

公路工程软土路基施工处理技术及质量控制研究

李睿

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘要】：针对沿海地区公路工程软土路基易产生沉降变形、侧向滑移及稳定性不足等问题，结合实际工程地质条件，对软土路基施工处理技术及质量控制方法进行了研究。施工过程中采用塑料排水板联合堆载预压、CFG桩复合地基及水泥搅拌桩等处理技术，通过优化排水体系、控制填筑速率及完善监测机制，提高软土地基承载能力与整体稳定性。同时，对施工准备、过程检测及沉降稳定控制等环节进行了系统分析，建立全过程质量控制体系。研究结果表明，各项处理措施能够有效促进超孔隙水压力消散，降低工后沉降与差异变形风险，增强路基整体刚度与抗变形能力。研究为复杂软土地区公路路基施工安全控制与质量提升提供了技术参考。

【关键词】：公路工程；软土路基；地基处理；施工技术；质量控制

DOI:10.12417/3083-5526.25.10.011

引言

随着公路工程建设规模不断扩大，沿海及软土地区路基稳定性问题日益突出。软土具有高含水率、高压缩性及低抗剪强度等特点，在填筑荷载与地下水共同作用下，易引发不均匀沉降、边坡失稳等病害，对公路结构安全与使用寿命产生不利影响。公路工程施工中，通过科学合理的技术措施进行加固处理，能够有效控制软土路基沉降量，确保公路工程的正常使用并延长其使用寿命^[1]。基于此，结合沿海软土公路工程实例，对排水固结、复合地基加固及施工质量控制措施进行分析，以提高软土路基施工稳定性与工程耐久性能。

1 工程概况

研究路段位于沿海软土沉积区域，公路全长约12.6km，设计等级为一级公路，双向四车道结构形式，路基宽度26m，受区域海积淤泥质土与冲积软黏土共同影响，场地内广泛分布高含水率、高压缩性及低渗透性软土层。勘察结果显示，软土天然含水率普遍处于48%~71%，孔隙比达到1.25~1.86，液限指标较高，十字板剪切强度不足18kPa，局部地段存在流塑状态淤泥层，地基承载力与抗剪稳定性明显不足。地下水埋深维持在0.6m~1.2m范围，受潮汐变化与降雨影响显著，易诱发路基侧向位移及工后沉降累积问题。施工区域填筑高度最大达到6.8m，填筑荷载作用下软土层内部超孔隙水压力消散速率较低，存在明显次固结变形特征。结合现场地质条件及交通荷载要求，工程重点控制软土路基不均匀沉降、边坡滑移及地基整体稳定性问题，对地基处理深度、排水体系布设、填筑速率及施工监测精度提出较高技术要求。

2 软土路基施工处理关键技术

2.1 排水固结施工处理技术

针对本工程软土层压缩性高、渗透系数低及超孔隙水压力消散缓慢等特征，施工阶段采用塑料排水板联合堆载预压处理方案，通过构建竖向排水通道缩短固结排水路径，提高地基有

效应力增长速率^[2]。排水板采用SPB-B型带状排水体，板宽100mm，厚度4mm，打设深度控制在14~18m范围，贯穿主要淤泥质软土层并进入相对稳定持力层0.5m以上，平面布设间距控制为1.1m梅花形布置，以降低地基固结不均匀性。

插板施工使用静压套管式插板机，严格控制垂直偏差小于1.5%，避免出现回带、扭曲及断板现象。场地表层铺设0.6m厚中粗砂垫层，内部设置纵横向盲沟及集水系统，形成完整水平排水网络。堆载预压阶段采用分级加载方式，首级填筑高度控制在2.5m以内，根据孔压监测结果动态调整加载速率，防止软土抗剪强度不足引发滑移失稳。监测系统同步布设孔隙水压力计、沉降板及测斜管，对地基沉降速率、侧向位移及超孔隙水压力变化进行连续跟踪。结合现场监测数据，当超孔隙水压力消散率达到85%以上且连续两周沉降增量小于2mm/d后进入后续路基填筑工序，从而保证软土地基固结稳定过程满足施工控制要求。

2.2 复合地基加固施工技术

考虑本工程软土层厚度较大、天然承载能力偏低及高填方荷载条件下易产生深层剪切变形等问题，部分高风险路段采用CFG桩复合地基处理方案，通过桩体与桩间土共同承担上部荷载，提高地基整体压缩模量及抗变形能力。CFG桩采用长螺旋钻管内泵压灌注工艺，桩径控制为500mm，桩长18~22m，桩端进入粉质黏土持力层不少于1.0m，桩距按照1.8m等边三角形布置。水泥掺量控制在14%~16%，混合料坍落度维持在160~200mm范围，以保证成桩连续性与桩身密实度。钻进过程中同步监测钻杆垂直度、提升速度及泵送压力参数，提升速率稳定控制在2.5m/min以内，防止出现缩颈、断桩及离析现象。桩顶设置0.5m厚级配碎石褥垫层，利用褥垫层应力扩散效应协调桩土变形差异，减弱局部应力集中问题。

