

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202401202024101989

文章编号:1674-599X(2024)05-0080-07

引用格式:伍雪梅,周滔.羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩工程特性研究[J].交通科学与工程,2024,40(5):80-86.

Citation: WU Xuemei, ZHOU Tao. Engineering properties of hydroxycellulose modified disintegrated carbonaceous mudstone [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5): 80-86.

羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩工程特性研究

伍雪梅¹, 周滔²

(1.湖南高速设计咨询研究院有限公司,湖南 长沙 410114;
2.中国建筑第六工程局有限公司交通建设分公司,天津 300451)

摘 要:为探究羟基纤维素对预崩解炭质泥岩工程特性的改良效果,开展了无侧限抗压强度、干湿循环以及理化特性的试验,以分析掺量、养护时间、干湿循环次数对预崩解炭质泥岩力学和理化特性的影响,并结合扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)技术揭示了羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩的微观机制。结果表明:在养护时间相同的情况下,改良后的预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度随羟基纤维素掺量的增加呈现出先增大后减小的趋势,且当掺量为4%时,其无侧限抗压强度达到最大值;当羟基纤维素的掺量保持不变时,随着养护时间的增加,改良后的预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度也随之增加,并在养护14 d后趋于稳定;在干湿循环作用下,经羟基纤维素改良后的预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度变化符合指数函数规律;改良后的预崩解炭质泥岩的pH基本保持不变,而TDS值、电导率及盐度均有所降低;羟基纤维素主要通过胶结颗粒和填充孔隙的方式来增强预崩解炭质泥岩的力学性能。

关键词:路堤工程;炭质泥岩;羟基纤维素;工程特性;微观机制

中图分类号:TU411 文献标志码:A

Engineering properties of hydroxycellulose modified disintegrated carbonaceous mudstone

WU Xuemei¹, ZHOU Tao²

(1.Hunan Expressway Design & Research Institute Co., Ltd., Changsha 410114, China; 2.Transportation Construction Branch of China Construction Sixth Engineering Bureau Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract: To investigate the engineering properties of hydroxycellulose modified disintegrated carbonaceous mudstone, this study conducted tests on its unconfined compressive strength, properties under dry and wet cycles, and physical and chemical properties. The effects of dosage, curing time, and the number of dry and wet cycles on the mechanical, physical, and chemical properties of disintegrated carbonaceous mudstone were analyzed, and the micromechanisms of hydroxycellulose modified disintegrated carbonaceous mudstone were revealed with the help of a scanning electron microscope (SEM). The unconfined compressive strength of modified disintegrated carbonaceous mudstone showed a tendency to increase first and then decrease with the increase in hydroxycellulose dosage under fixed curing time. It reached the maximum when the dosage was 4%. When the dosage of hydroxycellulose kept unchanged, the unconfined compressive strength of modified disintegrated carbonaceous mudstone increased with the increase in curing time and tended to level off after curing

收稿日期:2024-01-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52078060)

通信作者:伍雪梅(1989—),女,工程师,主要从事边坡生态防护方面的研究工作。E-mail:894020671@qq.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

for 14 d. The unconfined compressive strength of hydroxycellulose modified disintegrated carbonaceous mudstone conformed to the trend of the exponential function. The pH of modified disintegrated carbonaceous mudstone remained unchanged, while its TDS value, conductivity, and salinity decreased. Hydroxycellulose enhances the mechanical properties of disintegrated carbonaceous mudstone mainly by cementing particles and filling pores.

