

# 粉土改良膨胀土工程特性试验研究

唐紫琼<sup>1</sup>, 陈加富<sup>2</sup>, 侯爵<sup>2</sup>, 章定文<sup>1\*</sup>, 孙海军<sup>3</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 江苏省交通工程建设局, 江苏 南京 210004;

3. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 为探讨粉土改良膨胀土的工程特性, 对不同粉土占比的改良膨胀土进行了击实试验、膨胀特性试验、界限含水量试验、承载比(CBR)试验和无侧限抗压试验。结果表明, 掺加粉土降低了膨胀土亲水性能, 改善其压实特性, 粉土占比为40%时, 最大干密度达到峰值。改良土的膨胀性指标显著降低, 自由膨胀率可降低至24.5%, 有荷膨胀率逐渐接近0; 随着粉土占比的提高, 改良土的CBR值得到明显提升, 无侧限抗压强度先增大后减小, 粉土占比为10%时, 改良土无侧限抗压强度达到峰值0.87 MPa。结合连宿高速公路工程实际, 利用低掺量石灰降低膨胀土塑性, 使其易破碎从而提高材料拌和均匀性, 对40%粉土与2.5%石灰联合改良膨胀土进行室内试验, 发现石灰掺入提高了土体无侧限抗压强度, 进一步抑制了土体的膨胀潜势。

**关键词:** 膨胀土; 粉土; 膨胀特性; 力学性能; 改良

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)02-0113-08

## Experimental study on engineering characteristics of modified expansive soil with silt

TANG Zi-qiong<sup>1</sup>, CHEN Jia-fu<sup>2</sup>, HOU Jue<sup>2</sup>, ZHANG Ding-wen<sup>1\*</sup>, SUN Hai-jun<sup>3</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Provincial Transportation Engineering Construction Bureau, Nanjing 210004, Jiangsu, China;

3. Huashe Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, Jiangsu, China)

**Abstract:** Compaction test, expansive properties test, Atterberg limits test, California bearing ratio test (CBR) and unconfined compression test on modified expansive soil with different proportions of silt were carried out to investigate its engineering characteristics. It is concluded that the addition of silt reduces the hydrophilicity of expansive soil and improves its compaction characteristics. The maximum dry density reaches the peak when the proportion of silt is 40%. The swelling index of the modified soil is significantly reduced, the free expansive rate can be reduced to 24.5%, and the loaded expansive rate is gradually close to zero. With the increase of the proportion of silt, the CBR of the improved soil is significantly increased, and the unconfined compressive strength increases first and then decreases. It can be found that its unconfined compressive strength has a peak value of 0.87 MPa when the proportion of silt is 10%. Combined with the engineering practice of the Liansu expressway project, the uniformity of the mixed materials is improved by adding a small amount of lime to the expansive soil to reduce its plasticity and increase its breakability. The laboratory tests were carried out on expansive soil improved by combining 40% silt and 2.5% lime. The results show that the addition of lime improves the unconfined compressive strength of the soil and further inhibits the expansion potential of the soil.

**Key words:** expansive soil; silt; expansive characteristic; mechanical properties; improvement

## 0 引言

膨胀土是一种具有显著胀缩性的特殊土, 对各

类浅表层轻型工程有多次反复和长期潜在的危害作用, 工程中对膨胀土的处理十分重要<sup>[1]</sup>。常用的膨胀土地基处理方法包括置换、土质改良、保湿、

收稿日期: 2022-04-12

作者简介: 唐紫琼(1999—), 女, 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要从事路基工程研究。E-mail: 220203218@seu.edu.cn。

\*通信作者: 章定文(1978—), 男, 湖南常德人, 教授, 博士生导师, 主要从事特殊土地基处理与路基长期性能等研究。E-mail: zhang@seu.edu.cn。

预浸水和桩基础等<sup>[2]</sup>。目前工程实践中多采用土性改良法(尤其以化学改良法)处治膨胀土,利用材料间物理化学反应改善膨胀土工程特性,如掺石灰、水泥、粉煤灰、工业碱渣等无机改性剂<sup>[3-6]</sup>,其中石灰改良膨胀土工程应用最多<sup>[7]</sup>。针对石灰改良膨胀土,国内外众多学者主要研究了施工控制参数(掺灰量、含水量、压实度等)以及施工工艺优化等领域,取得了一系列的成果<sup>[8-9]</sup>。

