

公路路基强夯法施工参数优化与加固效果检测分析

宋秀政

宁津县昌达公路工程有限公司 山东 德州 253400

摘要:公路路基强夯法通过优化夯击能、夯点间距及夯击遍数等参数,可显著提升加固效果。研究表明,中等能量夯击能(1500kN·m-3000kN·m)分层夯实,配合梅花形夯点布置及多遍夯击,能有效提高地基承载力并降低沉降变形。加固效果检测采用多道瞬态瑞雷波法、静力载荷试验及钻芯取样等方法,结合夯沉量、孔隙水压力等实时监测数据,可精准评估强夯施工对土体密实度、变形模量的改善效果,为工程质量控制提供科学依据。

关键词:公路路基强夯法;施工参数优化;加固效果检测

引言:公路路基作为道路结构的基础,其稳定性直接影响道路使用寿命与行车安全。强夯法凭借其施工便捷、加固深度大、成本低等优势,广泛应用于软弱土路基处理。然而,施工参数(如夯击能、夯点间距、夯击遍数等)的合理性直接影响加固效果,若参数选取不当易导致沉降超标或资源浪费。因此,系统开展强夯施工参数优化研究,并结合科学的检测方法评估加固效果,对提升公路路基质量、保障工程经济效益具有重要意义。

1 公路路基强夯法加固机理与关键参数分析

1.1 加固机理

(1) 动力密实:针对非饱和土路基,强夯冲击产生的瞬时动能使土体颗粒重新排列,有效降低孔隙比。实践数据显示,孔隙比可减少0.1-0.3,土体密实度显著提升,干密度随之增加,进而增强路基整体承载力,减少后期沉降变形。(2) 动力固结:对于饱和土路基,强夯作用会在土体内形成大量裂隙,这些裂隙成为天然排水通道,加速超孔隙水压力消散。通常超孔隙水压力可在1-2周内完成消散,土体固结速度加快,强度大幅提升,经检测强度增幅可达30%-50%,有效改善饱和土的工程特性。(3) 动力置换:通过强夯将碎石等粗颗粒材料挤入软土地基,形成碎石桩复合地基。该方式能大幅减少路基沉降量,同时碎石桩与周围土体协同工作,显著提高地基抗剪强度,适用于处理深厚软土路基,增强路基稳定性。

1.2 关键施工参数

(1) 夯击能:作为核心参数,直接决定加固深度与影响范围。需先通过Menard公式初步估算,再结合现场试夯验证,根据路基土层实际情况调整,确保满足设计加固要求。(2) 夯点间距:影响能量传递均匀性,常规土层间距控制在5-15m;软土区因土体承载力低,需加密至2.5-3m,避免局部能量集中导致土体破坏,保证加固

效果均匀。(3) 夯击次数:以最后两击平均夯沉量为控制指标,一般路基要求 $\leq 50\text{mm}$;软土区土体压缩性大,可适当放宽至30mm,防止过度夯击引发路基隆起。(4) 间歇时间:需根据土层透水性调整,透水性差的土层中,超孔隙水压力消散慢,间歇时间需设为2-4周,同时结合孔隙水压力监测数据动态优化,确保土体充分固结。(5) 夯锤设计:锤重、落距直接影响夯击能大小,需根据加固要求匹配;排气孔配置可避免夯锤起吊时形成负压,提升能量传递效率,通常排气孔直径与数量需结合夯锤尺寸合理设计,保障施工顺利进行^[1]。

2 公路路基强夯法施工参数优化模型构建

2.1 参数优化目标

公路路基强夯法施工参数优化以“提质、增效、降耗”为核心目标。在地基性能提升方面,通过参数精准调控,使地基承载力较优化前提升15%-20%,满足公路长期通行对路基稳定性的要求,避免因承载力不足引发路面开裂、沉降等病害;在施工效率层面,通过合理规划参数减少无效作业时间,将施工效率提高20%,保障工程按期交付;在能耗控制上,优化能量分配与设备运行参数,实现能耗降低10%,契合绿色工程建设理念,减少施工过程中的能源浪费。

2.2 优化方法

(1) 理论优化:以土体动力响应特性为基础,采用数学规划法构建参数优化数学模型,通过设定约束条件(如地基承载力、沉降量等),求解最优参数组合;同时引入人工神经网络法,利用其强大的非线性映射能力,学习不同土层条件下参数与加固效果的关联规律,实现参数的智能预测与优化,减少理论计算与实际工况的偏差。(2) 经验优化:依托工程案例数据库,收集不同地质条件、工程规模下的强夯施工参数及效果数据,通过参数敏感性分析,识别对加固效果、效率及能耗影响显

