

# 公路软土路基沉降控制技术应用

潘紫凌 关炎炎

江西云工建设有限公司 江西 334600

**摘要：**软土路基过量沉降是造成公路和市政道路使用性能、服役寿命下降的主要技术难题。本文系统论述了软土的工程特性及沉降变形机理，对排水固结法、复合地基法、轻质路堤法等沉降控制主流技术的作用原理及适用条件进行了详细的分析，并从勘察设计、动态施工、工后监测三个方面提出了全过程沉降控制策略。合理选型、组合应用沉降控制技术，配合科学的施工管理、监测反馈，是保证软土地地区道路工程安全稳定的主要途径。

**关键词：**软土路基；沉降控制；排水固结；复合地基；市政道路

软土在我国沿海、沿江、内陆湖盆地区分布广泛，其主要特征是天然含水量高、孔隙比大、压缩性强、抗剪强度低、渗透性差。软土地基上修筑公路和市政道路，如果处置不当，很容易造成路基过量沉降、不均匀沉降甚至失稳破坏，从而引发路面开裂、桥头跳车、管线受损等一系列病害。随着交通基础设施网络向软土地区延伸，路基沉降控制成了影响工程质量、运营安全的主要因素。系统研究软土路基沉降控制技术的应用原理和实践策略，对提高道路建设品质、延长服役寿命、降低全生命周期运维成本有重要的工程价值。

## 一、软土路基工程特性与沉降机理分析

### （一）软土的工程性质及其对路基的影响

软土属于不良地基土体，其工程性质会对路基稳定性及变形行为造成较大的不利影响。软土高压缩性使路堤填筑荷载、交通循环荷载作用下地基产生较大的主固结沉降、次固结沉降。以滨海相沉积软土为例，其孔隙比一般较大，压缩系数远大于一般黏性土，在相同的附加应力作用下，产生的沉降量比良好地基要大很多倍。软土的低渗透性造成孔隙水压力消散很慢，固结时间一般要几年，工后沉降占总沉降量的比例很高。以某市政道路拓宽工程为例，新老路基结合部下方软土层厚度不均，固结速率的差异造成明显的差异沉降，引起路面纵向裂缝反复出现。软土的低抗剪强度使得路堤填筑高度受到严格限制，填筑速率过快时地基容易发生剪切破坏，表现为坡脚隆起或者整体滑移。

### （二）软土路基沉降变形的主要类型与特征

软土路基沉降按时间进程和成因机制分为瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降三种类型。瞬时沉降发

生在加载瞬间，是土体在附加应力作用下产生的剪切变形和侧向挤出变形，其量值由软土的不排水抗剪强度和路堤填筑速率决定，填筑过快会使瞬时沉降占比增大并带来稳定性风险。主固结沉降是孔隙水逐渐排出、土骨架有效应力增长过程中的体积压缩变形，在总沉降量中占主导地位。以深厚软土地区高路堤为例，主固结沉降占总沉降的绝大部分，发展速率受控于软土渗透系数和排水路径长度。次固结沉降是在超静孔隙水压力消散殆尽之后，土骨架在恒定有效应力下的蠕变变形，对于有机质含量较高的淤泥质软土来说，次固结沉降量不能忽略。三种沉降类型的叠加效应以及空间分布的不同，是软土路基差异沉降和桥头跳车等病害的力学原因。

## 二、软土路基沉降控制主流技术及其应用

### （一）排水固结法的技术原理与工程适用性

排水固结法是软基处理的经典方法，经济性较好，其基本原理是设置竖向排水通道，缩短软土层的排水距离，施加预压荷载，加快孔隙水排出和固结沉降。竖向排水体可采用袋装砂井或塑料排水板，砂井直径和排水板截面尺寸根据软土渗透特性及工期要求综合确定，平面上按等边三角形或正方形布设。以塑料排水板为例，其板芯沟槽形成竖向排水通道，外覆土工滤膜防止细颗粒淤堵，打设深度要穿透软土层进入下卧透水层或者满足沉降计算要求。预压荷载一般用路堤填土自重来实现，当填筑高度受到限制时，可以采用真空预压联合堆载的方式。真空预压通过抽真空在地基内形成负压，等效加载值相当于一定高度的填土荷载，且加载过程不增加地基剪切应力，稳定性优于堆载预压。排水固结法适用于处理厚度大、渗透性较好的饱和软黏土地基，但是工期较长是其缺点之一。

