

DOI: 10.7672/sgjs2026070140

多元聚合物改良淤泥土试验及应用研究*

周 焯¹, 李东炎¹, 王艳芳², 舒兆翰¹

(1. 核工业湖州勘测规划设计研究院股份有限公司, 浙江 湖州 313000; 2. 金陵科技学院, 江苏 南京 210000)

[摘要] 为改善淤泥土的工程特性,降低其工程危害,开展了多元聚合物改良淤泥土的试验及应用研究。先通过单因素试验确定玄武岩矿粉(MP)、Ca(OH)₂、聚丙烯纤维(PP)改良淤泥土的最优掺量。再利用 Design-expert 软件中的 BBD(Box-Behnken design)响应面法进行多因素试验设计,建立响应面回归模型,探讨 MP-Ca(OH)₂-PP 改良淤泥土工程特性的交叉影响效应,确定 MP-Ca(OH)₂-PP 的最优配合比。试验表明:当 MP : Ca(OH)₂ : PP = 16.95 : 5.68 : 0.25(质量比)时,淤泥土改良效果最佳,无侧限抗压强度(UCS)值最大。UCS 实测均值为 797kPa,响应面模型预测值为 825kPa,二者相差 3.51%,说明响应面模型预测精度高。选取湖州地区路基工程项目进行淤泥土分层分格摊铺,并拌入最优配合比下的 MP,Ca(OH)₂,PP,养护至指定龄期测得改良后的淤泥土路基能满足路用压实设计要求,说明多元聚合物改良淤泥土方案可行。

[关键词] 路基;淤泥土;改良;玄武岩矿粉;聚丙烯纤维;响应面法;试验

[中图分类号] TU43

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0140-07

Experiment and Application of Multi-component Polymer in Muddy Soil Improvement

ZHOU Ye¹, LI Dongyan¹, WANG Yanfang², SHU Zhaohan¹

(1. Nuclear Industry Huzhou Survey, Planning, Design and Research Institute Co., Ltd., Huzhou, Zhejiang 313000, China;

2. Jinling Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

Abstract: To improve the engineering properties of sludge soil and mitigate its engineering hazards, this paper conducts an experimental and application study on the modification of sludge soil using a multi-component composite admixture consisting of basalt mineral powder, calcium hydroxide, and polypropylene fiber. First, single-factor experiments were carried out to determine the optimal dosages of basalt mineral powder (MP), Ca(OH)₂, and polypropylene fiber (PP) for sludge soil modification. Subsequently, the Box-Behnken design (BBD) response surface methodology within the Design-Expert software was adopted for multi-factor experimental design, a response surface regression model was established to investigate the cross-interaction effects of MP-Ca(OH)₂-PP on the engineering properties of modified sludge soil, and the optimal mix ratio of the composite admixture was determined. The experimental results show that the sludge soil achieves the optimal modification effect with the maximum unconfined compressive strength (UCS) when the mass ratio of MP : Ca(OH)₂ : PP is 16.95 : 5.68 : 0.25. The measured average UCS value is 797kPa, while the predicted value from the response surface model is 825kPa, with a relative error of merely 3.51%, indicating the high prediction accuracy of the established model. A field application was implemented in a subgrade engineering project in Huzhou, where the sludge soil was paved in layered and compartmentalized sections, mixed with the MP-Ca(OH)₂-PP composite admixture at the optimal ratio, and cured to the specified age. Test results demonstrate that the modified sludge soil subgrade meets the design requirements for compaction in highway engineering, verifying the feasibility and applicability of the sludge soil modification scheme

* 浙江省自然资源厅科技项目(2024ZJDZ021);湖州市科技攻关计划(2023GS02)

[作者简介] 周 焯,工程师,E-mail:1457770512@qq.com

[通信作者] 王艳芳,教授,E-mail:wyl_02@163.com

[收稿日期] 2025-10-10

using the multi-component composite admixture.

Keywords: subgrade; muddy soil; improvement; mineral powder; polypropylene fiber; response surface method; tests

0 引言

软土具有天然含水量高、压缩性较高、抗剪强度低和透水性较差等特点^[1-2],在荷载作用下容易发生显著沉降,不适合作为天然地基使用,往往要进行工程性质改良,用化学胶凝手段改善其物理力学性质,提高承载力,以消除过量变形及长期变形。常见改良方式为拌入石灰、水泥、粉煤灰^[3-5]等,这些方法因施工简便、施工周期短和固化强度高等优点在国内外得到广泛应用。然而,这些传统胶凝材料的煅烧会消耗大量自然资源并伴随二氧化碳等温室气体的排放,对环境产生巨大影响。

近年来,许多学者进行了大量工业固废材料的试验研究,致力于将工业废料作为石灰、水泥、粉煤灰等的替代材料,应用于淤泥土改良中,以实现资源循环利用与生态环境保护的目标^[6-10]。已有研究表明:将高炉矿渣、钢渣、电石渣、脱硫石膏等附属工业废料,辅以碱激发剂如 NaOH, Na₂SiO₃, Ca(OH)₂ 等制备多元聚合物用于软黏土的工程性质改良,具有原材料易获取、制备过程碳排放低、高强度耐久等优点,且生产 1t 多元聚合物的 CO₂ 排放量约为水泥的 30%,被视为替代水泥的新型绿色胶凝材料^[11-12]。