Key words: embankment engineering; carbonaceous mudstone; hydroxycellulose; engineering property; micromechanism

炭质泥岩广泛分布于我国西南地区,其特点是结构疏松、富含黏土矿物、遇水易崩解^[1]。在公路工程建设开挖过程中会产生大量的炭质泥岩堆料,部分工程将其直接用作路堤填料。然而,在外界环境的影响下,路堤内外部易发生严重损伤,这会加速路堤边坡的失稳与破坏^[2]。因此,将炭质泥岩作为路堤填料时,需要先进行相应的改良处理。

为了满足实际工程的需要,众多学者已对岩土体的改良开展了大量研究^[3-4]。杨建林等^[5]研究发现水泥材料能够有效填充重塑泥岩中存在的众多孔隙,增强其胶结作用,显著提升其抗拉强度。HSIAO等^[6]研究了高密度水泥掺量对泥岩力学特性的影响规律。此外,微生物改良技术作为新兴研究领域,逐渐展现出良好的发展潜力,成为当前的研究热点。李中义等^[7]利用巴氏芽孢杆菌搭配胶结液对粉土进行改良,发现草本植物对微生物固化材料反应良好,不仅能提高植物发芽率,还能促进植物生长。曾庆杰等^[8]则研究出了微生物改良水泥土的试样制备方法,并探讨了其力学增长特性。高分子固化材料因其种类丰富且对环境友好的特性,目前越来越多地被运用于实际工程中^[9]。基于此,部分学者进行了深入研究,苏成林^[10]发现,在软岩边坡表面喷涂聚合物固化剂,可有效提高边坡稳定性并增强植被种植效果。这一结论与吴忠等^[11]的研究成果一致。高分子固化材料中的木质素能够有效增强泥岩和膨胀土的力学性能^[12-13],而瓜尔胶不仅能显著提升纤维黄土的抗侵蚀能力和水土保持能力^[14],而且能增强泥岩坡表的抗冲刷性能^[15]。对于粉土而言,将胶结型高聚物掺入其中并适当延长养护龄期,会显著提升其强度。由此可见,常见的边坡表层固化材料可分为传统无机胶凝材料、有机高分子材料以及生物聚合物材料三种^[16-18]。然而,由于传统无机胶凝材料对环境影响较大且黏结性不强等,其并不适用于炭质泥岩边坡表层的固化处理。

综上所述,本文选取羟基纤维素对预崩解炭质泥岩进行改良处理,并通过无侧限抗压强度试验、崩解试验综合评价羟基纤维素对预崩解炭质泥岩力学特性及水稳性能的影响,以期为炭质泥岩长期稳定性能的研究提供科学参考。

1 材料与试验

1.1 试验材料

试验所用炭质泥岩取自广西壮族自治区柳州市某高速公路。试验时将原样置于室外,待其完全崩解后筛分备用。并依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中的比重瓶法测得比重为2.66;通过击实试验获得炭质泥岩土最大干密度和最佳含水率分别为2.09 g/cm³和10.56%;利用液塑限仪测得其液限为32.9%,塑限为25.3%,塑限指数为7.6。利用X射线衍射分析预崩解炭质泥岩的矿物成分,如图1所示。由图1可知,其矿物成分主要为石英、白云母、高岭石、伊利石、方解石等,经X射线荧光光谱检测出其化学成分为SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃及CaO。

