

城市道路建设施工中的软基加固技术研究

王 浩, 徐泉城, 杨 垒

(济南市市政工程建设集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要 在城市道路建设中, 软土地基处理直接影响道路稳定性与使用寿命。针对济南地区典型软基特性, 本文系统分析了水泥搅拌桩、高压旋喷桩、CFG 桩及排水固结法等技术的原理、适用场景与施工要点, 结合经十路、二环南路等工程案例, 揭示了不同技术在淤泥质黏土、粉砂互层等复杂地层中的应用效果。研究提出了基于地质条件、环境限制与全周期成本的技术选择策略, 强调了施工中材料配比、过程监测及沉降控制的关键作用。实践证明, 精准匹配技术特性与工程需求是保障软基加固效果的核心, 相关经验可为同类城市道路建设提供参考。

关键词 软基加固; 城市道路; 水泥搅拌桩

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.016

0 引言

随着济南“东强、西兴、南美、北起、中优”城市发展战略的推进, 城市道路网络持续拓展与升级。然而, 济南地处黄河下游冲积平原, 部分区域软土地基分布广泛, 尤其在黄河沿岸、小清河周边及南部山区山前冲积地带, 软土层厚度不均, 含水率高(多在 30%~50%), 天然承载力低(通常小于 80 kPa), 给道路建设带来严峻挑战。近年来, 济南市政工程建设集团在经十路改造、工业南路扩建、黄河大道等项目中, 针对不同软基条件采用了多种加固技术, 积累了丰富的经验。本文结合这些工程实例, 对常用技术进行梳理与分析, 以期同类地区软基处理提供借鉴。

1 常见软基加固技术与工程应用

1.1 水泥搅拌桩加固技术

水泥搅拌桩是通过专用机械将水泥浆或水泥粉与软土强制搅拌, 形成具有一定强度的水泥土桩体, 与周围土体共同作用形成复合地基。该技术适用于淤泥、淤泥质土、粉质黏土等软土地层, 可有效地提高地基承载力, 减少沉降量^[1]。根据施工工艺不同, 分为湿法(水泥浆搅拌)与干法(水泥粉喷搅), 城市道路施工中湿法应用更为广泛, 因其搅拌均匀性更好, 尤其适合含水量较高的土层。济南经十路是济南市东西向交通主干道, 某标段施工时发现地表以下 3~8 m 为淤泥质黏土, 天然含水量达 45%, 承载力仅 50 kPa, 无法满足道路路基设计要求。经方案比选, 采用湿法水泥搅拌桩加固, 桩径 500 mm, 桩长 8~10 m, 间距 1.2 m, 按正方形布置。施工中严格控制水泥掺量(15%)与搅

拌速度, 确保桩体强度均匀。成桩 28 天后检测显示, 复合地基承载力达 150 kPa, 满足设计要求。该路段通车 5 年后回访, 路面无明显沉降裂缝, 证明加固效果良好。水泥浆配比需根据土层特性调整, 水灰比一般控制在 0.45~0.55, 避免过稀导致桩体强度不足或过稠影响搅拌均匀性。搅拌机械下沉与提升速度应匀速, 确保上下层土体与水泥浆充分混合, 尤其是在土层分界面处需重复搅拌。施工前需清除地表杂物, 平整场地, 避免因局部硬层导致桩体偏斜或断桩。