采用多种工业废渣协同制备多元聚合物用于固化软弱土^[13-14]、膨胀土^[15-16]、盐渍土^[17]、重金属污染土^[18]、红黏土^[19]等逐渐成为岩土工程领域研究热点。叶华洋等^[20]用水玻璃作为激发剂,讨论了激发剂-偏高岭土聚合物对软土固化机制,试验表明淤泥黏土改良后的强度随着碱激发剂的增加先增后减,固化土土体结构比水泥土更为致密。俞家人等^[21]发现碱激发剂掺量的增加对地聚合物固化软黏土的早期强度提升影响显著并建立了地聚合物固化土的强度预测公式。Sahoo 等^[22]通过试验研究发现地聚合物固化土比水泥、石灰固化土表现出更为优异的力学性能和耐久性。Tremblay 等^[23]研究发现有机质释放腐殖酸抑制了水泥水化反应,使得水泥土强度大大降低。张跃明等^[24]开展了地聚合物加固沼泽土、江畔土和田间土的室内试验,发现地聚合物掺量和软土的含水率是影响固化软土强度的两个主要因素。刘旭等^[25]采用赤泥-粉煤灰作为固化材料进行软土加固,该固化剂对软土有一定加固效果,但 28d 强度不超过 2MPa。杨望星

等^[26]认为采用地聚合物部分替代水泥加固软土存在最优配合比。陈瑞敏等^[27]以水泥-矿渣-粉煤灰-石膏作为新型 CSFG 固化剂,研究了 CSFG 与纤维协同固化改良淤泥土的力学特性。境内外学者围绕力学特性、耐久性及微观机理表征等方面对多元聚合物固化土进行了试验研究和理论分析,证实了采用多元聚合物来固化淤泥土不失为行之有效的。多元聚合物进行土体工程特性改良,确定各类成分的占比是一个比较复杂的问题,往往需要进行大量的试验组别才能确定其最佳掺量。采用正交试验法^[28]、响应面法^[29]是快速有效确定多元聚合物最佳掺量的好方法。

基于此,本文采用 Design-Expert 软件中的 BBD (Box-Behnken design) 响应面法设计试验方案,通过加入不同掺量的玄武岩矿粉(mineral powder, MP)、Ca(OH)₂、聚丙烯纤维(polypropylene fiber, PP)作为影响因素,以改良淤泥土的 7d 和 14d 无侧限抗压强度(UCS)值作为响应值,构建响应面回归模型,探究 MP, Ca(OH)₂ 和 PP 的最优配合比及各因素对改良淤泥土的交互作用效果,为处理淤泥土工程问题提供借鉴。

1 试验方案

1.1 试验材料

1.1.1 淤泥土

淤泥土取自湖州地区的路基工程项目,土体天然含水率为 53%,天然孔隙比 e 为 1.542,其他基本物理性质指标如表 1 所示,土的颗粒粒径分布曲线如图 1 所示,属于淤泥质黏土,土的 XRD 图谱如图 2 所示。

表 1 淤泥土物理性质指标

Table 1 Geotechnical property parameters of muddy soil

密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	天然 含水量 $\omega / \%$	土粒相 对密度 G_s	天然 孔隙比 e	黏聚力 c / kPa	内摩 擦角 $\varphi / (^\circ)$
1.66	53.0	2.75	1.542	6.6	5.7

1.1.2 矿粉

玄武岩矿粉(MP)为浙江嵊州地区在玄武岩矿生产高速公路沥青混合料时产生的附属品,其化学成分如表 2 所示。通过比表面积测试法得知其颗粒相对密度为 2.05,活性成分含量为 75.2%,比表面积为 35.62m²/g。

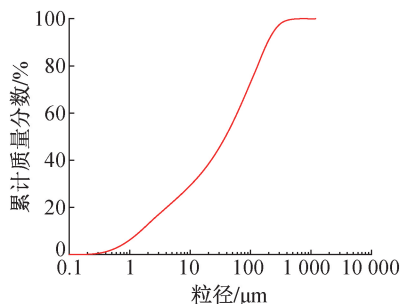


图 1 土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of soil

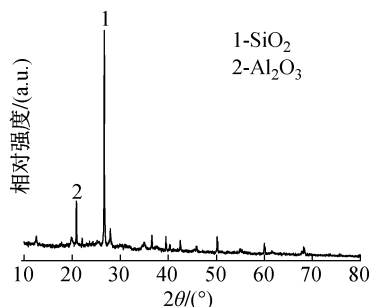


图 2 土的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD pattern of soil

表 2 MP 的化学成分含量

Table 2 The chemical composition content of MP

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	其他
含量/%	49.60	13.42	1.82	7.63	9.79	17.74

1.1.3 聚丙烯纤维

聚丙烯纤维(PP)为束状单丝纤维,该纤维价格低廉且性质稳定,其物理力学参数如表 3 所示。

表 3 PP 的物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of PP

类型	密度/ (g · cm ⁻³)	直径/ mm	抗拉 强度/ MPa	弹性 模量/ MPa	断裂 延伸 率/%	分散性
束状单丝	0.91	0.048	>400	>3 500	10	极好

1.1.4 Ca(OH)₂

采用工业级 Ca(OH)₂,纯度 ≥ 95%,细度为 200 目,常温下为白色粉末状固体,具有强碱性和腐蚀性,在工程中是生产石灰、水泥等建筑材料的重要原料,也可以作为固化剂,提高土壤或材料的稳定性。

