

泥岩填料路基边坡稳定性的影响因素

杜以龙¹,李庆林¹,仲光军¹,郇荣建¹,陈雯雯²

1. 山东省路桥集团有限公司,山东 济南 250014;2. 济南科技学校,山东 济南 250014

摘要:为增大泥岩等固体废物在实际工程中的利用率,基于有限元软件 COMSOL Multiphysics 分析分别处于基本稳定状态、欠稳定状态、不稳定状态时,不同含水率、压实度下泥岩填料路基边坡的位移,研究边坡稳定性的影响因素。研究表明:泥岩填料边坡稳定性随含水率的增大而线性减小,随压实度的增大而缓慢增大;分析泥岩填料路基边坡处于基本稳定状态、欠稳定状态、不稳定状态时的极限水平位移,确定单应力场作用下泥岩填料路用性能阈值的变化规律,含水率和压实度对处于欠稳定状态、不稳定状态时的边坡影响较大,研究成果可为泥岩填料路基边坡稳定性预警提供监测依据。

关键词:泥岩;边坡稳定性;阈值;压实度;含水率

中图分类号:U213.1⁺3;U416.1⁺4

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2023)04-0109-07

引用格式:杜以龙,李庆林,仲光军,等.泥岩填料路基边坡稳定性的影响因素[J].山东交通学院学报,2023,31(4):109-115.

DU Yilong, LI Qinglin, ZHONG Guangjun, et al. Influencing factors of the stability of mudstone-filled road subgrade slopes[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(4): 109-115.

0 引言

我国经济持续快速稳定发展,基础设施建设需求不断增大,基建原材料需求量剧增^[1]。为达到设计强度要求,应尽量选取集配良好的碎石、砂等天然填料作为路基填料。受环境保护限制,矿产资源开采管控越来越严,若路基施工现场全部采用优质填料,成本较高,也不符合固废利用等可持续发展理念,须在满足设计要求的前提下适当考虑采用部分回收固体废物填料^[2]。

泥岩是自然状态下形状完整、力学性能良好的软岩,开挖时强度较高,在风化作用和水理作用下极易崩解、软化^[3-8]。若采用泥岩铺筑公路,易产生表面松散、泥化、承载力不足、路基滑坡、路肩滑塌开裂等诸多病害^[9-11]。已有研究明确了泥岩路基易产生的病害,但未量化分析泥岩路基稳定性能的影响因素,未给出泥岩填料路基路用性能的稳定阈值,无法有效避免泥岩路基填料出现病害,不利于泥岩路基填料在实际工程中的广泛应用。

为获取泥岩填料在不同工况下的稳定性能,明确稳定阈值,为其路用性能设计提供详实参数。本文基于有限元软件 COMSOL Multiphysics 系统分析泥岩填料路基边坡稳定性的影响因素,监测泥岩填料在不同影响因素下、不同位置、边坡处于不同稳定状态时的极限水平位移,以期后续泥岩填料路用性能及泥岩边坡稳定预警提供数据支撑。

1 泥岩路基模型建立及参数选取

在有限元软件 COMSOL Multiphysics 中采用贝塞尔多边形、矩形等命令对泥岩填料路基边坡进行几

收稿日期:2022-11-28

基金项目:山东省交通运输厅科技计划项目(2023B90)

第一作者简介:杜以龙(1987—),男,山东沂南人,主要研究方向为道路桥梁施工、养护、维修加固技术,E-mail:3704832@qq.com。

何建模,如图1所示。

根据摩尔-库仑土体屈服准则,剪切面上某点的剪应力与正应力之比最大时,该点发生屈服破坏,剪切强度 τ 与作用在剪切面的正应力 σ 的关系为:

$$\tau = c - \sigma \tan \varphi, \quad (1)$$

式中: c 为材料的黏聚力, φ 为材料的内摩擦角。

基于摩尔-库仑土体屈服准则,模拟泥岩路基填料边坡稳定性能时,需考虑的材料参数主要包括弹性模量、泊松比、密度、黏聚力及内摩擦角。材料的弹性模量与泊松比对边坡稳定安全系数影响不大,可忽略不计,材料的黏聚力及内摩擦角对边坡稳定安全系数的影响较大^[12]。模拟分析泥岩填料路基边坡的稳定性能时,泥岩填料的弹性模量为 35 MPa,泊松比为 0.3,密度为 2 020 kg/m³。根据文献[13],黏聚力和内摩擦角均与含水率、干密度有关。

