

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221276

# 不同改良方法对膨胀土力学性质影响 及物理机制对比分析

柴石玉<sup>a,b</sup>, 张凌凯<sup>a,b</sup>

(新疆农业大学 a. 水利与土木工程学院; b. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**为解决北疆供水工程由于膨胀土湿胀干缩引起的滑动破坏问题,采用石灰、水泥和砂石料作为主要的固化材料,通过无侧限抗压强度试验、直剪试验、压缩试验和 SEM 试验,宏微观相结合探究不同改良方法下试验掺量对改良膨胀土力学特性的影响和微观结构强度形成机理。结果表明,随石灰、砂石料掺量的不断增加,土体强度稳步提升,而水泥改良土在掺量为 7% 左右时出现峰值,石灰、砂石料在掺量分别约为 6%、30% 时,改良土整体结构可压缩性较低,粘聚力较大,抗剪抗压强度较高,可满足工程应用要求;对最佳配合比的石灰与水泥固化土进行 SEM 分析发现,均有大量卷曲薄片状水化凝胶物质生成,相比原膨胀土孔隙减少明显,团粒胶结紧密,从宏观力学性能上表现为固化土体力学性能和稳定性能得到大幅提高。

**关键词:** 膨胀土; 固化改良; 力学特性; 微观结构; 强度机理

**中图分类号:** [TV221.2]; TU443

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)04-0190-05

## 1 引言

膨胀土是一种以亲水性矿物为主要成分的高液限粘性土,具有吸水膨胀软化、失水收缩干裂的特性<sup>[1]</sup>,修筑于膨胀土区域的构筑物易发生变形导致失稳破坏<sup>[2]</sup>。因此,有必要对膨胀土进行加固处理,解决由其力学特性劣化诱发的工程问题。目前,针对建设工程中面临的膨胀土问题,常用方法有化学和物理改良,如 ELKADY T Y 等<sup>[3,4]</sup>发现石灰改良膨胀土能有效抑制土体胀缩提高土体强度,改善微观形态并提升胶结体量;韩晶等<sup>[5,6]</sup>从宏观力学特征、物相构成演变及微观结构特性方面,对水泥改性膨胀土进行系统研究;苏蔚等<sup>[7,8]</sup>通过杠杆式标准固结仪对风化砂改良土进行膨胀力试验,发现土体膨胀力降低显著。已有研究多针对某一改良土,而较少对比分析不同改良土的力学特性。为选择合理、经济的手段,达到最优的工程效益,针对北疆供水一期工程中的膨胀土由于受季节性气温变化和历年通水停水运行方式双重作用下造成渠基土强度劣化明显,渠坡

滑坡或坍塌频繁等问题,开展室内基本力学试验,对比分析水泥、石灰和砂石料三种改良土的性能,并通过 SEM 试验探究试样内部孔隙结构和微观机制演化规律,以期在膨胀土工程改良应用中起指导作用。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

试验所用膨胀土为北疆供水一期工程中的膨胀土,通过室内基本试验获得其基本物理性质见表 1。

表 1 试验用土物理指标

Tab. 1 Physical index of soil for test										
最优含水率 / %	最大干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	天然含水率 / %	天然干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	液限 / %	塑限 / %	塑性指数 / %	限缩率 / %	体缩率 / %	自由膨胀率 / %	
18.9	1.67	14.8	1.60	61.3	20.1	41.2	18.4	23.5	75	

试验选用普通硅酸盐水泥(32.5 级),初凝时间约 4.5 h。试验所用生石灰氧化钙含量 95%,烧失量为 24.4%,属于优质石灰。试验所用砂石料粒径取 2~5 mm。

收稿日期: 2022-06-20, 修回日期: 2022-07-27

基金项目: 新疆维吾尔自治区天山青年计划项目(2019Q077); 新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2019Y020); 新疆维吾尔自治区青年基金项目(2019D01B16)