物理改良是指掺入碎石、砂等粗颗粒土或纤维、橡胶等性质稳定材料,依靠减少土体中亲水性黏土矿物的占比和颗粒间嵌挤咬合作用实现对膨胀土的改良,由于其环境友好、降低工程造价、改良效果持久的优点受到学者们的关注<sup>[10]</sup>。现有研究以风化砂、粉砂及碎石等掺料为主,YANG等<sup>[10]</sup>发现风化砂可以有效抑制膨胀土的胀缩性,并能提高膨胀土的力学强度指标。凡超文<sup>[11]</sup>试验研究了黄泛区粉砂土对弱膨胀土的改良效果,提出了30%的最佳掺量,但以砂砾为主的改良材料通常颗粒粒径较大,路基施工时存在难以压实的问题。目前,还未见利用粉土对膨胀土进行物理改良的研究报道。由于单纯的物理改良法并没有改变膨胀土的本性,采用该法处理膨胀土,通常需较高掺量的改良材料,主要适用于弱膨胀土的改良。

连云港至宿迁在建高速公路沿线膨胀土分布广,同时浅层分布大量粉土,区别于现有研究中所涉及的粗粒土,粉土是一种工程性质特殊的低塑性土,同膨胀土一样不能直接用作路基填料,否则易导致出现路基路面沉陷、变形和失稳等破坏,通常需换填或固化处理。为科学合理利用材料实现“以废治废”、就地取材,本文提出采用粉土改良膨胀土的方法,对膨胀土的基本物理特性、胀缩特性及路用强度特性进行试验以研究不同粉土掺入量对膨胀土工程特性的影响。此外,考虑到施工过程中

膨胀土与粉土的拌合问题,将利用低掺量石灰降低膨胀土塑性,使其易破碎从而提高材料拌合均匀性,并通过室内试验分析粉土石灰联合作用对膨胀土的改良效果,为今后的工程应用提供参考,丰富膨胀土地基处理的技术方法。

## 1 试验概况

### 1.1 试验用土

#### (1) 膨胀土

试验采用的膨胀土取自宿迁市连宿高速公路沭阳至宿窑段LS-SQ6标段取土场,颜色呈灰黄色,坚硬状态,含白色钙质结核和少量灰褐色铁锰结核,裂隙较发育,为高液限黏土,基本土性指标见表1。

由表1可见,该膨胀土自由膨胀率为55%,初判为弱膨胀土( $40% < \delta_{ef} < 60%$ ),且其液限为54.1%( $\omega_L > 50%$ ),不满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)<sup>[10]</sup>中细粒土作路堤填料的要求。

#### (2) 粉土

试验所用粉土取自宿迁市泗阳县,颜色呈灰黑色,手捻时有细颗粒存在且无黏滞感,土样含水量较高,摇震有水析出,基本土性指标见表2。

### 1.2 试验方案

试验参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)<sup>[10]</sup>相关规程进行,试样采用静压法制备,膨胀率试验、承载比(CBR)试验、无侧限抗压试验的所有试样均在最优含水量条件下制备,含石灰试样在温度 $20 \pm 2$  °C、相对湿度达95%以上的标准养护室养护。

试验研究粉土改良对膨胀土工程特性的影响,着重从膨胀特性和强度特性进行分析。试验中粉土和石灰的掺加比例分别称为粉土占比 $p_1$ 和石灰掺量 $p_2$ ,试验中各配合比计算如下:

表1 膨胀土基本性质指标

Table 1 Basic properties of the expansive soil for testing

天然含水 量 $\omega_n$ /%	比重 $G_s$	液限 $\omega_L$ /%	塑限 $\omega_p$ /%	塑性指数 $I_p$	最大干密度 $\rho_{dmax}$ /(g/cm <sup>3</sup> )	最优含水 量 $w_{op}$ /%	自由膨胀 率 $\delta_{ef}$ /%	颗粒粒径分布/%		
								<0.005 mm	0.005~0.075 mm	>0.075mm
25.1	2.73	54.1	28.8	25.3	1.796	16.7	55.0	48.45	46.91	4.64

表2 粉土基本性质指标

Table 2 Basic properties of silt for the test

天然含水量 $\omega_n$ /%	比重 $G_s$	液限 $\omega_L$ /%	塑限 $\omega_p$ /%	塑性指数 $I_p$	颗粒粒径分布/%		
					<0.005 mm	0.005~0.075 mm	>0.075 mm
24.4	2.70	32.3	25.0	7.3	3.32	60.48	36.20

$$m = m_0 + m_1 \quad (1)$$

$$m_1 = p_1 \times m \quad (2)$$

$$m_2 = p_2 \times m \quad (3)$$

式中:  $m$  为改良土总干质量;  $m_0$  为膨胀土干质量;  $m_1$  为粉土干质量;  $m_2$  为石灰干质量;  $p_1$  为粉土占比;  $p_2$  为石灰掺量。

