

姜立春,王格格.凹陷露天矿内排土护坡体破坏模式及关键参数[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(1):9-18.
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.01.002

JIANG L C, WANG G G. Failure Mode and Key Parameters of Slope Protection by Dumping in Sunken Open Pit Mine [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(1):9-18. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.01.002

凹陷露天矿内排土护坡体破坏模式及关键参数

姜立春^{1*}, 王格格^{2,3}

(1.华南理工大学 土木与交通学院,广东 广州 510640;

2.华南理工大学 安全科学与工程研究所,广东 广州 510640;3.广东省安全生产科技协同创新中心,广东 广州 510640)

摘要:根据瑞典圆弧法积分求解原理,结合护坡体结构特征,判断护坡体破坏模式并推导其安全系数表达式,分析台阶高度 h 、平台宽度 d 以及台阶坡面角 β 等对护坡体安全系数 F_s 的影响规律及影响程度.通过护坡体数值模拟结果,分析护坡体的位移变化规律以及潜在滑移面特征,并判断其破坏特征.研究表明:护坡体的破坏模式是以土体-块石交界面为底界面,以土体圆弧为侧界面的顺层圆弧滑动.随着护坡体台阶高度与台阶坡面角增大,其安全系数减小,最大位移量与应变量增大;随着护坡体平台宽度增大,其安全系数增大,最大位移量与应变量减小.台阶坡面角是影响护坡体安全系数与最大位移量的关键结构参数.

关键词:凹陷露天矿;内排土;护坡体;结构参数;数值模拟

中图分类号:TD77+1

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)01-0009-10

Failure Mode and Key Parameters of Slope Protection by Dumping in Sunken Open Pit Mine

JIANG Lichun¹, WANG Gege^{2,3}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Institute of Safety Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Provincial Science and Technology Collaborative Innovation Center for Work Safety, Guangzhou 510640, China)

Abstract: According to the integral solution principle of Swedish arc method, combined with the structural characteristics of slope protection body, the failure mode of slope protection body is judged and its safety factor expression is deduced. The influence law and degree of structural parameters of slope protection body, such as step height h , platform width d and step slope angle β , on the safety factor F_s of slope protection body are analyzed. Based on the numerical simulation results of slope protection, the displacement variation law and potential slip surface characteristics of slope protection are analyzed, and the failure characteristics are judged. Results show that the failure mode of slope protection body is bedding circular arc sliding with the interface between soil and rock as the bottom interface and the soil circular arc as the side interface. With the increase of step height and slope angle, the safety factor decreases, and the maximum displacement and strain increase. With the increase of platform width, the safety factor increases and the maximum displacement and strain

收稿日期:2021-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974135)

*通信作者,E-mail: ginger@scut.edu.cn

decrease. Step slope angle is the key structural parameter that affects the safety factor and maximum displacement of slope protection.

Keywords: sunken open pit mine; inner dumping; slope protection; structural parameters; numerical simulation

边坡稳定一直以来都是矿山追求的目标^[1-2].内排土场是在露天矿生产过程中为减少土地资源占用、减少废土运输成本而形成的排土场形式.在滑坡灾害区域内排土,利用废土的重力分量维护边坡体稳定,是一种经济高效的滑坡治理模式.为提高滑坡治理工程中内排土护坡体结构的稳定性与经济性,有必要开展凹陷露天矿内排土护坡体关键结构参数研究.

对于凹陷露天矿内排土场,国内外学者已开展多种形式的研究^[3-5],主要采用数值模拟与室内试验等方法,分析内排土场结构因素或外部因素对其稳定性或空间利用率的影响^[6-8].丁鑫品等^[9]通过分析边坡剪应变增量、塑性区分布及位移特征,研究顺倾基底高段排土场边坡的变形失稳模式;徐晓惠等^[10]采用ANSYS软件模拟内排压脚边坡的边坡角及边坡形状与其稳定性的关系;周永利等^[11]分析内排土场堆叠至不同高度时边坡的稳定性及其潜在滑坡模式;宋子岭等^[12]基于刚体极限平衡法和强度折减理论,研究倾斜基底对内排土场边坡稳定性的影响;梁冰等^[13]利用相似模拟试验和数字散斑观测方法,研究抛掷爆破动载作用下内排土场边坡的变形规律;刘玉凤等^[14]结合水文地质条件分析、理论力学分析与试验研究结果,分析地下水对露天矿内排土场边坡稳定性的影响;王东等^[15]为解决内排土空间利用难题,研究采场工作线布置、边坡角、内排土场边坡角及基底倾角对排土线布置的影响规律;周伟等^[16]基于内排台阶的发展规律,利用三维数值模拟分析压帮内排对端帮稳定性的增效效果.

总的来说,国内外工程界鲜有关于护坡体治理滑坡的相关研究.结合某凹陷露天铁矿山滑坡治理工程,以滑坡治理实践中涉及的护坡体、挡土坝等结构为研究对象,建立计算模型,基于极限平衡法与强度折减理论,分析内排土护坡体的破坏模式,揭示护坡体结构参数变化对其安全稳定性的影响,评价护坡体的滑坡治理效果.

1 护坡体稳定影响因素分析

1.1 滑坡情况

某凹陷露天铁矿山滑坡位于采坑下盘东北角,滑坡体上部端口标高为+145 m,下部最低标高为+70 m,涉及8个台阶,坡度角大于45°,体积最大部分集中在+120~+90 m中段,呈“梨”型分布,滑坡体垂直边坡方向深度约为4~6 m,体积约为17.0万~20.0万m³.滑移方向垂直边坡体,滑体成分主要为白灰岩、红色砂岩(见图1).