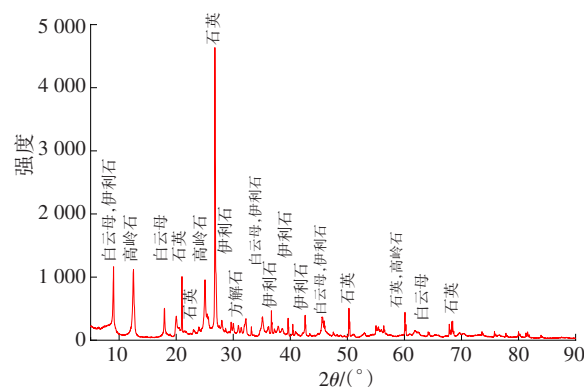


图1 预崩解炭质泥岩X射线衍射谱

Fig. 1 XRD pattern of disintegrated carbonaceous mudstone

羟基纤维素是一种白色或淡黄色、无味、无毒的纤维状或粉末状固体,其分子式为C₂H₆O₂·x,结构式如图2所示。羟基纤维素溶于水可形成黏稠的胶

状物,具有增稠、悬浮、黏合、乳化、分散、保持水分及保护胶体等作用。

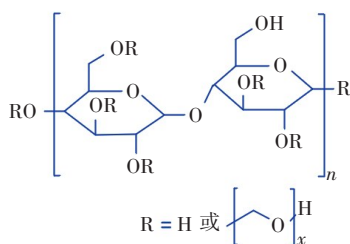


图2 羟基纤维素结构式

Fig. 2 The structural formula of hydroxy cellulose

1.2 试样制备

试验样品采用如下方法制备:首先,将置于室外且完全崩解的炭质泥岩过2 mm筛,随后置于103℃的烘箱内进行完全干燥处理;接着,将一定掺量的羟基纤维素与定量水混合均匀,再将此混合液与干燥的预崩解炭质泥岩混合,搅拌均匀后焖料24 h;最后,采用静压法分三层压实,制备尺寸为50 mm×100 mm的圆柱形试样。试样制备完成后,分别置于室内自然条件下养护3、7、14、28 d。为了深入探讨羟基纤维素对预崩解炭质泥岩的改良效果,本文开展了不同羟基纤维素掺量、不同养护时间下的改良预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度试验,以及理化特性(包括pH、硬度、TDS、电导率等)试验。同时,通过扫描电镜(SEM)试验揭示了羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩的作用机制。具体试验方案如表1所示,其中含水率采用最优含水率。

表1 试验方案
Table 1 Test protocol

试验	羟基纤维素 掺量/%	龄期/d	干湿循环次数
无侧限抗压强度试验	0、1、2、3、4、5	3、7、14、28	0
干湿循环试验	0、4	14	0、2、4、6、8、10
理化特性试验	0、1、2、3、4、5	14	0
SEM试验	0、4	14	0

1.3 试验方法

1.3.1 无侧限抗压强度试验

改良预崩解炭质泥岩的力学强度是评价其改良效果的关键指标之一。因此,本文采用万能试验机对不同养护龄期和不同羟基纤维素掺量下的改良预崩解炭质泥岩进行了无侧限抗压强度试验,试

验设置轴向应变的速率为1 mm/min,当轴向应力下降至最大轴向应力的1/3时,终止试验。

1.3.2 干湿循环试验

为了深入研究经羟基纤维素改良后预崩解炭质泥岩在干湿循环作用下的性能变化规律,试验设计如下:首先,将经过14 d标准养护的试样放置于三轴饱和器中,真空饱和24 h,随后,将饱和后的试样转移至50℃的烘箱中干燥24 h。此为一个完整的干湿循环过程。每经历两个干湿循环过程后,即对试样进行一次无侧限抗压强度测试,以此评估材料在干湿交替环境下的稳定性与耐久性。

1.3.3 理化特性试验

固化剂主要影响改性土周边地下水的硬度、酸碱度及土体的酸碱度。为了准确评估这一影响,采用离心技术有效分离出改良预崩解炭质泥岩的析出液,进而对其pH及硬度进行精确测定。pH及硬度测量步骤如下:

① 取质量为10.00 g、已养护7 d的改良预崩解炭质泥岩试样,将其碾碎并过0.5 mm筛以去除大颗粒杂质,随后进行干燥及备用。

② 将干燥后的改良预崩解炭质泥岩置于50 mL的分离管中,在管中加入30 mL去离子水后进行密封并置于离心机中进行离心(为保证离心效果,应保证各试样的质量误差不大于0.01 g)。设置离心机转速为10 000 r/min,在离心30 min后,停止离心。

③ 将离心后的析出液倒入密封好的50 mL塑料试管中,利用雷磁PHS-3E型pH计测量析出液的pH,同时利用雷磁DDS-11A型电导率仪测量析出液的电导率及硬度。

