

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.008

基于分形维数的高速铁路“微膨胀性”泥岩微孔隙结构分析*

张唐瑜¹, 马丽娜¹, 张戎令^{1,2,3}, 王起才^{1,2}, 王天双², 王炳忠²

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 卡迪夫大学工程学院, 英国 CF24 3AA)

摘要: 微膨胀性泥岩严重影响高速铁路的平稳运行, 为研究压实作用对高速铁路微膨胀性泥岩微孔隙结构的影响, 采用冻干法将压片机制备的不同干密度的试样进行干燥, 应用压汞仪定量测定其孔隙分布特征。研究表明: 随着试样干密度及进汞压力的增大, 试验界限进汞压力逐渐增加, 最大进汞量逐渐减小; 不同干密度试样的孔隙特征分布曲线均呈现出明显的三峰特征, 据此将试样孔隙分为大孔、中孔和小孔三类; 采用与研究土体粒径级配类似的方法对孔隙的分布进行了分析, 发现不同干密度的试样, 小孔隙占比均较大; 压实作用对大孔隙影响显著; 采用 Menger 海绵模型及热力学关系模型对泥岩孔隙结构的分形特征进行了研究, 研究发现泥岩干密度越大, 泥岩孔隙内壁越粗糙, 孔隙结构越复杂。研究成果可为膨胀泥岩地区高速铁路修建提供参考依据, 对该地区同类工程建设具有借鉴意义。

关键词: 泥岩; 压汞试验; 孔隙分布; 分形维数

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0056-07

Analysis of Microscopic Pore Structure of “Micro-expansive” Mudstone in High Speed Railway based on Fractal Dimension

ZHANG Tangyu¹, MA Lina¹, ZHANG Rongling^{1,2,3}, WANG Qicai^{1,2}, WANG Tianshuang²,
WANG Bingzhong²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Road and Bridge Disaster Prevention and Control Technology National Local Joint Engineering Laboratory, Lanzhou 730070, China;

3. Cardiff University, School of Engineering CF24 3AA, UK)

Abstract: Micro expansive mudstone affects the smooth operation of high-speed railway seriously. In order to study the effect of compaction on the micro-pore structure of micro expansive mudstone of high speed railway, the freeze-drying method is applied to dry the samples with different dry densities

* 收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768033)、长江学者和创新团队发展计划滚动支持(IRT_15R29)、中国铁路总公司科技研究开发计划课题(Z2015-G001)、飞天学者特聘计划(2016)、甘肃省基础研究创新群体(145RJIA332)、甘肃省高校协同创新科技团队支持计划(2017c-08)、兰州交通大学优秀平台(201606)资助

作者简介: 张唐瑜(1995-), 男, 硕士研究生。主要从事岩土及隧道方面的研究。Email: 670912431@qq.com

通讯作者: 马丽娜(1985-), 女, 副教授, 硕导。主要从事膨胀性泥岩及隧道工程的教学与科研。

Email: malinalanzhou@163.com

using the tablet machine, and then the mercury porosimeter is used to measure the pore distribution characteristics quantitatively. The results show that with the increase of the dry density of the sample and mercury pressure, the mercury pressure limit of the test gradually increases, and the maximum amount of mercury decreases gradually. The pore distribution curves of different samples with different dry density all show three obvious peaks, according to this characteristic, the pores in the sample are classified into three types: large pore, mesopore, and small pore. The distribution of pores was analyzed by the same method as that used to study the particle size distribution of soils. It is found that the samples with different dry densities had a larger proportion of small pores; compaction has a significant effect on large pores. The Menger sponge model and thermodynamic relationship model were used to study the fractal characteristics of the pore structure of mudstone. It was found that the higher the dry density of mudstone, the more rough is the pore wall of mudstone and more complicated the pore structure. The research results can provide reference for the construction of high speed railway in the swelling mudstone area, and can be used as a reference in similar projects in this area.

