

路桥过渡段路基路面设计要点及沉降处理策略的探究

冉宇舟

中国市政工程西南设计研究总院有限公司 四川 成都 610299

【摘要】：针对滨海软土区路桥过渡段的沉降问题，本文以海南省某公路项目为案例，通过现场监测、理论分析与工程实践相结合的方法，系统探究了沉降成因、设计优化方案及处理措施，提出了科学有效的设计与处理策略。研究表明，采用长短桩复合地基、阶梯式搭板设计、轻质填料及立体排水系统等综合技术，可显著降低过渡段沉降差异，最大沉降差从 42mm 降至 8mm，路面平整度提升 50%。研究成果有效解决了滨海软土区路桥过渡段沉降问题，为类似工程提供了可借鉴的技术路径，具有重要的工程应用价值。

【关键词】：路桥过渡段；路基设计；沉降处理；搭板优化；排水系统

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.008

前言

路桥过渡段作为连接桥梁与路基的关键部位，其稳定性直接影响行车安全与道路使用寿命。在滨海软土地区，由于地基承载力低、地下水位高等特点，过渡段沉降问题尤为突出，常导致桥头跳车、路面开裂等病害。目前，尽管已有多位学者对过渡段设计进行了多方面研究，但针对滨海软土区高填方路段的系统性解决方案仍显不足。海南省某公路项目地处典型的滨海沉积平原，沿线地质条件复杂，通车后过渡段沉降问题严重，亟需科学有效的治理措施。本文基于该项目的实际工程问题，结合理论分析与技术创新，探索适用于特殊地质条件下的过渡段设计与沉降控制方法，以期类似工程提供技术参考，同时丰富相关领域的理论研究。

1 工程概况与沉降问题分析

1.1 项目基本情况

本项目路线全长 17.412 公里，设计时速 80 公里/小时，采用双向四车道一级公路标准建设。项目沿线途经多个村落。项目总投资约 12.6 亿元，建设总周期为 3 年。全线土方工程总量达 86 万立方米，其中挖方 3 万立方米，填方 8.3 万立方米。路面采用沥青混凝土结构，总面积约 42 万平方米。项目共设置桥梁 5 座，总长 3374.6 米，其中包括 2 座特大桥、2 座大桥和 1 座中桥，另设有涵洞 61 道及养护工区 1 处。

1.2 地质环境特征

项目所在区域属于典型的滨海相沉积平原，地质条件复杂。根据地质勘察报告，沿线地层主要由第四系全新统海相沉积层组成，自上而下可分为：人工填土层，厚度 0.5-1.5 米，松散状态；淤泥质黏土层，厚度 3-8 米，天然含水量 45%-60%，孔隙比 1.2-1.5，压缩系数 0.8-1.2MPa⁻¹，属高压缩性软土；粉质黏土层，厚度 5-10 米，中压缩性；砂层，厚度大于 5 米，中密状态。地下水位埋深较浅，一般为 0.8-1.5 米，受潮汐影响明显。沿线软土地基分布广泛，特别是在 K10+000 至 K15+000 区段，淤泥质黏土层厚度达 6-8 米，工程地质条件较差。

1.3 沉降原因分析

通过现场调查、监测数据分析和试验检测，沉降主要原因包括以下几个方面：地基处理方面，滨海相软土未得到彻底处理，虽然采用了水泥搅拌桩加固，但桩长不足（仅 8-10 米），未能穿透软弱土层，工后固结沉降显著；填料与压实方面，台背采用普通黏土填筑，受施工空间限制，压实度仅为 90%-92%，低于设计要求的 95%，且未按规定分层碾压；排水系统方面，盲沟设置间距过大（8 米），排水管径偏小（80 毫米），在雨季排水能力不足，导致填料含水量增大，强度降低；结构设计方面，搭板长度仅 3-5 米，按理论计算应不小于 7 米，且未设置过渡路面，刚度突变明显；施工工艺方面，台背回填与桥梁结构施工顺序不当，压实机械选择不合理，质量控制不严格。