作者简介: 柴石玉(1995-),男,硕士研究生,研究方向为膨胀土力学特性试验, E-mail: 1875058894@qq.com

通讯作者: 张凌凯(1987-),男,博士、副教授,研究方向为环境岩土工程, E-mail: xjau\_zlk@163.com

## 2.2 试验方案

通过无侧限抗压强度试验、直剪试验和压缩试验探究各试验掺量对各项宏观力学指标的影响,利用 SEM 试验对土体进行微观结构分析,宏观相结合探究各改良方法下改良土的力学机制,综合评价各改良材料对膨胀土力学性能的影响。所涉及试验参数与方案见表 2。

表 2 固化剂配比试验表

Tab. 2 Test table of curing agent ratio

试验水平	膨胀土质量/%	石灰掺量/%	水泥掺量/%	掺水质 量/%	养护龄 期/d	砂石掺量/%	掺水质 量/%
1	100	4	3	21	28	10	16
2	100	6	5	21	28	20	16
3	100	8	7	21	28	30	16
4	100	10	9	21	28	40	16

## 2.3 试验方法

具体试验方法步骤如下。

(1)准备。将现场取回的土晾晒至干燥,磨碎,筛分保留粒径小于 2 mm 的膨胀土。根据方案取相应质量的土于烘箱(105 °C)中烘干,防止膨胀土吸湿回潮,关闭烘箱待土体自然降温冷却后备用;再称取相应质量改良材料,按干密度 1.6 g/cm<sup>3</sup> 和含水率 21% 制备试样,较高含水率利于凝胶的较快生成,更利于改性土强度的发挥。

(2)制样。对于水泥改性土,通过喷壶将所需水喷洒于膨胀土中拌匀后用塑料袋密封浸润 48 h 后加入所需质量水泥拌匀进行制件,制件时间不超过初凝时间;对于石灰和砂石改良土,先将改良材料加土中初拌,再按含水率加水喷洒拌匀后密封,焖料 48 h 后利用土工试验仪器制备成相应试样后密封养护。

(3)试验。将标准养护箱(温度 20±1 °C、湿度 98%±1%)养护 28 d 的试样根据《土工试验方法标准》<sup>[9]</sup>开展相关试验;于每龄期及每配比制备 3 个平行试样,以平均值为代表性结果。之后选取代表性原状土和最佳掺量下改良土试样内部碎块烘干制成 2 mm×2 mm×1 mm 大小备用,通过扫描电镜试验对比分析微观结构状况。

## 3 结果与分析

### 3.1 改良试验

#### 3.1.1 无侧限抗压强度试验

图 1 为不同掺量与无侧限抗压强度的关系。由图 1 可知,改良膨胀土无侧限抗压强度受不同改良材料掺量的影响较大,通过调整各掺量可显著提高膨胀土无侧限抗压强度;石灰和砂石料改

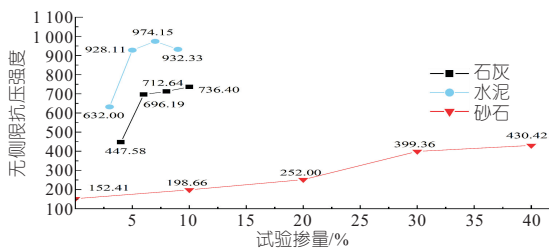


图 1 不同试剂掺量与无侧限抗压强度的关系

Fig. 1 Relationship between different reagent dosage and unconfined compressive strength

良土随其掺量的增加土体无侧限抗压强度增长明显,在石灰掺量约为 6%、砂石料掺量约为 30% 时,强度增长幅度达到顶点,分别为 59.22%、58.47%,随固化材料的继续增多,强度增长逐渐减缓。而水泥改良土在掺量为 7% 时无侧限抗压强度达到峰值 974.15 kPa,随掺量的继续增加,强度不增反而降低。图 2 为不同改性剂对土样破坏形式的影响。由图 2 可知,石灰和水泥改良土受垂直压力后出现较大的贯穿裂缝,强度达到峰值后骤然丧失,甚至出现崩解脱落的现象,随掺量的增加,结构脆性破坏特征更明显;砂石料改良土仍存在较多的粘土颗粒,并未改变原膨胀土应变软化的塑性破坏形式,仅表面的土颗粒脱落。

