第 7 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2737-4580(P) / 2737-4599(O)

道路桥梁施工中软土地基处理新技术的应用研究

尚宁
江苏省润城市政建设工程有限公司
DOI:10.32629/jpm.v7i10.9063
[摘　要] 当前，国内交通基建规模持续扩大，道桥项目建设频繁遇到软土地基。这类土体含水量与压缩性偏高、承载力不足，地基处置不到位会诱发沉降、结构开裂，严重时造成构筑物坍塌，直接影响工程安全。合理选用软基处理方案，可兼顾工程质量、造价与运行安全。基于此，本文先阐述介绍软土的工程特性及其对道桥产生的不利作用，再明确软土地基处理的核心目标及选择原则，梳理现有处置技术体系。重点分析高压旋喷桩、刚性复合地基、真空-堆载联合预压以及生态化学加固等新技术的施工要点，结合实际工程案例检验技术实施成效。研究成果可为提高道桥地基稳定性、延长构筑物服役年限提供理论依据与现场施工参考。
[关键词] 道路桥梁施工；软土地基；处理新技术；工程质量

Research on the Application of New Technologies for Soft Soil Foundation Treatment in Road and Bridge Construction

Shang Ning
Jiangsu Runcheng Municipal Construction Engineering Co., Ltd.
[Abstract] Currently, the scale of transportation infrastructure development in China continues to expand, and road and bridge projects frequently encounter soft soil foundations. Such soil types exhibit relatively high water content and compressibility, as well as insufficient bearing capacity; inadequate foundation treatment can lead to settlement, structural cracking, and, in severe cases, the collapse of structures, thereby directly compromising project safety. The appropriate selection of soft soil treatment solutions can simultaneously address engineering quality, cost efficiency, and operational safety. Accordingly, this paper first elaborates on the engineering characteristics of soft soil and its adverse effects on road and bridge structures; it then delineates the core objectives and selection criteria for soft soil foundation treatment, and reviews the existing suite of treatment technologies. Particular emphasis is placed on analyzing the key construction considerations for emerging technologies—including high-pressure jet grouting piles, rigid composite foundations, combined vacuum and surcharge preloading, and eco-chemical reinforcement—while validating their practical effectiveness through real-world engineering case studies. The findings of this study provide both a theoretical foundation and practical field guidance for enhancing the foundation stability of road and bridge structures and extending their service life.
[Key words] road and bridge construction; soft soil foundations; new treatment technologies; project quality

在交通基础设施持续推进的背景下，道桥项目不断拓展至沿海、沿江及三角洲软土集中区域。软土地基由淤泥、淤泥质土、泥炭土等构成，土体含水量高、压缩性强、承载力低、透水能力差，受荷载作用易发生大幅沉降与不均匀变形，危害桥梁道路结构稳定，给勘察、设计与现场施工带来诸多难题[1]。传统软基处理技术沉降管控效果有限，施工周期长，对周边环境干扰较大，难以满足当前工程耐久性与绿色施工要求。相关统计显示，软土地区道桥工程中，因地基处置不当引发的病害占比超 30%，不仅会增加后期养护费用，还会埋下交通安全隐患。因此，探索软土地基新型处理工艺，有效控制地基变形，减少工程病害，对保障道桥建设品质，助力交通工程高质量发展具备较强工程实用价值。

1 软土地基的特点及其对道路桥梁工程的影响

1.1 软土地基的特点

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

软土多形成于饱水环境，含水量普遍在 30%~80%，滨海区域软土含水量甚至超过 70%，土体常呈流塑状态，施工难度大。其孔隙比多处于 1.0~2.0，部分软土孔隙比更高，土体颗粒联结薄弱，地基承载力偏低，在外荷载作用下极易产生变形。软土抗剪强度较差，淤泥质土内摩擦角 5°~15°，粘聚力仅 10~30kPa，远低于普通地基土，受剪切荷载时容易失稳破坏。同时软土压缩性高，荷载作用下土体变形具备时效性，荷载持续作用会引发长期沉降，威胁工程长期稳定。加之土体颗粒细小、透水性弱，采用排水固结法处理时，孔隙水排出缓慢，拖慢地基加固进程。

