

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.008



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



多元固废协同固化低液限粉土路基的配比优选及其力学性能

张可翔¹, 张立师², 王豹², 丁建文¹, 杨铮涛¹

(1. 东南大学交通学院, 南京 210096; 2. 江苏省洪泽湖水利工程管理处, 江苏 淮安 223100)

摘要:为解决低液限粉土路基碾压困难、强度低、水稳定性差等工程缺陷,并寻求传统无机固化材料代替方案,联合高炉矿渣(GGBS)、电石渣(CS)、脱硫石膏(DG)组成复合工业固废改良剂(ISW)对粉土进行改良以用作路基填料。通过击实试验、无侧限抗压强度(UCS)试验与水稳定性试验,探究ISW对低液限粉土力学性能和水稳性能的改良效果。基于试验结果建立适用于多元固废(GGBS-CS-DG)协同固化土体的强度预测经验模型,构建三元固废协同改良下低液限粉土的UCS响应面,并提出了ISW的最优配比(14.88%GGBS+5.96%CS+2.26%DG)。结果表明,固废改良土具备良好的路用性能,其力学性能和水稳性能随养护龄期的增大而显著提升,在28d龄期时固废改良土强度和水稳定性与同掺量水泥改良土基本相当。低液限粉土经GGBS-CS-DG联合固化后具有良好的路用力学性能,可作为路基填料使用。

关键词:低液限粉土;多元工业固废;强度预测模型;响应面法;路用性能

中图分类号:TU472.5 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Optimal proportion and its mechanical properties of low liquid limit silt stabilized by multi-source solid waste

ZHANG Kexiang¹, ZHANG Lishi², WANG Bao², DING Jianwen¹, YANG Zhengtao¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China; 2. Jiangsu Hongze Lake Water Conservancy Project Management Office, Huaian 223100, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: To address the engineering defects of low liquid limit silt subgrade, such as difficult rolling, low strength, poor water stability, and to seek the alternative of traditional inorganic curing agent, this paper combined with blast furnace slag (GGBS), carbide slag (CS), desulfurization gypsum (DG) to form a composite industrial solid waste (ISW) to improve the silt for subgrade filling, and carried out compaction test, unconfined compressive strength (UCS) test and water stability test, to explore the improvement effect of ISW on the mechanical properties and water stability of low liquid limit silt. Based on experimental results, an empirical

收稿日期:2025-11-28

基金项目:国家自然科学基金(52378330);江苏省水利科技项目(编号:2024014)

作者简介:张可翔(2000-),男,硕士,主要从事工业固废资源化利用研究,E-mail:220233259@seu.edu.cn。

丁建文(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:jwding@seu.edu.cn。

Received: 2025-11-28

Foundation items: National Natural Science Foundation of China(No. 52378330); Jiangsu Water Conservancy Science and Technology Project (No.2024014)

Author brief: ZHANG Kexiang(2000-), PhD, main research interest: resource utilization of industrial solid wast, E-mail: 220233259@seu.edu.cn

DING Jianwen (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: jwding@seu.edu.cn.

model for strength prediction of multi-source solid waste(GGBS-CS-DG) improved soil was established, the response surface of UCS of low liquid limit silt under ternary ISW improvement was constructed, and the optimal ratio of ISW (14.88% GGBS+5.96% CS+2.26% DG) was proposed. On this basis, it is proved that the ISW improved soil has great road performance, and its mechanical properties and water stability are significantly improved with the increase of curing age. At 28 days, the strength and water stability of the ISW improved soil are basically equivalent to that of the cement improved soil with the same dosage. The low liquid limit silt solidified by GGBS-CS-DG can be used as subgrade filler.

Keywords: low liquid limit silt; multi-source industrial solid waste; strength prediction model; response surface methodology; road performance

粉土填筑路基存在承载能力低、施工碾压困难、边坡易冲刷流失等缺陷,因此须采取改良措施提升粉土的物理力学性能,才可将其用于公路路基等工程^[1]。固化技术是改良粉土最常用手段之一,具有处理土方量大、成本相对较低等优点^[2]。目前工程上常采用添加高能耗的传统水泥、石灰等方法稳定粉土,这会导致不可再生资源的大量消耗,以及温室气体(CO₂)的过度排放^[3]。因此,亟须寻找传统固化剂的绿色替代方案。

另一方面,现代化工业体系每年产生大量固体废弃物。这些固废不仅会侵占土地资源,还会引发一系列环保问题。在此背景下,基于工业固废中的有效组分制备土体固化剂,从而实现“以废治废”已成为一个备受关注的研究方向^[4]。根据成分与性质差异,固废固化剂可分为3类,包括提供活性Si、Al氧化物的粉煤灰、矿渣、炉渣、钢渣等,提升固化环境碱性的碱渣、赤泥、电石渣等,以及向固化体系补充SO₄²⁻的磷石膏、脱硫石膏等。在合理配比下多源固废的复合协同效应可有效增强固化改良效果。

高英力等^[5]指出电石渣、脱硫石膏与矿渣3类工业固废的复合固化原理为电石渣内的氢氧化钙提供碱性环境,脱硫石膏提供硫酸根离子,两者共同作用进而激发矿渣硅铝质原料,生成针棒状结构的钙矾石(Aft)晶体及网状结构的水化凝胶相互穿插。郭沁颖等^[6]探明了碱渣、脱硫石膏与石灰复合改良盾构渣土的力学性能、浸水稳定性与耐久性提升显著,固化土可用作路基填料。丁建文等^[7]研究了水泥协同赤泥、磷石膏固化淤泥的力学性状演化规律,分析了赤泥与磷石膏间存在的微观耦合效应。李雪和等^[8]选用矿渣、钢渣、脱硫石膏和普通硅酸盐水泥联合改良黄河冲积粉土,揭示了固化土的最优含水率随固化剂掺量增大而提升的规律。黄伟等^[9]使用钢渣与矿渣微粉改良杂填土,探明固化土强度随龄期提升大幅增长,30 d高温水浴膨胀率仅1.03%。Mujtaba等^[10]发现GGBS固化不同地区膨胀土的强度、承载比均有提升,膨胀性得到有效

抑制。Li等^[11]采用脱硫石膏、钢渣与氢氧化钠激发剂对黏土进行改良研究,结果表明,固化土无侧限抗压强度(UCS)随脱硫石膏掺量提升呈先增大后减小的趋势。Mozejko等^[12]发现钢渣水化产生的碱性环境能够促进粉质黏土内火山灰反应正向进行。

综上可知,将工业固废用作土体改良剂的前景广阔,但现有研究普遍集中于将其仅部分替代水泥、石灰,且改良对象多以淤泥、盾构渣土等高含水率黏性土为主,针对全固废固化改良低液限粉土的研究相对匮乏。笔者选取高炉矿渣、电石渣与脱硫石膏3类功能互补且当地堆存量较大的工业固废,复配成全固废基固化剂以替代传统无机结合料,通过开展室内击实试验、UCS试验与水稳定性试验,构建多元全工业固废(以下简称“多元固废”)改良土强度预测模型,提出复合工业固废改良剂的最优配比,并与传统水泥固化土的改良效果进行对比,以揭示多元固废改良粉土路用性能的影响因素与变化规律。