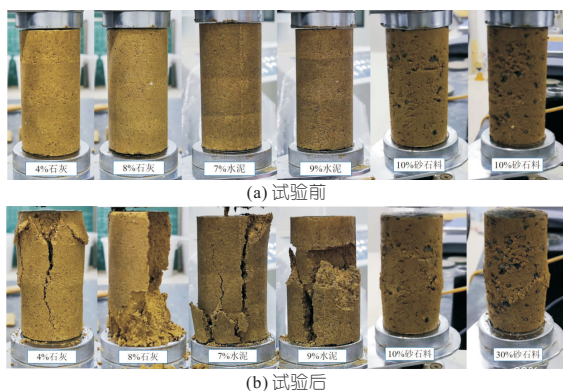


图 2 不同固化土抗压试验破坏图

Fig. 2 Failure diagram of compression test of different solidified soils

#### 3.1.2 直剪试验

图 3、4 为不同固化土掺量与抗剪强度指标的关系。由图 3、4 可知,膨胀土掺入固化剂后,土体抗剪强度及指标 c、φ 值增加明显,但随掺量继续

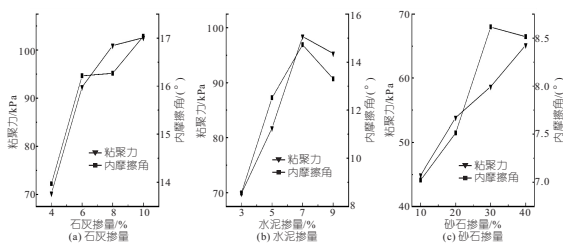


图 3 不同掺量与 c、φ 值的关系

Fig. 3 Relationship between different dosage and c, φ value

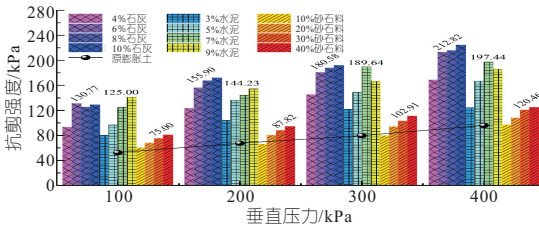


图4 不同掺量与抗剪强度的关系

Fig. 4 Relationship between different dosage and shear strength

增加,固化土强度增长减缓,相比原膨胀土仍有大幅提升;当石灰掺量在6%、砂石料掺量为30%时抗剪强度增幅最大;水泥掺量在7%时,粘聚力达到峰值98.40 kPa,随掺量继续增加,粘聚力减小,相应的抗剪强度降低,说明剪切强度与粘聚力呈正相关性。随水泥掺量增加,膨胀土强度依然会提高,但随水化反应不断发生,水分消耗使粘土矿物发生干缩和开裂,出现反复变形导致改良土稳定性消弱、强度下降,灾害频繁发生,因此对于水泥改良膨胀土,应严格控制水泥掺量,这与DUY等<sup>[10]</sup>的试验结果相吻合。由图5可知,石灰、水泥改良土体剪切破坏依旧脆性明显,砂石改良土粘性较高,塑性变形显著。



图5 不同改良土剪切试样破坏图

Fig. 5 Failure diagram of shear samples of different improved soils

### 3.1.3 压缩试验

图6、7分别为不同改良土压缩试验后的试样

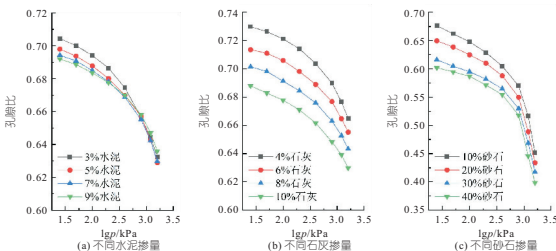


图6 不同掺量与孔隙比的关系

Fig. 6 Relationship between different content and void ratio

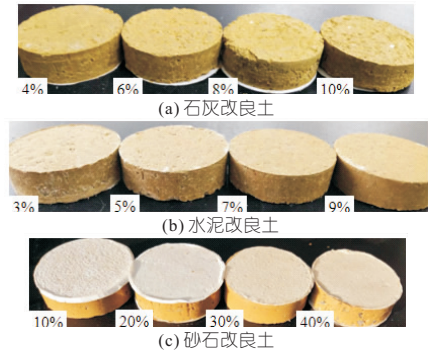


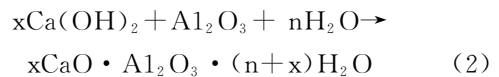
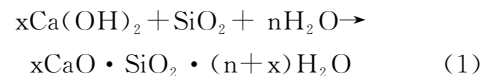
图7 不同改良土压缩试验图