滑坡体已经处于失稳滑动状态,在暴雨的作用下,滑坡体将继续发育,蓄积势能将进一步释放,影响+60~+20 m中段矿体的开采.

1.2 滑坡区域治理方案

为有效消除滑坡可能产生的潜在安全隐患,在采坑+60 m水平治理区域的无矿天窗区开挖原位挡土坝,由上至下逐级清理滑坡体,开挖基坑,利用剥离废土渣在基坑内排土,反压边坡体,利用护坡体的重力分量维护边坡稳定.图2所示为护坡体治理滑坡技术中的护坡体示意图,采用从坡脚延伸至坡顶的覆盖式排土方式,形成排土台阶.护坡体物料通过分层碾压的方式进行叠加堆放,同时将坚硬的大块岩石堆置在内排土场的最低一个台阶下,使



图1 滑坡体实景

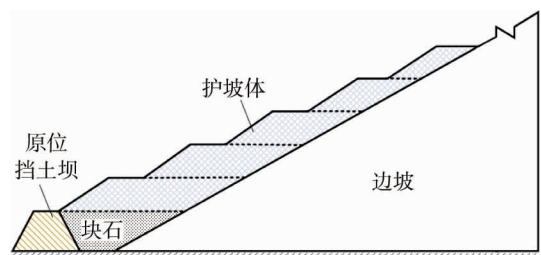


图2 护坡体

其反压坡脚以稳固基底.

1.3 护坡体稳定安全系数

工程实例中,大多数挡土墙边坡失稳的滑动面在挡土墙墙脚以下^[17].在某凹陷露天铁矿山内,原位挡土坝为天然岩土体开挖而成,具有较致密的结构与较强的抗滑移能力,故假定护坡体失稳的圆弧滑动面在护坡体坡脚以下且经过坡脚,形式为坡脚圆,如图 3 所示.图 3a 中 $O(a, b)$ 为滑动面圆弧的圆心, r 为圆弧半径.利用瑞典圆弧法的积分法求解护坡体安全系数^[18-20],将滑动体划分为水平方向的积分微元,如图 3b 所示,图 3b 中 $O(a, b)$, r 含义与图 3a 相同, $b(x)$ 为微元长度, dy 为微元高度, dN 为微元所受反力, dT 为微元所受摩擦力.

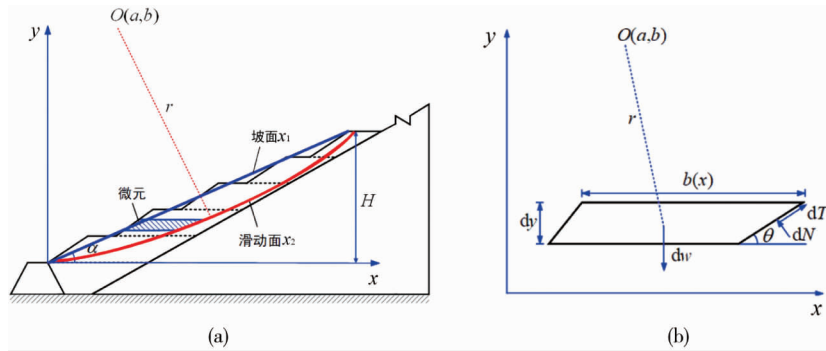


图 3 计算模型

图 3a 中连接坡顶和坡脚的直线代表简化后的护坡体坡面,直线下方的曲线代表圆弧滑动面,利用数学方程可将坡面和滑动面表示为

$$x_1 = \frac{y}{\tan \alpha}; \quad (1)$$

$$x_2 = a + \sqrt{r^2 - (y - b)^2}. \quad (2)$$

式中: α 为简化后的护坡体坡面角; a, b 为圆心 O 的 x, y 方向坐标; r 为滑动圆弧半径.

令微元滑动面与水平线夹角为 θ ,则存在如下关系:

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{r^2 - (y - b)^2}}{r}; \quad (3)$$

$$\cos \theta = \frac{b - y}{r}. \quad (4)$$

在护坡体高度方向上对微元进行积分,下滑力矩 M_s 为

$$M_s = \int_0^H \left(\frac{x_1 + x_2}{2} - a \right) dw = \gamma \frac{3a \tan \alpha H^2 - H^3}{6 \tan^2 \alpha} + \gamma \frac{H(r^2 - a^2)}{2} - \gamma \left[\frac{(H - b)^3 + b^3}{6} \right]. \quad (5)$$

式中: H 为护坡体高度; dw 为微元重力; γ 为护坡体重度.

黏聚力合力 T'_1 为

$$T'_1 = \int_0^H c \frac{r}{\sqrt{r^2 - (y - b)^2}} dy = cr \left(\arcsin \frac{b}{r} + \arcsin \frac{H - b}{r} \right). \quad (6)$$

滑面法向反力合力 T'_2 为

$$T'_2 = \int_0^H \tan \varphi dw \cos \theta = \frac{\gamma \tan \varphi}{r} \left\{ \frac{2H^3 - 3bH^2}{6 \tan \alpha} + \frac{1}{3} [r^2 - (H - b)^2]^{3/2} \right\} + \frac{\gamma \tan \varphi}{r} \left\{ \frac{a}{2} [b^2 - (H - b)^2] - \frac{1}{3} (r^2 - b^2)^{3/2} \right\}. \quad (7)$$

式中: c 为黏聚力; φ 为内摩擦角.