Keywords: mudstone; mercury intrusion porosimetry; pore distribution; fractal dimension

引言

土的微观结构是土体强度、固结系数、渗透系数等物理力学指标的重要影响因素,相关学者对红土、黄土、膨胀土以及冻土等各类土的微观结构进行了研究,认识到各类土物理力学性质存在较大差异的内在原因是微观结构的不同^[1]。关于土体微观结构的研究具有地域性和工程具体性。国内外学者对各类土体进行了大量研究并取得了颇有价值的理论成果。张泽林等^[2]利用SEM电镜扫描技术系统地研究了天水地区黄土和泥岩的动力学特性和微细观损伤机制;周建等^[3]借助扫描电镜获取杭州结构性黏土的微观结构图像,研究表明用土体的微观结构变化解释土体的物理力学特性是可行的。

马丽娜等^[4-7]对兰新高铁第二双线泥岩进行了前期研究,发现该地区泥岩具有弱膨胀性,这将引起高速铁路路基的上拱,导致轨道不平顺,进而加剧轮轨之间的相互作用,影响行车的安全舒适性。因此,有必要对该地区泥岩的微观孔结构进行分析研究。

对土体微观结构形态的研究多采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope,简称SEM)和压汞法(mercury intrusion porosimetry,简称MIP)^[7-11]。但SEM方法本身有一定的不足,如电镜扫描图片很难量化描述微结构的变化、扫描图像是二维图像,不足以准确确定同类土体在不同工程环境下的结构差异或变化等,而压汞法可以对微结

构进行量化研究,能够定量测出孔隙分布与大小,并且具有一定的准确性^[12]。基于以上原因,本文采用压汞试验分析压实作用对哈密泥岩孔隙分布特征的影响。

1 试验概况

1.1 制样

试验土样取自兰新高铁第二双线哈密段,采用钻机取样,取样深度8~13 m。按照《铁路工程土工试验规程》^[12]测得泥岩基本物理力学指标见表1。

表1 泥岩基本物理力学指标

Table 1 Basic physical and mechanical parameter of mudstone

天然含水率/%	比重	液限/%	塑限/%	自由膨胀率/%	阳离子交换量/(mmol·kg ⁻¹)
11.2	2.74	37.69	18.28	37.21	101.23

试样制备过程如下:

(1)制样:使用YP-20TB型油压式千斤顶压片机制备6种不同干密度(1.4、1.5、1.6、1.7、1.8、1.9 g/cm³)的试样。

(2)饱和:将制备好的试样装入饱和器,放入真空饱和缸中进行饱和,试验使用ZK-270型真空饱和缸,抽气速率:1 L/s;极限真空:60 Pa。

(3)干燥:因该地区泥岩具有弱膨胀性,因此常规干燥方法如烘干法、风干法对试样孔隙影响较大。由文献[13]可知采用冻干法干燥压汞试样不

会导致土体微孔隙特征的变化,因此本试验采用冻干法干燥试样。将饱和后的试样切成小块,放入冷冻干燥机内快速冷却,抽真空升华 24 h。试验使用 FD-T12N-80 型冷冻干燥机,冷阱温度: $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$;冻干效率 4 L/24 h;真空泵抽速: 120 L/min;极限真空: 1 Pa。

1.2 试验原理

本试验采用 AutoPore IV 9500 V1.07 全自动压汞仪。压汞法的原理是由于汞对一般固体不润湿,欲使汞进入孔则必须对汞施加一定的压力以克服汞的表面张力带来的阻力,孔半径越小,所需外压越大^[13]。利用该原理可得到施加压力与孔隙半径的关系:

$$P = -\frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (1)$$

式中, P 为进汞压力; γ 为汞的表面张力,参照文献[13],试验取 $\gamma = 485\text{ dynes/cm}$, $1\text{ dynes/cm} = 10^{-3}\text{ N/m}$; r 为孔隙半径; θ 为液态汞与固体材料的接触角,取 $\theta = 130^{\circ}$ 。

2 试验结果与分析

2.1 孔径与进汞压力关系

由公式(1)可知,进汞压力与进汞孔径一一对应。孔隙直径及单位质量试样累计进汞量随进汞压力变化,如图1所示,图中 $P-D$ 曲线为进汞压力与孔隙直径关系曲线、 $P-V_{\text{Hg}}$ 为进汞压力与单位质量试样累计进汞量关系曲线,图中 $1\text{ psia} = 6.895\text{ kPa}$ 。

