

# 软基加固技术在城市道路施工中的应用

文 / 徐晓阳 菏泽城建工程发展集团有限公司

**摘要：**在城市化进程加快的背景下，城市道路的施工要求不断提升，如果遇到软土地基，必须制定针对性的加固技术方案，才能够让城市道路工程效益得以最大限度发挥。文章从这个角度入手，系统分析了主流的软基加固技术，主要有换填垫层、排水固结、水泥搅拌桩、流态固化土等，结合典型城市道路工程案例，对复杂环境下软基加固方案的设计要点、施工要求、质量控制措施进行界定，并对其效益进行了评估，由此提出，在软基加固工程中，要坚持科学性和合理性原则，建立相应的技术体系，才能使城市道路工程效益得到充分发挥。

**关键词：**软基加固；加固技术；城市道路施工

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.049

## 引言

软土有着高含水量、低强度、易变性等特点，如果不能妥善处理，可能会导致城市道路出现路面开裂、不均匀沉降等问题，继而对道路的安全性和耐久性造成极大的不良影响。传统的处理技术，往往不能满足现代城市道路对于承载力、变形控制的要求，因此必须要使用更加理想的加固技术方案。

### 一、软土地基特性以及对于道路工程的影响

#### （一）软土的基本物理力学性质

软土是一种特殊岩土介质，其固有属性会对道路工程建设造成极大的影响。在物理力学性质维度，软土展现出如下的特点：天然含水率常超液限，土体处于饱和和软塑状态；孔隙比较大，渗透系数比较低，排水固结速度处于相对缓慢的状态；抗剪强度指标低于常规土体，承载能力也比较差。这种特性赋予软土明显的触变性、流变性，受扰动后，容易发生结构上的破坏，继而让地基变形的风险不断增加。

#### （二）软基引发的道路工程问题

软基对道路工程的影响体现在工程结构的安全性和耐久性方面。在施工环节，没有充分加固的软基，可能会因为荷载作用产生比较大的沉降差，让路基出现横向裂缝、纵向起伏等问题。在运营的过程中，持续的承压，会让沉降效益增强，继而撕裂路面结构层，形成反射裂缝，严重的时候，甚至会出现局部的坍塌。更为严重的是，软土的次固结效应，使长期沉降难以精准预测，这对需要持续高精度平整度的城市道路来说，是很不利的。

#### （三）城市道路软基加固的特殊要求

城市道路处于复杂的环境中，对于软基加固的要求更高。在城市道路系统中，密集的地下管网、附近的建筑物、繁忙的城市交通，使传统大面积开挖作业方案难以有效实施。另外，在施工过程中很容易出现振动、噪声，这些也需要进行控制，否则可能对周边居民的生活造成诸多影响。

### 二、常用软基加固技术原理以及适用性分析

#### （一）浅层处理技术

浅层处理技术，关注的是地表以下一定范围内的改

良，可以换填垫层，置换软弱土层，将砂砾、碎石等透水性材料使用进去，实现刚性持力层的打造，由此可以阻断地下水上升通道，让浅层承载能力不断提升。依靠该方法，施工简单，周期较短，适合应用于一些软土层比较薄，并且没有地下障碍物的工程中。强夯法，使用重锤冲击能量，可以让土颗粒进入到重新排列的状态，瞬时压缩孔隙体积，可以快速密实松散土层，但是很容易造成周边的振动，在一些密集的城市区域，往往不会使用该方案。下图1为浅层处理技术现场示意图。



图1 浅层处理技术现场图

#### （二）深层处理技术

在软土层深度超过一定范围之后，会使用深层处理技术。首先是排水固结法，通过插入塑料排水板、设置砂井的方式，构建竖向排水通道，加上堆载预压，使土体排出自由水，继而完成土体的固结任务，从而让沉降周期不断缩短。其二，水泥土搅拌桩法，利用深层搅拌机，将固化剂与软土强制拌和，原位生成高强度的水泥土复合地基，其网格状分布可使上部荷载得以扩散。其三，若处于特殊地质条件，还可采用高压旋喷技术方案，依靠高压射流切割地层，并注入相应浆液，形成柱状加固体。

