

基于 FEM 的改良煤矸石边坡稳定性分析

李瑞杰^{1,2,3}, 李学丰^{1,3*}

(1. 宁夏大学 物理与电子电气工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏公路管理中心, 宁夏 银川 750011;
3. 宁夏大学 固体力学研究所, 宁夏 银川 750021)

摘要: 煤矸石是煤矿开采后的固体废物, 堆积后的煤矸石排土场持续影响矿区生态, 其边坡稳定特性受到广泛关注。本文以宁夏宁东某矿区生态实施修复重建的煤矸石边坡为例, 对边坡结构进行改良, 构建基于水土保持特性的改良煤矸石边坡, 构建草植层、渗流层和过滤层的分层边坡结构, 可以提高边坡稳定性, 初步满足土地复垦需要。基于 FEM 建立了改良煤矸石边坡数值模拟模型。数值模拟结果表明, 在平面应变试验条件下, 会产生“X”型剪切带, 剪切带的发育程度与围压及应力水平相关; 改良煤矸石边坡失稳易发生在边坡坡脚处, 在剪应力与水平力共同作用下, 会发生较大的变形, 产生较大位移; 持续降雨对改良煤矸石边坡的影响较小。研究结果为矿区改良煤矸石边坡稳定性实践和矿区生态环境安全提供了参考。

关键词: 煤矸石排土场; 边坡; 稳定性; 降雨; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)02-0144-08

Stability analysis of improved coal gangue slope based on FEM

LI Rui-jie^{1,2,3}, LI Xue-feng^{1,3*}

(1. School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;
2. Ningxia Highway Administration Center, Yinchuan 750011, Ningxia, China;
3. Institute of Solid Mechanics, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Coal gangue is a type of solid waste after coal mining. The coal gangue stock dump continues to affect the ecology of the mining area, and its slope stability characteristics have received extensive attention. This paper takes the coal gangue slope of Ningdong mining area as an example to improve the slope structure. An improved coal gangue slope was constructed based on the characteristics of water and soil conservation. The layered slope structure of grass planting layer, seepage layer and filter layer can effectively improve the slope stability and initially meet the needs of land reclamation. The numerical model of the improved coal gangue slope was established based on FEM. The numerical simulation results show that an 'X'-shaped shear band is generated under the condition of the plane strain test, and the development degree of the shear band is related to the confining pressure and stress level. The slope instability easily occurs at the toe of slope. When the shear stress and the horizontal force act together, a large deformation and displacement occur. However, the continuous rainfall has little effect on the stability of the improved coal gangue slope. The research results provide a reference for improving the stability of coal gangue slopes in the mining area and the safety of the ecological environment in the mining area.

Key words: gangue dump site; slope; stability; rainfall; numerical simulation

0 引言

宁夏宁东地区地处中国能源化工金三角(宁夏宁东、陕西榆林、内蒙古鄂尔多斯)的核心区, 煤

炭资源丰富, 是宁夏回族自治区重要的煤炭能源基地, 也是宁夏生态环境脆弱区。近些年来地下煤矿开采后, 大量煤矸石及废料堆积形成了占地面积较大的排土场。通常出于经济实用性的考虑, 排土场

收稿日期: 2022-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(1216020092); 宁夏科技创新领军人才计划项目(KJT2019001); 宁夏“多尺度力学与工程应用自治区科技创新团队”。

作者简介: 李瑞杰(1987—), 男, 宁夏隆德人, 博士研究生, 工程师, 主要从事公路工程和岩土工程方面研究工作。E-mail: lrj456@163.com。

*通信作者: 李学丰(1976—), 男, 宁夏平罗人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土本构理论应用及环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: lixuefeng1928@163.com。

边坡坡度较大、堆积废弃物种类繁多,排土场面临边坡稳定安全和生态环保经济的双重矛盾^[1-2],严重破坏了原有地貌和矿区生态环境,严重影响了地区社会经济的可持续发展。土地逐步损毁,植被退化进一步影响了矿区的可持续发展。此外,采煤沉陷区也会对植被生长造成一定程度的影响。对此,国内外普遍开展了各类采煤迹地排土场生态修复工程,提出了保持排土场边坡稳定性的措施,通过对矿区土壤基质的改良和复垦开发,实现对矿区生态的持续修复^[3-4]。大量研究表明,生态修复与边坡稳定性既是一项系统工程,又是协调统一的整体。排土场边坡稳定性受边坡结构(坡度、组分)、自然因素(地震、降雨、地质失稳)等多种因素影响。赵国贞等^[5]以底山村矸石山为例,应用 Midas GTS NX 有限元数值模拟,对比分析了天然、地震、降雨 3 种工况下的矸石山边坡稳定性,计算结果表明降雨工况下边坡失稳的变形最为明显。KHAN 等^[6]研究了降雨入渗速率对煤矸石边坡失稳的影响,基于有限元的分析结果进一步证实,应力和孔隙水压力的耦合效应对非饱和煤矸石堆积体边坡稳定性影响较大。林江宇等^[7]以煤矸石高边坡为例,通过 FLAC 3D 数值模拟发现,降雨会对煤矸石边坡临界滑动面产生影响,特别是持续降雨的影响加剧了滑动面的移动。