本文中粉土改良膨胀土的配合比共 6 种, 粉土占比分别为 0%、10%、20%、30%、40%、50%, 经粉土改良试验后, 同时考虑到工程应用推广, 利用石灰对黏土的砂化作用增加施工时材料拌和均匀程度, 拟采用 2.5% 低掺量石灰与粉土联合改良膨胀土并试验研究其改良效果。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 击实试验

试验采用干土法进行闷料, 根据工程要求和试样粒径选择重型 II-2 试验方法, 分 3 层击实, 每层锤击 98 下, 试样内径为 152 mm, 高为 120 mm, 体积为 2 177 cm<sup>3</sup>。

粉土改良膨胀土的击实曲线见图 1, 其击实试验结果见表 3。粉土占比  $p_1$  对改良土最优含水量  $w_{op}$  和最大干密度  $\rho_{dmax}$  的影响见图 2。

由图 1 可见击实曲线有明显的峰点, 随着粉土占比的增加, 改良土最优含水量逐渐下降, 表明粉土的掺入使得膨胀土中弱结合水膜变薄进而改善了膨胀土的亲水性能。

由图 2 可见最大干密度随粉土占比增加先增大后减小, 粉土占比为 40% 时最大干密度达到峰值。其上升趋势说明向膨胀土中掺加适量粉土可以降低改良土孔隙率, 使得土体易于碾压, 同时代表路基施工压实控制标准的提高, 有利于提高施工质量; 而当粉土占比为 50% 时, 土体内粉土颗粒过多, 大粒径土颗粒造成改良土内部的孔隙率增大, 反而降低了土体的压实特性。

### 2.2 膨胀率试验

公路工程中常采用膨胀率作为评价膨胀土工程特性的重要指标, 其中包括最为直观的自由膨胀率  $\delta_{ef}$  以及代表膨胀土在不同上覆压力下的无荷膨胀率  $\delta_e$  和有荷膨胀率  $\delta_{ep}$ 。为了更直观地分析粉土改良膨胀土的改良效果, 将改良前后三项膨胀率各自指标之差与未改良膨胀土相应膨胀率指标之比分

别记为  $E_{ef}$ 、 $E_e$  和  $E_{ep}$  (减小为负), 称为改良效果。

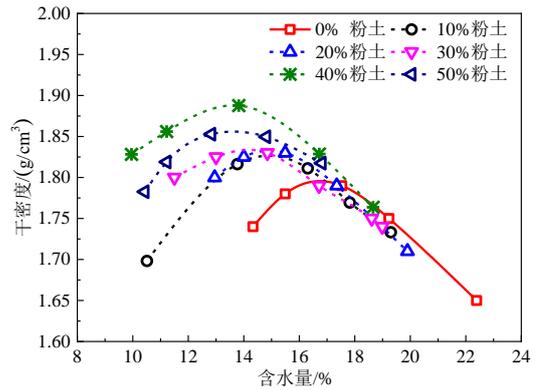


图 1 改良膨胀土击实曲线

Fig. 1 Compaction curves of the improved expansive soil

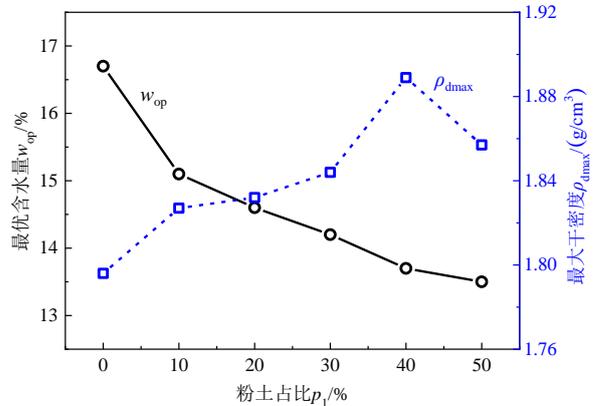


图 2  $p_1$  对  $w_{op}$  和  $\rho_{dmax}$  的影响

Fig. 2 Effect of  $p_1$  on  $w_{op}$  and  $\rho_{dmax}$

表 3 改良膨胀土击实试验结果

Table 3 Results of compaction test of the improved expansive soil

粉土占比 $p_1$ / %	最优含水量 $w_{op}$ / %	最大干密度 $\rho_{dmax}$ / (g/cm <sup>3</sup> )
0	16.7	1.796
10	15.1	1.827
20	14.6	1.832
30	14.2	1.844
40	13.7	1.889
50	13.5	1.857

