

道路施工中土基改良与路面加固技术应用

刘玉龙 丁德鑫

山东高速路桥国际工程有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i4.20293

[摘要] 道路工程建设中,软土路基处理一直是制约工程质量与成本的关键难题,尤其是高含水率软土路段,传统处理方法存在成本高、污染大等弊端。京杭运河二通道海宁段工程面临大量深度达40~50m的高含水率软土,项目引入“软土路基低碳化加固与智能监测技术”,利用工业固废制成绿色胶凝材料替代传统材料,采用就地固化工艺及轻质固化土桩技术,搭配精准检测装备,有效降低了工程成本与碳排放,提升了路基承载力,减少了沉降量,实现了软土路基低碳化处理与路面结构安全保障的双重目标。

[关键词] 高速公路; 桥面混凝土; 施工工艺优化; 耐久性

中图分类号: U412.36+6 **文献标识码:** A

Application of Soil Base Improvement and Pavement Reinforcement Technology in Road Construction

Yulong Liu Dexin Ding

Shandong Hi-Speed Road & Bridge International Engineering Co., Ltd.

[Abstract] In road engineering construction, the treatment of soft soil subgrades has always been a key challenge restricting project quality and cost. This is especially true for sections with high-moisture-content soft soil, where traditional treatment methods suffer from drawbacks such as high costs and significant pollution. The Hangzhou Section of the Second Channel of the Beijing-Hangzhou Grand Canal project faced a large volume of high-moisture-content soft soil reaching depths of 40 to 50 meters. The project introduced the "Low-carbon Reinforcement and Intelligent Monitoring Technology for Soft Soil Subgrade." By utilizing industrial solid waste to produce green cementitious materials as a substitute for traditional materials, adopting in-situ solidification processes and lightweight solidified soil pile technology, and incorporating precise detection equipment, the project effectively reduced engineering costs and carbon emissions. It also enhanced subgrade bearing capacity and minimized settlement, achieving the dual goals of low-carbon treatment of soft soil subgrades and ensuring the safety of the pavement structure.

[Key words] Expressway; Bridge Deck Concrete; Construction Process Optimization; Durability

1 引言

随着交通基础设施建设的不断推进,道路工程对土基与路面的承载能力、稳定性提出了更高要求,尤其是在软土分布广泛的区域,土基强度不足、路面易破损等问题频发,严重影响道路使用寿命与通行安全。高含水率软土因其承载力低、沉降量大的特性,给道路施工带来极大挑战,传统换填等处理方法不仅成本高昂,还会产生大量环境污染,不符合低碳工程建设理念。土基改良与路面加固技术的科学应用,能够有效改善软土工程性质,提升路面结构稳定性,降低工程运维成本,对推动道路工程高质量、低碳化发展具有重要现实意义。

2 项目概况

京杭运河二通道海宁段工程因航道开挖产生大量高含水率

软土,最大深度达40~50m,传统换填方法成本高、污染大。为此,项目引入南京工业大学吴志坚团队研发的“软土路基低碳化加固与智能监测技术”。该技术利用工业固废(冶炼渣、粉煤灰)及电石渣制成绿色胶凝材料,替代传统水泥、石灰,生产降碳率达92%,成本降低超25%。施工中采用就地固化工艺,将软土切碎、研磨后现场拌和,直接转化为合格路基填料,节约工程成本超70%。对承载力要求高的路段,进一步引入轻质固化土桩,减少附加应力50%,沉降量缩小23%。

