

DOI:10.116544/j.cnki.cn43-1494/u.20220530001

文章编号:1674-599X(2023)02-016-07

引用格式:刘晓萁,何忠明,卢逸恒.考虑应力变化的炭质泥岩粗粒土微观结构特征研究[J].交通科学与工程,2023,39(2):16-22.

Citation: LIU Xiaoqu, HE Zhongming, LU Yiheng, et al. Study on microstructure characteristics of coarse-grained carbonaceous mudstone soil considering stress change[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(2): 16-22.

## 考虑应力变化的炭质泥岩粗粒土微观结构 特征研究

刘晓萁,何忠明,卢逸恒,刘正夫

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**为了探究炭质泥岩粗粒土的强度特性及微观结构变化特征,该文通过开展压汞试验和电镜扫描试验,对不同荷载作用下的炭质泥岩粗粒土微观结构进行分析。研究表明:炭质泥岩粗粒土在不同荷载作用下的微观结构变化主要体现在颗粒排列方式,随着围压的增加,其颗粒排列状态由疏松向密实转变,孔隙体积呈先降低后上升趋势,孔隙多为开放型和半封闭型。同级配的炭质泥岩粗粒土随着围压的增大,孔隙圆形度先增大后减小,分形维数则先减小后增加,对应的孔隙形态面积减小;4种试样在不同围压下的丰度均为0.46~0.51,试样孔隙呈扁圆形态。该研究成果可为炭质泥岩粗粒土路基强度控制提供参考。

**关键词:**炭质泥岩;电镜扫描;压汞试验;微观结构

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

### Study on microstructure characteristics of coarse-grained carbonaceous mudstone soil considering stress change

LIU Xiaoqu, HE Zhongming, LU Yiheng, LIU Zhengfu

(School of Traffic and Transportation on Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To investigate the strength characteristics and microstructure changes of coarse-grained carbonaceous mudstone (CGCM) soil, this paper analyzes the microstructure of CGCM soil under different loads using mercury intrusion porosimetry (MIP) and scanning electronic microscope (SEM) characterization. The research results show that the microstructure changes of CGCM soil under different loads mainly manifest in the change of particle arrangement. With the increase of confining pressure, the particle arrangement state changes from loose to dense, and the pore volume shows a trend of first decreasing and then increasing, with most of the pores being open and semi-closed. For the CFCM soil with the same gradation, with the increase of confining pressure, the pore roundness first increases and then decreases, while the fractal dimension shows a opposite trend, along with the decreasing pore shape area. The abundance of the four samples under different confining pressures is between 0.46 and 0.51, and the pore shape of the samples are oval. The research results of this paper can provide reference for the strength control of CFCM soil subgrade.

**Key words:** carbonaceous mudstone; scanning electron microscope test; mercury pressure experiments; microstructure

收稿日期:2022-05-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51978084);湖南省自然科学基金项目(2020JJ4605)

作者简介:刘晓萁(1996—),女,长沙理工大学硕士生。

炭质泥岩属于软岩,广泛分布于中国西南部,已有研究表明预崩解处理后的炭质泥岩粗粒土可用于路堤填筑<sup>[1]</sup>。炭质泥岩具有低强度、易风化和水稳定性差等缺点,国内部分学者对炭质泥岩作用路堤填料时的强度特性进行了研究,并取得了一些有效成果<sup>[2-4]</sup>。现有研究表明:岩土体所表现出的宏观力学特性与微观结构存在密切关系<sup>[5-6]</sup>。土体微观结构变化是影响其物理力学特性的重要因素<sup>[1]</sup>,在外部荷载作用下,土体内部结构变化表现为颗粒滑移、重新排列、孔隙体积变化等方面。目前,针对土体的微观测试技术种类繁多,如:电镜扫描、CT扫描、X射线衍射、核磁共振、红外能谱分析、压汞试验及氮吸附等。HUANG等<sup>[7]</sup>通过CT和电镜扫描对不同温度下的砂岩微观结构和动态抗压强度进行了分析。杜宇翔等<sup>[8]</sup>通过X射线衍射试验、电镜扫描试验测定了岩土体矿物成分和天然与饱和状态下的矿物颗粒微观结构。周翠英等<sup>[9]</sup>通过开展红砂岩三轴压缩试验,以及对不同加载条件下的破坏岩样进行电镜扫描试验,分析了岩样的破坏特征及其微观特性。张泽林等<sup>[10]</sup>采用电镜扫描试验获取了岩土体的微观参量,研究了黄土和泥岩的动力学特性和微细观损伤机制。张唐瑜等<sup>[11]</sup>应用压汞仪定量测定泥岩孔隙分布特征,研究了压实作用对泥岩微孔隙结构的影响。