1.2 备样

将烘干土与改良材料在搅拌锅中干拌混合至均匀,然后按最优含水率 20%称取相应的水,缓慢加入搅拌锅中,使水与混合料拌合均匀。再称取一定质量拌合土均分成 3 份,采用击实法分层击

实制成高度为 80mm、直径 39.1mm 的柱形试样,每组设置 3 个平行试样。试样制备完成后,用保鲜膜包好放入标准养护箱静置养护(标养条件为:湿度 > 90%,温度 20℃ ± 2℃)7d 和 14d,取出进行无侧限抗压强度试验,土样制备过程如图 3 所示。

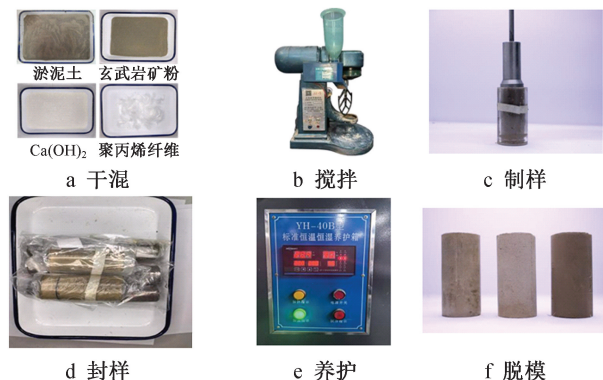


图 3 土样制备过程

Fig. 3 Sample preparation process

1.3 单因素试验

按表 4 进行单因素试验,依据 7d 无侧限抗压强度(UCS)值来确定 MP, Ca(OH)₂, PP 的响应面设计范围中点。单因素下土样的 UCS 随掺量变化情况如图 4 所示。

表 4 单因素试验方案

Table 4 Single factor test scheme

方案	Ca(OH) ₂ 掺量 / %	PP 掺量 / %	MP 掺量 / %
因素 1: Ca(OH) ₂	2, 5, 8, 11		
因素 2: PP		0.05, 0.2, 0.3, 0.4	
因素 3: MP			5, 10, 15, 25

如图 4a 所示,当 MP 掺量到达 15%之前,MP 改良土的 UCS 值上升幅度明显;当 MP 掺量超过 15%后,其 UCS 值开始下降。即当 MP 掺量为 15%时,MP 改良土的 UCS 值最大,故这里将 15%的 MP 掺量作为后续响应面设计范围中点。如图 4b 所示,当 PP 掺量为 0.2%时,PP 改良土的 UCS 值达到最大,故将 0.2%定为 PP 响应面设计范围中点。

由图 4c 可知, Ca(OH)₂ 的掺入对淤泥土的 UCS 值提升明显。Ca(OH)₂ 改良土的破坏形式如图 4d 所示,可看出当 Ca(OH)₂ 掺量超过 5%,土样由压剪破坏逐渐变为脆性劈裂破坏。综合考虑强度提升及土体变形不宜过于脆性,将 5%作为 Ca(OH)₂ 的响应面设计范围中点。

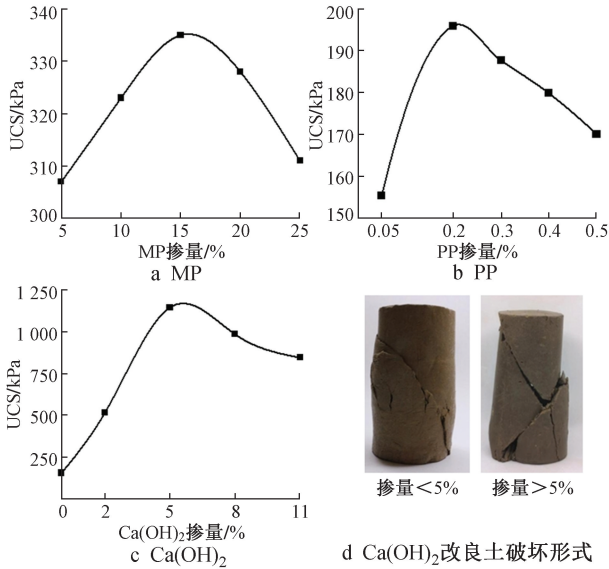


图 4 单因素下土样的 UCS 随掺量变化情况

Fig. 4 Variation of UCS of soil samples with different content under single-factor condition

2 配合比优化试验

2.1 响应面法优化设计

响应面法是通过建立影响因素与目标响应值之间的二阶回归方程,通过等值线图与响应面曲线图直观得到各个影响因素与响应值的关系。该方法特别适用于评估多个因素及其交互作用对响应值的影响,并寻找多个掺量组合的最优配合比。

这里选取 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, MP 和 PP 掺量作为响应面二阶方程的 3 个影响因素,三者的编码值分别用 A, B, C 表示,每个因素设置 3 个水平。将前期单因素试验确定的最佳掺量作为 0 水平,即响应面范围中点。最佳掺量前后 2 个掺量分别作为 -1 水平和 1 水平进行响应面法方案设计(见表 5)。运用三因素三水平的中心组合设计出 17 组 UCS 试验,每组进行 3 次平行试验,以改良土养护 7d 和 14d 的 UCS 值作为响应值(分别用 Y_{7d} 和 Y_{14d} 表示,见表 6),建立起影响因素与响应值之间的二次回归模型,运用软件对模型进行方差分析和可靠性分析,最终得到最佳配合比。