2 试验数据分析

2.1 改良预崩解炭质泥岩无侧限抗压强度

图3为在不同养护时间(3、7、14、28 d)下,掺入不同比例羟基纤维素后改良预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度变化情况。由图3可知,当养护时间相同时,预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度随着羟基纤维素掺量的增加呈现出先增大后减小的趋势,且在羟基纤维素掺量达到4%时,其无侧限抗压强度达到峰值。养护7 d时,未掺入羟基纤维素的预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度为603.40 kPa,掺入1%的羟基纤维素后,改良预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度为753.99 kPa,增长了24.96%;掺入

4%的羟基纤维素后,改良预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度达到峰值,为1 036.68 kPa,与未掺入羟基纤维素的预崩解炭质泥岩相比,其无侧限抗压强度增长了71.81%;当羟基纤维素掺量为5%时,改良预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度为974.29 kPa,与未掺入羟基纤维素的预崩解炭质泥岩相比,其无侧限抗压强度增长了61.47%,而与羟基纤维素掺量为4%的改良预崩解炭质泥岩相比,其无侧限抗压强度减小了6.02%。这主要是由于掺入羟基纤维素后,羟基纤维素形成的凝胶能够有效胶结预崩解炭质泥岩的颗粒,促使它们形成稳定的团聚体结构,从而显著增强了整体的力学性能。然而,当羟基纤维素掺量超过4%时,羟基纤维素凝胶浓度较大,会导致预崩解炭质泥岩流动性较差,养护过程中羟基纤维素难以随水分迁移而均匀分布在试样中,形成了一定的薄弱区域,降低了预崩解炭质泥岩力学性能。

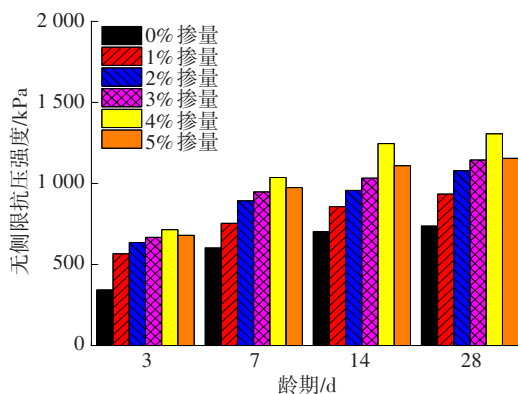


图3 改良预崩解炭质泥岩无侧限抗压强度

Fig. 3 Unconfined compressive strength of modified disintegrated carbonaceous mudstone

如图3所示,当羟基纤维素掺量相同时,随着养护时间的增长,经羟基纤维素改良的预崩解炭质泥岩无侧限抗压强度也显著增长,且在养护14 d后趋于稳定。未掺入羟基纤维素的预崩解炭质泥岩养护3、7、14、28 d后的无侧限抗压强度分别为344.51、603.40、703.45、738.51 kPa,这一强度增长主要归因于试样在养护过程中会缓慢失水,促进了颗粒间的胶结作用,从而增强了整体结构强度。当羟基纤维素掺量为4%时,羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩养护3、7、14、28 d后的无侧限抗压强度分别为714.89、1 036.68、1 245.76、1 306.78 kPa,可见随着养护时间的增长,虽然羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩无侧限抗压强度的增长幅度逐渐减小,但其整体结构强度有明显提升。一方面,这可能是由于羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩试样缓慢失水造成

