

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.193



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



机制砂和水玻璃改良弱膨胀土抗压和抗剪强度试验研究

付相深,王齐,杨振北,李贤,汪时机

(西南大学 工程技术学院,重庆 400715)

摘要:广西地区膨胀土分布广泛,在工程中危害较大,常常需要对其进行改良处治。选用机制砂和水玻璃为改良剂,在两者单独掺入和复合掺入的情况下对广西南宁地区膨胀土进行改良,并通过无侧限抗压试验和直剪试验对该膨胀土强度及刚度进行测定,结果表明:机制砂和水玻璃均能提高该膨胀土的强度和刚度,且强度及刚度均随着掺量的增加而先增大后减小,复合掺入的情况下机制砂会降低水玻璃的改良效果。水玻璃最佳掺量为1%,机制砂最佳掺量为10%。进一步用不同粒径的机制砂对膨胀土进行改良发现,为提高该膨胀土的强度,掺入机制砂的粒径不宜大于0.5 mm。研究结果验证了利用水玻璃改良膨胀土和机制砂代替天然风化砂改良膨胀土的有效性。

关键词:膨胀土;机制砂;水玻璃;抗压强度;抗剪强度

中图分类号: TU443; U416.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2022)04-0060-08

Experimental analysis of effect of manufactured sand and water glass on unconfined compressive strength and shear strength of weak expansive soil

FU Xiangshen, WANG Qi, YANG Zhenbei, LI Xian, WANG Shiji

(College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, P. R. China)

Abstract: In Guangxi province, the expansive soil is widely distributed, and the damage to the project is relatively great. It is essential to improve it. Using manufactured sand and water glass as modifiers, in this study, the expansive soil in Nanning, Guangxi was improved under the condition of mixing them separately or in combination. The strength and stiffness of the expansive soil were measured by unconfined compression test and direct shear test. It was found that both manufactured sand and water glass can improve the strength and rigidity of the expansive soil, and both the strength and rigidity first increase and then decrease with increments of the manufactured sand and water glass amount. The manufactured sand will reduce the improvement effect of water glass in the case of compound mixing. The optimum addition amount of water glass is 1%, the optimum addition amount of manufactured sand is 10%. The expansive

收稿日期: 2020-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(11972311);中央高校基本业务费(XDJK2018AB003);西南大学大学生创新创业训练计划(X201910635059)

作者简介: 付相深(1998-),男,主要从事特殊土处治研究, E-mail: 1827846348@qq.com。

汪时机(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail: shjwang@swu.edu.cn。

Received: 2020-08-04

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 11972311); Special Funds for Basic Business Expenses of Central Universities (No. XDJK2018AB003); Southwest University College Student Innovation and Entrepreneurship Training Program Project (No. X201910635059).

Author brief: FU Xiangshen (1998-), main research interest: special soil treatment, E-mail: 1827846348@qq.com.
WANG Shiji (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: shjwang@swu.edu.cn.

soil was further improved with manufactured sand of different particle sizes, and it was found that in order to improve the strength of the expansive soil, the particle size of the manufactured sand should not be greater than 0.5 mm. This study verifies the effectiveness of water glass modified expansive soil and manufactured sand instead of natural weathered sand to improve expansive soil, which can provide a reference for future improvement of expansive soil.

Keywords: expansive soil; manufactured sand; water glass; compressive strength; shear strength

膨胀土是一种遇水膨胀、失水收缩的高液限黏土,在中国乃至全世界的分布均十分广泛。因其兼具多裂缝性和超固结性,对环境的湿热变化敏感,裂缝宽度随季节变化,工程性质极不稳定^[1],对路基、坝基和边坡等建设工程的危害较大^[2-3],中国每年因此产生的工程危害经济损失高达百亿美元以上^[4-5]。近年来,相关学者就膨胀土的改良方法开展了大量试验和研究工作,包括应用物理、化学方法^[6]、生物技术和固体废弃物等^[7-8]进行改良处治,如沈泰宇等^[9]、Ali 等^[10]通过室内土工试验研究了纤维类材料改良膨胀土的可行性和效果;Sami 等^[11]、Mujtaba 等^[12]利用硅粉、石灰、高炉矿渣改善膨胀土的工程特性。杨俊等^[13]、庄心善等^[14]通过试验研究了掺入风化砂后膨胀土的一系列工程特性参数的变化;曾娟娟等^[15]、陈永青等^[16]通过一系列一维固结试验及三轴剪切试验研究发现,生物酶能有效地改善膨胀土的压缩性,提高改良膨胀土的力学性能;He 等^[17]研制了一种液体离子土壤稳定剂,用于控制膨胀土的膨胀和收缩行为,能够有效抑制膨胀土胀缩变形并提高其强度。虽然目前膨胀土改良的技术已得以发展,但经济、高效且便捷的改良技术和方案仍有待进一步深入和探究。

