

软土路基原位固化施工工艺与工程性能研究——以无锡钱胡快速路项目为例

陈磊¹ 於亮¹ 夏涛² 刘文化^{3*}

1. 无锡市城市重点建设项目管理中心, 江苏 无锡 214000
2. 纳思同(江苏)高科技发展有限公司, 江苏 无锡 214000
3. 江南大学 纤维工程与装备技术学院, 江苏 无锡 214000

[摘要]针对长江三角洲地区城市道路建设中广泛分布的软弱地基问题,传统地基处理方法普遍存在施工周期长、成本高及环境扰动大的不足,原位固化技术因其施工效率高、经济环保等优势,逐渐成为软土路基处理的重要手段。以无锡市钱胡快速路西延工程为依托,系统研究了软土路基原位固化处理的材料配合比、施工工艺及工程性能。通过室内配合比试验确定合理的固化剂掺量,并在现场采用强力搅拌设备实施原位固化施工,对固化效果进行强度、弯沉及承载力等多指标检测评价。结果表明,在含水率约60%的工况下,固化剂掺量为湿土质量的8%时,原位固化土7d无侧限抗压强度即可满足设计28d强度要求,表现出显著的快硬早强特性;现场检测结果显示,处理后地基弯沉小、承载力高、变形均匀,整体工程性能良好。研究成果验证了原位固化技术在软土路基处理中的适用性与可靠性,可为类似地区城市道路软土地基工程提供参考。

[关键词]软土路基; 原位固化; 施工工艺; 工程性能; 道路工程

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18611 中图分类号: TU472 文献标识码: A

Study on In-situ Stabilization Construction Technology and Engineering Performance of Soft Subgrade — A Case Study of Qianhu Expressway Project in Wuxi

CHEN Lei¹, YU Liang¹, XIA Tao², LIU Wenhua^{3*}

1. Wuxi City Urban Key Construction Projects Management Center, Wuxi, Jiangsu, 214000, China
2. Leistung (Jiangsu) High-tech Development Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214000, China
3. School of Fiber Engineering and Equipment Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu, 214000, China

Abstract: Soft soil foundations are widely distributed in the Yangtze River Delta region, posing significant challenges to urban road construction due to their high water content, low bearing capacity and large compressibility. Conventional ground improvement methods often suffer from long construction periods, high costs and considerable environmental disturbance. In-situ stabilization technology, which improves soil properties by mechanically mixing stabilizing agents with in-place soil, has attracted increasing attention owing to its efficiency and environmental benefits. Based on the western extension project of Qianhu Expressway in Wuxi, this study systematically investigates the mix proportion design, construction process and engineering performance of in-situ stabilized soft subgrade. Laboratory tests were conducted to determine the optimal dosage of the stabilizing agent, followed by full-scale field application using powerful mixing equipment. The performance of the treated subgrade was evaluated through unconfined compressive strength tests, deflection measurements and plate load tests. The results indicate that when the water content is approximately 60% and the stabilizer dosage is 8% by mass of wet soil, the 7-day unconfined compressive strength of the stabilized soil meets the design requirement specified for 28 days, demonstrating excellent early strength development. Field test results further confirm that the treated subgrade exhibits low deflection, high bearing capacity and uniform deformation. The study demonstrates that in-situ stabilization is an effective and reliable technique for soft subgrade treatment in urban road engineering, providing valuable reference for similar projects.

Keywords: soft subgrade; in-situ stabilization; construction technology; engineering performance; road engineering

引言

随着我国城市化进程加快,城市道路建设面临越来越多的软土地基处理难题^[1-3]。无锡钱胡快速路作为无锡市“两环十四射三联”快速路网体系的重要组成部分,其西延工程地处长江三角洲太湖冲湖积平原,场地广泛分布杂填土、淤泥质填土等软弱土层,具有含水量高、压缩性大、承载力低等特点,传统地基处理方法存在成本高、工期长、环境影响大

等弊端。原位固化技术通过将固化剂与原地基土就地搅拌混合,利用固化剂的物理化学反应改善土体工程性质,具有施工简便、经济环保等优势,特别适用于城市软土地基处理^[4-6]。

本文以江苏省无锡市钱胡路西延工程为背景,系统研究原位固化技术的材料配比、施工工艺与质量控制方法,通过系统的现场试验与检测,验证该技术在软土路基处理中的适用性与可靠性,为类似工程提供技术参考。