综上,现有大量研究指出,边坡失稳破坏是一个渐进过程,会伴随初始应变产生至应变局部化,进而向应力剪切破坏持续演化,最终由多种因素共同引发边坡结构失稳。现有研究对基于水土保持的改良煤矸石边坡稳定研究较少,本文以宁夏宁东地区某煤矿排土场为例,旨在对矿区改良煤矸石边坡稳定性进行研究,关于构建新土体的内容和方法在此不做介绍。

1 改良煤矸石边坡

1.1 煤矸石简介

煤矸石是一种较为特殊的堆石材料,系采煤和洗煤过程中产生的固体废弃物,其主要成分以次软岩石或极软岩石为主, SiO_2 和 Al_2O_3 是其化学成分,约占总成分的 67%~90%左右^[8],具有强度低、自燃、易破碎等特殊性质。因煤矿生产和开采需要,常会产生大量的煤矸石在排土场堆积。当受到外力破坏或者暴雨侵蚀时,常因其堆积过高、坡度过大,易引发滑坡和泥石流等自然灾害,影响矿区生态环境安全。因此,基于水土保持的改良煤矸石边坡稳定性分析具有重要意义。

1.2 工程背景

宁东镇煤炭资源探明储量 273 亿吨,是全国十三个大型煤炭基地之一,其位于宁夏灵武市东部,处于荒漠化、半荒漠化地带,为缓坡丘陵地貌,是宁夏地区水土重点保护区域。本工程应用实例选自宁夏宁东能源化工基地附近某大型煤矿生产区,如图 1 为某煤矸石废弃料原始堆积现场,该煤矿煤矸石年总产量达 10.29 万 m^3 ,原排矸石场占地 7.12 hm^2 ,设计堆高 16 m,排矸石场容量约为 113.9~210.29 万 m^3 。此外,现有研究发现草本植物可有效加固排土场边坡,其根系可以改变边坡的破坏形态^[9]。因此,拟定当煤矸石堆放达到标准高度后,采取覆土措施构建新土体,并播撒草籽恢复植被,满足生态重建的需要。



图 1 某煤矸石废弃料原始堆积现场
Fig. 1 Stock dump of a coal gangue waste

2 改良煤矸石边坡结构特性

2.1 改良煤矸石边坡

煤矸石废弃料在原始条件下形成的堆积边坡受矿区生产活动的影响较大,在受到外力影响下,边坡结构渐进失稳易引发滑坡等地质灾害,严重影响矿区安全生产环境。因此,稳定的地形地貌是煤矿区安全生产和绿色可持续发展的必要条件。对矿区煤矸石边坡进行有效治理,创造较好的经济和环境效益,迫切需要对原有煤矸石边坡进行改良,并对其边坡稳定性开展研究。

对此,本研究对现有原始条件下的煤矸石边坡进行改良,主要目的是构建基于水土保持的改良煤矸石边坡。边坡表层材料就地取材,主要以当地砒砂岩、沙黄土、煤矸石为主要材料,建立配比为 2:2:1 的改良煤矸石边坡表层新土体,使得改良后的煤矸石边坡的结构分层具备隔水、涵养水分、抑制水分蒸发的特点。同时,如图 2 所示,采用小型 X 射线荧光重金属元素分析设备(XRF)分析了改良煤矸石边坡表层新土体中镉(Cd)、汞(Hg)、砷

(As)、铅(Pb)、铬(Cr)等几种有害元素的分布,测试结果符合《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中土壤重金属元素风险筛选值限值,满足土地复垦要求,能够满足植被生长需要。