设定模拟边界时,考虑泥岩填料路基边坡下部为原状岩土或已固结处理的稳定地基,可认为路基下部不产生变形,模型的下边界采用固定约束;假设泥岩填料路基为整体,左右边界仅限制其垂直位移,在模拟过程中,左右边界采用辊支撑。

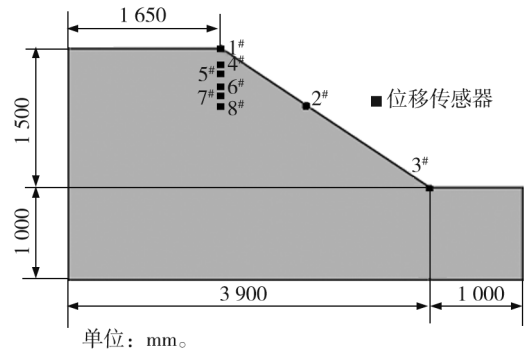


图1 泥岩填料路基边坡几何模型

2 应力状态下泥岩路基边坡稳定性能影响因素分析

2.1 含水率

根据式(1)推导泥岩中饱和-非饱和岩土的剪切强度^[14]

$$\tau = c - (\sigma - u_w) \tan \varphi,$$

式中 u_w 为与含水率有关的孔隙水压力。

其他影响因素保持不变,研究含水率对泥岩填料路基稳定性能的影响。设定泥岩填料路基边坡斜率为 1:2.5,模拟分析含水率 w 分别为 9.0%、11.0%、13.0%、15.0%、17.0% 时边坡的有效塑性应变,结果如图2所示。