分析已有研究成果可知,学者们对常规岩土体的微观结构变化规律进行了较深入的研究,但对于炭质泥岩这一特定对象而言,其不同外荷载作用下的微观结构变化研究鲜见。因此,本研究通过开展电镜扫描试验和压汞试验,研究炭质泥岩在不同应力条件下的微观结构变化规律,分析不同级配的炭质泥岩粗粒土颗粒的孔隙尺寸、形态及排列的变化规律。

## 1 炭质泥岩力学参数

将天然状态下的炭质泥岩进行室内崩解处理,根据分形原理按式(1)~(2)确定不同级配土体的级配曲线<sup>[11]</sup>,如图1所示。制备含水率为9%、压实度为94%的土体试样,并分别在60、120和180 kPa围压下对试样进行三轴压缩试验<sup>[12]</sup>,测得不同条件下的炭质泥岩粗粒土抗剪强度参数见表1。

$$M(\varepsilon)/M = b(\varepsilon/\delta) \quad (1)$$

$$D = 3 - b \quad (2)$$

式中: $D$ 为分形维数;对 $\lg \varepsilon$ 和 $\lg(M(\varepsilon)/M)$ 的散点进行回归分析,所得直线斜率即为 $b$ ;  $\varepsilon$ 为筛网孔径; $\delta$ 为平均尺寸; $M$ 为炭质泥岩总质量。

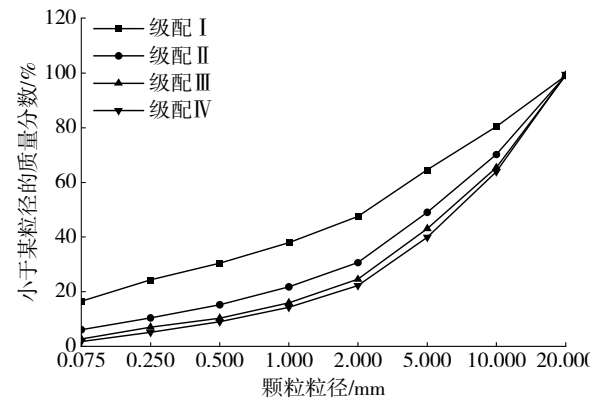


图1 级配曲线

Fig. 1 Grading curves

表1 炭质泥岩粗粒土基本物理力学指标

Table 1 Basic physical and mechanical indexes of coarse-grained carbonaceous mudstone (CGCM) soil

级配	分形维数	含水率/%	压实度/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
I	2.68	9	94	36.61	24.23
II	2.49	9	94	28.82	22.29
III	2.39	9	94	21.57	21.81
IV	2.35	9	94	19.92	20.81

## 2 微观试验仪器及方案

本研究压汞试验采用美国麦克全自动压汞仪(Auto Pore IV 9620),如图2(a)所示。由于炭质泥岩粗粒土试样孔隙率较高,故该压汞试验将压力值选择为60 000 psi<sup>[13]</sup>。首先,将切好的试样放入玻璃试管中,然后通过压汞仪和真空泵连接的计算机,利用PoreMaster 33软件选择各个待测参数。最后将试样放入膨胀仪,并抽至真空,在确保试样孔隙内的气压接近零时注入汞。

电镜扫描试验采用日立S-3000N变压扫描电子显微镜设备,加速电压为10 kV,如图2(c)所示,其工作原理为:使用聚焦的高能电子束,将其打在样品上进行成像。对于炭质泥岩试样,须在其表面进行喷金镀膜处理后才能试验。当对粗粒土进行微观结构观察时,显微镜选取1 000~20 000倍的放大倍数最为合适<sup>[14-19]</sup>。由于炭质泥岩粗粒土试样结构