1 工程概况与地质条件

1.1 工程概况

钱胡路西延工程位于江苏省无锡市滨湖区，总体呈东西走向，西起陆马公路，东至大河绛路，全长约400m。作为钱胡路快速路先导段，设计结合钱胡路远期快速化确定，道路宽度为40m，双向6车道，道路等级为钱胡路快速路先导段，技术指标按城市次干路兼二级公路标准设计，设计速度为50公里/h。

1.2 地质条件

地貌单元为长江三角洲太湖冲湖积平原。场地地势整体较平坦、局部存在堆土略有起伏，地面标高在3.99~7.51m之间。本项目勘察区域主要土层包括：①1层杂填土：杂色松散，软塑，厚度约1.3~4.3m，性能极差；②3层淤泥质填土：灰黑色，流塑状，厚度约1.57m，性能极差；③1层粉质黏土：灰黄色硬塑，压缩性中偏低，性能较好；④2层粉质黏土夹粉土：灰黄至黄灰色可塑，压缩性中偏高，性能一般；⑤1层粉质黏土：灰色软塑至流塑，压缩性高，性能较差；⑥1层粉质黏土：灰黄色硬塑，含铁锰质，压缩性中偏低，性能较好。

整体来看，场地土层表现为“上差中一般下较好”的特征，上部杂填土与淤泥质填土地质性能极差，施工难度大、风险高。根据道路功能区划，对K0+180~设计终点段范围内软土路基进行原位固化处理，处理深度2.2m，固化软土28d设计无侧限抗压强度 $\geq 0.8\text{MPa}$ 。

2 原状土工程特性研究

2.1 基本物理性质

对钱胡路项目原状土进行系统测试，结果表明：原状土最大干密度 1.872g/cm^3 ，最优含水率14.9%；液限44.77，塑限24.77，塑性指数20，属低液限黏土(CL)；pH值8.52，呈弱碱性；有机质含量0.672%，含量较低。

2.2 颗粒组成与矿物成分

激光粒度分析显示，黏粒含量达37.90%，粉粒与黏粒含量总和达99.99%，土颗粒极细。XRF分析表明，土体中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主要氧化物，同时含有较高的 Na_2O 和 K_2O 。XRD分析确认主要矿物成分为石英，含云母、长石等矿物。

2.3 化学特性

阳离子交换量(CEC)测定值 $25.6\text{cmol}^+/kg$ ，与黏粒含量高相符；硫酸盐含量 0.42g/kg ，处于较低水平；重金属等污染物含量远低于规范限值，可不经额外稳定化处理直接应用。

3 原位固化配合比试验

采用纳思同(江苏)高科技发展有限公司提供的LST-FR型软土固化剂，根据强度设计指标，设计了4组配合比，如表1所示。强度试样尺寸为 $70.7\text{mm}\times 70.7\text{mm}\times 70.7\text{mm}$ ，试样成型后经标准养护7d和28d后测定其对应龄期时的无侧

限抗压强度以评估固化性能。

表1 地基原位固化配合比

组号	钱胡路干土	LST-FR	含水率
钱胡路土+6FR	1	6%	60%
钱胡路土+7FR	1	7%	60%
钱胡路土+8FR	1	8%	60%
钱胡路土+10FR	1	10%	60%

注：含水率是水与干土的质量比，原位固化剂LST-FR的掺量是与干土和水总质量的质量比。

原位固化试验结果如图1所示。由图1可知，在60%含水率下，当固化剂掺量为湿土重的7%时已可满足设计要求(28d强度大于800kPa)。考虑到施工引起的材料浪费及性能损失，经室内试验验证，推荐实际施工时的固化剂LST-FR掺量为8%。