1 试验材料与试验方案

1.1 试验材料

试验用土取自依托工程江苏泰兴某沿江高速公路路堤施工现场。该工程位于长江下游平原地区,粉土地层广泛分布,项目路基填筑主要采用当地粉土。土样的基本物理化学指标如表1所示。试验测得土体塑性指数为9.7,液限为28.2%,细粒含量为70.6%,黏粒含量为14.0%,参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[13]对土体进行分类,该土样为低液限粉土(ML)。

利用激光粒度仪S3500测得土体级配曲线,如

表1 粉土的基本理化指标

Table 1 Basic physical and chemical indicators of silt

天然含水率/%	最优含水率/%	最大干密度/(g/cm ³)	比重	
17.5	12.2	1.92	2.72	
不均匀系数	曲率系数	液限/%	塑限/%	塑性指数
17.88	0.53	28.2	18.5	9.7

图1所示。X射线衍射试验(XRD)测得土体主要矿物组成如图2所示,由图可知,试验用土晶相组成主要包含石英、超石英、钙长石与石榴石等。X射线荧光光谱试验(XRF)测得土体主要化学成分如表2所示。

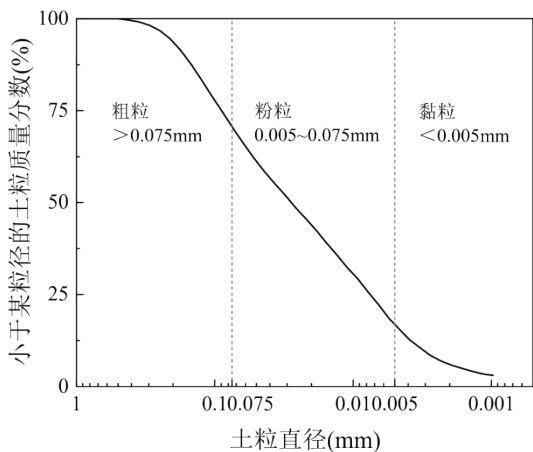


图1 粉土颗粒级配
Fig.1 Particle size distribution of silt

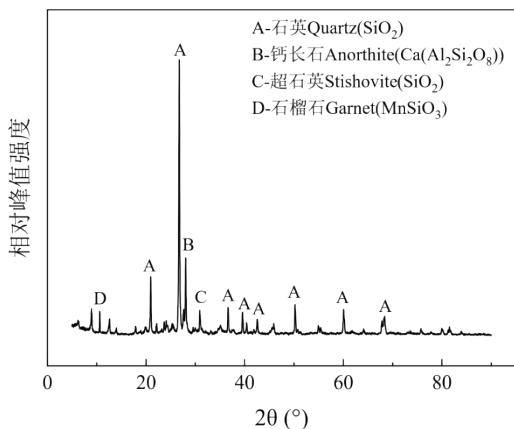


图2 粉土X射线衍射图谱
Fig.2 XRD diffraction pattern of silt

表2 试验材料主要化学成分

材料	Table 2 Main chemical components of test materials					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO
ML	3.28	56.88	13.62	4.34	0.08	2.24
GGBS	40.44	33.58	13.58	0.40	3.08	8.89
CS	89.86	4.80	2.55	0.81	1.34	0.11
DG	45.21	1.65	0.59	0.25	45.52	1.25
OPC	55.63	19.84	5.99	3.87	3.72	1.22

试验所用固化材料包括高炉矿渣(GGBS)、电石渣(CS)、脱硫石膏(DG)与水泥(OPC),经XRF试验测得其主要化学成分如表2所示。

1.2 试验方案

为确定固废固化剂的最优配比,选取GGBS、CS、DG掺量作为自变量,参考文献[7, 14]将各因素

设定为高、中、低3个水平,具体如表3所示。基于三因素三水平设计表,并考虑增加试验组数以提升交互作用分析精度,制定了15组正交试验方案L₁₅(3³),用以探究各固废对改良土强度的具体影响效果。同一龄期每个配比制备3个平行样,样本总数为90,各组试样固化剂掺量见表4。

表3 固废改良土三因素三水平正交试验设计表
Table 3 Orthogonal experimental design table for three factors and three levels of ISW stabilized soil

影响因素	编号	水平		
		1	2	3
GGBS	X ₁	10	13	16
CS	X ₂	4	6	8
DG	X ₃	1	2	3

表4 固废改良土强度筛选正交试验方案
Table 4 Orthogonal experimental scheme for strength screening of ISW stabilized soil

试验组编号	固化材料掺量/%			固化剂总掺量/%
	X ₁	X ₂	X ₃	
1	10	6	1	17
2	10	4	2	16
3	10	6	3	19
4	10	8	2	20
5	13	8	1	22
6	13	4	3	20
7	13	4	1	18
8	13	8	3	24
9-1	13	6	2	21
9-2	13	6	2	21
9-3	13	6	2	21
10	16	6	3	25
11	16	8	2	26
12	16	4	2	22
13	16	6	1	23

注:试验组编号9-1~9-3为配比9组试样的3组平行试验

为研究多元固废改良土体的影响因素以及最优配比下的实际改良效果,以固废掺量、初始含水率、养护龄期为变量,制备多组固废改良试样,并与水泥改良土及素土进行对比,其中水泥掺量参考文献[14-15]确定为6%、10%。为确保不同固化剂种类与掺量下试样制备的科学性,所有试验组均需重新击实并严格按照各配比的最优含水率 ω_{opt} 与最大干密度 ρ_{dmax} 制备试样。试样养护至指定龄期后进行UCS与水稳定性测试,同一龄期每个配比制备6个平行样,总计168个有效样本,具体方案如表5所示。

参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024)^[16]与《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[17]制备试样,具体流程如图3所

表 5 固化土无侧限抗压强度与水稳定性研究方案
Table 5 Research scheme on UCS and water stability of stabilized soil

测试内容	试样编号	固化剂种类	固化剂掺量/%	养护龄期/d
UCS 试验、水稳定性试验	ISW6	工业固废(Industrial solid waste, ISW)	6	3、7、14、28
	ISW10	工业固废(Industrial solid waste, ISW)	10	3、7、14、28
	ISW23	工业固废(Industrial solid waste, ISW)	23	3、7、14、28
	ISW23(H)	工业固废(Industrial solid waste, ISW)	23	3、7、14、28
	OPC6	水泥(Ordinary Portland cement, OPC)	6	3、7、14、28
	OPC10	水泥(Ordinary Portland cement, OPC)	10	3、7、14、28
	Silt	天然粉土,不参加固化剂		3、7、14、28