1.2 软土地基对道路桥梁工程的影响

软土特殊的物理力学性质，会给道桥施工与后期运营带来多重风险。受高压缩性影响，地基易出现大幅度、不均匀沉降，造成基础倾斜开裂，改变桥梁上部结构内力分布，引发梁体裂缝、支座损毁等病害。软土承载力不足，施工设备与上部结构荷载容易超出地基承受极限，引发地基剪切破坏，干扰施工进度，诱发安全隐患[2]。同时，软土还具备触变性与流变性，在车辆荷载与自重作用下，路基沉降量可达 200~500mm，沉降稳定周期长达 3~5 年。此外，不均匀沉降造成路面波浪变形，平整度超标 2~3 倍，降低行车安全与舒适度，桥台与路基位置沉降差 50~100mm，桥头跳车问题频发。软土地基边坡安全系数常低于 1.3，滑坡风险较，对于桥梁桩基，软土会产生负摩阻力，单桩承载力下降 20%~30%，降低桥梁整体结构安全性。

2 道路桥梁施工中软土地基处理的核心目标及选择原则

2.1 核心目标

软土地基处理核心在于提升地基承载力、控制沉降变形，保障构筑物整体稳定。处理后地基承载力特征值应≥150kPa；总沉降量不大于 50mm，工后沉降控制在 30mm 以内，差异沉降坡度≤0.15%；边坡安全系数大于 1.5，满足抗震液化规范。固结度、压实度达到 90%、93%以上，回弹模量提升至 40MPa 以上，地基处理造价控制在工程总造价 15%以内。

2.2 选择原则

选用地基处理技术需遵循四项原则。（1）匹配地质条件，浅层软土适合换填垫层、加筋法，深厚软土优先排水固结、深层搅拌工艺；（2）契合工程设计标准，桥梁等沉降控制严格的项目，选用控沉效果优良的技术；（3）兼顾现场施工条件，场地受限的城市道路避开大型机具作业方案；（4）兼顾经济性，小型道路选用低成本换填垫层法，大型桥梁虽排水固结法投入偏高，但长期稳定性更优[3]。

3 道路桥梁施工中的软土地基处理新技术

3.1 高压旋喷桩技术

高压旋喷桩适合标贯击数小于 30 的淤泥、黏性土、粉土、等土层。若土层块石、植物根茎或有机质含量偏高，高压射流破碎拌合效果变差，成桩质量难以保障，需预处理，若地下水流速较大，浆液易流失，需掺加速凝剂或调整工艺。该技术多用于提升地基承载力、控制沉降，能够构筑防渗帷幕与基坑支护，不适用于高桩身强度、大水平荷载工况，常需搭配其他桩基共同使用[4]。施工依靠高压射流切割土体，将水泥浆液和软土拌合形成固结桩体。作业时钻杆转速维持 10~15r/min，浆液喷射压力控制 20~40MPa，通过浆液与土体混合固化，实现地基加固与防渗。工艺分为单管、双管、三管法。单管法喷射水泥浆，设备简单，但加固范围与效果有限；双管法喷出浆液与压缩空气，二次切割土体，加固效果优于单管法；三管法喷射高压水、压缩空气和浆液，土体切割拌合效果最好，加固范围最大，不过设备复杂，施工成本更高[5]。