水玻璃(硅酸钠的水溶液)具有黏结力强、价格低廉、胶凝时间短等特点,对黏土矿物具有改性作用^[18-19],水玻璃对膨胀土的改性作用有一定的研究价值。基于在膨胀土中拌入风化砂可以改善土体颗粒级配、增大孔隙率及土颗粒之间摩擦力的物理原理,“掺砂法”能够起到降低膨胀率并提高抗剪强度的作用^[13],但露天开采风化砂往往伴随着生态环境问题^[20],部分地区对露天矿的采动还具有灾害风险^[21]。另外,由于过度开采,天然砂日益匮乏,为节约成本,缩短工期,工程建设中机制砂正在逐步替代天然砂。对此,用机制砂替代天然风化砂对膨胀土进行改良就具有一定的研究价值。在路基、基坑等工程中,无侧限抗压强度是一个关键技术指标,能准

确地反映土的强度特性。笔者以无侧限抗压强度为主要试验指标,探究机制砂和水玻璃在单独作用和复合作用下膨胀土的无侧限抗压强度的变化,并通过试验研究了掺砂粒径对改良土的无侧限抗压强度的影响规律。

1 试验材料

1.1 膨胀土

试验用膨胀土取自广西南宁市邕武路某路段,该路段处于坡度平缓的丘陵地带,取土深度为地表以下 2~3 m。土样呈黄褐色,由泥灰岩的风化残积物形成,黏土矿物成分主要为伊利石,含量超过 70%。测试得到试验用土的相关物理性质:天然重度 19.6 kN/m³,天然含水率 15.34%,孔隙比 0.88,塑限 27.85%,液限 52.45%,塑性指数 25,自由膨胀率 42%。根据《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112—2013)^[22],该膨胀土成因类型为 A 类,综合判定为弱~中等膨胀土。

1.2 机制砂

试验用砂是由 SiO₂>96%的天然石英质海砂经过加工得到的,湿含量小于 0.2%,烧失量小于 0.4%。其相关物理性质见表 1。

表 1 试验用机制砂的相关物理性质

| Table 1 Relevant physical properties of the manufactured sand for testing | | | | | |
|---|--------|----------|---------|--------------------------------|-------|
| 粒径组成/% | | | | 自然密度/ (g·cm ⁻³) | 孔隙率/% |
| 5~2 mm | 2~1 mm | 1~0.5 mm | ≤0.5 mm | | |
| 7.7 | 31.6 | 32.3 | 28.4 | 1.58 | 31 |

1.3 水玻璃

为便于控制,试验中试样的含水率一致,试验采用山东优索化工科技有限公司生产的零水硅酸钠(Na₂SiO₃),模数为 1.4,规格为分析纯,白色粉状固体,常温下易溶于水。试验中将其溶于水而得到的溶液即为水玻璃。

2 无侧限抗压强度试验

2.1 机制砂和水玻璃对无侧限抗压强度的影响

取膨胀土样风干碾碎后过 2 mm 的标准筛,再放入 110 °C 烘箱烘干至恒温后取出,用于制样。为探究机制砂和水玻璃在单一作用和复合作用下对试样无侧限抗压强度的影响,分别取硅酸钠掺量为 0.0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.5%,砂的掺量为 0.0%、5.0%、10.0%、15.0%、20.0% (掺量为机制砂或硅酸钠的质量占试样干重的比例) 进行交叉试验。为最大程度接近现场实际情况,试验制备的试样含水率均取为 15% (接近试验用土的天然含水率),干密度取天然干密度 1.65 g/cm^3 ,便于制样和观察比较。试样为直径 38.1 mm,高 80 mm 的圆柱体试样,试验按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)^[23] 进行,采用 YSH-2 型应变控制式无侧限抗压强度仪,轴向速率为 1 mm/min,每种掺量下的改良土做 3 组平行试样,取平均值为最终试验结果。试验结果见表 2。