图2 某小型X射线荧光重金属元素分析设备

Fig. 2 X-ray fluorescence spectrometer heavy metal element analysis equipment

2.2 改良煤矸石边坡结构特性

改良煤矸石边坡结构层功能性描述为浅层径流,防止水土流失;中层渗流,形成持续有效排水通道;深层吸收多余水分。如图3所示,改良煤矸石边坡结构由表及里分别为草植层、渗流层和过滤层。其中,最外层为草植层,厚度约为1 m,主要作用是固化边坡,防止因水土流失造成边坡失稳;中间为渗流层,厚度约为2 m,其作用是在保证边坡稳定的前提下,形成渗透水系通道,流向边坡基层;边坡基层为过滤层,主要作用是吸入和保存过量水分,避免降雨条件下水分的流失。

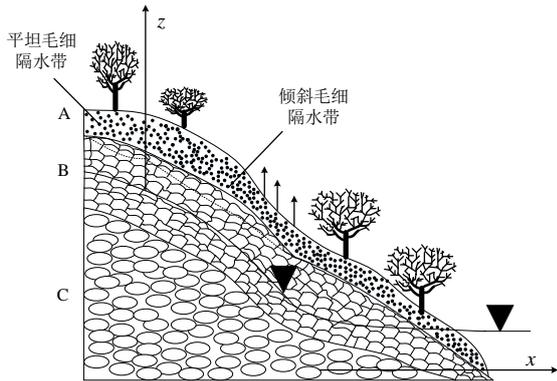


图3 某改良煤矸石边坡结构

Fig. 3 Structure of an improved coal gangue slope

3 改良煤矸石边坡数值建模

3.1 改良煤矸石试验建模

为了便于对煤矸石边坡开展数值模拟,根据现场煤矸石排土场实际情况,做如下假设:(1)仅考虑某一断面的堆石料边坡稳定性,即 $x-z$ 平面的边

坡;(2)考虑3种情况下的煤矸石边坡稳定情况,根据陡峭型($45^\circ \sim 60^\circ$)、适中型($35^\circ \sim 45^\circ$)、高大型($25^\circ \sim 35^\circ$)范围,选取适当的边坡坡角开展建模;(3)改良煤矸石结构为横观各向同性材料。本实例边坡采用基于材料特性相关位势理论的弹塑性本构模型,模型参数如表1所示,详细过程见参考文献[10-11]。

表1 本构模型参数

Table 1 Constitutive model parameters

| 参数类型 | 取值 | 参数类型 | 取值 |
|--------------------|-------|-----------------|-------|
| 材料常数 G_0 | 1.709 | 模型参数 l | 0.744 |
| 泊松比 ν | 0.300 | 模型参数 κ | 0.008 |
| 临界状态参数 M_{cs} | 1.727 | 模型参数 λ | 0.699 |
| 临界状态参数 a' | 0.032 | 状态相关参数 d_0 | 2.267 |
| 临界状态参数 b' | 0.527 | 状态相关参数 c_ψ | 0.980 |
| 临界状态参数 c' | 0.313 | 状态相关参数 h_1 | 0.460 |
| 临界状态参数 k_h | 0.120 | 状态相关参数 h_2 | 0.780 |
| 临界状态参数 λ_c | 0.140 | 状态相关参数 h_3 | 4.950 |
| 大气压强 P_a/kPa | 101 | 状态相关参数 k_d | 0.458 |

实践证明,边坡稳定性与垂直沉降和侧向变形有着密切的联系^[12]。基于上述基本假设,为了数值模拟平面应变试验剪切情况,建立双轴试验模型,以观测应变局部化及剪切带发展过程及其变化规律。试验选取的材料初始分形维数为2.082,比重为2.77,相对密度 D_r 为1.0,初始孔隙比 e_0 为0.297,密度为 2.18 g/cm^3 。

双轴试验应力加载如图4所示,选取材料试样,在围压下固结稳定后,同时施加轴向力和水平方向力。令 $\eta = d\sigma_1/d\sigma_2$, 取 $\eta = 0.5$ 时,分别在低围压300 kPa和高围压1500 kPa下观察双轴试验的应变演化规律。在FEM上建立双轴试验的模型如图5(a)所示,模型的宽为10 cm,高为20 cm,底端固定,上端及两边施加负荷。为了便于观察模型的尺寸变形,将模型以边长2 cm的正方形进行网格划分,总共划分了50个单元,66个节点。