表 5 三因素三水平 BBD 设计

Table 5 Three-factor and three-level BBD design

影响因素	编码值	编码水平		
		-1	0	1
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量/%	A	2	5	8
MP 掺量/%	B	8	15	22
PP 掺量/%	C	0.05	0.2	0.35

2.2 方差分析

利用 Design-Expert 软件对 7d 和 14d 的 UCS 值

表 6 响应面法设计试验方案及结果

Table 6 Experimental scheme and results designed by response surface method

序号	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量/%	MP 掺量/%	PP 掺量/%	Y_{7d} /kPa	Y_{14d} /kPa
1	2	8	0.20	492	549
2	8	8	0.20	552	703
3	2	22	0.20	515	690
4	8	22	0.20	578	733
5	2	15	0.05	477	612
6	8	15	0.05	565	715
7	2	15	0.35	513	700
8	8	15	0.35	577	760
9	5	8	0.05	532	645
10	5	22	0.35	568	712
11	5	8	0.05	550	682
12	5	22	0.35	598	774
13	5	15	0.20	645	827
14	5	15	0.20	631	816
15	5	15	0.20	636	809
16	5	15	0.20	625	801
17	5	15	0.20	639	793

进行分析,可得到 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, MP 和 PP 三因素关于 UCS 值的二次多项回归方程:

$$Y_{7d} = 635.20 + 34.38A + 16.63B + 12.00C + 0.75AB - 6.00AC + 3.00BC - 64.98A^2 - 35.98B^2 - 37.22C^2 \quad (1)$$

$$Y_{14d} = 809.20 + 45.00A + 41.25B + 29.00C - 27.75AB - 10.75AC + 6.25BC - 73.48A^2 - 66.98B^2 - 38.98C^2 \quad (2)$$

对二次回归方程进行方差分析,如表 7 所示。 F (F -statistic) 值是方差比的统计量, P (Probability Value) 值是概率值。 P 值越小、 F 值越大表示二次回归模型越可靠。表 7 中,7d 和 14d 的响应面模型的 F 值分别为 71.43, 72.68 且 P 值都小于 0.000 1,表明响应面模型非常显著,具有统计学意义。由表 7 可知,7d 和 14d 模型 $A, B, C, AB, A^2, B^2, C^2$ 项的 P 值均小于 0.05,说明 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, MP, PP 以及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 MP 交互作用下对改良淤泥土强度都起到显著作用。 F 值越大,说明因素对响应值的作用越显著,从表 7 可以看出单因素对 UCS 值的影响程度为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量 > MP 掺量 > PP 掺量。

模型可靠性检验分析如表 8 所示。表 8 中多元相关系数 R^2 和 R^2 校正值(Adj R^2) 十分接近 1; Adj R^2 和 Pre R^2 (预测值) 差值 < 0.2, 说明各因素与响应值相关程度高; 变异系数 < 10%; 精密度分别为 24.06, 27.76, 大于 4 视为合理, 表明式(1), (2) 建立的二次回归模型有效可靠、因素水平合理, 可用于 UCS 试验结果的分析与预测。

表7 方差分析结果

Table 7 Results of variance analysis

来源	7d			14d		
	F	P	方程系数	F	P	方程系数
模型	71.430	<0.000 1	506.02	72.68	<0.000 1	809.20
A	134.80	<0.000 1	26.69	113.40	<0.000 1	45.00
B	31.52	0.000 8	-17.67	95.31	<0.000 1	41.25
C	16.420	0.004 9	-225.50	47.11	0.000 2	29.00
AB	0.032	0.862 9	0.75	21.57	0.002 4	-27.80
AC	2.050	0.195 0	-30.56	3.24	0.115 1	-10.80
BC	0.513	0.497 0	-12.86	1.09	0.330 4	6.25
A ²	253.40	<0.000 1	-1.22	159.15	<0.000 1	-73.50
B ²	77.680	<0.000 1	0.72	132.20	<0.000 1	-67.00
C ²	83.170	<0.000 1	1480.00	44.78	0.000 3	-39.00

表8 模型可靠性检验分析

Table 8 Model reliability test analysis

Group	R ²	Adj R ²	Pre R ²	变异系数/%	精密度
Y ₇	0.989 2	0.975 4	0.901 4	1.47	24.06
Y ₁₄	0.989 4	0.975 8	0.936 5	1.65	27.76

2.3 响应面交互作用分析

固定MP,PP,Ca(OH)₂三者其中1个因素,另外2个因素交互作用对响应值的影响程度可通过响应面曲线和等值线直观反映。响应面曲线越陡峭及等值线越密集,越接近椭圆,表明这2个因素交互作用对响应值的影响越显著。Ca(OH)₂,MP,PP两两交互作用对土体14d无侧限抗压强度的影响如图5所示。图5a,5c,5e响应面曲线均呈上凸状态;图5b,5d,5f等值线呈密集分布椭圆形状,结合表7中P值为0.002 4<0.05,说明三者的两两交互作用十分显著。