羟基纤维素-预崩解炭质泥岩团聚物凝结;另一方面,随着养护时间的增长,羟基纤维素凝胶随水分迁移,使羟基纤维素凝胶分布更均匀。

2.2 干湿循环效应

养护14 d后,羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩无侧限抗压强度随干湿循环次数的变化规律如图4所示。由图4可知,掺入羟基纤维素的预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度随着干湿循环次数的增加呈现显著的降低趋势。经历10次干湿循环后,未掺入羟基纤维素的预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度为250.56 kPa,强度保持率仅为未经历干湿循环作用时的35.58%;添加4%羟基纤维素后,随着干湿循环次数的增加,其无侧限抗压强度也呈减小的趋势,但减小幅度比未掺入羟基纤维素的预崩解炭质泥岩的小。经历10次干湿循环后,4%掺量的羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度为888.68 kPa,强度保持率为71.33%。这主要是由于未经处理的预崩解炭质泥岩结构较为疏松,水能通过孔隙迅速进入试样内部,降低预崩解炭质泥岩颗粒间的胶结作用力,产生软化现象,甚至引发结构破坏。羟基纤维素能增强预崩解炭质泥岩颗粒间的胶结力,同时能填充孔隙,堵塞进水通道。因而掺入羟基纤维素后改良预崩解炭质泥岩强度保持率得到显著提升。通过拟合后发现,预崩解炭质泥岩及羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度均符合指数函数的变化规律。

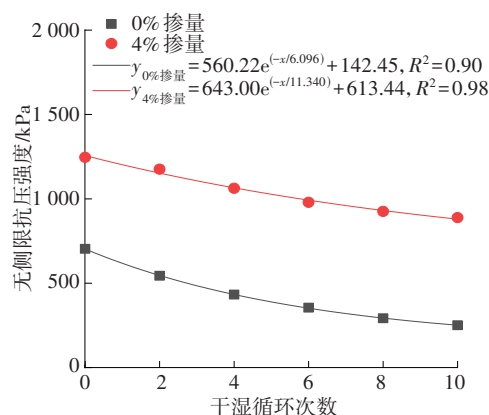


图4 干湿循环作用下改良预崩解炭质泥岩无侧限抗压强度

Fig. 4 Unconfined compressive strengths of disintegrated carbonaceous mudstone before and after modification under the action of dry and wet cycles

2.3 改良预崩解炭质泥岩理化特性

不同掺量羟基纤维素改良后的预崩解炭质泥岩的理化特性如图5所示。从图5中可以看出,未

改良的预崩解炭质泥岩的pH、TDS值、电导率及盐度分别为8.17、492 mg/L、1 083 $\mu\text{m}/\text{cm}$ 、0.55‰；随着羟基纤维素掺量的增加,改良预崩解炭质泥岩的pH基本保持不变,TDS值、电导率及盐度均随之减小,且TDS值下降幅度逐渐减小,电导率及盐度下降幅度逐渐增大。这主要是由于羟基纤维素的黏度较大,且其酸碱性呈中性,故在预崩解炭质泥岩中加入羟基纤维素并不能使其pH发生较大的改变,但羟基纤维素的包覆及黏聚作用会使预崩解炭质泥岩溶于水后析出的离子量减小,导致TDS值、电导率及盐度随羟基纤维素掺量的增加而减小。

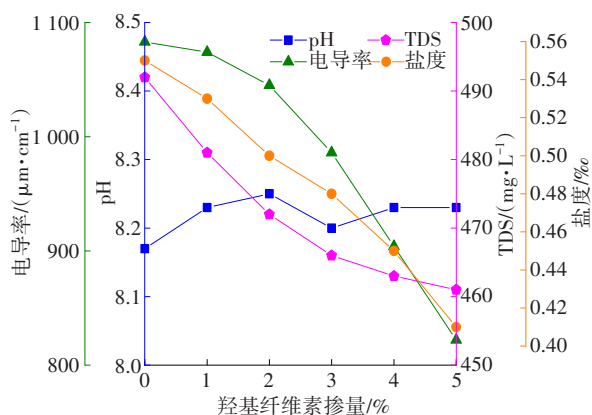


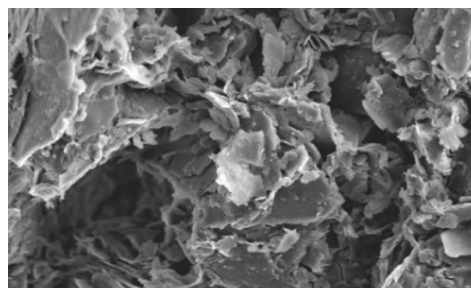
图5 改良预崩解炭质泥岩理化特性

Fig. 5 Physical and chemical properties of modified disintegrated carbonaceous mudstone