则抗滑力矩可表示为

$$M_r = r(T'_1 + T'_2). \tag{8}$$

护坡体稳定性安全系数为抗滑力矩 M_r 与下滑力矩 M_s 之比,即

$$F_s = \frac{M_r}{M_s}. \tag{9}$$

如图4所示,护坡体在逐级排土过程中形成排土台阶,且台阶高度、平台宽度和台阶坡面角直接影响整体结构边坡角度的大小^[21-22].为简化分析,设定每一排土台阶的高度、宽度及坡面角均相同,则护坡体的坡面角 α 可表示为

$$\tan \alpha = \frac{\sum_1^n h}{\sum_1^n h \cot \beta + \sum_1^{n-1} d} = \frac{1}{\cot \beta + \frac{n-1}{n} \frac{d}{h}}. \tag{10}$$

式中: n 为排土台阶数; h 为排土台阶高度; d 为排土台阶平台宽度; β 为排土台阶坡面角.

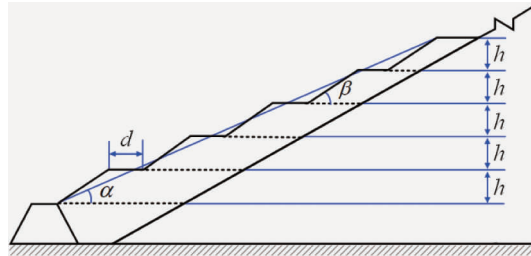


图4 护坡体结构

将式(10)代入式(9),可得护坡体安全系数表达式为

$$F_s = \frac{\gamma \tan \varphi \left\{ \frac{n^2 h^2}{6} (2nh - 3b) \left(\cot \beta + \frac{nd - d}{nh} \right) + \frac{anh}{2} (2b - nh) + \frac{1}{3} [r^2 - (nh - b)^2]^{\frac{3}{2}} - \frac{1}{3} (r^2 - b^2)^{\frac{3}{2}} \right\} + cr^2 \left(\arcsin \frac{b}{r} + \arcsin \frac{nh - b}{r} \right)}{\gamma \left\{ \frac{n^2 h^2}{6} \left(\cot \beta + \frac{nd - d}{nh} \right) \left[3a - nh \left(\cot \beta + \frac{nd - d}{nh} \right) \right] + \frac{nh}{2} (r^2 - a^2) - \left[\frac{(nh - b)^3 + b^3}{6} \right] \right\}}. \tag{11}$$

由式(11)可以发现,护坡体台阶高度 h 、平台宽度 d 以及台阶坡面角 β 等结构参数是影响安全系数的主要因素.

1.4 护坡体稳定影响因素

选取排土台阶数 $n=5$,分析护坡体在不同台阶高度 h 、平台宽度 d 与台阶坡面角 β 下的稳定性安全系数变化情况.依据矿山设计资料,设计台阶高度为 8.0~10.0 m,平台宽度为 4.0~6.0 m,故计算时选取台阶高度 h 为 8.0~12.0 m,选取平台宽度 d 为 3.0~7.0 m;根据矿山实地测量,滑坡附近土体安息角为 35.0°,故计算时选取台阶坡面角 β 为 31.0°~35.0°.

1.4.1 台阶高度 h

设定平台宽度 $d=5.0$ m,台阶坡面角 $\beta=33.0^\circ$,分析护坡体稳定安全系数与台阶高度之间的关系,计算结果如图5所示.从图5可以看出:随着台阶高度增大,安全系数呈负指数趋势减小.在平台宽度和台阶坡面角不变的情况下,台阶高度越高则排土场容量越高,但导致护坡体整体结构重心更高,其势能更大,安全性则更小.

1.4.2 平台宽度 d

设定台阶高度 $h=10.0$ m,台阶坡面角 $\beta=33.0^\circ$,分析护坡体稳定安全系数与平台宽度之间的关系,计算结果如

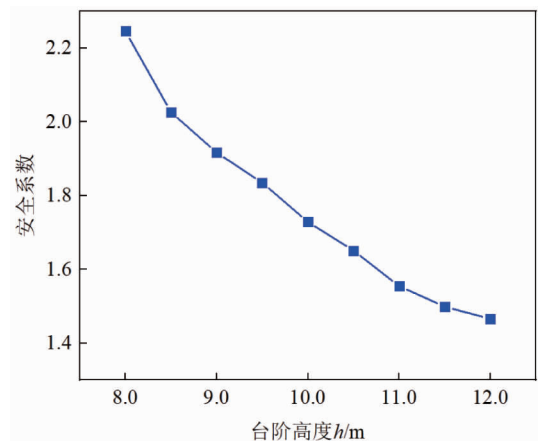


图5 安全系数与台阶高度的关系

图 6 所示.从图 6 可以看出:随着平台宽度的增大,安全系数呈正指数趋势增大.在一定的台阶高度与台阶坡面角下,增大平台宽度对提高护坡体稳定性有较大程度影响,但同时考虑到排土容量需求较大,在满足矿场行车需求的前提下适当减小平台宽度,更能满足滑坡治理的经济性需求.

1.4.3 台阶坡面角 β

设定台阶高度 $h=10.0$ m,平台宽度 $d=5.0$ m,分析护坡体稳定安全系数与台阶坡面角之间的关系,计算结果如图 7 所示.从图 7 可以看出:随着台阶坡面角的增大,安全系数呈负指数趋势减小.台阶坡面角在 $31.0^{\circ}\sim 33.0^{\circ}$ 内增大时,安全系数减小的趋势更为显著.