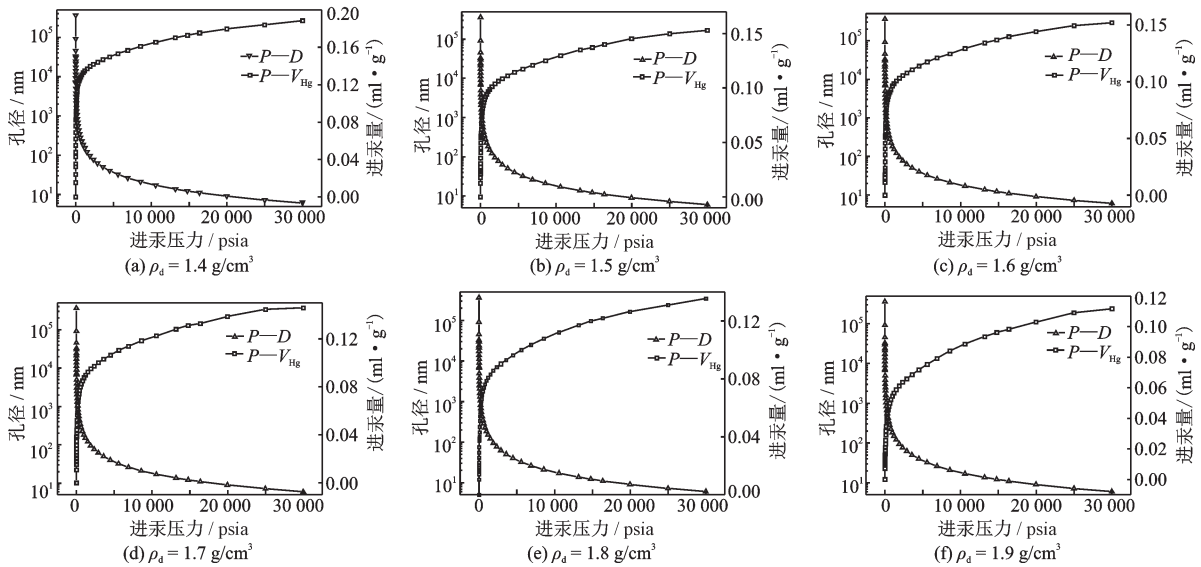


图1 孔径及进汞量随压力变化

Fig.1 Variation of pore size and mercury intake with pressure

由图1(a)可知:孔隙直径随着进汞压力的增大逐渐减小,且在试验前期(进汞压力为 $0 \sim 86.72\text{ psia}$ 时)减小速度较快,呈线性快速减小;试验中后期(进汞压力为 $86.72 \sim 29\,992.66\text{ psia}$ 时),孔隙直径呈外凸弧线缓慢减小,并最终趋于最小孔径 6.03 nm ;进汞量随着进汞压力的增大逐渐增大,且在试验前期(进汞压力为 $0 \sim 86.72\text{ psia}$ 时)增长速度较快,呈线性快速增长,试验中后期(进汞压力为 $86.72 \sim 29\,992.66\text{ psia}$ 时),进汞量呈外凸弧线缓慢增大,最终趋于最大值 0.1885 ml/g 。

同理可由图1(b)~图1(f)得到其它试样的界限进汞压力(即进汞量与孔径随进汞压力线性变化结

束时的压力),最大进汞量和最小孔径,见表2。

由表2可知,随着试样干密度的增加,试验界限进汞压力逐渐增加,最大进汞量逐渐减小,最小孔径不变。

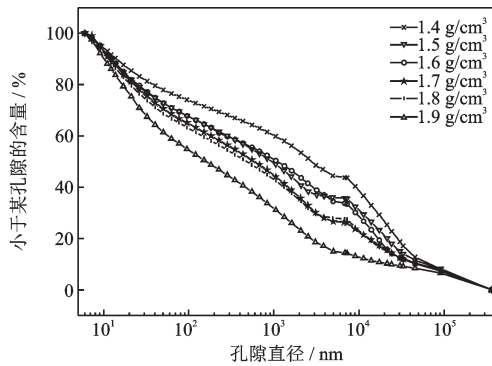
2.2 孔隙分布特征

从压汞试验数据可以分析得到不同干密度情况下孔隙分布情况,由于土体中孔隙直径相差比较悬殊,且小孔隙的含量对土体的性质影响较大,必须较为详细地表示,因此,将孔隙直径的坐标取为对数坐标,如图2所示,其中图2(a)为孔隙累计分布曲线(类似于粒径级配曲线),即总孔隙中大于某孔