相对松散,且颗粒平均粒径较大,故不宜采用太大的放大倍数,本研究选取2 000倍的放大倍数。

取三轴压缩试验后的试样进行压汞试验和电镜扫描试验。方案见表2。先从三轴试样中选取累积塑性应变发展集中部位的泥岩颗粒,制成如图2(b)、2(d)所示的试样。试样观测面用小刀处理平整,采用冷冻干燥方法对试样进行干燥处理后,再进行压汞试验和电镜扫描试验。

表2 微观试验方案

Table 2 Micro-test scheme

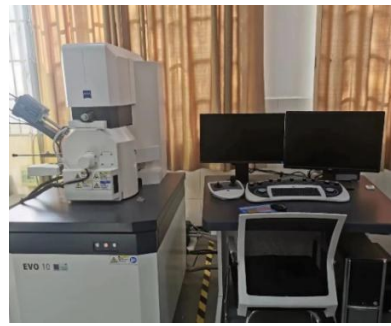
编号	级配	分形维数	围压/kPa
1	I	2.68	60
2	I	2.68	120
3	I	2.68	180
4	II	2.49	60
5	II	2.49	120
6	II	2.49	180
7	III	2.39	60
8	III	2.39	120
9	III	2.39	180
10	IV	2.35	60
11	IV	2.35	120
12	IV	2.35	180



(a) 压汞仪



(b) 压汞试样管



(c) 电镜扫描仪



(d) 电镜扫描试样

图2 试验设备及试样

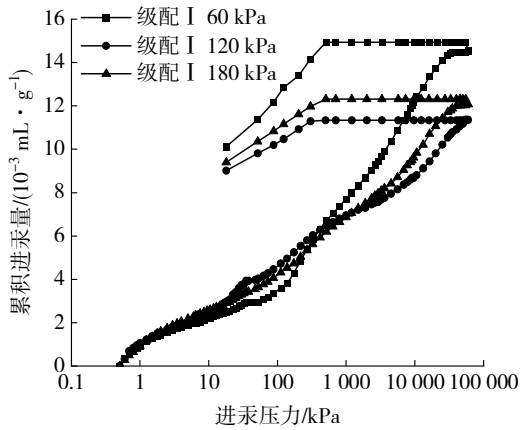
Fig. 2 Test equipment and sample

### 3 试验结果分析

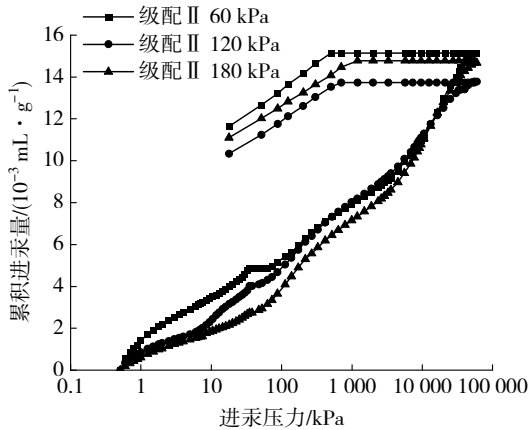
#### 3.1 压汞试验结果

炭质泥岩粗粒土试样的进退汞曲线如图3所示。从图3可看出,进退汞曲线和进汞量改变趋势相似,均呈现先上升再平缓,最后迅速下降的趋势,排驱压力为0.85~1.00 kPa,这表明:在此压力区间内,汞开始进入最大连通孔隙结构中。试样的退汞效率约为65%,进退汞体积差较大,这表明炭质泥岩粗粒土试样中开放型和半封闭型孔隙较多,且孔隙连通性良好。从图3还可看出,最大进汞量随着围压的增大呈现先降低后上升的趋势,其原因是炭质泥岩在较小围压作用下颗粒被压实,颗粒间孔隙变小,但随着围压进一步增大,炭质泥岩颗粒崩解形成较多细小孔隙,故累积进汞量增加。从图3压力-进汞曲线上可以看出,围压对级配II和级配IV试样的孔隙影响较小,对级配I和级配III试样的孔隙影响较大。当围压从60 kPa增大到120 kPa时,级配II试样的最大累积进汞量从0.0150 mL/g减小到0.0137 mL/g,级配IV试样的从0.0160 mL/g减小到0.0148 mL/g,分别减小了约8.7%和7.5%,而级配I试样的最大累积进汞量从

