

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.0857

粉土改良膨胀土的路用性能与现场试验

张 艺¹, 李永强², 章定文¹, 侯 爵³, 樊晓军², 唐紫琼¹

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 中交一公局第三工程有限公司, 北京 100000; 3. 江苏省交通工程建设局, 江苏 南京 210017)

摘 要: 为探究粉土对膨胀土的改良效果, 对不同粉土占比改良膨胀土进行了胀缩特性、路用性能和微观结构测试。研究表明: 掺入粉土改变了膨胀土土体颗粒成分及结构, 抑制了膨胀土的胀缩潜势; 随着粉土颗粒的增加, 膨胀土的密实度和无侧限抗压强度均先增大后减小, 最大干密度在粉土占比为 40% 时达到 1.889 g/cm³, 无侧限抗压强度在粉土占比为 10% 时最大, 加州承载比 (CBR) 值持续显著提高, 回弹模量呈下降趋势, 均满足规范要求; 验证了粉土改良膨胀土的可行性, 确定了最佳配合比为粉土掺量 40%。为便于现场施工, 并考虑现场拌和均匀程度, 先掺入 3% 低剂量石灰对膨胀土进行“砂化”, 降低膨胀土黏性使其破碎。在此基础上, 采用粉土掺量 40% 对膨胀土进行改良后用于高速公路路堤填筑, 并开展了现场压实度、CBR 值、弯沉值等测试。现场试验结果表明: 现场填筑联合改良试验段和单一石灰改良对照段整体压实质量良好, 但试验段压实度易受粉土均匀程度影响而降低; 试验段路基 CBR 值和路基弯沉与对照段相当, 粉土改良有效弥补了相对于对照段减少的 2% 石灰所提供的强度。

关 键 词: 膨胀土; 粉土; 改良; 胀缩特性; 路用性能

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2023) 10—2942—11

Road performance and field test of expansive soil improved by silt

ZHANG Yi¹, LI Yong-qiang², ZHANG Ding-wen¹, HOU Jue³, FAN Xiao-jun², TANG Zi-qiong¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China; 2. No. Three Engineering Co., Ltd. of CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100000, China; 3. Transportation Engineering Construction Bureau of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210017, China)

Abstract: To explore the improvement effect of adding silt on expansive soil, the swelling-shrinkage characteristics, road performance and microstructure of expansive soil with different proportions of silt were tested. The results show that the incorporation of silt changes the composition and structure of soil particles, and inhibits the expansion and contraction potential of expansive soil. With the increase of silt particles, the compactness and unconfined compressive strength of expansive soil increase first and then decrease. The maximum dry density reaches 1.889 g/cm³ when the proportion of silt is 40%, and the unconfined compressive strength reaches the maximum when the proportion of silt is 10%. The California bearing ratio (CBR) value continues to increase significantly, and the rebound modulus shows a downward trend. All of these indexes meet the requirements of the specification. The feasibility of using silt to improve expansive soil is verified, and the optimum dosing ratio of silt is determined to be 40%. In order to facilitate onsite construction and consider the uniformity of onsite mixing, 3% low-dosage lime is first added to causes the performance of expansive soil to tend towards those of sandy soil so as to reduce the viscosity of the expansive soil and break it. On this basis, the expansive soil is applied to highway embankment filling after improved with 40% silt content, and onsite compaction degree, CBR value, deflection and other tests are carried out. The field test results show that the overall compaction quality of the experimental section improved by silt and lime and the control section treated by the single lime are controlled well, but the compaction degree of the test section is reduced due to the influence of the uniformity of the silt. The CBR value and subgrade deflection of the test section are comparable to those of the control section, and the silt improvement effectively compensates for the strength provided by the 2% lime reduced relative to the control section.

Keywords: expansive soil; silt; improvement; swelling-shrinkage characteristics; road performance

1 引 言

膨胀土是一种特殊黏土, 主要由蒙脱石、高岭

石和伊利石等矿物成分组成^[1], 具有胀缩特性、多裂隙性和超固结性, 体现在吸水膨胀和失水收缩^[2], 在反复吸水、失水过程中, 土体频繁膨胀、收缩,

收稿日期: 2023-06-18

录用日期: 2023-07-31

第一作者简介: 张艺, 女, 1998 年生, 硕士研究生, 主要从事土壤改良治理方面的研究工作。E-mail: 220213560@seu.edu.cn

通讯作者: 章定文, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事交通岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: zhang@seu.edu.cn

土颗粒内部发生变形并产生大量裂隙，这些裂隙降低了土体颗粒间的黏聚力、承载力及抗剪强度^[3]。我国是膨胀土分布最为广泛的国家之一，许多地区干湿两季分明，季节性含水率变化引起膨胀土体积和强度的反复变化，长期对膨胀土地区工程建设带来巨大安全隐患和经济损失。实施绿色公路建设是实现公路建设可持续科学发展的重要任务，公路工程中遇到不良土质时，采用弃土换填不具有经济和环保效益，同时为了避免其在实际工程应用中带来的潜在危害，目前通常采取物理、化学、生物等手段对膨胀土进行改良，使其特性满足工程需要^[4]。

工程应用中多以水泥、粉煤灰、石灰等作为外加剂改良膨胀土^[5]，化学改良法改变了膨胀土的原生矿物组成与土体内部结构。近年来关于石灰改良膨胀土，国内外学者开展了改良土的物理力学性能、路用性能及施工技术、干湿循环效应及水稳性研究^[6-10]，并认为石灰具有优良的改性效果，推广度高。

近年来，掺入土体材料对膨胀土进行改良进入了大众视线，如天然砂砾、风积土、碎石等，该方法通过改变膨胀土填料颗粒级配达到改良效果。张继伟等^[11]对风化砂改良膨胀土开展了干缩裂隙演化试验，提出了风化砂改良膨胀土可显著抑制其裂隙开展，在风化砂掺量小于 30% 时，掺砂量越大，改良效果越好。杨俊等^[12-15]对风化砂改良膨胀土的作用机制进行了研究，并探究了改良土的力学性能、胀缩特性，结果表明风化砂可有效改良膨胀土。黄勇杰^[16]对风化砂改良膨胀土进行了动力试验，提出了风化砂的临界掺量为 15%，最佳掺量为 25%，且改良土的动强度较素膨胀土强度有所提高。