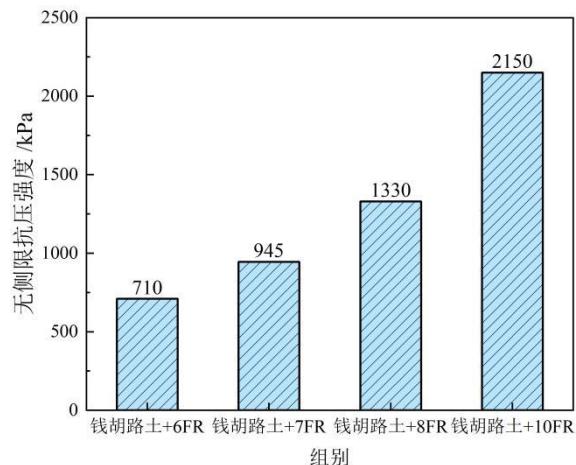


图1 原位固化强度试验结果

4 原位固化施工工艺

4.1 原位固化场地概况

经现场踏勘发现，试验段内原状土中存在部分场地的地表层为中低含水率的杂填土，如图2所示。经综合考虑工期、固化成本、场地面积、环保等因素，采用强力搅拌设备对原状的软弱地基土进行原位固化处治。基于初步踏勘与计算，需原位固化处治的软弱土层平均厚度约2.2m，总工程量约8500方。



图2 钱胡路原位固化场地情况

4.2 原位固化技术路线

在进行前期室内试验进行合理的方案论证后,采用如下工艺过程对钱胡路软弱地基进行就地固化: 场地预翻松处理、材料与设备就位、固化剂调浆与供给、强力搅拌设备原位拌合作业、平板振动整平表层、制备伴随试件、覆膜洒水养护、平地机场地标高调整等工序。

4.3 场地土预翻松处理

如图 3 所示, 原位固化作业前, 需使用挖掘机将待固化原状软弱土翻松, 同时剔除超粒径的大石块, 以便后续强力搅拌设备进行固化作业。



图 3 场地土预翻松处理

4.4 固化材料与设备就位

依据原位固化作业的现场情况开展作业面布置及固化剂存储及造浆系统组装, 如图 4 所示。设备就绪后, 安排固化剂进场并泵送至粉料存储罐中。



图 4 钱胡路项目原位固化施工系统

4.5 固化剂调浆与供给

正式施工时, 经专业搅拌设备将固化剂按设计比例(固化剂: 水=1:1.5)调配成固化剂浆液, 再经由专门的高压泵送系统供应至原位强力搅拌头中, 以在强力搅拌设备开展旋切搅拌作业时实现固化剂与原状软弱土的良好混合。

4.6 强力搅拌设备原位拌合施工

调配并顺利供应固化剂浆液后, 即可采用原位强力搅拌设备(阿鲁头)开展原位固化作业, 如图 5 所示。通过阿鲁头的强力旋切以及上下往复式搅拌, 在固化剂连续供应的情况下, 可以实现固化剂与原状软弱土的良好混合, 继而实现原状软弱土的固化改性。实际施工前进行了工艺验证试验, 最终确定以下施工参数: 强力搅拌头的轴横转

速为 80~100r/min, 挖掘机的液压驱动力 32~36MPa, 固化剂浆液供料压力 3.5MPa; 强力搅拌头垂直上下搅拌并喷射固化剂浆液, 对现场 2.2m 深度区域垂直划分 3 段, 每个搅拌区块的每个垂直段范围内软土上下搅拌次数 3 次, 强力搅拌头的升降速率 0.1m/s。



图 5 强力搅拌设备原位拌合施工作业

4.7 平板振动器收面

如图 6 所示, 在原位强力搅拌作业结束后, 立即采用平板振动夯实设备收紧、整平表层固化作业面。



图 6 平板振动器收面施工作业

4.8 强度伴随试件制备

为同步评估场地固化效果, 现场固化作业时由专业技术人员进场制备边长为 70.7mm 的立方体试件。伴随试件同现场条件养护, 并在指定龄期内由第三方检测单位进行测试, 以作为现场固化质量的初步评判依据。

4.9 覆盖土工布并洒水养护

考虑到现场作业期间温度较高(基本在 35°C 以上), 原位固化作业结束达到可上人状态时(约 4~5h)对作业场地进行土工布覆盖并洒水养护, 如图 7 所示, 固化区域养护 3d 后可开放设备通行。



图 7 土工布覆盖与洒水养护

4.10 场地标高修整

由于原状土被扰动，原位固化后场地实际标高较设计标高 20~30cm，场地交付前采用铣刨机对原位固化场地进行标高修整，如图 8 所示。



图 8 铣刨机对场地标高进行修整

5 工程质量检测与评估

原位固化作业结束后经实地踏勘表明，原位固化处治 4~6h 后的固化作业区已满足可上人条件。经铣刨机进行场地标高修整后，硬化场地平整、质地坚硬有光泽，固化效果理想。