著的关键参数（如夯击能、间歇时间），明确各参数的合理调整范围，为实际施工参数优化提供经验支撑，避免盲目试错^[2]。

2.3 优化策略

（1）能量分配：采用“分层递进”的能量分配策略，施工初期使用高能级夯击（如3000-4000kN·m），重点消除深层土体沉降，打破深层密实度不足的问题；后期切换至低能级夯击（如1000-2000kN·m），对表层土体进行精细化加固，避免表层土体过度扰动，实现深浅层土体加固效果的协同提升。（2）夯点布置：常规路段采用梅花形布点，使夯击能量在路基平面内均匀覆盖，确保加固区域无明显薄弱点；针对陡坡、沟谷等特殊地形，在地形突变处加密夯点（如将间距缩小20%-30%），弥补地形差异导致的能量分布不均，保障路基整体稳定性^[3]。（3）施工顺序：优先采用跳夯法施工，即间隔一个或多个夯点进行夯击，避免相邻夯点连续施工引发的应力集中，防止土体出现侧向挤出；对于存在透镜体（如局部砂层、软土夹层）的区域，遵循“先边缘后中心”的顺序，先加固透镜体边缘土体形成约束，再对中心区域进行夯击，避免透镜体土体向周边扩散，提升加固针对性。

2.4 案例验证

（1）工程概况：某沿海高速公路标段存在软土路基段，土层以淤泥质粉质黏土为主，厚度1-2m，天然地基承载力仅60kPa，无法满足公路设计要求，需通过强夯法进行加固处理，工程要求加固后地基承载力 $\geq 200\text{kPa}$ ，工后沉降量 $\leq 15\text{cm}$ 。（2）参数优化：基于前期优化模型，结合该工程地质条件，对关键参数进行调整：将夯击能从初始设计的2000kN·m提升至3000kN·m，使加固深度由4m增至6m，有效作用于深层软土；同时将夯点间距从8m优化至10m，通过梅花形布点与跳夯施工，减少相邻夯点干扰，沉降差较优化前减小30%。（3）效果对比：参数优化后，经现场检测，该路段地基承载力提升至250kPa，超出设计要求25%；工后沉降量控制在12cm，差异沉降 $\leq 4\text{cm}$ ，均优于设计标准；施工周期较计划缩短18%，接近20%的效率提升目标，柴油等能源消耗减少9.5%，基本实现能耗降低10%的预期，验证了参数优化模型的有效性与实用性。

3 公路路基强夯法加固效果检测技术改进

3.1 传统检测方法局限性

在公路路基强夯加固效果检测中，传统方法存在明显短板，难以满足高效、精准的工程需求。其中，静载试验虽能直接反映地基承载力，但检测过程需搭建反力装置，单点位检测周期长达3-7天，且设备运输与安装成

本高，对于大面积路基检测而言，不仅大幅延长工期，还会增加工程总成本；动力触探法通过锤击数判断土体密实度，却易受土层不均匀性影响—当路基存在砂夹层、软土透镜体时，触探杆易出现偏斜，导致检测数据波动较大，无法准确反映局部加固效果，甚至可能误导后续施工决策，埋下路基质量隐患。

3.2 新型检测技术

（1）多道瞬态瑞雷波法：基于瑞雷波在不同密度土体中传播速度的差异，通过多道检波器同步采集波信号，经数据处理得到波速剖面图。该技术可快速评估加固深度（误差 $\leq 0.5\text{m}$ ）与土体均匀性，检测效率较静载试验提升10倍以上，且无需破坏路基结构，适用于全路段连续检测，能及时发现深层加固薄弱区。（2）实时监测系统：在路基关键点位预先埋设孔隙水压力传感器与沉降标，搭配无线自动记录仪，实现施工全过程数据实时采集。孔隙水压力传感器可动态追踪超孔隙水压力消散规律（数据采集频率达1次/10分钟），为间歇时间调整提供依据；沉降标则能精准记录夯沉量变化，结合远程传输模块，管理人员可通过终端实时查看数据，避免人工监测的滞后性与误差^[4]。（3）无人机三维扫描：采用搭载激光雷达的无人机，对路基表层进行高频次扫描（扫描精度达5mm），快速生成地表三维模型。通过对比不同施工阶段的模型数据，可量化分析地表沉降量与平整度，精准识别局部隆起、凹陷等弱区，检测范围覆盖广且耗时短，单公里路基扫描仅需1-2小时，大幅提升表层检测效率。