注:在后续水稳定性试验中,试样编号后缀“N”代表正常养护,后缀“W”代表测试前浸水 24 h。此外,除 ISW23(H)组试样按粉土的天然含水率制备外,其余组试样均按固化土的最优含水率制备。

示。首先,将现场土样摊铺晾晒、过 2 mm 筛去除杂质后,于 60 °C 下烘干并粉碎。随后,将固化剂粉末(除水泥外)与粉土按设计配比干拌,再加入纯净水拌均匀。所有混合料浸润 12 h 后,进行重型击实试验,以获得固化土的最大干密度与最优含水率。制备水泥改良土时,为严格控制水化进程,须在击实

前 1 h 方将水泥加入已浸润的土样中,搅拌 3~5 min。设定试样压实度为 94%,计算混合料用量并分 3 层填入直径、高度均为 50 mm 的试模中,并使用成型脱模一体机顶压成型后脱模。成型试样立即用塑料薄膜密封,置于温度 20 °C±2 °C、相对湿度≥95% 的标准养护室中,养护至预定试验龄期。

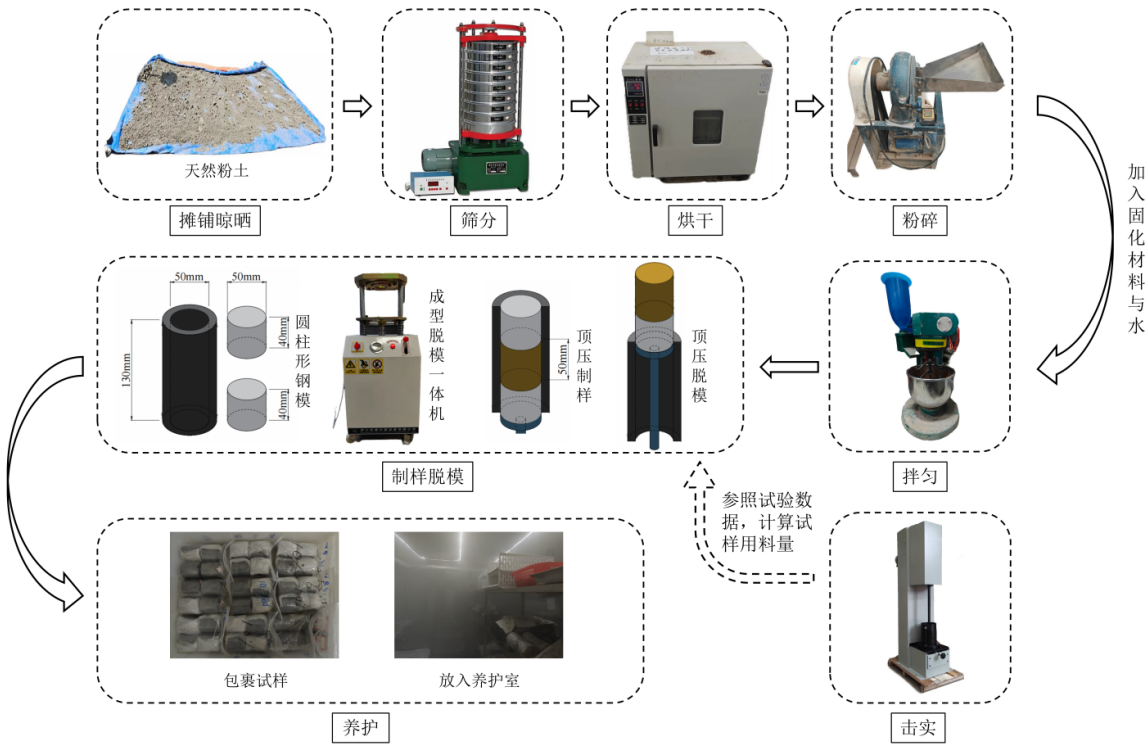


图 3 试样制备与养护流程图

Fig. 3 Flowchart for sample preparation and curing

UCS 测试参考规范《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[18],采用 YSH-2 型应变控制式无侧限压力仪,控制轴向应变速率 1%/min。水稳定性测试选取部分标准养护试样,于测试前一天浸水 24 h,随后测定其强度。通过计算相同龄期和相同配比下浸水试样与标准养护试样的强度之比,得到试样的水稳系数 K 。

2 试验结果与讨论

2.1 固废改良土强度预测模型建立

图 4 为不同配比固废改良土的击实曲线。由图 4 可知,相较于天然粉土,固废改良土的最优含水率显著提升且随固化剂掺量增大呈递增趋势,最大干密度则有所降低。最优含水率提升的核心原因是固废火山灰反应持续进行需要孔隙间充足的自由水作为介质;此外,生成的水化产物比表面积较大,

其毛细孔吸水效应需更高的初始含水率才能保障反应完全。最大干密度下降的原因可归结为两方面:CS、DG 等固化材料比重小于天然粉土,且固废颗粒经破碎后多呈不规则形状,相较于天然粉土的圆形颗粒更难紧密排列,最终导致改良土密实度下降。在 UCS 试验中,为提升后续建模精度,针对 13 组配比中各影响因素均为中水平的配比,额外增设 2 组平行试验。15 组试验的测试结果如表 6 所示。

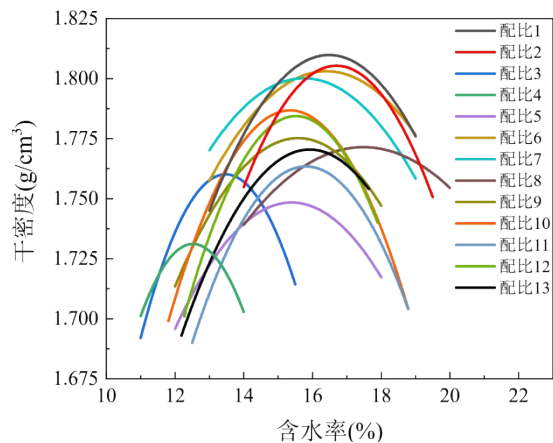


图 4 不同配比固废改良土击实曲线

Fig.4 Compaction curves of ISW stabilized soil with various proportions

基于测试数据,选用二次型函数进行多元回归分析,建立了能够精确表征 GGBS、CS 和 DG 影响效果的改良土 UCS 预测模型,如式(1)所示。

表 7 固废改良土强度模型参数取值

Table 7 Parameter selection for strength model of ISW stabilized soil										
UCS 组别	α_0	α_1	α_2	α_3	α_{11}	α_{22}	α_{33}	α_{12}	α_{13}	α_{23}
S_{UC1}	-7.51	0.51	1.34	1.49	-0.024	-0.12	-0.40	0.018	0.043	-0.048
S_{UC2}	-8.98	1.71	0.59	1.15	-0.071	-0.082	-0.29	0.042	0.061	-0.089