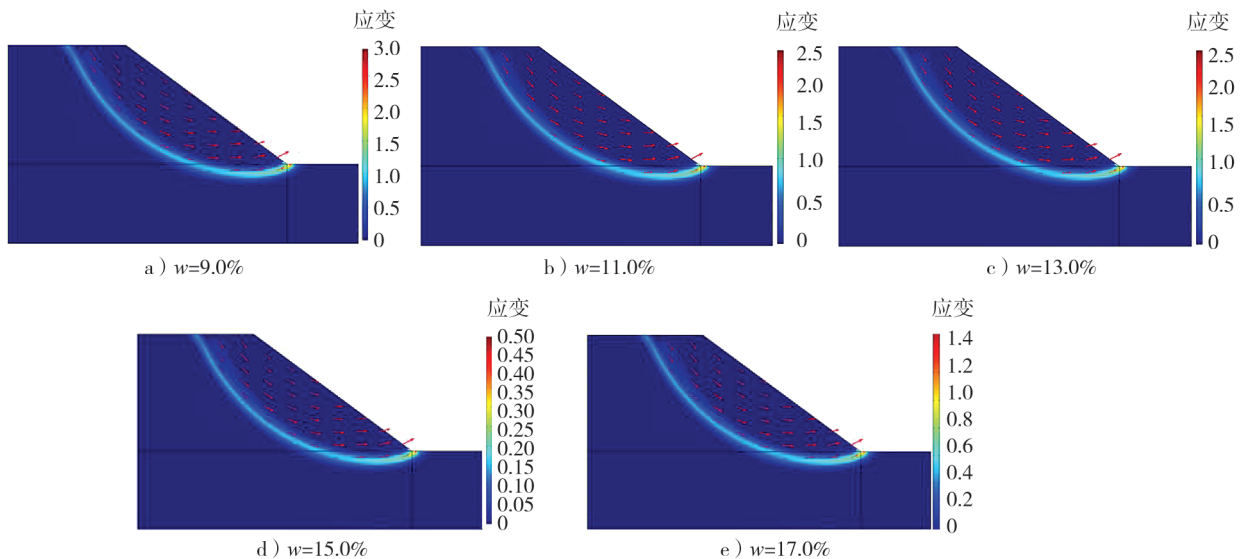


图2 不同含水率下泥岩填料路基边坡有效塑性应变云图

由图2可知:泥岩填料路基边坡发生滑塌时,其有效塑性应变区域贯通,可认为泥岩边坡路基发生塑性破坏,此时的稳定系数即为泥岩填料路基边坡安全稳定系数 F_r 。

泥岩填料路基边坡 F_r 与 w 的关系曲线如图3所示。由图3可知:其他影响因素不变,泥岩填料的含水率由9.0%增至17.0%时, F_r 由2.76呈直线趋势减至1.50。

根据图3对 F_r 线性拟合,得到 $F_r = -0.145w + 4.073$, 相关系数 $R = 0.95352$ 。泥岩填料含水率为21.2%时,路基边坡的 F_r 降至1,边坡失稳。现场施工时须严格控制泥岩填料的含水率,不能超过21.2%。

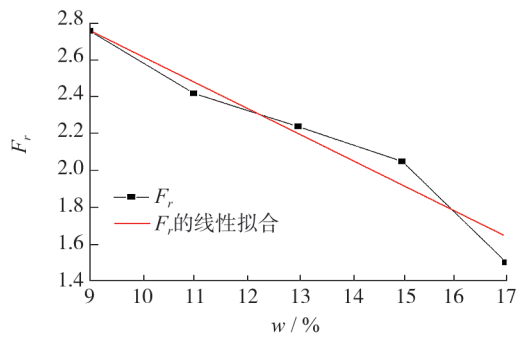


图3 泥岩填料路基边坡 F_r 与 w 关系曲线

2.2 压实度

在含水率相同、固体颗粒不可压缩,仅改变孔隙率的情况下计算模型压实度,模拟泥岩填料压实度对边坡稳定性的影响。设泥岩路基填料边坡斜率为1:2.5,模拟分析压实度 K 分别为90%、92%、94%、96%、98%时边坡的有效塑性应变,结果如图4所示。

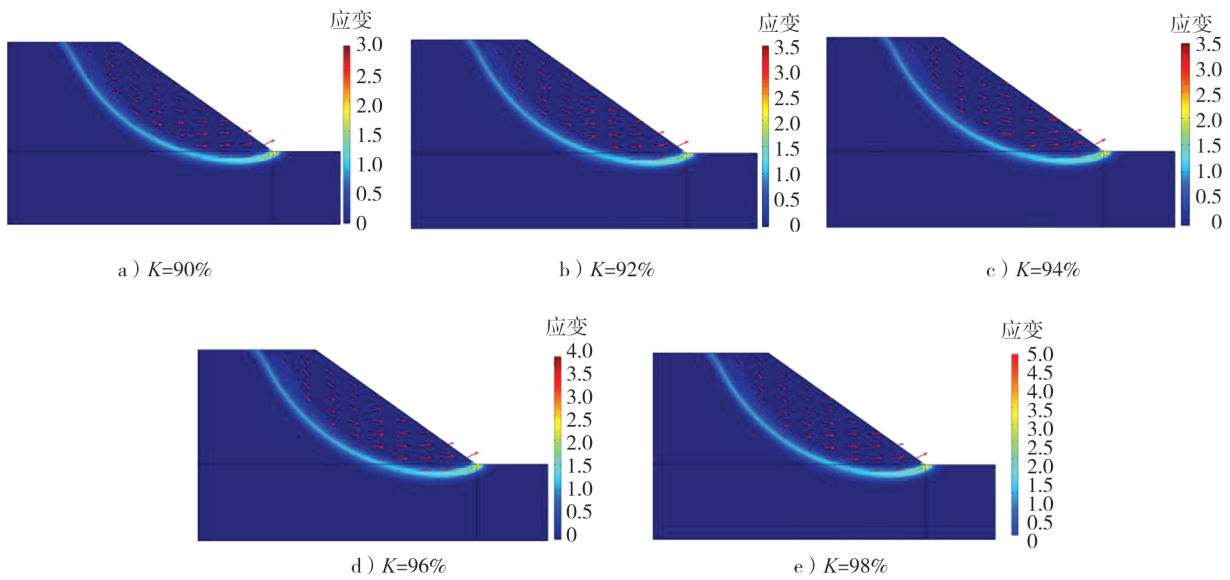


图4 不同 K 下泥岩填料路基边坡有效塑性应变云图

由图4可知: K 由90%增至98%,泥岩填料路基边坡发生破坏时的最大有效塑性应变由3.0增至5.0。随泥岩填料压实度的增大,泥岩填料路基边坡的稳定性逐渐增强,且增长率越来越大。

