

公路施工中软土路基的施工技术和处理方法

张浩昌

新疆昆仑工程咨询管理集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830010

摘 要：软土路基具有含水量高、承载力低、压缩性大、稳定性差的特点，是公路工程施工的常见地质难题，极易引发路基沉降、开裂、滑移等病害，严重影响公路施工质量与通行安全。本文结合公路工程施工实际，系统梳理换填垫层、排水固结、强夯加固、复合地基等主流软土处理技术，分析各类技术的施工要点与适用场景，总结施工中的质量控制措施，为软土地区公路路基施工提供科学、可行的技术参考与实践借鉴。

关键词：公路施工；软土路基；施工技术；处理方法

引言：随着我国公路交通网络不断向偏远、软土广布区域延伸，软土路基施工问题愈发凸显，成为制约公路工程建设质量的关键因素。软土特殊的物理力学性质，导致常规路基施工工艺难以适配，易出现各类路基病害，缩短公路使用寿命。为有效解决软土路基施工难题，保障路基结构稳定性与承载力，提升公路工程建设水平，本文针对性研究软土路基核心施工技术与处理方法，结合现场施工需求优化技术应用方案，助力公路工程高质量建设发展。

1 公路软土路基基本特性与施工病害分析

1.1 软土路基核心物理力学特性

(1) 高含水率、高孔隙比：软土天然含水率远高于普通土体，液限范围内呈流塑或软塑状态，土体内部孔隙发育充分，结构松散、密度偏低。高含水率直接降低土体有效应力，高孔隙比则为压缩变形提供了结构性空间，是导致路基沉降变形的核心诱因。(2) 低强度、低渗透性：软土天然抗剪强度与不排水抗剪强度普遍较低，承载力严重不足，难以支撑路基填筑与行车荷载。同时，软土颗粒细、孔隙微细，渗透系数极小，土体固结排水过程十分缓慢，施工后易出现持续沉降，延长工后稳定周期^[1]。(3) 高压缩性、触变性显著：软土在外部荷载作用下压缩指数高，变形量大，且具有明显的触变特性——受施工扰动（如碾压、打桩、开挖）后土体结构迅速破坏，强度显著下降；静置恢复过程中强度增长缓慢，灵敏度高，导致施工过程中稳定性控制难度极大。

1.2 软土路基对公路施工的主要危害

(1) 路基沉降变形：软土路基在上部荷载作用下会产生瞬时沉降、固结沉降与次固结沉降三种形态。瞬时沉降随填筑加载瞬间发生；固结沉降为孔隙水排出引起

的长期下沉，历时较长；次固结沉降则源于土体蠕变效应。三者叠加易引发路面纵向开裂、桥头跳车及路基局部塌陷等严重病害。(2) 路基失稳滑移：软土天然抗剪强度无法抵抗路基填筑产生的水平推力与剪切应力，当填筑速度过快或填筑高度过大时，易产生深层滑动面，导致边坡滑移、路基整体推移甚至滑塌，造成重大安全事故。(3) 路面破损病害：路基不均匀沉降传递至路面结构层，致使路面产生龟裂、沉陷、波浪起伏及车辙等病害，严重降低公路通行舒适度与行车安全性，增加后期养护维修成本。

1.3 软土路基施工影响因素

(1) 地质水文因素：软土覆盖厚度、空间分布连续性、下卧层倾斜程度以及地下水位变化、渗流方向等，直接决定软基处理方案的选型与施工设备配置要求，显著影响施工难易程度与处治成本。(2) 施工工艺因素：软基处理工法（如排水固结、复合地基、轻质路堤等）的选择、施工工序的衔接安排、压实与加载速率的参数控制等，直接决定处理效果的均匀性与长期稳定性，工艺不当会削弱加固成效，甚至引发二次破坏。(3) 环境气候因素：施工期间降雨量、蒸发量、气温变化及季节性冻融等条件，会动态改变软土表层含水率与土体稠度状态，影响机械设备作业效率与施工连续性，同时高温多雨季节易导致已处理地基的含水率回弹，严重干扰施工质量与进度计划。