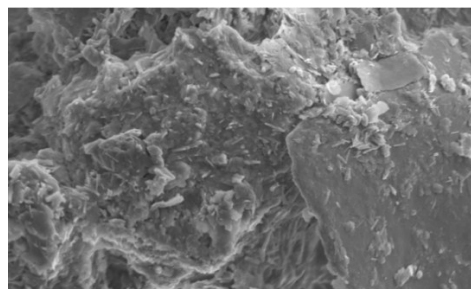
2.4 改良预崩解炭质泥岩微观机制

图6为羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩的SEM图。从图6(a)可以看出,未掺入羟基纤维素的预崩解炭质泥岩的微观结构主要以片状为主,片状结构间胶结不明显,结构松散,颗粒间的孔隙较多且存在明显的孔洞。从图6(b)可以看出,经4%掺量的羟基纤维素改良的预崩解炭质泥岩结构致密,羟基纤维素间胶结明显,颗粒凝聚成大的羟基纤维素-预崩解炭质泥岩胶结体,且改良后预崩解炭质泥岩的颗粒胶结紧密,颗粒间的微观孔隙显著减少。由此可见,羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩的作用机制可归纳为两部分:1) 羟基纤维素的胶结作用。羟基纤维素溶于水后形成黏结性较大的溶胶,掺入预崩解炭质泥岩后,与预崩解炭质泥岩颗粒形成结构稳定的羟基纤维素-预崩解炭质泥岩胶结体,增强了其力学特性。2) 羟基纤维素的孔隙填充作用。羟基纤维素掺入预崩解炭质泥岩后,羟基纤维素形成的凝胶迅速填充预崩解炭质泥岩颗粒间的微观孔隙,

封堵水分进出通道,使改良后的预崩解炭质泥岩结构更加致密,增强了其力学特性和水稳性。



(a) 预崩解炭质泥岩



(b) 4% 羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩

图6 羟基纤维素改良前后预崩解炭质泥岩 SEM 图

Fig. 6 SEM image of hydroxycellulose modified disintegrated carbonaceous mudstone

3 结论

本文开展了羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度试验、干湿循环试验、理化特性试验、SEM试验,分析了羟基纤维素对预崩解炭质泥岩的力学特性及水稳性的影响,并通过扫描电子显微镜揭示了羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩的作用机制,得到结论如下:

1) 养护时间相同时,羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度随着羟基纤维素掺量的增加呈现出先增大后减小的趋势,并在掺量为4%时达到最大。

2) 当羟基纤维素掺量相同时,随着养护时间的增长,羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩无侧限抗压强度也随之增长,且在养护14 d后趋于稳定。

3) 随着干湿循环次数的增加,羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩无侧限抗压强度呈现逐渐减小的趋势,且干湿循环10次后,经4%羟基纤维素改良后的预崩解炭质泥岩的无侧限抗压强度保持率为71.33%,远大于未改良的预崩解炭质泥岩。

4) 改良预崩解炭质泥岩的pH基本保持不变,TDS值、电导率及盐度均随羟基纤维素含量的增加而减小,且TDS值下降幅度逐渐减小,电导率及盐

度下降幅度逐渐增大。

5) 经羟基纤维素改良预崩解炭质泥岩后,微观结构致密,羟基纤维素胶结明显,颗粒凝聚成大的羟基纤维素-预崩解炭质泥岩胶结体,且颗粒间的微观孔隙显著减少,其作用机制可分为胶结作用和孔隙填充作用。

参考文献(References):