2.4 参数优化及验证

采用Design-Expert软件进行复合改良淤泥土配合比的优化。根据式(2),将14d最大UCS值作为优化目标,对3个影响因素的掺量进行优化,最终

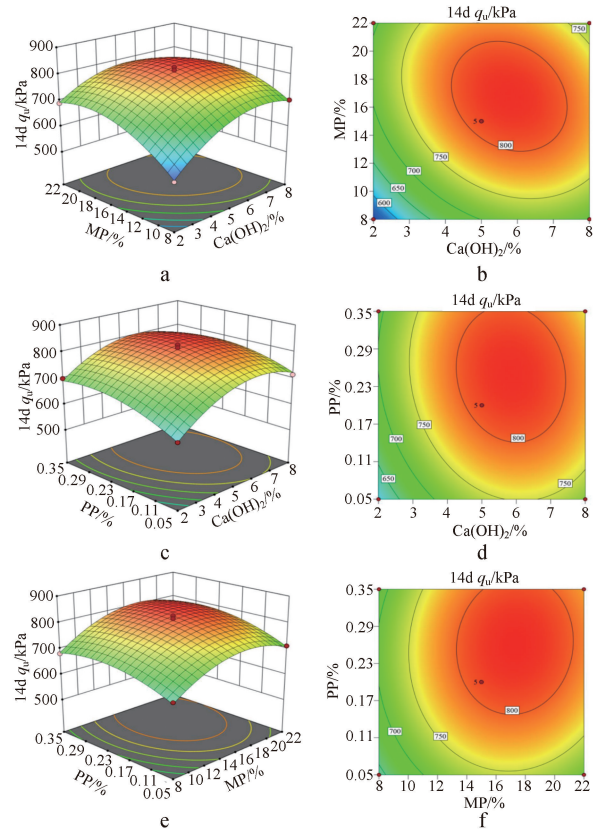


图5 响应面交互作用分析

Fig. 5 Response surface plot for interaction effect analysis

确定MP:Ca(OH)₂:PP=5.68:16.95:0.25(质量比)为最优配合比(见图6)。在此配合比下进行3组平行室内试验,得到改良土的UCS平均值为797kPa,与响应面模型给出预测值825kPa相对误差在5%范围内,再次说明所建立的模型有效可靠,具借鉴价值。

3 微观机理分析

MP-Ca(OH)₂-PP多元聚合物改良淤泥土SEM图像如图7所示。由图7a,7b可以看出PP穿插、嵌入土体内部,建立起土骨架的“桥接效应”,约束

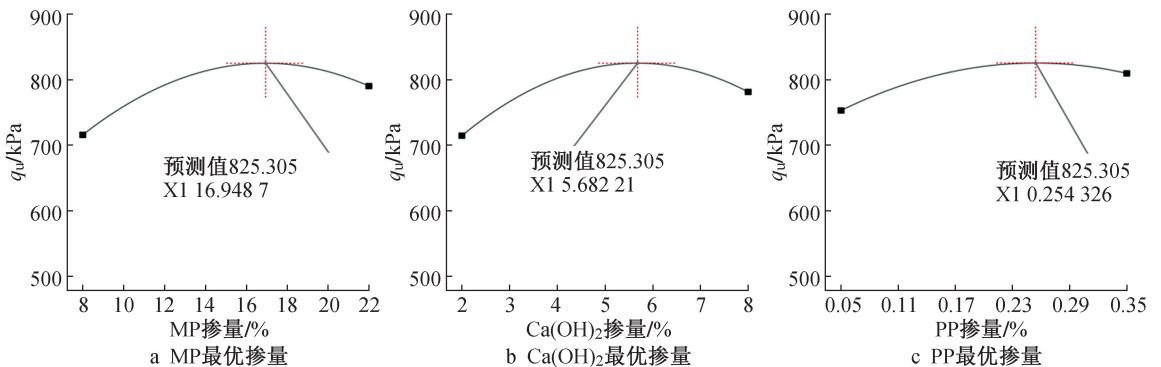


图6 配合比优化结果

Fig. 6 Mix proportion optimization results

土颗粒位移,在土体起到一种“牵拉”作用,为土块提供拉力,增强土体抵抗变形的能力。MP 中的活性 SiO_2 , Al_2O_3 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生碱激发火山灰反应,生成 C-S-H 絮状胶结物(图 7c,7d 红色圈注)包裹土颗粒、填充微孔隙并形成连续胶结面,强化颗粒间黏聚力,同时还可可见一部分残余 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体(图 7c,7d 黄色圈注)进一步密实填充土体空隙结构。MP, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, PP 三者协同作用提升了淤泥土的强度与稳定性。

