次分布,坡体表层形成卸荷裂隙,坡脚处位移增大,弱层逐渐达到峰值强度;随着开采深度的不断增加,应力进一步释放,卸荷裂隙得到充分发展,节理面时效变形显著,弱层发生剪切错动,弱层强度逐渐衰减,变形增大,坡顶出现大量张拉裂缝,边坡底部有明显隆起。当弱层衰减至残余强度,边坡变形进一步增大,剪切破坏面逐渐贯通,滑坡面形成,滑坡体沿滑坡面向下开始滑动。滑坡主要是沿弱层节理面进行滑动,应力集中在部分节理和弱层附近,也说明南帮边坡的主要破坏形式是由局部向整体演化的渐进式破坏。

4 南帮滑移大变形治理方案

由于南帮边坡高陡,且滑坡体体积巨大,很难对边坡进行有效治理。综合分析比选最有效且可行的方法是采用压脚回填控制来边坡进一步变形。

为了对压脚回填下边坡的稳定性进行分析,并对回填不同程度南北帮边坡变形的差异进行分析,建立了矿

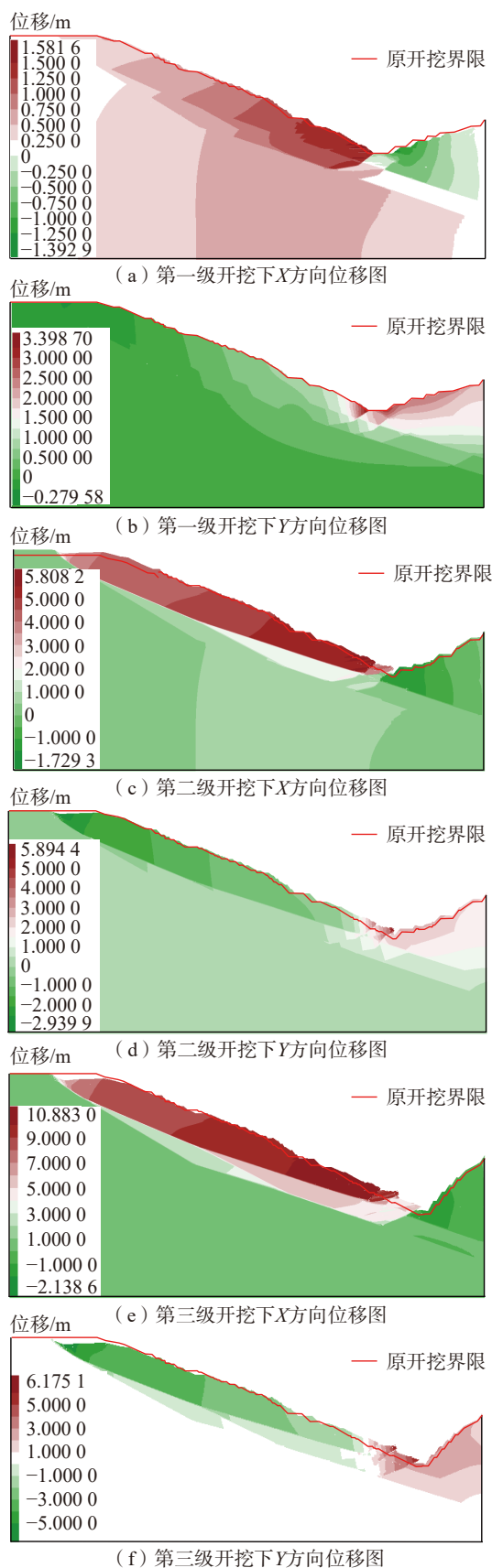


图 10 各级开挖变形图

Fig. 10 Deformation diagram for each level of excavation

区坑底回填数值计算模型对边坡的稳定性进行分析。数值计算模型如图 11 所示。

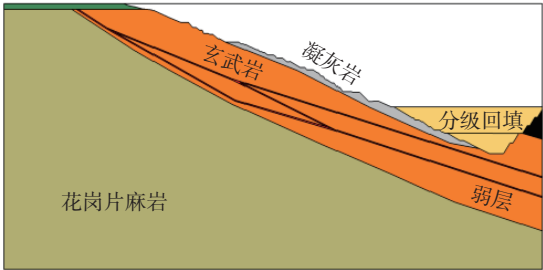


图 11 南帮回填数值模型

Fig. 11 Numerical model of cross-section diagram for Nanbang backfilling

根据《滑坡防治工程勘察规范》(GB/T 32864—2016)^[25-26], 滑坡稳定状态应根据表 4 中稳定系数确定。

表 4 滑坡稳定状态划分

Table 4 Division of landslide stable state

滑坡稳定系数	$F < 1.00$	$1.00 \leq F < 1.05$	$1.05 \leq F < 1.15$	$F \geq 1.15$
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