为进一步分析泥岩填料路基边坡压实度对泥岩填料边坡稳定性的影响,研究基于泥岩填料路基边坡有效塑性应变区域发生贯通时的黏聚力和内摩擦角,获得泥岩填料路基边坡稳定安全系数 F_r 与压实度 K 的关系曲线,如图5所示。

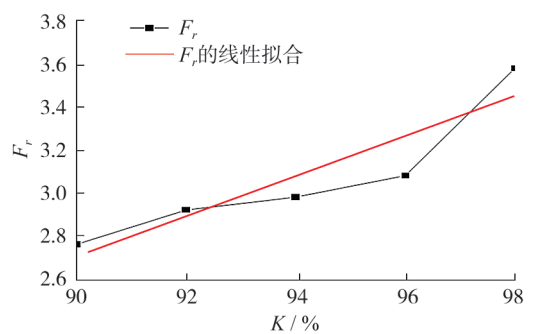


图5 泥岩填料路基边坡 F_r 与 K 关系曲线

由图5可知:泥岩填料的压实度由90%增至98%,泥岩填料路基边坡 F_r 由2.76增至3.58。根据图5拟合压实度影响下泥岩填料路基边坡的安全稳定系数 $F_r = 0.09K - 5.396$, 相关系数 $R = 0.83782$ 。

3 自重应力状态下泥岩填料路用稳定阈值分析

采用软件 COMSOL Multiphysics 模拟分析各因素影响下的泥岩填料路基边坡位移,得到压实度与含水率影响下泥岩填料路基边坡的位移,可获得泥岩填料路基边坡发生破坏时边坡不同位置处的极限位移

变化,将该位移与实际工程应用中通过位移传感器监测获得的边坡各位置处水平位移对比分析。

模拟选取泥岩填料路基边坡坡脚处、坡面中、坡顶及边坡内部距坡顶 0.20、0.30、0.40、0.45、0.50 m 处作为本次模拟所得泥岩填料路基边坡失稳破坏阈值参考点,位移传感器设定位置如图 1 所示。

3.1 不同稳定状态下泥岩填料路基边坡的位移

根据文献[15]对泥岩填料的安全稳定系数要求,模拟计算各因素综合影响下泥岩填料路基边坡处于基本稳定状态、欠稳定状态及不稳定状态时的极限水平位移,结果如图 6 所示。

