

# 软土地基路段公路路基施工处理技术

高延波

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 软土地基因其高含水量、高压缩性、低强度及显著的流变特性,对公路工程建设构成严峻挑战。若处理不当,极易引发路基沉降、侧向位移乃至整体失稳等工程病害,严重影响道路的使用性能与服役寿命。本文系统阐述了软土的基本工程特性及其对公路路基的危害机理,深入分析了当前主流的软基处理技术体系,包括置换法、排水固结法、复合地基法及加筋法等,并对其适用条件、作用原理、施工要点及优缺点进行了全面评述。在此基础上,结合工程实践,探讨了处理方案的选择原则与优化策略,并通过典型案例分析验证了技术应用的有效性。最后,文章展望了软基处理技术的发展趋势,旨在为公路工程设计与施工提供理论参考与实践指导。

**关键词:** 软土地基;公路路基;沉降控制;地基处理;排水固结;复合地基

## 引言

随着我国交通基础设施建设的持续深入,公路网络不断向沿海、沿江、湖区及河谷等区域延伸。这些地区广泛分布着深厚的软土层,其物理力学性质极差,成为制约公路工程质量与安全的关键地质因素。软土通常指在静水或缓慢流水环境中沉积形成的,天然含水量高、孔隙比大、压缩性强、抗剪强度低的细粒土,主要包括淤泥、淤泥质土及部分冲填土等。在此类地基上直接修筑路基,将不可避免地产生过大的工后沉降和不均匀沉降,导致路面开裂、桥头跳车、路基失稳等一系列严重问题,不仅增加后期养护成本,更威胁行车安全。因此,针对软土地基进行科学、有效的处理,是确保公路工程长期稳定性和耐久性的核心环节。经过数十年的工程实践与理论研究,国内外已发展出多种成熟的软基处理技术。然而,面对不同地质条件、工程要求及环境约束,如何精准选择并优化组合处理方案,仍是工程界面临的重要课题。

## 1 软土地基的工程特性及其危害

### 1.1 软土的基本物理力学特性

软土的工程特性可概括为“三高三低”。首先,其天然含水量极高,通常大于液限,甚至可达80%至120%,使得土体长期处于流塑至软塑状态,结构极为松散。其次,软土具有显著的高压缩性,压缩系数 $a_{1-2}$ 普遍大于 $0.5\text{MPa}^{-1}$ ,在荷载作用下会产生巨大的体积压缩变形,且这种变形往往不可逆。再次,其天然孔隙比常大于1.0,颗粒排列呈絮状或蜂窝状,内部连接脆弱,稳定性差。与之相对的是其“三低”特征:渗透性极低,水平与垂直渗透系数均小于 $10^{-6}\text{cm/s}$ ,导致孔隙水压力消散极其缓慢,固结过程漫长;抗剪强度低下,不排水抗剪强度 $c_u$ 通常不足 $20\text{kPa}$ ,内摩擦角 $\phi$ 接近于零,承载能力严重不足;此

外,软土还表现出显著的流变性,即在长期荷载作用下,即使主固结完成,次固结(蠕变)仍会持续发生,造成沉降随时间不断累积。

### 1.2 对公路路基的主要危害

一是过大及不均匀沉降:这是最普遍且最直接的危害。路堤荷载使软土层产生压缩变形,若沉降量超出设计允许值,将破坏路面结构的平整度和连续性。不均匀沉降则会导致路面出现波浪、坑槽,严重影响行车舒适性与安全性。二是路基失稳(滑动破坏):当路堤填筑高度较大或边坡较陡时,其产生的下滑力可能超过软弱土层的抗剪强度,引发路基整体或局部沿软弱层面发生圆弧滑动,造成灾难性后果<sup>[1]</sup>。三是桥头跳车:桥梁基础通常置于持力层上,沉降极小,而与其相连的路基段若位于软土地基上,则会产生显著沉降,形成台阶,即“桥头跳车”现象,是高速公路运营中的顽疾。四是工期延误:由于软土固结速率慢,为控制沉降速率和保证施工期稳定,往往需要设置预压期,这直接拉长了整个工程的建设周期。