无锡公建工程质量检测有限公司现场取土和固化剂，按施工配合比通知单中推荐的配比开展了原位固化土配合比验证试验。试验结果表明，本次钱胡路原位固化土在含水率 60% 时其 7d 无侧限抗压强度为 0.92MPa，已达到设计文件中所规定的 28d 龄期时 0.8MPa 的设计要求，表现出了明显的快硬早强特性。原位固化土的强度随龄期持续发展，其 28d 强度约为 7d 强度的 1.3 倍。

无锡公建工程质量检测有限公司采用贝克曼梁法对原位固化场地进行了弯沉检测，如图 9 所示。检测结果表明，原位固化场地的弯沉代表值为 55.39 (0.01mm)，远低于设计值 180 (0.01mm)，说明本项目所实施的原位固化结构刚度大、强度高，承载能力强，在车轮荷载下变形小，不易损坏。



图 9 原位固化场地弯沉检测（贝克曼梁法）

无锡公建工程质量检测有限公司采用浅层平板载荷试验法对原位固化场地进行了承载力检测，选取了三处具有代表性的区域，逐级施加荷载直至 600kPa（约为设计承载特征值 250kPa 的 2.4 倍），以充分评估地基的安全储

备和变形特性，检测过程如图 10 所示。检测结果表明，在最大试验荷载下，三块检测区域的最大沉降量仅为 8.41mm~10.82mm，变形量小且均匀，表明原位固化后的地基整体刚度高、压缩性低。卸载后，地基表现出良好的回弹特性，回弹量介于 1.22mm~3.69mm 之间，回弹率达 11.28%~39.38%。该数据表明，地基土体不仅强度高，还具有一定的弹性恢复能力，塑性变形得到了有效控制。试验荷载-沉降曲线呈缓变型，未出现陡降段，地基承载力特征值远高于设计要求的设计值 250kPa。检测结果充分证明，该原位固化地基处理效果显著，承载力与变形指标完全满足项目设计及安全要求。



图 10 原位固化场地承载力检测（浅层平板载荷试验法）

4 结语

(1) 针对无锡钱胡快速路西延工程中软弱地基分布广、含水量高、工程性能差的问题，采用原位固化技术对软土路基进行处理，通过室内试验与现场应用相结合的方式，系统验证了该技术在工程中的可行性与有效性。

(2) 室内配合比试验结果表明，在含水率约 60% 的条件下，当固化剂掺量为湿土质量的 8% 时，原位固化土可在 7d 龄期内达到并超过设计要求的 28d 无侧限抗压强度，表现出显著的快硬早强特性，为缩短工期提供了有力支撑。

(3) 现场施工与检测结果显示，原位固化处理后的地基具有较高的整体刚度和承载能力，弯沉值和沉降量均显著低于设计控制指标，变形均匀，工程性能稳定，能够满足城市快速路路基结构的使用要求。

(4) 研究成果表明，原位固化技术在软土路基处理中具有施工简便、质量可控、经济环保等综合优势，适用于类似软土地区的城市道路工程，对推广原位固化技术在市政及相关工程领域的应用具有一定的工程参考价值。

[参考文献]

- [1] 王君. 软土地基原位固化技术试验与应用研究 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(15):12-15.

- [2] 郭猛,周世宗,魏洁,等.原位固化技术处理滨海浅层软土应用研究[J].建筑技术,2025,56(8):1015-1018.
- [3] Yonghui Chen, Shihu Gao, Long Chen. Laboratory and field test study on the improvement of marine clay slurry by in-situ solidification [J]. Marine Georesources & Geotechnology,2018,37(6):1-9.
- [4] 喻海波.软土路基加固施工中工业废渣基固化剂的应用 [J].交通世界,2024(19):39-41.
- [5] 胡志明,王子帅,张艳林,等.粉煤灰联合水泥原位固化软土现场试验研究[J].中国港湾建设,2024,44(5):40-47.
- [6] 徐亮,唐彤芝,白兰兰,等.就地固化技术处理浅层软土的应用及机理研究[J].水利水运工程学报,2021(2):109-116.
- 作者简介: 陈磊 (1980—), 男, 汉族, 江苏无锡人, 本科, 研究方向: 工程施工技术与项目管理; *通讯作者: 刘文化 (1987—), 男, 汉族, 江西吉安人, 博士, 副教授, 研究方向: 固废资源化利用。