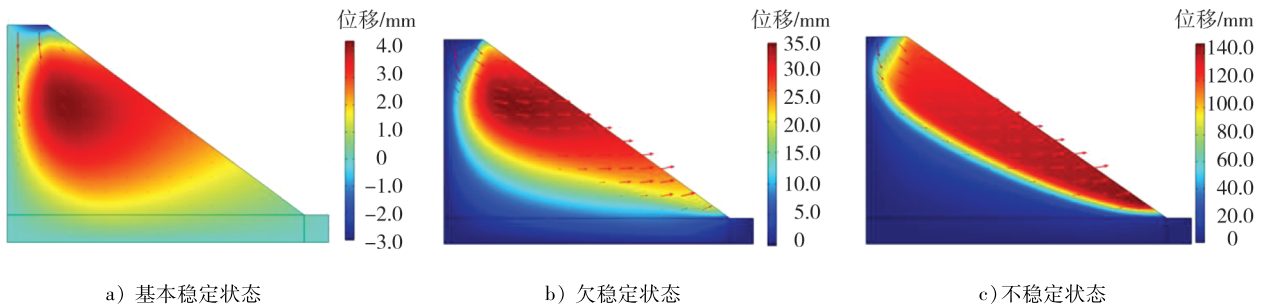


图 6 不同稳定状态下泥岩填料路基边坡的水平位移云图

由图 6 可知:泥岩填料路基边坡处于基本稳定状态时,泥岩填料的极限水平位移较小,最大极限位移为 4.0 mm,位于坡面中与坡顶间;泥岩填料路基边坡处于欠稳定状态时,泥岩填料路基边坡的最大极限水平位移为 40.0 mm,是基本稳定状态时的 10 倍,最大极限水平位移出现位置仍在坡顶至坡面间,但逐渐向坡脚移动;泥岩填料路基边坡处于不稳定状态时,泥岩填料路基边坡的最大极限水平位移为 140.0 mm,为欠稳定状态时的 3.5 倍,最大极限水平位移出现位置更靠近坡脚。

可将泥岩填料路基边坡处于稳定、欠稳定和 unstable 状态时极限水平位移 4.0、40.0、140.0 mm 作为泥岩填料路基边坡不同稳定状态的阈值。

3.2 含水率对不同泥岩填料边坡稳定阈值的影响

为获得含水率对泥岩路基边坡稳定阈值影响,分析泥岩填料路基边坡各观测点在不同含水率下,边坡处于不稳定、欠稳定、基本稳定 3 个状态时的极限水平位移变化状态,结果如图 7 所示。

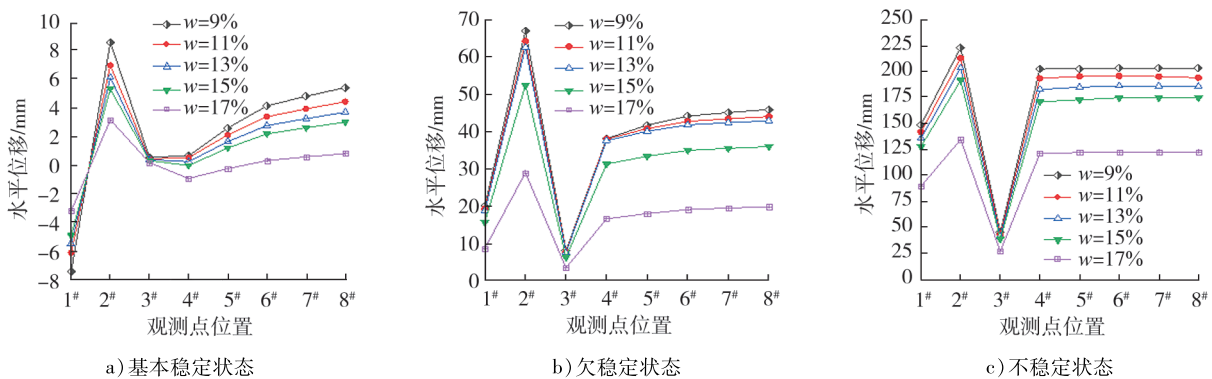


图 7 不同含水率下各观测点的极限水平位移变化曲线

由图 7 可知:随含水率的增大,各观测点在不同状态时的极限水平位移逐渐减小。泥岩填料路基边坡处于基本稳定状态,含水率由 9.0% 增至 17.0% 时,各观测点的极限水平位移减小约 0.25 倍,坡面中部减小最多,约为 5.5 mm,其次为距坡顶 50 mm 处、坡顶及距坡顶 45 mm 处,分别减小约 4.6、4.3、4.3 mm,坡脚处减小最少,约为 0.4 mm;处于欠稳定状态时,泥岩填料路基边坡的含水率由 9.0% 增至 17.0% 时,各观测点的极限水平位移减小约 0.4 倍,坡面中部减小最多,为 38.0 mm,其次为边坡内部,均减小约 24.0 mm,坡顶减小 11.0 mm,坡脚处减小最少,为 4.6 mm;处于不稳定状态时,泥岩填料路基边坡的含水率由 9.0% 增至 17.0% 时,各观测点的极限水平位移减小约 0.6 倍,坡面中部减小最多,为 88.0 mm,其次