表 2 不同掺量下改性膨胀土的无侧限抗压强度值

Table 2 Unconfined compressive strength values of modified expansive soils with different amounts

| 掺砂量/% | 无侧限抗压强度/kPa | | | | |
|-------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| | 硅酸钠掺量 0.0% | 硅酸钠掺量 0.5% | 硅酸钠掺量 1.0% | 硅酸钠掺量 1.5% | 硅酸钠掺量 2.5% |
| 0.0 | 46.4 | 64.4 | 70.7 | 60.0 | 57.4 |
| 5.0 | 48.7 | 54.0 | 58.3 | 52.6 | 50.6 |
| 10.0 | 49.7 | 53.0 | 55.4 | 51.1 | 43.1 |
| 15.0 | 37.4 | 41.6 | 43.4 | 39.3 | 38.6 |
| 20.0 | 30.7 | 37.3 | 40.7 | 37.9 | 32.1 |

以硅酸钠掺量为横坐标,试样无侧限抗压强度为纵坐标,得到的交叉试验结果如图 1 所示。由试验结果可见,分别单独掺入机制砂和水玻璃时,强度均随着掺量的增加而先增大后减小。机制砂掺量为 10% 时,试样强度最高,与杨俊等^[13] 利用风化砂改良膨胀土的研究结果相同,水玻璃(硅酸钠)掺量为 1.0% 时,试样强度最高。复合掺入时,机制砂降低了水玻璃的改良效果。

图 2(a)、(b) 分别是通过上述无侧限抗压强度试验得出的在单独掺入机制砂和水玻璃时试样破坏的应力-应变曲线,由图 2 可以看出,分别掺入机制

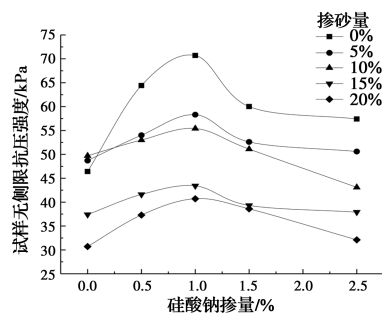
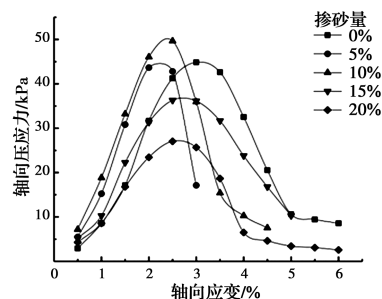


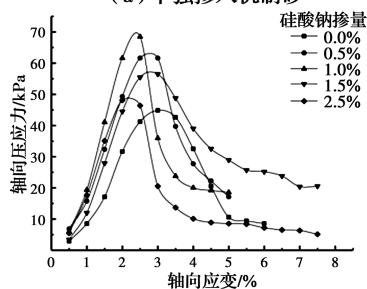
图 1 交叉试验结果

Fig. 1 Crossover test results

砂和水玻璃时,试样刚度较素土均有所提高(刚度可用应力-应变曲线上段斜率定性表征),且提高幅度均随掺量的增加而先增大后减小,后者提高效果明显优于前者。掺砂量为 10% 时,试样刚度最大,但掺砂量达到 20% 时,刚度低于素土。掺入水玻璃时,刚度均高于素土,掺量为 1.0% 时,试样刚度最大。



(a) 单独掺入机制砂



(b) 单独掺入水玻璃

图 2 不同改性试样破坏的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of different modified specimens failure

