

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.014

粉煤灰与石灰改良花岗岩残积土压缩特性研究

李自立^{1,2,3}, 陈志波^{1,2,3}, 胡屏^{1,2,3}, 安亚洲^{1,2,3}

(1. 国土资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室(福建省地质灾害重点实验室), 福建 福州 350116;

2. 福州大学 环境与资源学院岩土与地质工程系, 福建 福州 350116;

3. 地质工程福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350116)

摘要: 采用粉煤灰、石灰对福州地区花岗岩残积土进行掺合改良,通过进行击实试验和固结试验对比研究了粉煤灰石灰掺量和养护期的变化对花岗岩残积土压实性和压缩变形特性的影响。试验结果表明:在试验研究范围内,随着粉煤灰掺量的增加,粉煤灰改良土的最大干密度 ρ_{dmax} 明显增大,最优含水率 ω_{op} 逐渐减小,压缩性逐渐降低,且养护期对其影响不大;随着石灰掺量增加,石灰改良土的 ρ_{dmax} 逐渐减小, ω_{op} 逐渐增大,压缩性逐渐降低,且通过养护能明显降低其压缩性;同时掺入石灰和粉煤灰后,石灰-粉煤灰改良土的压实性和压缩性也都得到了较好的改善,且通过养护能有效降低其压缩性;综合分析表明 1:2:7 配比对于沉降要求较高工程的固化效益最佳。

关键词: 粉煤灰;石灰;花岗岩残积土;土体改良;压缩系数

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0082-05

Compression Characteristics of Flyash-lime Treated Granite Residual Soil

LI Zili^{1,2,3}, CHEN Zhibo^{1,2,3}, HU Ping^{1,2,3}, AN Yazhou^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Land and Resources

(Fujian Key Laboratory of Geohazard Prevention), Fuzhou, Fujian 350116, China; 2. Department of Geotechnical and Geological Engineering, College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;

3. Fujian Provincial Universities Engineering Research Center of Geological Engineering, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: In order to find a better way to improve the engineering mechanical properties of granite residual soil, the consolidation experiments and the compaction test of granite residual soil which mixed with different content of lime and fly-ash were carried out after a series of curing period. The conclusion of compatibility and compression deformation characteristics have obtained under various conditions. The results show that compatibility and compression deformation characteristics are affected by the content of admixture and curing period. For the flyash-treated soil, the more the flyash is, the greater the ρ_{dmax} is, the smaller the ω_{op} is, and the lower the compressibility which is hardly influenced by curing period is. For the lime-treated soil, the more the lime is, the smaller the ρ_{dmax} is, the greater the ω_{op} is, and the lower the compressibility which decreases with the increase of curing period is. After adding lime and fly ash at once, the compatibility and compressibility of the treated soil have been improved better, the compressibility of the treated soil can be effectively reduced by curing. The comprehensive analysis shows that the double ash improvement method of 1:2:7 ratio is best choice for engineering projects with higher settlement requirements.

Keywords: flyash; lime; granite residual soil; treated soil; compression coefficient

在我国东南部花岗岩分布相当广泛,尤其在广东、福建以及桂东南与湘南、赣南一带,更为集中。

花岗岩出露面积,在闽、粤两省都占其总面积的 30%~40%,桂、湘、赣三省分别占其总面积的 10%

收稿日期:2018-09-16

修稿日期:2018-10-14

基金项目:福建省自然科学基金项目(2017J01481);国土资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室开放基金项目(FJKLGH2017K005)