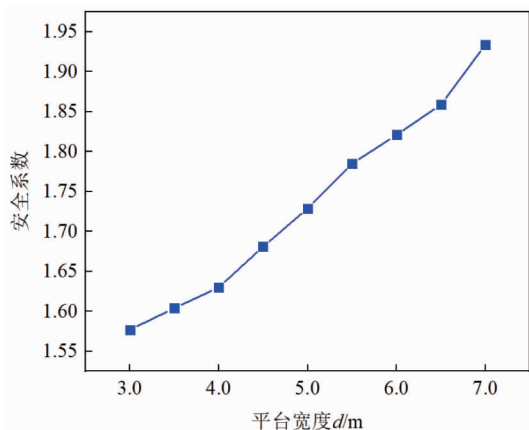


图 6 安全系数与平台宽度的关系

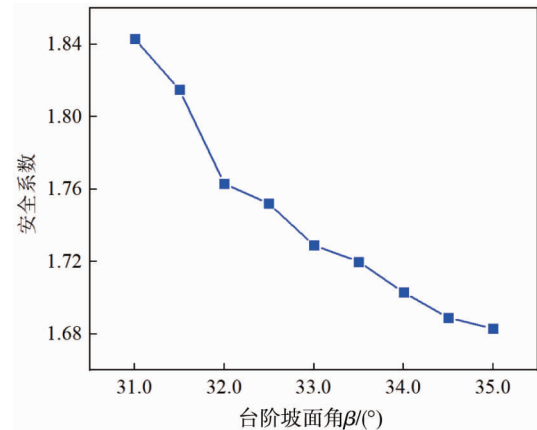


图 7 安全系数与台阶坡面角的关系

1.4.4 影响因素敏感性分析

利用正交试验的极差分析,可判断台阶高度、平台宽度与台阶坡面角等因素对护坡体安全稳定性的影响程度.设定 h, d 与 β 分别为 $+10\%, 0, -10\%$ 的 3 个水平,则 h 的 3 个水平取值为 11.0, 10.0, 9.0 m, d 的 3 个水平取值为 5.5, 5.0, 4.5 m, β 的 3 个水平取值为 $36.3^{\circ}, 33.0^{\circ}, 29.7^{\circ}$, 由于 β 的计算范围设定为 $31.0^{\circ}\sim 35.0^{\circ}$, 故调整 β 的 3 个水平取值为 $35.0^{\circ}, 33.0^{\circ}, 31.0^{\circ}$, 各影响因素的水平值如表 1 所示.

表 1 敏感性因素水平

水平	h/m	d/m	$\beta/(\text{degrees})$
1	11.0	5.5	35.0
2	10.0	5.0	33.0
3	9.0	4.5	31.0

建立 $L_9(3^3)$ 正交表,得到正交试验的 9 个试验方案,分别计算各试验方案的护坡体安全系数,结果如表 2 所示,9 个试验方案中, $h=9.0$ m, $d=5.5$ m, $\beta=31.0^{\circ}$ 的方案安全系数最大.

表 2 敏感性因素正交试验方案

方案	h/m	d/m	$\beta/(\text{degrees})$	F_s
1	11.0	5.5	35.0	1.614
2	11.0	5.0	33.0	1.723
3	11.0	4.5	31.0	1.730
4	10.0	5.5	33.0	1.756
5	10.0	5.0	31.0	1.807
6	10.0	4.5	35.0	1.596
7	9.0	5.5	31.0	1.911
8	9.0	5.0	35.0	1.689
9	9.0	4.5	33.0	1.744
R	0.092	0.070	0.183	敏感性排序 $\beta>h>d$

利用敏感性因素极差 R 的大小,可判断各因素对安全系数的影响程度.由表 2 的极差 R 计算结果可知:对护坡体安全性影响程度最大的因素为台阶坡面角,其次是台阶高度与平台宽度.为了确保护坡体稳

定,在施工设计时,应首先根据规定安全系数大小确定合理的台阶坡面角,在条件允许范围内尽量选择台阶高度较小、平台宽度较大的方案.

2 护坡体稳定数值模拟

2.1 模型构建

假设岩土体为均质、各向同性,符合摩尔-库伦弹塑性模型,且不考虑降雨入渗、地震等外界因素的影响.使用 Midas-GTS 软件建立护坡体、挡土坝、块石、边坡的计算模型,并根据不同区域的计算精度需要,划分不同的网格尺寸,边坡体、挡土坝及块石部分网格尺寸相同,护坡体台阶表面部分细化网格,如图 8 所示.该计算模型的护坡体台阶表面以及边坡顶部设置为自由边界,边坡左右两侧设置为水平约束,边坡底侧设置为固定约束.

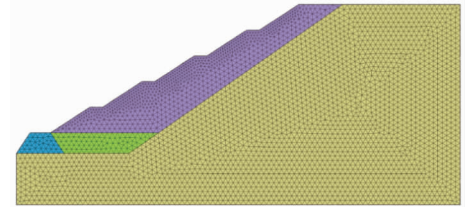


图 8 计算网格划分

为获取可靠有效的物理力学参数,在矿山剥离土取样,进行土力学基础试验,得到该铁矿山岩体部分物理力学参数如表 3 所示.

表 3 岩土体物理力学性质指标

土类型	容重 $\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 E/MPa	泊松比	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
边坡体	18.5	35.0	0.30	76.0	40.0
护坡体	17.0	32.0	0.32	11.3	35.7
挡土坝	18.0	34.0	0.31	28.6	41.3
块石	26.0	3 800.0	0.27	120.0	45.0

2.2 模拟结果

改变模型中护坡体结构参数大小,进行护坡体稳定性数值模拟计算,分析护坡体在不同台阶高度 h 、平台宽度 d 和台阶坡面角 β 下的位移变化规律(见图 9、图 11、图 13)、塑性应变变化规律(见图 10、图 12、图 14),分析护坡体可能的破坏模式.