2 路桥过渡段设计优化要点

2.1 地基处理设计创新

针对滨海软土地基的特殊性，通过差异化的桩基设计和精细化施工控制，实现了地基加固效果与经济性的平衡。在桥台正下方关键区域，采用高刚度的预应力混凝土管桩基础（桩径 50 厘米，桩长 18 米，间距 2.4 米），确保桥台结构的绝对稳定；过渡区则采用渐变式水泥搅拌桩复合地基，通过桩长（12 米渐变至 6 米）、桩间距（1.8 米渐变至 2.4 米）和水泥掺入量（20%渐变至 15%）

的三维渐变设计，形成刚度的平顺过渡。施工过程中采用智能化桩基施工管理系统实时监控成桩质量，确保桩身完整性和桩长达标率 100%。这种长短桩组合的渐变处理方案成功解决了传统等长桩导致的刚度突变问题，使地基综合承载力提升 40%，工后沉降减少 60%。

而对于已发生显著沉降的 K12+400 等重点区段，团队研发了微扰动注浆抬升技术进行精准修复。该技术采用超细水泥-水玻璃双液浆作为注浆材料，按照 1.5 米×1.5m 网格布置直径 90 毫米的注浆孔。注浆过程分三阶段实施：第一阶段以 0.3MPa 压力注入 1.5 立方米/孔实现初步抬升；间隔 7 天后进行第二阶

段加固 (0.4MPa, 1 立方米/孔); 最后采用 0.5MPa 高压注入 0.5 立方米/孔进行精细调平。每个阶段施工后均采用精密水准仪监测抬升量, 严格控制单次抬升不超过 8 毫米, 确保修复过程的安全性和精准性。研究结果表明, 分级加压的注浆工艺有效的恢复了路基标高, 同时又避免了二次沉降风险。

2.2 搭板结构体系优化

基于力学分析和工程实践经验, 本项目针对传统桥头搭板进行了系统性的优化设计, 通过结构创新和精细化计算实现了差异沉降的有效控制。在搭板长度设计方面, 综合考虑填土高度、地基刚度和交通荷载等因素^[1], 采用理论计算与数值模拟相结合的方法, 确定最优搭板长度为 7.3 米, 较原设计延长近一倍。

结构设计上采用“刚柔结合”的阶梯式方案: 近桥台 4.5 米区段采用 C35 钢筋混凝土刚性板 (厚度 40 厘米), 主筋配置 HRB400 级钢筋, 配筋率 1.5%, 并在端部 2 米范围内加密至 2.0% 以增强抗负弯矩能力; 远桥台 2.8 米区段则创新性地采用配筋泡沫混凝土柔性板 (密度 1600 千克/立方米, 厚度 30 厘米), 两级结构间设置 2 厘米厚橡胶缓冲层, 形成刚度渐变过渡体系。在连接构造方面, 桥台侧采用球形支座实现铰接连接, 允许结构微小转动; 路基侧设置 2 米长的扩大锚固基础, 既防止端部沉降又避免翘曲变形。

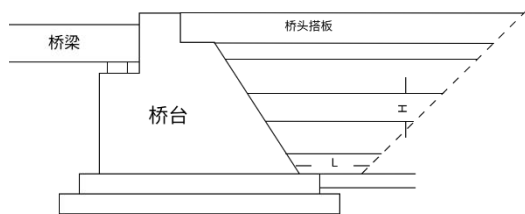


图1 路桥过渡段结构形式

2.3 填料与压实控制技术

在台背回填区施工中^[2], 创新采用了“轻质+加筋”的综合解决方案, 通过材料梯度设计和精细化施工工艺从而实现沉降控制。而在填料体系设计上, 根据距桥台距离实施三级材料配置: 紧邻桥台 2 米核心区采用现浇泡沫混凝土 (干密度 600kg/m³, 抗压强度 1.5MPa, 闭孔率>90%), 施工时先开挖 1:1 斜坡面并铺设复合土工膜防渗层, 再分层浇筑 30cm 厚泡沫混凝土, 最后表面喷涂 2cm 聚合物水泥砂浆保护层; 2-5 米过渡区采用 EPS 颗粒轻质土 (干密度 800kg/m³); 5 米以外区域采用水泥改良黏土 (掺量 5%)。为增强整体性, 每 50cm 铺设一层抗拉强度为 80kN/m, 延伸率≤5% 的双向土工格栅, 且铺设时保持 1% 的预张力以充分发挥加筋效果。