引入统计学中常用的显著性概率(P 值)、 F 检验统计量(F 值)、调整 R^2 与预测 R^2 概念对预测模型及其各分项进行显著性分析与拟合效果检验。值得注意的是,当检验数据的 F 值较大且 P 值 $\ll 0.05$ 时,可认为该检验数据的显著性水平较高,反映整体模型结构或各分项系数的设置合理。此外,还计算了整体模型的失拟 P 值和失拟 F 值,反向论证预测结构的可靠性,失拟 P 值 >0.05 代表无充足模型结构错误证据。另一方面,决定系数 R^2 被用于衡量模型预测值与实际试验数据的重合度,调整 R^2 越接近 1,且预测 R^2 与调整 R^2 的数值越接近,说明模型可解释的变异比例更大,具备更好的预测能力。表 8 显示模型应用于 7 d 和 28 d 养护龄期 UCS 试验数据时的 P 值都为 0.000 4, F 值则分别为 38.22 和

表 6 固废改良土击实试验结果与无侧限抗压强度

Table 6 Experimental results of compaction and UCS of ISW stabilized soil

试验组 编号	击实试验结果		不同养护龄期 UCS/MPa	
	$\rho_{dmax}/(g/cm^3)$	$\omega_{opt}/\%$	S_{UC1-7d}	$S_{UC2-28d}$
1	1.81	16.48	1.36	5.15
2	1.81	16.70	1.22	5.42
3	1.76	13.47	1.45	5.13
4	1.71	12.53	1.27	4.74
5	1.75	15.39	1.46	5.93
6	1.80	16.41	1.50	6.69
7	1.80	15.75	1.07	5.63
8	1.77	17.48	1.50	6.27
9-1	1.78	15.58	2.18	6.78
9-2	1.78	15.58	2.28	6.83
9-3	1.78	15.58	2.31	6.65
10	1.79	15.35	2.19	6.84
11	1.76	15.81	2.15	6.66
12	1.78	15.52	1.66	6.34
13	1.77	15.92	1.59	6.15

$$S_{UC} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^k \alpha_{ii} X_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i < j}}^k \alpha_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

式中: S_{UC} 为固废改良土无侧限抗压强度模型预测值; α_0 为偏移项; α_i 为线性偏移系数,对应 GGBS、CS、DG 对强度的核心功能贡献; α_{ii} 为二阶偏移系数,对应固废过量参加对强度的负面影响; α_{ij} 为交互作用系数,对应固废间协同作用强度。各系数的具体取值如表 7 所示。

42.00。表明模型整体的模拟精度高,满足显著性要求^[19]。而模型失拟 F 值接近 1,失拟 P 值则大于 0.05,反映模型结构合理,预测偏差主要来源于随机误差^[14]。此外,模型的调整 $R^2>0.8$,且预测 R^2 与调整 R^2 间差值 ≤ 0.2 ,证明模型拟合效果理想,解释力强,预测能力良好。

图 5 对比分析了所有配比条件下 UCS 预测值

表 8 固废改良土强度模型性能评估分析

Table 8 Performance evaluation and analysis of strength model for ISW stabilized soil

养护龄 期/d	P 值	F 值	失拟 P 值	失拟 F 值	调整 R^2	预测 R^2
7	0.000 4	38.22	0.37	1.88	0.82	0.96
28	0.000 4	42.00	0.27	2.85	0.83	0.96

与实测值间的偏差。可以发现,7 d和28 d养护条件下 UCS 的预测值与实测值间的偏差均小于10%,直观地反映了预测模型的正确性和可靠性。各分项与 UCS 的显著性水平分析如表9所示。可以发现,单因素项($X_1, X_2, X_3, X_1^2, X_2^2$ 和 X_3^2)的 P 值远小于双因素耦合项影响(X_1X_2, X_1X_3 和 X_2X_3),而 F 值则远大于双因素耦合项影响,表明单因素项影响的显著性远超双因素耦合项,反映 GGBS、DG 和 CS 的协同作用相对较小,其对 UCS 的强度贡献相对独立。此外,在7 d和28 d养护龄期下, X_1 项对模型的显著性水平均远高于 X_1^2 项,表明 GGBS 对 UCS 的贡献主要呈现为线性趋势; X_2 项对模型显著性水平则低于 X_2^2 项,表明 CS 项对 UCS 的贡献或主要为二次项形式。DG 的影响机制相对复杂,7 d龄期下表现为 X_3^2 项的显著性水平高于 X_3 项,而在28 d龄期时, X_3 项的显著性水平却高于 X_3^2 项,这可能与 DG 对改良土影响机制随养护时间改变有关。

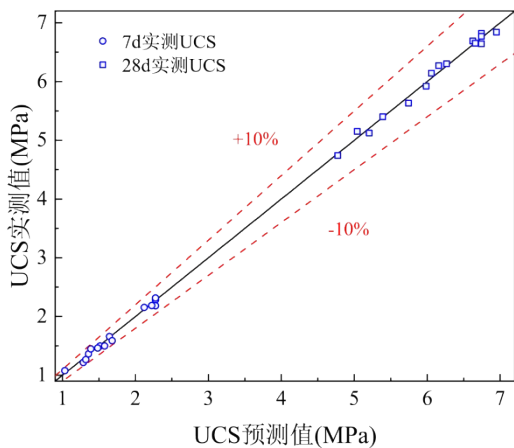


图5 固废改良土强度模型预测误差分布图

Fig.5 Error distribution diagram of ISW stabilized soil strength model

表9 固废改良土强度模型各分项显著性分析

Table 9 Significance analysis of each sub-item in the strength model of ISW stabilized soil

分项	7 d 养护龄期		28 d 养护龄期	
	P 值	F 值	P 值	F 值
X_1 项	0.000 2	90.87	<0.000 1	209.24
X_2 项	0.012 0	14.99	0.030 0	13.32
X_3 项	0.005 0	22.78	0.002 8	29.71
X_1^2 项	0.005 0	22.87	0.000 3	83.84
X_2^2 项	0.000 1	114.56	0.005 5	21.81
X_3^2 项	0.000 3	82.33	0.009 3	16.81
X_1X_2 项	0.048 0	6.76	0.013 0	14.01
X_1X_3 项	0.030 0	9.03	0.043 0	7.32
X_2X_3 项	0.074 0	5.08	0.047 0	6.92

