

# 公路路基软基换填施工关键技术应用

林梓康

(广西路桥工程集团有限公司, 广西南宁 530200)

**摘要** 公路路基是交通系统的主要组成部分, 其施工质量关系到道路的稳定性和承载能力, 是保障交通系统安全、高效运行的关键基础。在公路路基施工过程中, 软土路基比较普遍, 多数软土路基需采取换填施工技术进行处理, 以有效改善力学性能, 确保其具备较高的承载力与稳定性。本文从软土路基特性出发, 采用有限元软件方法进行路基沉降场模拟分析, 选择换填材料级配优化、压实工艺改进的方式, 以提高软土路基换填施工效果。在该技术应用阶段, 通过现场使用智能压实监控系统并调整摊铺厚度参数, 选择动态化排水方案, 从而确保公路路基性能达到要求。结果表明, 公路路基软基换填施工技术应用效果明显, 经检验能使软土路基加固效果合格, 避免路基发生沉降问题, 对延长公路使用寿命有积极作用。

**关键词** 公路路基; 软基处理; 换填施工; 分层压实; 沉降控制

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.014

## 0 引言

公路路基为重要交通基础设施, 其安全性关系到整个道路的运行效果, 也是施工环节的重点。由于公路项目投入运营时间比较长, 路基存在呈现材料老化、施工缺陷等问题, 极易造成路基结构发生严重沉降缺陷、路基部分缺损而无法达到道路运行安全性要求。想要提高公路项目运行水平, 确保其达到安全性、可靠性标准, 需在路基施工前进行勘察与数值模拟, 进而确定软土路基所在位置, 再确定最佳施工处理措施。软土路基施工阶段, 通过换填法能提高路基结构稳定性、施工效率, 其在多种公路项目中都能有效应用<sup>[1]</sup>。本文选择某高速公路路段施工进行分析, 结合沉降计算确定最具风险性的路基施工部位, 再结合地层情况确定换填参数, 优化换填方法, 从而使软基换填效果合格, 为类似工程项目施工奠定基础。

## 1 工程概况

某高速公路项目设计为双向四车道, 其路基顶面高程 52.5 m, 最大填高 8.3 m, 路基顶宽 26.0 m, 设计时速 100 km/h, 总工程量 128 万 m<sup>3</sup>。该项目于 2023 年建设完成并投入使用, 因为长期投入运营, 对于公路结构已经产生较大破坏影响。在该项目地基勘测中发现, 有些位置存在松散夹层、沉降严重等情况, 无法保证公路项目运行稳定性要求。为确保本公路项目运行达到安全性, 采取除险加固措施提高路基结构的承

载力性能, 通过换填方法使基础深入硬土层以下 1.5 m, 换填厚度 0.6 m 以上, 换填长度 190 m, 从而保证路基结构性能达到要求。

## 2 路基沉降与稳定性分析

### 2.1 计算工况

通过对该项目路基沉降情况进行分析, 设定如下三种典型工况: 正常荷载工况, 水位 0 m; 设计车辆荷载工况, 荷载 15 kN/m<sup>2</sup>; 水位骤降工况, 水位从 2.0 m 下降到 0.5 m, 其参数见表 1。

表 1 计算工况

编号	类型	计算水位 / 荷载 (m/kN)
1	正常荷载工况	0
2	设计车辆荷载工况	15
3	水位骤降工况	2.0 → 0.5

### 2.2 断面及参数指标

根据该项目施工需求, 在现场选择最大填高断面进行二维有限元模型建设, 模拟水平向延伸至路肩以外 30 m, 竖向则至基岩下部 10 m。在现场地质勘测阶段, 通过注水试验确定土体渗透系数, 得出路基上部为  $1.2 \times 10^{-5}$  cm/s, 中部松散层达到  $3.5 \times 10^{-5}$  cm/s, 下部及基岩为  $1.0 \times 10^{-5}$  cm/s。通过数据计算得出, 在正常荷载以及车辆荷载工况下, 路基下游逸出点比降接近允许值; 路基所在位置水位突然下降时, 路基内