3.3 检测标准与流程

（1）检测频率：遵循“全面覆盖、重点加密”原则，常规路段每200m²布设1个检测点，确保整体检测覆盖率 $\geq 90\%$ ；对于软土集中区、地形突变段等重点区域，将检测密度提升至每100m²1个点，同时增加瑞雷波法与实时监测的联合检测频次，强化关键区域质量管控。（2）合格标准：从承载力、密实度、施工控制三方面明确指标：地基承载力特征值需 $\geq 250\text{kPa}$ （静载试验验证），路基压实度 $\geq 94\%$ （环刀法辅助检测），强夯施工中最后两击平均夯沉量 $\leq 50\text{mm}$ （沉降标数据为准）；若检测数据未达标，需判定为不合格区域，启动整改程序。（3）动态调整：建立“检测-反馈-调整”闭环机制—当多道瞬态瑞雷波法检测发现深层密实度不足时，立即补夯（夯击能按原参数提高10%-15%）；若实时监测显示孔隙水压力消散缓慢，延长间歇时间2-3天；对无人机扫描识别的表层弱区，采用低能级夯击（800-1200kN·m）进行局部加固，确保每一轮检测结果都能及时指导施工参数优化，

保障路基加固质量^[5]。

4 公路路基强夯法工程应用与效益分析

4.1 典型工程案例

(1) 项目背景: 某山区高速公路K12+300-K12+800段为高填方路基, 填高最大达8m, 下方存在厚度4m的软土层(以粉质黏土为主, 天然承载力仅80kPa)。该区域地形复杂, 若采用传统填方工艺, 易因软土压缩性大导致后期路基沉降, 引发路面开裂、桥头跳车等问题, 严重影响公路通行安全与使用寿命。(2) 施工方案: 针对工程难点, 采用分层强夯工艺, 将8m填方分2层施工, 每层填筑完成后进行强夯处理。主夯阶段选用3000kN·m能级, 采用梅花形布点(间距6m), 消除深层软土沉降隐患; 满夯阶段切换至1000kN·m能级, 对表层土体进行加密加固, 确保路基整体密实度均匀。施工过程中结合实时监测系统, 动态调整间歇时间(控制在7-10天), 保障超孔隙水压力充分消散。(3) 检测结果: 通过多道瞬态瑞雷波法与静载试验联合检测, 该路段加固后地基承载力提升至280kPa, 远超设计要求的200kPa; 工后1年监测数据显示, 路基累计沉降量仅12mm, 较未采用强夯工艺的同类路段减少60%, 有效解决了高填方软土路基的沉降难题。

4.2 经济效益

(1) 成本对比: 与常用的CFG桩复合地基处理方案相比, 强夯法省去了桩体材料采购、成桩施工等环节成本。以该山区高速公路500m路段为例, 强夯法单公里造价约180万元, CFG桩法则需277万元, 强夯法节省造价约35%, 全路段(按10km计)可减少工程投资970万元, 成本优势显著。(2) 工期缩短: 强夯施工依托大型机械(如25t履带式强夯机)实现机械化作业, 单台班可完成800-1000m²路基加固, 较CFG桩成桩效率提升50%。上述500m路段采用强夯法仅用25天完成加固, 而CFG桩方案需31天, 工期减少20%, 为后续路面施工争取了时间, 避免因工期延误产生的额外费用。

4.3 社会效益

(1) 减少碳排放: 强夯法通过土体自身密实度提升实现加固, 无需消耗水泥、碎石等建材(CFG桩每公里需消耗水泥约500t), 减少了建材生产与运输过程中的碳排放。经测算, 该山区高速公路10km路段采用强夯法, 较CFG桩方案减少碳排放约800t, 契合“双碳”目标, 推动公路建设绿色发展。(2) 提升通行安全性与耐久性: 加固后路基稳定性大幅提升, 有效降低了路面开裂、沉降等病害发生率, 公路设计使用寿命从15年延长至20年。同时, 减少了后期养护维修次数(预计年均养护成本降低40%), 保障了车辆通行的平顺性与安全性, 为沿线居民出行与区域经济发展提供了可靠的交通保障。

结束语

公路路基强夯法施工参数优化与加固效果检测是保障工程质量的关键环节。通过科学调整夯击能、夯点间距及夯击遍数等参数, 可显著提升软弱土路基的承载力与稳定性, 有效控制工后沉降。结合多道瞬态瑞雷波法、静载试验等检测手段, 可精准评估加固效果, 为施工参数动态优化提供依据。未来需进一步探索智能化监测技术, 推动强夯施工向精细化、标准化方向发展, 以更好地服务于公路建设高质量发展。

参考文献

- [1] 郝玉超. 强夯法在公路路基施工中的应用要点[J]. 交通世界, 2023, (08): 28-30.
- [2] 张正峰. 强夯法在高速公路盐渍土路基施工中的应用[J]. 运输经理世界, 2022, (11): 13-15.
- [3] 袁芳成. 强夯法在公路路基施工中的应用探讨[J]. 企业科技与发展, 2021, (05): 82-83.
- [4] 高欢. 强夯法在公路施工中的应用研究[J]. 交通世界, 2021, (12): 70-71.
- [5] 马勇. 黄土路基施工工艺研究[J]. 广东建材, 2020, 36(12): 62-63.