作者简介:李自立(1993—),男,云南大理人,硕士研究生,研究方向为岩土工程。E-mail:1360303318@qq.com

通讯作者:陈志波(1977—),男,福建莆田人,教授,主要从事岩土工程与地质工程方面的教学与科研工作。E-mail:czb@fzu.edu.cn

~20%^[1]。其中,花岗岩残积层的厚度在闽粤沿海地区一般为 20 m ~ 35 m^[2],在厦门地区最厚逾 70 m^[3]。改革开放以后,我国公路、铁路等交通事业和住房建设事业得到了高速发展,花岗岩残积土成为了东南沿海地区工程建设中最常见的土体之一。但是,花岗岩残积土的工程力学性质较为特别,其在原始地层环境中具有强度大、承载力较高、压缩性低的特点,而因扰动和雨水的浸入都会使其崩解、软化,造成强度的明显降低。这种强度的差异对于工程建设是十分不利的,特别是在东南沿海这种降水丰富的地区,花岗岩残积土的这种特性往往会造成滑坡、崩塌等地质灾害,成为工程建设的安全威胁。而粉煤灰是我国当前排量最大的工业废渣之一,年排渣量已达 3 亿 t 以上^[4]。作为一种工业废弃物,如果对粉煤灰处理不当,就容易引起空气污染、水污染等一系列的生态环境问题,成为人类健康的巨大隐患。但是,粉煤灰具有较好的工程特性,其在改善黄土、盐渍土、膨胀土和软土等特殊土体的土工力学性能方面得到了充分应用,具有巨大的工程价值。因此,采用粉煤灰对花岗岩残积土进行改良,可谓一举两得,既可提高花岗岩残积土的工程力学性能,又能充分发挥粉煤灰的工程利用价值,避免粉煤灰造成环境污染。

近年来,很多科学学者在土体性能研究和改良方面已经做了大量的探索。周建基等^[5]为解决黄土的湿陷问题,利用添加固化剂石灰来提高黄土的工程力学性质,通过对泡水饱和和不泡水的一系列不同掺量的改良土进行固结压缩试验,对比研究了掺量对土体改良效果的影响。石熊等^[6]通过大型三轴剪切实验探讨了不同级配碎石改良填料的强度特性,并对邓肯-张模型进行了改进。吕擎峰等^[7]采用传统固化剂石灰、粉煤灰及新型改良剂水玻璃对盐渍土进行了固化,通过常规室内试验和微观分析等手段测试了改良土的强度特征,深入研究了改良机理。赵德安等^[8]深入地研究了盐渍化土体的改良机理,通过试验论证了固化剂在盐渍化土体水分迁移中扮演的重要作用,为盐渍土改良的深入研究提供了重要参考。朱彦鹏等^[9]研究了不同配比的黄土-红砂岩混合土的强度及压缩性,明确了改良红砂岩用于填料的适宜性。陈湘亮等^[10]通过改良土强度、刚度等分析了泥质粉砂岩改良土作为路基填料的适宜性。段伟宏等^[11]利用橡胶颗粒对砂土进行改良,通过固结试验研究了砂含量对改良土的压缩变形特性影响及影响趋势。王宏伟等^[12]利用 MgO 对淤泥进行改良,并研究了改良土的压缩性变化趋

势。王朝辉等^[13]利用蛭石与水泥、石灰合成新型固化剂,通过试验表明该固化剂可有效改善淤泥的路用性能。袁明月等^[14]通过钢渣微粉有效地提高了膨胀土的强度,降低了其膨胀性。杨俊等^[15]在膨胀土中添加风化砂以提高膨胀土的工程力学性能,通过对经冻融循环后的改良土进行直剪试验,研究分析了风化砂掺量对膨胀土的改良效果。冯巧等^[16]以聚丙烯纤维等为固化剂对砂土进行了固化,通过无侧限压缩试验和直剪试验研究分析了固化剂掺量对改良土强度的影响。张亚杰等^[17]采用石灰对高液限土进行改良,能有效降低素土的液限及塑性指数。

本文采用石灰和粉煤灰对花岗岩残积土进行改良,通过击实试验和压缩试验分别获取改良土的最大干密度、最优含水率、压缩系数等压实性指标和压缩性指标,对比研究分析了不同养护期和不同掺量的石灰、粉煤灰对花岗岩残积土的压实性和压缩变形特性的影响及影响趋势,探讨了改良土工程的沉降问题,为改良花岗岩残积土的工程实践提供科学的指导。

1 试验

1.1 试验材料

本试验采用福州某一待建场地出露的花岗岩残积土作为试验用土,其基本物理性质如表 1 所示,测试方法参照《土工试验方法标准》^[18](GB/T 50123—1999)。粉煤灰采用河南巩义豫联电厂生产的粉煤灰,其基本化学成分见表 2。试验所采用的石灰为过 2 mm 筛的消石灰粉。

