DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260551

软土地区道路土壤固化剂关键影响因素研究

刘　超[1,2],张　帅[1,2],刘　好[3]
(1.天津市政工程设计研究总院有限公司,天津市 300392; 2.天津市基础设施耐久性企业重点实验室,天津市 300392;
3.天津市交通科学研究院,天津市 300074)

摘　要: 为推广土壤固化剂在软土地区道路路基工程中的应用,以路邦-1离子型固化剂为研究对象,选取重载交通基础设施道路现场土为试验材料,系统开展压实度、龄期、含水量、石灰含量对固化土无侧限抗压强度影响的室内对比试验。结果表明:固化土无侧限抗压强度与压实度呈显著线性正相关,随养护龄期增长持续提升,石灰+固化剂体系后期强度增长尤为突出;含水量约18.0%时强度达峰值,与规范要求含水量控制区间一致;石灰含量在3%~13%范围内强度整体递增,低于6%时增幅显著,高于6%后增幅趋缓。研究成果可为软土地区道路路基与基层固化设计、施工控制及配比优化提供试验依据与技术参考。

关键词: 土壤固化剂;无侧限抗压强度;压实度;龄期;含水量;石灰含量;道路工程
中图分类号: U416.1;TU997　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)09-0088-05

Study on Key Influencing Factors of Soil Stabilizer for Roads in Soft Soil Areas

LIU Chao[1,2], ZHANG Shuai[1,2], LIU Hao[3]
(1. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300392, China; 2. Tianjin Enterprise Key Laboratory of Infrastructure Durability, Tianjin 300392, China; 3. Tianjin Transportation Science Research Institute, Tianjin 300074, China)

Abstract: To promote the application of soil stabilizers in road subgrade engineering of soft soil areas, taking Lubond-1 ionic soil stabilizer as the research object, and selecting the in-situ soil from heavy-duty transportation infrastructure roads as the test material, the laboratory tests are systematically conducted to compare the influences of compaction degree, curing age, moisture content and lime content on the unconfined compressive strength of stabilized soil. The results show that the unconfined compressive strength of stabilized soil has a significant linear positive correlation with compaction degree, and increases continuously with the growth of curing age. The strength growth of the lime + stabilizer composite system is particularly prominent in the later stage. The strength reaches the peak when the moisture content is about 18. 0%, which is consistent with the moisture control range required by the specification. The strength increases overall when the lime content ranges from 3% to 13%, with a significant increase rate below 6% and a slow increase rate above 6%. The research results can provide experimental basis and technical reference for the stabilization design, construction control and mix ratio optimization of road subgrades and bases in soft soil areas.

Keywords: soil stabilizer; unconfined compressive strength; compaction degree; curing age; moisture content; lime content; road engineering

0　引　言

我国软土分布广泛,城市道路与公路工程常面临路基承载力不足、沉降过大、水稳定性差等工程难题。传统路基处理多采用换填砂砾、石灰土、水泥稳定土等工艺,存在造价偏高、资源消耗大、施工周期长、后期易开裂等问题,难以完全满足重载交通与长寿命道路建设需求。土壤固化剂作为一种能显著改善土体物理力学性能的新型环保材料,通过物理化学作用与土体颗粒发生反应,降低亲水性、增强颗粒间联结、提升整体强度与稳定性,在软土路基加固、基层材料替代、旧路改造等领域应用前景广阔[3-6,15]。

近年来,国内外学者在固化剂类型、固化机理、配合比设计及路用性能等方面取得诸多进展。离子型固化剂可改变土体颗粒表面电位,破坏双电层结构,排出孔隙水并提升密实度;无机类固化剂依托水化与火山灰反应生成胶凝产物,实现土体骨架强化[9,14]。现有研究多聚焦单一因素影响或特定固化体系,针对重载道路、软土场地的多因素耦合影响及

收稿日期: 2026-05-16
作者简介: 刘超(1984—),男,学士,高级工程师,从事道路工程设计工作。

量化规律仍需完善，工程应用中压实控制、含水量管控、石灰掺量优选等关键参数缺乏系统试验支撑[8,11,13]。

本文以路邦-1离子型土壤固化剂为研究核心，选取满足300~600 t重载需求的重载交通基础设施道路现场土为试验对象，系统研究压实度、养护龄期、含水量、石灰含量对固化土无侧限抗压强度的影响特性及变化规律，建立关键参数与强度的量化关系，形成适配软土地区、重载道路的固化剂应用技术要点，为同类工程的设计与施工工作提供可靠的技术支撑和参考依据[7,12]。