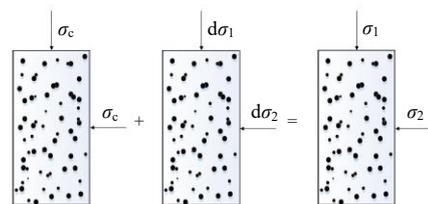


图4 双轴试验模拟应力加载示意图

Fig. 4 Simulation of stress loading in biaxial test

图 5 (b) 和 (d) 分别为 300 kPa 和 1 500 kPa 围压下应变 ϵ_x 的变化情况。图中出现一定程度的应变集中, 在平面两侧形成了“X”型的交叉型剪切带, 但高围压下应变集中趋势更为明显, 有限元数值模拟结果显示在高应力作用下进一步加速了左侧剪切带的贯通及剪切带内颗粒的旋转、移动

程度。

图 5 (c) 和 (e) 分别为 300 kPa 和 1 500 kPa 围压下应变 ϵ_y 的变化情况。与图 5 (b) 和 (d) 类似, 右侧剪切带在平面应变条件下, 也出现了较为明显的“X”型剪切带, 但由于轴向力增量较小, 故右侧剪切带的发育贯通程度不如左侧剪切带明显。

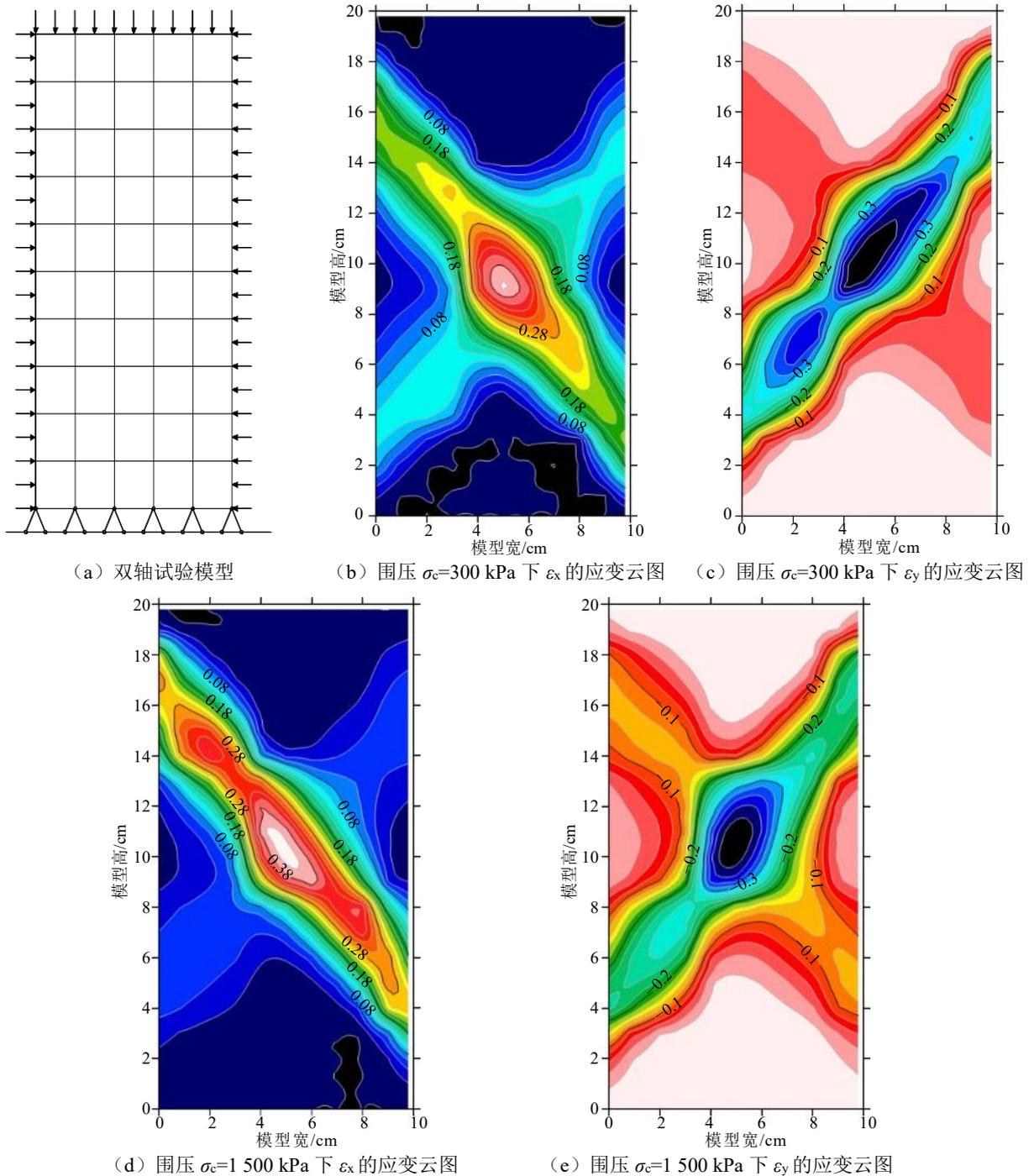


图 5 建立的双轴模型及应变云图

Fig. 5 Biaxial numerical model and its strain nephogram

3.2 改良煤矸石边坡建模

对排土场实际尺寸进行测量, 边坡基层宽度 a 为 36 m, 边坡高度 h_2 为 10 m, 据此建立模型, 模

型尺寸与改良煤矸石边坡实际尺寸一致, 如图 6 所示。考虑到排土场的荷载类型主要为重力加载, 为简化计算过程, 近似用 3.1 节中建立的双轴模型表

示堆石料边坡。即截取堆石料边坡某一断面，仅研究竖向和水平向应力应变情况。

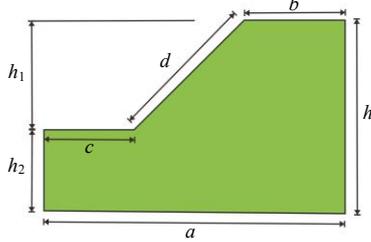