#### (1) 自由膨胀率

粉土改良膨胀土自由膨胀率结果见表 4, 粉土占比  $p_1$  对改良土自由膨胀率  $\delta_{ef}$  的影响见图 3。试验结果表明粉土的掺入使得膨胀土自由膨胀率显著下降, 且当粉土占比为 50% 时, 改良效果  $E_{ef}$  超过了 50%, 表明粉土的掺入不仅发挥了换土作用, 也对膨胀土颗粒在无约束条件下的吸水膨胀产生了抑制作用, 土体自由堆积条件下密实度很低, 但粉土中的粗颗粒所提供的摩擦力较小, 因此抑制效果并不明显。参照《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112—

2013) [10] 对膨胀土进行膨胀潜势的划分, 当粉土占比达到 30% 时, 自由膨胀率  $\delta_{ef} = 38.5\% < 40\%$ , 土体由弱膨胀土转化为非膨胀土。

表 4 改良膨胀土自由膨胀率

Table 4 Free swelling ratio of the improved expansive soil %

粉土占比 $p_1$	自由膨胀率 $\delta_{ef}$	改良效果 $E_{ef}$
0	55.0	0.00
10	50.5	-8.18
20	48.0	-12.72
30	38.5	-30.00
40	28.0	-49.09
50	24.5	-55.45

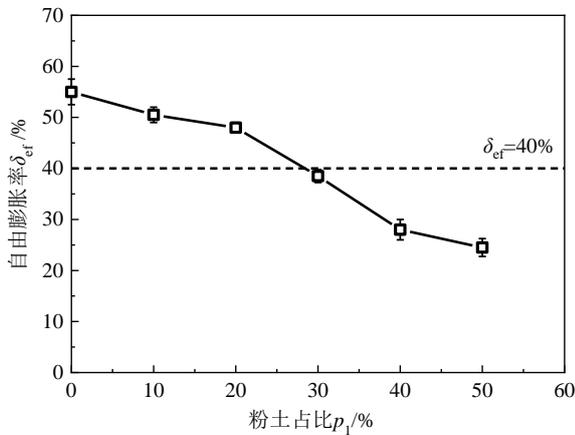


图 3  $p_1$  对  $\delta_{ef}$  的影响

Fig. 3 Effect of  $p_1$  on  $\delta_{ef}$

(2) 0 kPa 无荷膨胀率与 50 kPa 有荷膨胀率

膨胀率试验采用轴承式单杠杆固结仪, 试样尺寸为  $\Phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 试样压实度为 96%。相较于自由膨胀率, 有/无荷膨胀率代表土体在侧向约束下浸水膨胀潜势, 更能反映实际工程中的土体状态。

粉土改良膨胀土膨胀率试验结果见表 5, 粉土占比  $p_1$  对改良土 0 kPa 无荷膨胀率  $\delta_e$  与 50 kPa 有荷膨胀率  $\delta_{ep}$  的影响见图 4。在无上覆应力及 50 kPa 上覆应力条件下, 改良土的膨胀率均随粉土占比的提高而减小, 且呈良好的线性关系。粉土占比 50% 时, 改良土 50 kPa 有荷膨胀率减小为 0.027 5%, 接近 0, 表明粉土可有效抑制膨胀土的膨胀潜势, 这是由于粉土改良减少了膨胀土中的黏性细颗粒的含量, 且随着粉土占比的提高, 压实状态下粉土颗粒产生的内摩阻力增大, 阻止土颗粒间的相对位移, 土体吸水膨胀潜势减小, 宏观结果表现为土体膨胀率逐渐减小。

粉土占比  $p_1$  对改良效果  $E_e$  和  $E_{ep}$  的影响见图 5, 上覆压力的提升使得土体膨胀率下降幅度增大, 表明在有侧限约束的条件下, 上覆压力的施加可以提升粉土改良膨胀土的改良效果。当有 50 kPa 上覆压力作

用膨胀土时, 土体颗粒受挤压作用, 粉土粗颗粒产生的摩阻力增大, 且上覆压力抵消了亲水性黏性颗粒吸水产生的部分膨胀力, 因而膨胀率下降更明显。

表 5 改良膨胀土膨胀率

Table 5 Swelling ratios of the modified expansive soil %

$p_1$	0 kPa 无荷膨胀率		50 kPa 有荷膨胀率	
	$\delta_e$	$E_e$	$\delta_{ep}$	$E_{ep}$
0	11.80	0.00	2.79	0.00
10	9.25	-21.61	2.15	-23.01
20	7.69	-34.87	1.73	-38.05
30	6.65	-43.64	1.30	-53.36
40	5.26	-55.42	0.51	-81.74
50	3.81	-67.71	0.03	-99.02