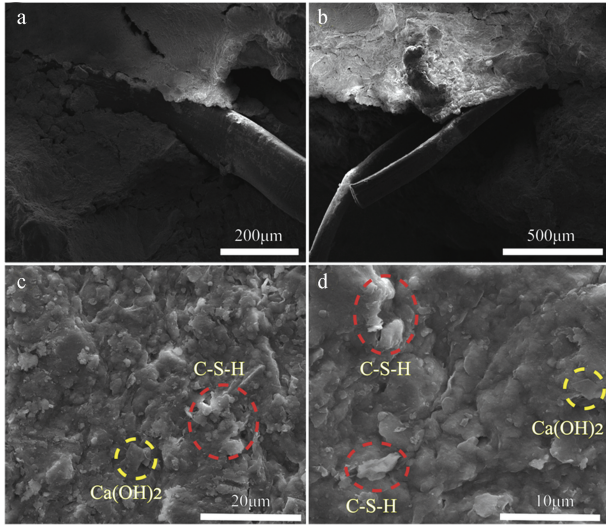


图 7 MP- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -PP 改良土 SEM 照片

Fig. 7 SEM images of MP- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -PP

4 工程应用

选取湖州地区临太湖大道项目 I 标段进行软黏土路基改良的现场试验,试验段长度为 200m。取松软淤泥土层摊铺在路基表面,摊铺厚度为 30cm。将路面范围划分为 $2.0\text{m} \times 2.0\text{m}$ 方格,按 $2.0\text{m} \times 2.0\text{m} \times 0.3\text{m}$ 的体积估算土料质量,并根据土料质量按 MP : $\text{Ca}(\text{OH})_2$: PP = 16.95 : 5.68 : 0.25 计算每一方格需要拌入 MP, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, PP 的量。采用人工或机械将改良材料在方格内摊铺、翻拌均匀,并在 1d 后碾压密实。施工结束 1d 后采用灌砂法进行改良土路基压实度检测。在路基上随机选择 4 个点进行现场试验,结果如表 9 所示。由表 9 可知,4 个测点的压实度均 $>93\%$, 满足路用压实设计要求^[27]。

5 结语

1) 以单因素试验为基础,通过 BBD 响应面法设计试验可以得出,MP, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, PP 在淤泥土改良试验中,对于 UCS 能起到显著作用,当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量为 5.68%、MP 掺量为 16.95%、PP 掺量为 0.25% 时,显著性最大,配合比最优。

表 9 现场改良土压实度检测结果

Table 9 Test results of compaction degree for on-site improved soil

点位	湿密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水 率/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最大 干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	压实 度/%
1	1.982	19.8	1.654	1.772	93.4
2	2.007	20.5	1.666		94.0
3	1.997	20.4	1.659		93.6
4	2.021	20.9	1.672		94.3

注:表中数据依据 JTG3450—2019《公路路基路面现场测试规程》测定

2) 在 7d 和 14d 试验中得知, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作为碱激发剂能较大提高土体强度,含量在 5.68% 时,提升强度最为明显,随着含量的增加,强度虽能提高,但利用率低,且从经济效益、环境保护和绿色发展的角度来看,掺量 5.68% 为最佳,节约成本的同时,也能满足大多数工程建设需要。

3) MP, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, PP 三者形成协同效应增强土体强度。MP 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 通过化学反应生成 C-S-H 絮状胶结物起到胶结填充土空隙的作用,PP 则会起到一种“牵拉”作用。三者共同发挥作用既增强淤泥土的 UCS 值,也使改良土进一步增韧,具备良好的抵抗变形能力。

4) 现场工程应用随机选择的 4 个测点的压实度均 $>93\%$, 满足路用压实设计要求,说明基于响应面法提出 MP : $\text{Ca}(\text{OH})_2$: PP = 16.95 : 5.68 : 0.25 (质量比) 的多元聚合物改良材料可满足工程实际需求,具有一定借鉴价值。

参考文献:

- [1] 梁国钱,张民强,俞炯奇,等. 浙江沿海地区软土工程特性[J]. 中国矿业大学学报,2002,31(5):435-437,441.
LIANG G Q, ZHANG M Q, YU J Q, et al. Technical characteristics of mild clay in coastal areas of Zhejiang Province [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(5):435-437,441.
- [2] 裘友强,张留俊,富志鹏,等. 内陆河湖相软土土性指标统计特征与竖向变化规律研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023,54(12):23-34.
QIU Y Q, ZHANG L J, FU Z P, et al. Study on statistical characteristics and vertical change law of soil index for soft soil in the inland fluvial-lacustrine sediments [J]. Water resources and hydropower engineering, 2023,54(12):23-34.
- [3] 高国瑞,李俊才. 水泥加固(改良)软土地基的研究[J]. 工程地质学报,1996,4(1):45-52.
GAO G R, LI J C. Study of effect of reinforcing soft cohesive ground with Portland cement [J]. Journal of engineering geology, 1996,4(1):45-52.
- [4] 李丽华,刘文,李玉涛,等. 椰壳纤维加筋石灰改良土力学性能试验研究[J]. 工程科学与技术,2025,57(6):131-141.