2 公路施工中软土路基主流施工技术与处理方法

2.1 表层处理类施工技术

(1) 换填法：适用于软土厚度≤3m的浅层路基。施工流程：准备与放线→基坑开挖排水→基底整平→分层摊铺换填料（每层30~50cm）→机械碾压→质量

验收。技术要点：基坑预留工作面并设排水沟；填料最大粒径 $\leq$ 层厚 $2/3$ ，含泥量 $<5\%$ ；压实度：一般路基 $\geq 93\%$ ，高速及一级公路 $\geq 95\%$ 。适用场景：地表硬壳层薄、地下水位高、工期紧的路段。（2）砂垫层法：在软土顶面铺设中粗砂垫层，形成水平排水通道，加速固结，改善承载力。厚度 $0.5\sim 1.0\text{m}$ ，依软土灵敏度与荷载确定；压实相对密度 ≥ 0.70 ，含泥量 $\leq 3\%$ 。垫层宽出坡脚两侧各 $\geq 0.5\text{m}$ ，并与排水沟顺接。常与塑料排水板或堆载预压联合，单独用于软土薄、固结系数较高的路段^[2]。（3）抛石挤淤法：针对常年积水、机械难进场的高含水量淤泥质软土，直接抛填粒径 $30\sim 80\text{cm}$ 、强度 $\geq \text{MU}30$ 的大块石料，借自重挤压置换软塑至流塑状淤泥。施工从中部向两侧展开，重型推土机配合碾压，抛石高出原地面约 0.5m 后以碎石填塞空隙并振动压实。无需预先排水、速度快，仅适用于软土厚度 $\leq 3\text{m}$ 、底层有一定承载力的浅层软弱地基。

2.2 排水固结类施工技术

（1）塑料排水板法：以插板机械将预制塑料排水板（宽度 100mm ，厚度 $3\sim 5\text{mm}$ ，通水量不低于 $30\text{cm}^3/\text{s}$ ）竖向沉入软土层，形成密集竖向排水通道，缩短水平向渗流路径。布设间距通常 $1.0\sim 1.5\text{m}$ ，按正方形或等边三角形布置，插设深度穿透软土层进入硬层 0.5m 以上。控制要点：垂直度偏差不大于 1.5% ，回带长度不超过 30cm ，回带率控制在 5% 以内；板体预留外露长度不小于 20cm ，以便与水平砂垫层搭接。（2）砂井排水固结法：通过振动沉管或水冲成孔后灌注中粗砂形成竖向砂井，直径 $20\sim 40\text{cm}$ ，间距 $1.5\sim 3.0\text{m}$ ，有效处理深度可达 20m 以上。设计以固结度达 80% 所需时间为控制指标反算间距与深度，砂井顶部铺设厚度不小于 0.5m 的水平砂垫层连通各井，配合分级堆载预压（预压荷载为设计荷载的 $1.1\sim 1.3$ 倍），分级加载以控制剪切破坏风险。（3）真空预压法：在软土表面铺设水平排水垫层与密封膜，通过真空泵抽吸形成膜下负压（真空度维持 85kPa 以上），利用大气压力差替代堆载，使孔隙水沿竖向排水体排出。该法无需大规模堆载材料，适用于深厚层软土（ 15m 以上）及施工场地狭窄路段。关键工序为密封沟开挖、密封膜埋设、真空管路连接及真空度实时监测，膜下真空度 72h 内达设计值 80% 以上，持续抽真空 $3\sim 6$ 个月^[3]。

2.3 复合地基加固类施工技术

（1）水泥搅拌桩技术：利用深层搅拌钻机将水泥（掺量土重的 $12\%\sim 20\%$ ，425级普硅水泥）喷入软土中强制搅拌，形成柱状加固体。核心参数：搅拌下沉速

