

熔岩地质条件下现浇箱梁大钢管支架基础换填片石工艺的创新与应用

刘 洋

(四川路桥桥梁工程有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘要 针对特性熔岩地质叠加淤泥层形成“淤泥软基+地基裂隙渗水+承载力不均”三重施工难题: 淤泥层易导致片石“深陷失稳”, 熔岩裂隙易引发淤泥“侧向挤出”, 传统换填工艺难以平衡基础承载力与稳定性。本文以某高速公路桥梁项目为例, 从工艺创新、现场实施、效益验证三个方面系统阐述改良后的换填片石工艺如何破解“淤泥+渗水”复合地质困境, 以期为同类工程提供技术方案参考。

关键词 现浇箱梁; 大钢管支架; 换填片石工艺; 复合地质

中图分类号:TU47

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.020

0 引言

在熔岩地质条件与淤泥层共存的复杂环境下, 淤泥质软土在沿海或者沿河的地质结构中比较常见, 地质中包含了大量的淤泥、有机质以及颗粒, 导致其存在承载力低、透水性差以及压缩性大等缺陷^[1], 传统换填工艺常因淤泥流动性强、熔岩裂隙渗水等问题导致基础承载力失衡。本文以某高速公路桥梁工程为案例, 系统阐述改良后的换填片石工艺如何通过“淤泥预处理一分层嵌挤—动态控压—立体防渗”四重技术突破, 实现淤泥与片石的咬合结构构建, 有效抑制侧向挤出风险, 阻断渗水软化链条。实践表明, 该工艺显著提升了复合地质条件下的支架基础稳定性, 为熔岩地区桥梁建设提供了经济高效的解决方案。

1 工艺创新: 针对“熔岩+淤泥”复合地质的四重突破

针对传统工艺在复合地质中“换填区淤泥清理不彻底、片石填筑架空、防渗水失效”的短板, 本工艺通过“淤泥预处理、分层嵌挤、动态控压、立体防渗”四重创新, 构建“抗陷—承力—防渗”一体化基础体系。

1.1 淤泥精准预处理: 从“盲目抛填”到“分区处置”

摒弃传统“片石强挤淤泥”的粗放模式, 根据淤泥层厚度(0.5~1.0 m)与分布范围。

1. 薄层淤泥区(厚度<1.0 m): 采用“挖掘机+人工”清淤, 深度至完整地质承载力达标, 对残留淤

泥(厚度<10 cm), 喷洒水泥浆(掺量8%)进行固化处理, 使其表面形成“硬壳层”。

2. 厚层淤泥区(厚度≥1.0 m): 对于局部厚淤泥层, 先使用挖机将大面积淤泥清理干净, 少数淤泥采用人工清理, 清理完成后对地基基础表面进行承载力试验, 达到设计要求后, 再填筑粒径40~60 cm的大块片石, 将荷载直接传递至岩面, 避免淤泥层整体沉降。

1.2 片石分层嵌挤: 构建“淤泥+片石”形成咬合结构

创新设计“四级梯度片石”填筑方案, 通过“下嵌岩面、中挤淤泥、上找平”的分层填筑逻辑, 解决片石与淤泥的协同受力问题:

第一层: 选用粒径40~60 cm的大块片石, 采用挖机配合振动压路机施工, 确保片石底部嵌入岩面≥10 cm^[2], 同时挤压周边淤泥至片石间隙, 形成“嵌岩骨架”。

第二层: 采用粒径30~50 m的中块片石, 填筑厚度50 cm, 通过20 t振动压路机“低频高幅”碾压(频率22 Hz、振幅2.0 mm), 利用片石棱角挤压淤泥, 填充底层间隙, 形成“淤泥一片石”混合承力层。

第三层: 选用粒径15~30 cm的小块片石+10%石屑, 填筑厚度40 cm, 采用“中频中幅”碾压(频率28 Hz、振幅1.5 mm), 挤压残留淤泥, 提升基础密实度。

第四层: 铺设粒径5~15 cm的细片石+20%细沙, 人工找平后“高频低幅”碾压(频率35 Hz、振幅1.0 mm), 形成平整度≤3 cm的“致密层”, 确保钢管支架底座受力均匀。

现场原基础地基承载力不满足设计要求时，可采用机械震动压实、堆载预压、真空预压、换填垫层或复合地基等方法，结合现场实际施工情况进行处理^[3]。

1.3 动态控压技术：实时规避“淤泥侧向挤出”风险

创新引入“压力监测+碾压调整”双控体系，替代传统“固定遍数碾压”，通过实时控制碾压应力，避免淤泥因局部压力过大发生侧向挤出：

1. 压力预设：根据淤泥层承载力设计要求，计算每层级最大允许碾压应力，按底层不超过 120 kPa、中层不超过 100 kPa、上层不超过 80 kPa，对应匹配压路机吨位与碾压参数。