引用现有文献中 GGBS、CS、DG 三类固废联合改良全尾砂^[5]和黏土^[14]的试验数据,结合试验固废

改良粉土实测数据,对式(1)所示模型进行普适性验证。运用 Python 拟合对应的模型分项系数,计算各数据点的标准化残差,并对残差开展 Shapiro-Wilk 正态性检验与 Durbin-Watson 独立性检验,结果如图6、表10所示。不同配比的3类改良土养护7 d和28 d后的 UCS 标准化残差均分布于(-2,2)区间内,其残差绝对值小于3,Shapiro-Wilk 检验 P 值>0.05, Durbin-Watson 统计量 D 值位于1.5~2.5范围,满足残差呈正态分布与无显著自相关的独立性假设,表明模型细节拟合合理,无异常点,预测效果理想^[20]。由于模型选取的改良土涵盖了以砂为主的粗粒土至以粉粒/黏粒为主的细粒土,颗粒级配差异较大,主要组成也包括了石英、云母等稳定矿物与高岭石、绿泥石、钠长石等易反应矿物,表明式(1)所示模型对不同类型土体兼具一定的普适性,佐证了模型的可靠性和正确性。

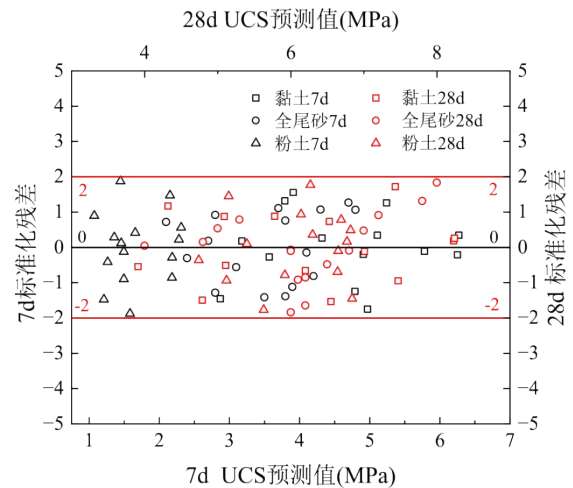


图6 三类固化土预测强度标准化残差分布图

Fig.6 Standardized residual distribution diagram of model prediction strength for three types of stabilized soil

表10 标准化残差分布与独立性检验

Table 10 Standardized residual distribution and independence test

改良土类型	养护龄期/d	Shapiro-Wilk 检验 P 值	Durbin-Watson 检验 D 值
粉土	7	0.441 2	1.983
	28	0.345 8	2.012
全尾砂 ^[5]	7	0.672 1	1.897
	28	0.312 4	1.925
黏土 ^[14]	7	0.301 7	2.056
	28	0.423 5	1.918

式(1)所示模型及其各分项经 P 值、 F 值检验与 R^2 分析,且经现有文献中数据验证,已证明其结构合理可靠,且预测效果理想,是描述 GGBS、CS 和 DG 三类固废联合改良土体后强度发展的有效模

型。但模型的建立基于核心假设条件:受岩土材料地域性和变异性影响,当土体矿物成分、颗粒级配与本试验差异显著时,模型回归系数需重新标定;固化土样养护环境为标准温湿度,不考虑干湿交替等长期服役工况对强度的衰减影响。此外,模型仍存在一定局限性:模型为确保预测精度在一定程度上复杂化了结构形式,牺牲了模型在工程应用过程中的简易性;固废掺量适用范围限于10%~30%,超出该区间时预测精度可能下降。但为详尽了解GGBS、CS和DG对多元固废改良土的影响效果及探究最优配比,仍以式(1)所示模型结构展开讨论,并基于此构成合理响应面对影响效果进行详细分析。

2.2 各固废影响机理与ISW最优配比

2.2.1 各固废影响机理分析

图7为基于式(1)所示预测模型构建的7 d和28 d养护龄期下双因素对UCS交互作用的响应面图,每组响应面图均控制第3影响因素保持中间水平。由图7可知,各响应曲面中响应值随双因素水平提升均出现先增大后减小的抛物线趋势,每组响应面图均存在最优配比。对该现象进行分析:当GGBS处于较低水平时,提升其掺量可提供更多的活性硅铝氧化物参与反应,从而生成更多的水化产物,有效胶结土粒并填充孔隙,促使固化土强度持续增长^[14]。然而,当GGBS过量掺入时,由于缺乏足量的 OH^- 与 SO_4^{2-} 进行反应,多余的GGBS会以惰

性填充物形式存在。这不仅会打破粉土的颗粒级配,导致固化土密实度下降,也令颗粒间缺乏胶结,宏观表现为UCS降低。

针对CS掺量的影响效果,当CS水平较低时,其掺量增加可电离更多 OH^- ,促进黏土矿物溶解释放 Si^{2+} 、 Al^{3+} ,激发火山灰反应加速进行,同时未溶解的六方片状氢氧化钙(CH)晶体也可填充土骨架内微小孔隙,提升整体UCS^[21]。但过量掺入的CS导致析出的CH晶体持续堆积并形成力学薄弱区,且CH遇水膨胀,在土体内产生拉应力进而形成微裂隙。此外,过量CH对后期火山灰反应同样具有抑制作用,加之初期水化产物在局部过度生成导致结构均匀性下降^[22],双重效应叠加导致固化土UCS大幅下降。

DG的掺入同样可能产生过犹不及的影响效果,当DG掺量较低时,适当提升其掺量可令 SO_4^{2-} 溶解释放,并反应生成微膨胀的针状AFt晶体,能够有效填充颗粒间孔隙^[23]。随着DG掺量的提高,早期形成的密实硬化结构会对AFt产生约束作用。在有限空间内持续生成的AFt晶体会膨胀产生巨大内应力,当应力超过固化土承受能力时,便会诱发大量微裂缝产生,导致UCS显著降低。

为验证提出的“火山灰反应生成水化产物”与后续推论,对天然粉土与28 d龄期的改良土进行SEM测试,结构如图8所示。由图8放大20 000倍的衍射图谱可知,相较于素土,改良土内生成了大