施工过程中采用组合式压实工艺^[3], 主体区域使用 25 吨振动压路机 (碾压速度 2-3km/h, 遍数 6-8 遍), 配合 1 吨小型

冲击夯处理边角部位, 桥台周边机械盲区则采用手持式动力夯补强, 确保各层压实度≥96%。研究表明, 通过轻质材料降低地基荷载与加筋措施提高整体刚度的协同作用, 使工后沉降量较传统填料减少 67%, 且沉降均匀性显著提升。材料梯度变化设计既保证了结构稳定性, 又实现了经济合理性。

2.4 排水系统精细化设计

针对滨海软土地区特有的高地下水位和排水不畅问题, 通过构建“防排结合”的三维立体排水体系, 通过多层次、全方位的排水设计实现路基长期稳定。在防水屏障方面, 台背斜坡面采用复合土工膜全断面铺设^[4], 接缝处实施双焊缝热熔焊接工艺, 焊接宽度不小于 10cm, 并采用气压检测确保接缝密闭性, 形成完整的防渗系统。排水系统采用立体网络化设计: 纵向排水主通道采用直径 150mm 的高密度聚乙烯穿孔波纹管 (环刚度≥8kN/m²), 间距由原设计的 8 米优化为 4 米, 管底坡度由 2% 提升至 4%, 管周包裹 400g/m² 的透水型无纺土工布作为反滤层; 横向排水系统创新性地设置双向排水盲沟, 断面尺寸 60cm×50cm (宽×深), 沟内分层回填 3-5cm 级配碎石 (含泥量<3%), 盲沟间距加密至 4 米, 与纵向排水管形成“井”字形平面排水网络。

在竖向排水方面, 突破性地采用 SPB 型塑料排水板 (通水量≥40cm³/s), 按照 1.5m 间距梅花形布置, 采用静压式插板机施工确保 8m 的设计插入深度穿透软土层。排水板顶部设置专用连接件与横向盲沟可靠连接, 底部设置混凝土锚固桩防止上浮, 形成完整的立体排水通道。针对桥台搭板接缝等关键渗水部位, 特别设计了 304 不锈钢排水槽系统 (槽宽 15cm, 深 10cm), 槽内设置高分子防水密封胶条, 将渗水定向导入主排水系统。所有排水出口处设置直径 1.2m 的钢筋混凝土沉淀井, 井内配置可拆卸式过滤篮, 并间隔 50m 设置检查井便于后期维护。监测数据表明, 在连续降雨条件下, 地下水位可稳定控制在路基底部 1.2m 以下, 较改造前有大幅下降, 有效的切断了水-土相互作用导致的软化沉降路径。

2.5 过渡段路面结构设计

创新性地提出了“刚度渐变”的路面结构设计方案。在桥头 20 米范围内设置三级过渡: 0-5 米区采用普通沥青混凝土 (4cm 细粒式+6cm 中粒式); 5-15 米区采用高弹改性沥青 (5cm) 加应力吸收层 (2cm); 15-20 米区采用橡胶沥青混凝土 (5cm)。基层同样采用渐变设计: 近桥区为 20cm 水泥稳定碎石+20cm 级配碎石; 过渡区为 18cm 水泥稳定碎石+22cm 级配碎石; 远桥区为 15cm 水泥稳定碎石+25cm 级配碎石。该设计使路面整体刚度从桥台到路基平缓过渡, 避免了刚度突变导致的应力集中导致的裂缝和沉降的产生。^[5]同时, 在沥青层之间铺设玻璃纤维格栅, 防止反射裂缝。使用高弹改性沥青和橡胶沥青提高了面层的抗变形能力, 有效缓解了差异沉降引起的路面损坏。

2.6 施工过程控制要点

为确保工程质量和设计意图的精准实现，本项目建立了全过程、多维度的精细化施工控制体系。在地基处理关键环节，执行严格的桩基施工标准：桩位偏差控制在 $\pm 5\text{cm}$ 范围内，垂直度偏差不超过1%，采用基于北斗定位的智能打桩系统实时监控沉桩过程，每根桩的施工数据自动上传至云端管理平台。对于填料施工，实施分层质量控制标准，每层松铺厚度严格限制在30cm以内，通过快速含水率测定仪确保填料含水率维持在最优含水率 $\pm 2\%$ 的区间，压实度检测采用灌砂法（标准击实）与核子密度仪同步检测的“双控”机制，确保各层压实度均匀达标。