2.2 掺砂粒径范围对无侧限抗压强度的影响

为探究掺入砂的粒径范围对试样的无侧限抗压强度的影响规律,将试验用的机制砂依次过 2、1、0.5 mm 的标准筛,得到粒径分别为 $\leq 0.5 \text{ mm}$ 、 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ 、 $1.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ 的砂。由表 2 可得,单独掺入机制砂时,当掺量为 10% 时,无侧限抗压强度最大,因此,在控制掺砂量为 10% 的情况下,改变

掺入砂的粒径大小,观测试样的无侧限抗压强度的变化规律。试样含水率及干密度同上一试验,制样方法及试验标准也同上一试验。得到的试验结果如图 3 所示。

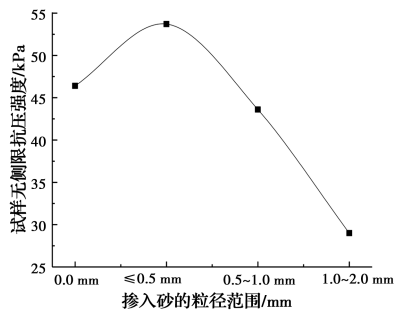


图 3 不同掺砂粒径下试样的强度变化

Fig. 3 Variation of sample strength under different sand particle sizes

3 直剪试验

为进一步探究两种方法在有侧限压力情况下对土样抗剪强度指标的影响,对掺砂 10%、掺水玻璃 1.0%以及两者复合作用下的膨胀土开展直剪试验,含水率和干密度与前述试验保持一致,得到不同垂直压力 σ 下的抗剪强度 τ_f ,拟合出的 τ_f - σ 关系曲线和公式如图 4 所示,得到的莫尔-库伦抗剪强度指标见表 3。

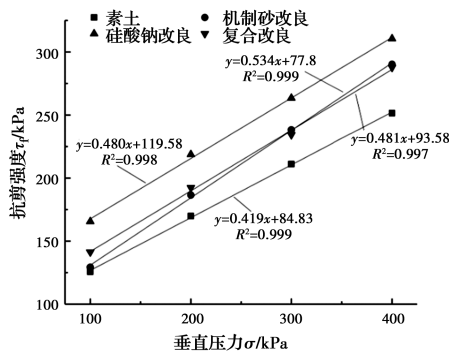


图 4 τ_f - σ 关系曲线

Fig. 4 τ_f - σ relation curve

表 3 不同土样的莫尔-库伦强度指标

Table 3 Measured Mohr-Coulomb shear strength parameters of different soil samples

| 土样 | 黏聚力 c /kPa | 内摩擦角 φ /($^{\circ}$) |
|--------|--------------|--------------------------------|
| 素土 | 84.8 | 22.7 |
| 机制砂改良土 | 77.4 | 28.1 |
| 水玻璃改良土 | 119.6 | 25.6 |
| 复合作用土 | 93.6 | 25.7 |

由图 4 和表 3 可以得到,掺入机制砂(10%)后土样黏聚力减少了 8.7%,但内摩擦角增大了 5.4°,掺入水玻璃(1.0%)后,黏聚力增大了 41%,内摩擦角增大了 2.9°,两者复合作用下,土样黏聚力增大了 10.4%,内摩擦角增大了 3.0°。机制砂主要通过改变土体的内摩擦角而影响抗剪强度,水玻璃主要通过改变土体的黏聚力而影响抗剪强度。相比机制砂单独作用及两者复合作用,水玻璃单独作用对抗剪强度的提高作用更明显。

4 自由膨胀率试验

为进一步验证两种方法对该膨胀土膨胀特性的影响,分别用掺量为 10%的机制砂(粒径 ≤ 0.5 mm)和掺量为 1%的硅酸钠(水玻璃)对该膨胀土进行改良,观测改良前后的自由膨胀率。试样制备方法为:选取具有代表性的风干膨胀土样过 0.5 mm 标准筛,在 110 $^{\circ}\text{C}$ 电热鼓风干燥箱(精度 0.1 $^{\circ}\text{C}$)内烘干。取 3 份烘干土样,每份 100 g,调整含水率至 15%(接近天然含水率),一份为素土试样,其余两份分别掺入 10%的机制砂(粒径 ≤ 0.5 mm)和 1%的硅酸钠搅拌均匀,将试样用密封袋密封,放入保湿缸中静置 24 h 后取出,观测自由膨胀率 δ_{ef} ,试验按照《土工试验方法标准》^[23]进行,每组土样进行 3 次平行试验,3 次结果相对误差控制在 1% 以内。试验结果见表 4。