表 1 土样的物理性质指标

天然密度 (g·cm ⁻³)	天然 孔隙比	天然含 水率/%	比重	液限 /%	塑限 /%
1.835	0.725	20.36	2.63	45.2	30.5

表 2 粉煤灰成分

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
质量分数/%	58.2	30.0	4.3	1.5	2.8	3.2

注:%表示质量分数。

1.2 试验方案

取过 5 mm 筛后的花岗岩残积土,分别掺入占残积土质量 5%、10%、15%、20% 的粉煤灰和占残积土质量 2%、4%、6%、8% 的石灰,以及分别按石灰:粉煤灰:花岗岩残积土的质量比为 1:2:7、1:3:6 和 8:32:60 配制土样。根据击实试验成果,按最优含水率配置土样并采用击样法制取环刀样,压实系数取

0.95。制样后,将成型试样密封置于标准养护条件(温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 90\%$)下养护,养护期分别为 1 d、7 d、14 d 和 28 d,到达预定养护期后分别对不同掺量的试样进行固结试验,施加荷载等级依次为 25 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa、800 kPa、1 600 kPa,采用压力段由 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ 增加到 $p_2 = 0.2 \text{ MPa}$ 时的压缩系数 a_{1-2} 评定土的压缩性。

2 试验结果与分析

2.1 改良花岗岩残积土的击实特性

2.1.1 粉煤灰改良花岗岩残积土的击实特性

花岗岩残积土中的粉煤灰掺量与改良土最大干密度和最优含水率关系曲线如图 1 所示。

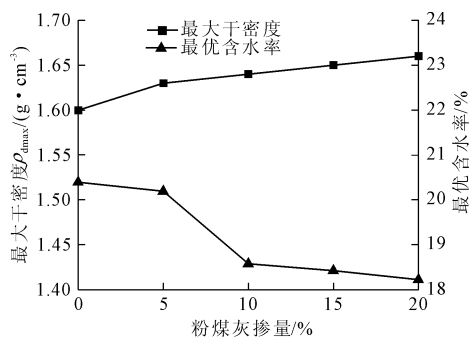


图 1 压实性随粉煤灰掺量的变化曲线

由图 1 可以看出:在本试验研究范围内,随着花岗岩残积土中的粉煤灰掺量增加,改良土的最大干密度明显增大,而最优含水率呈减小趋势。当掺量为 10% 时,改良土的最优含水率显著下降;当粉煤灰掺量为 20% 时,改良土的最大干密度提高了 3.8%,而最优含水率却降低了 10.6%。由此可知,当花岗岩残积土经过粉煤灰改良之后,其整体密度得到提高,施工需水量也显著降低。

2.1.2 石灰改良花岗岩残积土的击实特性

花岗岩残积土中石灰掺量与改良土最大干密度和最优含水率关系曲线如图 2 所示。

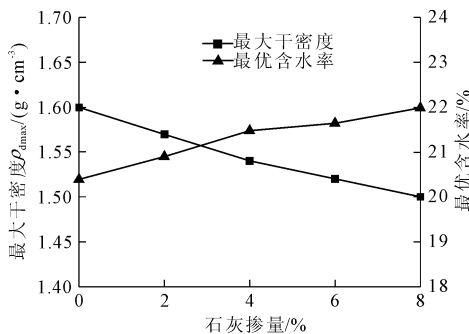


图 2 压实性随石灰掺量的变化曲线

由图 2 可以看出:在本试验研究范围内,当花岗岩残积土中的石灰掺量增加时,最大干密度逐渐减小,而最优含水率逐渐增大。当掺量为 8% 时,改良土的最大干密度降低了 6.2%,而最优含水率却提高了 7.8%。造成上述现象的原因可能是随着石灰掺量的增加,改良土的微观结构受到影响,土颗粒粒径产生变化,改良土颗粒发生团聚现象,土体级配变得均匀,从而造成在击实过程中有效击实功变小,改良土中水分排放受到限制,最终表现为最优含水率变大,最大干密度变小^[19]。