除了对膨胀土自身特性进行研究以外，相关学者将经过处治的膨胀土应用在路基填筑方面，并对路基长期质量进行评价。陶飞飞等^[17]将改良膨胀土应用于高速公路路基，路面保持完整，路基未表现出下沉现象，边坡保持稳定，证明了膨胀土改性后可进行应用。阮志新等^[18]采用石灰改良膨胀土进行高速公路路基填筑，试验段经过 3 年重载交通及恶劣气候，未出现质量问题 and 工程缺陷。江涛^[19]以沪渝蓉高速铁路沿线膨胀土作为路基填料，提出了熟石灰掺量在基床底层和基床以下分别为 6% 和 5%，养护龄期为 7 d。目前，暂未见粉土资源化利用改良膨胀土的相关研究报道。连云港至宿迁高速公路建设中沿线分布粉土层，本文考虑利用场地粉土改良膨胀土作为路基填料进行试验研究，对改良土进行基本物理力学性质、膨胀特性和路用性能试验，综

合研究粉土改良对其工程特性的影响。为利于现场施工拌和，在前期研究确定粉土掺量的基础上加入低掺量石灰，对 40% 粉土和 3% 石灰联合改良膨胀土进行现场压实度、路基加州承载比（CBR）值和弯沉检测，验证其改良效果，为类似工程应用提供参考依据。

2 试验概况

2.1 试验材料

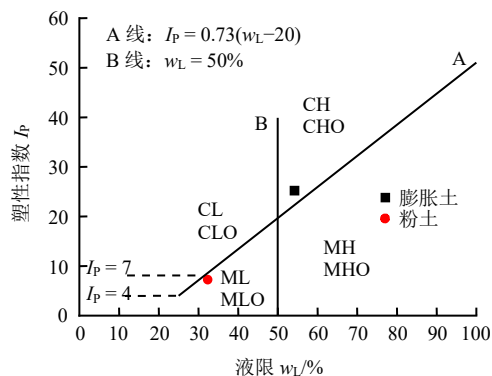
试验用土均取自宿迁市高速路标段及附近土场。在前期试验中已对其进行基本指标测试，试验用膨胀土、粉土的颗粒粒径分布见表 1，塑性图见图 1。

（1）膨胀土：颜色呈棕黄色，土粒相对密度为 2.73，最大干密度为 1.796 g/cm³，天然含水率为 25.1%，最佳含水率为 16.7%，液限为 54.1%，塑限为 28.8%，塑性指数为 25.3，属于高液限黏土（CH），自由膨胀率 δ_{ef} 为 55.0%，初判为弱膨胀土，因其液限大于 50%，且自由膨胀率在 40%~60% 区间，故不满足《公路路基设计规范》（JTG D30—2015）^[20]中对细粒土作路基填料的要求。

（2）粉土：颜色呈灰黑色，天然含水率为 24.4%，土粒相对密度为 2.70，黏粒含量仅为 3.32%，粉粒含量较高，为砂质粉土，液限为 32.3%，塑限为 25.0%，塑性指数为 7.3，属于低液限粉土（ML）。

表 1 膨胀土、粉土颗粒粒径分布
Table 1 Particle size distribution of expansive soil and silt

土体类别	颗粒粒径分布/%		
	<0.005 mm	0.005~0.075 mm	>0.075 mm
膨胀土	48.45	46.91	4.64
粉土	3.32	60.48	36.20



注：CL 为低液限黏土；CLO 为低液限有机质黏土；CH 为高液限黏土；CHO 为高液限有机质黏土；ML 为低液限粉土；MLO 为低液限有机质粉土；MH 为高液限粉土；MHO 为高液限有机质粉土。

图 1 试验用膨胀土、粉土塑性图

Fig.1 Plasticity diagram of expansive soil and silt for test

2.2 试验方案

试验参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[21]进行,在最佳含水率条件下,采用静压法制备试样,含石灰试样在标准养护室养护,温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $>95\%$ 。

试验从胀缩性和路用性能出发,基于膨胀土吸水膨胀和失水收缩的特性,在前期膨胀特性基础上研究其收缩特性,共同分析胀缩总率。在击实、CBR 试验基础上,研究粉土改良膨胀土路基在长期服役过程中的回弹模量。除此之外,从微观结构和工程现场 CBR 值进行分析与验证膨胀土改良效果。

试验中粉土和石灰的掺入量分别称为粉土占比 p_1 和石灰掺量 p_2 , 试验中各配合比计算式为

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

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

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

式中: m 为改良土干质量; 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。

本文在前期试验中已采用 6 种粉土改良膨胀土的配合比,粉土占比分别为 0%、10%、20%、30%、40%、50%。结合前期粉土改良膨胀土的试验结果和易于工程施工,在粉土改良膨胀土试验的基础上,拟加入掺量为 3% 的石灰,通过检测压实度、路基 CBR 值和路基弯沉,验证粉土与石灰联合改良膨胀土的路基填筑效果。

3 试验结果与分析

3.1 胀缩性试验

3.1.1 膨胀特性试验

粉土改良膨胀土的膨胀特性结果见表 2, 粉土占比 p_1 对改良土自由膨胀率 δ_{ef} 、无荷膨胀率 δ_e 、50 kPa 有荷膨胀率 δ_{ep} 的影响见图 2。根据前期试验结果可知,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;随着粉土占比从 0% 增至 50%, 无上覆应力时,改良土的无荷膨胀率 δ_e 从 11.8% 线性减小至 3.81%, 上覆应力为 50 kPa 时,改良土的有荷膨胀率 δ_{ep} 由 2.79% 下降至 0.027 5%, 趋于 0。表明加入粉土不仅可以改变土体的颗粒成分,而且可以抑制膨胀土的膨胀潜势,随着低黏粒含量的粉土占比的增加,改良土中黏性细颗粒含量降低,土体内摩擦角增大,抑制土颗粒间互相移动;当土体有上覆垂直应力作

用时,颗粒间受到挤压,粉土粗颗粒产生的摩阻力增大,同时膨胀土土体中黏性颗粒因吸水产生的部分膨胀力也被竖直应力抵消,更加抑制了膨胀土的膨胀潜势。

表 2 改良膨胀土膨胀特性指标
Table 2 Expansion characteristics indexes of improved expansive soil

粉土占比 $p_1 / \%$	自由膨胀率 $\delta_{ef} / \%$	无荷膨胀率 $\delta_e / \%$	50 kPa 有荷膨胀率 $\delta_{ep} / \%$
0	55.0	11.80	2.79
10	50.5	9.25	2.15
20	48.0	7.69	1.73
30	38.5	6.65	1.30
40	28.0	5.26	0.51
50	24.5	3.81	0.03