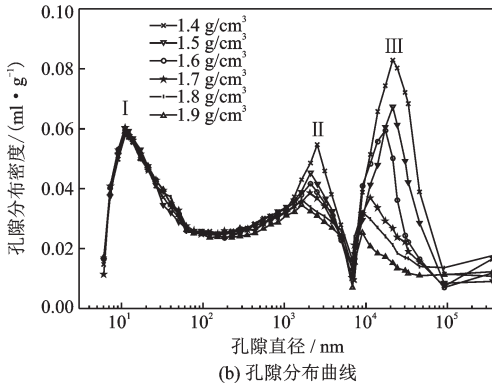
表2 不同干密度试样压汞数据对比

Table 2 Comparison of mercury pressure data for different dry density samples

干密度/ (g·cm ⁻³)	界限进汞压力/ psia	最大进汞量/ (ml·g ⁻¹)	最小孔径/ nm
1.4	86.72	0.188 5	6.030
1.5	112.78	0.153 0	6.030
1.6	136.06	0.152 1	6.030
1.7	171.52	0.145 9	6.030
1.8	217.32	0.135 6	6.030
1.9	327.26	0.111 6	6.030



(a) 孔隙累计分布曲线



(b) 孔隙分布曲线

图2 孔隙分布特征曲线

Fig.2 Characteristic curve of pore distribution

径的累计百分含量,曲线陡,表示孔径大小分布均匀;曲线平缓,表示孔径相差悬殊。图2(b)为孔径分布曲线。

由图2可知本次试验量测的试样孔径范围为6.03~361 936.38 nm;由图2(b)可以看出不同干密度的试样均出现三个峰,随着干密度的增加,Ⅲ号峰的峰高逐渐减小,位置向左偏移;Ⅱ号峰的峰高也逐渐减小,位置也向左偏移,减小幅度及偏移幅度较Ⅲ号峰小;Ⅰ号峰的峰值及位置几乎不变。

孔隙分布特征曲线可以定量表示出孔隙构成情况,相关学者对特定土体的孔径分布进行了划

分,如王清等^[11]对黄土孔隙特征进行研究,以20 nm、800 nm为节点将黄土孔隙划分为微孔、小孔和大孔;本文参照文献[14]结合图2(b)中的三峰态将试样的孔隙分为三类:小孔隙(6~300 nm)、中孔隙(300~7 000 nm)、大孔隙(孔径 $D > 7 000$ nm)。结合图2(a)可以得到不同类型孔隙的占比,见表3。

由表3可知,干密度不同的试样,小孔隙含量占整体孔隙含量的比例均较大,除干密度1.4 g/cm³的试样外,其他试样中孔隙占比均达到40%以上;随着试样干密度的增大,小孔隙含量由32%增加到56%,中孔隙含量由25%增加到30%,大孔隙含量由43%减小到14%。结合图2(b)中Ⅲ号峰的峰高的变化可知,压实作用改变试样大孔隙效果最为显著。

表3 孔隙分布

Table 3 Pore distribution table

单位: %

干密度/(g·cm ⁻³)	小孔隙	中孔隙	大孔隙
1.4	32	25	43
1.5	40	25	35
1.6	41	26	33
1.7	44	29	27
1.8	46	29	25
1.9	56	30	14
极差	24	5	29

2.3 孔隙分形特征

分形维数 D 可以表示固体物质内部的粗糙程度,分形维数越大,表明孔隙在空间的形貌特征偏离光滑表面程度越远,孔隙内壁越粗糙,孔隙结构的复杂程度越高^[11]。

本文首先应用文献[15]所提及的Menger海绵模型,计算试样的分形维数,计算方法如下:

$$\lg \left(\frac{dV}{dP} \right) = \lg k + (D_M - 4) \lg P \quad (2)$$

式中, V 为累计孔体(Cumulative Pore Volume), ml/g; k 为常数; P 为进汞压力,psia; D_M 为分形维数。

根据试验数据可得 $\lg \left(\frac{dV}{dP} \right)$ 和 $\lg P$,以 $\lg P$ 为横

坐标, $\lg \left(\frac{dV}{dP} \right)$ 为纵坐标进行作图,然后进行线性拟合。拟合的直线斜率为 $K = (D_M - 4)$,由此可得分形维数 $D_M = K + 4$ 。