为边坡内部,均减小 80.0 mm,坡顶处减小约 59.0 mm,坡脚处仍最少,仅减小 18.0 mm。

泥岩填料路基边坡的含水率对泥岩填料路基边坡稳定阈值影响不及压实度大,但对边坡处于不稳定及欠稳定状态时的影响较大,做好路基防水能较大程度增大泥岩填料路基的路用性能^[16-18]。

3.3 压实度对不同泥岩填料路基边坡稳定阈值影响

为获得压实度对泥岩路基边坡稳定阈值影响,分析泥岩填料路基边坡各观测点在边坡处于不稳定、欠稳定、基本稳定 3 个状态时的极限水平位移变化状态,结果如图 8 所示。

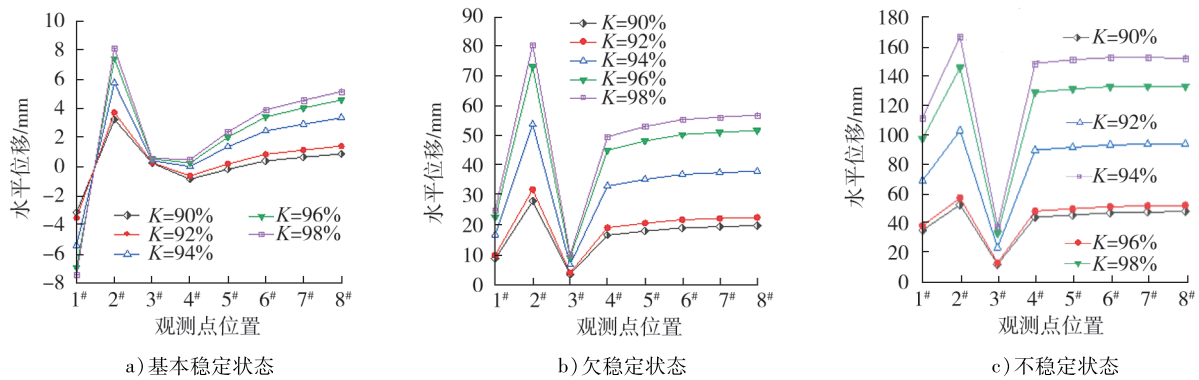


图 8 不同压实度下各观测点的极限水平位移变化曲线

由图 8 可知:泥岩填料路基边坡处于基本稳定状态,压实度由 90% 增至 98% 时,各观测点的极限水平位移增大 0~5.0 mm,坡面中部增大最多,增大 5.0 mm,其次为距坡顶 50 mm 处,增大 4.0 mm,坡脚处增大最少,为 0.4 mm;泥岩填料路基边坡处于欠稳定状态,压实度由 90% 增至 98% 时,各观测点的极限水平位移增大 1.9 倍,坡面中部增大最多,为 52.0 mm,其次为边坡内部各点,均增大 35.0 mm,坡顶处增大 16.0 mm,坡脚处的极限水平位移增大最少,为 6.0 mm;泥岩填料路基边坡处于不稳定状态,压实度由 90% 增至 98% 时,各观测点的极限水平位移增大 1.7 倍,坡面中部增大最多,为 91.0 mm,其次为边坡内各点,增大 82.0 mm,坡顶处增大 61.0 mm,坡脚处增大最少,约为 18.0 mm。

处于基本稳定状态时,随压实度的增大,泥岩填料路基边坡的极限水平位移总体变化较小。泥岩填料路基边坡压实度对泥岩填料路基边坡处于不稳定状态和欠稳定状态时的影响较大,增大压实度能较大程度增大泥岩填料的滑动位移,增强泥岩路基的路用性能^[19-21]。