图6 改良煤矸石边坡算例

Fig. 6 Example of the improved coal gangue slope

网格划分会影响有限元模型的计算速度，考虑到草植层和渗流层是应变滑移变化区，是重点观测区域，因此单位网格长度选定为0.2m；而边坡基层为次重点区域，单位网格长度选定为1m。考虑到不同地形下边坡的实际情况，根据边坡倾角和坡度尺寸将堆石料改良煤矸石边坡划分为陡峭型、适中型和高大型3种界面，如图7所示。3种类型边坡有限元模型的参数如表2所示。

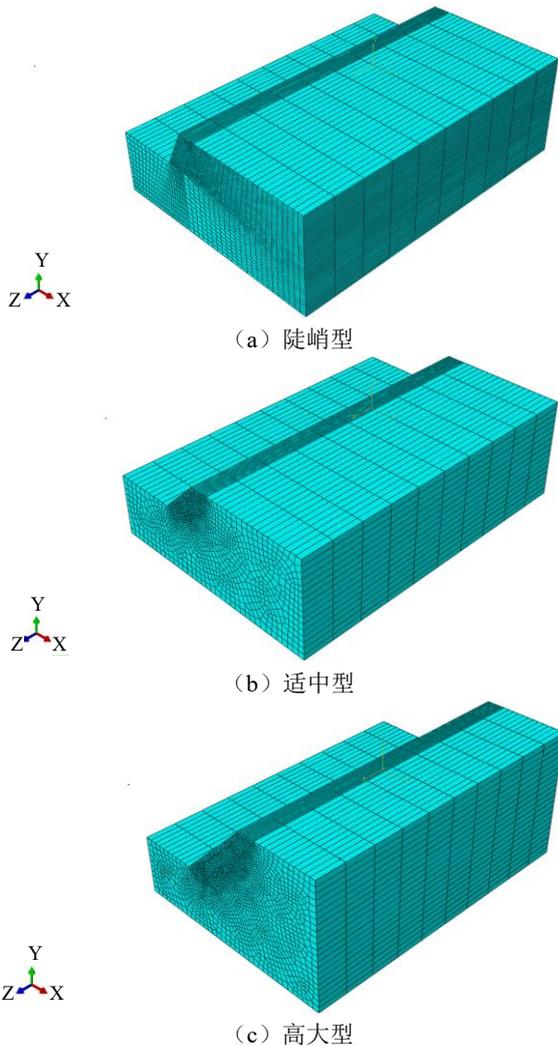


图7 基于有限元建立的改良煤矸石边坡模型

Fig. 7 Finite element model of improved coal gangue slope

表2 有限元边坡模型参数

Table 2 Finite element slope model parameters

| 边坡类型 | 陡峭型 | 适中型 | 高大型 |
|-------------------|--------|--------|--------|
| 截面节点/个 | 1 963 | 1 949 | 3 481 |
| 截面单元/个 | 1 868 | 1 842 | 3 347 |
| 模型节点/个 | 21 593 | 21 439 | 38 291 |
| 模型单元/个 | 18 680 | 18 420 | 33 470 |
| 边坡高度 h_1 /m | 6 | 6 | 12 |
| 坡面长度 d /m | 6.7 | 8.5 | 22 |
| 坡面斜角 α (°) | 63 | 44 | 33 |