1.2 高压旋喷桩加固技术

高压旋喷桩利用高压泵将水泥浆以 20~30 MPa 的压力喷射, 切割破坏土体, 同时旋转提升钻杆, 使水泥浆与土体混合, 形成圆柱形桩体。该技术适用于复杂地层, 包括软土、砂土、碎石土等, 尤其适合处理深厚软基或对地基加固精度要求较高的区域(如邻近建筑物的道路段)^[2]。其优点是桩体强度高、可控性强, 缺点是施工成本较高, 且需注意高压喷射对周边环境的影响。济南二环南路快速路某匝道紧邻居民区, 地下 2~10 m 为淤泥质土与粉砂互层, 且存在浅层地下水。考虑到周边建筑物安全, 采用高压旋喷桩加固, 桩径 600 mm, 桩长 12 m, 间距 1.5 m, 梅花形布置。施工中采用三重管法(水、气、浆喷射), 控制提升速度 15 cm/min, 旋转速度 20 r/min, 避免因压力过大导致地面隆起。检测显示, 桩体 28 天抗压强度达 3 MPa, 复合地基承载力满足 200 kPa 设计要求。该匝道投入使用 3 年来, 路基沉降量控制在 15 mm 以内, 优于规范允许值(30 mm)。喷射压力与提升速度需根据土层硬度调整, 在硬土层中可适当提高压力, 软土层中降

低提升速度以保证搅拌效果。施工前需进行试桩，确定最佳工艺参数，同时设置监测点，实时观测地面位移与周边建筑物沉降，避免施工扰动。水泥浆需随配随用，存放时间不超过 2 小时，防止初凝影响喷射效果。

1.3 CFG 桩复合地基技术

CFG 桩（水泥粉煤灰碎石桩）是由水泥、粉煤灰、碎石、石屑等材料组成的半刚性桩，通过沉管或钻孔方式成桩，与桩间土、褥垫层共同形成复合地基。该技术适用于黏性土、粉土、砂土等土层，具有承载力提高幅度大、沉降小、造价低等优点，尤其适合处理厚度较大的软基或对工后沉降要求严格的城市主干道^[3]。济南新旧动能转换先行区某道路沿线为黄河冲积软土，土层厚度 10 ~ 15 m，天然承载力仅 60 kPa。设计采用 CFG 桩复合地基，桩径 400 mm，桩长 15 m，间距 1.8 m，正方形布置，桩顶设置 30 cm 厚级配砂石褥垫层。施工中采用长螺旋钻孔压灌混凝土工艺，避免泥浆污染，成桩效率高。检测显示，单桩承载力达 800 kN，复合地基承载力 220 kPa，满足设计要求。该道路通车 2 年后监测显示，最大沉降量 20 mm，整体均匀性良好。桩体材料配合比需严格控制，粉煤灰掺量不宜超过 30%，确保桩体强度与经济性平衡。沉管或钻孔过程中需控制垂直度，偏差不得超过 1%，避免因桩体倾斜影响复合地基受力性能。褥垫层铺设时需分层夯实，厚度误差控制在 ±20 mm，保证桩土共同作用效果。

1.4 排水固结法加固技术

排水固结法通过在软基中埋设塑料排水板、砂井等竖向排水体，结合地表铺设砂垫层形成水平排水通道，再施加预压荷载（堆载、真空或联合预压），促使土体中孔隙水排出，加速固结沉降，提高地基承载力。该技术适用于厚度大（> 10m）、含水量高（>

50%）、渗透性低的淤泥及淤泥质土地层，尤其适合对工后沉降控制要求严格的城市主干道或桥梁引道工程。其优点是加固效果均匀、成本较低，缺点是需 3 ~ 12 个月预压期，工期较长^[4]。济南黄河滩区某新建道路沿线软土层厚度达 15 ~ 20 m，天然含水量 55%，孔隙比 1.6，属典型超软土地基。设计采用“塑料排水板 + 堆载预压”工艺：排水板正方形布置，间距 1.2 m，板长 20 m 穿透软土层；表层铺设 50 cm 厚中粗砂垫层，堆载高度 3 m（等效荷载 80 kPa），预压期 6 个月。施工中定期监测沉降速率，当连续 10 天沉降量 < 1 mm/d 时卸载。检测显示，地基固结度高，承载力从 40 kPa 提升至 130 kPa，工后 1 年沉降量控制在 25 mm 以内，满足道路设计标准。需根据土层渗透系数调整间距（一般 1.0 ~ 1.5m），确保排水路径短捷，塑料排水板需垂直插入，避免扭曲、断裂。堆载材料选用级配砂石，分层填筑（每层 30 cm）并压实，荷载大小需接近设计荷载（不超过 105%），防止地基失稳。沿道路轴线每 50 m 设置监测断面，埋设沉降板与孔隙水压力计，当实测沉降量达预测值 85% 以上时，可判断固结完成。