### (二) 复合地基法的加固机理与施工工艺

复合地基法是在软土地基中设置竖向增强体,使增强体和桩间土一起承担上部荷载,达到提高地基承载力、减少沉降量的目的。增强体类型有散体材料桩和粘结材料桩两种,前者以碎石桩、砂桩为代表,后者有水泥搅拌桩、高压旋喷桩和预制管桩等。碎石桩复合地基具有置换加固和排水固结双重作用,碎石桩体形成竖向排水通道加快固结,桩体对桩周软土施加径向约束提高承载能力。水泥搅拌桩是利用水泥浆液与软土强制拌和,发生水化反应,形成具有一定强度的水泥石桩体,桩身强度可达数百千帕至数兆帕。以深厚软土地区市政道路为例,水泥搅拌桩复合地基的桩长、桩径、置换率根据沉降控制目标和稳定性验算结果确定,桩体多采用湿喷工艺成桩,桩身均匀性、桩体强度是质量控制的关键环节。复合地基法适用于沉降控制要求高、工期有约束的路段,在城市道路下有管线分布、开挖受限的工况中优势明显。

### (三) 轻质路堤法与桥头过渡段处治技术

轻质路堤法采用轻质填料代替常规填土,从荷载源头减小地基附加应力,是软土地区高路堤和桥头过渡段的有效处治方法。常用的轻质填料有粉煤灰、气泡混合轻质土和聚苯乙烯泡沫块体等。粉煤灰填料的湿密度比常规填土要低很多,而且具有一定的自硬性,填筑后板体效应可以减小不均匀沉降。气泡混合轻质土是将水泥浆和气泡混合而成的轻质材料,密度和强度可以按照配合比灵活调节,流动自密实的特性使其特别适合于桥台背侧等狭窄空间的回填作业。桥头过渡段是路基与桥梁结构衔接处,由于结构物与路基刚度不同、地基沉降不连续,跳车现象较多。除采用轻质填料外,搭板设置和地基渐变处理也属于常规处治措施。搭板一端支承在桥台牛腿上,另一端搁置在路基上,将集中沉降差分散成缓坡过渡。地基渐变处理是在桥台后方一定长度范围内逐段增加地基处理深度或者提高置换率,使路基刚度平顺过渡。

## 三、软土路基沉降控制的全过程管理策略

### (一) 勘察阶段的前期控制要点

勘察阶段充分的工作是软土路基沉降控制的前提。地质勘察要查明软土层的空间分布范围、厚度变化、物理力学参数和水文地质条件,勘察深度应满足沉降计算和稳定性分析的最低要求。对于市政道路沿线软土性质变化复杂的区段,应加密勘探点间距,

防止由于地质资料不清楚而造成设计方案与实际情况相脱离。沉降计算是设计阶段的核心工作,应根据软土层的固结特性选择合适的计算模型,分层总和法应用最广,但要合理确定压缩层计算深度和各土层压缩指标。对于工后沉降有严格限制的快速路或者主干道,应做固结沉降与时间关系的专项分析,预测各个时间节点的沉降完成比例,为预压期的确定和路面铺筑时机的选择提供依据。设计方案比选时要综合考虑沉降控制效果、工程投资、施工工期、环境影响等多目标因素,选择或组合应用合适的地基处理技术。

### (二) 施工阶段的动态控制与质量保障

软土路基施工具有较强的动态性特征,施工过程中沉降、稳定监测数据是指导施工节奏、调整工艺参数的重要依据。填筑速率控制属于施工阶段沉降管理的主要内容,加载过快会造成软土层中超静孔隙水压力急剧增加、有效应力增长滞后,容易引发地基失稳。施工规范要求填筑过程中埋设沉降板、测斜管、孔隙水压力计等监测元件,逐日观测沉降量和侧向位移量,根据沉降速率和位移速率判断填筑的安全性。当沉降速率或者侧向位移速率超过控制标准时,应暂停填筑,待孔隙水压力消散到安全范围后再行恢复。地基处理施工质量控制同样重要,塑料排水板打设垂直度、深度、水泥搅拌桩水泥掺量、桩身均匀性、碎石桩密实度、桩径等参数均应按设计要求执行,现场检测验证处理效果。施工过程中出现的异常情况要及时反馈给设计方,启动动态设计程序调整后方案。

### (三) 工后监测与长期性能维护

工后监测是检验沉降控制技术效果、评价道路运营安全性的必要环节,也是确定路面铺筑时机、制定养护方案的科学依据。路面施工前应在代表性断面埋设沉降观测标志,持续观测至沉降趋于稳定,路面施工应在工后沉降速率满足规范限值后方可进行。通车运营之后,沉降监测要转入周期性长期观测,重点观测桥头过渡段、软土厚度突变段以及不同处理方式衔接段的差异沉降发展状况。以某市政快速路为例,通车数年后桥头搭板末端仍有轻微跳车现象,经补充注浆、路面铣刨加铺后得以修复。长期监测数据的积累可以给类似工程提供宝贵的经验参数,也可以用来校核沉降计算模型的计算精度,推动设计理论的不断改进。对于出现过量工后沉降或者差异沉降的路段,可以采用路面加铺调平、注浆抬升、微型桩补强等措施