根据上述方法求解各个试样的分形维数。图3中黑点为干密度为1.4g/cm³时试样的lg(dV/dP)与lg P的关系,对其进行线性拟合,得到相关系数R²=0.974 6的直线,如图3中实线所示。由此可以求得试样干密度为1.4g/cm³时的分形维数为2.964 43。同理,可以求得其他干密度试样的分形维数D_M,计算结果见表4。

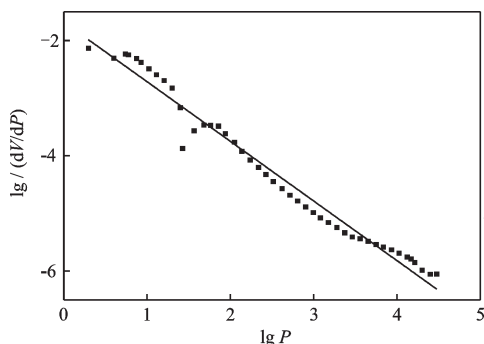


图3 Menger模型分维系数计算(1.4 g/cm⁻³)

Fig.3 Calculation diagram of Menger model fractal dimension coefficient (1.4 g/cm⁻³)

表4 Menger模型计算结果

Table 4 Menger model calculation results

干密度/ (g·cm ⁻³)	斜率	分形维数 D _M	相关系数 R ²
1.4	-1.035 57	2.964 43	0.974 6
1.5	-0.020 77	2.979 23	0.954 4
1.6	-1.023 50	2.976 50	0.972 0
1.7	-1.054 09	2.945 91	0.927 2
1.8	-0.893 49	3.106 51	0.971 3
1.9	-0.783 78	3.2162 2	0.978 4

由表4可以看出,应用Menger海绵模型计算试样孔隙分形维数,不同干密度的试样相关系数均达到90%以上,相关性均较好;对于干密度为1.8 g/cm³、1.9 g/cm³的试样,其分形维数均大于3,而Menger海绵模型的孔隙分形维数合理范围为2~3^[15]。由此可知,哈密泥岩的微孔隙结构不能满足Menger海绵模型。所以下面采用基于热力学关系的分形模型进行分形计算^[15]。

采用基于热力学关系的分形模型计算分形维数,计算方法如下:

$$W_n = \sum_{i=1}^n \bar{P}_i \Delta V_i \quad (3)$$

$$Q_n = V_n^{1/3} / r_n \quad (4)$$

$$\ln \left(\frac{W_n}{r_n^2} \right) = D_f \ln Q_n + C_1 \quad (5)$$

式中, \bar{P}_i 为压汞仪第*i*次进汞时的平均压力; ΔV_i 为试验过程中第*i*次的进汞量;*n*为进汞次数;*r_n*为第*n*次进汞时所对应的孔隙半径;*V_n*为第*n*次进汞时的累计进汞量;*C₁*为常数;以ln Q_{*n*}为横坐标,ln (W_{*n*}/r_{*n*}²)为纵坐标,进行绘图及数据的线性拟合,拟合得到的直线斜率即为泥岩的分形维数D_{*f*}。

通过简易程序将式(3)~式(5)编辑到Excel表格中,并用origin绘图软件得到不同干密度试样的分形维数。图4中黑点为干密度为1.4 g/cm³时试样的ln (W_{*n*}/r_{*n*}²)与ln Q_{*n*}关系,对其进行线性拟合,得到相关系数为0.999 1的直线,如图4中实线所示。由拟合直线的斜率可得试样孔隙的分形维数为2.781 7。同理可得其他不同干密度试样的分形维数,结果见表5。

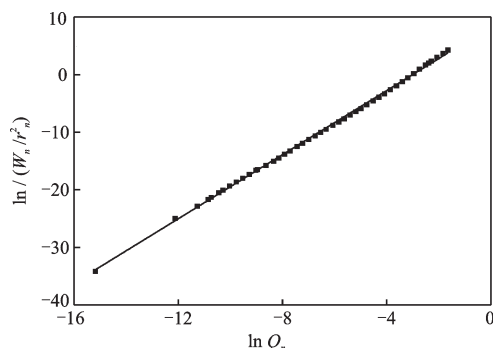


图4 热力学模型分维系数计算(1.4 g/cm⁻³)

Fig.4 Calculation diagram of the fractal dimension coefficient of the thermodynamic model (1.4 g/cm⁻³)