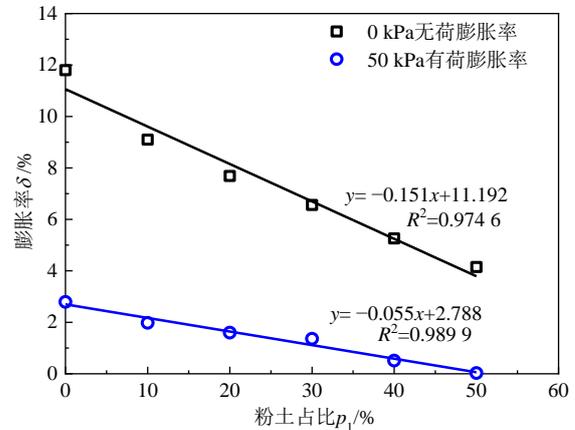


图 4  $p_1$  对  $\delta_e$  和  $\delta_{ep}$  的影响

Fig. 4 Effect of  $p_1$  on  $\delta_e$  and  $\delta_{ep}$

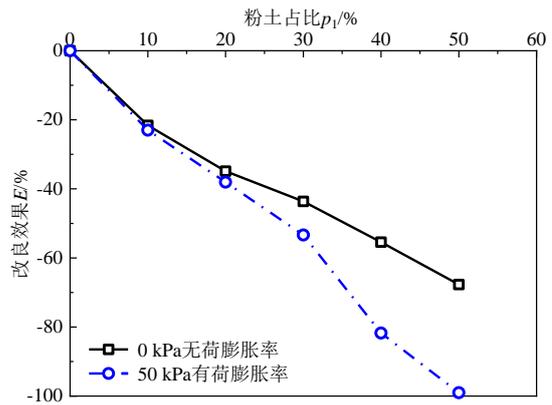


图 5  $p_1$  对  $E_e$  和  $E_{ep}$  的影响

Fig. 5 Effect of  $p_1$  on  $E_e$  and  $E_{ep}$

2.3 界限含水量试验

膨胀率试验按照规范规定 (76 g/17 mm) 利用光电式液塑限联合测定仪进行试验。

粉土改良膨胀土的界限含水量试验结果见表 6, 粉土占比  $p_1$  对界限含水量的影响见图 6。液限随着粉土占比的提高而降低明显, 塑限整体呈下降趋势, 塑性指数也因粉土的掺入而降低, 少量粉土的

掺入使得改良土液限满足规范 (小于 50%) 的要求。分析产生该试验现象的原因, 粉土的掺入造成土体中亲水性黏土矿物含量降低, 所以表面阳离子浓度下降, 扩散双电层减弱, 降低了结合水含量, 因此改良膨胀土的液限逐渐减小; 土体中粒径较大的粉土颗粒改变了土体颗粒排列结构, 黏性颗粒间距增大, 土体的可塑性降低, 试验表现为塑限降低。由改良膨胀土的标准塑性图 (见图 7) 对土体进行土类划分, 结果表明经粉土改良后, 土体由高液限黏土转变为低液限黏土。

表 6 改良膨胀土界限含水量

Table 6 Boundary moisture contents of the improved expansive soil %

$p_1$	界限含水量 (76 g/17 mm)			土类划分
	$\omega_L$	$\omega_p$	$I_p$	
0	54.1	28.8	25.3	CH
10	49.2	25.8	23.4	CL
20	47.9	24.7	23.2	CL
30	43.7	22.7	21.0	CL
40	37.5	20.7	16.8	CL
50	35.9	22.3	13.6	CL