3 道路施工中土基改良关键技术及应用

3.1 土基改良原材料选型与配合比优化技术

在京杭运河二通道海宁段软土路基改良工程中,原材料选型需严格结合当地软土高含水率、低强度、高压缩性的核心特

性, 优先选用绿色环保且性价比高的工业固废及专用改良材料, 杜绝选用易产生二次污染、与软土适配性差的原材料。施工单位选用冶炼渣、粉煤灰作为主要掺合料, 搭配电石渣制备绿色胶凝材料, 其中冶炼渣选用粒径范围为0.075~5mm的级配颗粒, 粉煤灰采用II级粉煤灰, 烧失量控制在8%以内, 电石渣的有效氧化钙含量不低于60%, 三者均经过严格的筛分、烘干处理, 去除杂质及有害成分后备用^[1]。配合比优化需通过室内试验与现场试拌相结合的方式开展, 针对当地含水率为35%~45%的软土, 确定绿色胶凝材料与软土的质量比为1:8.5, 其中冶炼渣、粉煤灰、电石渣的配合比为4:3:3, 同时掺入0.3%的高效减水剂, 改善混合料和易性, 掺入0.05%的缓凝剂, 延长初凝时间至4小时, 确保施工衔接顺畅。优化后的混合料无侧限抗压强度达1.2MPa, 满足路基填料设计要求, 且降碳率达92%, 相比传统水泥改良材料成本降低25%以上, 既实现了工业固废资源化利用, 又兼顾了工程质量与低碳环保目标。

3.2 换填改良技术及施工工艺要点

施工前先采用全站仪精准放线, 确定换填范围, 换填宽度比设计路基宽50cm, 避免路基边缘压实不足, 随后采用挖掘机分层开挖, 每层开挖深度控制在1.2m, 开挖过程中采用轻型井点降水, 将地下水位降至开挖面以下0.5m, 防止开挖过程中软土坍塌^[2]。换填材料选用级配良好的碎石土, 碎石粒径控制在5~31.5mm, 含泥量不超过3%, 分层摊铺厚度为30cm, 摊铺后采用重型压路机碾压, 碾压速度控制在2.5km/h, 碾压次数不少于6遍, 前3遍采用慢压轻振模式, 后3遍采用快压强振模式, 碾压完成后采用环刀法检测压实度, 要求压实度不低于96%。换填施工过程中, 每完成一层换填、碾压及检测后, 方可进行下一层施工, 对于换填深度超过5m的路段, 在换填层底部铺设一层厚度为20cm的土工格栅, 格栅抗拉强度不低于15kN/m, 有效增强换填层整体性, 减少后期沉降, 换填完成后路基承载力提升至180kPa以上, 完全满足道路施工设计标准, 如图1所示。



图1 换填改良技术及施工工艺要点

3.3 夯实挤密型土基改良技术

对于京杭运河二通道海宁段软土分布较均匀、含水率适中(28%~35%)的路段, 施工单位采用夯实挤密型土基改良技术, 通过机械夯实的方式挤压软土孔隙, 排出孔隙水, 提高土基密实度和承载力, 同时掺入适量改良材料进一步提升土基稳定性^[3]。施工前先对施工区域进行平整, 清除地表杂草、杂物及浮土, 采用轻型动力触探仪检测原土基承载力, 针对承载力低于80kPa的区域, 重点进行夯实挤密处理。夯实过程中, 土基孔隙比与干密度的核心关联公式如下, 用于量化改良效果:

$$e = \frac{p_s}{p_d} - 1$$

式中: e 为土基孔隙比; p_s 为土颗粒密度(g/cm^3), 本工程软土 $p_s = 2.7 \text{g}/\text{cm}^3$; p_d 为土基干密度(g/cm^3)。夯实采用重锤夯实法, 重锤质量为12t, 锤底直径为1.5m, 落距控制在3.5m, 夯实点采用梅花形布置, 间距为1.8m, 每个夯实点连续夯实4遍, 第一遍和第二遍采用全锤重夯实, 第三遍和第四遍采用半锤重复夯, 确保夯实深度达到2.5m。夯实过程中, 每夯实一遍后采用水准仪检测地面沉降量, 要求每遍沉降量不超过20mm, 夯实完成后在土基表面铺设一层厚度为15cm的石灰土垫层, 石灰掺量为8%, 采用小型压路机碾压密实, 压实度控制在95%以上, 如表1所示。