2. 实时监测：在淤泥层外侧布设 10 个位移监测点，每碾压 1 遍后，用全站仪测量水平位移，若位移超 5 mm，立即停止碾压，补填大块片石“反压”，待位移稳定后再继续。

3. 压实检测：每层级碾压完成后，采用“轻型动力触探仪”检测承载力（要求 ≥ 200 kPa），同时用探坑法检查淤泥残留量（要求 $< 5\%$ ），双重验证合格后方可进入下一层。

1.4 立体防渗体系：阻断“地基裂隙渗水、淤泥软化”连锁反应

针对熔岩裂隙渗水易软化淤泥的风险，设计“横向截水+纵向防渗+层间隔水”的立体防护方案：

1. 横向截水：在换填区域上游侧（如两侧都有坡度均设置截水沟）开挖深度 0.5 m、宽度 0.3 m 的截水沟，内填碎石+土工布+M7.5 水泥砂浆，形成“截水盲沟”，阻断地表雨水渗入淤泥层。

2. 纵向防渗：如换填区域表面出现渗水情况，在斜坡底侧挖设一个截水坑，将水引流至截水坑内，将水抽出至外侧截水沟排出。

3. 层间隔水：在中层与上层之间铺设 1.5 mm 厚 HDPE 土工膜，阻断上层渗水进入中层淤泥片石混合层，避免基础强度衰减。

2 工程应用：现浇箱梁大钢管支架换填片石施工技术要点

2.1 工程概况

该项目为双向六车道高速公路，1~4# 现浇箱梁跨越熔岩发育区，箱梁全长 200 m，单幅宽 38.5 m，支架用 $\Phi 720 \times 8$ mm 大钢管，单根承载力超 800 kN。地质勘察表明，项目地质底层依次为饱和软土淤泥、粉质粘土，淤泥层最厚 35~45 m，承载力差，其下局部

强风化层厚，揭露碎块状强风化层，这种地质条件增加了施工难度。且项目所在区域地质复杂，有大量溶洞、裂隙等不良地质现象，导致地基承载力不均，传统基础施工方法难以保证大钢管支架稳定性。为确保桥梁施工安全和质量，项目团队经研究和试验，决定采用换填片石工艺处理大钢管支架基础，该工艺提高了基础承载力和稳定性，缩短了施工周期，降低了成本。

2.2 现浇箱梁大钢管支架施工

现浇箱梁钢管支架基础处理完成后，经测量定位，在每根钢管中心点浇筑 1.5*1.5*0.6 m（按现场实际调整）的 C30 混凝土基础，内部配双层双向钢筋网片（直径 12 mm、间距 150 mm），便于施工并与换填片石层形成整体受力体系。支架体系安装时，用全站仪控制钢管垂直度（偏差 $\leq 0.3\%$ ）。针对熔岩地质沉降差，每跨支架设 3 组横桥向沉降观测点，每日比对监测数据与理论计算值，若 24 小时沉降量超 2 mm，立即启动预案：对沉降大的区域补填 5~10 cm 级配碎石，用冲击压路机二次压实，确保支架安全受控。

2.3 现浇箱梁大钢管支架预压施工

待现浇箱梁大钢管支架体系施工完成，按设计图纸计算箱梁钢筋及混凝土总重，对支架整体预压，预压荷载为设计荷载 1.1 倍，以验证承载能力、消除非弹性变形。预压材料用袋装砂石，分 30%、60%、90%、110% 阶段逐步加载至预定荷载，每阶段加载后监测沉降和变形，加载不少于 72 小时。监测时每 4 小时记录沉降数据并绘制沉降一时间曲线图。每阶段加载后，若 12 小时内沉降量小于 1 mm，判定支架稳定，继续下一阶段加载；若大于等于 1 mm，暂停加载，检查加固支架，问题解决且稳定后再继续。加载至 110% 设计荷载并监测 72 小时，若最终沉降量满足要求（一般不超 3 mm）、沉降一时间曲线平缓，支架预压合格，可进行后续箱梁施工。预压中，检查支架连接节点、焊缝等，确保无松动、开裂。支架沙袋卸载后，基础测点标高反弹，因堆载预压有弹性变形，卸载后恢复；该阶段仍下沉，一是地基软土主固结沉降未完成，二是次固结沉降所致。现浇箱梁浇筑完成后条形基础继续小速率下沉，也说明堆载预压时地基主固结沉降不到位^[4]。

2.4 现浇箱梁钢筋、混凝土施工

在支架预压合格后，立即开展现浇箱梁的钢筋绑扎作业。钢筋加工严格按设计图纸下料，主筋采用直螺纹套筒连接，接头错开率 $\geq 50\%$ ，箍筋间距误差控制在 ± 5 mm 以内。在绑扎过程中，在梁体转折处设置定