Fig. 7 Compression test of different improved soils

和不同固化土掺量与孔隙比的关系。图6中,  $p$  为上覆垂直压力。由图6可知,改良土体随掺量的增加,土体孔隙比逐渐减小,孔隙含量减少,同时改良土体强度也得到提高;石灰和水泥改良土在一系列的物化反应作用下,生成大量的水化物凝胶,在提高土体胶凝体量的同时,也减小了膨胀土粘粒含量,使土体颗粒胶结孔隙被填充;石灰改良土随掺量变化孔隙比降幅明显,说明孔隙含量相对较高;砂石料改良土在掺量增至30%时,孔隙含量降幅减小,随竖向垂直压力不断增大,孔隙被压实,孔隙比逐渐趋于稳定,相比石灰和水泥改性土,由于砂石料对含水率的影响较小,粘粒含量相对较多,可压缩性较高(图7)。

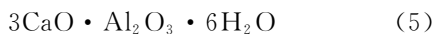
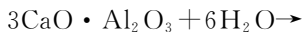
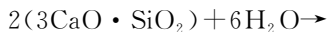
### 3.2 改良膨胀土机理分析

(1)在膨胀土中分别加入水泥和石灰进行化学固化处理,主要改变粘土矿物含量和微观结构特征,以提高土体结构强度和稳定性,其作用机理如下。在膨胀土中加入水泥与石灰进行改性处理,主要体现在石灰消化及水泥水化后进行的离子交换、吸水结晶、遇二氧化碳和胶结硬凝等一系列物化反应方面。随反应的进行,固化土中  $Ca^{2+}$  被大量释放,增加了孔隙水溶液中离子浓度,并与土颗粒表面吸附的低价阳离子发生交换,使吸附结合水膜厚度减小,颗粒间吸附牵引作用增大,结合力增强,结构稳定性增加;固化土中生成的  $Ca(OH)_2$  渗入土体内部会与粘土矿物发生反应:



继续生成凝胶物质和含水晶体胶结土颗粒,使土中处于分散状态的胶粒聚集成团,同时也会被碳化(式(3))生成耐水性较强的碳酸钙晶须,相应降低改性土中胶粒和粘土矿物含量,削弱土体的胀缩特性;反应生成的强大硬凝固化产物硅酸

盐、铝酸盐等(式(4)、(5))同样会增加土颗粒间胶结连接作用,使其具有较好的板体性和刚性;因此,其结构也表现出完全的脆性破坏,强度瞬间丧失。



(2)在膨胀土中加入砂石料进行物理改良处理,主要改善粘土矿物颗粒级配,依靠物质间的嵌挤咬合作用来改善土体结构和工程性质,其破坏机理如下。在膨胀土中加砂石料进行物理改良处理时,砂石料的添加使膨胀土中粗颗粒含量占比增加,亲水性的粘粒相对降低,膨胀潜势削弱;同时土体内部颗粒间接触面积增大,比表面积减小,摩擦力随之增大,在水平剪切力的作用下土体间相对运动减少,相应的塑性变形减小,且较小粒径的膨胀土颗粒能较好地充斥在较大粒径的砂石之间,使土体致密性增强,通过颗粒间的嵌挤摩擦也抑制了改良土体的胀缩特性;在剪应力的作用下,砂石改良土的破坏实质是土颗粒和砂石料逐渐滑移翻转的过程,其颗粒或团粒均在内部应力作用下发生定向性的滑移或转动,在此过程中砂石料与土颗粒间出现撕裂、扰动,强度在砂石出现平移滑动时降低、破坏。

