

煤矸石粉改良膨胀土的试验

马缤辉^{1,2*}, 曾星¹, 郭佳乐¹, 胡志勇¹, 贺成斌¹

(1.湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201;

2.岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要:针对南方地区广泛存在的膨胀土路基病害处置及煤矸石资源化利用需求,采用煤矸石粉改良膨胀土的胀缩特性.通过现有的公路工程土工试验规程中的室内试验方法,利用击实试验确定最佳含水率和最大干密度,再进行直接剪切试验和无荷载膨胀率试验,研究分析在掺入6%,8%,10%,12%煤矸石粉下膨胀土的黏聚力 c ,内摩擦角和无荷载膨胀率的变化规律,比较素膨胀土和改良土的效果,并通过扫描电镜试验分析膨胀土的改良机理.结果表明:随着煤矸石粉掺量的增加,膨胀土的抗剪强度提高,无荷载膨胀率减小,黏聚力和内摩擦角均有提高,煤矸石粉能够有效地降低膨胀土的胀缩性和改良膨胀土的抗剪强度,得出了改良膨胀土的物理化学机理及微观结构机理,并且确定了煤矸石粉的最佳掺量为8%,为有效改良膨胀土路基、资源化利用煤矸石提供科学依据和有效改良方法.

关键词:膨胀土;煤矸石;抗剪强度;无荷载膨胀率;改良机理

中图分类号:TU4111

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2019)03-0066-07

Experimental Study on Improved Expansive Soil of Coal Gangue Powder

Ma Binhui^{1,2}, Zeng Xing¹, Guo Jiale¹, Hu Zhiyong¹, He Ghengbin¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Aiming at the widespread disease disposal of expansive soil subgrade and the demand of coal gangue resource utilization in the southern region, the swelling and shrinkage characteristics of expansive soil are improved by coal gangue powder. Through the indoor test method in the existing geotechnical test rules of highway engineering, the optimum water content and maximum dry density are determined by the compaction test, and then the direct shear test and the non-load expansion rate test are carried out, and the variation law of cohesion, internal friction angle and non-load expansion rate of expansive soil under 6%, 8%, 10% and 12% coal gangue powder are studied, comparing the effect of vegetarian expansive soil and modified soil, and analyzing the improvement mechanism of expansive soil by scanning electron microscope test. Results show that with the increase of coal gangue powder content, the shear strength of expansive soil increases, the non-load expansion rate decreases, the adhesion force and internal friction angle are improved, the coal gangue powder can effectively reduce the swelling and shrinkage of expansive soil and improve the shear strength of expansive soil, and the physicochemical mechanism and microstructure mechanism of the modified expansive soil are obtained. It also determines that the optimum dosage of coal gangue powder is 8%, which provides a scientific basis and an effective improvement method for effective improvement of expansive soil subgrade and resource utilization of coal gangue.

Keywords: expansive soil; coal gangue; shear strength; unloaded expansion rate; improvement mechanism

收稿日期:2019-05-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778227;51308208;41372303);湖南省科技创新平台与人才计划资助项目(2016RS3032);湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ3069);湖南省教育厅科研资助项目(10C0669)

