

# 交通公路工程中软土地基处理施工技术研究

戎亦飞

南京昊天路桥工程有限公司, 江苏南京, 210000;

**摘要:** 软土地基有高含水量、低剪切强度、高压缩性等特殊工程性质, 因此成为交通公路工程施工的核心技术难题, 容易造成路基沉降、滑坡、结构失稳等病害, 大幅拉低公路工程的质量和使用寿命。本文依据公路工程建设实操需求, 全方位讲解软土地基的定义分类、物理力学特性及核心工程风险; 全面剖析填筑技术、垂直排水处理、地下固结技术、深层搅拌技术等常用施工技术的运行逻辑、适用边界及技术参数; 全面解析生物固结技术、纳米材料应用、环境友好型处理材料及智能监控系统等创新技术的研发速度与应用长处; 建立覆盖地基稳定性、环境影响、经济效益的3维效果评估体系。研究成果可为交通公路工程软土地基处理方案的科学选型及优化设计给出技术参考, 协助强化公路工程稳定性、耐久性和可持续性。

**关键词:** 交通公路工程; 软土地基; 处理技术; 效果评估; 创新应用

**DOI:** 10.69979/3029-2727.26.03.003

## 引言

国家交通运输网络的核心组成部分包含公路工程, 能串联城乡脉络、促进区域经济协同发展的关键基建, 它的建设质量直接左右商品流通效率、应急救援保障及社会公共服务水平。我国软土覆盖面积大, 长江三角洲、珠江三角洲、东南沿海、内陆湖沼地带, 公路总里程中15%—25%为软土路基, 开展公路施工, 软土地基的特殊工程性状, 容易引发路基不均匀沉降、路面开裂、桥梁台背沉降等病害。来自交通运输部的相关数据显示, 软土地基路段的公路养护成本超出普通路段30%—50%, 可用时长缩短10—15年, 结合软土地基的工程特性, 研发并采用高效、经济、环保的施工处理技术, 成了保障公路工程质量、降低全生命周期成本的核心任务。本文依托现有研究成果和工程实践经验, 针对软土

地基处理施工技术做系统研究, 给交通公路工程建设做技术支持。

## 1 软土地基的基本特性与工程风险

### 1.1 软土地基的定义与分类

天然含水量高、孔隙比大、剪切强度低、压缩性高的特殊土类统称软土, 从土壤力学出发, 液限数值一般超过50%, 塑性指数 $>20$ , 天然孔隙比超1.0。按成因和物质组成划分, 软土可分成4类: 有机软土、沼泽土、淤泥质软土、粉砂质软土, 各类软土的工程性质差异突出, 有机软土的压缩模量为2-5MPa, 沼泽土天然含水量可达70%—90%, 直接左右处理技术的选择。

### 1.2 软土地基的物理力学性质

软土地基的物理力学性质是引发工程风险的核心根源, 其关键指标如表1所示:

| 指标类型 | 具体指标  | 典型范围                                    | 工程影响                                      |
|------|-------|---|---|
| 物理性质 | 天然含水量 | 30%—70%                                 | 含水量越高, 土壤强度越低, 压缩性越大                      |
|      | 孔隙率   | 40%—60%                                 | 孔隙率高导致土壤密实度低, 变形能力强                       |
| 力学性质 | 天然密度  | 1.5—1.8g/cm <sup>3</sup>                | 低于普通黏性土(1.8—2.0g/cm <sup>3</sup> ), 承载能力弱 |
|      | 剪切强度  | 5-20KPa                                 | 远低于公路工程要求的地基承载力标准( $\geq 100$ kPa)        |
|      | 压缩模量  | 1-5MPa                                  | 压缩模量小, 受荷载后易产生大幅沉降                        |
|      | 渗透系数  | 10 <sup>-6</sup> —10 <sup>-8</sup> cm/s | 渗透性极差, 水分难排出, 固结周期长                       |