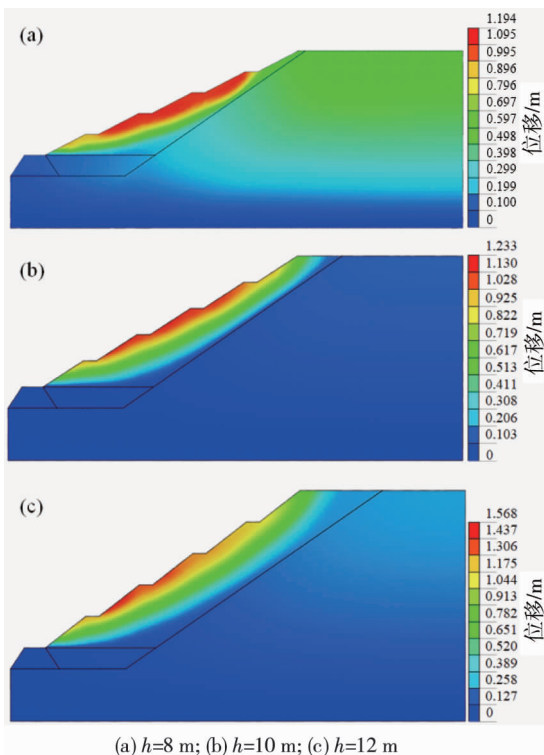


图 9 不同台阶高度下的边坡位移云图

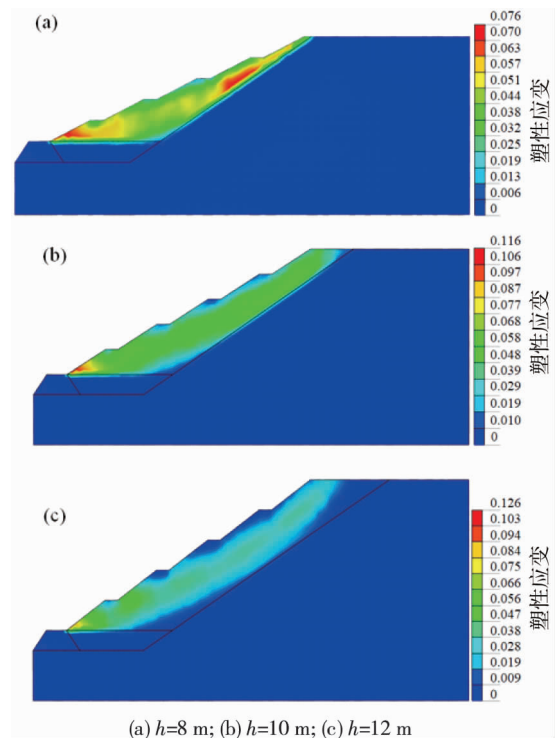


图 10 不同台阶高度下的边坡应变云图

2.2.1 台阶高度 h

选取 8.0, 10.0, 12.0m 这 3 个台阶高度下的位移云图(见图 9)和塑性应变云图(见图 10)进行分析.由图 9 可知:护坡体的最大位移量随着台阶高度的增大而增大,且发生最大位移的部位逐渐从护坡体中部台阶向底部台阶转移.由图 10 可知:护坡体塑性应变随着台阶高度的增大而逐渐增大,且产生最大应变的区域逐渐向护坡体坡脚处集中.

2.2.2 平台宽度 d

选取 3.0, 5.0, 7.0 m 这 3 个平台宽度下的位移云图(见图 11)和塑性应变云图(见图 12)进行分析.由图 11 可知:护坡体的最大位移量随着平台宽度的增大而减小,且最大位移的发生部位逐渐由底部台阶向中部台阶转移.由图 12 可知:护坡体塑性应变随着平台宽度的增大逐渐减小,且产生最大塑性应变的区域由集中坡脚处逐渐转变为向上部台阶蔓延.