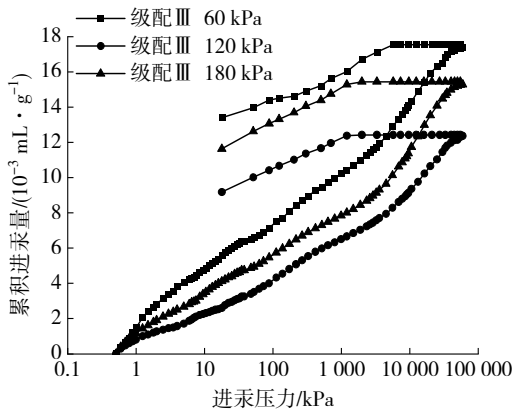
0.014 4 mL/g 减小到 0.011 0 mL/g,级配Ⅲ试样的从 0.017 2 mL/g 减小到 0.012 5 mL/g,分别减小了约 23.6% 和 27.3%。当围压从 120 kPa 增大到 180 kPa 时,级配Ⅱ试样的最大累积进汞量从 0.013 7 mL/g 增大到 0.014 7 mL/g,级配Ⅳ试样的从 0.014 8 mL/g 增大到 0.015 8 mL/g,分别增大了约 7.3% 和 6.8%,而级配Ⅰ试样的最大累积进汞量从 0.011 0 mL/g 增加到 0.012 4 mL/g,级配Ⅲ试样的从 0.012 5 mL/g 增大到 0.015 2 mL/g,分别增大了约 12.7% 和 21.6%。



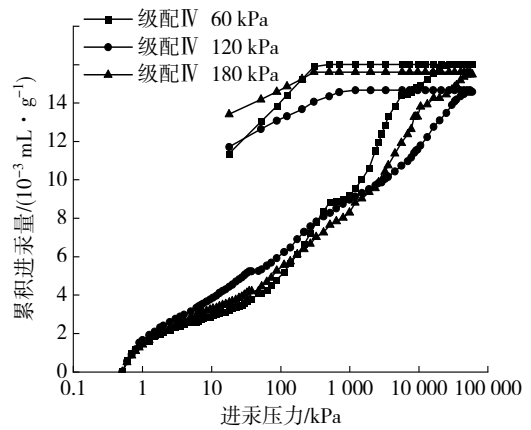
(a) 级配Ⅰ



(b) 级配Ⅱ



(c) 级配Ⅲ



(d) 级配Ⅳ

图3 不同围压下压力-进汞量关系曲线图

Fig. 3 Accumulated mercury intrusion volume-intrusion pressure curves

### 3.2 电镜扫描试验结果

#### 1) 炭质泥岩粗粒土微观结构定性分析。

不同级配的炭质泥岩粗粒土在不同围压作用下的微观电镜扫描结果,如图4所示。在试验中,1、2、3号试样的加速电压均为 10 kV,工作距离分别为 8.80、8.47、9.91 mm。从图4可看出,炭质泥岩粗粒土颗粒之间以点接触、面接触及点-面接触的形式为主,颗粒间无胶结物质。随着围压的增加,颗粒排列状态由疏松向密实转变。颗粒在压缩过程中定向性稳定,孔隙形态多处于圆形与长形之间,呈扁圆形态。炭质泥岩粗粒土在三轴压缩试验过程中,微观结构的变化主要体现在颗粒排列方式和颗粒移动上。

#### 2) 孔隙形态变化规律。

为定量分析孔隙形态变化规律,引入圆形度  $R$ 、分形维数  $D$  和丰度  $E$  的概念。圆形度  $R$  即形状系数,指的是孔隙或颗粒接近圆形的程度,其表达式为:

$$R = \frac{4\pi S}{C^2} \quad (3)$$

式中: $S$ 为孔隙的面积; $C$ 为单元体的周长; $R$ 为圆形度,其取值为0~1,若 $R$ 越趋近1,孔隙越接近圆形。

分形维数  $D$  是度量物体或分形体复杂性和不规则性的主要指标, $D$ 取值一般为1~2,其值越大表示孔隙形态的复杂程度越高。

$$D = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln r} \quad (4)$$

式中: $D$ 为研究对象的分形维数; $r$ 为孔径; $N(r)$ 为大



于某孔径的孔隙数量。

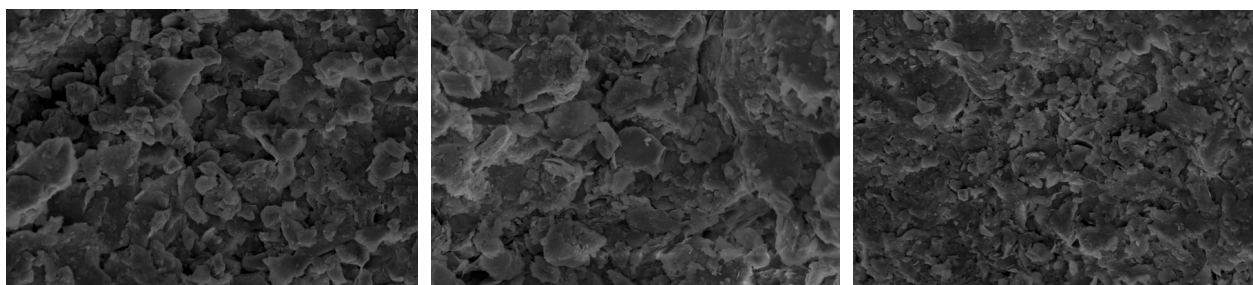
丰度  $E$  是颗粒或者孔隙最短轴和最长轴的比值,  $E$  可以体现孔隙的几何形态, 其取值范围为  $0 \sim 1$ 。  $E$  越接近  $0$ , 表示孔隙的形态越接近长条形;  $E$  越接近  $1$ , 表示孔隙的形态越圆润。

$$E = B/L \quad (5)$$

式中:  $B$  为孔隙最短轴;  $L$  为孔隙最长轴。

通过 Image-Pro Plus 软件对试样的微观参量进行分析, 并按式(3)~(5)计算试样的圆形度  $R$ 、分形维数  $D$  和丰度  $E$ , 结果如图 5 所示。图 5(a) 所示为不同级配炭质泥岩的孔隙分形维数随围压变化的

关系曲线, 随着围压的增加分形维数先减小后增大。这表明围压较小时(60、120 kPa)试样在静压过程中颗粒不断密实, 孔隙间面积减小, 颗粒边缘的不规则度增加; 当围压较大时(180 kPa), 静压条件下的试样内部颗粒密实, 颗粒出现破碎, 边界逐渐圆滑, 颗粒间相互嵌合。从图 5(b) 可以看出, 孔隙圆形度为  $0.31 \sim 0.36$ , 随着围压的增大, 相同级配的炭质泥岩粗粒土孔隙圆形度呈先增大后减小的趋势。从图 5(c) 可以看出, 炭质泥岩粗粒土的孔隙丰度整体为  $0.46 \sim 0.51$ , 且在不同围压下 4 种试样的丰度平均值相差甚小, 这表明其孔隙呈扁圆状态。