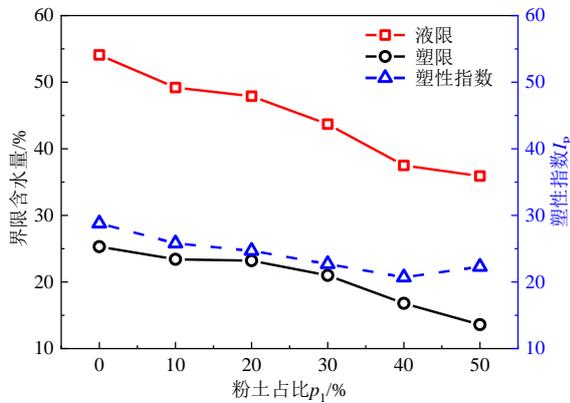


图 6  $p_1$  对界限含水量的影响

Fig. 6 Effect of  $p_1$  on Atterberg limits

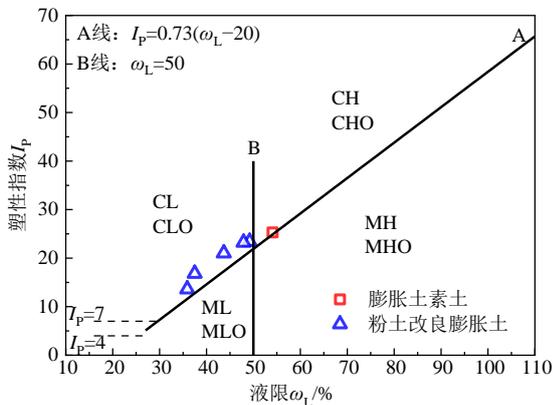


图 7 改良膨胀土标准塑性图

Fig. 7 Standard plasticity diagram of the improved expansive soil

## 2.4 CBR 试验

CBR 试验采用 CBR-1 型承载比试验仪, 试样尺寸为  $\Phi 152 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ , 由于公路规范对不同压实度层位的填料承载比值有不同的要求, 因此分别对 96% 和 93% 压实度浸水 96 h 试样进行试验。试验结果见表 7, 粉土占比  $p_1$  对改良土 CBR 值和 CBR 膨胀量影响分别见图 8~9。

表 7 改良膨胀土 CBR 试验结果

Table 7 CBR test results of the improved expansive soil %

$p_1$	96% 压实度		93% 压实度	
	CBR	CBR 膨胀量	CBR	CBR 膨胀量
0	6.30	6.73	4.02	4.23
10	7.48	5.15	6.01	3.64
20	8.98	4.25	7.42	2.75
30	13.80	3.61	11.30	2.45
40	21.96	2.60	16.09	1.50
50	30.65	0.94	25.30	0.44

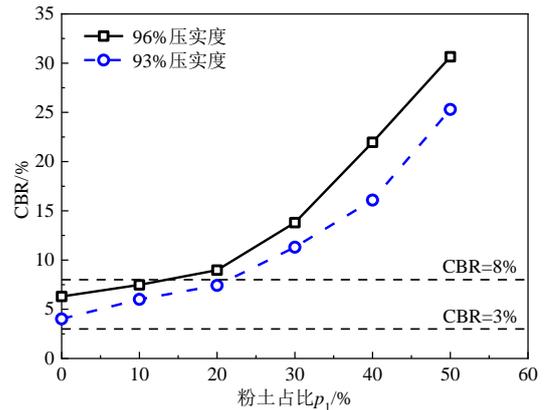


图 8  $p_1$  对 CBR 值的影响

Fig. 8 Effect of  $p_1$  on CBR

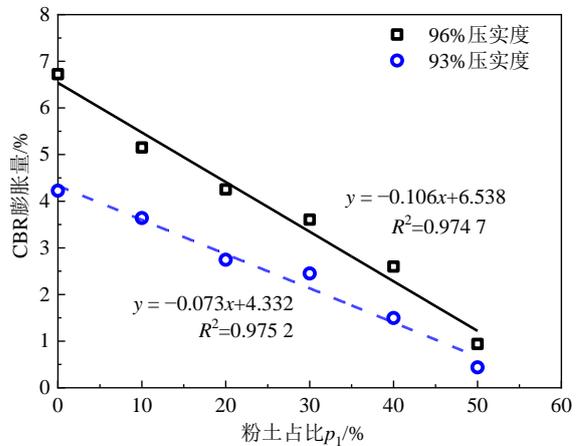


图 9  $p_1$  对 CBR 膨胀量的影响

Fig. 9 Effect of  $p_1$  on CBR swelling capacity

(1) 96% 压实度下, 膨胀土的 CBR 值为 6.3% (小于 8%), 不满足规范对高速、一级公路上路床

(路面下深度 0~0.3 m) 填料最小承载比的要求。粉土大幅提升了膨胀土的 CBR 值, 当粉土占比为 20% 时满足了规范要求; 粉土含量较低时, 土颗粒悬浮在软弱膨胀土颗粒中, 不能有效增加膨胀土的 CBR 值; 而含量进一步提高时, 粉土颗粒含量逐渐增多, 形成较好的耦合结构, 使得粉土改良膨胀土体的 CBR 值迅速增大。压实度较高时 CBR 值较高, 但相比较而言压实度对 CBR 值影响较小。