表1 夯实挤密型土基改良技术夯实参数

夯实参数	具体数值	施工要求	检测指标
重锤质量	12t	采用重锤夯实法, 确保锤底平整	夯实深度 $\geq 2.5\text{m}$
锤底直径	1.5m	锤底无破损、无变形	每遍沉降量 $\leq 20\text{mm}$
落距	3.5m	落距均匀, 避免偏锤	压实度 $\geq 95\%$
夯实点间距	1.8m	梅花形布置, 间距均匀	孔隙比 ≤ 0.95
夯实遍数	4遍	前2遍全锤重, 后2遍半锤重	干密度 $\geq 1.7 \text{g}/\text{cm}^3$

3.4 注浆加固型土基改良技术

注浆材料选用水泥-水玻璃双液注浆材料, 其中水泥采用42.5级普通硅酸盐水泥, 水玻璃浓度为35°Be', 水泥与水玻璃的体积比为1:0.8, 注浆液水灰比为0.55, 同时掺入0.2%的注浆剂, 提高注浆液的流动性和胶结强度^[4]。注浆施工采用分段注浆法, 注浆孔采用地质钻机钻孔, 钻孔直径为110mm, 钻孔深度比设计加固深度深0.5m, 注浆孔采用正方形布置, 间距为2.2m, 注浆压力控制在0.8~1.2MPa, 注浆速度为20L/min, 每段注浆长度为2m, 注浆完成后稳压30min, 确保注浆液充分填充孔隙。注浆过程中采用注浆记录仪实时监测注浆压力、注浆量等参数, 避免出现漏浆、冒浆现象, 注浆完成7天后, 采用标准贯入试验检测加固效果, 要求加固后土基承载力不低于200kPa, 压缩模量提升至25MPa以上, 有效解决了深层软土加固难题, 为路面结构施工提供了坚实的土基基础。

4 道路施工中路面加固关键技术及应用

4.1 路面基层加固技术及工艺规范

京杭运河二通道海宁段完成土基改良后, 路面基层加固兼顾低碳与稳定性, 采用绿色胶凝材料搭配级配碎石制备混合料, 替代传统单一水泥基层。施工前清理土基顶面浮土, 用3m直尺检测平整度, 误差控制在3mm内, 喷洒0.8mm厚乳化沥青透层油, 喷洒量0.7~0.9L/m², 确保渗透深度 $\geq 5\text{mm}$ 。基层混合料中绿色胶凝材料掺量8%, 级配碎石粒径5~31.5mm、含泥量 $\leq 2\%$, 水胶比0.45~0.50, 强制式拌和不少于90s。摊铺机匀速摊铺(2.0~2.5m/min), 虚铺厚度增加5%, 重型压路机碾压至压实度 $\geq 97\%$, 碾压速度1.5~2.8km/h、不少于8遍。碾压后覆盖洒水养护 ≥ 7 天, 养

护完成后基层7天无侧限抗压强度 ≥ 3.5 MPa,为面层施工提供支撑。

4.2 路面面层加固与修复技术

施工单位先对养护合格的基层顶面进行检测,确认基层平整度、压实度符合要求后,喷洒一层粘层油,粘层油选用SBS改性乳化沥青,喷洒量控制在 $0.3\sim 0.5$ L/m²,喷洒后静置30min,待粘层油破乳后再进行面层摊铺。面层采用AC-13C型改性沥青混合料,沥青选用70号A级道路石油沥青,改性剂掺量为5%,混合料中粗集料选用玄武岩,粒径范围 $2.36\sim 13.2$ mm,细集料选用机制砂,含泥量不超过1%,填料采用矿粉,亲水系数小于1.0。混合料采用间歇式拌和机拌和,拌和温度控制在 $160\sim 170$ °C,拌和时间为 $45\sim 60$ s,出料温度不低于 155 °C。摊铺采用沥青摊铺机匀速作业,摊铺速度控制在 $2.2\sim 2.8$ m/min,摊铺温度不低于 150 °C,摊铺后采用双钢轮压路机与胶轮压路机联合碾压,双钢轮压路机碾压速度 2.0 km/h,胶轮压路机碾压速度 2.5 km/h,碾压次数共计9遍,碾压完成后面层压实度不低于98%,如表2所示。

