

水泥改性膨胀土基本特性试验

王佩, 宋新江, 徐海波, 周文渊

(安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院, 安徽 合肥 230000)

摘要:通过无侧限抗压强度试验、收缩试验、X射线衍射(XRD)试验、压汞(MIP)试验、扫描电镜(SEM)测试,从宏观力学特征、物相构成演变以及微观结构特性三方面,对水泥改性膨胀土进行系统研究。结果表明:掺入水泥可以有效改善膨胀土的土体强度和胀缩特性;掺入水泥使得膨胀土微观结构发生显著变化,随水泥掺入量的增加,水化反应产生的C-S-H凝胶态产物总量逐渐增多,将土体颗粒粘联胶结形成较大的絮状体,优化土体孔隙结构,改性膨胀土土体内孔径小于100 nm的微小孔体积分数逐渐增大,说明水化产物的总量是决定水泥改性膨胀土微观孔隙结构特征、土体强度及收缩特性的关键因素。

关键词:水泥改性;膨胀土;水化产物;微观特性;力学特性

中图分类号:TU41 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)03-0056-05

Experiments on basic characteristics of cement-modified expansive soil//WANG Pei, SONG Xinjiang, XU Haibo, ZHOU Wenyuan(*Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Hefei 230000, China*)

Abstract: Through the unconfined compressive strength test, shrinkage test, X-ray diffraction (XRD) test, mercury injection porosimetry (MIP) test and scanning electron microscopy (SEM) test, the cement-modified expansive soil was systematically studied in the aspects of macroscopic mechanical properties, phase evolution and the micro-structure characteristics. The results show that cement addition can effectively improve the strength, swelling and shrinkage characteristics of expansive soil. After the cement addition, the microstructure of expansive soil changes significantly, and the gel phase hydration products of C-S-H during hydration reaction increase with the cement content. The soil particles can form a larger flocculent body and can benefit the pore distribution. The volume fraction of micro holes (diameter less than 100 nm) in modified expansive soil increases, indicating that the amount of hydration products is the key factor to soil strength, microscopic pore structure characteristics and shrinkage characteristics of cement-modified expansive soil.

Key words: cement-modified; expansive soil; hydration products; micro-characteristic; mechanical property

膨胀土含有大量的蒙脱石和伊利石等矿物成分,由于蒙脱石和伊利石具有非常强的吸水膨胀能力,在反复的吸水膨胀和失水收缩过程中,膨胀土内部结构发生变形,产生大量裂隙,土体结构遭到破坏,加之水的软化作用,使得土体的抗剪强度骤降,进而导致膨胀土边坡容易发生崩塌、滑坡等失稳现象^[1-5]。由于膨胀土在我国分布广泛,通过换填改良地质条件是不可行的^[2]。

水泥作为改性剂已被广泛用于膨胀土改良工程中,水泥改性膨胀土具有良好的水稳性、污染小等优点,国内多位学者以水泥作为外掺剂,对各地膨胀土的力学特性和微观结构等进行了试验研究^[6-9]。宋新江等^[10-12]通过平面应变试验、三轴压缩固结排水

试验及真三轴试验对水泥改性粉土力学性质进行了系统性研究。徐菲等^[13]从宏观和微观两个角度系统地研究离子固化剂改性水泥土的机理。土体微观结构的改变导致其宏观物理力学特性发生变化,通过对土体的微观结构的定性分析和定量研究,可以有效地了解土体的微观结构特征,从微观层面解释土体的宏观力学性质变化的机理^[14-15];Horpibulsuk等^[16]发现水泥土中通过水泥与水发生水化反应产生的水化产物能够黏结土颗粒以达到减少孔隙、改善土体结构的作用;Peethamparan等^[17]通过XRD试验、热重分析(TGA)和SEM试验等对水泥窑粉尘加固的钠基蒙脱土的微观结构进行了系统性研究。

由于膨胀土较普通黏土含有更多的伊利石等亲

水性物质,在反复的吸水膨胀和失水收缩过程中,膨胀土内部结构变化与普通黏土存在明显的差异。将水泥掺入膨胀土后,水泥与土体中自由水发生水化反应,水化产物吸附在土体颗粒表面,导致矿物成分和微观孔隙组成结构发生变化,其规律尚待深入研究。本文采用室内试验测试水泥改性膨胀土的自由膨胀率、抗压强度和收缩特性,并利用 XRD 试验、MIP 试验、SEM 测试进一步研究水泥改性膨胀土微观结构变化规律,分析水泥改性膨胀土的工作机理。