1　试验材料与方案

1.1　试验材料

（1）路基土。重载交通基础设施道路现场原状土，属软塑～可塑黏性土，天然含水量较高、孔隙比偏大、原位强度较低，符合典型软土地区路基土工程特性。

（2）固化剂。路邦-1离子型土壤固化剂，液态，通过离子交换、表面吸附作用改善土体结构，提升强度与水稳性。

（3）无机结合料。普通硅酸盐水泥；Ⅲ级钙质消石灰，有效钙镁含量符合规范要求。

（4）试验用水。洁净自来水，满足拌合与养护用水标准。

1.2　试验依据

本次试验严格遵循现行规范《公路土工试验规程》（JTG E40—2007）、《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》（JTG E51—2009），确保试件制备、养护条件、加载制度统一可控。土工试验方法同时参照《土工试验方法标准》（GB 50123—2019）[10]要求。

1.3　试件制备与养护

采用ϕ50 mm×50 mm圆柱体标准试件，按设计配合比称取土、石灰、水泥、固化剂与水，充分拌合均匀。土壤混合料试件含水量较最佳含水量高1%~2%，以模拟现场施工不利条件。试件采用静力压实法成型，标准条件养护6 d后浸水24 h，测定无侧限抗压强度[1-2]。

1.4　试验配合比设计

本次设置4组核心固化体系，具体为：路基土+4%石灰+路邦固化剂（路床/底基层），路基土+2%水泥+3%石灰+路邦固化剂（底基层），路基土+3%水泥+3%石灰+路邦固化剂（基层），路基土+5%石灰+3%水泥+路邦固化剂（用于含水量影响试验配比）。

2　强度影响因素试验结果与分析

2.1　无侧限抗压强度和压实度的关系

压实度直接决定固化土内部密实程度与颗粒接触状态，是控制路基、基层施工质量的核心指标。本次分别对“路基土+2%水泥+3%石灰+路邦固化剂”、“路基土+4%石灰+路邦固化剂”及“路基土+3%水泥+3%石灰+路邦固化剂”这3组配比无机结合料稳定土试件在不同压实度情况下的无侧限抗压强度进行了试验，试验结果如表1、图1所示。

表1　各种配比试件的无侧限抗压强度和压实度关系

2%水泥+3%石灰			加4%石灰			加3%水泥+3%石灰		
等效质量/g	压实度/%	抗压强度/MPa	等效质量/g	压实度/%	抗压强度/MPa	等效质量/g	压实度/%	抗压强度/MPa
199.80	92.93	1.1	200.30	93.77	1.26	197.27	92.35	1.6
203.35	94.58	1.4	201.60	94.38	1.32	199.42	93.36	1.77
206.16	95.89	1.57	205.70	96.30	1.56	206.17	96.52	2.4
208.09	96.79	1.91	207.30	97.05	1.62	209.6	98.13	2.59
210.62	97.96	2.13	208.10	97.43	1.68	211.3	98.92	2.7
213.19	99.16	2.47	—	—	—	211.9	99.20	2.72

注：等效质量=试件质量×50 mm/试件高度（mm）。

结果表明：通过表1试验数据可分析出，试件的无侧限抗压强度与压实度呈良好线性关系，强度会随着压实度提升呈现稳步上升趋势。工程应用关键阈值为：

（1）4%石灰+路邦固化剂用于道路路床，压实度大于90%时，7 d强度大于0.82 MPa，满足高等级公路底基层要求[11]。

（2）2%水泥+3%石灰+路邦固化剂达1.5 MPa，需压实度不小于95.5%。

（3）3%水泥+3%石灰+路邦固化剂达2.5 MPa，需压实度不小于97.6%。

压实度每提升1个百分点，强度增幅可达5%~12%，施工中严格压实控制是保障强度达标、减少后期沉降的关键[13]。

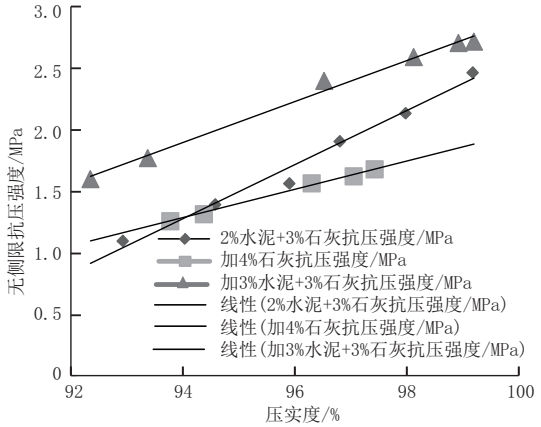


图1　各种配比试件的无侧限抗压强度和压实度关系曲线

2.2　无侧限抗压强度与养护龄期的关系

固化土强度随龄期增长源于水化反应持续进行与离子固化作用逐步稳定[9,14]。为进一步对比不同龄期固化剂固化土的强度变化规律，需对试件进行不同龄期的无侧限抗压强度试验。对上述3种配比重新制作试件，分别养护7、14、28 d浸水24 h后做无侧限抗压强度试验，系统观测不同龄期条件下试件抗压强度变化规律。无侧限抗压强度试验结果如表2所示。