作者简介: 林梓康 (1999-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 公路工程。

浸润线下降后, 局部位置存在反向渗流风险, 需采取防渗措施以增强路基结构稳定性。

### 2.3 沉降计算结果分析

通过有限元软件模拟结果进行分析, 在该高速公路中的三种典型工况下进行沉降场分布计算与分析。在公路项目所处正常交通荷载作用下, 有些位置的路基浸润线平缓, 沉降路径较长, 下游逸出点位于排水棱体附近。经过测定后确定, 该位置水力比降 0.82, 已经接近于允许值 0.85。这表示该路基结构的防渗效果基本满足要求, 但不具备较大的安全裕度。而在该项目的车辆荷载工况作用下, 测定上游水位抬升至 47.2 m。路基浸润线整体上抬, 逸出点水力比降增大到 0.84。虽然这一参数未超出安全标准, 但在路基运行过程中因渗流量比较集中, 地下水对路基结构产生冲刷作用, 造成结构的性能损坏。而在有限元软件模拟最不利工况时, 主要分析路基水位骤降的冲刷风险。若库水位在短期内从 46.0 m 下降到 42.5 m, 路基土料渗透性较差, 内部孔隙水消散速度较慢, 容易造成浸润线超过当前库水位, 路基结构出现反向渗流现象而导致路基结构性能下降。该路段测定水力比降局部为 0.91, 明显超出安全范围。在有限元软件模拟计算后, 得出路基中部 8 ~ 10 m 高程内松, 散夹层由于渗透系数明显高于上下土层, 这就会在路基结构内部形成渗流通道, 从而出现渗漏严重现象。经过上述参数分析, 确定该高速公路路基最薄弱点, 并采取换填施工措施, 以增强路基结构性能, 保证路基各项安全性达到要求<sup>[2]</sup>。

## 3 公路路基软基换填施工关键技术应用

### 3.1 技术方案设计

通过对该工程路基有限元模拟结果的分析, 最终确定软基换填深度 0.8 m, 换填间距 2.0 m, 采用梅花型布孔方式, 并形成搭接厚度超过 0.6 m 的连续墙体。在连续墙体设计过程中, 应保证墙体深入地下岩层深度 1.5 m, 平均深度达到 18 m, 而换填施工所选材料为 P.042.5 普通硅酸盐水泥, 按照水灰比 1:1 制作。在现场换填施工阶段需考虑到软土路基特性, 确定合适的施工技术参数, 并对换填效果展开检测, 从而保证地下连续墙成型效果达到要求。

### 3.2 开挖作业

采用 XY ~ 150 型地质钻机钻孔, 钻机安装前用水平仪校正机体保证钻机机身铅垂, 钻杆偏斜小于或等于 1/100; 钻孔孔径为 110 mm, 孔距为 2.0 m, 布孔形式采用梅花形布孔方式共完成了 95 个灌浆孔(孔号从 1 ~ 95), 孔位偏差通过全站仪进行控制, 不超过  $\pm 3$  cm; 钻孔过程中分层记录地层情况, 并与勘察资料对比,

在孔深 8 ~ 10 m 处(路基中部位)都发现了松散土层, 厚度 1.2 ~ 2.0 m, 和前期的检测结果相吻合, 钻孔结束后利用孔口管临时封闭孔口, 避免孔壁坍塌。