1 试验材料与试验方案

1.1 试验材料

试验所需膨胀土取自安徽省驷马山分洪道切岭段,驷马山膨胀土是皖东地区膨胀土的典型代表。土的液限为 47.6%,塑限为 20.0%,塑性指数为 27.6,自由膨胀率为 52.5%,粒径为 0~0.005 mm、0.005~0.075 mm 和 0.072~2 mm 的颗粒的质量分数分别为 34.47%、50.48% 和 15.05%。水泥采用海螺 P·O 32.5 普通硅酸盐水泥。

1.2 试样准备

依据 JGJ/T 233—2011《水泥土配合比设计规程》,水泥土试配时,宜采用 3 个配合比,其中一个配合比的水泥掺入比为基准值,另外两个配合比的水泥掺入比宜比基准值分别减少和增加 3%。水泥改性膨胀土水泥掺入比基准值确定为 5%,结合实际情况,另外两个配合比的水泥掺入比分别为 3% 和 8%。

向风干后的膨胀土土样中依次掺入 3%、5% 和 8% 比例的水泥,根据土的塑限制备不同含水率的试样,密封养护 24 h 后进行轻型击实试验,测定素土和 3 组水泥改性膨胀土的最大干密度和最优含水率等,为相关试验提供准备。

根据击实试验结果,采用一次成型压样仪,制备无侧限抗压强度试样,试样为直径 3.91 cm、高 8.0 cm 的圆柱样,压实系数为 0.95。将制备好的试样放入恒温恒湿标准养护箱内养护 28 d(温度 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $\geq 95\%$)。

1.3 宏观特性测试

对试样的无侧限抗压强度、自由膨胀率、收缩特性进行测试,具体步骤参照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,测试龄期为 28 d。每组无侧限抗压强度试验中制作 3 个平行样,取平均值作为试样的抗压强度值。

1.4 微观特性测试

1.4.1 XRD 测试

将无侧限抗压强度试验碎块进行研磨,过 200

目筛后进行 XRD 测试,对水泥改性膨胀土的矿物成分组成变化进行研究,扫描速率为 $5^{\circ}/\text{min}$ 。

1.4.2 微观结构孔测试

选取无侧限抗压强度试验芯部试样,样品尺寸不超过 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$,采用压汞仪对所选样品的微观孔结构进行分析,测试设备为 AutoPore Iv 9510,可分析孔径范围为 5~340 000 nm。

1.4.3 SEM 测试

选取无侧限抗压强度试验芯部试样,样品尺寸不超过 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,对样品表面进行喷金,然后进行 SEM 测试,对所选样品的微观结构进行分析,试样龄期为 28 d,测试设备为 KYKY-EM6200。

2 试验结果与分析

2.1 击实特性

击实试验结果见表 1。由表 1 可见,改性膨胀土的最大干密度和最优含水率随水泥掺入量的增加逐渐增大。这是因为膨胀土掺入水泥后,水泥与土体颗粒表面的自由水发生水化反应,形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 等水化合物,晶体和孔隙液体中的 Ca^{2+} 与二氧化碳继续反应生成 CaCO_3 ,将土体颗粒黏结,使得土体颗粒得到加固,提高了土体的稳定性和耐水性^[18]。

表 1 击实试验结果

水泥掺入量/%	最大干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最优含水率/%
0	1.64	21.5
3	1.64	22.0
5	1.66	23.0
8	1.67	24.5

2.2 抗压强度

膨胀土改性前后土体的抗压强度对比如图 1 所示。水泥掺入量为 3% 时,改性膨胀土的抗压强度较素土提高了 88.55%;水泥掺入量为 5% 时,土体抗压强度较水泥掺入量为 3% 时提高 213.12%;水泥掺入量为 8% 时,土体抗压强度较水泥掺入量为 5% 时继续增大 126.74%。由此可见,水泥的掺入使得膨胀土的抗压强度显著增大,对膨胀土有着良