结果表明：通过表2试验数据可分析出，所有配比强度均随龄期增长而提高，增长速率存在显著差异。4%石灰+路邦体系后期强度增长突出，28 d相对7 d增幅达59.59%，远高于含水泥配比的22%左右，体现石灰与离子固化剂协同作用的长效优势。含水泥体系早期强度高，适合快速通车路段；石灰+固化剂体系后期强度储备充足，耐久性更优，适合长期承载的重载道路结构[6,15]。

表2　不同龄期固化土无侧限抗压强度

配比	龄期/d	制作质量/g	等效质量/g	压实度/%	抗压强度/MPa	增长率/%
4%石灰+路邦	7	220.10	208.7	97.70	1.46	—
	14	220.20	208.8	97.74	1.81	23.97
	28	219.77	208.4	97.55	2.33	28.73
2%水泥+3%石灰+路邦	7	220.90	205.7	96.32	2.08	—
	14	217.45	202.5	96.32	2.22	6.73
	28	219.01	204.0	95.50	2.54	14.41
3%水泥+3%石灰+路邦	7	220.90	207.6	97.20	2.44	—
	14	218.3	205.2	96.06	2.65	8.61
	28	219.3	206.1	96.50	2.98	12.45

2.3　无侧限抗压强度与含水量的关系

含水量直接影响拌合均匀性、压实效果与水化反应进程，是施工质量控制的敏感参数[8,13]。本次为了研究无侧限抗压强度与无机结合料稳定土含水量的关系，制作了6组相同配比试件。试件配比为路基土+5%石灰+3%水泥+路邦土壤固化剂（2.5 mL/10 kg），设置7组含水量梯度，试验结果如表3、图2所示。

表3　无侧限抗压强度和含水量关系

组号	编号	含水量/%	制作时重/g	浸水前重/g	浸水后重/g	压力计读数	抗压强度/MPa	平均抗压强度/MPa
1	1-1	15	213.0	211.9	掉块	29.5	1.66	2.32
	1-2		221.0	220.3	224.8	53.0	2.32	
2	2-1	16	218.5	217.8	221.9	44.0	2.73	2.73
	2-2		217.5	216.9	掉块	53.0	2.98	
3	3-1	17	219.8	219.1	掉块	54.8	3.09	2.98
	3-2		220.5	219.6	223.7	51.0	2.98	
4	4-1	18	216.2	215.2	219.4	41.0	2.31	3.09
	4-2		218.5	217.4	220.0	68.9	3.88	
5	5-1	19	216.0	214.9	218.5	41.0	2.31	2.28
	5-2		218.0	217.1	220.3	40.0	2.25	
6	6-1	20	209.0	207.0	209.7	22.5	1.27	1.31
	6-2		212.0	210.5	212.9	24.0	1.35	

注：表3中出现掉块的试件均判定为破损试件，对应单值数据已剔除，平均强度仅采用完整有效试件数据计算。

结果表明：通过表3试验数据可分析出，强度随含水量呈先增后减趋势，含水量约18.0%时达峰值3.09 MPa，与规范要求试件含水量较最佳含水量高1%~2%完全吻合。含水量偏低时拌合困难、压实不足；偏高时孔隙水过多、强度大幅下降。现场施工应严格控制含水量在最佳值±1%范围内，确保强度稳定达标。

2.4　无侧限抗压强度与石灰含量的关系

石灰作为无机辅料，提供碱性环境、激发火山灰反应、提升早期强度与水稳性[9,14]。为确定无侧限抗压强度与石灰含量的关系，本次分8组在路基土中添加3%~13%的石灰制作试件，控制相同一致的压实度。实验结果如表4、图3所示。