- [1] 曾铃, 张华麟, 戚双星, 等. 基于能量耗散原理的炭质泥岩崩解特征试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 4181-4189. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.11.037.
ZENG Ling, ZHANG Hualin, QI Shuangxing, et al. Experimental study on disintegration characteristics of carbonaceous mudstone based on energy dissipation principle [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11): 4181-4189. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.11.037.
- [2] 曾铃, 罗锦涛, 侯鹏, 等. 干湿循环作用下预崩解炭质泥岩裂隙发育规律及强度特性[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 1-11. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.09.001.
ZENG Ling, LUO Jintao, HOU Peng, et al. Crack development and strength characteristics of pre-disintegrated carbonaceous mudstone under dry-wet cycles [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 1-11. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.09.001.
- [3] 龚锦林, 柳厚祥, 王真. 石灰改良膨胀土压缩特性及力学特性研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 35-40. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.009.
GONG Jinlin, LIU Houxiang, WANG Zhen. Study on compression characteristics and mechanical properties of lime modified expansive soil [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(4): 35-40. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.009.
- [4] PHAN V T A. Improvement in engineering properties of mudstone in southwestern Taiwan through compaction and a cement additive [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(3): 1833-1843. DOI: 10.1007/s10706-017-0435-1.
- [5] 杨建林, 王来贵, 张鹏, 等. 泥岩试件改性前后拉破坏实验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2812-2819. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0231.
YANG Jianlin, WANG Laigui, ZHANG Peng, et al. Experimental research on tensile failure of mudstone samples before and after modification [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2812-2819. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0231.
- [6] HSIAO D, HSIEH C. Improving mudstone materials in badland in southwestern Taiwan by increasing density and low-cement amount [J]. Applied Sciences, 2022, 12(5): 2290. DOI: 10.3390/app12052290.
- [7] 李中义, 邵光辉, 马志刚. 微生物固化粉土坡面的植物适生性研究[J]. 林业工程学报, 2020, 5(2): 158-163. DOI: 10.13360/j.issn.2096-1359.201903004.
LI Zhongyi, SHAO Guanghui, MA Zhigang. Plant adaptability of silty soil slope protected by microbial solidification [J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(2): 158-163. DOI: 10.13360/j.issn.2096-1359.201903004.
- [8] 曾庆杰, 李悦, 黎金杭, 等. 微生物改性水泥土的制备与力学特性研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(2): 135-140. DOI: 10.11988/ckyyb.20201084.
ZENG Qingjie, LI Yue, LI Jinhang, et al. Preparation and mechanical properties of cement soil modified by *Sporosarcina pasteurii* [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(2): 135-140. DOI: 10.11988/ckyyb.20201084.
- [9] 董金梅, 朱华, 边疆, 等. 高分子材料改性粉土力学特性试验研究及机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 4326-4333. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.117.
DONG Jinmei, ZHU Hua, BIAN Jiang, et al. Experimental study on mechanical properties and mechanism of polymer modified silt [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(sup 2): 4326-4333. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.117.
- [10] 苏成林. 基于聚合物固化剂技术的软岩边坡稳定性研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(2): 40-46. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.02.006.
SU Chenglin. Study on stability of soft rock slope based on polymer curing agent technology [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(2): 40-46. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.02.006.
- [11] 吴忠, 刘瑾, 何勇, 等. 高分子固化剂-植被复合改良砂土抗冲刷特性[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5): 28-33, 70. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2021.05.005.
WU Zhong, LIU Jin, HE Yong, et al. Erosion resistance characteristics of surface sand soil improved by polymer curing agent and vegetation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 28-33, 70. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2021.05.005.
- [12] 樊科伟, 严俊, 刘冬杰, 等. 木质素纤维改性季冻区膨胀土强度特性与微观结构研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 326-334. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.027.
FAN Kewei, YAN Jun, LIU Lingjie, et al. Study on strength characteristics and microstructure of expansive soil treated with lignin fibers in seasonal frozen area [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 326-334. DOI: 10.11817/j.

issn.1672-7207.2022.01.027.