4 改良煤矸石边坡稳定性分析

4.1 改良煤矸石边坡稳定性分析

在受到重力荷载作用下，边坡 σ_x 应力云图如图8所示，图中应力单位为 Pa。结果表明3种类型边坡的应力呈层状分布，应力在边坡和坡角处均存在不同程度的应力集中，其中陡峭型边坡的应力集中程度最大，滑动面出现滑动，边坡滑移趋势增大，易发生失稳现象，适中型边坡相对稳定性最好。

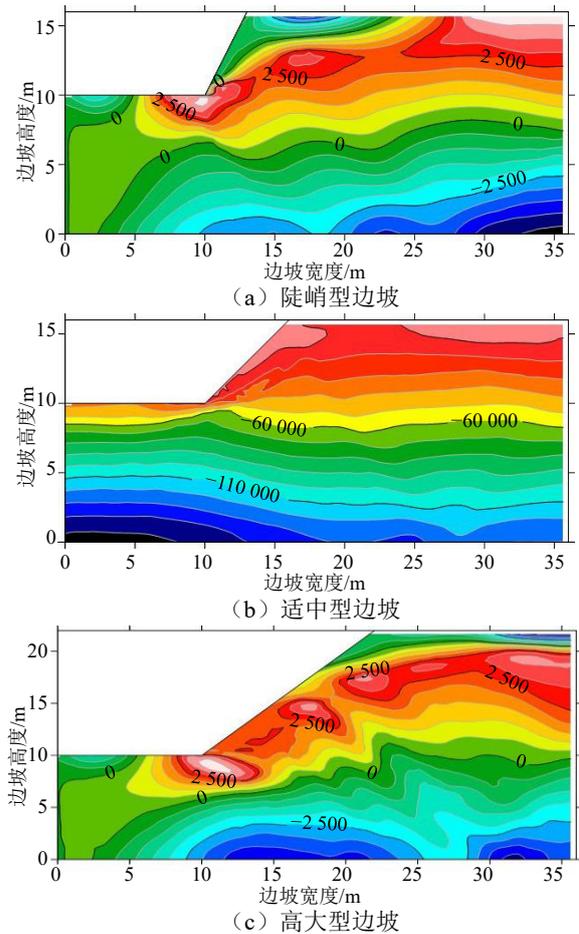


图8 改良煤矸石边坡数值模拟应力云图

Fig. 8 Numerical simulation of stress nephogram of improved coal gangue slope

图 9 为改良煤矸石边坡水平方向位移云图, 位移单位为 m。通过观察发现, 位移在边坡处分层, 坡角处的位移较大, 受到坡角应力集中的影响, 当边坡土体剪应力与水平应力共同作用在坡角时, 会产生较大的塑性变形; 陡峭型和适中型边坡在垂直方向的位移较大, 高大型边坡在垂直方向的位移较小。应力分布与边坡形状相适应, 在分层错位处的应变易发生失稳, 由此造成边坡外层土体向外侧滑移, 局部应力集中对应变集中行为起到诱发作用, 当滑移面持续滑动至达到极限后, 边坡会失稳倒塌。相对而言, 高大型和陡峭型边坡更易出现应力集中现象, 由此边坡应变集中影响边坡位移的整体趋势为向前下方移动, 进而对边坡破坏具有推动作用。