4 结论

采用数值模拟手段,从含水率、压实度研究泥岩填料路基边坡在自重应力作用下的变形规律,基于边坡极限位移明确泥岩填料在基本稳定状态、欠稳定状态、不稳定状态时的阈值。

1) 对不同含水率及压实度下的泥岩填料路基边坡稳定性进行数值模拟研究,发现泥岩填料路基边坡安全系数随含水率的增大而线性减小,随压实度的增大而缓慢增大。

2) 模拟获得应力场作用下泥岩填料路基边坡处于基本稳定状态、欠稳定状态、不稳定状态时的极限水平位移,得到单应力场作用下泥岩填料路用性能阈值,发现在不同压实度、含水率影响下,泥岩填料路基边坡在处于基本稳定状态时的极限水平位移变化约为 0~10 mm;处于欠稳定状态时,极限水平位移变化为 10~50 mm;处于不稳定状态时,极限水平位移变化超过 50 mm。在泥岩填料路基边坡处于欠稳定状态后,应及时发出预警,并及时采取措施加固处理。

参考文献:

[1] 陈羽,张静波,杨露,等. 惠罗高速风化炭质泥岩作路基填料的试验研究[J]. 公路工程,2017,42(5):32-37.

CHEN Yu, ZHANG Jingbo, YANG Lu, et al. Research on the experiment of weathered carbonaceous mudstone as subgrade

- filler in Huishui-Luodian Expressway[J]. Highway Engineering, 2017, 42(5): 32-37.
- [2] 高曙光, 高晖, 肖尊群, 等. 某高速公路红层泥岩路基填料改良试验研究[J]. 路基工程, 2018(3): 107-112.
GAO Shuguang, GAO Hui, XIAO Zunqun, et al. Experimental study on improvement of red mudstone subgrade filler on an expressway[J]. Subgrade Engineering, 2018(3): 107-112.
- [3] 阮毅, 柳光磊, 刘志芳, 等. 酸性环境对红层泥岩公路路基填料崩解特性的影响研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(5): 75-79.
RUAN Yi, LIU Guanglei, LIU Zhifang, et al. Influence of acid environment on disintegration characteristics of red mudstone highway subgrade filler[J]. Safety and Environment Engineering, 2021, 28(5): 75-79.
- [4] 刘先峰, 马杰, 袁胜洋, 等. 干密度和含水率对压实红层泥岩路基填料强度特性的影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(10): 2910-2918.
LIU Xianfeng, MA Jie, YUAN Shengyang, et al. Experiment research on the influence of dry density and water content on the strength characteristics of compacted red mudstone fill material[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(10): 2910-2918.
- [5] 姚海林, 郑少河, 李文斌, 等. 降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1034-1039.
YAO Hailin, ZHENG Shaohu, LI Wenbin, et al. Parametric study on the effect of rain infiltration on stability of unsaturated expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1034-1039.
- [6] 邱恩喜, 薛元, 刘洋. 红层软岩边坡稳定性影响因素分析[J]. 铁道建筑, 2015(10): 122-125.
- [7] 白志鹏, 马天驰, 尹红亮, 等. 红层泥岩在不同浸水条件下填料强度特性试验研究[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(5): 37-42.
BAI Zhipeng, MA Tianchi, YIN Hongliang, et al. Experimental study on filler strength features of red rocks mudstone under different soaking condition[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(5): 37-42.
- [8] 郭永春, 赵峰先, 闫圣龙, 等. 红层泥岩三轴膨胀力的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 87-93.
GUO Yongchun, ZHAO Fengxian, YAN Shenglong, et al. An experimental study of the triaxial expansion force of red-bed mudstone[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 87-93.
- [9] 司文明, 庞永海. 川中红层泥岩高速铁路基上拱病害处理设计[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(3): 96-99.
SI Wenming, PANG Yonghai. The design of disease treatment for the upheaval of subgrade of high-speed railway on red bed mudstone in Central Sichuan[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(3): 96-99.
- [10] 李明洪. 成安渝高速公路斜坡地段红层填料路基病害发生机理与治理措施[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
LI Minghong. Disease mechanism and treatment measures of red filling subgrade in the declivity sections of Chengdu-Anyue-Chongqing Expressway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [11] 余云燕. 甘肃省红层泥岩地区公路路基沉降病害形成机理及处治技术研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
YU Yunyan. Study on formation mechanism and treatment technology of highway subgrade settlement disease in red mudstone area of Gansu Province[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [12] 潘宇雄, 袁厚海. 干湿循环条件下泥岩路基填料路用性能的试验研究[J]. 路基工程, 2020(4): 53-56.
PAN Yuxiong, YUAN Houhai. Experimental study on pavement of mudstone subgrade filling under dry-wet cycle[J]. Subgrade Engineering, 2020(4): 53-56.
- [13] 吕国伟. 明董高速泥岩路基填料的实验报告[R]. 济南: 山东交通学院公路检测中心, 2022: 3-5.
LÜ Guowei. Experimental report on mudstone roadbed filler for Mingdong Expressway[R]. Jinan: Shandong Jiaotong University Highway Inspection Center, 2022: 3-5.
- [14] 杨国宇. 露天矿泥岩水敏性特征及其对边坡稳定性的影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
YANG Guoyu. Study on water sensitivity characteristics of mudstone in open pit mine and its influence on slope stability[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 重庆市设计院, 中国建设技术集团有限公司. 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.
- [16] 韦世贵. 广西航运枢纽工程新近系泥岩岩土参数取值[J]. 水运工程, 2023(11): 198-203.
WEI Shigui. Parameter values of Neogene mudstone in Guangxi shipping hub project[J]. Port & Water Engineering, 2023