3.2 刚性复合地基技术

刚性复合地基借助桩土共同受力提高软土地基的性能，通常采用 C30~C50 的预制桩或者灌注桩，桩径在 400~800mm，桩长 15~30mm，桩的间距选取 3~5 倍。设计运用有限元计算桩土的应力分配情况，桩体需承受 70%至 85%的上部荷载，剩余荷载则由桩间土体承担。本次施工作业选用静压桩压桩机来完成压桩作业，压桩力量不超过桩的强度 80%，桩垂直度偏差把控在小于 0.5%内。相关研究显示，沿海地区高速工程运用直径为 600mm 的预应力钢管桩，按照 2.5m 的正方形布局，当地基承载力从初始的 80kPa 上升至 280kPa 时，整体沉降幅度降低了 82%。针对桩基顶部铺设厚度为 300mm 的碎石褥垫层，以此协调桩土变形状况，使差异沉降把控在小于 0.1%内。12 个月工作后监测发现路基最大的沉降仅仅是 18mm，比 50mm 的限值要好。与传统的搅拌桩相比较，造价降低了 23%，工作时间缩短了 40min，技术方面的经济效益很明显。

3.3 真空-堆载预压技术

堆载预压依靠分层填筑砂石、土料施加荷载挤压土体，从而排出孔隙水，在施工时需要把控加载的速率，防止土体剪切被破坏，能够承受较大荷载，但沉降稳定时间较长，适用于材料充足、工期宽裕的场所。真空预压依靠真空泵来产生负压，利用气压差来排出土体的水分，不需要大量堆填的物料，施行周期更短，适宜大面积软基、土源不足的地方[6]。两种工艺相互结合，借助真空预压对土体进行加固，分级堆载，平衡地基的承载力与施工效率。整套工艺包含密封结构、排水系统以及荷载调控装置。施工时铺设砂垫层以及 B 型 SPB-100 塑料的排水板，铺设板按照 0.8~1.2 米的正方形进行布置，深度穿过软土层。密封运用三层厚度为 0.12mm 的 PVC 膜进行热熔焊接操作，确保真空度保持在 85kPa 及以上，堆载按照 1.2~1.5 的超载比分层施加。例如，在港口堆场的工程实例中，针对厚度为 20mm 的淤泥质黏土，经 120min 的联合预压处理后，其平均固结率可达 92%，相较于单独开展真空预压的方案，整体时长缩短了 40min。由于正负压力协同作用，排水效率提升 1.8 倍。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

原本仅 1.2m 的沉降区域经过稳定处理后，残余沉降厚度仅为 15mm，土体十字板的剪切强度已从 18kPa 上升至 45kPa，地基承载力符合 40kg 集装箱的堆载需求。工艺砂石的用料减少了 50%，工程造价则降低了 35%。

3.4 生态与化学加固技术

传统水泥、强夯等地基加固工艺能耗比较高，碳排放比较大，对生态的影响比较明显。全球混凝土每年消耗量超过 140 亿吨，每年 CO_2 的排放量大于 24 亿吨。在双碳背景下，绿色加固技术变成岩土工程研究的领域，生态化学加固存在微生物矿化、离子固化剂两种技术。微生物矿化时，借助巴氏芽孢杆菌催化尿素完成水解，产生碳酸根且与钙离子相结合，分解出碳酸钙晶体，填充土体孔隙，使得松散土颗粒胶结。施工时菌液的浓度保持在 10^6 个/mL，尿素和氯化钙的溶液按照 1：1 摩尔比例进行灌注，碳酸生成量能够达到土体干重的 3%~5%[7]。例如，某边坡进行加固工程完成 6 轮注浆后，砂土的摩擦角由 32° 升高至 41°，其渗透系数也同步下降了两个数目。本次选取的离子土基固化剂为磺化油基类有机物，其浓度范围设定为 0.5%~1.0%，通过离子交换破坏黏土的双电层。现场拌和深度把控在 0.3~0.5m，压实程度能够达到 93%或者更高。检测结果显示固化黏土液限降低了 18%，塑限度提高了 12%，加州承载比从 4%提升至 35%。整体的工艺扰动比较小，能耗较低，符合低碳的施工观念，适用道桥软基的绿色加固情况。