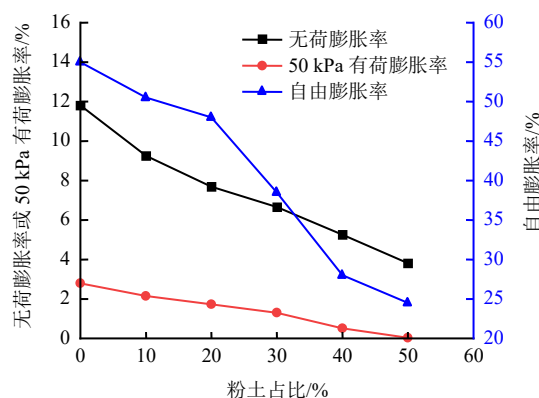


图 2 膨胀特性与粉土占比的关系

Fig.2 Relationship between expansion characteristics and silt proportion

3.1.2 收缩特性试验

按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[21],分别在最佳含水率条件下配置不同配合比的粉土改良膨胀土土样,用塑料袋封存,在标准条件下闷料 24 h 后,采用静压法制备压实度为 96% 的环刀样,浸水 24 h 后将饱和土样从环刀中推出,利用收缩仪在不高于 30 °C 的室温条件下进行粉土改良膨胀土的收缩试验,试验过程中不考虑竖向压力对收缩的影响。

膨胀土失水收缩过程大致可分为 3 个阶段,第 1 阶段土体的收缩与水分流失呈线相关性;第 2 阶段土体的收缩与水分呈缓慢变形曲线关系;第 3 阶段土体水分继续流失,但土体几乎不再收缩。

第 1 阶段直线收缩的斜率称为土样收缩系数 λ_n 。第 1 阶段直线收缩段和第 3 阶段近水平直线段的交点所对应的横坐标 ω_s ,即为土体的缩限,也是土样收缩的过程中含水率的转折点。

$$\delta_{si} = \frac{z_t - z_0}{h_0} \times 100 \quad (4)$$

$$\lambda_n = \frac{\Delta \delta_{si}}{\Delta \omega} \quad (5)$$

式中： δ_{si} 为试样在某时刻的线缩率； z_t 为某时刻的百分表度数； z_0 为百分表初始度数； h_0 为试样高度； λ_n 为竖向收缩系数； $\Delta \omega$ 为收缩曲线上第 1 阶段两点的含水率之差； $\Delta \delta_{si}$ 为与 $\Delta \omega$ 相对应的两点线缩率之差。

粉土改良膨胀土收缩曲线如图 3 所示，粉土改良膨胀土各收缩指标见表 3。粉土改良膨胀土线缩率、缩限及收缩系数随粉土占比的变化如图 4 所示。

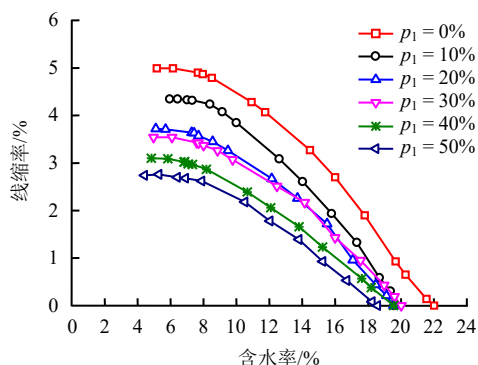


图 3 改良膨胀土收缩曲线

Fig.3 Shrinkage curves of improved expansive soil

表 3 改良膨胀土收缩特性指标

Table 3 Shrinkage characteristic indexes of improved expansive soil

粉土占比 p_1 /%	线缩率 δ_{si} /%	缩限 ω_k /%	收缩系数 λ_n
0	4.99	9.3	0.517
10	4.35	9.9	0.487
20	3.73	10.2	0.421
30	3.55	10.2	0.362
40	3.10	10.5	0.328
50	2.74	10.6	0.301

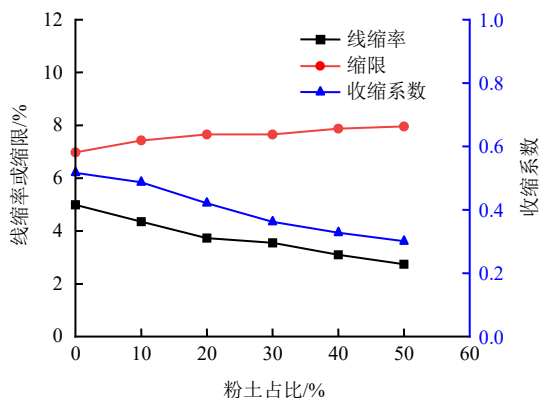


图 4 收缩特性与粉土占比的关系

Fig.4 Relationship between shrinkage characteristics and silt proportion

图 3 中试验曲线符合膨胀土典型收缩曲线，呈直线收缩段、曲线过渡段和近水平直线段。含水率从 22%降至约 15%阶段，不同粉土占比下改良土的线缩率均线性增加，当含水率下降至 10%后，即使含水率持续减小，各改良土的线缩率也保持各有数值不变，曲线保持水平。

随着粉土占比从 0%增至 50%，粉土改良膨胀土线缩率显著下降，改良膨胀土的线缩率由膨胀土素土的 4.99%降低为 2.74%，此时缩限变化不明显，仅在 9.3~10.6 之间略有增加，收缩系数稍有降低。

3.1.3 胀缩总率

依据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015) [20]，膨胀土用作路堤填料时，应以击实膨胀土的胀缩总率作为分类指标，其中规定膨胀土处治后的胀缩总率不得超过 0.7%。胀缩总率是膨胀土在 50 kPa 上覆荷载作用下有荷膨胀率与收缩率之和，是决定土体的工程性质分类和评定胀缩等级的一项重要参数。

$$e_{ps} = e_{p50} + c_{sl}(\omega - \omega_m) \quad (6)$$

式中： e_{ps} 为土体的胀缩总率； e_{p50} 为土体 50 kPa 时的有荷膨胀率； c_{sl} 为土体的收缩系数； ω 为土体天然含水率，按土体的最佳含水率计算； ω_m 为地基土在收缩过程中可能产生的含水率限值，按土体的缩限计算。

不同粉土占比的改良膨胀土胀缩总率结果如表 4 所示，其变化曲线见图 5。由图、表可知，改良土的胀缩总率均随着粉土占比的提高而逐渐降低，膨胀土素土的胀缩总率为 6.61%，粉土占比为 50%时改良膨胀土胀缩总率降至 0.90%，均满足规范要求。

表 4 改良膨胀土胀缩总率

Table 4 Swelling-shrinkage rate of improved expanded soil

粉土占比 p_1 /%	胀缩总率 e_{ps} /%
0	6.61
10	4.70
20	3.59
30	2.77
40	1.57
50	0.90

3.2 路用性能试验

3.2.1 击实试验

依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020) [21]进行击实试验，采用重型 II-2 试验方法，试样内径为 15.2 cm，高为 12 cm，体积为 2 177 cm³。