2 技术对比与选择策略

2.1 不同技术适用性对比

城市道路软基加固技术的选择需基于土层特性、处理深度、环境要求等多维度综合评估。以济南地区典型地质条件为例，常用软基加固技术的适用性对比见表 1。

2.2 选择策略

2.2.1 地质条件优先：从土层特性锁定核心技术

济南地区软土地基以黄河冲积形成的淤泥质黏土为主，兼具含水量高（40% ~ 50%）、压缩性强（压缩

表 1 常用软基加固技术的适用性对比

技术类型	适用土层	处理深度	承载力提升效果	环境影响	工期效率
水泥搅拌桩	淤泥、淤泥质土、粉质黏土	5 ~ 15 m	中等	低（噪声小、无泥浆污染）	中等（需 28 天养护期）
强夯法	砂土、杂填土、松散黏性土	3 ~ 10 m	较高	高（振动噪声大，可能影响周边建筑）	快（无需养护，施工周期短）
粉煤灰垫层	浅层软土（厚度 < 3 m）	1 ~ 3 m	较低	低（利用工业废料，环保性强）	快（施工简便，可快速回填）
高压旋喷桩	各类土层（含碎石、硬黏土）	5 ~ 20 m	高	低（施工精度高，对周边扰动小）	慢（工序复杂，需高压设备配合）
CFG 桩复合地基	黏性土、粉土、砂土	8 ~ 25 m	高	中等（长螺旋钻孔工艺污染较小）	中等（成桩速度较快，需褥垫层施工）

模量 $<4\text{ MPa}$)的特点,不同深度的土层分布直接决定技术选型:深厚软基(厚度 $>5\text{ m}$)如济南新旧动能转换先行区部分路段,软土层厚度达 $10\sim15\text{ m}$,需采用桩体复合地基技术。水泥搅拌桩适用于纯软土层(无碎石夹层),如经十路某标段,通过湿法搅拌形成连续桩体,有效控制工后沉降(5年沉降量 $<20\text{ mm}$);若土层含粉砂或薄砂层(如二环南路匝道区域),高压喷射可破除砂层胶结,形成高强度桩体(28天抗压强度 $3\sim5\text{ MPa}$)。浅层软基(厚度 $<3\text{ m}$)如城市支路或临时施工便道,可采用经济便捷的表层处理技术:利用济南周边电厂粉煤灰(需检测烧失量 $<15\%$),分层夯实后形成柔性垫层,适用于承载力要求 $\leq 100\text{ kPa}$ 的低荷载道路;在砂土或回填土地段(如济南机场周边道路),通过 $800\sim1\,500\text{ kN}\cdot\text{m}$ 能级夯击,可将地基承载力从 80 kPa 提升至 150 kPa 以上,但需控制夯击间距($4\sim6\text{ m}$)避免地面隆起。

2.2.2 环境限制导向:平衡施工影响与周边需求

城市核心区施工常面临居民区密集、地下管线复杂等限制,需优先选择低扰动技术。敏感区域(如居民区、学校周边)禁用强夯法(振动影响范围可达 20 m),改用水泥搅拌桩或高压旋喷桩^[5]。例如:在济南泉城路改造工程中,临近百花洲片区民居,采用湿法搅拌桩施工,通过控制搅拌速度(提升速度 $\leq 0.5\text{ m/min}$),将施工噪声控制在 65 dB 以下,未对周边建筑基础造成扰动。空旷区域或工业区道路优先采用强夯法或粉煤灰垫层。如济南临港经济开发区货运通道,沿线为砂土回填层,采用 $1\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 强夯施工,每日可处理面积达 $5\,000\text{ m}^2$,工期较桩体工艺缩短且成本降低。