- LI L H, LIU W, LI Y T, et al. Experimental study on mechanical properties of coconut fiber reinforced lime improved soil mechanics[J]. *Advanced engineering sciences*, 2025, 57(6): 131-141.
- [5] 周恒锐, 崔高航, 程卓, 等. 粉煤灰改良粉砂土动静力学特性研究[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(4): 1619-1626.
- ZHOU H R, CUI G H, CHENG Z, et al. Dynamic and static characteristics of fly ash amended chalk soil [J]. *Science technology and engineering*, 2024, 24(4): 1619-1626.
- [6] 邓永锋, 吴子龙, 刘松玉, 等. 地聚合物对水泥固化土强度的影响及其机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(3): 446-453.
- DENG Y F, WU Z L, LIU S Y, et al. Influence of geopolymer on strength of cement-stabilized soils and its mechanism[J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2016, 38(3): 446-453.
- [7] 周恒宇, 王修山, 胡星星, 等. 地聚合物固化淤泥强度增长影响因素及机制分析[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2089-2098.
- ZHOU H Y, WANG X S, HU X X, et al. Influencing factors and mechanism analysis of strength development of geopolymer stabilized sludge[J]. *Rock and soil mechanics*, 2021, 42(8): 2089-2098.
- [8] 吴燕开, 胡晓士, 胡锐, 等. 烧碱激发钢渣粉在淤泥质土中的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(12): 2187-2194.
- WU Y K, HU X S, HU R, et al. Experimental study on caustic soda-activated steel slag powder in muddy soil [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2017, 39(12): 2187-2194.
- [9] 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.
- [10] 李柱, 王宏. 电石灰改良高液限黏土强度特性研究[J]. *施工技术*, 2021, 50(9): 103-106.
- LI Z, WANG H. Study on strength characteristics of high liquid limit clay improved by calcium carbide dust [J]. *Construction technology*, 2021, 50(9): 103-106.
- [11] 沈君, 程寅, 金小平, 等. 废渣基地聚物稳定粉黏土性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(S1): 147-156.
- SHEN J, CHENG Y, JIN X P, et al. Experimental study on performance of waste slag based geopolymer stabilized silt clay [J]. *Rock and soil mechanics*, 2024, 45(S1): 147-156.
- [12] 樊辉, 刘顺, 王振鑫, 等. 膨润土协同地聚物固化有机质软土力学特性及微观机理分析[J]. *公路*, 2025, 70(9): 247-254.
- FAN H, LIU S, WANG Z X, et al. Mechanical properties and micro-mechanism analysis of bentonite synergistic geopolymer solidified organic soft soil[J]. *Highway*, 2025, 70(9): 247-254.
- [13] CHEN K Y, WU D Z, YI M, et al. Mechanical and durability properties of metakaolin blended with slag geopolymer mortars used for pavement repair [J]. *Construction and building materials*, 2021, 281: 122566.
- [14] 刘景锦, 罗昊鹏, 雷华阳, 等. 碱激发地聚物固化海相淤泥质软土抗压强度及固化机制研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(7): 2745-2754.
- LIU J J, LUO H P, LEI H Y, et al. Compressive strength and curing mechanism of alkali-activated geopolymer curing marine silty soft soil [J]. *Journal of railway science and engineering*, 2024, 21(7): 2745-2754.
- [15] 张晓果, 杨博, 赵亚婷, 等. 工业固废复合胶凝材料与消石灰改良膨胀土的性能对比及冻融/干湿循环破坏研究[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2025(4): 78-82.
- ZHANG X G, YANG B, ZHAO Y T, et al. Performance comparison of industrial solid waste-based composite cementitious materials and hydrated lime for stabilizing swelling soil and study on degradation mechanisms under freeze-thaw/dry-wet cycles [J]. *China non-metallic mining industry*, 2025(4): 78-82.
- [16] 王艳芳, 刘传新, 梁波, 等. 土壤稳定剂-聚丙烯纤维复合改良膨胀土的试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2022(6): 86-94.
- WANG Y F, LIU C X, LIANG B, et al. Experimental study on improving expansive soil with soil stabilizer-polypropylene fiber composite[J]. *Hydro-science and engineering*, 2022(6): 86-94.
- [17] 廖斯汉, 蔡燕燕, 林毅华, 等. 改性地聚物 CG 固化/稳定化重金属污染底泥室内试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2025, 23(2): 25-31, 73.
- LIAO S H, CAI Y Y, LIN Y H, et al. Solidification and stabilization of heavy metal contaminated sediment by modified geopolymer CG[J]. *Journal of water resources and architectural engineering*, 2025, 23(2): 25-31, 73.
- [18] 刘俊芳, 张天然, 刘霖, 等. 矿渣复合物固化/稳定化铅污染沙土特性[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(28): 12287-12295.
- LIU J F, ZHANG T R, LIU L, et al. Characteristics of solidified/stabilized lead contaminated sandy by slag composite[J]. *Science technology and engineering*, 2024, 24(28): 12287-12295.
- [19] 黄世斌, 陈田鑫, 王家全, 等. 工业固废-水泥改良红黏土路用特性及微观机理[J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(21): 9130-9139.
- HUANG S B, CHEN T X, WANG J Q, et al. Road properties and micro-mechanism of industrial solid waste-cement improved red clay [J]. *Science technology and engineering*, 2025, 25(21): 9130-9139.
- [20] 叶华洋, 张伟锋, 韦未, 等. 激发剂-地聚物对软土固化试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(4): 906-917.
- YE H Y, ZHANG W F, WEI W, et al. Experimental study on the curing of soft soil with activator-geopolymer[J]. *Journal of basic science and engineering*, 2019, 27(4): 906-917.
- [21] 俞家人, 陈永辉, 陈庚, 等. 地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(2): 364-371.
- YU J R, CHEN Y H, CHEN G, et al. Mechanical behaviour of geopolymer stabilized clay and its mechanism [J]. *Journal of building materials*, 2020, 23(2): 364-371.
- [22] SAHOO S, PRASAD SINGH S. Strength and durability properties of expansive soil treated with geopolymer and conventional stabilizers [J]. *Construction and building materials*, 2022, 328: 127078.
- [23] TREMBLAY H, DUCHESNE J, LOCAT J, et al. Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement [J]. *Canadian geotechnical journal*, 2002, 39(3): 535-546.