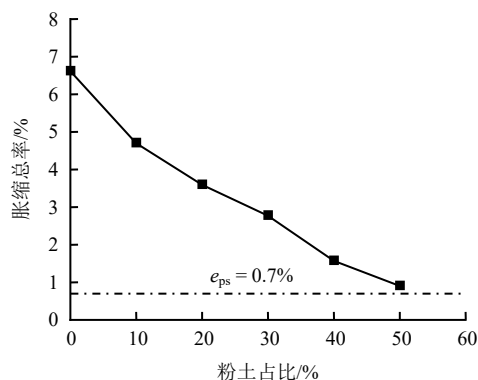


图5 胀缩总率与粉土占比的关系
Fig.5 Relationship between Swelling-shrinkage rate and silt proportion

粉土改良膨胀土击实曲线如图6所示。不同粉土占比的改良土击实试验曲线符合典型击实曲线,有明显峰值。随着粉土占比增大,改良土的最大干密度先增大后减少,且在粉土占比为40%时达到峰值,改良土的最佳含水率逐渐下降,膨胀土素土的最佳含水率为16.7%,最大干密度为1.79 g/cm³。该变化趋势说明掺入粉土初期可以提高膨胀土的密实性,增大密实度,降低孔隙率,而当粉土占比为50%时,改良土中粉土颗粒较多,土体颗粒级配发生变化,导致内部孔隙率增大,反而降低其密实程度;同时,改良土中弱结合水水膜由于粉土的掺入而变薄,降低了土体的亲水性能。

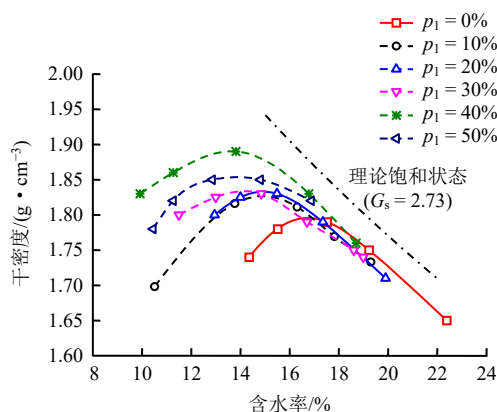


图6 改良膨胀土击实曲线^[22]
Fig.6 Compaction curves of improved expansive soil^[22]

3.2.2 强度特性试验

改良膨胀土的主要力学强度指标有无侧限抗压强度(UCS)和加州承载比(CBR)。无侧限抗压试验试样尺寸为 $\phi 50$ mm $\times$ 50 mm,制样压实度为96%;加州承载比 CBR 试验采用 CBR-1 型承载比试验仪,试样尺寸为 $\phi 152$ mm $\times$ 120 mm,制样压实

度为96%和93%,浸水时间为96 h。

粉土改良膨胀土的强度特性试验结果如表5和图7所示。根据前期试验结果可知,掺入一定量的粉土可以提高膨胀土的无侧限抗压强度和 CBR 值,在粉土掺量为10%时,改良土的无侧限抗压强度达到最大值0.87 MPa;93%压实度下 CBR 值均大于3%,满足规范对路堤的最小强度要求;在粉土掺量大于20%时,96%压实度下 CBR 值大于8%,均满足公路路基填料规范对上路床填料最小承载比的要求。结果表明,掺入少量粉土时,改良土颗粒级配没有发生明显改变,与此同时粉土颗粒提供了内摩阻力,无侧限抗压强度有一定的提升,却无法提高 CBR 值;掺入一定含量以上粉土后,由于粉土中黏粒含量较少,土体黏聚力较低,无侧限抗压强度开始降低,此时粉土与膨胀土形成的耦合结构较为牢固,反而提高了改良土的 CBR 值。

表5 改良膨胀土强度特性指标
Table 5 Strength characteristics indexes of improved expansive soil

粉土占比 p_1 /%	CBR/%		无侧限抗压强度 R_c /MPa
	96%压实度	93%压实度	
0	6.30	4.02	0.86
10	7.48	6.01	0.87
20	8.98	7.42	0.75
30	13.80	11.30	0.56
40	21.96	16.09	0.41
50	30.65	25.30	0.23

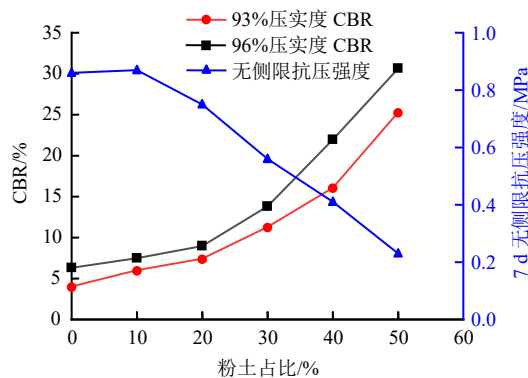


图7 强度特性与粉土占比的关系
Fig.7 Relationship between strength characteristics and silt proportion

3.2.3 回弹模量试验

回弹模量试验按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[21]执行,采用静压法制备试样,控制压实度为96%,采用承载板法测定改良土的回弹模量。

粉土改良膨胀土回弹模量结果如图8所示。从

图中可知, 粉土改良膨胀土的回弹模量随着粉土占比的提高呈现下降趋势, 掺入 10%~20% 少量粉土时, 粉土不改变土体的颗粒分布, 对膨胀土的孔隙率、压实程度影响较小, 荷载作用下回弹变形量降低幅度较小; 在粉土占比为 50% 时, 回弹模量大幅降至 53.40 MPa, 相比膨胀土素土降低了 44.8%。连云港至宿迁高速公路交通荷载等级为重交通荷载, 根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017) [23] 规定, 该条件下路基顶面回弹模量应不小于 50 MPa, 因此, 粉土改良膨胀土回弹模量均满足要求。