表 4 改良前后土样的自由膨胀率

Table 4 Free expansion rate of soil samples before and after improvement

| 土样 | δ_{ef} / % |
|-------|-------------------|
| 素土 | 42 |
| 机制砂改良 | 22 |
| 水玻璃改良 | 20 |

结果显示,两种改良方法均能降低膨胀土自由膨胀率,改良后的土样膨胀性体现为非膨胀土($\delta_{ef} < 40\%$)。

5 结果分析

1)单独掺入机制砂时,由表 2 和图 3 可得,试样无侧限抗压强度和刚度随着掺量的增加先增大后减小,当掺量为 10%时,无侧限抗压强度最大,掺量超过 10%时开始降低,当掺量为 15%时,低于素土试

样的无侧限抗压强度。结合庄心善等^[24]对风化砂改良膨胀土强度特性的研究进行分析,当掺量较小时,机制砂的掺入改变了试样的颗粒级配,密实度提高,增加了试样中粗颗粒的含量和硬度,同时,还增加了试样中颗粒与颗粒间的摩擦力以及砂粒与土之间的胶结咬合,强度和刚度增加,但随着掺量的增加,试样中膨胀土的含量减少,孔隙率增加,密实度降低,试样的黏聚力不断减小,强度和刚度逐渐降低,当掺砂量达到15%时,强度和刚度均低于素土试样。

2)控制掺砂量为最佳掺量10%,改变砂的粒径范围,图3所示结果表明,掺砂粒径小于0.5 mm时,相比表2(未控制掺砂粒径),无侧限抗压强度大幅度提高,由图4和表3可得,此改性作用下土样的内摩擦角显著提高,抗剪强度也相应提高。掺砂粒径大于0.5 mm时,试样的无侧限抗压强度小于素土试样。将图3中不同掺砂粒径下的试样分别编号为1[#]、2[#]、3[#]、4[#],1[#]~4[#]试样破坏后的裂隙截面见图5。如前面所分析,掺砂可以提高颗粒间的胶结力和摩擦力,所以,2[#]比1[#](素土)更密实,裂隙截面更粗糙,强度也更高。而随着掺砂粒径的增加,与2[#]试样相比,3[#]、4[#]试样孔隙增多,密实度降低,4[#]试样比1[#]试样更松散。由此可见,随着掺砂粒径变大,颗粒之间的骨架间隙增大,导致黏聚力的减小超过颗粒间摩擦力的增加,试样的强度降低,且低于掺砂前的强度。

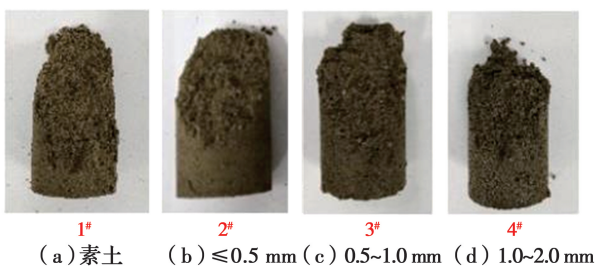


图5 不同掺砂粒径试样的裂隙截面

Fig. 5 Crack cross sections of samples with different particle sizes

3)由图1和图2可得,单独掺入水玻璃时,试样的无侧限抗压强度和刚度随着硅酸钠掺量的增加先增大后减小,且强度提高的效果明显比掺砂改良要好,当掺量为1%时,试样的无侧限抗压强度达到最大值。将不同水玻璃掺量下的改良试样(单独掺入)分别编号为5[#]、6[#]、7[#]、8[#],5[#]~8[#]试样破坏后的