表5 热力学关系模型计算结果

Table 5 Calculation results of thermodynamic relationship model

干密度/ (g·cm ⁻³)	分形维数 (斜率)D _{<i>f</i>}	相关 系数R ²	干密度 (g·cm ⁻³)	分形维数 (斜率)D _{<i>f</i>}	相关 系数R ²
1.4	2.781 70	0.999 1	1.7	2.842 46	0.999 6
1.5	2.824 44	0.999 3	1.8	2.848 00	0.999 6
1.6	2.818 48	0.999 4	1.9	2.895 47	0.999 6

由表5可知,不同干密度试样的分形维数为2.781 70~2.895 47,处于合理的分形维数范围;结合分形维数与试样干密度的关系(图5),可以看出,

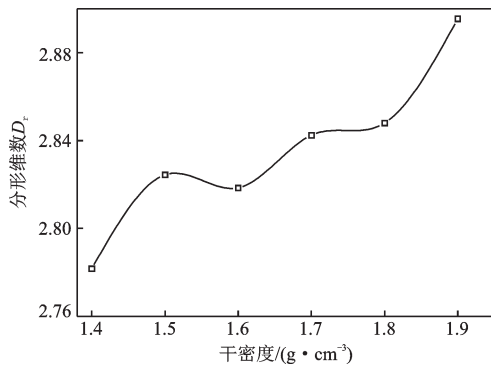


图5 分形维数与试样干密度关系

Fig.5 Relation between fractal dimension and dry density of sample

随着试样干密度的增加,试样孔隙的分形维数逐渐增大,由此可得,泥岩干密度越大,泥岩孔隙内壁越粗糙,孔隙结构越复杂;对比表5和表4的相关系数可知,应用热力学关系的分形模型进行计算的数据相关性更高。

3 结 论

(1)通过分析干密度及进汞量与进汞压力关系可知,随着试样干密度及进汞压力的增大,试验界限进汞压力逐渐增加,最大进汞量逐渐减小。

(2)哈密泥岩不同干密度试样的孔隙特征分布曲线均呈现出明显的三峰特征,随着干密度的增加,Ⅲ号及Ⅱ号峰的峰高逐渐减小,位置向左偏移,Ⅰ号峰的峰值及位置基本不变,可知压实对哈密泥岩大孔隙影响较大。

(3)采用Menger海绵模型及热力学关系模型对泥岩孔隙结构的分形特征进行了对比研究,发现采用热力学关系模型分析泥岩孔隙特征更为合理。

(4)由热力学关系模型所得的分形维数可知,泥岩干密度越大,泥岩孔隙内壁越粗糙,孔隙结构越复杂。

参考文献:

[1] 丁建文,洪振舜,刘松玉.疏浚淤泥流动固化土的压汞试验研究[J].岩土力学,2011,32(12):3 591-3 596,3 603.
Ding J W, Hong Zh Sh, Liu S Y. Microstructure study of flow-solidified soil of dredged clays by mercury intrusion porosimetry [J]. Rock and Soil Mechanics,

2011, 32(12):3 591-3 596,3 603. (in Chinese)
[2] 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):1 256-1 268.
Zhang Z L, Wu Sh R, Tang H M, et al. Dynamic characteristics and microcosmic damage effect of loess and mudstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5):1 256-1 268. (in Chinese)
[3] 周建,邓以亮,曹洋,等.杭州饱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):1 998-2 005.
Zhou J, Deng Y L, Cao Y, 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):1 998-2 005. (in Chinese)
[4] 马丽娜,严松宏,张戎令,等.低黏土矿物含量泥岩浸水膨胀变形的试验研究[J].工业建筑,2015,45(11):111-115,196.
Ma L N, Yan S H, Zhang R L, et al. Experimental research on soaking swelling deformation of mudstone with low content of clay minerals [J]. Industrial Construction, 2015, 45(11): 111-115,196. (in Chinese)
[5] 马丽娜,严松宏,王起才,等.哈密地区膨胀性泥岩膨胀特性研究[J].兰州交通大学学报,2015,34(1):17-22.
Ma L N, Yan S H, Wang Q C, et al. Research on the characteristics of expansive mudstone in Kumul prefecture [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2015, 34(1):17-22. (in Chinese)
[6] 薛彦瑾,王起才,张戎令,等.高速铁路路基膨胀土膨胀变形试验研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(4):690-696.
Xue Y J, Wang Q C, Zhang R L, et al. Experimental study on expansive deformation of expansive soil in high speed railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(4):690-696. (in Chinese)
[7] Tanaka H, Locat J. A microstructural investigation of Osaka Bay clay: The impact of microfossils on its mechanical behavior [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(3): 493-508.
[8] Penumadu D, Dean J. Compressibility effect in evaluating the pore-size distribution of kaolin clay using mercury intrusion porosimetry [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(2): 393-405.
[9] Hong Z, Tateishi Y, Han J. Experimental study of macro and micro-behavior of natural diatomite [J]. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE,