*通信作者,E-mail:mbh@hnust.edu.cn

煤矸石是我国堆存量和排放量最大的工业固体废弃物之一。煤矸石不仅占用了大量土地,还会自燃产生大量有害气体,对环境造成严重污染。膨胀土作为一种影响道路及其它工程建设的特殊土,在我国分布范围广。膨胀土黏粒成份主要由强水性矿物质组成,且具有吸水膨胀失水收缩、浸水承载力降低、干缩产生裂隙等特性^[1],容易导致道路路基及其工程建筑物产生不均匀的胀缩变形,造成位移、开裂甚至破坏。目前,在工程上常用掺石灰^[2]、粉煤灰^[3]对膨胀土路基进行改良,但石灰、粉煤灰改良的成本较高,而用煤矸石既可降低成本,又可以解决煤矸石废弃物堆量大、占地多、污染环境等问题。目前,煤矸石常被用来制砖、生产水泥及填筑路基等^[4]。利用煤矸石改良膨胀土研究不多,张燕等^[5]通过对最佳煤矸石掺量的膨胀土进行干湿循环试验及压汞试验,得到了最佳掺量下煤矸石胀缩性能的规律,并从微观角度揭示了改良膨胀土强度变化机理。李维生等^[6]利用不同含水率、煤矸石级配和煤矸石掺量拌制膨胀土,对其掺合料进行击实试验测定最佳含水率和最大干容重,得出了影响膨胀土密实性的因素和改良膨胀土路基的压实机理。杨晓蕴等^[7]通过对煤矸石粉、浸泡液 pH 值及 X 射线衍射分析,证明了其析出的物质可与膨胀土胶结或发生离子交换反应从而提高膨胀土的抗剪强度。上述研究多采用大颗粒煤矸石改良膨胀土,且性能指标过于单一,在选用不同煤矸石粒径和结合膨胀土区域性特点进行膨胀土改良方面有待进一步探讨。

本文针对南方地区典型膨胀土的胀缩特性及改良方法进行研究,通过无荷载膨胀率试验、直剪试验以及扫描电镜试验^[8]等,研究不同掺量下的煤矸石粉对南方地区膨胀土的改良效果,分析膨胀土的改良机理及煤矸石粉对膨胀土胀缩特性的影响,不同煤矸石粉掺量下改良土的膨胀率及抗剪强度的变化规律,并得出煤矸石改良膨胀土的最佳掺量,为膨胀土的改良提供借鉴。

1 试验材料性质

煤矸石是一种含碳量较低,比煤坚硬的黑灰色岩石,其与石灰性质相近,都含有大量钙离子、镁离子、铝离子,且改良原理是煤矸石粉与膨胀土的离子交换,减少膨胀土中的亲水离子,并产生絮凝或团聚作用,使土体组织结构发生变化,黏粒含量降低,从而有效的改善膨胀土遇水膨胀的缺陷。本试验煤矸石取自湖南临湘,其主要成分和基本技术指标见表 1 和表 2。

表 1 煤矸石的化学成分

						%
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	C	
63.2	23.9	3.7	1.9	1.4	3.1	

表 2 煤矸石的基本技术指标

						%
崩解率	烧失率	自由膨胀率	吸水率	压碎值	坚固值	
0.5	15.2	13.7	0.5	21.1	12.0	

从表 1 中可知,煤矸石中的主要成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃, 占总质量分数的 87.1%。为充分激发煤矸石粉的活性,把煤矸石磨成粒径小于 0.5 mm 的颗粒,使其按 0%, 6%, 8%, 10%, 12% 掺入到膨胀土中进行试验研究。

试验采用的膨胀土取自湖南长沙望城区,根据 JTG E40-2007《公路土工试验规程》^[9] 的相关试验方法,测得其基本物理性质指标。

表 3 膨胀土的化学成分

						%
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	
45.5	26.4	11.1	0.25	1.6	2.4	

表 4 膨胀土的基本物理性质

液限/%	塑限/%	塑性指数/%	最大干密度/(g/cm ³)	自由膨胀率/%	最佳含水率/%
52.48	29.30	23.18	1.83	49	16.21

从表 4 中可以看出,膨胀土的塑性指数为 23.18%,自由膨胀率为 49%,按文献^[10]中的判别方法进行分类,判定试验所用的土属于弱膨胀土。

击实试验按照中 T0131-2007 法 II-2 类重型击实法进行试验.为使试验数据更加准确,不同含水率试样由规范规定的 5 个增加到了 8 个,如图 1 得到膨胀土的最佳含水率为 16.21%,最大干密度为 1.83 g/cm^3 .再通过将不同掺入比的煤矸石粉掺入到膨胀土中,并按所得到的最优含水率击实改良土制备试验试件,按照 JTG E40-2007《公路土工试验规程》进行无荷载膨胀率试验、直接剪切试验测试.