### 3.3 SEM 试验结果及分析

#### 3.3.1 定性描述

选取代表性试样,通过扫描电镜试验进行微观结构对比分析,结果见图 8。由图 8(a)可知,膨胀土结构中存在紧密堆积的面一面叠聚体及边一面叠聚体,接触方式主要以面面接触为主,这种面胶结叠聚体以自相集聚的方式构成粘土基质,基质中镶嵌着如蒙脱石等具有膨胀性的粘土颗粒,联结力相对较弱。高国瑞<sup>[11]</sup>发现面一面结构具有较强的膨胀势,土中粘性颗粒越多越小,其胀缩

性越强,结构性越弱,强度越低;由图 8(b)可知,土体表面排布棱角状和集粒状的粘土颗粒,颗粒或团粒间界限较清晰,并有大量孔隙存在,包括叠聚体间的连通孔隙及土体表面的大孔洞,这也是其强度较低和变形较大的原因。由图 8(b)、(c)、(e)可知,膨胀土在掺入石灰和水泥后,其微观表征结构中均出现较多相互堆积的团聚体,并有大量的水化硅铝酸系列凝胶物生成,在絮凝和团聚作用下粘土小团粒或颗粒被胶结粘结成大团块和板状晶体,这些大团块、团聚体及单粒间彼此相互接触联结构成骨架结构,使土体的致密性和强度得到改善与提高;对于石灰改良土团聚体上还粘附着大小不一的凝块和集粒,粒间胶结更紧密,但大块团聚体之间存在着大量的架空孔隙及胶结孔隙,连接较松散;而对于水泥改良土微观表面排列更具有定向性,颗粒基面相互叠聚形成结构致密的板体结构,板状晶体之间存在少量的连接孔隙,是相比石灰改性土孔隙比较低、粘聚力较大、强度较高的具体表现。由图 8(d)、(f)可知,改良土颗粒之间胶结更致密,颗粒体间的接触面积增加,微裂隙减少,整个加固土形成结构致密的整体,宏观力学上表现为孔隙含量降低,结构致密性增强,土体抗压抗剪强度得到显著提升。

#### 3.3.2 量化分析

根据扫描电镜结果,选择 10 000 倍图像进行定量分析。利用 image-J 软件对图像进行微观信息处理,量化膨胀土改良前后土体颗粒形态变化,结果见表 3。

表 3 颗粒参数

Tab.3 Particle parameters

土体类型	颗粒总数	颗粒总面积/ $\mu\text{m}^2$	颗粒平均尺寸/ $\mu\text{m}$	颗粒面积占比/%	颗粒平均周长/ $\mu\text{m}$
原状土	1 689	52.148	0.031	46.457	0.367
石灰改良土	595	70.047	0.118	59.900	0.895
水泥改良土	179	87.258	0.487	81.391	1.110

由表 3 可知,膨胀土多以细小的粘粒居多,粒径较小、较细、较分散,小颗粒总数愈多其分散程度也愈大,可压缩性越高,相应的剪切强度和侧限抗压强度值愈小;对于石灰与水泥改良土,由于水化凝胶物质的增多,土体之间的结合力增强,在胶结联结及孔隙填充作用下尺寸较小的颗粒凝结成团聚体,大团聚体增多,相应的小颗粒总数减少,骨架结构增强,胶结紧密程度更显著,形成致密均匀的硬化体,使改良土体结构整体性得到显著提升,更具有板体性和刚性,随之改良土体抗压抗剪呈明显的脆性破坏特征,相较于未改良土体

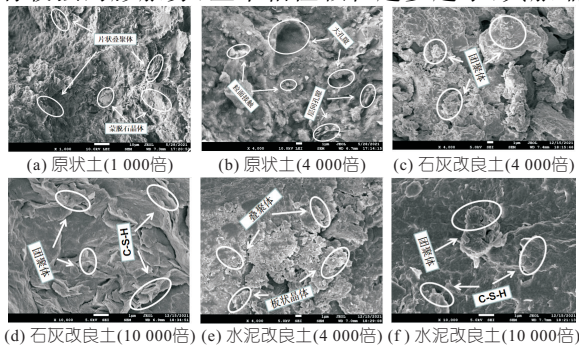


图 8 不同改良土体的扫描电镜图

Fig. 8 Scanning electron microscope of different improved soils

强度增强明显,其微观结构颗粒形态的改善从而影响了改良土体宏观力学性能的提升;但水泥改良土团聚体的增加、颗粒总数的减少相较于石灰改良土明显,说明水泥改良土水化产生的胶凝物质较石灰改良土相对要多,胶结团聚作用相对要强,土体性能改善效果更明显。由此可知,微观结构的定性和量化分析与宏观力学特性试验结果相吻合。