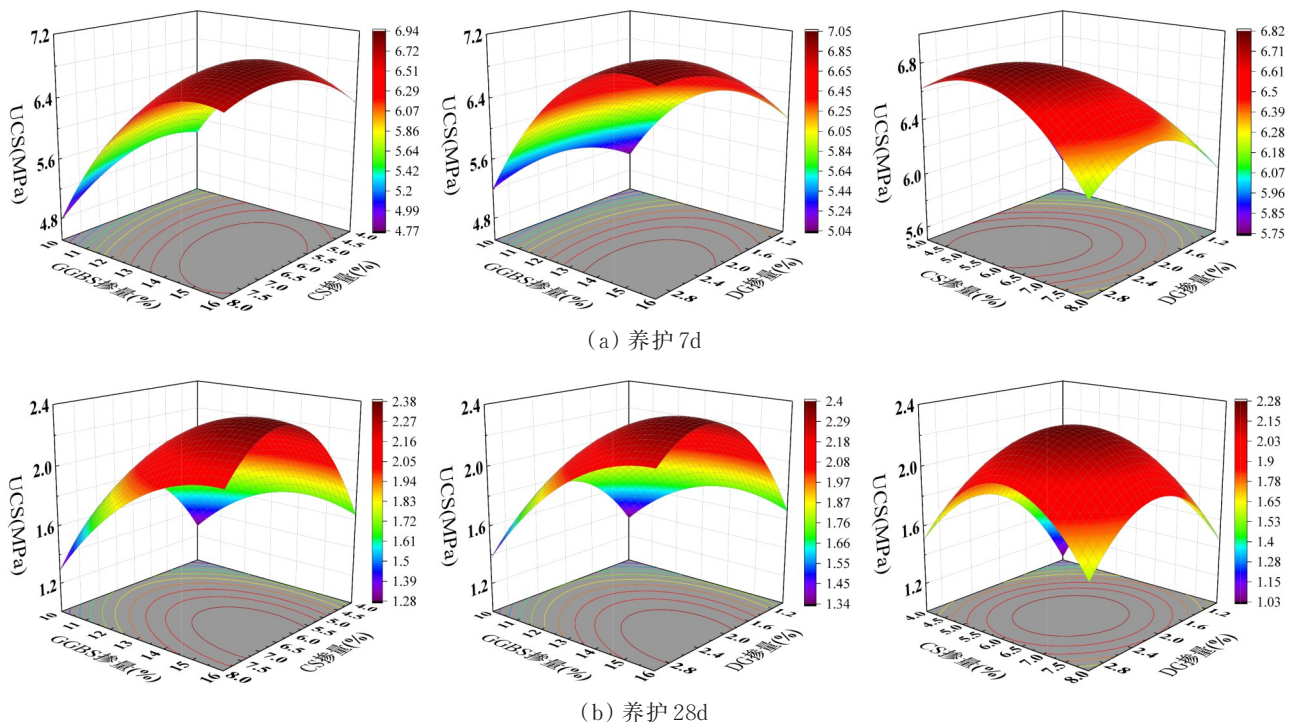
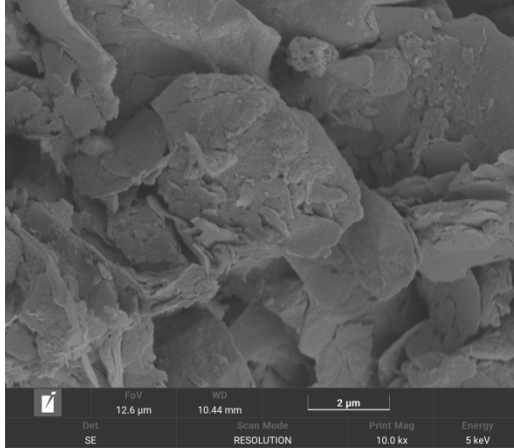


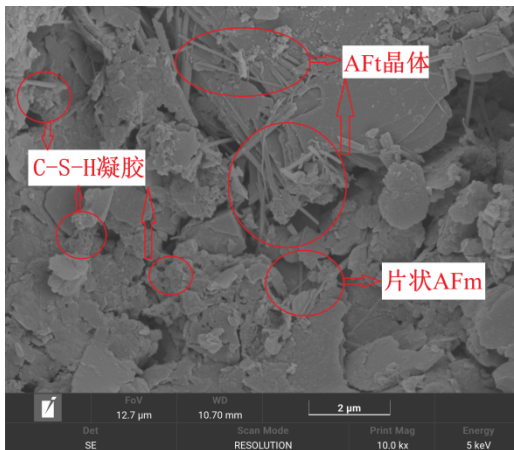
图7 双因素交互作用下无侧限抗压强度响应面

Fig.7 UCS response surface under the action of two factors

量的刚性水化产物,包括三维网状交织的C-S-H凝胶、簇状/放射状分布的AFt晶体棒、片状堆叠的AFm晶体以及絮状C-A-H晶体等,试样孔隙基本被全部填充,团聚体间无明显间隙,结构体致密,验证了水化产物通过“化学胶凝+物理填充”充填孔隙进而密实土体的机理。



(a) 素土



(b) 固废改良土

图8 SEM扫描电镜图

Fig.8 SEM scanning electron microscope image

GGBS、CS和DG均存在掺入的适宜区间,盲目增加掺量不仅会增加工程费用,而且可能对固废改良土的力学性能产生过犹不及的影响效果。因此,探究3类固废联合掺入时的掺料比例具备重要研究意义和工程价值。

2.2.2 ISW 最优配比确定与验证

由UCS响应面结果可知,固废三因素在两两交互作用下均存在峰值,理论上GGBS、CS与DG间应存在最优配比令改良土的改良效果达到最佳^[19]。因此,以UCS作为改良土改良效果的评价指标^[24],运用Design Expert软件对GGBS、CS、DG掺量进行优化,搜寻两组函数模型的UCS峰值,结果如表11所示。为验证理论最优配比,采用该配比的固废

固化剂再次制备改良土试样,并开展UCS试验。鉴于28d养护龄期下模型整体及各分项系数经 P 值和 F 值检验时所表现的显著性水平对比更加明显,因此,选择28d养护龄期组别作为的固废最优配比探究的试验数据。结果表明,当GGBS、CS和DG的掺入质量比分别为14.88%、5.96%和2.66%时,固废改良的UCS达到最大,即改良效果最为优越。该质量比固废改良土养护28d后试样UCS实测值为7.11 MPa,高于此前试验工况下的15组改良土。此外,最优配比下的试样UCS实测值与预测值间相对误差仅为0.9%,表明建立的预测模型以及所构建的响应面均有效可靠,最优配比选取无误。

表11 固废改良土无侧限抗压强度预测值与最优配比

Table 11 Maximum UCS prediction and optimal ratio of ISW stabilized soil

养护龄期/d	固化剂掺量/%			预测 UCS _{max} /MPa
	GGBS-X ₁	CS-X ₂	DG-X ₃	
7d	15.44	6.38	2.29	2.41
28d	14.88	5.96	2.26	7.05

2.3 养护龄期、掺量与初始含水率对改良土力学性能的影响

图9为不同龄期下改良土与素土的UCS与水稳定性变化情况(其中固废改良土均采用最优配比)。由图9可知,改良土强度相比素土得到了大幅度提升。由图9(a)可知,所有固废改良土试样UCS均随养护龄期增长而显著提升,且后期强度增长率未出现明显衰减,这主要得益于火山灰反应的持续进行。不同固废掺量的改良土随养护龄期的强度增幅有所差异,3d至28d养护龄期下,强度增幅排序为ISW23(H)组>ISW23组>ISW10组>ISW6组,具体增幅分别为792.3%、440.0%、312.7%、179.2%,说明改良土强度增幅随固废掺量的提升显著增长。