表2 路面面层加固与修复施工环节参数

面层施工环节	关键参数	施工标准
粘层油喷洒	SBS 改性乳化沥青, 喷洒量 $0.3\sim 0.5$ L/m ²	静置 30min, 待破乳后摊铺面层
沥青混合料	AC-13C 型, 70 号 A 级沥青, 改性剂掺量 5%	无离析、无结块, 拌和均匀
集料要求	粗集料玄武岩 ($2.36\sim 13.2$ mm), 细集料机制砂 (含泥量 $\leq 1\%$)	级配均匀, 无杂质
拌和参数	温度 $160\sim 170$ °C, 时间 $45\sim 60$ s, 出料温度 ≥ 155 °C	沥青无老化, 混合料均匀
碾压参数	双钢轮 2.0 km/h, 胶轮 2.5 km/h, 共计 9 遍	压实度 $\geq 98\%$, 表面平整无轮迹

4.3 路面加固施工参数优化技术

施工单位先通过室内试验确定基层混合料的最佳配合比,针对不同路段土基承载力差异,将绿色胶凝材料掺量优化为 $7\%\sim 9\%$,水胶比优化为 $0.43\sim 0.52$,确保不同路段基层强度均能满足设计要求。面层施工中,优化沥青混合料拌和温度与摊铺速度,将拌和温度由传统的 $165\sim 175$ °C优化为 $160\sim 170$ °C,既降低能源消耗,又避免沥青老化,摊铺速度根据混合料供应速度优化为

$2.0\sim 2.8$ m/min,减少混合料离析现象。碾压参数优化中,将双钢轮压路机碾压初始速度由 1.2 km/h优化为 1.5 km/h,碾压遍数由传统的10遍优化为 $8\sim 9$ 遍,胶轮压路机碾压压力优化为 $3.5\sim 4.0$ MPa,有效提升碾压效率与压实效果。

5 结语

道路施工中土基改良与路面加固技术的合理应用,是解决软土路基难题、保障道路工程质量的核心举措,京杭运河二通道海宁段工程通过采用低碳化加固与智能监测技术,成功破解了高含水率软土处理的困境,在降本减碳、提升工程安全性方面取得了显著成效。该技术的应用不仅实现了工业固废的资源化利用,还推动了道路工程施工模式的绿色转型,未来应进一步优化技术参数,拓展技术应用场景,加强智能化监测与运维体系建设,推动土基改良与路面加固技术向更高效、低碳、智能的方向发展,助力交通基础设施建设高质量升级。

[参考文献]

- [1]孙媛媛.道路施工中土基改良与路面加固技术应用[J].工程机械与维修,2026,(02):125-127.
- [2]刘志华.高速公路路面加固防护与检测处理探究[J].工程抗震与加固改造,2025,47(04):189.
- [3]王伟.道路桥梁沉降段路基路面施工加固技术研究[J].交通世界,2024,(12):134-136.
- [4]曾鹏.混凝土路面加固沥青改性剂应用[J].运输经理世界,2023,(25):161-163.

作者简介:

刘玉龙(1997--),男,汉族,山东德州人,本科,现就职于山东高速路桥国际工程有限公司,助理工程师,研究方向工程技术-交通工程。

丁德鑫(1996--),男,汉族,山东济南人,本科,现就职于山东高速路桥国际工程有限公司,助理工程师,研究方向工程技术-交通工程。