

软基路段高速公路改扩建施工工艺创新与质量控制探讨

罗 甲

中交路桥华南工程有限公司 广东 中山 528400

摘 要：软基路段高速公路改扩建中，施工工艺创新与质量控制至关重要。工艺上，采用真空联合堆载预压优化、高性能泡沫轻质土填筑及微型桩+CFG桩复合地基等技术，提升软基固结效率与承载力。质量控制方面，构建全过程框架，包括施工前精细化地质详勘、施工中动态监测与调整、施工后长期健康监测，同时制定关键工序标准与质量风险预警机制，确保改扩建工程安全高效推进。

关键词：软基路段高速公路；改扩建施工；工艺创新；质量控制

引言：随着我国交通网络的持续拓展与升级，高速公路改扩建工程日益增多。软基路段因其地质条件复杂，在改扩建过程中面临诸多技术挑战，如新旧路基差异沉降、施工期稳定性风险等。传统施工工艺难以满足高质量建设需求，施工工艺创新与质量控制成为关键。本文聚焦于此，深入探讨软基路段高速公路改扩建的创新工艺，并构建科学的质量控制体系，为工程实践提供参考。

1 华南软基工程特性与改扩建技术挑战

1.1 华南软基地质特征

（1）区域地质分布：华南地区软土分布具有显著地域差异。珠三角区域以三角洲相软土为主，多为河流入海口长期沉积形成，土层厚度普遍达10-25m，含大量有机质及贝壳碎屑，土质不均；粤西地区软土以滨海相、泻湖相为主，主要分布于湛江、茂名等沿海城市，土层含黏粒含量高，夹薄层粉砂，易产生渗透变形；海南地区则以滨海相及沼泽相软土为主，东部沿海软土含水量极高，西部部分区域软土含腐殖质，工程性质极差，给基础工程建设带来极大挑战。（2）物理力学性质：华南软土普遍具备“三高两低”特性。含水量通常在40%-80%之间，部分沼泽相软土甚至超过100%，远高于液限；天然孔隙比多为1.2-2.0，压缩系数 α_{1-2} 普遍大于 0.5MPa^{-1} ，属于高压缩性土，在上部荷载作用下易产生长期沉降；抗剪强度极低，不排水抗剪强度仅10-25kPa，且灵敏度高，受扰动后强度大幅衰减，给工程稳定性带来严重隐患。

1.2 改扩建工程主要技术问题

（1）新旧路基差异沉降控制：既有路基沉降已基本完成，而新建路基在软基上将产生显著工后沉降，易形成数厘米的差异沉降，导致路面开裂、桥头跳车等病害，严重影响行车安全与道路耐久性。差异沉降会导致路面开裂、桥头跳车等问题，不仅影响行车舒适性，还

会缩短道路使用寿命，需通过地基处理、设置过渡段等技术手段控制差异沉降在允许范围内。（2）施工期稳定性风险：华南地区台风、暴雨频发，施工期间易引发软土地基失稳。强降雨会急剧升高软土含水量，导致抗剪强度骤降，易引发路基滑塌、基坑失稳等事故。施工中必须考虑恶劣天气的影响，进行动态设计与信息化施工。需制定专项应急预案，加强施工期间监测，提前采取加固防护措施，降低恶劣天气对工程稳定性的影响。

（3）交通组织与导改难度大：项目需在保证既有交通通行的前提下施工，交通组织复杂。设置在软基上的临时导行路自身可能发生沉降，影响通行安全与效率。（4）对既有结构物的保护：施工中的振动、开挖、堆载等作业易对相邻的既有桥梁、涵洞、地下管线等产生不利影响，必须采取有效的隔离与防护措施^[1]。

2 软基路段高速公路改扩建施工工艺创新

2.1 新型软基处理技术

（1）真空联合堆载预压优化：针对华南软土高压缩性特点，对传统真空联合堆载预压工艺进行优化，集成智能监测系统（含沉降计、孔隙水压力计），实时采集膜下负压（控制在80kPa以上）、路基沉降速率及孔隙水压力消散数据。通过云端平台分析数据，自动调节真空泵运行功率与堆载加载速率，避免因加载过快导致软基失稳。相比传统工艺，该技术将软基固结时间缩短20%-30%，沉降控制精度提升至 $\pm 5\text{mm}$ ，适用于珠三角地区深厚软土处理。（2）高性能泡沫轻质土填筑：针对桥头路基与桥台差异沉降引发的跳车问题，采用高性能泡沫轻质土（干密度 $500-800\text{kg/m}^3$ 、28d抗压强度 $\geq 1.0\text{MPa}$ ）填筑桥头过渡段。该材料通过水泥、粉煤灰、泡沫剂精准配比制成，具有轻质、高抗压、低收缩特性，可大幅降低路基自重（较传统填料减重40%-60%），减少软基附加沉降。施工中采用分层浇筑（每层厚度30-50cm），