2.1.3 石灰-粉煤灰改良花岗岩残积土的击实特性

花岗岩残积土中的石灰-粉煤灰掺量与改良土最大干密度和最优含水率的关系曲线如图 3 所示。

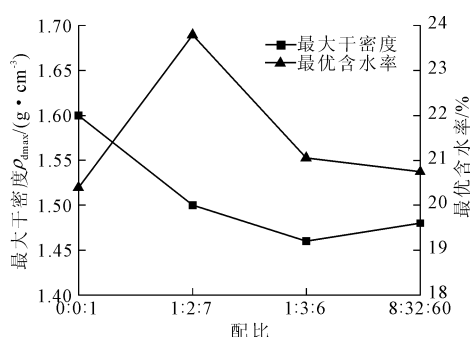


图 3 压实性随石灰-粉煤灰掺量的变化曲线

由图 3 可以看出:在本试验研究范围内,将一定量的石灰和粉煤灰同时添加到花岗岩残积土中后,改良土的最大干密度呈显著减小的趋势。当双灰改良土中粉煤灰比例增加时,改良土的最优含水率逐渐减小。其中,当配比为 1:2:7 时,改良土的最优含水率提高最为明显,提高了 16.7%;当配比为 1:3:6 时,最大干密度降低幅度最大,降低 8.8%。

2.2 改良花岗岩残积土的压缩特性

2.2.1 粉煤灰对改良土压缩特性的影响

通过固结试验得到花岗岩残积土在不同粉煤灰掺量和养护期下的压缩系数 a_{1-2} 随粉煤灰掺量和养护期的变化曲线如图 4 和图 5 所示。

从图 4 中可以看出,所有粉煤灰改良花岗岩残积土的压缩系数 a_{1-2} 大于 0.1 MPa^{-1} ,且小于 0.5 MPa^{-1} ,属于中压缩性土,而压缩模量 $E_{s,1-2}$ 和压缩系数表现出相似的规律性,均大于 4 MPa ,小于 16 MPa 。随着粉煤灰掺量的增加,花岗岩残积土的压缩系数 a_{1-2} 逐渐减小,且均在掺量为 10% 处压缩系数减小幅度最大,这与击实试验结果中最优含水率的变化成正相关关系。其主要原因可能是粉煤灰中

的活性物质与土颗粒发生水化硬凝反应,产生的凝胶物质水和空气中逐渐硬化,填充了土样的孔隙,阻止了土样的变形^[20-21]。

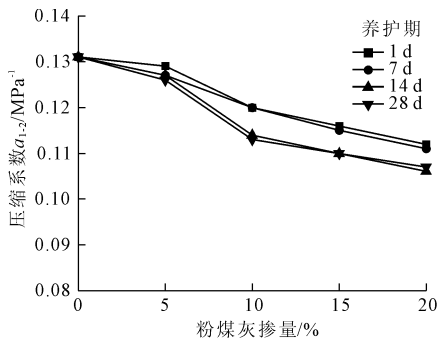


图 4 压缩系数随粉煤灰掺量的变化曲线

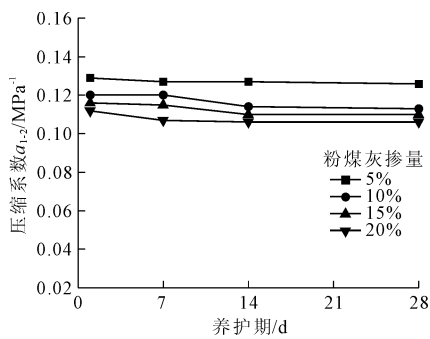


图 5 养护期对粉煤灰改良土压缩系数的影响

由图 5 可知,随着养护期的增加,粉煤灰改良花岗岩残积土的压缩系数 α_{1-2} 稍有减小,但不明显,仅在养护期为 14 d 时发生很小的变化,由此可见,增加养护期对粉煤灰改良花岗岩残积土的变形特性影响不大,这可能是因为粉煤灰中的活性物质较少,在 1 d 养护期间反应已基本完成,所以粉煤灰改良土的压缩特性在后期没有明显改善。