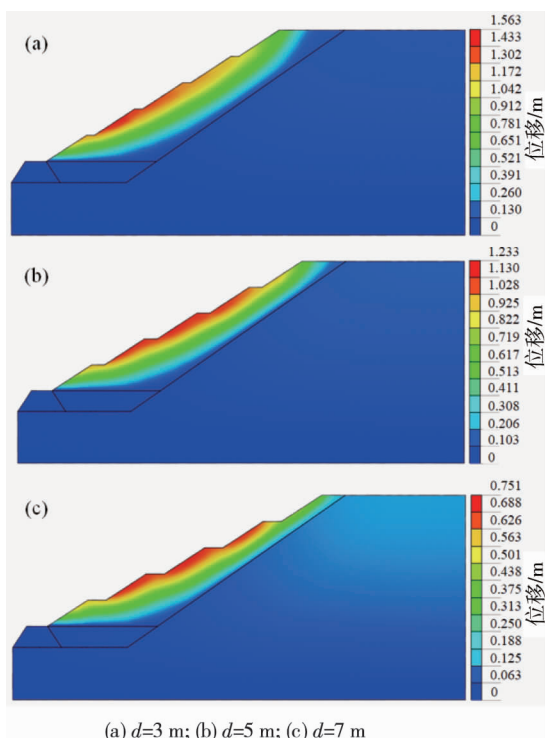


图 11 不同平台宽度下的边坡位移云图

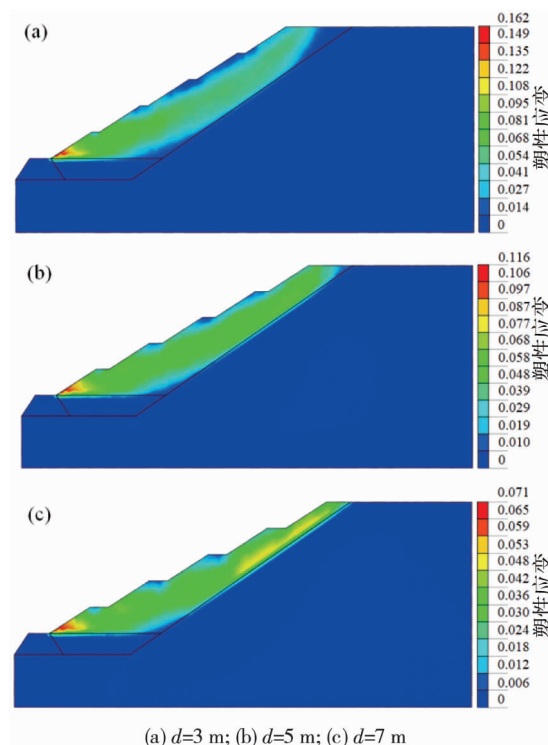


图 12 不同平台宽度下的边坡应变云图

2.2.3 台阶坡面角 β

选取 31.0° , 33.0° , 35.0° 这 3 个台阶坡面角下的位移云图(见图 13)和塑性应变云图(见图 14)进行分析.由图 13 可知:台阶坡面角为 31.0° 时,护坡体整体位移量较小,随着台阶坡面角增大,护坡体的最大位移量逐渐增大,且最大位移发生部位由护坡体中部台阶逐渐向坡脚台阶转移.由图 14 可知:护坡体内部的塑性应变随着台阶坡面角的增大而逐渐增大,坡脚处为应变最大部位.

2.2.4 护坡体破坏模式

从护坡体的塑性应变云图可以看出:塑性区以圆弧状连接坡脚与坡顶形成滑带,最大塑性应变都发生在坡脚处,是护坡体破坏的起点.从护坡体的位移云图可以看出:护坡体内产生位移的部位分布在最底部台阶与块石交界面及圆弧界面,结合塑性区分布特征,可以判断护坡体的破坏模式为以土体-块石交界面为底界面、以排土体圆弧为侧界面的顺层圆弧滑动,与理论计算部分的假设基本吻合.

2.2.5 安全系数

选取不同台阶高度、平台宽度与台阶坡面角下的模型各 5 组进行计算,将数值模拟所得安全系数结果与理论计算所得结果对比.如图 15 所示,数值模拟与理论计算所得到的安全系数变化规律基本一致,受模型网格划分精确程度影响,数值模拟计算结果略大于理论计算,计算结果相差 $6.0\% \sim 13.8\%$.理论计算在判定护坡体安全稳定性时更保守.