具体工况是采用对矿坑底部整体回填, 以 50 m 为一个台阶高度、80 m 为一个台阶宽度的方式进行台阶式回填。分别计算两种回填下边坡的稳定性:

工况 1: 回填高度至-100 m 水平。

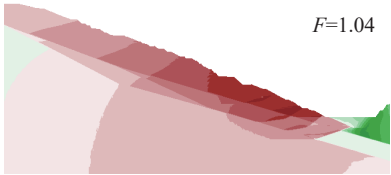
工况 2: 回填高度至-50 m 水平。

南帮边坡在当前工况条件下安全系数差异比较大, 且整体偏低, 结合现场踏勘分析, 该处区域上覆凝灰岩较厚且风化程度较严重, 容易沿弱层夹层发生滑坡。做回填处理后, 根据回填后的边坡位移云图(图 12)可知, 回填至-100 m 时, 边坡上部位移得到了明显降低, 计算得到边坡安全系数为 1.04, 边坡处于欠稳定状态。回填至-50 m 后, 坡角处变形进一步降低, 有效压住坡脚且减少凝灰岩出露面积, 不再沿边坡剪出, 边坡安全系数达到 1.12, 基本消除了坡脚的应力集中效应, 提高了南帮边坡的稳定性, 边坡达到基本稳定状态。

5 结论

本文通过 UDEC 离散元模拟, 推导弱层强度参数确定方法, 在顺层岩质边坡稳定性分析过程中考虑弱层强度衰减特性, 得到以下几点结论:

(1)分析试验结果可知: 弱层试样在围岩压力较低时在强度衰减幅度较大, 最大达到了 83.7%, 但仍有一



(a) 南帮边坡回填至-100 m 位移图



(b) 南帮边坡回填至-50 m 位移图

图 12 南帮回填位移图

Fig. 12 Displacement diagram of Nanbang backfill

定的残余强度, 围压的增大至 10 MPa 时, 试样表现出明显的弹塑性特征。

(2)数值模拟结果表明, 南帮边坡的破坏属于由局部向整体演化的渐进破坏。随着开挖卸荷的进行, 弱层强度达到峰值强度后逐渐衰减, 坡脚处最先产生破坏, 并沿弱层发展至坡顶, 坡顶后缘被拉裂, 形成滑坡体。

(3)对抚顺西露天矿南帮边坡采取压脚回填 100 m 以后, 边坡顶部位移显著减少, 坡脚处剪切破坏消失, 边坡安全系数达到 1.12, 边坡处于基本稳定状态。

参考文献(References):

[1] 邹宗兴, 唐辉明, 熊承仁, 等. 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2222-2231. [ZOU Zongxing, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Geomechanical model of progressive failure for large consequent bedding rockslide and its stability analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2222-2231. (in Chinese with English abstract)]

[2] 张泽林, 王涛, 吴树仁, 等. 泥岩中软弱夹层的剪切力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 713-724. [ZHANG Zelin, WANG Tao, WU Shuren, et al. Study on shear mechanical properties of mudstone with weak intercalation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(4): 713-724. (in Chinese with English abstract)]

[3] SLOAN S W. Geotechnical stability analysis [J]. Géotechnique, 2013, 63(7): 531-571.