(a) 围压 60 kPa 的 1 号试样

(b) 围压 120 kPa 的 2 号试样

(c) 围压 180 kPa 的 3 号试样

图 4 电镜扫描结果

Fig. 4 Results of scanning electron microscope characterization

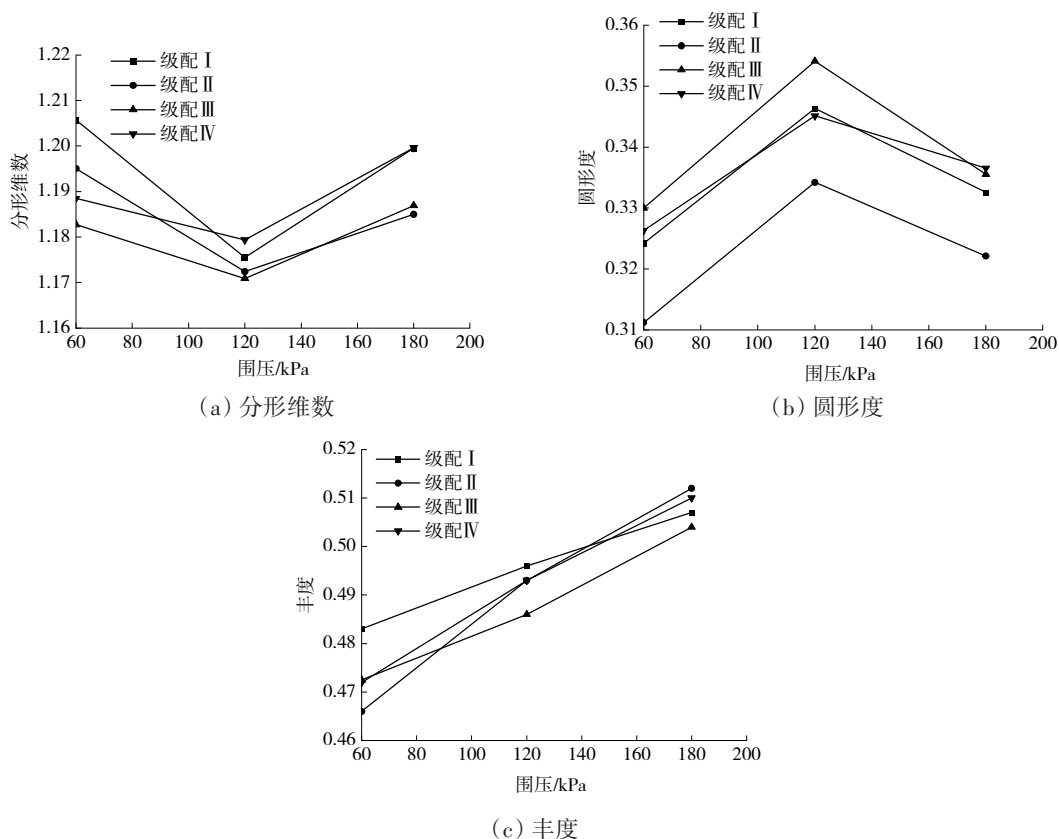


图 5 不同级配的炭质泥岩孔隙形态随围压的变化规律

Fig. 5 The variation of pore morphology of CGCM soil with different gradations and different confining pressure values

## 4 结论

1) 由微观结构定性分析可知,炭质泥岩粗粒土颗粒之间以点接触、面接触及点-面接触形式为主,颗粒间无明显胶结物质。在三轴压缩试验中,随着围压的增加,颗粒排列状态由疏松向密实转变。

2) 压汞试验结果表明,炭质泥岩粗粒土试样的孔隙体积随着围压的增大呈先降低后上升的趋势,炭质泥岩粗粒土试样的退汞效率约为65%,进退汞体积差较大,这表明试样中开放型和半封闭型孔隙较多,且孔隙连通性良好。

3) 随着围压的增大,炭质泥岩的孔隙圆形度呈先增大后减小的趋势,分形维数则先减小后增加;不同围压下4种级配试样的丰度变化较小,均为0.46~0.51,试样中孔隙均呈扁圆状态。