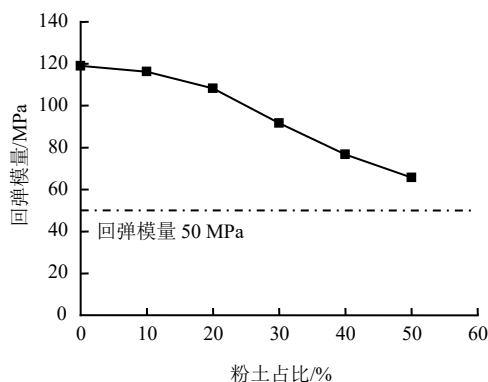


图 8 回弹模量与粉土占比的关系

Fig.8 Relationship between resilience modulus and silt proportion

3.3 微观结构

制作圆柱形试样的尺寸为 $\phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 压实度为 96%。将试样小心地掰开呈大约 1 cm^3 , 具有自然断面的小试块。试样经干燥后在断面上镀一层碳或重金属膜, 保证试样表面具有良好的导电性。试块表面的镀导电膜层大约需用碳膜 30 nm, 重金属膜 (金、银或铂) 3~4 nm 对膨胀土素土样和粉土改良膨胀土进行扫描电镜试验, 分析放大 2 000 倍土体的微观形态。

膨胀土素土及 40% 粉土改良膨胀土的 2 000 倍扫描电镜结果如图 9 所示。从图 9(a) 可知, 膨胀土素土中含有大量黏土颗粒, 主要以片状颗粒和粒状颗粒形态存在, 且粒径大小各不相同, 其中片状结构间以层状平行排列, 具有高度定向性。膨胀土素土中粒径较小且呈扁平片状的颗粒为膨胀土中的黏粒, 粒径较大的粒状颗粒为膨胀土中的粉粒, 部分弯曲薄片颗粒为黏土矿物混层结构。图中显示了片状颗粒紧密叠聚的面-面叠聚体, 大量集聚构成黏土基质。观察图 9(b) 可以看出, 由于粉土的掺入, 膨胀土中的黏粒含量减少, 砂粒和粉粒含量增加, 黏土基质含量随之降低, 此时砂粒和粉粒间形成骨

架结构, 颗粒间缝隙状孔隙减少, 架空孔隙增多, 这种骨架结构提供了一定摩擦力, 提高了膨胀土的强度。

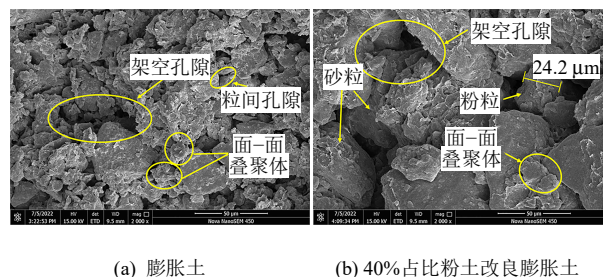


图 9 2 000 倍扫描电镜照片对比
Fig.9 Comparison of SEM photos 2 000 times

3.4 粉土石灰联合改良膨胀土工程应用

3.4.1 填筑施工工艺

对于联合改良膨胀土, 采用二次拌和的方式分别将石灰和粉土掺入, 即先利用低掺量的石灰初步降低膨胀土的含水率与塑性, 使土团块在翻拌施工过程中更能被机械破碎, “砂化” 膨胀土; 随后掺入粉土, 拌和均匀后对路基进行碾压整平等。粉土石灰联合改良膨胀土层的施工过程如图 10 所示。图中备料环节: 按照改良配合比计算施工段所需的膨胀土、粉土土方量和所需的石灰量, 摊铺膨胀土。闷料 “砂化” 膨胀土环节: 应将石灰与膨胀土充分拌和后闷料 1~3 d。粉土掺入并充分拌和后, 应检测此时联合改良填料的含水率, 通过洒水闷料或翻晒控制施工含水率高于最佳含水率 2%~3%, 以便更好地整平碾压。

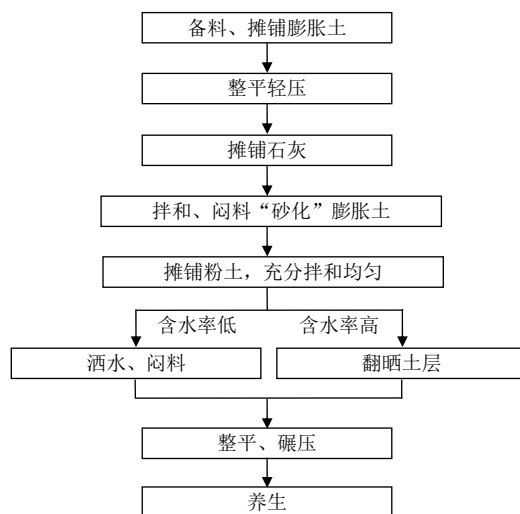


图 10 粉土石灰联合改良膨胀土施工工艺流程
Fig.10 Construction process of expansive soil improved by silt and lime

3.4.2 路基填筑效果现场检测方案

为检测施工后压实质量和路基承载能力是否满足设计要求,先对联合改良微观作用机制进行分析,再对试验段路基进行压实度、CBR 值和弯沉检测。

为易于现场施工,并考虑现场拌和均匀程度,先掺入 3%低剂量石灰对膨胀土进行“砂化”,降低膨胀土黏性使其破碎,后掺入 40%掺量粉土对膨胀土进行改良用于路堤填筑,将其作为粉土石灰联合改良试验段。将 5%掺量石灰作为石灰改良对照段。选取依托工程中 K121+600~K121+770 段为粉土石灰联合改良膨胀土试验段,共计 170 m。选取 K121+520~K121+600 段为石灰改良膨胀土对照段,共 80 m。

为评价路基填筑效果,碾压施工完成后的路基土层应及时进行质量检测,对现场路基试验段进行划分与检测点布置。现场试验测点位于路基填筑 94 区(下路床)。压实度和路基 CBR 检测在 94 区沿道路长度方向 50 m 设置 1 个测点。其中,压实度在 1~4 层每层各 20 个测点,共 80 个测点;CBR 检测在 94-1 层和 94-4 层每层各 20 个测点,共 40 个测点,如图 11 所示。弯沉检测在 94 区顶面沿道路长度方向 20 m 设置 1 个测点,一层共 48 个。现场试验方案如表 6 所示。

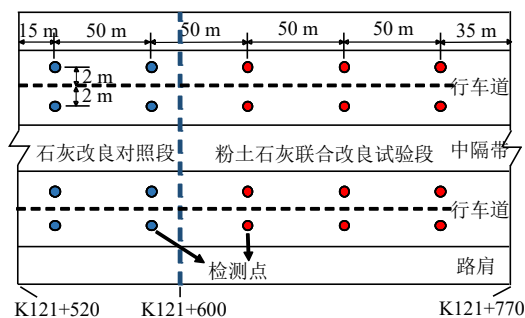


图 11 路基试验段划分与检测点布置示意图
Fig.11 Subgrade test section division and measuring points layout