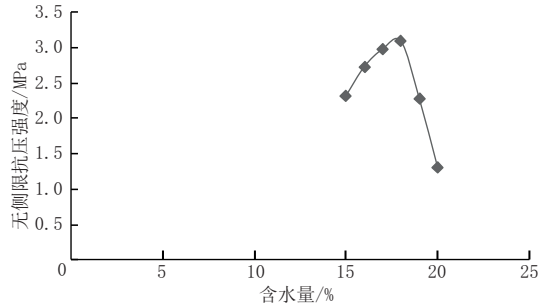


图2　无侧限抗压强度和含水量关系曲线

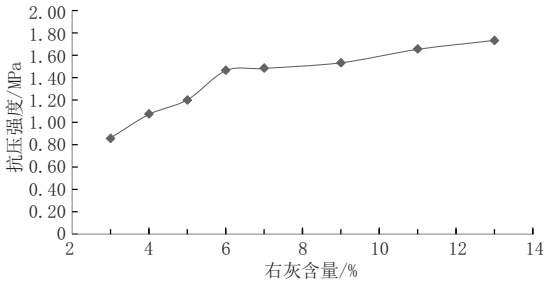


图3　无侧限抗压强度和石灰含量关系曲线

结果表明：通过表4试验数据可分析出，强度随石灰含量增加整体呈线性上升，3%~6%阶段斜率显著高于6%~13%阶段。石灰掺量低于6%时，对强度贡献突出，每提升1%，强度增幅约0.1~0.2 MPa；高于6%后增幅趋缓，并伴随小幅波动，主要原因是：石灰掺量过高会导致土体颗粒间距增大、拌合均匀性下降，同时过量石灰未充分参与火山灰反应，以游离态存在于土体中，降低结构整体性，进而引 发强度小幅波动，且经济性下降[11]。综合强度、成本与施工性，底基层推荐石灰掺量4%~6%，重载基层可适当提高，但不宜超过8%。

3　工程应用技术要点

3.1　配合比设计原则

路床/底基层：优先选用4%石灰+ 路邦固化剂，经济性好、后期强度高、水稳性优。

底基层：2%水泥+3%石灰+路邦固化剂，兼顾早期强度与耐久性。

基层：3%水泥+3%石灰+路邦固化剂，满足重载交通高强度需求。

3.2　施工关键控制参数

压实度：路床≥93%，底基层≥95%，基层≥97%，分层碾压、逐层检测。

含水量：控制在最佳含水量+1%~+2%，拌合前检测、及时调整。

石灰掺量：底基层4%~6%，基层5%~7%，计量精准、拌合均匀。

养护期：保湿养护不少于7 d，重载道路宜延长至14 d，禁止早期行车。

3.3　质量检测与验收

以无侧限抗压强度为核心指标，同步检测压实度、含水量、石灰（水泥）剂量。7 d强度满足：底基层≥0.8 MPa，基层≥2.0 MPa；28 d强度较7 d增幅不低于20%，确保长期性能稳定。

4　结　语

（1）固化土无侧限抗压强度与压实度呈线性正相关，压实度每提高1个百分点，强度增幅5%~12%，

表4　无侧限抗压强度和石灰含量的关系

配比	编号	高度/mm	制作时重/g	浸水前重/g	浸水后重/g	压力计读数	抗压强度/MPa	平均值/MPa
3%石灰	6-1	51.48	211.5	210.2	212.7	15.5	0.87	0.86
	6-2	51.36	212.5	211.1	213.3	15.0	0.84	
4%石灰	7-1	51.32	213.5	212.8	215.1	19.0	1.07	1.07
	7-2	51.34	214.0	213.0	215.2	19.0	1.07	
5%石灰	8-1	51.20	213.8	213.1	216.0	20.5	1.15	1.20
	8-2	51.54	213.9	213.1	216.0	22.0	1.24	
6%石灰	9-1	51.54	212.1	211.0	214.2	23.5	1.32	1.46
	9-2	51.30	215.4	214.6	217.9	28.5	1.60	
7%石灰	10-1	51.20	218.3	217.6	220.9	25.5	1.44	1.48
	10-2	51.24	216.7	216.5	219.9	27.0	1.52	
9%石灰	1-1	52.60	216.9	216.3	219.7	26.0	1.46	1.53
	1-2	52.20	217.0	216.4	219.8	28.5	1.60	
11%石灰	2-1	52.60	218.0	217.7	221.1	32.2	1.81	1.65
	2-2	52.10	217.0	216.8	220.3	26.5	1.49	
13%石灰	3-1	51.90	213.2	212.5	216.1	30.5	1.72	1.73
	3-2	52.00	216.2	215.5	219.2	31.0	1.75	

施工中严格压实控制是保障工程质量的核心。

（2）强度随养护龄期持续增长，石灰+路邦固化剂体系后期强度增长显著，28 d 较 7 d 增幅近 60%，长效性能突出。

（3）含水量约 18.0% 时强度达峰值，与规范要求区间一致，为现场含水量管控提供直接依据。

（4）石灰含量 3%~13% 范围内强度递增，低于 6% 时增幅显著，高于 6% 后趋缓，推荐底基层 4%~6%、基层 5%~7%。

（5）路邦-1 离子型固化剂适配软土地区重载道路，可替代传统石灰土、水泥稳定土，降低造价、缩短工期、提升耐久性，具备良好推广价值。

参考文献：

[1] JTG E40—2007 公路土工试验规程 [S].