结合现场取芯检测强度,有效控制桥头差异沉降在5mm以内,解决粤西沿海地区桥头跳车难题^[2]。(3)微型桩+CFG桩复合地基:针对既有高速公路改扩建中施工空间狭窄(如中央分隔带附近)的问题,研发微型桩(直径150-200mm)+CFG桩(直径500mm)复合地基工艺。微型桩采用地质钻机钻孔,植入钢筋笼后灌注水泥砂浆,CFG桩采用长螺旋钻机成孔,两者呈梅花形布置(间距1.5-2.0m),形成立体支护体系。该工艺无需大型施工机械,最小作业空间仅2.5m,可在不中断交通的情况下施工,复合地基承载力较单一CFG桩提升30%,适用于海南地区既有道路拓宽工程。

2.2 数字化施工管理技术

(1) BIM+GIS技术动态模拟:整合BIM模型(含路基、桩基、管网等构件)与GIS地理信息(含软土分布、地形地貌),构建三维可视化施工模型。施工前模拟真空预压、桩基施工等关键工序流程,预判施工冲突(如管线与桩基位置重叠),优化施工顺序;施工中实时更新模型数据(如桩基垂直度、路基沉降值),通过模型对比分析实际施工与设计偏差,及时调整方案。(2) 物联网沉降监测系统:部署物联网沉降监测系统,在路基关键点位(如桥头、涵洞附近)布设无线沉降传感器(精度 $\pm 0.1\text{mm}$),数据通过LoRa无线传输技术实时上传至监控平台。平台设置沉降速率阈值(施工期 $\leq 0.5\text{mm/d}$),当监测值超限时自动发送预警信息至管理人员手机。同时,系统可生成沉降曲线与趋势分析报告,为工艺调整提供数据支撑。相比传统人工监测,该系统数据采集频率提升至1次/小时,预警响应时间缩短至5分钟,有效防范软基失稳风险。

2.3 绿色施工工艺

(1) 废弃路基材料再生利用:针对改扩建中产生的废弃沥青、水泥混凝土路基材料,采用骨料破碎再利用技术,通过颚式破碎机破碎(粒径控制在5-31.5mm)、振动筛分级、洗石机除杂,将合格骨料用于新路基基层填筑(掺量 $\leq 30\%$)或临时便道铺设。同时,添加新型改性剂(如水泥、石灰)改善再生骨料性能,确保其压实度 $\geq 96\%$ 、CBR值 $\geq 8\%$ 。该工艺使废弃材料利用率达85%以上,减少建筑垃圾外运量,降低碳排放30%,符合华南地区生态环保要求。(2) 低影响施工措施:优化临时排水系统设计,采用“纵向盲沟+横向排水管+沉淀池”组合体系,纵向盲沟间距10-15m(内置透水土工布与碎石),横向排水管每50m设置一道(直径300mmHDPE管),沉淀池分三级(总容积 $\geq 50\text{m}^3$)。雨季施工时,雨水经盲沟收集后通过排水管导入沉淀

池,经沉淀(停留时间 ≥ 2 小时)、过滤后排放,避免泥水直接流入周边农田或水体。同时,在施工边界设置植被防护带(宽度 $\geq 2\text{m}$),减少水土流失,保护华南地区脆弱的生态环境^[3]。

2.4 华南台风工况专项工艺

(1) 抗台风临时支护结构:针对台风强风荷载,研发装配式临时挡墙,采用预制混凝土板块(尺寸 $2\text{m}\times 1\text{m}\times 0.3\text{m}$),通过榫卯结构拼接,底部采用打入式钢桩(长度3-4m)固定,顶部设置拉杆连接地锚。挡墙内侧铺设土工格栅(抗拉强度 $\geq 80\text{kN/m}$),与路基填料形成整体,抗风载能力达 0.8kN/m^2 以上。该结构安装便捷(单日可施工100m),台风过后可拆除重复利用,适用于珠三角、海南沿海地区施工临时防护。(2) 雨季快速施工方法:华南雨季降雨量大,采用透水性材料(级配碎石、砂砾石)分层填筑路基,每层厚度30cm,压实度 $\geq 95\%$ 。填筑前在路基两侧设置临时边沟(纵坡 $\geq 0.3\%$),及时排出雨水;填筑过程中采用轻型压路机(吨位12-15t)快速压实,减少雨水下渗。同时,在路基顶面铺设防雨布(厚度 $\geq 0.1\text{mm}$),雨后只需清理表面积水即可继续施工,较传统填料施工效率提升50%,确保雨季施工进度不受影响。