- 2006, 132(5): 603-610.
- [10] Ivan Fernando Otalvaro, Manoel Porfirio Cordão Neto, et al. Relationship between soil structure and water retention properties in a residual compacted soil [J]. *Engineering Geology*, 2016, 2(16): 73-80.
- [11] 王清, 王剑平. 土孔隙的分形几何研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 23(4): 496-498.
Wang Q, Wang J P. A study on fractal of porosity in the soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 23(4): 496-498. (in Chinese)
- [12] 铁路工程土工试验规程: TB10102—2010[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
Code for geotechnical test of railway engineering: TB10102—2010 [S]. Beijing: China Railway Press, 2010. (in Chinese)
- [13] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 不同固结压力下强结构性黏土孔隙分布试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(10): 2794-2800.
Zhang X W, Kong L W, Guo A G, et al. Experiment
- study of pore distribution of strong structural clay under different consolidation pressures [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(10): 2794-2800. (in Chinese)
- [14] 张英, 邴慧. 基于压汞法的冻融循环对土体孔隙特征影响的试验研究[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 169-174.
Zhang Y, Bing H. Experimental study of the effect of freezing-thawing cycles on porosity characters of silty clay by using mercury intrusion porosimetry [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 169-174. (in Chinese)
- [15] 刘永忠, 陈三强, 孙皓. 冻干物料孔隙特性表征的分形模型与分形维数[J]. *农业工程学报*, 2004, 10(6): 41-45.
Liu Y Zh, Chen S Q, Sun H. Characterizing pores in freeze-dried materials by fractal models and fractal dimensions [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 10(6): 41-45. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)



(上接第 34 页)

- [8] 王永强, 张继春. 尾矿型泥石流冲击高度的正交试验[J]. *现代矿业*, 2013, 29(12): 39-42.
Wang Y Q, Zhang J Ch. Orthogonal test for impact height of tailing debris flow [J]. *Modern Mining*, 2013, 29(12): 39-42. (in Chinese)
- [9] 陈洪凯, 唐红梅, 鲜学福, 等. 泥石流冲击脉动荷载概率分布特征[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(8): 124-127, 247.
Chen H K, Tang H M, Xian X F, et al. Probability distribution features of fluctuating impact force of debris flow [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(8): 124-127, 247. (in Chinese)
- [10] 王强, 何思明, 张俊云. 泥石流防撞墩冲击力理论计算方法[J]. *防灾减灾工程学报*, 2009, 29(4): 423-427.
Wang Q, He S M, Zhang J Y. Theoretical method for calculating impact force on debris flow protection piers [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2009, 29(4): 423-427. (in Chinese)
- [11] Peizhen L, Tangzhenhao L, Zheng L, et al. Parametric study on dynamic response of FRP masonry structures under the impacts of debris flow [J]. *Shock and Vibration*, 2018, 2018: 1-20.
- [12] 杜友耀, 李锡夔. 二维液桥计算模型及湿颗粒材料离散元模拟[J]. *计算力学学报*, 2015, 32(4): 496-502.
Du Y Y, Li X K. 2D computational model of liquid bridge and DEM simulation of wet granular materials [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2015, 32(4): 496-502. (in Chinese)
- [13] 焦杨, 章新喜, 孔凡成, 等. 湿颗粒聚团碰撞解聚过程的离散元法模拟[J]. *物理学报*, 2015, 64(15): 328-337.
Jiao Y, Zhang X X, Kong F Ch, et al. Discrete element simulation of impact disaggregation for wet granule agglomerate [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(15): 328-337. (in Chinese)
- [14] 赵海鑫, 游勇, 柳金峰, 等. 泥石流浆体冲击拦砂坝荷载计算的实验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2017, 37(5): 756-762.
Zhao H X, You Y, Liu J F, et al. Experimental study on debris flow slurry impact [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(5): 756-762. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)