裂隙截面见图6,定性观察图6中5[#]~8[#]试样的裂隙截面,密实度6[#]>5[#],6[#]>7[#]>8[#],且相比图5中1[#]试样(素土),5[#]~8[#]试样密实度均有所提高,相应地,强度和刚度也有相同规律。从微观机理方面,水玻璃液体中存在硅酸盐分子、离子化合物以及二硅酸盐离子等,如 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 、 SiO_3^{2-} 、 HSiO_3^- 、 HSi_2O_5^- 、 $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$ 和 Na^+ ,同时,也存在带负电荷的硅酸胶体粒子,水玻璃中的阴离子如 SiO_3^{2-} 等易与膨胀土矿物中水化 Ca^{2+} 发生静电吸附,形成水合硅酸钙凝胶,硅酸胶体和水合硅酸钙凝胶吸附在颗粒表面,形成团粒,提高了试样密实度,同时也增强了土体颗粒之间的胶结。另一方面,王生新等^[25]采用扫描电镜(SEM)、X线衍射(XRD)和X线光电子能谱(XPS)对常温下不同密度水玻璃固化的黏土矿物进行测试与分析,研究结果表明,硅酸盐离子和硅酸胶粒在黏土矿物表面(如伊利石、蒙脱石)的晶层平面与端面存在复杂的吸附作用,形成了团粒,具有很大表面能的团粒进一步失水缩聚,形成非晶质硅酸盐凝胶和晶质黏土矿物共存的网状结构产物,限制了黏土矿物的活性,固化了黏土矿物。而本试验所用广西膨胀土黏土矿物成分主要为伊利石,含量超过70%,因此,水玻璃能够对该膨胀土中的黏土矿物进行一定程度的固化,从而提高膨胀土的强度和刚度。

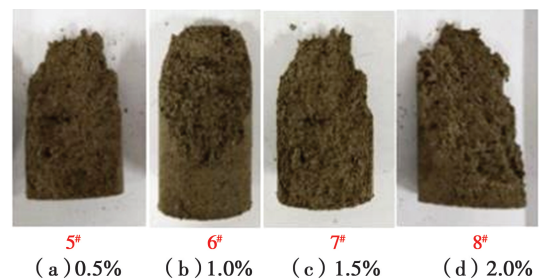


图6 不同水玻璃掺量下试样的裂隙截面

Fig. 6 The crack section of the sample under different water glass content

随着掺量的增加,试样的无侧限抗压强度开始逐渐减小。一方面,由于水玻璃中硅酸钠水解生成硅酸凝胶为水解反应(可逆反应),当水解达到一定程度,随着硅酸钠的加入,不再生成硅酸凝胶。另一方面,已有研究发现,当土体中孔隙溶液的浓度增大时,土颗粒之间的排列及结构会发生改变^[26-27],而土体的结构对强度具有重要影响,随着硅酸钠掺量的增加,盐溶液的浓度增加,改变了膨胀土的结构,使

其从集聚状变成絮凝状,使得土体结构变得疏松,降低了颗粒之间的作用^[28-29],所以,试样的密实度呈 $6^\# > 7^\# > 8^\#$ 的规律,试样的强度和刚度也逐渐降低。

4)当水玻璃和机制砂复合改良时,保持水玻璃掺量一定,表2所示的试验结果表明,随着机制砂的掺入,试样的无侧限抗压强度逐渐降低,改良效果不如水玻璃单独改良时的效果,当砂的掺量达到15%时,试样的无侧限抗压强度低于素土试样。这是由于,虽然单独加入一定量的机制砂可以提高试样的强度,但从表1可知,试验所用的机制砂粗粒含量较多(粒径大于0.5 mm的颗粒占比超过70%),当复合改良时,相对于试样中原来的土颗粒,粗砂颗粒比表面积降低,不仅降低了凝胶在土颗粒之间的黏结作用,还降低了试样的密实性,从而导致机制砂的加入降低了水玻璃的改良效果。从图4及表3可见,相比水玻璃单独作用时,两者复合作用下土样黏聚力的提高幅度有所降低,也进一步说明机制砂的加入会降低凝胶在土颗粒之间的黏结作用。

5)由自由膨胀率试验结果可得,掺机制砂和掺水玻璃均能使该膨胀土的自由膨胀率降低,按照规范,改良后的土已不属于膨胀土,进一步验证了两种膨胀土改良方法的可行性。两种方法相比,水玻璃降低自由膨胀率的效果稍好,但具体的降低机理还有待进一步的试验探究。