### 参考文献(References):

- [1] 曾铃,肖柳意,刘杰,等.预崩解炭质泥岩路堤填料工程性能试验研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(1):73-81.  
ZENG Ling, XIAO Liuyi, LIU Jie, et al. Experiment study on road mechanical properties and permeability characteristics of pre-disintegration carbonaceous mudstone [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1):73-81.
- [2] 李盛南,刘新喜,李玉,等.炭质泥岩渐进破坏过程的变形特性及损伤演化研究[J].中国公路学报,2022,35(4):99-107.  
LI Shengnan, LIU Xinxi, LI Yu, et al. Study on the deformation characteristics and damage evolution law of the progressive failure process of carbonaceous mudstone [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4):99-107.
- [3] 何忠明,钟魏,刘正夫,等.基于改进的Green-Ampt入渗模型的炭质泥岩粗粒土路堤边坡稳定性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2179-2187.  
HE Zhongming, ZHONG Wei, LIU Zhengfu, et al. Stability analysis of carbonaceous mudstone coarse-grained soil embankment slope based on improved Green-Ampt infiltration model [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(7):2179-2187.
- [4] 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.  
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.
- [5] 陈宾,周乐意,赵延林,等.干湿循环条件下红砂岩软弱夹层微结构与剪切强度的关联性[J].岩土力学,2018,39(5):1633-1642.  
CHEN Bin, ZHOU Leyi, ZHAO Yanlin, et al. Relationship between microstructure and shear strength of weak interlayer of red sandstone under dry and wet cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5):1633-1642.
- [6] 蒋明镜,李志远,黄贺鹏,等.南海软土微观结构与力学特性试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(S2):17-20.  
JIANG Mingjing, LI Zhiyuan, HUANG Hepeng, et al. Experimental study on microstructure and mechanical properties of seabed soft soil from South China Sea [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2):17-20.
- [7] HUANG S, XIA K W. Effect of heat-treatment on the dynamic compressive strength of Longyou sandstone [J]. Engineering Geology, 2015, 191:1-7.
- [8] 杜宇翔,盛谦,王帅,等.昔格达组半成岩微观结构与力学性质研究[J].岩土力学,2020,41(4):1247-1258,1269.  
DU Yuxiang, SHENG Qian, WANG Shuai, et al. Study of microstructure and mechanical properties of semi-diagenetic rock of Xigeda Formation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4):1247-1258,1269.
- [9] 周翠英,梁宁,刘镇.红层软岩压缩破坏的分形特征与级联失效过程[J].岩土力学,2019,40(S1):21-31.  
ZHOU Cuiying, LIANG Ning, LIU Zhen. Fractal characteristics of compression failure of red soft rock and cascading failure process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1):21-31.
- [10] 张泽林,吴树仁,唐辉明,等.黄土和泥岩的动力学特性及微观损伤效应[J].岩石力学与工程学报,2017,36(5):1256-1268.  
ZHANG Zelin, WU Shuren, TANG Huiming, et al. Dynamic characteristics and microcosmic damage effect of loess and mudstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5):1256-1268.

- [11] 张唐瑜,马丽娜,张戎令,等.基于分形维数的高速铁路“微膨胀性”泥岩微观孔结构分析[J].防灾减灾工程学报,2020,40(1):56-62.  
ZHANG Tangyu, MA Lina, ZHANG Rongling, et al. Analysis of microscopic pore structure of “micro-expansive” mudstone in high speed railway based on fractal dimension [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(1): 56-62.
- [12] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [13] 莫凯.炭质泥岩水力特性及其路堤工后动力变形特征研究[D].长沙:长沙理工大学,2013.  
MO Kai. Research on hydraulic characteristics of carbon mudstone and post-construction dynamic deformation properties of embankment [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013.
- [14] 北京市理化分析测试中心,中国科学院过程工程研究所.压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第1部分:压汞法:GB/T 21650.1—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.  
Beijing Center for Physical & Chemical Analysis, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences. Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption—Part 1: mercury porosimetry GB/T 21650.1—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [15] 徐清浩.数字图象分析程序在土的微观结构研究中的应用以及数据分析[D].太原:太原理工大学,2008.  
XU Qinghao. Application of image analyse technology on soil microstructure study and data analysis [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [16] 伍天华,周喻,王莉,等.单轴压缩条件下岩石孔-隙相互作用机制细观研究[J].岩土力学,2018,39(S2):463-472.  
WU Tianhua, ZHOU Yu, WANG Li, et al. Mesoscopic study of interaction mechanism between circular hole and fissures in rock under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 463-472.
- [17] 周建,邓以亮,曹洋,等.杭州饱和和软土固结过程微观结构试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(6):1998-2005.  
ZHOU Jian, DENG Yiliang, CAO Yang, et al. Experimental study of microstructure of Hangzhou saturated soft soil during consolidation process [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(6): 1998-2005.
- [18] 唐静,丁启龙.改性预崩解炭质泥岩强度特性及微观机理分析[J].交通科学与工程,2021,37(1):13-18.  
TANG Jing, DING Qilong. Analysis of strength characteristics and microscopic mechanism of modified disintegrated carbonaceous mudstone [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1): 13-18.
- [19] 刘泉菲,赵彬彬,周凯.基于分形维数的多尺度面目标匹配对相似性度量[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2018,15(3):1-7.  
LIU Quanfei, ZHAO Binbin, ZHOU Kai. Multi-scale polygon entities matched pairs' similarity measuring based on fractal dimension [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(3): 1-7.

(责任编辑:刘平;校对:罗容;英文编辑:李岳林)