软土地基应力—应变关系带有明显非线性特征, 荷载突破临界值, 易产生塑性变形; 季节变换对这类工程特性影响突出, 雨季水分占比上升, 强度再度降低, 旱季易催生收缩裂缝, 加剧结构不稳定<sup>[1]</sup>。

### 1.3 软土地基的核心工程风险

#### 1.3.1 沉降风险

高压缩性的软土地基, 易引发公路运营阶段出现长

期、大幅沉降, 依据工程实测数据, 没做处理的软土地基受公路荷载施压, 年沉降深度3—8cm, 总沉降量甚至破50cm, 此类沉降易引发路面平整度下降、桥头跳车, 问题加剧时引发路面开裂、路基失稳, 妨害行车安全。

#### 1.3.2 失稳风险

软土地基因剪切强度低, 受路基填筑、车辆荷载等

外力作用时,易出现滑动破坏,软土厚度超过5m且未做加固处理,路基出现滑坡的风险概率超过40%

滑坡及侧向位移会破坏路基结构,还或许致使周边管线、构筑物毁坏,引发次生灾害。

### 1.3.3 季节性变形风险

软土地基体积随湿度变化剧烈,雨季含水量上升体积膨胀,旱季水分蒸发体积收缩,年变形量最高5—10cm,这种胀缩变形多次交替,将引发路基结构疲劳损伤,路面出现网状开裂,降低公路抗损年限。

## 2 交通公路工程中常用软土地基处理施工技术

### 2.1 填筑技术

采用传统填筑技术处理软土地基时,核心运作逻辑是替换或填入强度高、稳定性好的材料,替换部分或全部软土,提升地基承重强度。这类技术适配软土厚度偏浅(通常小于3m)的路段,施工工序涉及软土开挖、基底清理、分层填筑、压实成型<sup>[2]</sup>。特殊填筑技术含重载压实,用施加预压荷载(常规为100-150kPa)的方式,加速软土固结,适配软土厚度3—8m的路段,该技术优势体现为施工工艺简单、成本较低,做完重载压实工序后,可使软土地基承载力提升50%—80%,把压缩模量提至8-12MPa,但这项技术存在施工耗时久(预压时间通常为3-6个月)、对周边环境干扰强等缺陷,符合施工周期要求宽松的郊区公路工程。

### 2.2 垂直排水处理技术

针对软土渗透性能差、固结耗时久的问题,垂直排水处理技术借助设置垂直排水通道,加快软土排水,缩短固结周期,常规技术含塑料排水板法、袋装砂井法等,塑料排水板施工法效率高,公路工程中应用占比最高。塑料排水板法对应施工参数:100—150mm宽排水板,厚度3至5mm,插入深度需穿透软土层,抵达硬土层上方0.5—1.0m,孔隙1.0—2.0m,采用正三角形或正方形排列。搭配堆载预压,能让软土固结时间缩短30%—50%,固结度从自然状态30%上升到80%以上,某高速公路软土路段引入该技术后,控制路基施工后沉降量不超15cm,把天然状态下的承载力从60kPa提至150kPa,符合公路1级荷载标准<sup>[3]</sup>。该技术的核心优势是固结作用明显、施工耗时较短,但对施工机械精度有较高要求,严格管控排水板插入深度和间距。

### 2.3 地下固结技术

地下固结技术借助夯实土壤或添加固化剂改善软土性质,包含深度振动法与喷射灌浆法,深度振动法借助振动棒(振动频率20—30Hz)的高频振动,让软土颗粒重新排布压实,适配粉砂质软土或含砂量较高的软