表 6 现场试验方案

Table 6 Field trial protocol

检测内容	测试指标	试验方法	路基层位和检测点数
施工参数指标	压实度	灌砂法	94 区各层 20 个测点
路基刚度和强度指标	CBR 值	承载板法	94-1 层、94-4 层各 20 个测点
	弯沉值	贝克曼梁法	94 区顶面 (94-4 层) 48 个测点

3.4.3 联合改良微观机制

粉土石灰联合改良膨胀土结合了粉土的物理改良作用和石灰的化学改良作用,综合利用粉土和

石灰改善了膨胀土胀缩性,掺加粉土弥补了石灰改良膨胀土早期强度低和施工时需水量大难压实的不足。同时采用环保的粉土作为膨胀土改良材料可以减少石灰等化学改性剂的使用量,从而提高经济和环保效益。联合改良在粉土改良微观机制的基础上主要有以下两方面的增强:

(1) 石灰与膨胀土作用机制:石灰对膨胀土的化学改良作用是通过离子交换作用、碳酸化作用、结晶作用和灰结作用等实现的。

(2) 粉土改善颗粒级配和孔隙特征:粉土对膨胀土的改良作用主要体现在换土作用和改变土体孔隙结构上。①粉土中石英、钾长石、钠长石等碎屑矿物逐渐代替了膨胀土中的蒙脱石、高岭石等亲水性黏土矿物,导致膨胀土中亲水性矿物含量下降。②粉土掺入使得膨胀土整体面孔隙度减小,膨胀土压实特性提高;由黏土颗粒相互镶嵌形成的缝隙状小孔隙(粒间孔隙)逐渐减小,粉土掺量较多时由粉土粗颗粒骨架形成的架空孔隙增多,因而一定程度上提供了填充在粗颗粒骨架中的亲水性黏土颗粒遇水胀缩变形的变形空间,并且粗颗粒骨架提供的摩擦力抵消部分了膨胀力也提高了土体强度。

在合理掺量的粉土和石灰联合作用下,膨胀土中亲水性黏土颗粒相对含量显著下降。粉土和石灰综合了物理改良和化学改良的优点,更好地改善了膨胀土的工程性质。

3.4.4 压实度

联合改良土试验段和石灰改良对照段的 94 区检测点压实度检测结果如表 7 所示。由表可知,94 区试验段和对照段整体压实质量较好,但存在个别检测点压实度低于 94%。联合改良土试验段和石灰改良土对照段的 94 区压实度检测结果值域统计分布如图 12 所示。从图中可以看出,94 区试验段压实度检测结果占比最高的在 94%~95%,对照段在 95%~96%,就 94 区试验段 170 m 和对照段 80 m 的施工而言,对照段的压实效果较好。

填筑路段内存在少部分未达到压实度要求的测点,其主要原因如下:

(1) 根据前期试验可知,联合改良土最大干密度在粉土掺量 40%时达到峰值;当粉土掺量低于或高于 40%时,改良土的压实特性均有所减弱。在拌和过程中,个别检测点粉土掺量未处于 40%这一最佳掺量,导致在相同碾压条件下压实度未达到 94%,因此,在碾压施工前掺入粉土应该进行充分翻拌,以提高联合改良土的混合均匀程度。

(2) 在填筑碾压过程中,由于填料含水率过高,

表 7 94 区压实度检测结果
Table 7 Test results of compaction degree in area 94

路段类型	路基层位	压实度/%												均值/%
试验段	94-1 层	94.4	94.6	94.1	92.7	95.0	94.2	94.6	93.4	96.2	95.6	97.1	94.6	94.7
	94-2 层	95.4	95.6	97.2	95.6	94.5	96.1	93.7	95.2	95.7	94.5	95.0	94.6	95.3
	94-3 层	94.6	96.5	94.3	93.1	94.7	94.8	95.9	94.4	95.2	94.6	97.5	94.8	95.0
	94-4 层	95.8	96.4	94.8	94.6	96.3	95.3	95.8	95.9	94.9	93.5	92.5	95.3	95.1
对照段	94-1 层	96.5	95.2	97.6	94.3	94.9	96.7	95.3	92.9	—	—	—	—	95.4
	94-2 层	96.1	95.7	94.5	94.3	95.1	96.5	97.4	95.9	—	—	—	—	95.7
	94-3 层	94.6	96.6	95.9	95.7	94.9	93.6	94.5	95.3	—	—	—	—	95.1
	94-4 层	95.9	95.1	93.3	97.3	95.5	96.7	94.4	96.3	—	—	—	—	95.6

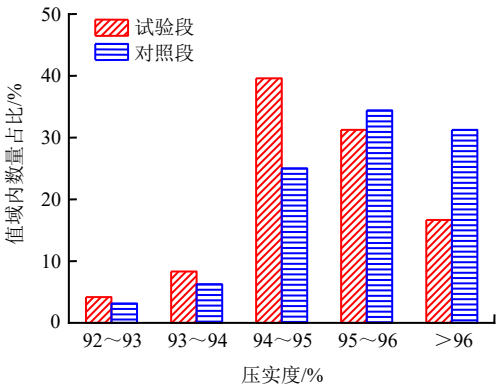


图 12 压实度检测结果值域分布
Fig.12 Distribution of measured compaction values

土颗粒间的挤密受到土体中自由水的阻碍，进而导致压实困难未达到要求，因而在碾压前控制填料含水率是十分必要的。

(3) 在实际工程检测中，测点的最大干密度是根据灰剂量检测结果间接计算确定的。当测点灰剂量偏低时，最大干密度数值偏高，计算所得压实度也相应偏低。

根据《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1—2017) [24] 中第 4.1.2 条规定的压实度检测标准，应根据压实度代表值 K 评定检测路段压实是否合格，以不低于压实度规定值以下 2% 的检测点数为准计算合格率。压实度代表值 K 为

$$K = \bar{k} - t_{\alpha} S / \sqrt{n} \tag{7}$$

式中： K 为路段压实度代表值； $\bar{k}$ 为段内各测点压实度的平均值； t_{α} 为 t 分布表中的系数，高速公路

路基置信度 α 取 95%； S 为压实度标准差； n 为检测点数。

经计算，试验段和对照段各层的压实度代表值见表 8。压实度代表值均大于设计值，路段压实度合格，检测点的合格率均达到 100%。

表 8 94 区压实度代表值 (单位：%)
Table 8 Representative values of compaction degree in area 94 (unit: %)

试验段				对照段			
94-1 层	94-2 层	94-3 层	94-4 层	94-1 层	94-2 层	94-3 层	94-4 层
94.1	94.8	94.4	94.5	94.4	95.0	94.5	94.7