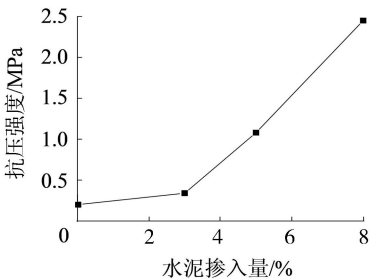


图 1 膨胀土抗压强度与水泥掺入量的关系

好的改性效果。当水泥掺入量较少时,水化反应产物较少,黏土颗粒与水泥反应不完全导致强度较低;随着水泥掺入量的提高,水泥与土体颗粒表面的自由水发生水化反应更加充分,土体颗粒得到进一步加固,强度不断提高。

2.3 自由膨胀率

膨胀土素土的自由膨胀率为 52.5%,掺入 3%、5%、8% 比例的水泥后,膨胀土的自由膨胀率依次为 43.5%、33.5% 和 32.5%,说明水泥对膨胀土的自由膨胀率特性有明显的改性作用,但是水泥掺入量达到 5% 后,若继续增加到 8%,膨胀土的自由膨胀率降低幅度很小,说明水泥改性膨胀土的水泥掺入量存在最优值。

膨胀土中掺入水泥后,水泥与土体颗粒表面的自由水发生水化反应,产生水化产物,水化产物在与膨胀土中黏土颗粒发生反应过程中使水泥和土从最初的离散颗粒状态变成一种胶结的均匀结构,土颗粒由较小形态形成较大的土团粒,减少了颗粒团之间的孔隙,同时增加了胶结键,降低了土体的自由膨胀率。

2.4 收缩特性

水泥改性膨胀土收缩试验结果见表 2。由表 2 可知,膨胀土的线收缩率和收缩系数均随水泥掺入量的增大逐渐减小,水泥对膨胀土的胀缩特性有明显的改性作用;水泥掺入量达到 5% 后,若继续增加到 8%,膨胀土的收缩性下降幅度较低,说明水泥改性膨胀土的水泥掺入量可能存在最优值。

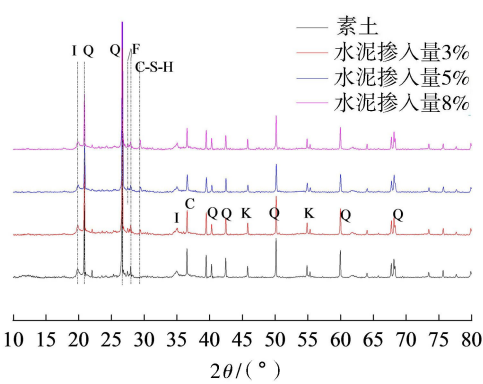
表 2 收缩试验结果

水泥掺入量/%	收缩系数	线收缩率/%
0	0.573	3.92
3	0.175	1.61
5	0.126	1.35
8	0.108	1.23

当水泥掺入量较低时,土体中水化反应产物较少,土体颗粒表面吸附的水化产物较少,水化产物的加固土体效果较低,改性膨胀土的收缩性仍然较强;随着水泥掺入量的提高,水泥水化反应产物进一步加固土体颗粒,因此收缩性不断降低。

2.5 XRD 分析

XRD 测试结果如图 2 所示。由图 2 可知,驷马山膨胀土素土的主要矿物成分包括高岭石、伊利石、石英、长石和绿泥石^[19]。掺入水泥后,膨胀土与水泥水化反应产生硅酸钙水化物(C-S-H),其衍射峰为衍射角 $2\theta=29.3^{\circ}$ 所对应的衍射峰。随着水泥掺入量的增加,更多的水泥与土颗粒表面的自由水发生水化反应,产生更多的 C-S-H,X 射线衍射强度增强。