6 结论

1)机制砂替代天然风化砂改良该弱膨胀土具有一定可行性,掺砂量为10%、掺砂粒径小于0.5 mm的情况下,改良效果最好,无侧限抗压强度可提高15.7%,刚度达到最大,内摩擦角增大,抗剪强度提高。试验结果表明,若掺砂粒径大于0.5 mm,会降低该膨胀土的无侧限抗压强度。与风化砂改良相比,机制砂材料供应更方便,成本更低,可以为通过掺砂方法改良膨胀土的实际工程提供参考。在路基工程中,可按“素土摊平、含水率调整、路拌机拌合、碾压整平、检测验收”的原则设计施工工艺。

2)水玻璃(硅酸钠溶液)掺入该弱膨胀土后,土体的刚度和无侧限抗压强度均呈先增大后减小的趋势。当硅酸钠的掺量为1%时,无侧限抗压强度达到最大,提高了52.4%,刚度达到最大,黏聚力提高了41%,抗剪强度较素土显著提高,自由膨胀率由

改良前的42%降低到20%,对该膨胀土的改良效果较好。与目前已有的其他复合改良方法相比,水玻璃改良配制简单、施工便捷,更加经济,实际应用中可采用现场土壤分层喷洒的方法,针对不同地区的膨胀土改良,此方法的有效性还需进一步的现场试验验证。

参考文献:

- [1] 余火忠, 杨慧之. 广西上思地区膨胀土特性及抗滑技术研究[J]. 施工技术, 2018, 47(Sup1): 252-254.
- [2] YU H Z, YANG H Z. Study on characteristics and anti-sliding technology of expansive soil in Shangsi area of Guangxi Province [J]. Construction Technology, 2018, 47(Sup1): 252-254. (in Chinese)
- [3] PUPPALA A J, PEDARLA A. Innovative ground improvement techniques for expansive soils [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2017, 2(1): 1-15.
- [4] NELSON E J, CHAO K C, NELSON J D, et al. Lessons learned from foundation and slab failures on expansive soils [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(3): D4016007.
- [5] 郑健龙, 杨和平. 膨胀土处治理论、技术与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 3-23.
- [6] ZHENG J L, YANG H P. Theory and practice of expansive soil treatment technology [M]. Beijing: China Communications Press, 2004: 3-23. (in Chinese)
- [7] PUPPALA A J, PEDARLA A. Innovative ground improvement techniques for expansive soils [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2017, 2(1): 1-15.
- [8] 冷挺, 唐朝生, 徐丹, 等. 膨胀土工程地质特性研究进展[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 112-128.
- [9] LENG T, TANG C S, XU D, et al. Advance on the engineering geological characteristics of expansive soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 112-128. (in Chinese)
- [10] KHAZAEI J, MOAYEDI H. Soft expansive soil improvement by eco-friendly waste and quick lime [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(10): 8337-8346.
- [11] SHAFIQU Q S M, HASAN S H. Improvement an expansive soil using polymethacrylate polymer [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 454: 012138.
- [12] 沈泰宇, 邢书香, 汪时机, 等. 降低强膨胀土膨胀率提