## 4 结 论

a. 水泥、石灰和砂石料均可有效提高膨胀土的无侧限抗压强度与剪切强度,改善孔隙,降低压缩性;当水泥掺量约 7%、石灰掺量约 6%、砂石掺量约 30%时,在达到合理的经济效益的同时改良效果相对较优;而水泥对膨胀土的加固效果要优于石灰,砂石料次之。

b. 从微观结构来看,膨胀土中加入石灰和水泥改性后生成较多的水化硅酸系列胶凝产物,增强了土颗粒之间的胶结联结作用;团聚体量的增加、孔隙含量的大量减少、结构整体性能的明显改善为土体强度提高、膨胀性降低、宏观力学性质提升的关键。

### 参考文献:

[1] 高游,孙德安,吕海波. 弱膨胀土浸水变形特性及其

预测[J]. 岩土力学,2015,36(3):755-761.

- [2] 程展林,龚壁卫,胡波. 膨胀土的强度及其测试方法[J]. 岩土工程学报,2015,37(增刊1):11-15.
- [3] ELKADY T Y, SHAKER A A. Role of cementation and suction in the swelling behavior of lime-treated expansive soils[J]. Journal of materials in civil engineering,2018,30(5):04018073.
- [4] 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.
- [5] 韩晶,王乐华,马莉,等. 水泥及石灰掺量对改良膨胀土抗剪强度的影响[J]. 人民黄河,2015,37(4):137-139,144.
- [6] 张齐齐,王家鼎,刘博榕,等. 水泥改良土微观结构定量研究[J]. 水文地质工程地质,2015,42(3):92-96.
- [7] 苏蔚,陈群,王琛,等. 掺砾膨胀土的侧限压缩增湿变形试验研究[J]. 水电能源科学,2019,37(4):136-139.
- [8] 杨俊,许威,张国栋,等. 风化砂掺量及上覆荷载对改良膨胀土的影响试验[J]. 水电能源科学,2013,31(3):109-111,247.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [10] DU Y, LI S, HAYASHI S. Swelling-shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China[J]. Engineering geology,1999,53(3-4):351-358.
- [11] 高国瑞. 膨胀土的微结构和膨胀势[J]. 岩土工程学报,1984,6(2):40-48.

## Comparison and Analysis of Mechanical Properties and Physical Mechanism of Expansive Soil Improved by Different methods

CHAI Shi-yu<sup>a,b</sup>, ZHANG Ling-kai<sup>a,b</sup>

(a. College of Hydraulic and Civil Engineering; b. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** In order to solve the sliding failure problem caused by the wet expansion and dry shrinkage of expansive soil in the North Xinjiang water supply project, lime, cement and sand and gravel were used as the main curing materials. Through unconfined compressive strength test, direct shear test, compression test and SEM test, the influence of test dosage on the mechanical properties of improved expansive soil and the formation mechanism of microstructure strength under different improvement methods were studied by combining macro and micro. The test results show that with the continuous increase of the amount of lime and sand gravel, the soil strength increases steadily, while the peak value of cement improved soil appears when the amount of lime and sand gravel is about 7%. For lime and sand gravel, when the amount of lime and sand gravel is about 6% and 30% respectively, the overall compressibility of the improved soil is low, the cohesion is large, and the shear and compressive strength is high, which can meet the requirements of engineering application. The SEM analysis of lime and cement stabilized soil with the best mix ratio shows that a large number of curly flake hydrated gel materials are generated, which significantly reduces the pores compared with the original expansive soil, and the aggregates are closely cemented. From the macro mechanical properties, the mechanical properties and stability of the solidified soil are greatly improved.

**Key words:** expansive soil; solidification improvement; mechanical properties; microstructure; strength mechanism