2.2.3 全周期成本考量:短期成本与长期性能的平衡

临时道路或低荷载道路(如小区内部路)选择粉煤灰垫层或换填法,单方成本 $<100\text{ 元/m}^2$,且施工周期短($7\sim10\text{ 天}$)。例如:济南某保障房小区内部道路,软基厚度 2 m ,采用级配砂石换填,虽承载力仅提升至 120 kPa ,但满足小区车辆荷载要求,且避免了桩体技术的冗余投入。城市主干道及快速路(设计使用年限 $\geq 15\text{ 年}$)需采用CFG桩或高压旋喷桩等长效技术。以济南顺河快速路南延工程为例,软基深度 12 m ,设计荷载为城-A级,采用CFG桩复合地基(桩间距 1.6 m ,桩长 15 m),初期成本较粉煤灰垫层高2倍,但工后10年沉降量控制在 10 mm 以内,避免了后期频繁维修的隐性成本,全周期经济性更优。

2.2.4 特殊场景适配:动态调整与创新应用

地下水丰富区域如济南小清河沿线道路,地下水

位埋深 $<2\text{ m}$,需避免采用干法水泥搅拌桩(易出现粉喷不均匀),改用湿法或高压旋喷桩,通过水泥浆护壁防止塌孔。在济南南部山区与平原过渡带,部分路段存在浅层溶洞,可采用“高压旋喷桩+注浆”组合工艺,先通过旋喷桩加固软基,再对局部溶洞填充水泥—水玻璃双液浆,确保地基整体性。

2.3 技术选择决策流程

在实际工程中,可按“勘察数据→设计要求→环境限制→成本测算”四步流程决策:(1)地质勘察:明确软土厚度、分层特性(如是否含砂层、有机质)、地下水情况;(2)荷载分析:根据道路等级确定目标承载力(城市快速路需 $\geq 200\text{ kPa}$,支路 $\geq 120\text{ kPa}$)及允许沉降量(主干道工后沉降 $\leq 30\text{ mm}$);(3)环境排查:标注周边建筑物距离(如 $<10\text{ m}$ 需控制振动)、地下管线位置(距桩体 5 m 内需调整工艺);(4)方案比选:建立技术—成本矩阵,如某项目同时满足“软基深度 8 m 、邻近居民区、设计承载力 180 kPa ”,则水泥搅拌桩与高压旋喷桩进入比选,最终通过试桩检测(如搅拌桩单桩承载力 600 kN vs旋喷桩 800 kN)结合成本差异(旋喷桩贵 30%)确定最优方案。

3 结束语

城市道路软基加固技术的选择需统筹地质条件、环境要求与全周期成本。水泥搅拌桩、高压旋喷桩等桩体技术在中深层软基处理中效果显著,粉煤灰垫层、强夯法适用于浅层或低荷载场景。济南地区工程实践表明,精准把控工艺参数与施工质量是控制沉降、保障道路长期稳定的关键。未来,随着城市建设向精细化发展,软基加固技术将更注重绿色材料应用、智能化监测及复杂环境适配,为高品质道路工程提供更可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 刘永彬.软基加固施工技术在市政道路施工中的应用[J].运输经理世界,2021(27):16-18.
- [2] 杜东荣.软基加固技术在市政道路工程中的应用[J].江西建材,2022(12):186-187,189.
- [3] 宋伯克.城市道路软土地基处理工程应用分析[J].城市建筑空间,2022,29(S1):235-236.
- [4] 顾凌军.市政道路工程软土地基沉降加固技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(14):197-199.
- [5] 周权.软基加固施工技术在市政道路施工中的分析[J].科学技术创新,2019(16):110-111.