- 高抗剪强度的复合改良剂筛选[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 109-115.
- SHEN T Y, XING S X, WANG S J, et al. Complex ameliorants screening for reducing swelling ratio and improving shear strength of strong expansive soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 109-115. (in Chinese)
- [10] ALI M, AZIZ M, HAMZA M, et al. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers [J]. Geomechanics and Engineering, 2020, 22 (3): 227-236.
- [11] SAMI A, RASHID I, BILAL M. Improvement in behaviour of expansive soil by adding lime and silica fume [J]. NED University Journal of Research, 2018, XV(3):101-110.
- [12] MUJTABA H, AZIZ T, FAROOQ K, et al. Improvement in engineering properties of expansive soils using ground granulated blast furnace slag [J]. Journal of the Geological Society of India, 2018, 92 (3): 357-362.
- [13] 杨俊, 刘子豪, 张国栋, 等. 复合方法改良膨胀土无侧限抗压强度试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 1069-1076.
- YANG J, LIU Z H, ZHANG G D, et al. Experimental research on unconfined compressive strength of expansive soil improved by composite method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 1069-1076. (in Chinese)
- [14] 庄心善, 王俊翔, 王康, 等. 风化砂改良膨胀土的动力特性研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(Sup2): 149-156.
- ZHUANG X S, WANG J X, WANG K, et al. Experimental study on dynamic characteristics of expansive soil modified by weathered sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (Sup2): 149-156. (in Chinese)
- [15] 曾娟娟, 文畅平, 刘子健. 生物酶改良膨胀土的压缩特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(3): 133-138.
- ZENG J J, WEN C P, LIU Z J. Characteristics of compressibility of bio-enzyme expansive soil modified [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(3): 133-138. (in Chinese)
- [16] 陈永青, 文畅平, 方炫强. 生物酶改良膨胀土的修正殷宗泽模型[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3515-3523.
- CHEN Y Q, WEN C P, FANG X Q. Modified Yin's double-yield-surface model for bioenzyme-treated expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3515-3523. (in Chinese)
- [17] HE S, YU X B, BANERJEE A, et al. Expansive soil treatment with liquid ionic soil stabilizer [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672 (52): 185-194.
- [18] 康靖宇, 王保田, 单熠博, 等. 水玻璃改良膨胀土的室内试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(5): 267-271.
- KANG J Y, WANG B T, SHAN Y B, et al. Experimental study on the improvement of expansive soil by sodium silicate [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(5): 267-271. (in Chinese)
- [19] 鲍捷, 方祥位, 申春妮, 等. 电场作用下水玻璃改良膨胀土正交试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1630-1638.
- BAO J, FANG X W, SHEN C N, et al. Orthogonal test study on the improvement of expansive soil by sodium silicate under electric field [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1630-1638. (in Chinese)
- [20] SOBCZYK W, KOWALSKA A, SOBCZYK E J. Impact assessment of sand and gravel deposits mining in Klaj on the natural environment of the Raba rivervalley [J]. Inzynieria Mineralna, 2016, 17(1): 241-248.
- [21] 王磊. 海州露天矿采动灾害风险评估与对策研究[D]. 辽宁 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.
- WANG L. Risk assessment and countermeasure research of mining hazards in Haizhou open-pit [D]. Fuxin, Liaoning: Liaoning Technical University, 2013. (in Chinese)
- [22] 膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Technical code for building in expansive soil regions: GB 50112-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [23] 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- Standard for soil test method: GB/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [24] 庄心善, 王子翔. 风化砂改良膨胀土无荷膨胀率及强度特性试验研究[J]. 公路, 2018, 63(9): 248-252.
- ZHUANG X S, WANG Z X. Experimental study on

- non-load swelling rate and strength characteristics of expansive soil modified by weathered sand [J]. Highway, 2018, 63(9): 248-252. (in Chinese)
- [25] 王生新, 吕擎峰, 王得楷, 等. 水玻璃固化黏土矿物的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 2656-2662.
- WANG S X, LV Q F, WANG D K, et al. Experimental study of clay minerals solidified by sodium silicate [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(7): 2656-2662. (in Chinese)
- [26] ARASAN S, YETIMOĞ LU T. Effect of inorganic salt solutions on the consistency limits of two clays [J]. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 2008, 32(2): 107-115.
- [27] 蔡晋晋, 叶为民, 宛志缓, 等. 弱碱性溶液对膨润土性能的影响试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(Sup1): 143-147.
- CAI J J, YE W M, WAN Z W, et al. Experimental study on the effect of weakly alkaline solution on the properties of bentonite [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20 (Sup1): 143-147. (in Chinese)
- [28] 于海浩, 孙德安. 不同溶液下弱膨胀土的抗剪强度研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 423-427, 451.
- YU H H, SUN D A. Shear strength of weakly expansive soils in different solution [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 423-427, 451. (in Chinese)
- [29] 姚传芹, 韦昌富, 马田田, 等. 孔隙溶液对膨胀土力学性质影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(Sup2): 116-122.
- YAO C Q, WEI C F, MA T T, et al. Effects of pore solution on mechanical properties of expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup2): 116-122. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)