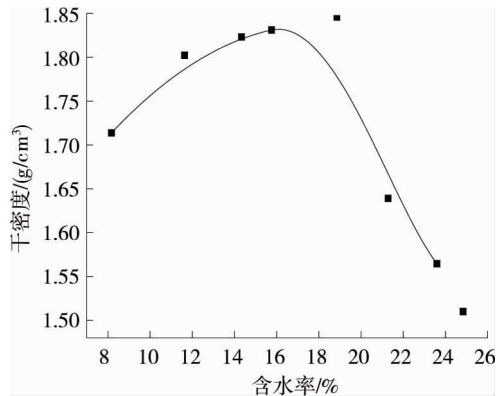


图 1 干密度与含水率的变化关系

2 试验过程

将煤矸石粉以 0%, 6%, 8%, 10%, 12% 掺入到膨胀土中,通过 T0131-2007 法 II-2 类重型击实法对膨胀土进行击实,制成无荷载膨胀率和直接剪切试验所需的试件,压实度控制在 95% 左右,最佳含水率为 16.21%.无荷载膨胀率试验采用内径 58 mm,高 35 mm 的环刀试样,固结快剪试验采用内径 61.8 mm,高 20 mm 的环刀试样,取样时在环刀内壁涂一薄层凡士林,齐环刀刃口将土样修平.击实试样及试验试件如图 2 和图 3 所示.

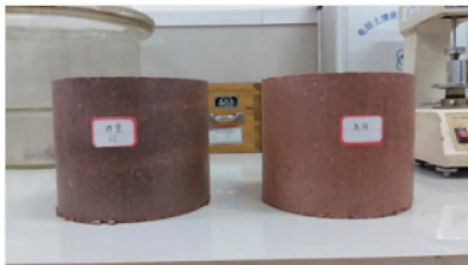


图 2 击实试样

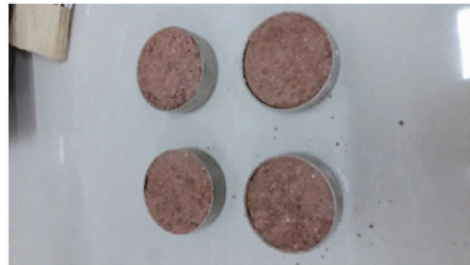


图 3 环刀试件

无荷载膨胀率试验是测定试样在无荷载有侧限条件下浸水后的单向膨胀率,严格按照 JTG E40-2007《公路土工试验规程》的试验步骤操作.在底座中放置一块湿润的透水石,将环刀钝口端旋在底座上,使试样地面与透水石顶面接触,把试件安好后,将有孔活塞板放在试样顶面上,对准活塞中心,装好百分表,并记录百分表读数后,注纯水入盆,盆内水面须经常保持约与试样底面高度齐平,记下开始注水时间,按 5, 10, 20, 30 min, 1, 2, 3, 24 h 及以后每隔 24 h 测记百分表读数,直至试样不再膨胀为止.即得出改良土的无荷载膨胀率.所用仪器如图 4.

在直接剪切试验中,采用固结快剪试验并严格按照规程要求进行试验,对准剪切容器上下盒,插入固定销,在下盒内放透水石和滤纸,将带有试样的环刀刃向上,对准剪盒口,在试样上放滤纸和透水石,将试样小心地推入剪切盒内进行试验,试验得出不同煤矸石粉掺量下土样的剪切位移和剪应力,算出改良土的抗剪强度得出抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角.其中垂直加载设有五级荷载分别为 50, 100, 200, 300, 400 kPa,剪切速率约为 0.8 mm/min ,试样控制在 3~5 min 内剪损.所用直剪仪器如图 5.



图4 WZ-2 膨胀仪



图5 ZJ型应变控制式直剪仪

3 结果分析

3.1 无荷载膨胀率

为研究不同煤矸石粉掺量对膨胀土的物理性质的影响,按0%,6%,8%,10%,12%的掺入比对膨胀土进行无荷载膨胀率试验,无荷载膨胀率根据式1进行计算:

$$\delta_e = \frac{\Delta H}{H_0} 100; \quad (1)$$

$$\Delta H = R_t - R_0. \quad (2)$$

式中: δ_e 为时间 t 时土的无荷载膨胀率,%;计算至0.1; ΔH 为时间 t 时试样膨胀的增量,mm; H_0 为试样起始高度,mm; R_t 为时间 t 时百分表读数,mm; R_0 为试验开始时百分表读数,mm.