3 软基路段高速公路改扩建施工质量控制体系构建

3.1 全过程质量控制框架

(1) 施工前:针对华南软土地域差异性,施工前需开展精细化地质详勘,采用钻探与原位测试(标准贯入试验、十字板剪切试验)结合的方式,明确软土分布范围、厚度及物理力学参数,制定符合华南地区的特殊土参数标准(如含水量 $\leq 80\%$ 、压缩系数 $\alpha_{1-2} \leq 1.5\text{MPa}^{-1}$)。同时对施工材料进行性能试验,真空预压膜需检测抗穿刺强度($\geq 15\text{N}$)与密封性,泡沫轻质土需测试干密度($500-800\text{kg/m}^3$)与抗压强度($0.8-2.0\text{MPa}$),确保材料性能满足设计要求,从源头把控施工质量。(2) 施工中:施工过程中建立动态监测体系,重点监测路基沉降速率、侧向位移及孔隙水压力,设定华南软基专属沉降速率阈值(真空预压阶段 $\leq 1\text{mm/d}$,填筑阶段 $\leq 0.5\text{mm/d}$)。当监测数据接近阈值时,及时调整施工工艺,例如真空预压阶段若沉降速率过快,可降低堆载加载速率;轻质土填筑时若强度未达标,需调整水泥掺量。通过“监测-分析-调整”的闭环管理,确保施工过程始终处于质量可控状态,避免因工艺偏差引发质量问题。(3) 施工后:施工完成后部署长期健康监测系统,采用光纤光栅传感技术,将传感器植入路基、桥台及复合地基内部,实现应变、温度、沉降等参数的实时

采集。该技术具有抗干扰能力强、监测距离远（单根光纤可达10km）的优势，可长期跟踪软基路段结构变形趋势。监测数据通过云端平台实时分析，当发现结构性能衰减或异常变形时，及时发出维护预警，为道路长期运营提供质量保障，延长使用寿命^[4]。

3.2 关键工序质量控制标准

（1）真空预压膜密封性检测：真空预压膜铺设完成后，采用“负压维持试验”检测密封性，关闭真空泵后监测膜下负压变化，设定负压维持时间标准（关闭30分钟内负压下降值 $\leq 2\text{kPa}$ ）。若未达标，需采用肥皂水涂抹法排查漏点，重点检查膜体拼接缝（采用双缝热合，宽度 $\geq 10\text{mm}$ ）与管道接口，确保真空系统密封性，避免因负压损失导致预压效果不佳，影响软基处理质量。

（2）轻质土容重与强度双控：泡沫轻质土填筑过程中实施“容重+强度”双控标准，每 500m^3 制作3组标准试块（ $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ ），养护28天后检测抗压强度（ $\geq 0.8\text{MPa}$ ）；同时采用现场取芯（芯样直径 $\geq 100\text{mm}$ ）与地质雷达无损检测相结合的方式，核查轻质土容重（ $500\text{-}800\text{kg/m}^3$ ）与均匀性，若发现局部容重超标或强度不足，需破除重新浇筑，确保过渡段质量满足桥头跳车控制要求。（3）桩基施工垂直度偏差控制：微型桩与CFG桩施工时，采用全站仪实时监测桩身垂直度，设定偏差控制标准（ $\leq 1\%$ ）。施工前调整钻机水平度，钻进过程中每钻进 2m 校核一次垂直度，若发现偏差超限时，立即停止钻进，通过调整钻机机位或钻杆角度进行纠偏，避免因桩身倾斜导致复合地基承载力下降，影响软基处理效果。

3.3 质量风险预警机制

（1）基于机器学习的沉降预测模型：整合华南地区近10年软基改扩建项目的历史沉降数据（如珠三角、海南地区不同软土类型的沉降规律），结合当前项目的实

时监测数据（沉降速率、孔隙水压力），构建基于随机森林算法的机器学习沉降预测模型。通过该模型，可对未来7-14天的路基沉降趋势进行预测。当预测值逼近设计控制限值时，系统将自动触发风险预警，为评估施工状态和前瞻性调整施工方案提供重要数据支撑，从而有效降低质量风险。（2）多级预警阈值设定：根据软基路段的重要性（如桥头、互通区）与施工阶段，设定黄、橙、红三级预警阈值。以沉降速率为例，施工期黄色预警（ $0.3\text{-}0.5\text{mm/d}$ ），启动加强监测（缩短采样间隔至15分钟）；橙色预警（ $0.5\text{-}0.8\text{mm/d}$ ），暂停加载并分析原因；红色预警（ $> 0.8\text{mm/d}$ ），立即停工并启动应急加固措施（如增设临时支护）。各级预警对应明确的响应流程与责任部门，确保风险发生时可快速处置，避免质量事故扩大。

结束语

软基路段高速公路改扩建施工工艺创新与质量控制是保障工程顺利推进与长期稳定运行的核心。通过新型软基处理、数字化施工管理及绿色施工等工艺创新，有效提升了施工效率与质量；构建的全过程质量控制体系与风险预警机制，为工程质量保驾护航。未来，需持续优化工艺、完善标准，以应对更复杂地质条件，推动高速公路改扩建向更高质量、更可持续方向发展。

参考文献

- [1]赵炬.高速公路改扩建路面拼接施工质量影响研究[J].四川建材,2022,48(11):138-139.
- [2]张明阳,王炳华,唐高华,等.高速公路改扩建气泡混合轻质土施工质量控制[J].质量与市场,2022,(12):193-195.
- [3]张俊财.高速公路改扩建新旧路基衔接处施工质量控制[J].交通世界,2022,(Z1):185-186.
- [4]刘竹光,巩琛,仓雅玲.高速公路改扩建互通立交交通组织设计[J].山东交通科技,2022,(03):28-29.