2.2.2 石灰对改良土压缩特性的影响

通过固结试验得到花岗岩残积土在不同石灰掺量和养护期下的压缩系数 α_{1-2} 随石灰掺量和养护期的变化曲线如图 6 和图 7 所示。

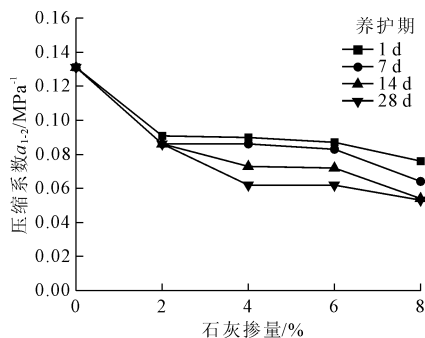


图 6 压缩系数随石灰掺量的变化曲线

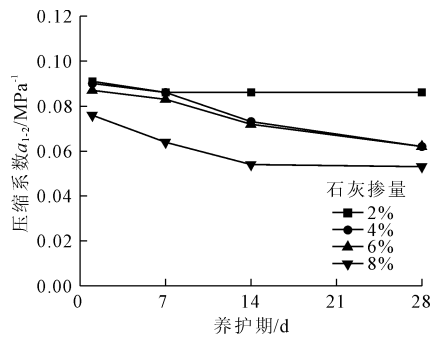


图 7 养护期对石灰改良土压缩系数的影响

从图 6 中可以看出,所有石灰改良花岗岩残积土的压缩系数 α_{1-2} 均小于 0.1 MPa^{-1} ,属于低压缩性土,而压缩模量 $E_{s,1-2}$ 和压缩系数也表现出相似的规律性,均大于 16 MPa 。石灰的掺入使得花岗岩残积土的压缩系数显著减小,改良土的压缩特性较粉煤灰改良土有明显提高。其原因是石灰中含有较多的活性物质,使火山灰作用和碳酸化作用得以充分进行,产生的 CaCO_3 、 CaSiO_3 等凝胶物质在花岗岩残积土的外围形成稳定的保护膜,形成网状结构,对土体进行胶结和填充孔隙^[20-21]。可以看到,随着石灰掺量的增加,花岗岩残积土的压缩系数 α_{1-2} 逐渐减小,2%、4% 掺量的改良土压缩系数变化较为明显,在掺量为 4% 之后压缩系数虽有减小但变化不大,这与击实试验中最大干密度的变化成负相关关系,主要原因是石灰反应使得土体级配均匀,密实度更大,土体更不易变形^[19]。

由图 7 可知,随着养护期的增加,石灰改良花岗岩残积土的压缩系数 α_{1-2} 均减小,压缩系数在养护期为 7 d 和 14 d 时的减小趋势较为明显,且在 14 d 之后趋于稳定。

2.2.3 石灰-粉煤灰对改良土压缩特性的影响

通过固结试验得到花岗岩残积土在不同粉煤灰、石灰掺量和养护期下的压缩系数 α_{1-2} 随石灰、粉煤灰掺量和养护期的变化曲线如图 8 和图 9 所示。

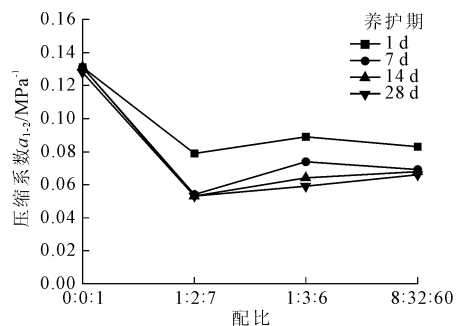


图 8 压缩系数随石灰-粉煤灰掺量的变化曲线

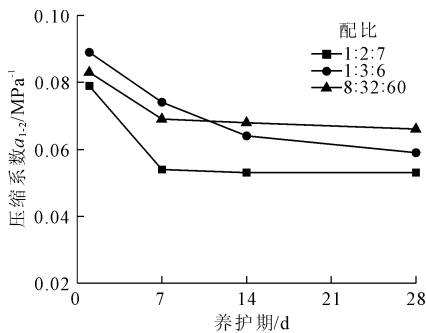


图 9 养护期对石灰-粉煤灰改良土压缩系数的影响

从图 8 中可以看出,所有石灰-粉煤灰改良花岗岩残积土的压缩系数 a_{1-2} 均小于 0.1 MPa^{-1} ,属于低压缩性土,而压缩模量 $E_{s,1-2}$ 和压缩系数也表现出相似的规律性,均大于 16 MPa 。不同配比的改良花岗岩残积土的压缩系数 a_{1-2} 均有显著减小,且配比为 1:2:7 改良土压缩系数减小幅度最大,说明配比 1:2:7 对花岗岩残积土变形特性的改良效果最好。由图 9 可知,随着养护期的增加,花岗岩残积土的压缩系数 a_{1-2} 均有减小,且在养护期为 7 d 时压缩系数的减小趋势最大,7 d 之后减小趋势逐渐趋于稳定。