土路段,经处理土壤孔隙率可减少20%—30%,剪切强度涨至原水平的140%—160%。喷射灌浆法借助压力20-40MPa的高压喷射设备,把水泥浆等固化剂注入软土,造出柱状固结体,可处理软土厚度较大(8—20m)或承载力要求较高的公路桥梁地基,固化剂添加占比一般为软土质量的15%—25%,固结体直径区间为0.6—1.2m,抗压强度达2-5MPa,这项技术有两大优势:处理深度大、固结效果稳定,但面临施工成本偏高、会对地下水造成一定影响等问题,必须严控固化剂配比与喷射参数。

### 2.4 深层搅拌技术

深层搅拌技术依靠深层搅拌机,把水泥、石灰等固化剂和软土在原地搅拌均匀,打造有一定强度的复合地基,适用于软土厚度5—15m的公路路基处理,施工参数为:搅拌桩直径500—800mm,桩身长度贯穿软土层,桩与桩间隔1.2—2.0m,固化剂添加量占软土质量的10%—20%<sup>[4]</sup>。为优化处理效果,可结合土工合成材料(土工布、土工格栅)开展复合加固,将土工格栅铺到搅拌桩顶端,能切实分散荷载、约束侧向位移,让复合地基承载力比单纯深层搅拌处理提高20%—30%。南方一公路工程含软土路段,采用该技术处理天然含水量50%—60%的材料后,把地基承载力从70kPa升到180kPa,把工后沉降量控制在12cm以内,契合高速公路运营要求,此技术的核心益处是施工速度快、对周边环境干扰小、成本合理,现阶段公路工程软土地基处理的主流技术之一。

## 3 软土地基处理创新施工技术

### 3.1 生物固结技术

生物固结技术为绿色可持续的创新技术,利用产脲酶细菌(如巴氏芽孢杆菌)在适配营养条件下代谢生成碳酸钙,和软土颗粒胶结形成稳定固结体,此技术的反应原理是:尿素被细菌分解产生氨和二氧化碳,提高环境pH值,二氧化碳与钙离子结合生成碳酸钙沉淀,填满土壤孔隙胶结土壤颗粒。和传统化学固结技术对比,生物固结技术优势突出:成本减少20%—30%,减碳排放40%—50%,固结体抗老化能力强(碳酸钙与土壤颗粒结合紧密,抗水侵蚀表现突出,试验数据证明,往软土接种产脲酶细菌,养护满28天,土壤剪切强度可从15kPa提至45kPa,压缩模量从3MPa涨至10MPa,达到公路路基地基要求,现在该技术已投用小型公路试验段,未来要攻克大规模施工中的细菌存活控制、反应速率调控等问题。

### 3.2 纳米技术应用

纳米材料带有比表面积大、反应活性高的属性,软土地基处理上潜力巨大,日常常用纳米材料包含纳米黏土、纳米硅颗粒、多壁碳纳米管等,添加比例一般取软土质量的0.5%—1.0%,纳米黏土可强化软土的黏结力与抗渗性,添入0.8%纳米黏土后,软土渗透系数从 $10^{-7}\text{cm/s}$ 降到 $10^{-9}\text{cm/s}$ ,抗剪强度升高35%;纳米硅颗粒可促进水泥水化反应。和深层搅拌技术配合运用阶段,深层搅拌技术能把复合地基抗压强度提高25%—40%;多壁碳纳米管力学性能出色,可强化土壤抗拉强度与变形能力,减少路基开裂隐患。

### 3.3 环境友好型处理材料

环保要求持续收紧,用再生资源做原料的环境友好型处理材料成为研发热点,涉及再生聚合物、生物基材料等,回收废旧塑料、橡胶,加工可制得再生聚合物,强度高且耐久性好,适用于软土地基填充、加固与修补,取10%—15%的再生聚合物颗粒(粒径2—5mm)掺进软土,能让土壤承载力提升50%—70%,压缩性减幅40%—50%。同步削减废旧材料填埋规模,降低自然资源依赖程度,生物基材料用秸秆、竹纤维等天然植物做原料,经过改性处理具备一定胶结能力,与软土掺合能改善土壤结构,降解后不留下环境残留,这类材料的显著长处是环保性能优、资源可重复利用,但要进一步强化它的耐水稳定性和长期力学性能。