#### （三）新兴技术与组合工艺

在技术不断进步的背景下，新兴工艺会不断突破传统边界。在此期间会用到的技术有：其一，真空预压法。引入负压加速排水进程，相较于正压加载，可减少工后

沉降量；其二，微生物诱导碳酸钙沉淀技术，可利用特定菌种的代谢活动生成方解石晶体，从而从微观尺度上实现土体的胶结强化；其三，引入组合工艺理念，例如将排水板、碎石垫层、分层碾压等技术融合，构建立体加固体系，可发挥单项技术优势，并依靠协同作用克服单一技术的不足。

### 三、软基加固技术在城市道路工程中的应用实践

#### (一) 工程概况与地质勘察结果

以我国某城市快速路项目为例，道路全长为 13.77 公里，双向六车道，横贯主城区、高新区和开发区，是连接老城区与新建机场的重要工程。该项目所经农田及老城区段，地表以下有厚度 9 米至 12 米的淤泥黏土层，局部区域还有薄层粉砂透镜体。地质勘探后，还发现如下结果：软土层天然含水量均值为 68%，液限指数高达 1.2，十字板剪切强度仅为 7-12kPa，压缩模量很低，因此将其归为高压缩性、低承载力的软弱地基范畴。再者，场地地下水埋深比较浅，容易受到潮汐因素的影响，这会严重影响地基稳定性。下图 2 为该工程的通车图。



图 2 工程通车效果图

#### (二) 使用的加固方案

考虑到本项目的地质条件和建筑需求，设计团队在加固方面，选择了真空联合堆载预压与水泥土搅拌桩复合地基融合技术。详细来讲，该技术的内容主要涉及：其一，先施打塑料排水板，形成竖向排水通道，以梅花形状来分布；其二，同步穿插  $\Phi 500\text{mm}$  的水泥土搅拌桩，桩长穿透软土层进入到持力层，对于桩身，会使用 42.5 级普通硅酸盐水泥，掺入比控制在 15%~18% 之间；其三，铺设两层土工格栅，让垫层的强度得以提升，上层是高强度聚酯长丝土工布，下层选择的是双向拉伸塑料土工格栅；其四，落实真空联合堆载预压方案，真空度维持在 85kPa 以上，堆载高度依照等效荷载换算来界定。上述的方案可以很好地发挥排水固结法的效能，加上搅拌桩的使用，可以让地基整体刚度不断提升，继而实现完善的治理系统的构建。

#### (三) 施工工艺流程与关键质量控制要点

在施工的过程中，严格依照分区段推进和全流程监控的原则。详细来讲，其工序为：场地平整、测量放线、

塑料排水板插设、搅拌桩成桩、土工格栅铺设、真空系统安装、分级加载、卸载与路面施工。在质量控制期间，关注点在于：其一，严格把控原材料，所有水泥需提供出厂合格证和复检报告，每批进场材料要按需抽样检测；其二，成桩质量管控，使用轻型动力触探法，检测桩身的完整性，按照总体的一定比例进行单桩承载力静载试验；其三，排水系统维护期间，要定期检查滤管的通畅性，避免出现淤堵的情况。

#### (四) 监测数据分析

该项目形成了完善的监测体系，引入了表面沉降表、分层沉降仪、测斜管、孔隙水压力计等设备。按照设备使用规范，获取了对应的监测数据：其一，预压期前 90 天累计沉降量达到 487mm，占据总体沉降量的七成左右，这意味着大部分固结已经完成；其二，第 180 天后日均沉降速率降至 0.3mm 每天以下，满足卸除真空条件；其三，横向差异沉降控制在 1/400 以内，比设计值要更加理想；其四，依靠有限元软件的反复推演分析，复合地基承载力特征值达到 120kPa，比原土提高了 8 倍之多；其五，在特定断面出现了局部隆起的现象，在经过排查之后，发现是排水板断裂导致的，对此迅速打加密排水板，使得对应问题得以有效控制<sup>[1]</sup>。