位钢筋框，确保主筋线形平顺。混凝土浇筑采用分层推进法，每层厚度不超过30 cm，使用两台56 m泵车对称布料，避免支架偏心受载。振捣时配备8~10台插入式振捣器，按“快插慢拔”原则作业，插入点保持均匀逐点移动，重点加强腹板与翼缘板交接处的振捣，防止出现蜂窝麻面。在顶面浇筑时，进行二次收浆并拉毛处理，确保与后续桥面铺装层的粘结强度。混凝土初凝后立即覆盖土工布洒水养护，养护时间不少于14天，期间安排专人监测温湿度，防止因温差过大导致开裂^[5]。

2.5 现浇箱梁大钢管支架体系监测分析

现浇箱梁浇筑施工完成后，需对大钢管支架体系持续监测分析，验证改良工艺效果，确保结构安全。监测内容包括支架沉降、应力应变及位移变化，采用自动化监测与人工巡查结合，实现全施工周期动态管控。

1. 沉降监测：在每跨支架横桥向、纵桥向及关键节点设观测点，用水平仪测顶部高程。预压阶段最大沉降量2.8 mm以内，浇筑时24小时沉降量小于1.5 mm，远低于设计值，表明基础处理抑制了沉降风险。

2. 应力应变监测：在钢管底部及连接节点贴振弦式应变计，采集受力数据。结果显示，浇筑时最大应力值680 kN，小于单根钢管承载力，应力分布均匀，无局部过载。

3. 位移监测：用全站仪测支架垂直度，偏差控制在0.25%以内，满足规范要求。

对比传统与改良工艺监测数据，验证了技术创新优越性。传统工艺沉降量大、应力超限，改良工艺将沉降量控制在3 mm以内，应力稳定。改良工艺解决了复合地质施工难题，为熔岩地区桥梁建设提供可参考的推广方案。

3 改良后的换填片石工艺应用成效

改良后的换填片石工艺在熔岩地质现浇箱梁大钢管支架基础施工中成效显著。在施工质量上，该工艺运用“淤泥预处理一分层嵌挤一动态控压一立体防渗”四重技术，解决传统工艺在复合地质中的淤泥清理不彻底、片石填筑架空、防渗水失效等问题。检测显示，处理后的淤泥层承载力超220 kPa，基础密实度达95%，支架体系浇筑时最大应力680 kN小于单根钢管设计承载力800 kN，垂直度偏差控制在0.25%以内，各项指标优于规范。

1. 施工效率方面，动态控压技术实时调整碾压参数，使施工周期缩短30%。传统工艺因局部压力大导致

淤泥挤出，需反复补填片石，改良工艺通过压力监测与碾压调整避免无效作业。同时，立体防渗体系阻断90%以上渗水路径，减少返工，缩短工期。

2. 经济效益方面，该工艺降低了材料浪费率。传统工艺因片石填筑架空需多投20%~30%片石，改良工艺通过分层嵌挤减少材料用量。且施工周期缩短降低人工与机械台班费用，整体成本较传统工艺降低约15%。

3. 环境效益方面，立体防渗体系阻断熔岩裂隙渗水对淤泥层的软化，避免支架失稳风险，减少施工安全隐患。截水沟与截水坑设计防止地表雨水渗入，保护周边生态。

4. 推广价值方面，该工艺为熔岩地区桥梁建设提供可复制方案。例如：某高速公路桥梁工程实践验证其在复杂地质适应性强，解决了“淤泥+渗水”施工难题，为类似工程提供经验，获行业专家认可，应用前景广泛。

箱梁浇筑后，混凝土外观平整无裂缝，支架基础雨季无渗水、变形，验证了工艺在“熔岩+淤泥”复合地质中的可靠性。

4 结束语

“熔岩+淤泥”复合地质条件下的支架基础施工关键在于“因地制宜”——既要解决淤泥的软基特性，又要适配熔岩的起伏裂隙。换填片石工艺通过“淤泥分区处置、片石分层嵌挤、动态控压、立体防渗”的创新组合，打破了传统工艺的局限。实践证明，只有针对复合地质的特殊性进行精准技术创新，才能开发出真正适配工程需求的解决方案，为复杂地质条件下的交通建设提供坚实的技术支撑。

参考文献：

- [1] 林晋辉.深厚回填土地不均匀沉降原因分析及治理措施研究[J].江西建材,2021(12):266-267.
- [2] 张立.软土地带现浇箱梁组合支架基础处理工艺的对比分析[J].四川水泥,2021(04):56-57.
- [3] 王冬恒,危志豪.复理石顺层岩面支架基础处理技术研究[J].建筑机械,2024(08):125-129.
- [4] 黄长溪.公路桥梁结构支架法施工中的关键技术问题研究[J].交通科技与管理,2025,06(10):45-47.
- [5] 王召.公路桥梁支架现浇箱梁施工技术[J].交通世界,2021(35):109-110.