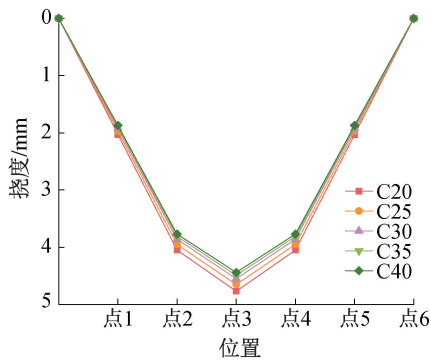


图 11 不同混凝土强度等级的叠合板底板的挠度变化规律

Fig. 11 Changing trend of deflection of base plate for composite slab with different concrete strength

叠合板底板在均布荷载作用下,桁架上弦钢筋受压、混凝土板受拉,底板混凝土应力呈点状分布;全部荷载几乎由桁架钢筋及其附近的混凝土承担。

3)增加钢筋直径为减小叠合板底板跨中挠度的有效措施;增加钢筋桁架个数也能够减小叠合板底板的跨中挠度,但多于4个后效果不明显,且挠度无法减小至规范限值以内;增加混凝土强度对改善叠合板底板的变形性能效果较差。

参考文献:

[1] 徐柳. 房屋建筑装配式混凝土结构的经济效能探讨[J]. 混凝土, 2018(5): 115-117, 122.
XU L. Discussion on economic efficiency of precast concrete structure of housing construction [J]. Concrete, 2018(5): 115-117, 122.

[2] 皮正波,魏奇科,兰涌森,等. 配置钢筋桁架的钢筋混凝土叠合板的剪弯性能研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(6): 51-57.
PI Z B, WEI Q K, LAN Y S, et al. Research on shear and bending properties of composite reinforced concrete slabs with reinforced trusses [J]. Industrial construction, 2020, 50(6): 51-57.

[3] 张弛,朱杰江. 钢筋桁架混凝土双向叠合板的力学性能分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(5): 75-79.
ZHANG C, ZHU J J. Mechanical behavior analysis of reinforced truss concrete two-way composite slabs [J]. China concrete and cement products, 2020(5): 75-79.

[4] 刘伟,刘文慧. 钢筋桁架-混凝土楼板的研究分析[J]. 吉林建筑大学学报, 2017, 34(5): 13-16.
LIU W, LIU W H. Steel bar truss-wheat straw concrete floor the development trend of research [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2017, 34(5): 13-16.

[5] 刘洋,李志武,杨思忠,等. 装配式建筑叠合楼板研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(1): 61-68.
LIU Y, LI Z W, YANG S Z, et al. Development progress on composite slabs for prefabricated buildings [J]. China concrete and cement products, 2019(1): 61-68.

[6] 高新宇. 钢筋桁架混凝土叠合板预制底板力学性能的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
GAO X Y. Research on mechanical properties of the steel bar truss concrete and superimposed precast slab [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.

[7] 杨旭杰,彭修宁,柯晓军,等. 钢管桁架倒T形叠合板施工阶段短期刚度研究[J]. 混凝土, 2023(6): 159-162.
YANG X J, PENG X N, KE X J, et al. Study on short-term stiffness of steel tube truss inverted T-shaped composite slab during construction stage [J]. Concrete, 2023(6): 159-162.

(上接第 146 页)

[24] 张跃明,李威,林天干,等. 地聚合物软土强度影响因素试验研究[J]. 公路, 2016, 61(11): 198-204.
ZHANG Y M, LI W, LIN T G, et al. Experimental study on influencing factors of geopolymers soft soil strength [J]. Highway, 2016, 61(11): 198-204.

[25] 刘旭,张默,邵龙潭. 地质聚合物加固含硫软土的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 136-142.
LIU X, ZHANG M, SHAO L T. Experimental study on sulfate rich-soil stabilization with geopolymer [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2018, 16(4): 136-142.

[26] 杨望星,陈柯宇,俞焯炜,等. 粉煤灰基地聚合物替代水泥加固软土的试验研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2022, 47(3): 433-440.
YANG W X, CHEN K Y, YU Y W, et al. Experimental study on replacing cement reinforced soft soil with fly ash-based geopolymer [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (natural sciences edition), 2022, 47(3): 433-440.

[27] 陈瑞敏,简文彬,张小芳,等. CSFG-FR 协同作用改良淤泥固土性能试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1020-1030.
CHEN R M, JIAN W B, ZHANG X F, et al. Experimental study on performance of sludge stabilized by CSFG-FR synergy [J]. Rock and soil mechanics, 2022, 43(4): 1020-1030.

[28] 姚钧天,杨建宇,杨伟军,等. 工业固废协同固化红砂岩土试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(7): 2730-2740.
YAO J T, YANG J Y, YANG W J, et al. Synergistic solidification of red sandstone soil by industrial solid waste [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2025, 44(7): 2730-2740.

[29] 张顶飞,刘涛,郝琪,等. 固废基地质聚合物固化沿海软土的力学机理与劣化性能研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(6): 1582-1596.
ZHANG D F, LIU T, HAO Q, et al. Investigation of mechanical mechanisms and deterioration properties of geological polymers from solid waste for stabilizing coastal soft soils [J]. Journal of basic science and engineering, 2024, 32(6): 1582-1596.