(2) CBR 膨胀量随着粉土占比的增加呈线性减小趋势, 当粉土占比为 50% 时, 其吸水膨胀率为 0.94% (小于 1%), 改良土基本已经没有了膨胀性, 粉土的掺入有效抑制了膨胀土的膨胀潜势, CBR 吸水膨胀量与有荷膨胀率类似, 试样尺寸较大, 上覆压力较小, 因而数值上介于 0 kPa 无荷膨胀率和 50 kPa 有荷膨胀率之间。

## 2.5 无侧限抗压试验

无侧限抗压试验试样尺寸为  $\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ , 制样压实度为 96%。试验结果见表 8, 粉土占比  $p_1$  对改良土无侧限抗压强度  $q_u$  的影响见图 10。

表 8 改良膨胀土无侧限抗压强度

Table 8 Unconfined compressive strength of the improved expansive soil

$p_1 / \%$	无侧限抗压强度 $q_u / \text{MPa}$	改良效果 / %
0	0.86	0.00
10	0.87	1.16
20	0.75	-12.79
30	0.56	-34.88
40	0.41	-52.33
50	0.23	-73.26

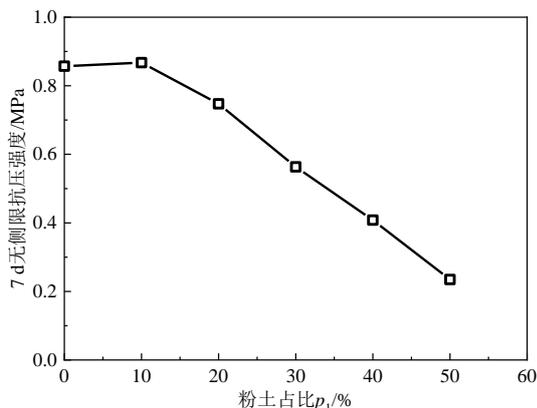


图 10  $p_1$  对  $q_u$  的影响

Fig. 10 Effect of  $p_1$  on  $q_u$

粉土掺入使得改良土无侧限抗压强度先有略微增长而后逐渐降低的趋势, 当粉土占比较小时, 没有明显改变土体内黏性颗粒的含量, 且由于粉土颗粒提供的摩擦力, 使得土体无侧限抗压强度有一

定的增长; 当粉土占比逐渐增大时, 粉土颗粒表面活性较低, 土体黏聚力迅速降低, 在无侧向约束的情况下, 土体的强度降低明显。

分析粉土改良膨胀土在无侧向约束条件下受压的整个破坏过程, 大致可描述为 4 部分<sup>[18]</sup>: (1) 受压一段时间后试样表面有细微竖向裂缝, 且在两端延伸逐步发展为八字型裂缝; (2) 裂缝向试样中部发展, 且裂缝变宽; (3) 由于试样中部的横向变形并不受约束而出现剥落; (4) 试样呈两个圆锥对接状而破坏。粉土改良膨胀土试样从细微裂缝出现到试样破坏, 经历时间很短, 属于脆性破坏, 如图 11, 改良土破坏形态基本符合两个圆锥对接状。

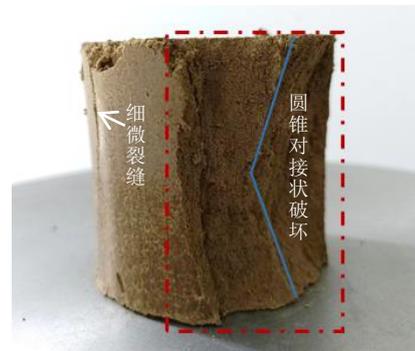


图 11 粉土改良膨胀土无侧限受压破坏形态

Fig. 11 Unconfined compression failure patterns of the improved expansive soil with silt

## 2.6 掺石灰联合改良膨胀土工程特性

综合试验结果分析, 结合连宿高速公路工程实际, 选择粉土占比为 40% 的掺量改良膨胀土。由于室内试验采用干土法制备各试样, 粉土与膨胀土拌合均匀, 改良效果较好。考虑施工过程中填料初始含水量通常较高, 尤其是膨胀土作为高液限黏土破碎较为困难, 可利用石灰快速降低膨胀土的含水量, 降低其塑性, 增加与粉土拌合时的均匀程度。参考灰土施工时二次掺灰的工艺, 施工过程中多采用 2%~3% 石灰对膨胀土进行“砂化”破碎处理, 结合粉土改良膨胀土室内试验结果, 本文拟采用 2.5% 石灰掺量联合 40% 粉土占比改良膨胀土, 分析其膨胀特性及强度特性等指标。土样均在最优含水量、96% 压实度条件下采用静压法制备, 标准养护 7 d 后进行 CBR 试验和无侧限抗压试验, 结果如表 9 所示。