### 3.3 换填材料装配

该项目路基换填施工阶段, 换填材料装配尤为重要, 需采取科学控制措施, 保证换填材料性能达到要求。第一, 接口密封升级。在换填材料装配阶段, 需选择双 O 型圈 + 遇水膨胀橡胶垫的方式形成密封结构, 并严格控制密封装置的螺栓紧固力矩, 使其达到  $80 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 并进行 0.8 MPa 水压试验, 确保在任何工况条件下不会造成渗漏问题。第二, 喷射角度校准。在换填材料施工前, 需对喷射角度进行校验, 其主要利用角度校准仪测定, 辅助使用激光定位仪、水平仪双向校验, 确保设备喷射角度偏差在  $\pm 0.5^\circ$  以内, 从而提高测量精度, 防止因为喷射角度偏移过大而影响换填效果。第三, 分段式管体设计。在本次换填施工阶段, 将传统喷射管道拆解成为长度 3 m 的模块化管体, 每段管子端部均设置定位凹槽和连接销, 并且在现场配置凹形槽快速对接、销钉固定, 进而保证现场安装效率提升, 且喷射过程中具备稳定性<sup>[3]</sup>。

### 3.4 分层压实灌浆

通过该项目前期试验确定的技术参数, 采用分层压实灌浆, 以提高地下连续墙结构施工效率和强度。第一, 变压力喷射控制。根据现场地层勘测结果, 根据示意图 1 确定喷射点位。路基表层 0 ~ 3 m 段喷射压力达 25 MPa, 能够快速进行土体稳定; 中部松散层深度 8 ~ 10 m, 将喷射压力提升到 32 MPa, 快速完成土体的搅拌均匀; 底部 15 m 以下压力下降到 28 MPa, 并保持该压力稳定喷射, 确保换填材料和路基结构充分混合均匀。第二, 浆液浓度动态调整。在换填材料施工过程中, 需在输送管道中安装在线浓度监测仪, 确保换填材料的浆液比重达到要求。如果系统监测发现浆液浓度在  $1.5 \text{ g/cm}^3$  以下, 则及时通知搅拌站进行调整, 按每立方米增加 50 kg 水泥比例添加; 如果系统监测浆液浓度超过  $1.6 \text{ g/cm}^3$ , 则需要在系统内自动补水进行浆液比重调节。第三, 全过程视频记录。在浆液喷射过程中, 通过设备安装高清摄像头, 通过孔口定位标尺进行喷射过程全面记录。在该环节根据各孔的喷射实际情况形成完善监测报告, 并掌握每道工序压力、浓度以及时间等信息, 再形成完善的检验记录, 为后续质量验收和追溯提供依据<sup>[4]</sup>。

### 3.5 封孔处理

该项目路基喷浆结束后, 进入封孔工序, 根据“分层回填、压力注浆、密实封闭”的方式完成分段注浆

封孔作业。在该环节需进行灌浆孔口的清掏工作,使用高压水枪将杂物、松散土层清理干净,确保孔壁具备稳定性和通畅性。而后使用浓浆置换方式处理,选择水灰比0.5:1的浓水泥浆从下到上循环置换,且置换时间超过10 min,确保孔口流出浓浆即可停止清孔作业。最后需进行分段压力注浆封孔,每次3 m为一个注浆段,采用纯压式注浆施工方式,将注浆压力设定为0.3~0.5 MPa。该环节保证注浆过程稳压5 min以上,确保封孔效果达到功能要求<sup>[5]</sup>。

该项目路基施工阶段受到冻融、干湿交替持续作用。根据以往经验,需在表层0.5 m深度内加入5%微膨胀剂,弥补水泥材料收缩作用,确保路基结构的粘结力达到要求。在该项目所有孔位全部注浆结束后,需在孔口位置设置长度超过1.0 m的混凝土封堵块,并使用C20细石混凝土浇筑施工,从而能有效封闭孔口,防止地表水从孔内漏下。在现场施工阶段对注浆效果进行检测,并且形成完善质量检测档案。施工结束后第七天,由技术人员检测现场是否存在裂缝、沉陷、渗水等情况,如果存在质量问题则及时进行补灌处理<sup>[6]</sup>。