#### (五) 经济效益与社会效益评价

本项目总体投资中软基处理费用占比为 27%，虽然高于常规地基处理的成本，但是综合效益明显：其一，直接经济效益角度来看，通过优化桩长设计和分级加载等措施，实现了混凝土用量的节约，节约量为 12%，缩短了 6 个月的工期，减少了贷款利息支出；其二，社会效益角度来看，道路通车后日均车流量达到 3.2 万辆次，有效解决了原来道路拥挤的问题，使得沿线土地增值达到 15 亿元；其三，从生态效益角度来看，施工期间使用了封闭式防尘网覆盖、泥浆固化处理等手段，平面 O 浓度比同类型工程下降 55%，符合本地区文明工地的标准。

### 四、软基加固施工中的关键问题与对策

#### (一) 施工质量控制难点

##### 1. 成桩质量检测

在软基加固工程中，不同的桩基质量，会有不同的加固效果。在此维度，当前最大的问题是：如何精确判定桩体的完整性、如何去判定桩体的强度是否达标。传统的检测手段，多数会以轻型动力触探模式为主导，虽然可以快速筛查浅层次的缺陷，但是不能对深层断裂、缩径等问题进行识别。如果使用静载试验，可以直观反映承载力，但是受到场地条件限制，耗费时间比较长。在工程实践中，会将过程控制和抽样验证手段组合起来，施工环节会依靠电流电压曲线监测喷浆的均匀性，继而将提升速度控制在合理范围内；成桩之后依照总体桩数的千分之五进行单桩的复合地基荷载试验，另外还会开展钻芯取样检测，此时关注的是芯样的连续性。下图 3 为软基成桩流程图。

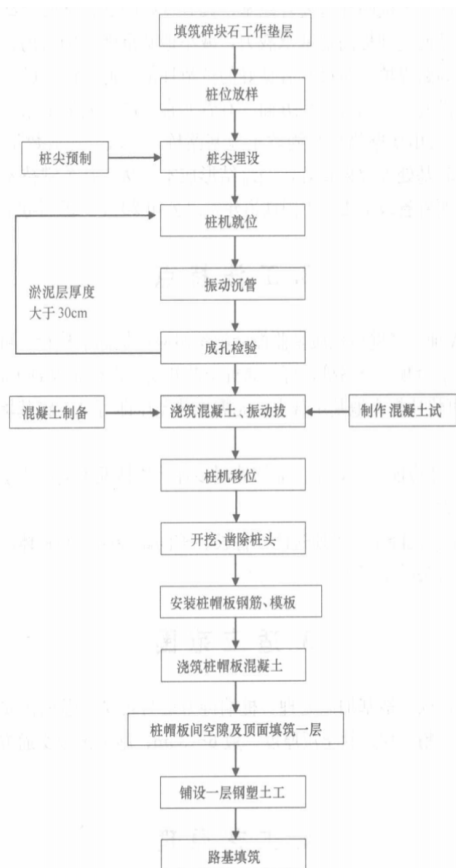


图3 软基成桩流程图

### 2. 排水系统堵塞与失效防治

排水固结法的主要价值在于：维持排水通道的顺畅性，但是在实际运作期间，会受到淤泥包裹因素、滤膜老化因素的影响，让排水板处于失效的状态。对此，可以采取针对性的措施去应对：其一，选择抗老化聚乙烯排水板，外裹透水性土工布；其二，设置保护套管防止打设过程中出现弯曲折断的情况；其三，建立三级巡查制度，每天检查排水板出露的高度，每周去测试代表性位置的流量衰减曲线，每月清理横向排水盲管。