[4] 孔祥墨, 李滨, 贺凯, 等. 柱状岩体崩塌动力特征与破碎规律——以重庆甑子岩崩塌为例 [J]. 中国地质灾害

- 与防治学报, 2022, 33(5): 1–10. [KONG Xiangzhao, LI Bin, HE Kai, et al. Dynamic characteristics and fragmentation evolution of columnar rockfall: A case study of the Zengziyan rockfall in Chongqing, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 1–10. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张家勇, 邹银先, 杨大山. 基于PFC3D的鱼鳅坡滑坡运动过程分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(4): 33–39. [ZHANG Jiayong, ZOU Yinxian, YANG Dashan. Analysis of Yuqiupo landslide motion process based on PFC3D [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(4): 33–39. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 成浩, 韩培锋, 苏有文. 含石量和坡度对土石混合体崩塌运动规律的影响 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 11–23. [CHENG Hao, HAN Peifeng, SU Youwen. Influence of rock content and slope on collapse in soil-rock accumulation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 11–23. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 宋子岭, 杨添, 赵立春. 含多层软弱夹层的顺向岩质边坡稳定性评价方法对比分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(2): 20–25. [SONG Ziling, YANG Tian, ZHAO Lichun. Application of combination algorithm in stability analysis of rock slope with contains multilayer weak bedrock layers [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(2): 20–25. (in Chinese with English abstract)]
- [8] XUE Demin, LI Tianbin, ZHANG Shuai, et al. Failure mechanism and stabilization of a basalt rock slide with weak layers [J]. *Engineering Geology*, 2018, 233: 213–224.
- [9] 张社荣, 谭尧升, 王超, 等. 多层软弱夹层边坡岩体破坏机制与稳定性研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1695–1702. [ZHANG Sherong, TAN Yaosheng, WANG Chao, et al. Research on deformation failure mechanism and stability of slope rock mass containing multi-weak interlayers [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1695–1702. (in Chinese with English abstract)]
- [10] LI Jinglong, ZHANG Bo, SUI Bin. Stability analysis of rock slope with multilayer weak interlayer [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1–9.
- [11] TAN Xin, REN Yakun, LI Tenglong, et al. *In-situ* direct shear test and numerical simulation of slate structural planes with thick muddy interlayer along bedding slope [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 143: 104791.
- [12] ZHENG Qingsong, LIU Enlong, YU Di, et al. Fatigue and damage properties of non-consecutive jointed mudstone samples subjected to cyclic triaxial loading [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(5): 2467–2481.
- [13] YANG Shengqi, TIAN Wenling, JING Hongwen, et al. Deformation and damage failure behavior of mudstone specimens under single-stage and multi-stage triaxial compression [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(3): 673–689.
- [14] YANG Bing, HOU Jiangrong, LIU Yifei, et al. Dynamic response and failure characteristics of slope with weak interlayer under action of near-fault ground motion [J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021: 1–18.
- [15] 王来贵, 向丽, 赵娜, 等. 地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(6): 18–25. [WANG Laigui, XIANG Li, ZHAO Na, et al. Dynamic response of down-dip multi-weak-layer rock slope under earthquake [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 18–25. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李鹏, 苏生瑞, 王闫超, 等. 含软弱层岩质边坡的动力响应研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 365–370. [LI Peng, SU Shengrui, WANG Yanchao, et al. Research on dynamic response of rock slope with weak layer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup 1): 365–370. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 皮晓清, 李亮, 唐高朋, 等. 基于有限元极限上限法的含软弱夹层边坡稳定性分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(2): 351–358. [PI Xiaoping, LI Liang, TANG Gaopeng, et al. Stability analysis for soil slopes with weak interlayers using the finite element upper bound limit analysis [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(2): 351–358. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 杨令强, 练继建, 陈祖坪. 软弱夹层的接触问题与强度问题探讨 [J]. 水利水电技术, 2002, 33(6): 17–19. [YANG Lingqiang, LIAN Jijian, CHEN Zuping. Discussion on contact problem and strength problem of weak interlayer [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33(6): 17–19. (in Chinese)]
- [19] 吕布, 杨之俊, 韦秀东, 等. 坝基不同倾角软弱夹层的破坏模式及D-C模型参数研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 189–192. [LU Bu, YANG Zhijun, WEI Xiudong, et al. Failure modes and constitutive model for weak interlayer of dam foundation with different inclination angles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup 1): 189–192. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 郑青松, 刘恩龙, 刘明星. 三轴试验下结构面倾角对制备岩样力学特性的影响 [J]. 岩土力学, 2019, 40(5):

- 1854 – 1861. [ZHENG Qingsong, LIU Enlong, LIU Mingxing. Influence of dip angle of structural planes on mechanical properties of artificial rock samples under triaxial test conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1854 – 1861. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 李东. 抚顺西露天矿南帮高陡弱层边坡变形规律研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021. [LI Dong. Study on deformation law of high, steep and weak layer slope in the south side of Fushun west open pit mine [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 刘传正, 崔原, 陈春利, 等. 辽宁抚顺西露天矿南帮滑坡成因 [J]. 地质通报, 2022, 41(5): 713 – 726. [LIU Chuansheng, CUI Yuan, CHEN Chunli, et al. Research on the south side landslide at west open-pit coal mine in Fushun City, Liaoning Province of China [J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(5): 713 – 726. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 孙闯, 张向东, 张涛, 等. 深部大跨度泥质顶板剪切冒落失稳区预测研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(1): 23 – 27. [SUN Chuang, ZHANG Xiangdong, ZHANG Tao, et al. Prediction on shear caving instability region of deep and large span muddy roof [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(1): 23 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 孙闯, 张树光, 贾宝新, 等. 花岗岩峰后力学特性试验与模型研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 847 – 852. [SUN Chuang, ZHANG Shuguang, JIA Baoxin, et al. Physical and numerical model tests on post-peak mechanical properties of granite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 847 – 852. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 滑坡防治工程勘查规范 GB/T 32864-2016 [S], 2016. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Specification of geological investigation for landslide stabilization GB/T 32864-2016 [S], 2016. (in Chinese)]
- [26] 汪美华, 李勇, 裴叶青. 甘肃临夏盆地韩集北山滑坡群致灾特征与稳定性评价 [J]. 地质通报, 2023, 42(2/3): 460 – 468. [WANG Meihua, LI Yong, PEI Yeqing. Disaster characteristics and stability evaluation of the Hanjin Beishan landslide group in Linxia Basin, Gansu Province [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(2/3): 460 – 468. (in Chinese with English abstract)]