I—伊利石;K—高岭石;Q—石英;F—长石;C—绿泥石

图 2 所选试样 XRD 测试结果

2.6 微观结构 SEM 分析

选取有代表性、能反映微观结构实际情况的 SEM 图像,经过降噪、滤波等前期预处理,得到素土及水泥改性膨胀土的 SEM 图像如图 3 所示。由图 3 可见,素土的孔隙由大量的裂隙等粗孔构成,这是由于膨胀土的干缩特性导致的,颗粒之间的黏结、搭接现象较少。掺入水泥后,SEM 图像表面变得崎岖、陡峭,水泥水化反应产生的 C-S-H 凝胶与土颗粒发生团聚,土颗粒之间逐渐黏结形成体积较大的絮状物或者絮状体,使得土体得到加固,土体更加密实。当水泥掺入量为 5% 时,孔隙较水泥掺入量 3% 时小,絮状体之间产生明显的丝状物质,使得絮状体进一步互相黏结,形成呈块状分布、体积更大的复杂絮状体;而当水泥掺入量达到 8% 时,颗粒之间的孔隙及絮状体进一步黏结,土体孔隙结构得到进一步优化。

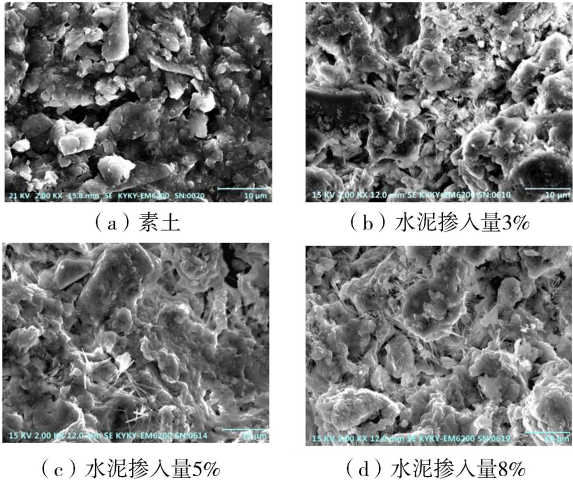


图 3 素土及水泥改性膨胀土的 SEM 图像

2.7 微观孔结构分析

所选试样的 MIP 测试结果如图 4 所示。根据图 4 可知,驷马山膨胀土素土试样的孔隙直径主要表现为“三峰形态”,第一个“峰”出现在孔径大于 8000 nm 附近,这是由于膨胀土失水发生干缩,产生大量的宏观裂隙;在孔径 555 nm 附近出现低矮平缓

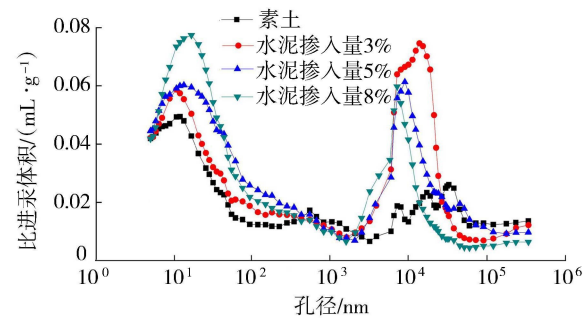


图4 所选试样 MIP 测试结果

“峰”,说明素土试样中的细观孔隙相对较少,这是由于制备试样时,将膨胀土素土配置最优含水率后经过 2 mm 筛,压实度控制为 0.95,采用一次成型压样仪制备无侧限抗压强度试样,试样土颗粒十分密实,细观孔隙较少;第三个“峰”出现在 10 nm 附近,这是由于土颗粒表面间存在微细孔。掺入水泥后,试样孔径主要分布在 10 nm 和 10 000 nm 附近,整体呈现“双峰”形态,并且 10 nm 附近的微细孔明显逐渐增多,孔隙直径显著降低。改性膨胀土的孔径小于 100 nm 的微细孔随着水泥掺入量的增加明显增多,这是由于随着水泥水化反应的进行,C-S-H 在黏土中的含量逐渐增加,逐渐填充土体中孔径为 100 ~ 10 000 nm 的孔隙。

根据 Horpibulsuk 等^[20]的研究结果,将试样中孔隙按照孔径尺寸划分为 5 组:<10 nm、10 ~ 100 nm、100 ~ 1 000 nm、1 ~ 10 μm 和 >10 μm,试样的孔隙体积及各组孔隙体积分数如表 3 所示。

表 3 孔隙体积及各组孔隙体积分数

水泥 掺入 量/%	孔隙体积/ (mL · g ⁻¹)	各组孔隙体积分数/%				
		<10 nm	10 ~ 100 nm	100 ~ 1 000 nm	1 ~ 10 μm	>10 μm
0	0.091	7.94	28.33	15.42	14.37	33.93
3	0.120	9.68	31.62	13.01	15.03	30.64
5	0.126	9.98	38.84	15.12	13.41	22.62
8	0.116	11.19	48.35	13.99	14.12	12.33