3 结论

(1) 在试验研究范围内,随着粉煤灰掺量的增加,粉煤灰改良土的最大干密度明显增大,而最优含水率呈减小趋势;随着石灰掺量的增加,石灰改良土的最大干密度逐渐减小,而最优含水率逐渐增大。

(2) 在试验研究范围内,随着粉煤灰掺量的增加,粉煤灰改良土的压缩性逐渐减小,养护期对改良土的压缩性影响不大,粉煤灰改良土的最佳掺量为 20%;随着石灰掺量的增加,石灰改良土的压缩性逐渐减小。

(3) 从经济环保的角度出发,对于沉降变形要求较高的工程,建议采用 1:2:7 配比进行土体改良;否则,也可以用 20% 掺量的粉煤灰进行改良。

参考文献:

[1] 吴能森,赵 尘,侯伟生.花岗岩残积土的成因、分布及工程特性研究[J].平顶山工学院学报,2004,13(4):1-4.
 [2] 魏克和,刘殿选.闽粤沿海花岗岩风化带方法及其地基承载力的研究[J].河海大学学报(自然科学版),1991,19(4):76-84.
 [3] 林树枝.建筑地基基础工程实践[M].北京:中国环境科学出版社,2004:1-8.
 [4] 荆 富,伊茂森,张忠温,等.粉煤灰提取白炭黑和氧化

铝的研究[J].中国工程科学,2012,14(2):96-106.
 [5] 周建基,梁收运,张帆宇,等.石灰改良黄土的工程特性试验研究[J].铁道建筑,2014(9):105-108.
 [6] 石 熊,张家生,孟 飞,等.改良粗粒土填料大型三轴试验[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(2):645-652.
 [7] 吕擎峰,申 贝,王生新,等.水玻璃固化硫酸盐渍土强度特性及固化机制研究[J].岩土力学,2016,37(3):687-693.
 [8] 赵德安,余云燕,马惠民,等.新疆铁路路基次生盐渍化试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(4):745-751.
 [9] 朱彦鹏,栗 慧,杨校辉,等.黄土改良红砂岩的试验及路用性能研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):12-15.
 [10] 陈湘亮,王永和,王灿辉.泥质粉砂岩改良土路基填料适宜性试验分析[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(10):4287-4293.
 [11] 段伟宏,张 涛,蔡国军,等.橡胶颗粒-砂混合物压缩特性试验研究[J].工程地质学报,2015,23(S1):200-204.
 [12] 王宏伟,王东星,贺 扬.MgO 改性淤泥固化土压缩特性试[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(8):2133-2141.
 [13] 王朝辉,赵娟娟,曾 伟,等.新型 CVC 固化剂固化淤泥结构表征与路用性能[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(3):917-924.
 [14] 袁明月,张福海,陈 翔,等.钢渣微粉改良膨胀土室内试验研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2):81-85.
 [15] 杨 俊,童 磊,许 威,等.冻融循环影响风化砂改良膨胀土抗剪强度室内试验研究[J].工程地质学报,2015,23(1):65-71.
 [16] 冯 巧,刘 瑾,卢 毅,等.一种复合加固剂改良砂土的强度试验研究[J].工程地质学报,2017,25(4):903-911.
 [17] 张亚杰,洪宝宁,刘 鑫.高液限土掺灰改良的试验研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(1):6-10.
 [18] 土工试验方法标准:GB/T 50123—1999[S].北京:中国计划出版社,1999.
 [19] 王绍全,高 斯,何钰龙,等.基于微观分析的石灰改良粉质粘土击实特性[J].中外公路,2015,35(6):246-248.
 [20] 惠会清,胡同康,王新东.石灰、粉煤灰改良膨胀土性质机理[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(2):34-37.
 [21] 查甫生,刘松玉,杜延军.石灰-粉煤灰改良膨胀土试验[J].东南大学学报(自然科学版),2007,37(2):339-344.