### 3. 分层沉降观测数据的实时反馈机制

传统的分层沉降仪往往依靠的是人工定期读数，不能获取瞬时变形特点。现代工程中，往往会将自动化监测系统引入其中，提前埋设磁致伸缩式传感器，加上无线传输模块，可以实现毫米级精度的实时监测。在此期间，需要建立监测、预警、调整闭环的机制，在某层沉降速率超过警戒值的时候，系统可以自动触发警报，将其推送给对应项目管理平台。对于技术人员，会结合平台数据信息，去调整加载速率，必要的时候会暂停堆载，进入补压处理环节<sup>[2]</sup>。

## (二) 环境影响与风险管控

### 1. 地下水位变化的生态影响评估

大规模抽排地下水，可能会导致地面沉降漏斗扩展，这会对周边植被生长以及建筑物的安全造成极大的不良影响。对此，需要建立三维地下水流数值模型，可以模拟不同工况下水位变动情况。对于敏感区域可以设置回

灌井群，使用抽灌平衡的工艺，将抽出的地下水经过沉淀后回灌到深层含水层。

### 2. 施工振动对于周边敏感结构的扰动控制

强夯、打桩等工序产生的振动波，会对于附近老旧房屋造成影响，因此必须要能够依照对应振动标准，将铅垂向z振级控制在75dB以内。为此需要做好的工作主要有：其一，设置减震沟隔离振动传播路径；其二，使用跳打发，实现振动能量的有效分散；其三，对于精密仪器室等特殊结构物，可以将液压钳使用到钢板桩拔除环节中去<sup>[3]</sup>。

### 3. 应急预案的制定

对于可能出现的突发事件，可以设定对应的应急预案。在此期间，需要关注的节点有：其一，生成危险源的辨识清单，采取分级管控的措施；其二，关注应急物资储备机制的构建；其三，建立人员疏散路线，在此基础上建立医疗救护联动机制<sup>[4]</sup>。

## (三) 技术创新方向

### 1. 智能监测设备的应用

新一代光纤光栅传感器，可以实现分布式测量，单根光缆可以串联上百个监测点，对于大面积软基处理项目连续观测而言，可以很好地发挥其效能。再者，可以将无人机倾斜摄影技术使用进去，快速获取地表形变三维云图，分辨率可以达到厘米级别<sup>[5]</sup>。对于新形势下的城市道路工程，在软基加固工程运作期间，要有意识地将智能监测设备使用进去，据此获取到大量精准的监测信息，才能够为后续的工程效益发挥奠定良好的基础。

### 2. 数字化建模辅助设计与施工优化

基于BIM技术的参数化设计平台，可以将地质勘察数据、实验室试验结果、历史工程经验等融入进去，在此基础上生成最优加固方案。在此期间还可以将有限元软件ABAQUS使用进去，模拟不同加固方案下的应力应变场分布，精确计算工后沉降量。

## 结语

综上所述，软基加固技术，在城市道路施工中有着巨大的效能，要保证综合处置方案的科学性。经过大量的案例验证，基于地质条件的精准施策、动态控制机制的构建，可以让软基加固技术方案有效落实下去。对此维度，未来的研究方向可以将智能化、数字化作为主要方向，建立夯实的软基加固技术标准，才能够保证城市道路结构的稳定性。

## 参考文献

[1] 齐彦翔. 城市道路建设施工中的软基加固技术要点[J]. 建材发展导向, 2025, (06): 94-96.  
 [2] 朱徐亮. 城市道路建设施工中的软基加固技术关键点分析[J]. 汽车周刊, 2025, (02): 131-133.  
 [3] 侯宏军. 城市道路施工中的软基加固施工技术应用研究[J]. 四川建材, 2025, (01): 137-139.  
 [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] 杨富生. 软基加固技术在城市道路软土混合路基中的应用[J]. 江西建材, 2022, (12): 245-246.