结合石灰的化学改良作用, 改良膨胀土的路用性能显著提高, 其中膨胀潜势抑制明显, 膨胀率指标均在 0 左右。CBR 值增长数十倍, 且改良土无侧限抗压强度为 0.90 MPa, 石灰的掺入解决了粉土改良膨胀土无侧向约束时土体强度下降的

问题。

表 9 40%粉土与 2.5%石灰联合改良膨胀土试验指标  
Table 9 Test indexes of the improved expansive soil with silt and lime

改良配合比	指标	结果
$p_1 = 40\%$ $p_2 = 2.5\%$	$w_{op}$	15.7%
	$\rho_{dmax}$	1.76 (g/cm <sup>3</sup> )
	$\delta_{ef}$	1.0%
	$\delta_e$	0.011%
	$\delta_{ep}$	-0.002 3%
	$\omega_L$	35.2%
	$\omega_p$	26.6%
	$I_p$	8.6%
	CBR	214.2%
	$q_u$	0.90 MPa

### 3 结 论

(1) 粉土改良膨胀土的方法具有可行性, 掺一定量粉土使得土体最优含水量降低, 最大干密度增大, 粉土占比 40%时改良土最大干密度达到峰值, 表明粉土可以改善膨胀土的压实特性。

(2) 改良土液限和塑性指数减小, 表明粉土降低了膨胀土的亲水性能, 粉土占比对膨胀性指标影响较大, 粉土占比提高至 30%时自由膨胀率减小至小于 40%, 满足规范对路基填料的要求, 0 kPa 无荷膨胀率及 50 kPa 有荷膨胀率呈线性降低, 表明粉土抑制了膨胀土的膨胀潜势。

(3) 粉土占比提高, 土体 CBR 值显著提高, 表明粉土可以提高受侧向约束时膨胀土的土体强度, 一定量的粉土可以提高膨胀土的无侧限抗压强度, 粉土占比为 10%时, 无侧限抗压强度达到峰值。

(4) 结合连宿高速公路工程实际, 选定合理的粉土占比为 40%。联合 40%粉土与 2.5%石灰改良膨胀土工程性质试验结果表明, 石灰掺入解决了粉土改良膨胀土无侧向约束时土体强度下降的问题, 进一步抑制了土体的膨胀潜势。实际工程中可考虑粉土对膨胀土的物理改良作用, 减小膨胀土处理时所需的石灰掺量以达到经济环保的目的。

### 参考文献

[1] 唐朝生, 施斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1376-1384.  
TANG Chao-sheng, SHI Bin. Swelling and shrinkage

behaviour of expansive soil during wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1376-1384.

- [2] 龚晓南. 地基处理技术发展展望[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.  
GONG Xiao-nan. The Development and Outlook of Ground Improvement[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 2004.
- [3] PITTHAYA J, NUTTAPONG N, PANICH V, et al. Laboratory investigations on the swelling behavior of composite expansive clays stabilized with shallow and deep clay-cement mixing methods[J]. Applied Clay Science, 2017, 148: 83-94.
- [4] NEGAWO W J, DI EMIDIO G, BEZUIJEN A, et al. Lime-stabilization of high plasticity swelling clay from Ethiopia[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019, 23(4): 504-514.
- [5] AL-MUKHTAR M, KHATTAB S, ALCOVER J. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil[J]. Engineering Geology, 2012, 139: 17-27.
- [6] MAHEDI M, CETIN B, WHITE D, et al. Cement, lime, and fly ashes in stabilizing expansive soils: performance evaluation and comparison[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(7): 04020177.
- [7] 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.
- [8] PUPPALA A J, PEDARLA A. Innovative ground improvement techniques for expansive soils[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2017, 2(1): 1-15.
- [9] 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): 999-1005.  
ZHOU Bao-chun, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Stress-strain-strength behaviour and constitutive description of lime-treated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 999-1005.
- [10] YANG J, LI X, ZHANG G, et al. Expansive soil improvement with weathered sand[C]//In ICTE 2013: Safety, Speediness, Intelligence, Low-Carbon, Innovation. Chengdu, 2013: 2082-2087.
- [11] 凡超文. 黄泛区粉砂土改良弱膨胀土工程特性研究[D]. 郑州: 河南大学, 2019.