- (11):198-203.
- [17] 曾铃,邱健,匡波,等. 干湿循环作用下预崩解炭质泥岩强度特性及其劣化机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023,54(9):3635-3646.
- ZENG Ling, QIU Jian, KUANG Bo, et al. Strength characteristics and deterioration mechanism of pre-disintegrated carbonaceous mudstone in wetting and drying cycles[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023,54(9):3635-3646.
- [18] 罗伟,姜智予,李佳宝,等. 不同雨型循环作用下边坡渗流场及稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2023,23(25):10918-10925.
- LUO Wei, JIANG Zhiyu, LI Jiabao, et al. Seepage field and stability analysis of slope under different rain type circulation [J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(25):10918-10925.
- [19] 戴前伟,朱泽龙,韩行进,等. 基于无单元 Galerkin 法的饱和-非饱和土石坝渗流正演模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2023,34(2):171-179.
- DAI Qianwei, ZHU Zelong, HAN Xingjin, et al. Simulation of seepage in saturated-unsaturated earth-rock dam based on element-free Galerkin method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023,34(2):171-179.
- [20] 吕雨桦,梁德贤,王莹,等. 降雨条件下非饱和土边坡渗流-应力耦合分析[J]. 桂林理工大学学报, 2021,41(2):318-324.
- LÜ Yuhua, LIANG Dexian, WANG Ying, et al. Seepage-stress coupling analysis of unsaturated soil slope under rainfall infiltration[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2021,41(2):318-324.
- [21] 郝建峰,梁冰,孙维吉,等. 煤与瓦斯的热流固耦合关系研究现状及展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2022,39(5):1051-1060.
- HAO Jianfeng, LIANG Bing, SUN Weiji, et al. State-of-the-art and prospect of thermo-hydro-mechanical coupling relation between coal and gas[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(5):1051-1060.

Influencing factors of the stability of mudstone-filled road subgrade slopes

DU Yilong¹, LI Qinglin¹, ZHONG Guangjun¹, XUN Rongjian¹, CHEN Wenwen²

1. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan 250014, China; 2. Jinan Science and Technology School, Jinan 250014, China

Abstract: In order to increase the utilization rate of solid waste such as mudstone in practical engineering, the finite element software COMSOL Multiphysics is used to analyze the displacement of mudstone-filled slope in different water content and compaction degrees under conditions of basic stability, under stability, and instability. The factors influencing the slope stability are studied. The research shows that the slope stability of mudstone-filled decreases linearly with increasing water content and increases slowly with increasing compaction degree. The ultimate horizontal displacement of the mudstone-filled slope in different stability states (basic stability, under stability, instability) is analyzed, and the variation of the threshold of road performance of mudstone fill under single stress field is determined. Water content and compaction degree have a greater impact on the slope in under stability and instability. This study can provide monitoring basis for stability warning of mudstone-filled slope.

Keywords: mudstone; slope stability; threshold; water content; compaction degree

(责任编辑:王惠)