针对桥头过渡段及局部流塑性淤泥区域，采用水泥搅拌桩复合地基进行补强处理。搅拌桩施工使用双轴深层搅拌设备，桩径700mm，桩长12~15m，水泥采用42.5级普通硅酸盐水

泥, 水灰比控制在 0.5~0.6 范围, 单位水泥掺入量不低于 65kg/m。搅拌过程中实施“四搅两喷”施工工艺, 确保浆液与原状软土充分混合, 提高固化体均匀性。施工阶段重点控制钻进速度、喷浆压力及重复搅拌深度, 避免形成夹层、断浆及空搅区域。成桩结束后采用轻便触探与钻芯取样相结合方式进行完整性检测, 同时对无侧限抗压强度及桩体均匀性指标进行专项检测, 以保证复合地基结构稳定性满足后续路基施工要求^[1]。

2.3 软土路基施工关键工艺控制

结合沿海软土路基施工特点, 施工阶段重点控制填筑速率、分层厚度及施工荷载传递路径, 以降低软土结构扰动对地基稳定性的影响。路基填筑采用“薄层填筑、分级加载、对称施工”工艺, 单层松铺厚度控制在 30cm 以内, 压实设备优先选用低振幅双钢轮压路机与轮胎压路机组合方式, 避免高频振动导致软土层孔隙水压力骤增。填料含水率严格控制在最佳含水率 $\pm 2\%$ 范围, 局部高含水率区域掺入 5%石灰进行改良处理, 提高填料抗剪强度及压实稳定性。填筑过程中依据监测数据控制日填筑速率不超过 0.6m/d, 当侧向位移速率超过 5mm/d 时立即停止加载, 防止形成深层滑移面。

针对桥涵搭接段及软硬地基过渡区域, 施工阶段设置土工格栅与级配碎石过渡层形成加筋扩散结构^[4]。土工格栅采用双向高强聚酯经编材料, 纵横向抗拉强度均不低于 80kN/m, 铺设过程中控制搭接宽度大于 30cm, 并利用 U 型锚钉进行端部固定, 减少施工扰动引起的界面错动。过渡段填筑采取台阶式衔接工艺, 台阶宽度控制为 2m, 内部增设反滤层与排水盲沟, 提高结构排水能力。施工机械行驶路线实施分区控制, 避免重复碾压导致局部附加应力集中, 同时利用 GNSS 测量系统与自动化沉降监测平台对路基高程、横坡及变形参数进行动态校核, 确保施工工艺参数满足软土路基稳定控制要求。

3 公路工程软土路基施工质量控制

3.1 施工准备阶段质量控制

基于沿海软土路基工程地质条件复杂及地下水位变化敏感等特点, 施工准备阶段重点围绕地基参数复核、原材料性能检验及施工组织体系优化展开。正式施工前采用静力触探、十字板剪切试验及波速测试相结合方式对软土层厚度、压缩模量及抗剪强度进行复核校验, 建立分层地基参数数据库, 为排水板长度、桩体加固深度及预压荷载计算提供依据。针对局部流塑性区域增设补充钻孔, 控制勘察孔间距小于 30m, 避免软弱夹层漏判引发地基处理深度不足问题。施工区域同步开展地下水动态监测, 对潮汐变化引起的地下水位波动范围进行统计分析, 以修正软土固结计算参数^[5]。

材料进场阶段重点控制水泥、碎石、土工合成材料及排水板性能指标。CFG 桩与搅拌桩所用水泥需进行安定性、凝结时间及抗压强度复检, 碎石材料重点检测压碎值、针片状含量及

级配连续性, 确保褥垫层具备稳定荷载扩散能力。塑料排水板实施纵向通水量、抗拉强度及滤膜渗透性能检测, 防止施工过程中出现排水衰减。施工机械设备完成标定校核后方可进场作业, 对插板机导向架垂直度、钻机扭矩系统及自动计量喷浆设备进行专项调试。施工组织方面建立分区分段流水施工体系, 提前布设临时排水沟、施工便道及监测基准点, 降低施工扰动对软土地基原状结构的影响。