由式1得到不同煤矸石粉掺量下膨胀土的无荷载膨胀率,无荷载膨胀率与煤矸石粉掺入比的关系曲线如图6.

由图6可知:素土的无荷载膨胀率为18.5%,曲线在煤矸石粉掺入比从0%增加到8%,膨胀土的无荷载膨胀率明显减小,降低了约2.3倍;当掺入比从8%到12%时,膨胀土的无荷载膨胀率开始回升不再减小,但是比素土的要低,且煤矸石粉掺入比为8%时,膨胀率达到最小值7.9%,相对于原膨胀土的膨胀率减小了10.6%.这表明了煤矸石粉对膨胀土的膨胀率有改良效果,当煤矸石粉掺入量达到一定程度后,对膨胀土的改良效果不再明显,且煤矸石粉掺量为8%时对膨胀土膨胀率的抑制效果最佳.

3.2 直接剪切

本试验严格按照T0141-1993法进行试验.得出不同煤矸石粉掺量下膨胀土的法向应力与抗剪强度的关系曲线,由图7可知,抗剪强度与法向应力为线性关系,随着掺量增加时,线性关系逐渐突显,不同煤矸石粉掺量下膨胀土的抗剪强度指标内摩擦角、黏聚力 c 和某正应力下的抗剪强度,见表5.煤矸石粉掺量与膨胀土的抗剪强度各项指标关系曲线如图8~图10所示.

从图8得出,膨胀土的黏聚力 c 随煤矸石粉掺量的增加不断增大,在8%后增加幅度不断降低,掺入煤矸石粉的土样黏聚力在8%时,达到最大值108.8 kPa,相对于素土的黏聚力提高了近25.2%;从图9可以看出,膨胀土内摩擦角随煤矸石粉掺量的增加而变大,在8%后增大幅度降低,土样的内摩擦角最大增加幅度为4.6%.土的抗剪强度 τ 可以根据式3计算,结果如表5所示.

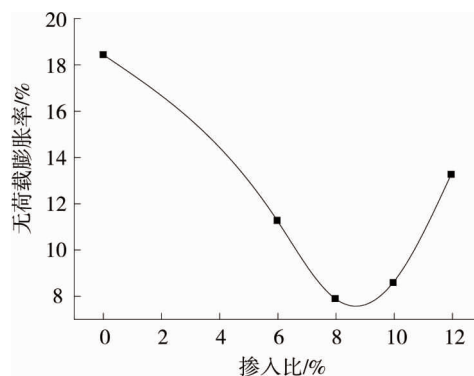


图6 无荷载膨胀率与煤矸石粉掺量的关系

$$\tau_f = C + \sigma \tan \varphi. \quad (3)$$

式中： τ_f 为抗剪强度； C 为土的黏聚力； σ 为总应力； φ 为土的内摩擦角。

表5 各试件的抗剪强度指标

煤矸石粉掺量/%	黏聚力/kPa	土的内摩擦角/(°)	正应力 100 kPa 下的抗剪强度/kPa
0	86.9	36.13	157.6
6	95.2	37.52	179.2
8	108.8	37.78	185.3
10	95.6	37.77	181.2
12	91.5	37.19	179.4