3.4.5 路基 CBR 值

联合改良土试验段和石灰改良对照段的路基 CBR 值试验结果见表 9。由表可得，粉土石灰联合改良膨胀土试验段路基 CBR 值的平均值为 43.9%，高于石灰改良膨胀土对照段路基 CBR 值的平均值 39.7%。尽管联合改良土试验段的石灰掺量减少了 2%，但粉土的物理改良作用不仅弥补了 2% 的石灰提供的路基强度，而且联合改良膨胀土的路基强度高于仅掺加较高掺量石灰改良膨胀土路基强度。联合改良土试验段各试验点路基 CBR 值标准差为 6.25%，小于石灰改良土对照段各试验点路基 CBR 值标准差 8.07%。这是由于粉土石灰联合改良膨胀土路基施工时采用二次拌和的施工工艺使得粉土石灰联合改良膨胀土试验段路基各材料之间拌和均匀程度高于石灰改良膨胀土对照段路基，表明粉土石灰联合改良膨胀土在工程实践中获得了更好的应用

表 9 路基 CBR 值试验结果
Table 9 Subgrade CBR value test results

路段类型	路基层位	CBR 值/%												平均值/%	标准差/%
试验段	94-1 层	47.8	43.6	42.1	36.3	45.1	44.9	45.8	51.1	51.4	49.7	49.1	37.5	43.9	6.25
	94-4 层	38.2	45.1	43.6	51.1	43.8	36.0	34.8	45.8	55.2	44.9	27.2	42.6		
对照段	94-1 层	28.7	31.7	33.2	34.7	36.2	39.2	37.7	37.7	—	—	—	—	39.7	8.07
	94-4 层	42.1	43.6	30.2	54.1	51.1	36.2	57.1	42.1	—	—	—	—		

效果。

将联合改良土试验段和石灰改良土对照段路基 CBR 值域进行统计,得到 CBR 值域分布见图 13。由图可以看出,对照段与试验段路基 CBR 值分布范围相近,均处在 25%~60%之间,远远满足规范对高速公路路基的 CBR 强度要求。对照段 CBR 值集中在 30%~35%和 35%~40%,分别占比 25%和 31.25%;而试验段 CBR 值集中在 40%~45%和 45%~50%,均占比 29.17%。还可直观地看出,40%粉土占比与 3%石灰掺量联合作用下,大部分试验点路基 CBR 值明显高于单掺 5%石灰的改良膨胀土。

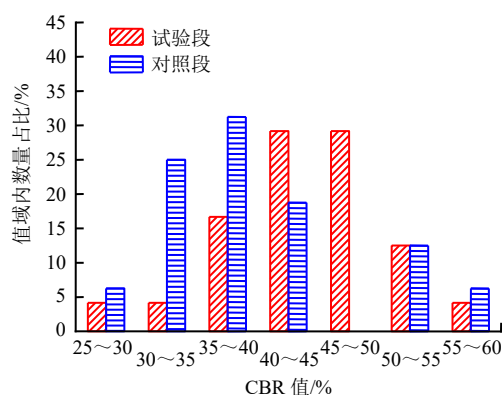


图 13 路基 CBR 值域分布

Fig.13 Distribution of subgrade CBR value

3.4.6 弯沉值

通过贝克曼梁法检测联合改良土试验段和石灰改良对照段的各车道弯沉值,如图 14 所示。由图可知,94 区顶面联合改良试验段路基弯沉平均值为 93.24(0.01 mm),石灰改良对照段为 92.93(0.01 mm),数值接近。两路段搭接处(桩号 K121+600)附近检测点弯沉值较高,且离散性较大。这是由于在两路段搭接处可能出现因施工机械作用不充分导致路

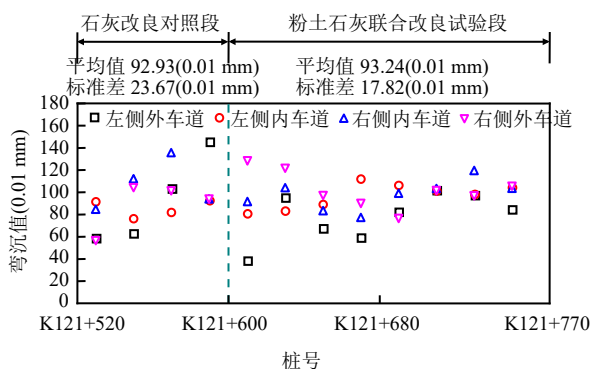


图 14 路基顶面弯沉值检测结果

Fig.14 Deflection test results of subgrade surface

基填料组分掺配比例失调、灰剂量分布不均等影响路基承载力的问题。粉土石灰联合改良膨胀土作路基填料时路基承载能力达到了设计要求。

4 结 论

(1) 掺入粉土可有效改良膨胀土的胀缩特性。当粉土占比达到 30%时,弱膨胀土转化为非膨胀土,随着粉土占比从 0%增至 50%,改良土的自由膨胀率、无荷膨胀率和 50 kPa 有荷膨胀率、线缩率和胀缩总率均显著下降。表明粉土不仅改变了土体的颗粒成分,抑制了膨胀土的膨胀潜势,还增大了土体的孔隙率,增加了土体内部水分流失。

(2) 随着粉土占比的增加,改良土的最大干密度先增大后减小,在粉土占比为 40%时达到峰值;无侧限抗压强度略微增大后减小,在粉土占比为 10%时达到最大值;CBR 值随粉土掺量的增加而增大,且在粉土占比达到 20%以上时,满足规范要求。表明掺入少量粉土可以提高膨胀土的密实性,增大密实度,降低孔隙率,此时粉土提供了内摩阻力,而当粉土占比过多时,土体颗粒级配发生变化,孔隙率增大,土体黏聚力较低。

(3) 膨胀土素土以粒状和单片状颗粒为主,大颗粒较少,粉土改良膨胀土以薄片状和单粒状膨胀土颗粒中夹杂粉土粗颗粒,表明粉土能够改变膨胀土土体结构,减少膨胀性矿物颗粒,进而降低膨胀土胀缩潜势。

(4) 现场填筑试验段和对照段各层压实度平均值和代表值均达到了设计值,检测点合格率均达 100%,压实效果较好,但对于联合改良试验段,由于压实度控制指标最大干密度取值较大,检测点压实度受粉土均匀程度影响而降低,施工时应更应注意碾压遍数和质量。试验段和对照段灰剂量检测结果修正后均达到了设计值。