## 2 软土地基处理技术体系

### 2.1 置换法

置换法的核心思想是通过物理手段将浅层软弱土体移除,并回填以强度高、压缩性低的优质材料,从而从根本上改善地基的承载与变形性能。其中,换填垫层法适用于软土层厚度较小(一般不超过3米)的情况。施工时,将表层软土挖除后,分层回填砂砾、碎石、灰土或素土等材料,并严格控制每层的压实度,确保形成一个密实、均匀的垫层。该垫层不仅能有效置换不良土体,还能起到应力扩散和横向排水的作用,提高地基的整体稳定性。对于常年积水、难以抽干的洼地或泥沼地带,则

可采用抛石挤淤法。该方法通过向软基中大量抛投片石,利用其自重将流动性较强的淤泥向两侧排挤,最终在原位形成一个由嵌锁片石构成的稳定持力层。此法施工简便、见效快,但对淤泥的流塑性有一定要求,且需注意施工过程中对周边水环境的扰动与保护。

## 2.2 排水固结法

排水固结法是处理深厚软土地基最为经典和广泛应用的技术路线,其基本原理是通过人为设置竖向排水通道并施加预压荷载,加速软土中孔隙水的排出,从而在较短时间内完成大部分主固结沉降。竖向排水体通常采用袋装砂井或塑料排水板(PVD),后者因其工厂化生产、质量稳定、施工便捷、成本低廉等优势,已成为当前工程实践中的首选。在设置好排水通道后,需施加外部荷载以提供固结所需的有效应力。堆载预压法是最直观的方式,即在路基位置堆填土石方或其他重物,模拟未来路堤的荷载。虽然效果可靠,但该方法需要大量借土,卸载后还需处理弃土,对环境造成一定负担。相比之下,真空预压法则通过在地表铺设密封膜并利用真空泵抽取膜下空气,形成负压环境。该负压等效于约4至5米高的堆载,且能均匀作用于整个加固区,不会产生侧向挤出效应,特别适用于临水、用地紧张或对侧向变形敏感的区域<sup>[2]</sup>。为了兼顾效率与经济性,真空-堆载联合预压法被越来越多地采用。此外,对于含有较多粉砂夹层、渗透性相对较好的软土,也可考虑采用降水预压法,通过降低地下水位来增加有效应力,促进固结。

## 2.3 复合地基法

复合地基法通过在天然软弱地基中引入刚度远高于原状土的增强体(桩体),使桩与桩间土共同承担上部荷载,从而形成一个性能优越的复合受力体系。碎石桩(包括振冲桩和干振碎石桩)是早期常用的增强体,它通过振动或冲击成孔后回填碎石并振密,主要依靠挤密周围土体、提供竖向排水通道以及桩体自身的承载能力来加固地基。然而,对于饱和软粘土,其挤密效果有限。水泥搅拌桩(如CFG桩、粉喷桩)则代表了化学加固的思路,通过专用机械将水泥浆(或粉)与原位软土强制搅拌,形成具有一定强度的水泥石桩。这种方法不仅能大幅提高地基承载力,还能有效阻断地下水的渗流路径,显著减小工后沉降。CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩)因掺入了工业废料粉煤灰,不仅降低了成本,还提升了桩体强度,应用日益广泛。不过,此类柔性桩存在“刺入破坏”的潜在风险,即在高路堤荷载下,桩顶可能刺入路堤填料,因此对桩顶刺入的控制至关重要。对于深厚软土层或对沉降控制要求极为苛刻的特殊路段(如高等级

公路的桥头过渡段),则可采用打入式或静压式预制混凝土管桩或方桩。这类刚性桩能够穿透整个软土层,将荷载直接传递至下卧的坚硬持力层,几乎可以完全消除工后沉降,是解决“桥头跳车”问题的终极技术手段之一,尽管其造价相对高昂。