进行针对性维修处治，最大限度恢复道路服务功能。

#### 四、软土路基沉降控制技术的发展趋势与优化建议

##### (一) 沉降预测方法的精细化发展

沉降预测的准确性同设计方案的经济合理性以及工后运营的安全性有着直接联系。传统分层总和法虽然计算参数取值简单，但是预测精度有限。数值分析方法如有限元法、有限差分法的应用越来越普遍，可以模拟路堤分级填筑过程，考虑土体非线性本构关系和固结渗流耦合效应，预测精度大大提高。以修正剑桥模型为代表的临界状态本构模型可以较好地反映软土的压硬性、剪胀性特征，适合于复杂应力路径下的沉降分析。基于实测数据的反分析方法利用沉降曲线拟合推算土层的综合固结参数，可以有效地修正理论计算的偏差，实现动态预测。人工智能技术人工神经网络、支持向量机也开始被应用于沉降预测领域，通过大量的工程案例数据训练建立沉降量与各个影响因素之间的非线性映射关系，为初步设计阶段的沉降估算提供辅助工具。

##### (二) 绿色低碳处理技术的创新方向

在碳达峰、碳中和战略背景下，软土路基处理技术的绿色低碳化转型成为重要发展方向。传统水泥搅拌桩、高压旋喷桩的水泥用量大，水泥生产过程中的碳排放问题不能忽视。开发低水泥用量或者替代胶凝材料的低碳型固化剂是技术创新的热点，以工业废渣如矿渣、钢渣、粉煤灰、脱硫石膏等为主要原料制备的复合固化剂，在满足强度要求的前提下可以大幅度降低碳排放。微生物诱导碳酸钙沉积技术利用微生物代谢活动生成碳酸钙结晶胶结土颗粒，是一种环境友好型的新型加固方法，在砂土加固领域已有成功应用，向软黏土领域的拓展研究正在推进。真空预压联合电渗法的探索给低渗透性软土快速固结提供新思路，电渗作用使孔隙水由阳极向阴极定向迁移，弥补了单纯真空预压在低渗透土体中排水效率低的缺陷。新型技术的研发和工程化应用，会给软土路基沉降控制提供更多的绿色技术选择。

##### (三) 智能化监测与预警系统构建

信息化、智能化技术给软土路基沉降控制的精准化、高效化提供技术支持。传统的人工沉降观测存在频率受限、数据离散、实时性差等缺点，自动化监测系统用埋设静力水准仪、分层沉降计、测斜仪等传感器，可以实现沉降量和侧向位移的连续自动采集和远

程传输。监测数据接入云平台之后，可以进行实时处理和可视化展示，管理人员通过终端设备可以随时掌握各个监测断面的沉降动态。根据监测数据建立预警系统，可以设定分级预警阈值，当沉降速率或者累计沉降量达到阈值时，自动发出报警信息，给应急处置争取时间窗口。建筑信息模型技术同地理信息系统集成应用，可以把地质信息，设计资料，施工记录，监测数据整合到同一个数字化平台上，创建起软土路基全生命周期信息模型，达成勘察设计到运维管理的数据贯通和协同共享。智能化管理体系的建立，会促使软土路基沉降控制由被动应对转向主动管控。

#### 五、结束语

软土路基沉降控制属于公路和市政道路建设中的系统工程，它牵涉地质勘察、理论分析、技术选型、施工管理以及长期监测等诸多专业环节的相互配合。排水固结法、复合地基法、轻质路堤法等主流技术各有其作用机理和适用边界，在工程实践中要根据软土特性、沉降控制标准、工期约束和经济条件综合比选，灵活采用单一技术或者组合方案。全过程管理理念认为沉降控制要贯穿于勘察、设计、施工、运维等各个阶段，用动态化、信息化的方法保证控制目标的最终实现。面向未来，沉降预测方法的精细化、绿色低碳处理技术的创新、智能化监测系统的普及，会不断改善软土路基工程的技术水平和质量效益，给软土地区交通基础设施高品质建设提供有力支撑。

#### 参考文献

- [1] 王晓宇, 毛雪松. 软土地区改扩建路基差异沉降控制技术综述 [C]// 中国公路学会, 中国航海学会, 中国铁道学会, 中国航空学会, 中国汽车工程学会. 2024 世界交通运输大会 (WTC2024) 论文集 (公路工程). 长安大学公路学院, 2024:383-386.
- [2] 李聪. 公路路基沉降及施工控制技术应用研究 [J]. 运输经理世界, 2023,(06):43-45.
- [3] 顾爱兵. 软土条件下的公路拓宽工程路基沉降控制技术 [J]. 黑龙江交通科技, 2022,45(10):37-39.
- [4] 姚浩明, 胡瑞卿. 路基沉降控制技术在中西非区域公路建设中的应用 [J]. 科技创新导报, 2021,18(34):43-45.
- [5] 王啸. 公路软土路基沉降规律及施工控制技术研究 [J]. 西部交通科技, 2021,(01):44-47.

作者简介: 1. 潘紫凌, (1986.08), 女, 汉, 江西省上饶市, 专科, 公路与桥梁。2. 关炎炎, (1987.07), 女, 汉, 江西省萍乡市, 助理工程师, 本科, 公路与桥梁。