度 $0.5\sim 0.8\text{m}/\text{min}$ ，提升速度 $0.8\sim 1.2\text{m}/\text{min}$ ，搅拌次数不低于 20 次/ m ； 28d 无侧限抗压强度不低于 0.8MPa 。适用于软土厚度 $5\sim 15\text{m}$ 的路段。（2）CFG桩复合地基技术：采用振动沉管或长螺旋钻孔压灌工艺，将水泥、粉煤灰、碎石（配比 $\approx 1:2:6$ ）拌合后灌注成桩，桩径 $400\sim 600\text{mm}$ ，桩距 $3\sim 5$ 倍桩径，桩端穿透软土层进入承载力不低于 150kPa 的下卧层不小于 1.0m 。CFG桩与桩间土通过褥垫层（ $20\sim 30\text{cm}$ 级配碎石）协同受力，复合地基承载力可提升至原软土的 $2\sim 4$ 倍，适用于高速公路、一级公路深厚软基（ $15\sim 30\text{m}$ ）路段。（3）高压旋喷桩技术：利用高压泥浆泵将水泥浆液（压力不低于 20MPa ）通过旋喷钻头侧向喷嘴喷射，浆流切割破碎土体并强制掺混，钻杆以 $10\sim 20\text{r}/\text{min}$ 旋转提升，形成直径 $800\sim 1200\text{mm}$ 的圆柱状凝结体。该法适应性强，可在桥梁墩台等狭小空间作业。关键控制参数为喷射压力、旋转速度、提升速度的匹配及水灰比（ $0.8\sim 1.2$ ）的精确控制，成桩后通过低应变检测判定完整性^[4]。

2.4 施工技术选型原则

（1）地质适配原则：依据软土覆盖厚度、物理力学指标、下卧层性状及地下水赋存条件定向选择技术。浅层软土优先换填或抛石挤淤，深厚软土结合排水固结或复合地基，复杂地层可采用多种技术组合加固。（2）经济高效原则：在满足承载力与沉降控制标准前提下，综合比选材料费用、设备投入、施工周期及维护成本。优先采用就地取材、施工便捷的方案，实现技术可行与经济合理的统一。（3）安全耐久原则：确保施工过程路基稳定，加载速率与固结进度协调可控，避免工艺不当引发滑移破坏；同时保障运营期在交通荷载与水文变化下的长期稳定性，工后沉降满足规范限值（高速公路一般路段 $\leq 30\text{cm}$ ，桥头段 $\leq 10\text{cm}$ ）。

3 软土路基施工难点、质量控制与工程应用

3.1 现阶段软土路基施工核心难点

（1）地质勘察精度不足：软土在空间分布上极不均匀，常呈透镜体、夹层或尖灭状产出，钻孔间距过大或取样扰动均易导致含水率、抗剪强度、压缩模量等关键参数失真。勘察数据偏差直接造成设计方案与现场实际条件不匹配，进而引发技术选型失效或加固深度不足等系统性风险。（2）施工过程管控难度大：软土灵敏度高，施工机械行走、振动碾压、桩基钻进等作业均会对土体产生显著扰动，造成强度瞬时衰减。同时，工序衔接复杂（如排水与填筑交替、成桩与养护交叉），任一环节失控均易诱发压实度不足、排水板回带超标、桩体缩颈或断桩等隐蔽性质量问题，且事后检测往往难以全面覆盖。（3）后期沉降难以精

准控制：软土次固结蠕变变形持续时间长（可达数年乃至十余年），工后沉降速率难以准确预判。在车辆动荷载与地下水位周期性变化耦合作用下，桥头段与一般路基段易出现差异沉降，导致路面纵横向起伏，严重影响行车舒适性与结构耐久性。