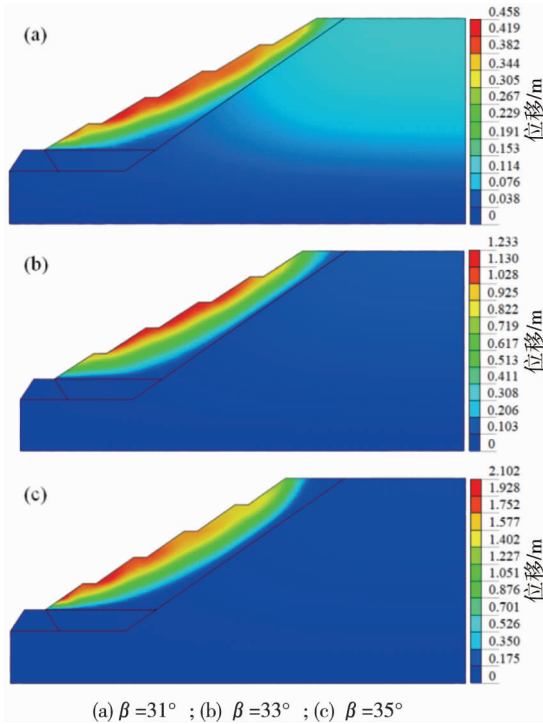


图 13 不同台阶坡面角下的边坡位移云图

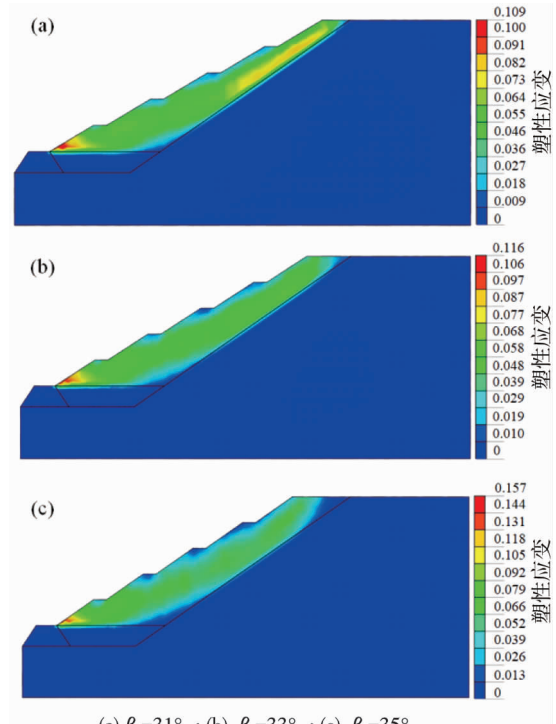


图 14 不同台阶坡面角下的边坡应变云图

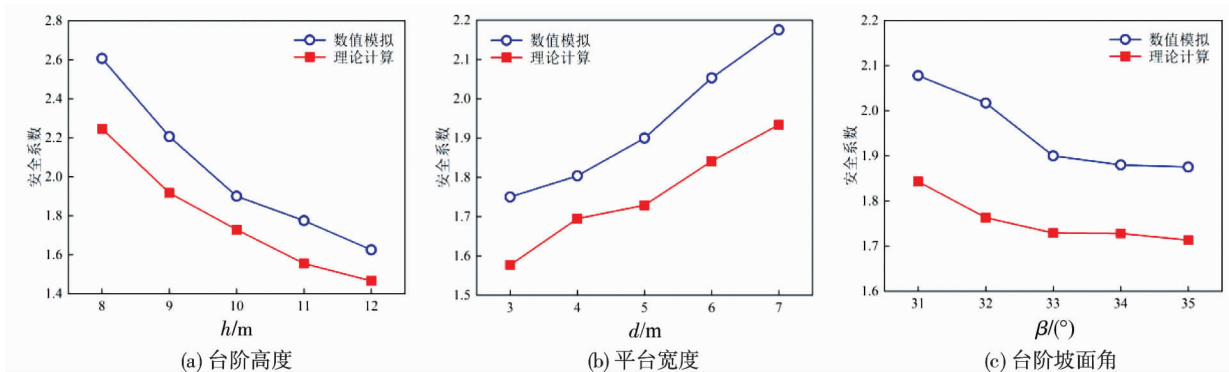


图 15 数值模拟与理论计算的安全系数对比

2.3 护坡体稳定关键参数

从不同结构参数下的护坡体应变云图可以看出:最大塑性应变变量随台阶高度与台阶坡面角的增大而增大,随平台宽度的增大而减小,3种结构参数在研究范围内变化对塑性应变变量影响程度相当。

从不同结构参数下的护坡体位移云图可以看出:最大位移量随台阶高度与台阶坡面角的增大而增大,随平台宽度的增大而减小;台阶高度在研究范围内变化对最大位移量影响很小,台阶坡面角在研究范围内变化对最大位移量影响最大,故可以判断台阶坡面角大小是影响护坡体位移大小的关键结构参数。

结合 1.3.4 节因素敏感性分析结论,台阶坡面角是影响护坡体稳定性安全系数和位移量的关键结构参数,在设计护坡体时,应首先在合理范围内确定满足安全要求的台阶坡面角,在此基础上设计平台宽度与台阶高度,以保证护坡体结构的稳定,进而保证护坡体治理滑坡的可靠性。

3 工程验证

在某凹陷露天铁矿山开挖无矿天窗区域形成原位挡土坝,在坝前基坑内排土形成护坡体,如图 16 所示,护坡体由+60,+70,+80,+90,+100,+110,+120 m 共 7 个台阶组成,台阶走向垂直采坑下盘底板,依据土体安息角大小设计护坡体台阶坡面角 35.0°,设计台阶高度为 10.0 m,平台宽度为 5.0 m。《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)规定边坡稳定安全系数 $[F_{st}] = 1.15$,由式(11)计算出该护坡体的安全系数

为 $1.78 > 1.15$, 满足边坡稳定性要求.



图 16 护坡体实景

为监测护坡体变形情况,在滑坡治理区域+150,+160,+170与+180 m 水平设置 4 个 GNSS 位移在线监测点,其监测原理是通过对监测点三维坐标与初始坐标之间的变化量获取位移量数据.一个水文年内的边坡 GNSS 位移在线监测数据如图 17 所示,4 个监测点的 X, Y 方向位移变形幅值均在 10 mm 范围区间振荡, Z 方向位移变形幅值在 30 mm 范围区间振荡,处于允许幅值范围内,可认为护坡体无明显位移变形.

滑坡治理工程实践表明,护坡体成功维护了滑坡灾害区域内边坡体的稳定,保证了采坑+60 m 以下水平采矿生产的安全正常进行.工程实践与理论计算结果一致,验证了护坡体治理滑坡体的可靠性.