(5) 现场试验段路基 CBR 值平均值高于对照段,检测点路基 CBR 值多集中在 40%~50%,远远高于规范要求,粉土的物理改良作用有效弥补了相对于对照段减少的 2%石灰提供的路基强度。试验段和对照段路基顶面弯沉值均小于设计弯沉值,粉土石灰联合改良膨胀土作路基填料时路基承载能力达到了设计要求。

参 考 文 献

- [1] 王保田, 张福海. 膨胀土的改良技术与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

- WANG Bao-tian, ZHANG Fu-hai. Improvement technology and engineering application of expansive soil[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [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. Foundation treatment technology development and prospects[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004.
- [3] 黄震, 陈铖. 改良膨胀土胀缩裂隙及与抗剪强度的关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 87-93.
- HUANG Zhen, CHEN Cheng. A study of the swelling shrinkage cracks of the modified expansive soil and its relationship with the shear strength[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2016, 43(3): 87-93.
- [4] 符策岭, 曾召田, 莫红艳, 等. 石灰改良膨胀土的工程特性试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(2): 524-533.
- FU Ce-ling, ZENG Zhao-tian, MO Hong-yan, et al. Experimental study on the engineering characteristics of the improved expansive soils with lime[J]. **Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)**, 2019, 44(2): 524-533.
- [5] 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 Jun, LIU Zi-hao, ZHANG Guo-dong, 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.
- [6] 王小芳. 干湿循环下石灰改良膨胀土路堤离心模型试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- WANG Xiao-fang. Centrifuge model test on lime modified expansive soil roadbed under wetting-drying cycles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [7] OSULA D. A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite[J]. **Engineering Geology**, 1996, 42(1): 71-81.
- [8] GUNEY Y, SARI D, CETIN M, et al. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil[J]. **Building & Environment**, 2007, 42(2): 681-688.
- [9] 杨明亮, 陈善雄, 全元元, 等. 空军汉口新机场试验路段石灰改性膨胀土试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1868-1875.
- YANG Ming-liang, CHEN Shan-xiong, QUAN Yuan-yuan, et al. Experimental research on improved expansive soil with lime in test section of the new Hankou airfield[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(9): 1868-1875.
- [10] LE RUNIGO B, FERBER V, CUI Y J, et al. Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions[J]. **Engineering Geology**, 2011, 118(1-2): 20-28.
- [11] 张继伟, 汪时机, 骆赵刚. 膨胀土裂隙演化规律及掺砂改良效果试验研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(8): 176-184.
- ZHANG Ji-wei, WANG Shi-ji, LUO Zhao-gang. Experimental study on crack evolution law of expansive soil and improvement effect of sand mixing[J]. **Journal of Southwest University (Natural Science Edition)**, 2022, 44(8): 176-184.
- [12] 杨俊, 黎新春, 张国栋, 等. 风化砂不同掺入率对膨胀土特性影响的研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(1): 55-60.
- YANG Jun, LI Xin-chun, ZHANG Guo-dong, et al. Research on the influence on expansive soil characteristics by different mixing rates of weathered sand[J]. **Industrial Construction**, 2013, 43(1): 55-60.
- [13] 杨俊, 袁凯, 狄先均, 等. 天然砂砾改良膨胀土力学指标试验及模型分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2016, 37(3): 359-366.
- YANG Jun, YUAN Kai, DI Xian-jun, et al. Experiment and mathematical model on mechanical properties of natural gravel improving expansive soil[J]. **Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)**, 2016, 37(3): 359-366.
- [14] 杨俊, 童磊, 张国栋, 等. 干湿循环对风化砂改良膨胀土无侧限抗压强度的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(4): 532-536, 556.
- YANG Jun, TONG Lei, ZHANG Guo-dong, et al. Wet and dry cycle effects on unconfined compressive strength of weathered sand improved expansive soil[J]. **Engineering**

- Journal of Wuhan University**, 2014, 47(4): 532-536, 556.
- [15] 杨俊, 黎新春, 张国栋, 等. 不同粒径风化砂改良膨胀土的特性试验[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 42(1): 26-33.
- YANG Jun, LI Xin-chun, ZHANG Guo-dong, et al. Experimental study on characteristics of improved expansive soil by mixing different sizes of weathered sands[J]. **Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)**, 2015, 42(1): 26-33.
- [16] 黄勇杰. 风化砂改良膨胀土动力特性及变形特性研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- HUANG Yong-jie. Research on dynamic characteristics and deformation properties of expansive soil modified by weathered sand[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020.
- [17] 陶飞飞, 申时庵. 石灰改良膨胀土力学性能试验[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2004, 29(2): 154-156.
- TAO Fei-fei, SHEN Shi-an. Mechanical performance experimentation of expansive-soil-amended-by-lime and construction way of commingle[J]. **Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)**, 2004, 29(2): 154-156.
- [18] 阮志新, 蓝日彦, 陈宏飞. 石灰改良膨胀土填筑路基的施工工艺及质量控制[J]. 中外公路, 2012, 32(2): 1-4.
- RUAN Zhi-xin, LAN Ri-yan, CHEN Hong-fei. Construction technology and quality control of lime improved expansive soil filling roadbed[J]. **Journal of China & Foreign Highway**, 2012, 32(2): 1-4.
- [19] 江涛. 沪渝蓉高速铁路合宁段路基膨胀土填料改良试验研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(1): 139-143.
- JIANG Tao. Experimental study on improvement of subgrade expansive soil filler in Hefei-Nanjing section of Shanghai-Chongqing-Chengdu high speed railway[J]. **Railway Engineering**, 2022, 62(1): 139-143.
- [20] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. JTG D30—2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd. JTG D30—2015 Specifications for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communication Press, 2015.
- [21] 交通运输部公路科学研究院. JTG 3430—2020 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Research Institute of Ministry of Transport. JTG 3430—2020 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communication Press, 2020.
- [22] 唐紫琼, 陈加富, 侯爵, 等. 粉土改良膨胀土工程特性试验研究[J]. 地基处理, 2023, 5(2): 113-120.
- TANG Zi-qiong, CHEN Jia-fu, HOU Jue, et al. Experimental study on engineering characteristics of modified expansive with silt[J]. **Journal of Ground Improvement**, 2023, 5(2): 113-120.
- [23] 中交路桥技术有限公司. JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- CCCC Road and Bridge Consultants Co., Ltd. JTG D50—2017 Specifications for design of highway asphalt pavement[S]. Beijing: China Communication Press, 2017.
- [24] 交通运输部公路科学研究院. JTG F80/1—2017 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- Research Institute of Ministry of Transport. JTG F80/1—2017 Inspection and evaluation quality standards for highway engineering section 1 civil engineering[S]. Beijing: China Communication Press, 2017.