3.2 施工过程质量检测与监测

施工阶段建立“现场检测—动态监测”质量控制体系, 对软土路基变形、孔压变化及地基承载状态进行全过程跟踪。排水板施工完成后采用开槽取样与通水试验检测排水板完整性及排水能力, 抽检频率控制在总数量的 2%以上。CFG 桩与水泥搅拌桩施工阶段同步开展桩位偏差、桩长及垂直度检测, 桩位偏差控制在 50mm 以内, 垂直度偏差不得超过 1%。钻芯取样重点检测桩体胶结状态及无侧限抗压强度, 对局部离析区域实施补桩处理。路基填筑过程中采用灌砂法与核子密度仪联合检测压实度, 填层压实系数控制在 0.96 以上, 同时利用弯沉检测设备校核路基整体刚度。监测系统沿线路每 50m 布设沉降板及测斜管, 桥头与高填方区域加密至 25m 间距, 孔隙水压力计覆盖主要压缩层范围。数据采集采用自动化监测平台, 对沉降速率、水平位移及超孔压变化进行实时分析, 当沉降速率超过 10mm/d 或侧向位移达到预警值时, 立即调整填筑速率与施工荷载, 防止软土地基发生失稳变形。

3.3 沉降与稳定性质量控制措施

针对沿海软土路基高压缩性及低抗剪强度特征, 施工阶段采用“分级预压—动态卸载—变形反馈”控制模式, 对沉降发展及边坡稳定状态实施全过程调控。路基填筑前依据软土固结计算结果确定分级加载高度及间隔周期, 单级加载厚度控制在 1.5m 以内, 间隔时间结合孔隙水压力消散速率进行调整, 避免短期附加应力过大导致深层滑移破坏。高填方区域采用反压护道与坡脚加宽措施, 反压平台宽度控制在 3~5m 范围, 通过增加侧向约束减小路基边坡剪应力集中。针对桥头及软硬交界段易产生差异沉降问题, 施工阶段设置渐变式过渡结构, 并在路床底部铺设高强土工格栅, 提高荷载扩散能力与整体协调变形能力。

监测过程中重点分析沉降速率、分层沉降差及水平位移变化规律, 当连续 3d 沉降增量超过设计警戒值时立即暂停填筑作业, 并通过削载、增加排水措施或延长预压周期进行调整。地下水位较高区域同步设置截水沟及渗排体系, 降低地基浸润线抬升对边坡稳定性的影响。施工后期利用分层回弹模量检测与钻孔取样方式复核软土固结状态, 防止局部区域出现迟后性压缩变形。

4 应用效果分析

经现场监测与阶段性检测数据统计,软土路基处理后地基固结速率明显提升,超孔隙水压力消散过程与理论固结曲线基本保持一致,主要压缩层沉降变化趋于稳定。排水板区域孔压峰值持续下降,地基有效应力逐步增长,工后沉降预测值得到有效控制。CFG桩与水泥搅拌桩复合地基区域静载试验结果显示,复合地基承载特性满足高填方荷载要求,桩土应力比维持在合理区间,未出现明显应力集中现象。路基填筑阶段侧向位移监测数据整体处于预警控制范围以内,边坡深层水平位移未形成贯通性滑移带。弯沉检测与回弹模量测试结果表明,路基整体刚度分布较均匀,桥头过渡段差异变形得到有效协调。钻芯取样结果显示桩体完整性较好,水泥土固化体内部胶结均匀,未发现明显断桩、缩颈及空搅缺陷,软土路基整体稳定状

态满足后续路面结构施工要求。

5 结语

软土路基施工质量直接关系公路工程整体稳定性与后期运营安全。结合工程实践分析,塑料排水板联合堆载预压能够有效缩短固结排水路径,CFG桩与水泥搅拌桩复合地基处理可提高地基承载能力与抗变形性能,配合分级加载、动态监测及过渡段加筋等措施,有利于控制沉降发展与边坡稳定风险。全过程质量控制体系的建立,对材料性能、施工工艺、监测数据及变形反馈实施综合管理,可有效降低施工扰动与结构失稳问题。工程应用结果表明,软土路基整体刚度、稳定性及工后沉降控制效果较好,满足后续路面施工要求。未来可进一步加强智能化监测技术与长期沉降预测研究,提高软土地区公路工程施工精细化与信息化管理水平。

参考文献:

- [1] 游秋燕.公路软土路基施工中水泥搅拌桩技术应用研究[J].汽车周刊,2026,(04):95-97.
- [2] 张振涛.公路路基填筑废弃软土固化料关键施工技术[J].交通世界,2025,(35):124-126.
- [3] 贺晓婧.公路软土路基勘察及加固措施研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(34):110-112.
- [4] 沈星.高速公路软土路基处置及施工技术分析[J].交通科技与管理,2025,6(22):125-127.
- [5] 顾介平.软土路基处理技术在公路工程施工中的运用[J].运输经理世界,2025,(31):20-22.