由表 3 可知,素土试样中孔径大于 1 000 nm 粗孔孔隙体积分数达到 48.30%,其原因是膨胀土失水发生干缩,产生大量的宏观裂隙及细观孔隙;而经过掺入水泥改性的膨胀土,水化反应产生的 C-S-H 凝胶态产物总量增多,对土体起到一定程度的胶结作用,土颗粒之间逐渐黏结形成体积较大的絮状物或者絮状体,使得土体颗粒得到加固,土体更加密实,试样内的孔隙主要吸附在土体颗粒上水化产物之间的孔隙,表现为孔径小于 100 nm 的微细孔,这也从侧面反映水泥改性膨胀土的收缩特性得到明显改善,其线收缩率和收缩系数较膨胀土素土小得多。

另外由表 3 可知,素土的孔隙体积仅有 0.091 mL/g,小于水泥改性膨胀土的孔隙体积,但由

于其内孔径大于 100 nm 的粗孔的孔隙体积分数达到 63.73%,孔径小于 100 nm 的微细孔孔隙体积分数仅有 36.27%,孔隙结构较松散,因而力学性能最差。水泥掺入量为 3%、5%、8% 的改性膨胀土的孔径小于 100 nm 微细孔孔隙体积分数分别为 41.31%、48.85% 和 59.55%,表明改性膨胀土样品中孔径小于 100 nm 的微细孔孔隙体积分数与水泥掺入量呈良好的正相关关系。随着水泥掺入量的增加,孔径大于 10 μm 的宏观裂隙体积分数逐渐降低。水泥掺入量的增加,水化反应的进行,C-S-H 凝胶态产物总量增多,对土体起到一定程度的胶结作用。

此外,水化产物间隙孔的总量与抗压强度试验结果、自由膨胀率试验结果、收缩试验结果及 SEM 图像测试结果具有良好的相关性,说明水化产物的总量是决定水泥改性膨胀土微观孔隙结构特征、土体强度及胀缩特性的关键因素。

3 结 论

a. 掺入水泥可以有效地改善膨胀土的性能,随水泥掺入量的增加,土体强度显著增加、胀缩特性明显降低,但水泥掺入量达一定程度后,掺入量的增加对土体强度的提升效果及对胀缩性的抑制效果并不明显。

b. 从水泥改性膨胀土的 XRD 图谱可以发现代表 C-S-H 矿物的新的衍射峰出现;随着水泥掺入量的增加,更多的水泥与土颗粒表面的自由水发生水化反应,产生更多的 C-S-H,X 射线衍射强度增强。

c. 掺入水泥对膨胀土进行改性处理后,土体的微观结构发生显著变化,水泥水化反应产生的 C-S-H 凝胶与土颗粒发生团聚,土颗粒之间逐渐黏结形成体积较大的絮状物或者絮状体,优化土体孔隙结构,使土体得到加固。

d. 膨胀土具有明显的胀缩特性,素土孔隙主要由裂隙(孔径大于 1 000 nm 的粗孔)组成,随水泥掺入量的增加,水化反应产生的 C-S-H 凝胶态产物总量增多,对土体起到一定程度的胶结作用,土颗粒之间逐渐黏结形成体积较大的絮状物或者絮状体,使土体颗粒得到加固,土体更加密实,改性膨胀土土体内孔径<100 nm 的微细孔体积分数逐渐增大,说明水化产物的总量是决定水泥改性膨胀土微观孔隙结构特征、土体强度及收缩特性的关键因素。

参考文献:

[1] 殷宗泽,袁俊平,韦杰,等.论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J].岩土工程学报,2012,34(12):2155-2161.
(YIN Zongze, YUAN Junping, WEI Jie, et al.