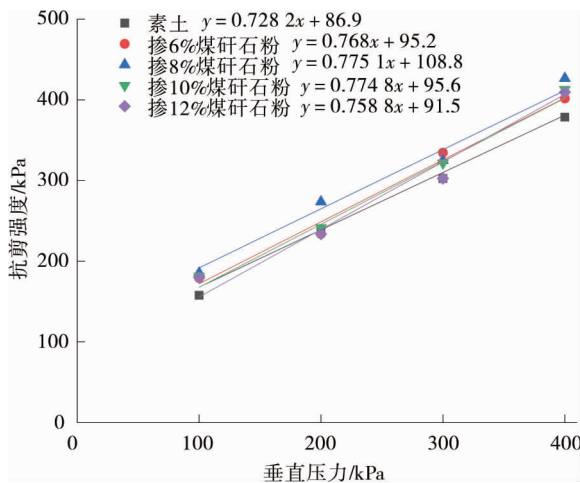


图7 抗剪强度与垂直压力的关系

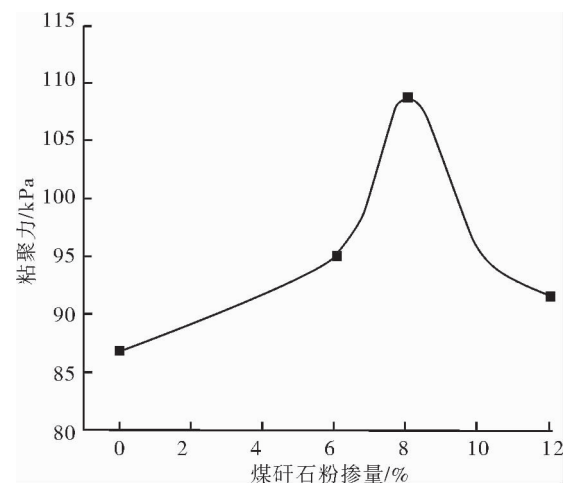


图8 煤矸石粉掺量与黏聚力的关系

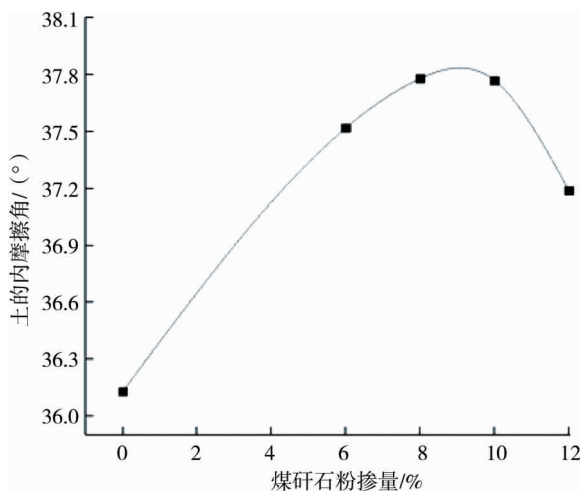


图9 煤矸石粉掺量与内摩擦角的关系

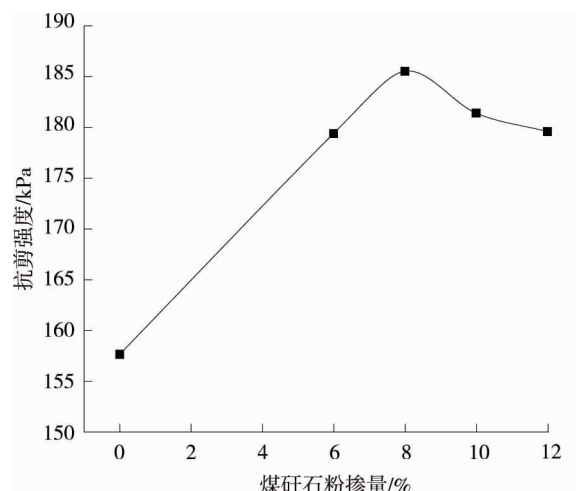


图10 煤矸石粉掺量与抗剪强度的关系

由图10可以得出,煤矸石粉掺量从0%增加到8%时,膨胀土的抗剪强度从157.6 kPa增加到185.3 kPa,提高了近17.6%;从8%增加到12%时,膨胀土的抗剪强度逐渐下降到179.4 kPa,相比原膨胀土的抗剪强度增加幅度为13.8%,8%煤矸石粉掺量下的膨胀土的抗剪强度达到最大值,相对于素膨胀土提高了27.7 kPa.因此得出煤矸石粉能够提高膨胀土的抗剪强度,且掺量在8%时达到最佳效果。