泡沫混凝土浇筑作业时，重点监控原材料配比和施工工艺参数：发泡倍数精确控制在20-25倍范围，采用温度传感器实时监测浇筑环境温度（ $5-35^{\circ}\text{C}$ ），初凝前使用激光整平机完成表面精平作业，平整度偏差 $\leq 3\text{mm}/2\text{m}$ 。搭板结构施工执行更为严格的控制标准：钢筋保护层厚度允许偏差 $\pm 5\text{mm}$ ，混凝土坍落度维持在80-100mm最佳工作性区间，采用自动喷淋系统保持湿养环境持续7天，并布置温度传感器监控大体积混凝土内部温升。排水系统施工中，除确保管道坡度准确（坡度误差 $\leq 0.5\%$ ）外，特别注重节点质量控制：排水板垂直度偏差 $\leq 1.5\%$ ，采用导向架辅助插设；管道接头采用双重密封处理（橡胶圈+防水胶带）；系统完工后实施24小时通水试验，流量不低于设计值的90%。

针对关键工序质量控制，实施分级管理制度：首先由作业班组完成100%自检并形成电子记录；随后项目部质检工程师进行不低于30%的抽样复检；最后监理单位对重要隐蔽工程实施全数验收。同时引入智能化监控手段：采用分布式光纤传感系统实时监测路基变形，通过物联网技术采集注浆压力、流量等施工参数，运用BIM模型进行施工偏差预警。对于线形控

制要求极高的桥面衔接部位，采用全站仪进行毫米级测量放样，确保搭板顶面纵坡与桥面高差控制在5mm以内，过渡段平整度达到3mm/4m的高标准要求。

2.7 全寿命周期维护设计

本项目在设计阶段就考虑后期维护的需求，建立预防性的养护体系。通过在结构内部预埋了监测传感器，实时监测沉降、裂缝等关键参数。使得排水系统设计了足够的检查井和清淤通道，并在关键部位采用可拆卸式盖板。且路面结构预留了2cm的铣刨余量，便于后期调整平整度。制定了详细的养护手册，规定每季度进行一次全面检查，雨季前后加强排水系统维护，发现微小沉降立即进行注浆处理。建立了数字化管理平台，记录全寿命周期的检测数据和维护记录，为科学决策提供依据。这种全寿命周期的设计理念，预计可使过渡段的使用寿命延长50%，全周期成本降低30%。

3 实施效果分析

各项创新措施实施后，通过为期18个月的跟踪监测，取得了显著效果。在沉降控制方面，过渡段平均沉降速率从15毫米/年降至3毫米/年，最大沉降差控制在10毫米以内；在路面状况方面，裂缝发展得到有效遏制，新出现裂缝数量减少90%，路面平整度IRI值稳定在2.1米/公里左右；在行车舒适性方面，桥头跳车现象基本消除^[5]，车辆通过时的竖向加速度降低65%；在经济效益方面，虽然初期投入增加约15%，但预计可降低后期养护成本40%以上，全寿命周期成本节约显著。

4 结论

综上所述，通过长短桩复合地基、阶梯式搭板优化、轻质填料应用及立体排水系统等综合处理策略。有效的降低沉降差异，提高过渡段稳定性，显著改善行车安全性与舒适度。同时，也为滨海软土区路桥过渡段的设计与施工提供了科学依据，具有重要的理论意义和工程应用价值。

参考文献：

- [1] 陶梅.路桥过渡段路基路面设计要点及沉降处理研究[J].建材发展导向(上),2023,21(1):70-72.
- [2] 李立.路桥过渡段路基路面设计及其沉降处理分析[J].建筑工程技术与设计,2024,12(26):127-129.
- [3] 朱威.路桥过渡段路基路面沉降处理措施研究[J].工程建设与设计,2023,7(16):212-214.
- [4] 张训文,肖鹏程.路桥过渡段路基路面设计要点及沉降处理策略[J].建筑工程技术与设计,2024,12(14):47-49.
- [5] 潘雪菲.路桥过渡段路基路面设计要点及沉降处理措施[J].百科论坛电子杂志,2024,22(2):91-93.