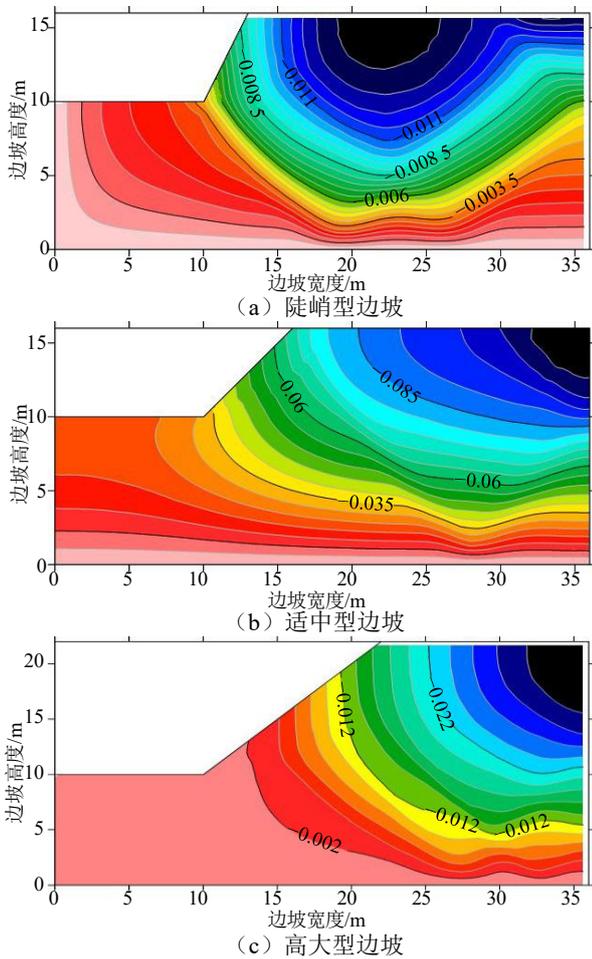


图 9 改良煤矸石边坡数值模拟位移云图

Fig. 9 Numerical simulation of displacement nephogram of improved coal gangue slope

4.2 考虑降雨影响的改良煤矸石边坡稳定性分析

TANG 等^[13] 研究发现, 一般情况下, 降雨入渗的深度不超过 3 m, 但若降雨形成渗透通道进入深层土体, 势必影响边坡稳定性。马蓓青等^[14] 研究了持续降雨对黄土的影响得到了类似结论。降雨持续入渗使得黄土边坡的局部土体发生剪切破坏, 形成贯

通滑动面, 进而发生滑坡, 主要原因是持续降雨使得边坡土体含水量增大, 降低了土体强度。基于 4.1 节中改良煤矸石边坡稳定性分析结果和宁夏宁东某煤矿现场实际情况, 建立适中型改良煤矸石边坡模型, 该边坡建模尺寸与实际尺寸一致, 边坡高度 h 为 30 m, 边坡底边长度 a 为 54 m, 坡角 α 约为 41° 。考虑到宁夏宁东地区处于西北内陆, 降雨量偏少, 故本次以持续中强度降雨条件模拟降雨对改良煤矸石边坡稳定性的影响, 即降雨强度为 50 mm/d。

图 10 为持续降雨状态对改良煤矸石边坡稳定性的影响, 等值线为边坡某位置处的饱和度。在降雨初期, 边坡土体分层均匀; 随着持续的雨水渗入, 在降雨 24 h 后, 持续降雨使得边坡表层土体饱和, 土体内部孔隙水压力升高, 受自重应力和雨水渗入影响, 在边坡表层出现了一定程度的应力集中; 在降雨 48 h 后, 降雨影响减弱, 边坡趋于稳定, 强度恢复。总体而言, 由于改良煤矸石边坡特有的水土保持结构特性, 该强度下水渗入对边坡影响并不明显。