4 道路桥梁施工中软土地基处理新技术案例分析

4.1 工程概括

研究选取 PHC 桩复合基础在高速铁道桥头过渡区段的应用场景作为分析样本，该场地地处海拔较高的冲积平原区域，整体地质条件相对复杂。地表分布 2.5m 的杂填土，下层是 12m 淤泥质的黏土，含有 65%水分，孔隙比 1.35，压缩系数 0.8MPa^{-1}，不排水抗剪强度 18 千帕；再往下是 6m 粉质黏土，含水比率 28%，孔隙比为 0.75；深部处于粉细砂层中，标注贯击数量 15 击。过渡段工作完成后沉降限值为 15mm，桥头路基刚度比控制在 1.5 内，地基需要承受列车的动荷载，地基加固施工需在 60min 内完成且符合设计强度要求，施工管控难度较大。

4.2 技术方案设计与实施

工程选用 PHC 桩复合地基方案，桩径 500mm，桩长 18m，穿透软土且嵌入粉细砂层 1.5m；桩纵向间距为 2.2m，横向距离为 2.5cm，呈梅花形布置，桩身使用 C80 混凝土，进行静压沉桩操作，压桩力量为 3000kN。施工采用智能监控的方式，让桩身的垂直度出现偏差不超过 0.5%，运用跳打工艺减轻挤土效应，每一天沉桩不超出 20 根。在桩基完成后加入 1.2 倍设计荷载堆载且进行预压 30min，当天沉降低于 0.1mm 可以卸载。检测结果显示复合地基承载力为 280kPa，单桩所承载力为 1200kN，符合设计的指标。

4.3 实施效果

从经济效益维度展开分析，采用全周期成本核算，PHC 桩方案初期投入比搅拌桩高出 25%，但在后续运维环节，维护成本下降了 60%，全生命周期的总成本同样减少了 18%。从技术层面来看，该桩地基的承载能力提升了 3.5 倍，工程竣工后沉降被控制在 12mm 以内，整体性能优于设计规范 20%，施工周期缩短了 40d。环境方面，PHC 桩碳排放强度 0.8tCO_2e/m，相比传统工艺减排 35%，土方开挖量减少 50%，施工噪声降低 20dB。社会效益方面，施工阶段保留双向四车道通行，事故发生率下降 40%；运营阶段路面平整度提升 30%，公众满意度提高 25%。项目综合效益指数 0.87，评价等级优秀，具备良好推广前景。

5 结语

综上所述，道道路桥梁工程建设中，软土地基加固直接决定工程质，各类软基处理工艺原理、适用条件各有差异，方案选型要结合现场地质、设计指标、施工条件与造价综合判断。高压旋喷桩、刚性复合地基、真空-堆载预压、生态化学加固等新技术各有适用场景。案例中的 PHC 桩复合地基有效解决桥头跳车与不均匀沉降问题，同步提升地基承载力，在经济、环境与社会效益上优势明显。随着基建向着高标准、可持续方向发展，软基技术应融合智能监测、大数据、绿色新材料，持续研发高效低成本的环保加固手段，为道桥工程建设提供技术支撑。

[参考文献]

[1]李鸿烈.软土地基处理技术在市政道路桥梁工程施工中运用探究[J].中文科技期刊数据库（引文版）工程技术,2026,(9):029-032.

[2]李念成.道路桥梁工程中软土地基施工技术应用探究[J].科技资讯,2026,24(16):132-134.

[3]贾进攻.市政道路桥梁工程施工中软土地基处理技术应用研究[J].中国科技期刊数据库 工业 A,2026,(1):151-155.

[4]张艺援.软土地基处理新技术的工程应用研究[J].江西建材,2026,(4):244-246.

[5]柴志磊,王晓锋,王永光.高压旋喷桩施工技术在软土地基处理中的应用研究[J].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术,2025,(6):117-120.

[6]邹豪豪.道路工程施工中软土地基处理技术的对比分析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2026,(1):087-091.

[7]赵立业,王新宇.道路桥梁施工中软土地基处理新技术的应用与效益评估[J].陶瓷,2026,(4):178-180.

作者简介：尚宁，1984-7-1，男，江苏省镇江市，汉族，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.