4 改良机理分析

蒙脱石和伊利石是膨胀土膨胀与收缩的物质基础,土壤矿物表面带有大量负电荷,其结构单元由两层 SiO_2 和一层 Al_2O_3 组成,层间连接很弱,水分子可以渗入层间,生成水夹层而产生晶间膨胀,加上蒙脱石一

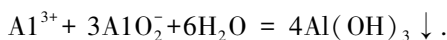
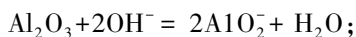
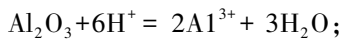
般又有较多 Na^+ , Ca^{2+} 阳离子,而阳离子吸附作用会产生粒间膨胀.当土壤改良剂和它相遇后,改良剂带正电荷的亲水基和膨胀土就会紧密结合,疏水基一致向外,置换出膨胀土颗粒表面的亲水金属阳离子,降低了膨胀土颗粒表面的吸附水膜厚度,使土壤颗粒进一步靠近,封闭各土团之间的孔隙,减少了吸水性和膨胀性,土对水的敏感性减弱,经干燥后不再受潮,使膨胀土的水稳定性得到提高.

4.1 物理化学机理

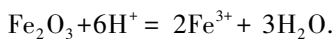
将煤矸石粉掺入膨胀土中会发生离子交换、团粒化作用、碳酸化作用和胶凝作用等.早期主要发生离子交换和团粒化作用,煤矸石粉成分中的高价阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与黏土颗粒表面的低价阳离子 K^+ 、 Na^+ 发生交换,减薄土粒吸附水膜的厚度,使土体塑性、胀缩性降低,最佳干密度减小,最佳含水率增大,并促进较大的土团粒进一步联合,土粒之间形成较强的联结,改变了土的组织结构,减小了黏粒含量.同时, CO_2 与土中的氢氧化钙和氢氧化镁发生长时间的碳酸反应,生成的碳酸钙对土体的胶结作用使得土体加固.在离子交换反应后期,膨胀土中的硅胶、铝胶与煤矸石粉进一步发生硬化反应生成硅酸钙、铝酸钙,在膨胀土的粘粒外围形成稳定的保护膜,具有很强的粘结力,形成网状结构,增长其强度,同时保护膜还能起到隔离水分的作用,使膨胀土获得水稳定性.以上四种作用将明显改善土的塑性、膨胀势和其他性质.其次,煤矸石粉是无机质和少量有机质组成的混合物,是一种细颗粒的无黏性材料,当掺入量较大时,人为地减小了膨胀土的黏粒含量,这对膨胀土性质的也有改善.

加入煤矸石粉的膨胀土会发生的化学反应式如下:

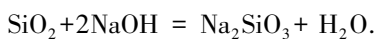
1) 氧化铝引起的反应



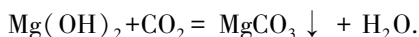
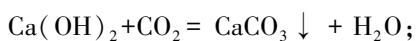
2) 氧化铁引起的反应



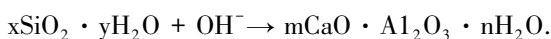
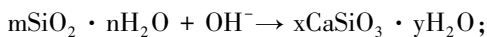
3) 二氧化硅引起的反应



4) 碳酸化作用



5) 胶凝作用



这些游离氧化物或生成的新的难溶性氢氧化物与膨胀土颗粒的胶结作用,以及游离的高价金属阳离子与土颗粒表面紧紧吸附进行离子交换作用,可抑制土体膨胀,提高黏聚力,从而降低了膨胀土的胀缩性,提高了抗剪强度.

4.2 微观结构机理

图 11 为膨胀土的扫描电镜试验图像,土体结构以扁平状聚集体和片状颗粒为主,颗粒大量堆积在一起形成颗粒堆积结构,同时含有少量絮凝结构等;黏土物质连续、无定向分布,孔隙形状不规则且具有孔隙发育,为胀缩变形提供了吸水与失水的通道.