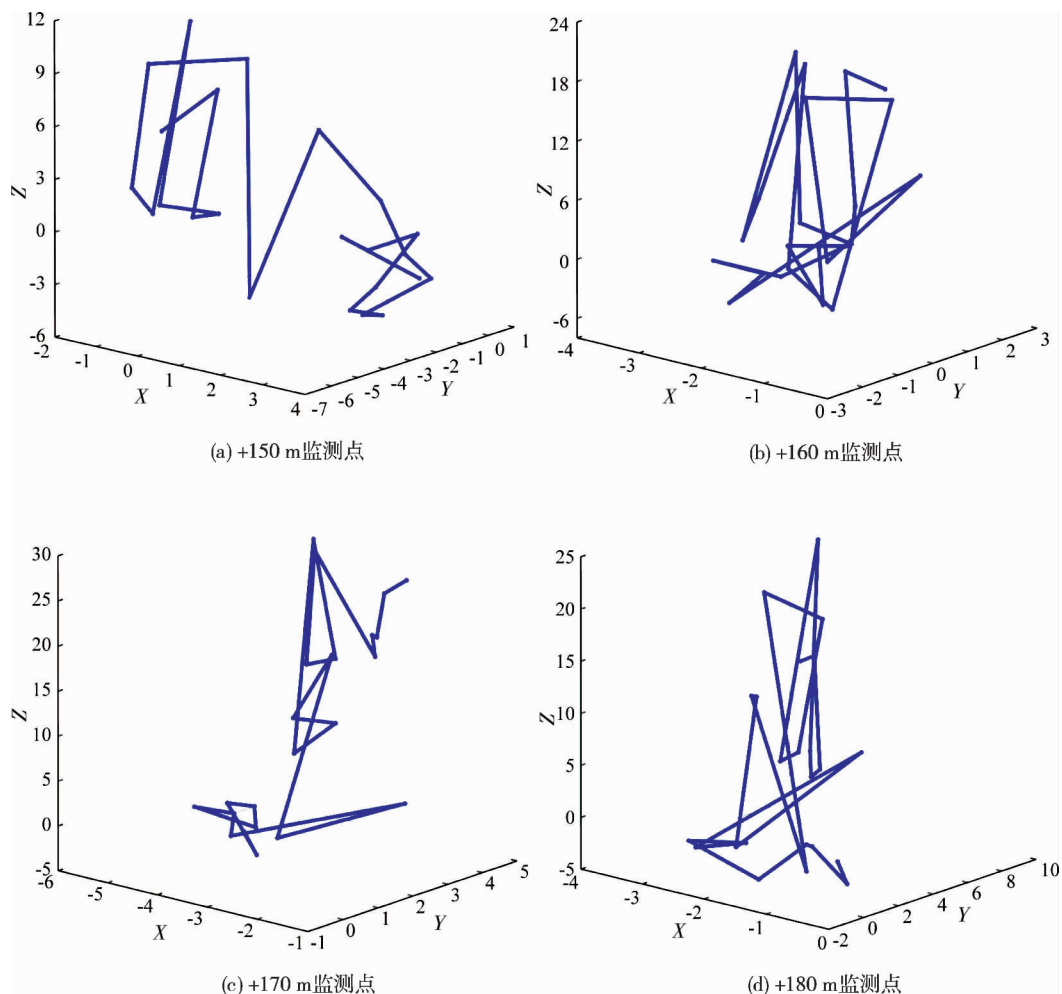


图 17 护坡体位移在线监测数据(单位:mm)

4 结论

1) 根据护坡体破坏模式假设与排土台阶高度、平台宽度、台阶坡面角等结构因素,推导内排土护坡体稳定性安全系数表达式.结合理论计算结果与护坡体数值模拟结果,判断护坡体破坏模式及关键结构因素对其安全稳定性的影响规律.

2) 护坡体最大位移发生在坡脚处台阶且塑性区由坡脚以弧状贯通至坡顶,其破坏模式为以土体-块石交界面为底界面、以排土体圆弧为侧界面的顺层圆弧滑动.

3) 随着护坡体台阶高度与台阶坡面角增大,其安全系数减小,最大位移量与应变量增大;随着护坡体平台宽度增大,其安全系数增大,最大位移量与应变量减小.台阶坡面角是影响护坡体安全系数与最大位移量的关键结构参数.

4) 工程实践效果表明:护坡体安全系数满足规定且成功维护了边坡的稳定,验证了护坡体治理滑坡的可靠性.

参考文献:

- [1] 吴江鹏,章广成,侯赠.开挖及降雨作用下土质边坡变形破坏机理[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2015,30(2):73-79.
- [2] 火映霞,侯新宇,陆善佳,等.基坑土钉支护边坡有限元稳定性分析方法探讨[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(1):58-62.
- [3] WANG Y, SUN S, PANG B, et al. Base Friction Test on Unloading Deformation Mechanism of Soft Foundation Waste Dump under Gravity[J]. Measurement, 2020, 163(8):108054.
- [4] 姜立春,张吉龙,李建锋.露天铝土矿山内排土场滑坡破坏模式分析及工程防治[J].有色金属(矿山部分),2007,59(6):27-31.
- [5] WANG Z, LIU B, HAN Y, et al. Stability of inner dump slope and analytical solution based on circular failure: Illustrated with a case study[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 117:103241.1-103241.10.
- [6] 陈毓,周西华.黑山露天矿内排土场边坡稳定分析及治理措施[J].煤矿安全,2019,50(12):231-233.
- [7] 鲁宁,韩猛,于玲,等.内蒙某矿内排土场稳定性分析及优化[J].煤矿安全,2019,50(9):236-239.
- [8] 李三川,王晨光,白润才,等.元宝山露天煤矿内排土场变形特性研究[J].煤炭科学技术,2018,46(3):85-89.
- [9] 丁鑫品,李凤明,刘博文,等.顺倾基底高段排土场边坡失稳模式与控制对策[J].煤矿安全,2020,51(7):244-247.
- [10] 徐晓惠,姚再兴.内排压脚与边坡稳定性的关系[J].安全与环境学报,2015,15(2):71-76.
- [11] 周永利,黄浩轩,翟正江,等.露天矿内排土场堆叠过程中边坡形态优化[J].煤矿安全,2019,50(6):263-265.
- [12] 宋子岭,刘文坊,范军富,等.倾斜基底内排土场边坡稳定性分析[J].金属矿山,2018(2):179-183.
- [13] 梁冰,孙维吉,杨冬鹏,等.抛掷爆破对内排土场边坡稳定性影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(4):710-715.
- [14] 刘玉凤,曹芳智,马明,等.地下水对伊敏露天矿内排土场边坡稳定的影响[J].煤矿安全,2019,50(8):236-239.
- [15] 王东,李广贺,曹兰柱,等.基于内排空间利用最大化的露天煤矿排土线布置方法[J].煤炭学报,2020,45(9):3150-3156.
- [16] 周伟,韩流,才庆祥.内排土场对端帮边坡稳定性影响研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(4):671-676.
- [17] 温树杰,田亮.挡土墙支护边坡的最小势能稳定性分析方法[J].建筑科学,2013,29(7):20-23.
- [18] 李连祥,贾斌,赵永新,等.土与全风化岩二元边坡整体稳定性计算分析[J].岩石力学与工程学报,2020,39(s1):2785-2794.
- [19] 卢玉林,薄景山,陈晓冉,等.瑞典圆弧法积分模型的边坡稳定性解析计算[J].应用力学学报,2017,34(2):257-263.
- [20] SONG C W, YU G M, WANG P S. Influence of Berm Number on Safety Factor of Tailings Dam[J]. Advanced Materials Research, 2012, 374-377:2488-2492.
- [21] 马力,张建国,肖双双,等.含水弱胶结外排土场边坡稳定性研究[J].西安科技大学学报,2018,38(6):931-936.
- [22] 张凯,高毓山,刘奎明,等.高海拔地区金属矿排土场稳定性分析及关键参数优化[J].金属矿山,2020(3):71-78.