- Influences of fissures on slope stability of expansive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2155-2161. (in Chinese))
- [2] 黄震,陈铖. 改良膨胀土胀缩裂隙及与抗剪强度的关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 87-93. (HUANG Zhen, CHEN Cheng. A study of the swelling shrinkage cracks of the modified expansive soil and its relationship with the shear strength [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 87-93. (in Chinese))
- [3] 黎伟,刘观仕,姚婷. 膨胀土裂隙特征研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4): 78-82. (LI Wei, LIU Guanshi, YAO Ting. Research progress in crack features of expansive soils [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4): 78-82. (in Chinese))
- [4] 杨和平,张锐,郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1936-1941. (YANG Heping, ZHANG Rui, ZHENG Jianlong. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1936-1941. (in Chinese))
- [5] 吴珺华,袁俊平,杨松,等. 干湿循环下膨胀土胀缩性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 62-65. (WU Junhua, YUAN Junping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrinking performance of expansive soil under wetting-drying cycles [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1): 62-65. (in Chinese))
- [6] 黄斌,聂琼,徐言勇,等. 膨胀土水泥改性试验研究[J]. 长江科学院学报, 2009, 26(11): 27-30. (HUANG Bin, NIE Qiong, XU Yanyong, et al. Experimental research on cement-modification of expansive soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(11): 27-30. (in Chinese))
- [7] 吴建涛,伍洋,金科羽,等. 水泥+石灰复合改性膨胀土对水质的影响[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 82-87. (WU Jiantao, WU Yang, JIN Keyu, et al. Effects of cement-lime compound modification of expansive soil on water quality [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 82-87. (in Chinese))
- [8] 刘志彬,施斌,王宝军. 改性膨胀土微观孔隙定量研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 526-530. (LIU Zhibin, SHI Bin, WANG Baojun. Quantitative research on micropores of modified expansive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 526-530. (in Chinese))
- [9] 赵春吉,赵红华,常艳,等. 水泥改性强膨胀土理化试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(6): 604-611. (ZHAO Chunji, ZHAO Honghua, CHANG Yan, et al. Physical-chemical experimental investigation on cement-treated highly expansive soil [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2014, 54(6): 604-611. (in Chinese))
- [10] 宋新江,徐海波. 平面应变条件下水泥土强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2325-2330. (SONG Xinjiang, XU Haibo. Experimental study on strength characteristics of cement-soil under plane strain condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2325-2330. (in Chinese))
- [11] 宋新江,徐海波,王永雷. 水泥土各向异性变形特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1619-1624. (SONG Xinjiang, XU Haibo, WANG Yonglei. Study on the characteristic of cement-soil anisotropic deformation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1619-1624. (in Chinese))
- [12] 宋新江,徐海波,周文渊,等. 水泥土应力-应变特性真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2489-2495. (SONG Xinjiang, XU Haibo, ZHOU Wenyuan, et al. True triaxial test study on stress-strain characteristics of cement-soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2489-2495. (in Chinese))
- [13] 徐菲,蔡跃波,钱文勋,等. 脂肪族离子固化剂改性水泥土的机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1679-1687. (XU Fei, CAI Yuebo, QIAN Wenxun, et al. Mechanism research of cemented soil modified by aliphatic ionic soil stabilizer [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1679-1687. (in Chinese))
- [14] 易进翔,李磊,王亮,等. 基于 GIS 的固化污泥微观结构的三维孔隙率及分形维数的计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12): 3359-3365. (YI Jinxiang, LI Lei, WANG Liang, et al. Calculation method of 3D porosity and fractal dimension of solidified sludge's microstructure by GIS [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(12): 3359-3365. (in Chinese))
- [15] 李磊,王佩,薛飞. 生化降解条件下水泥固化污泥的微观结构研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(6): 1217-1225. (LI Lei, WANG Pei, XUE Fei. Research on microstructure of solidified sludge using cement under biochemical degradation [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(6): 1217-1225. (in Chinese))
- [16] HORPIBULSUK S, RACHAN R, SUDDEEPONG A. Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(4): 1521-1531.
- [17] PEETHAMPARAN S, OLEK J, DIAMMOND S. Mechanism of stabilization of Na-montmorillonite clay with cement kiln dust [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39: 580-589.
- [18] 熊海帆. 膨胀土水泥改性试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [19] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [20] HORPIBULSUK S, RACHAN R, CHINKULKIJNIWAT A, et al. Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations [J]. Construction & Building Materials, 2010, 24(10): 2011-2021.

(收稿日期:2020-05-26 编辑:雷燕)