[2] JTG E51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程 [S].

[3] 季节，梁犇，韩秉烨. 中国道路工程中土壤固化技术综述[J]. 交通运输工程学报，2023，23（2）：47-66.

[4] 蒋明烨，胡贺松，梁湖清. 土壤固化剂的研究及其工程应用进展[J]. 广州建筑，2024，52（8）：1-6.

[5] 许大鹏，朱剑锋，汪正清. NB01 固化剂固化建筑渣土路基填料的适宜性试验研究[J]. 岩土工程技术，2024，38（5）：605-610.

[6] 王亮，李进军，徐超. 离子型土壤固化剂加固软土路基试验研究[J]. 岩土力学，2021，42（增刊 1）：112-118.

[7] 陈惠发，段炼. 土力学与基础工程[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2018.

[8] 张超，王选仓，李宁. 土壤固化剂稳定土基层路用性能研究[J]. 公路，2020，65（3）：187-192.

[9] 刘全伟，杨晓华. 复合固化剂加固软弱土的机理与工程应用[J]. 长安大学学报（自然科学版），2019，39（4）：23-30.

[10] GB 50123—2019 土工试验方法标准 [S].

[11] 李鹏飞，赵筑北，王艳. 重载道路固化土基层配合比优化及性能评价[J]. 城市道桥与防洪，2022（7）：223-226.

[12] 周志刚，郑健龙. 道路工程材料[M]. 北京：人民交通出版社，2019.

[13] 陈明，王雪平. 软土地区市政道路路基固化处理技术[J]. 市政技术，2023，41（3）：156-160.

[14] 张伟，王志强. 石灰-固化剂复合加固路基土强度特性及微观机理[J]. 科学技术与工程，2022，22（28）：117-122.

[15] 赵军，李建兵. 土壤固化剂在道路工程中的应用现状与发展趋势[J]. 交通科技，2020（4）：89-93.

（上接第 62 页）

江西省公路学会宜春市公路事业发展中心袁州分中心，2025.

[3] 任泽. 河北省高速公路路面使用性能衰变规律研究[J]. 交通科技与管理，2025，6（20）：173-175.

[4] 于明明，任仲山，于书恒. 基于随机森林的高速公路路面使用性能预测模型[J]. 黑龙江交通科技，2025，48（10）：1-7；12.

[5] 金添，李小红，易岳林，等. 刚柔复合式沥青路面车辙性能影响及预测研究[J]. 交通科技，2025（5）：13-17.

[6] 孙航. 车辆荷载作用下新旧路基差异沉降规律与累积沉降预测研究[D]. 扬州：扬州大学，2025.

[7] 褚丽晶. 高等级公路沥青路面性能预测模型及评价体系研究[J]. 四川水泥，2025（8）：221-222；243.

[8] 胡鹏坤. 实际服役条件下沥青路面平整度与车辙演变规律及预测模型[D]. 北京：北京建筑大学，2025.

[9] 束景晓，李俊，张海，等. 多场景下的高速公路路面性能预测及应用研究[J]. 公路，2026（4）：378-385.

[10] 韩昱，王祯国，赵晓晋. 多维数据融合下高速公路工区级路面养护区段与对策优化[J]. 公路，2026（4）：359-369.

[11] 肖祁南，王硕. 基于高速公路路面检测数据的路面性能衰变模型设计[J]. 市政技术，2026，44（3）：42-50.

[12] 林伟，林振华，艾小娟. 高速公路沥青路面病害预测与性能衰减建模研究[J]. 交通节能与环保，2025，21（6）：151-155.

[13] 黄祯敏，张伟，王斯倩，等. 江西省高速公路路面抗滑性能因素水平分析及预测模型研究[J]. 公路交通技术，2025，41（6）：87-93.

[14] 王红辉. 基于 LSTM 神经网络的沥青路面抗滑性能预测[J]. 城市道桥与防洪，2025（7）：291-297.

[15] 王翌翔，蔡婧. 基于灰色系统理论的高速公路沥青路面路用性能预测[J]. 黑龙江交通科技，2025，48（6）：98-103.