3.2 全过程施工质量控制措施

（1）施工前期质量控制：加密勘察钻孔布设（间距不大于 20m），结合室内土工试验与原位测试（十字板剪切、静力触探）综合获取软土力学参数；在此基础上进行方案比选与优化，明确各工序验收标准；同步做好材料进场检验（砂石含泥量、水泥强度标号、排水板通水量）及设备标定校准，确保源头可控。（2）施工中期过程管控：严格执行工序交接验收制度，针对换填层厚与碾压遍数、砂垫层含泥量与相对密度、排水板插设深度与回带率、搅拌桩水泥掺量与喷浆均匀性等关键指标实施全过程旁站与实时参数记录；引入自动化监测设备（如孔隙水压计、分层沉降仪）动态反馈加载速率，指导施工参数及时调整，避免盲目作业^[5]。（3）施工后期检测验收：综合采用静力触探、钻芯取样、标准贯入、载荷板试验等手段，对处理后的路基承载力、桩身完整性、固结度进行系统检验。检测频率应满足规范要求（如搅拌桩取芯率不低于总桩数的 2%），对不达标区域及时采取补强或返工处理，确保整体质量闭合。

3.3 工程实例应用与效果分析

（1）工程概况：以某沿海高速公路软基处理标段为例，软土厚度 12~18m，含水率 65%~82%，呈流塑状态，地下水位埋深仅 0.5m，设计要求工后沉降≤30cm，承载力不低于 120kPa。（2）施工方案实施：采用塑料排水板+真空预压联合方案，排水板间距 1.2m、正方形布置、插设穿透软土层，真空度维持 85kPa 持续抽真空 4 个月，同步埋设分层沉降标与孔隙水压力计进行动态监测。（3）施工效果分析：处理结束后，平均固结度达 92%，实测承载力达 135kPa；工后 12 个月连续监测显示累计沉降量 22~26cm，路面平整度满足规范要求，验证

了该组合技术在深厚高含水率软土中的良好适用性。

3.4 施工技术优化与发展趋势

（1）技术优化方向：推进施工参数精细化调控（如基于实时监测数据的动态加载优化），应用物联网与 BIM 技术实现施工全过程可视化管控；同时推广粉煤灰、矿渣等工业固废替代部分水泥作为固化材料，降低碳排放与工程成本。（2）行业发展趋势：复合化与集成化软基处理技术（如真空联合堆载预压、刚性桩与排水体系协同）将成为主流，满足不同地质条件下的综合加固需求；数字孪生、智能压实及基于人工智能的沉降预测模型将逐步落地，推动软土路基施工向智能化、精准化、绿色化方向持续升级。

结束语

综上所述，软土路基处理是公路工程施工的核心难点工作，各类施工技术与处理方法各有优劣，适配不同地质条件与施工场景。在实际施工中，需结合施工现场软土厚度、水文地质、公路等级及工期成本等要素，科学择优搭配施工技术，严格落实全过程质量管控。持续优化软土路基施工工艺，严控施工细节，可有效规避路基病害，提升路基稳定性与承载力，为公路工程安全、长效运营筑牢基础。

参考文献

- [1] 柯劲波, 顾松, 徐峻, 孟雄, 张荣. 云贵高原山区高速公路软土路基滑移处治技术 [J]. 公路交通科技, 2023, 40(05): 42-48.
- [2] 王景. 公路软土路基水泥搅拌桩施工技术及其质量控制研究 [J]. 路基工程, 2022, 19(05): 112-117.
- [3] 刘杰, 杨春风. 滨海公路深厚软土路基真空预压联合堆载施工技术 [J]. 公路, 2024, 69(03): 76-81.
- [4] 陈曦. 公路软土路基强夯置换法施工工艺及适用性研究 [J]. 公路工程, 2023, 48(06): 132-137.
- [5] 徐亦湾. 浅析软土路基处理技术在公路工程施工中的运用 [J]. 中国设备工程, 2025, 37(03): 251-253.