#### 4 公路路基换填加固效果分析

##### 4.1 沉降监测分析

该项目公路路基在施工结束后,为能精准检验分层换填防渗墙施工效果,需构建完善监测网络,主要通过渗流量计、渗压计、测水管等进行各位置施工效果检测。而在现场检测过程中,需结合不同深度选择适宜检测技术和方法,从而了解路基结构内部渗流场变化情况。在监测作业阶段,主要从水库蓄水至正常蓄水位开始,对于路基的正常蓄水、设计洪水位、水位骤降工况监测,具体可见表2。加固后,在路基体布置8个渗压,埋深分别为5 m、8 m、10 m、12 m,监测浸润线变化。

表2 渗流监测结果

监测项目	工况条件	数据
路基浸润线高程	正常蓄水位 46.0 m	43.0 m
渗漏量	正常蓄水位 46.0 m	0.12 m <sup>3</sup> /h
路基浸润线高程	设计洪水 47.2 m	43.8 m
渗漏量	设计洪水 47.2 m	0.21 m <sup>3</sup> /h

##### 4.2 结构稳定性分析

该项目高速公路路基在加固施工结束后,为使水库在极端条件下不会对路基结构稳定性造成影响,需研究汛期、路基长时间高水位情况下的稳定性。从路基结构稳定性方面分析,主要从下游路基坡表面、防

渗墙完整情况、路基顶变化规律等方面展开检测。在现场路基稳定性检测的过程中,需组织人员对洪水形成过程进行全面巡视,并在现场安装高精度监测设备掌握路基沉降量以及水平位移量。在现场监测作业阶段,需检测路基是否出现局部塌陷、散浸、异常渗水、裂缝等问题,并以此作为基础判定路基结构施工效果是否达到工程要求。当此水库出现20年一遇洪水时(入库洪峰为95 m<sup>3</sup>/s、水位涨至46.8 m、时间持续48 h),通过结构稳定性分析可知(见表3)。

表3 结构稳结果分析

项目	监测条件	结果
遭遇洪水	汛期	洪峰 95 m <sup>3</sup> /s
水库水位	洪水期	46.8 m, 持续 48 h
下游路基坡 / 防渗墙	洪水后检查	无散浸、裂缝、渗漏
路基顶沉降 / 水平位移	洪水后检查	≤ 3 mm / ≤ 2 mm

#### 5 结束语

公路路基软基是比较常见的地质问题,其导致路基渗流问题发生,造成结构强度不足,无法满足道路通行需求。针对软基采取换填施工方式,使路基结构承载力和稳定性达到要求,发挥地下连续墙作用,有效阻隔渗流通道,以满足公路项目运行可靠性与稳定性要求。本文采用有限元软件分析方法,以实际工程案例作为基础,通过分层换填防渗墙施工方式,旨在有效缩短工期、降低成本、提高防水效果,满足公路路基软基换填施工需求,为现代公路事业的高质量发展做出贡献。

#### 参考文献:

- [1] 徐财琴. 开挖换填施工技术在市政道路软土路基处理中的应用研究[J]. 运输经理世界, 2021(16):31-33.
- [2] 张杜锋, 袁以堂, 吴春伟, 等. 高速公路改扩建软基换填拓宽段宽窄路堤判别范围分析[J]. 公路, 2022, 67(06): 46-51.
- [3] 温莲英. 砂石换填施工技术在软土路基加固处理中的应用研究[J]. 城市建筑, 2019, 16(26):171-173.
- [4] 陈伟康, 李翻翻, 张志峰. 泡沫混凝土换填处理低填道路下伏深厚软基的数值分析研究[J]. 广州建筑, 2023, 51(05): 9-12.
- [5] 高立勇, 张磊, 侯伟, 等. 基于软基换填的高速公路高填方路基沉降特性研究[J]. 山东交通科技, 2025(05):60-63.
- [6] 高婷婷. 粉喷桩联合水泥土换填在巢湖地区软土地基中的应用研究[J]. 水上安全, 2025(07):40-42.