## 4 软土地基处理效果评估体系

### 4.1 地基稳定性评估

地基稳定性为处理效果的核心评估指标,涉及抗剪强度、承载力、固结度、沉降量与侧向位移,用三轴压缩试验测定抗剪强度,处理后的软土抗剪强度要 $\geq 30\text{kPa}$ ;用标准荷载板试验测定承载力,一级公路路基地基承载力要 $\geq 150\text{kPa}$ ;用孔隙水压力监测求固结度,处理后固结度要 $\geq 80\%$ ;工后沉降量要控制到15—20cm以内,侧向位移 $\leq 5\text{cm}$ <sup>[5]</sup>。某软土地基处理项目,实施深层搅拌技术处理后,抗剪强度从18kPa升到42kPa,承载力从80kPa升到185kPa,86%固结度达标,把沉降量控制到13cm,全部符合设计标准,对处理前后的指标做对比分析,可多角度检验地基稳定性改进效果。

### 4.2 环境影响评估

环境影响评估采用生态毒性试验加生命周期评估(LCA)的方式,核心指标涉及碳排放、地下水污染风险、生态扰动程度,碳排放各环节,传统化学固结技术全生命周期碳排放80-100kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>,采用生物固结技术加环境友好型材料处理,碳排放仅30-50kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>。

依托地下水重金属、化学药剂残留量检测,研判地下水污染风险,必须满足《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)Ⅲ类标准;核心评估施工对周边植被、土壤微生物群落的影响,以此判定生态扰动程度,生物固结技术对微生物群落的干扰程度比化学固结技术低60%以上。

### 4.3 经济效益评估

做经济效益评估要统筹考量初期投资、后期维护成本、寿命延长收益及故障损失,初始投入阶段,像生物固结、纳米技术这类创新技术,初始阶段的投入比传统技术高10%—20%,但后期维护成本低三成至四成,延长使用年限15—20年。某公路项目相关数据显示,采取深层搅拌技术的前期投资为120元/m<sup>3</sup>,年维护成本8元/m<sup>3</sup>·年,可用时长15年;引入生物固结技术的初始投资为140元/m<sup>3</sup>,年维护成本设定为5元/m<sup>3</sup>·年,可用30年,全生命周期成本比深层搅拌技术少28%,还得核算处理效果不佳引发的重建、补救费用,合格处理方案要把故障损失控制在项目总投资的5%以内。

## 5 总结

本文针对交通公路工程软土地基处理施工技术做研究,软土地基承载力低、沉降变形大是公路工程施工的核心隐患,常引发路面开裂、路基失稳等病害,针对换填法、排水固结法、复合地基法等常用处理技术。研究梳理其适用条件和施工工艺要点,明确施工前要结合地质勘察数据精准选择设备型号,施工全程严格把控工艺参数、落实现场监测,施工结束后强化质检,按需选用软土地基处理技术,可切实强化地基承载力和稳定性,控制工后下沉,从根源上杜绝公路运营病害,为交通公路工程施工质量、结构耐久性和运营安全筑牢根基,也为同类工程施工拿出技术参考。

### 参考文献

- [1]元均成.道路桥梁施工中软土路基处理技术[J].汽车周刊,2026,(02):123-125.
- [2]庞辉.不同拓宽方式对水平软土路基稳定性的影响机制分析[J].西部交通科技,2025,(12):100-102.
- [3]《中国公路学报》编辑部.中国路基工程学术研究综述·2025[J].中国公路学报,2025,38(12):1-153.
- [4]叶明.不同地基处理方法下软土路基沉降变形规律分析[J].现代工程科技,2025,4(22):17-20.
- [5]韩袁林,张立强,刘超,等.高速公路软土地基处理方法及应用[J].交通世界,2025,(33):105-107.