图9(b)为素土和水泥改良土在不同养护龄期下的强度发展趋势。由图9(b)可以发现,素土随养护龄期增长强度基本保持不变。与水泥改良土相比,固废改良土前期强度增长速率相对较慢,3d和7d养护龄期下固废改良土的强度低于水泥改良土,其强度约为水泥改良土的1/2。但该强度指标已满足《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)^[25]中此类无机结合料稳定土用作最高等级高速公路路基填料的7d龄期UCS最低要求(基层及底基层 ≥ 1.1 MPa)。从工程施工角度分析,该早期强度可保障路基层填筑过程中的机械通行、分层压实进度与临时承载需求,不会因强度不足导致施工停滞或压实质量不达标。而随着养护龄期的增长,达到28

d时,相同掺量下的固废改良土则与水泥改良土强度相差无几。进一步提高固废掺量条件下,其在14 d和28 d下的UCS甚至反超水泥改良土,这表明固废改良土能够有效解决粉土强度低的工程缺陷。值得一提的是,固废改良土强度在天然含水率与最优含水率下相差不超过0.55 MPa,因此,天然粉土具备省去现场翻土晾晒等工序的施工潜力,后续路基施工过程可运用固废直接对天然粉土进行改良。但当局部地区粉土天然含水率显著高于最优含水率时,需补充压实度测试或适当调整固化剂掺量,以保障固化土力学性能满足工程标准。

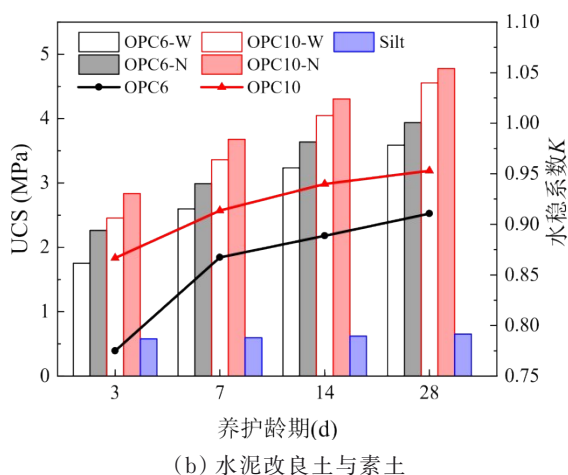
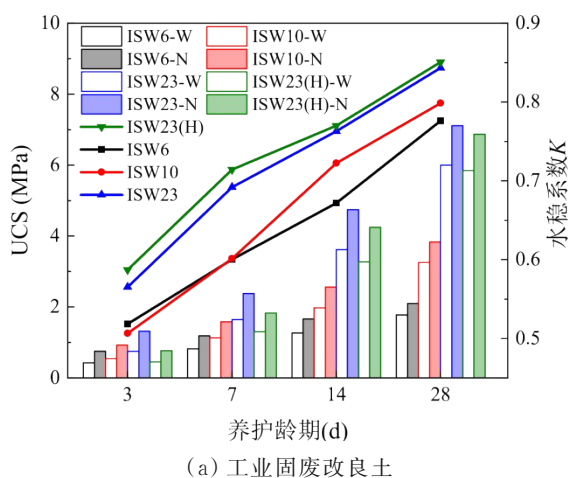


图9 无侧限抗压强度与水稳系数变化图

Fig.9 Variation diagram of UCS and water stability coefficient

同样由图9可知,固废改良土与水泥改良土水稳系数 K 均随掺量与养护龄期增长呈上升趋势,这一规律与水化产物的生成演化密切相关。从改善机制来看,网状C-S-H凝胶形成的致密结构可有效阻断土体内部的透水通道,减少水分侵入对土颗粒胶结体系的破坏;此外,针棒状AFt晶体的微膨胀效应能够填充土颗粒间的孔隙,进一步致密土体结构,降低浸水后的孔隙水压力与颗粒离散风险。二

者协同作用显著减少了改良土浸水后的强度损失。而素土试样因缺乏胶结性水化产物,遇水后颗粒间黏结力迅速丧失,最终发生崩解,不具备水稳能力。固废改良土中ISW23与ISW23(H)组水稳性能最优,水稳系数 K 从3 d至28 d养护龄期中分别由0.57、0.59增至0.84、0.85,而ISW6与ISW10组水稳系数 K 从3 d至28 d养护龄期中分别由0.52、0.51增至0.78、0.80。水泥改良土OPC6与OPC10组水稳系数 K 从3 d至28 d养护龄期中分别由0.77、0.87增长至0.91、0.95。对比固废改良土与水泥改良土,固废改良土虽前期水稳系数 K 小于0.6,低于水泥改良土,但土体抗水侵蚀能力随固化产物持续生成逐步增强,至28 d龄期时浸水强度损失已显著降低,完全能够满足路基填料的水稳定性工程要求^[26]。

2.4 工程应用与效益分析

模型通过响应面法得到的理论最优配比为14.88%GGBS+5.96%CS+2.26%DG,进行配比取整后推荐工程实用配比为15%GGBS+6%CS+2.5%DG,并补充强度测试以验证取整配比的可行性。实测7 d龄期试样UCS分别为2.23 MPa,对比理论最优配比试样相同龄期UCS实测值2.28 MPa,强度损失率小于2%,符合工程可接受损失阈值与早强需求,证明该配比下固废改良土的力学性能仍可满足高速公路路基填料要求,具备较强实操性。此外,为便于材料计量,将取整配比按外掺法换算为工程常用的每立方米土体固废掺加质量。按压实度94%计,每立方米改良土掺加的GGBS质量为255.2 kg,CS质量为102.1 kg,DG质量为42.5 kg。

基于推荐的工程实用配比,开展多元固废与水泥固化剂的经济与环境效益简化对比分析(忽略运输距离差异)。参考2025年地区建材市场调研数据,普通硅酸盐水泥单价约为400元/t,当地堆场简单破碎后的GGBS、CS、DG大批量回收利用单价分别约为80元/t、90元/t、60元/t。按每立方米改良土掺量计算,上述工程实用配比的固废改良土材料成本为32.1元/m³,低于6%掺量水泥改良土材料成本40.8元/m³,有效降低了约21%的路基填筑成本,尤其适用于大规模公路工程。环境效益对比采用生命周期评价(LCA)简化模型,根据中国水泥协会统计数据,水泥行业的碳排放场景主要为燃料排放(化石能源)、过程排放(碳酸盐分解)与间接排放(电力),碳排放强度总计约为850 kg/t,而工业固废碳排放核算场景为简单破碎,碳排放强度约为0.087 kg/t,对比水泥可忽略不计,由此可见多元固

废方案有效控制了碳排放,符合国家绿色基建理念。

3 结论

通过系列击实试验、水稳试验和无侧限抗压强度试验,探究了多元固废改良剂(ISW)对低液限粉土力学性能和水稳性能的改良效果,论证了固废改良粉土用作路基填料的可行性,为依托工程路基的填筑提供了技术指导。主要结论如下:

1)基于多元固废改良的正交试验结果,建立了GGBS-CS-DG三元固废协同改良低液限粉土的强度预测模型;通过分析模型整体和各单项的显著性、拟合度与误差,并经过其他文献数据验证了强度预测模型的可靠性。