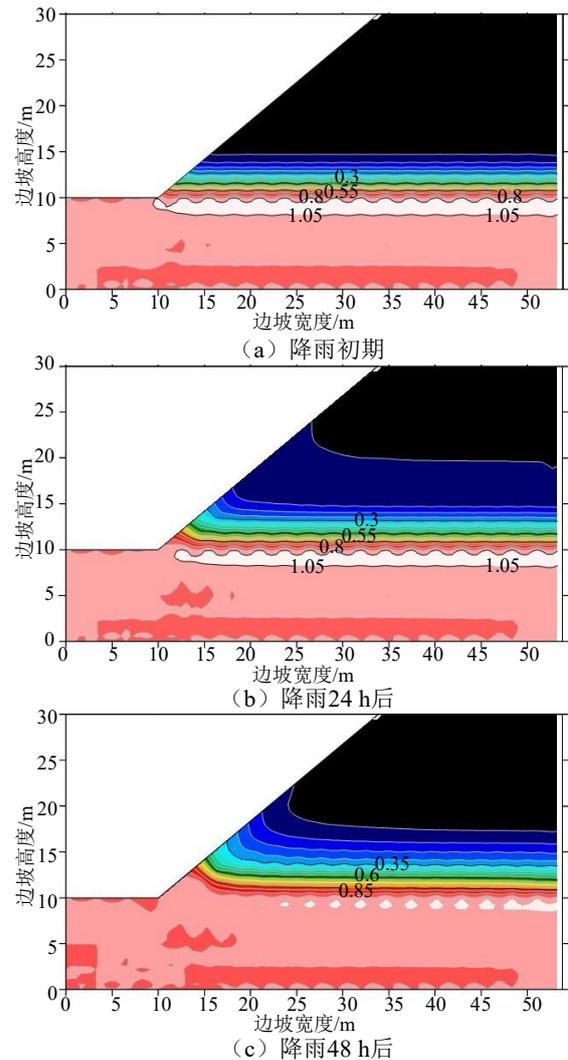


图 10 雨水入渗后的边坡饱和度云图

Fig. 10 Saturation nephogram after the rainfall infiltration in a slope

5 结论

本文基于宁东地区某煤矿排土场边坡工程应用背景,对改良煤矸石边坡稳定性进行分析,并在宁夏宁东某煤矿和内蒙古乌海某煤矿得到了初步实践和应用,如图 11 所示。模拟及工程实践结果进一步表明,本文中适中型边坡在降雨、灌溉等条件下较高大型、陡峭型边坡稳定,且新土体的自然分化和融合效果较好,有利于矿区生态的可持续发展。具体如下:

(1) 以当地砒砂岩、沙黄土、煤矸石废料按一定比例构成的改良煤矸石边坡,既能初步满足复垦要求,提供植被覆盖生长需要,也可变废为宝,实现绿色循环发展。

(2) 由双轴模拟试验可知,在平面应变试验条件下,会产生“X”型剪切带,剪切带的程度与围压及应力水平相关。

(3) 由改良煤矸石边坡稳定分析可知,边坡失稳易发生在坡角处,当剪应力与水平力共同作用在坡角处时,会发生较大的变形,从而产生较大位移,随着边坡角度和边坡高度的增大,边坡稳定性降低。

(4) 持续降雨对改良煤矸石适中型边坡影响较小,说明了基于水土保持的改良煤矸石边坡受雨水的影响较小,具有较好的适用性。



图 11 改良煤矸石边坡应用实例

Fig. 11 Application of improved coal gangue slope

参考文献

[1] 杨天鸿,张锋春,于庆磊,等.露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].岩土力学,2011,32(5):1437-1451,1472.
YANG Tian-hong, ZHANG Feng-chun, YU Qing-lei, et al. Research situation of open-pit mining high and steep slope stability and its developing trend[J]. Rock and Soil

Mechanics, 2011, 32(5): 1437-1451, 1472.

- [2] 刘彦,马小军,王彪龙,等.弃土场边坡稳定性和可靠性的多工况对比分析[J].安全与环境工程,2022,29(1):93-100.
LIU Yan, MA Xiao-jun, WANG Biao-long, et al. Comparative analysis of stability and reliability of spoil dump slope under multiple working conditions[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(1): 93-100.
- [3] 吴淑莹,周伟,袁涛,等.宁东煤矿基地采煤沉陷区植被动态变化研究[J].西北林学院学报,2020,35(1):218-225.
WU Shu-ying, ZHOU Wei, YUAN Tao, et al. Vegetation dynamics in mining subsidence area of Ningdong coal mine base[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1): 218-225.
- [4] 方瑛,马任甜,安韶山,等.黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究[J].环境科学,2016,37(3):1121-1127.
FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, et al. Heidaigou opencast coal mine: soil enzyme activities and soil physical and chemical properties under different vegetation restoration[J]. Environmental Science, 2016, 37(3): 1121-1127.
- [5] 赵国贞,吕义清,关军琪,等.底山村矸石山生态修复及其边坡稳定性分析[J].煤炭工程,2021,53(4):152-157.
ZHAO Guo-zhen, LV Yi-qing, GUAN Jun-qi, et al. Ecological restoration and slope stability analysis of hillock in Dishan Village[J]. Coal Engineering, 2021, 53(4): 152-157.
- [6] KHAN K U J, WANG C M, KHAN M W J, et al. Influence of rainfall infiltration on the stability of unsaturated coal gangue accumulated slope[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(6): 1696-1709.
- [7] 林江宇,吴勇,马鑫文,等.降雨条件下煤矸石高边坡稳定性评价[J].科学技术与工程,2021,21(34):14775-14782.
LIN Jiang-yu, WU Yong, MA Xin-wen, et al. Stability evaluation of coal gangue high slope under rainfall conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(34): 14775-14782.
- [8] 臧亚君.山区矸石山降雨入渗特性及其稳定性研究[D].重庆:重庆大学,2008.
ZANG Ya-jun. Characteristics of rain infiltration and its stability research of coal waste dump in mountainous area[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.