如图 12,通过比较素膨胀土与改良后的膨胀土,发现掺入煤矸石粉后的膨胀土孔隙发育程度明显减弱,土体结构也更加致密.颗粒以团粒状为主,含少量片状颗粒,颗粒之间主要以边-边、面-一面的方式接触,且填充部分孔隙,孔隙发育程度降低.

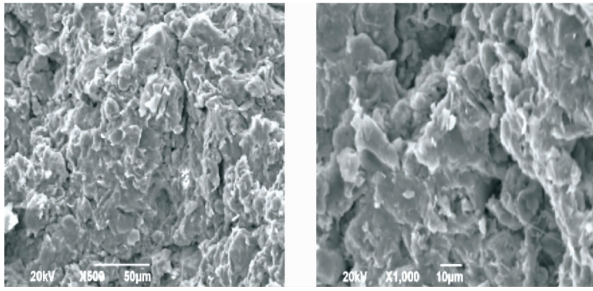


图 11 未掺煤矸石粉土样

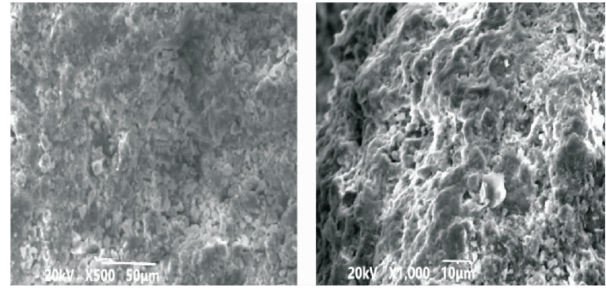


图 12 掺煤矸石粉土样

5 结论

1) 膨胀土中掺入煤矸石粉可降低其无荷载膨胀率,且随着掺量的增加膨胀率逐渐减小,当煤矸石粉掺入量达到一定程度后,对膨胀土膨胀率的抑制效果不再明显.改良土样比素膨胀土样的最大无荷载膨胀率减小了 10.6%.

2) 煤矸石粉可增强膨胀土的抗剪强度,随着掺量的增加,膨胀土的内摩擦角和黏聚力会先增大后减小,但不低于素膨胀土值,且内摩擦角相差不大而黏聚力的变化较明显.掺入煤矸石粉后膨胀土的抗剪强度增加主要是由于黏聚力的增加.

3) 掺入煤矸石粉的膨胀土颗粒以团粒状为主,含少量片状颗粒,且填充部分孔隙,孔隙发育程度降低.土体结构变密,颗粒之间粘结力更强,改良土体颗粒的团聚化程度增大,土体的整体性更加稳定.通过物理化学作用,降低了膨胀土的胀缩性,提高了黏聚力,增强了抗剪强度.

4) 煤矸石粉能够有效改良南方地区膨胀土的胀缩性和抗剪强度,且改良的最佳掺量为 8%.

参考文献:

- [1] Petry T M, Little D N. Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures—history, practice and future[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(6): 447-460.
- [2] 周葆春,孔令伟,郭爱国.石灰改良膨胀土的应力-应变-强度特征与本构描述[J].岩土力学,2012,33(4):44-50.
- [3] 冯美果,陈善雄,余颂,等.粉煤灰改性膨胀土水稳定性试验研究[J].岩土力学,2007,28(9):1889-1893.
- [4] 李化建.煤矸石的综合利用[M].北京:化学工业出版社,2010.
- [5] 张雁,殷潇潇,刘通.煤矸石改良膨胀土特性及其最佳掺量条件下的孔隙结构表征[J].农业工程学报,2018,34(22): 267-274.
- [6] 李维生,张雁,郭利勇,等.CG改良膨胀土击实特性机理研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2014,35(4): 107-110.
- [7] 杨晓蕴,张雁.煤矸石粉改良膨胀土抗剪强度机理分析[J].煤炭工程,2014,46(9):123-125.
- [8] 张小平,施斌.石灰膨胀土团聚体微结构的扫描电镜分析[J].工程地质学报,2007,15(5):654-660.
- [9] JTJ E40-2007.公路土工试验规程[S].2007.
- [10] GB50112-2013.膨胀土地区建筑技术规范[S].2013.