2)构建了基于多元固废改良的无侧限抗压强度(UCS)响应面;GGBS、CS和DG对UCS的增益效果均会先增后减,基于此提出了适用于联合改良低液限粉土的最优配比:GGBS:CS:DG=14.88%:5.96%:2.26%。

3)固废改良土的力学性能和水稳性能随养护龄期的增大而大幅提升。对比水泥改良土,其前期提升速率(3 d和7 d)相对较慢,而在28 d养护龄期时的强度和水稳系数与水泥改良土基本相当。低液限粉土经过全固废改良后可作为优质路基填料,以实现工业固废与粉土的协同资源化利用。

参考文献

- [1] 朱志铎. 粉土路基稳定理论与工程应用技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
ZHU Z D. Study on stabilization of silt subgrade: theory and application [D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [2] 汪平太, 邵光辉, 杨智, 等. 石膏钙源微生物固化/稳定化锌污染粉土试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(5): 127-134.
WANG P T, SHAO G H, YANG Z, et al. Experimental investigation on microbial solidification/stabilization of zinc-contaminated silt using gypsum calcium source [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(5): 127-134. (in Chinese)
- [3] CHANG I, IM J, CHO G C. Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering [J]. Sustainability, 2016, 8(3): 251.
- [4] 陈云敏, 施建勇, 朱伟, 等. 环境岩土工程研究综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 165-182.
CHEN Y M, SHI J Y, ZHU W, et al. A review of geoenvironmental engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(4): 165-182. (in Chinese)
- [5] 高英力, 孟浩, 冷政, 等. 电石渣-脱硫石膏复合激发充填材料性能及微观结构[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(3): 99-106.
GAO Y L, MENG H, LENG Z, et al. Properties and microstructure of backfilling material activated by carbide slag and desulfurized gypsum [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(3): 99-106. (in Chinese)
- [6] 郭沁颖, 李白云, 丁建文, 等. 工业废渣改良泥水盾构渣土的路用性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(2): 66-75.
GUO Q Y, LI B Y, DING J W, et al. Road performance investigation of slurry shield tunnel residue improved by industrial waste residues [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(2): 66-75. (in Chinese)
- [7] 丁建文, 万星, 高洪梅, 等. 赤泥磷石膏与水泥协同固化淤泥的力学特性与微观机理[J/OL]. 岩土工程学报. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20250418.1435.002>.
DING J W, WAN X, GAO H M, et al. Mechanical behavior and microscopic mechanism of soft clay stabilized by red mud, phosphogypsum and cement [J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20250418.1435.002>. (in Chinese)
- [8] 李雪和, 杨耀辉, 韦金城, 等. 矿渣-钢渣-脱硫石膏-水泥稳定粉土的强度及固化机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2382-2390.
LI X H, YANG Y H, WEI J C, et al. Strength and solidified mechanism of slag-steel slag-desulfurization gypsum-cement stabilized silt [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(6): 2382-2390. (in Chinese)
- [9] 黄伟, 张毫奎, 张丽, 等. 钢渣-杂填土基层材料配合比优化试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(6): 12-21.
HUANG W, ZHANG M D, ZHANG L, et al. Experimental study on optimization of mix ratio for steel slag-miscellaneous fill base material [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 12-21. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] LI M, WANG Q, YANG J D, et al. Strength and mechanism of carbonated solidified clay with steel slag curing agent [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(3): 805-821.

- [12] MOZEJKO C A, FRANCISCA F M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 239: 117901.
- [13] JTG 3430—2020 公路土工试验规程[S].
JTG 3430—2020 Test Methods of Soils for Highway Engineering [S]. (in Chinese)
- [14] 金胜赫,王修山,吴越鹏. 矿渣-脱硫石膏-电石渣固化剂固化黏土的研究[J]. *工程地质学报*, 2023, 31(2): 397-408.
JIN S H, WANG X S, WU Y P. Study on modification of marine clay treated with new GDC soil stabilizer [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(2): 397-408. (in Chinese)
- [15] 张孝彬. 交通循环荷载作用下公路固化粉土路基力学性质及设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
ZHANG X B. Mechanical properties and design methods of road stabilized silt subgrade under traffic cyclic loading [D]. Nanjing: Southeast University, 2022. (in Chinese)
- [16] JTG 3441—2024 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
JTG 3441—2024 Test Methods of Materials Stabilized with Inorganic Binders [S]. (in Chinese)
- [17] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S].
JTG D30—2015 Specifications for Design of Highway Subgrades [S]. (in Chinese)
- [18] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].
GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method [S]. (in Chinese)
- [19] 张顶飞,吕启航,张鹏,等. 基于响应面法的粉煤灰-电石渣地质聚合物固化软土试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(8): 2821-2829, 2845.
ZHANG D F, LYU Q H, ZHANG P, et al. Experimental study on soft soil solidified by fly ash and carbide slag geopolymer based on response surface method [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(8): 2821-2829, 2845. (in Chinese)
- [20] 刘浩,巴光忠,苗吉军,等. 锈蚀钢筋横截面积分布规律统计分析[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(5): 205-216.
LIU H, BA G Z, MIAO J J, et al. Statistical analysis of cross-sectional area distribution law of corroded reinforcing steel bars [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(5): 205-216. (in Chinese)
- [21] KAMPALA A, HORPIBULSUK S. Engineering properties of silty clay stabilized with calcium carbide residue [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(5): 632-644.
- [22] Shekhovtsova J, Kearsley E P, Kovtun M. Effect of activator dosage, water-to-binder-solids ratio, temperature and duration of elevated temperature curing on the compressive strength of alkali-activated fly ash cement pastes [J]. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 2014, 56(3): 44-52.
- [23] 孔祥辉,梁允鹏,张进港,等. 氧化镁-脱硫石膏-钢渣联合固化疏浚底泥试验研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(12): 61-69.
KONG X H, LIANG Y P, ZHANG J G, et al. Experimental study on dredged sediment solidified with magnesium oxide-desulfurization gypsum-steel slag [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2023, 42(12): 61-69. (in Chinese)
- [24] 肖杰,刘静,向家骏,等. 流态多源固废固化黄土固化剂配比优化及强度形成机理[J]. *中国公路学报*, 2025, 38(3): 250-263.
XIAO J, LIU J, XIANG J J, et al. Optimization of curing-agent mix ratio and mechanism of strength of fluidized multisource solid-waste solidified loesses [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2025, 38(3): 250-263. (in Chinese)
- [25] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S].
JTG D50—2017 Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S]. (in Chinese)
- [26] 张赛,章剑青,尚石磊,等. 南京长江漫滩废弃粉土改良用作路基填料的室内试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(3): 33-40.
ZHANG S, ZHANG J Q, SHANG S L, et al. Laboratory investigation on solidified waste silt from Nanjing Yangtze River floodplain as subgrade filling [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(3): 33-40. (in Chinese)

(编辑 XXX)