- [13] ZHA H Y, FU H Y, CHEN C Y, et al. The use of eco-friendly lignin as a cementitious material to improve the engineering properties of disintegrated carbonaceous mudstone [J]. Construction and Building Materials, 2022, 359: 129456. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129456.
- [14] 贾卓龙, 晏长根, 李博, 等. 瓜尔豆胶固化纤维黄土的抗侵蚀特性及生态护坡试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44 (10): 1881-1889. DOI: 10.11779/CJGE202210014.
- JIA Zhuolong, YAN Changgen, LI Bo, et al. Experimental study on erosion resistance and ecological slope protection of guar gum-treated fiber-reinforcement loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44 (10): 1881-1889. DOI: 10.11779/CJGE202210014.
- [15] 付宏渊, 查焕奕, 潘浩强, 等. 生物聚合物改良预崩解炭质泥岩水稳性及冲刷试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(7): 2633-2644. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.07.022.
- FU Hongyuan, ZHA Huanyi, PAN Haoqiang, et al. Experimental study on water stability and scour resistance of biopolymer modified disintegrated carbonaceous mudstone [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53 (7): 2633-2644. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.07.022.
- [16] GHADR S, LIU C H, MRUDUNAYANI P, et al. Effects of hydrophilic and hydrophobic nanosilica on the hydromechanical behaviors of mudstone soil [J]. Construction and Building Materials, 2022, 331: 127263. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127263.
- [17] KWON Y M, MOON J H, CHO G C, et al. Xanthan gum biopolymer-based soil treatment as a construction material to mitigate internal erosion of earthen embankment: a field-scale [J]. Construction and Building Materials, 2023, 389: 131716. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131716.
- [18] 罗震宇. 干湿循环作用下改良膨胀土力学特性及微观机制研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(6): 66-74. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022032123121983.
- LUO Zhenyu. Study on mechanical properties of modified expansive soil under the action of dry and wet cycles and its microscopic mechanism [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(6): 66-74. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022032123121983.

(责任编辑:薛仪)

(上接第79页)

- characteristics of ultra-high-performance concrete utilising seawater, sea sand and SCMs [J]. Construction and Building Materials, 2023, 372: 130815. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130815.
- [15] CHOI S J, KIM Y U, OH T G, et al. Compressive strength, chloride ion penetrability, and carbonation characteristic of concrete with mixed slag aggregate [J]. Materials, 2020, 13(4): 940. DOI: 10.3390/ma13040940.
- [16] YANG Z Q, SUI S Y, WANG L G, et al. Improving the chloride binding capacity of cement paste by adding nano- Al_2O_3 : the cases of blended cement pastes [J]. Construction and Building Materials, 2020, 232: 117219. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117219.
- [17] UKPATA J O, BASHEER P A M, BLACK L. Slag hydration and chloride binding in slag cements exposed to a combined chloride-sulphate solution [J]. Construction and Building Materials, 2019, 195: 238-248. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.055.
- [18] 彭晖, 张白. 地聚物混凝土耐久性研究进展[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(5): 1-24. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20231008002.
- PENG Hui, ZHANG Bai. Research progress on the durability of geopolymer concrete [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(5): 1-24. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20231008002.
- [19] FU C Q, YE H L, ZHU K Q, et al. Alkali cation effects on chloride binding of alkali-activated fly ash and metakaolin geopolymers [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 114: 103721. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103721.
- [20] WANG Z Z, WANG B M, YANG D L, et al. Research progress on the chloride binding capability of cement-based composites [J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2020, 128 (5): 238-253. DOI: 10.2109/jcersj.19146.
- [21] ZHU Y G, WAN X M, HAN X, et al. Solidification of chloride ions in alkali-activated slag [J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126219. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126219.
- [22] CAO Y Z, GUO L P, CHEN B, et al. Effect of pre-introduced sodium chloride on cement hydration process [J]. Advances in Cement Research, 2021, 33(12): 526-539. DOI: 10.1680/jadcr.19.00159.
- [23] LI Y, SHEN A Q, LYU Z H, et al. Investigations of chloride ions permeability of pavement concrete under coupled effect of fatigue loading and hydrodynamic pressure [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23 (5): 1659-1674. DOI: 10.1080/10298436.2020.1819540.

(责任编辑:石月珍)