## 2.4 加筋法

加筋法并非直接改良土体本身,而是通过在路堤填料中铺设土工合成材料,利用其优异的抗拉性能来改善整个路堤结构的力学行为。其中,土工格栅加筋路堤的应用最为普遍。当路堤填筑于软基之上时,填料在自重和车辆荷载作用下有向两侧“鼓胀”的趋势。铺设于填料中的土工格栅通过与填料颗粒间的嵌锁和摩擦作用,能够有效约束这种侧向位移,从而提高路堤的整体性和抗剪强度,防止路基失稳。实践证明,采用多层格栅、合理布置间距,能取得更佳的加筋效果<sup>[3]</sup>。此外,在软基顶面铺设一层土工布,也能发挥重要作用。它既能防止上部路堤的细颗粒填料在施工过程中陷入下方的软泥中,又能作为反滤层,允许软土中的孔隙水顺利排出而不带走土颗粒,起到了隔离与排水的双重功能。

## 2.5 其他辅助技术

除了上述主流技术外,一些辅助性措施也在特定场景下发挥着关键作用。例如,采用泡沫混凝土、EPS(聚苯乙烯泡沫)块等超轻质材料作为路堤填料,可以从源头上大幅减小施加于软基上的附加荷载,从而有效控制沉降。这种方法特别适用于净空受限、邻近既有建筑物或对沉降极其敏感的区域。无论采用何种处理方法,施工过程中的动态控制都不可或缺。必须遵循“动态设计、信息化施工”的原则,通过埋设沉降板、孔隙水压力计和侧向位移桩等监测设备,实时掌握地基的变形与稳定状态,并据此严格控制路堤的填筑速率。只有在确保每一阶段施工安全的前提下,才能逐步加载至设计标高,这是保障整个工程成功的关键所在。

## 3 软基处理方案的选择与优化

### 3.1 方案选择

没有一种“万能”的软基处理方法。方案的选择是一个多目标、多约束的综合决策过程,需综合考虑以下因素:(1)地质条件:软土层的厚度、埋深、物理力学指标(特别是强度、压缩模量、渗透系数)、下卧持力层情况等是决定性因素。(2)工程要求:包括道路等级、设计使用年限、允许工后沉降量、对差异沉降的敏感度(如是否邻近桥梁、涵洞)、工期要求等。(3)环境与社会因素:施工场地条件(是否有足够堆载土源、是否临水)、环保要求(弃土、噪音、振动)、对周边建筑物的影响等。

(4) 经济性: 综合比较各方案的直接成本(材料、设备、人工)与间接成本(工期延长、后期维护)。

### 3.2 优化策略

优化策略通常体现在“分区处理”和“组合应用”上。例如,对于一个典型的软基路段:一般路段可采用“塑料排水板+堆载预压”或“真空预压”方案,经济高效。桥头过渡段沉降控制标准极高,可采用“CFG桩复合地基”或“管桩+EPS轻质路堤”等刚性桩方案。鱼塘、沟渠等局部软弱区可采用“换填”或“抛石挤淤”进行针对性处理<sup>[4]</sup>。高填方陡坡路段在采用排水固结或复合地基的同时,必须辅以“土工格栅加筋”以确保边坡稳定。这种“区别对待、重点加强”的思路,既能满足技术要求,又能有效控制工程投资。

## 4 工程案例分

### 4.1 项目背景

某高速公路K15+200~K16+800段,穿越滨海相沉积区。地勘揭示:表层为1~2m厚的耕植土,其下为12~18m厚的淤泥质粘土( $w=65\%$ , $e=1.75$ , $c_u=12\text{kPa}$ , $a_{1-2}=1.2\text{MPa}^{-1}$ ),再下为中粗砂层。设计要求工后沉降 $\leq 30\text{cm}$ ,桥头段 $\leq 10\text{cm}$ ,工期紧张。

### 4.2 处理方案

一般路段(K15+200~K16+500)采用“塑料排水板(间距1.2m,正三角形布置,穿透淤泥层)+真空联合堆载预压(真空度 $\geq 85\text{kPa}$ ,堆载3m)”。预压期6个月,卸载后铺设双向土工格栅两层。桥头过渡段(K16+500~K16+800)采用“CFG桩复合地基(桩径0.5m,桩长15m,穿透淤泥层进入砂层2m,桩间距1.8m)+EPS轻质路堤(顶部3m)”。

### 4.3 监测与效果

施工期间,通过埋设沉降板、孔隙水压力计和侧向位移桩进行全过程监测。监测数据显示:一般路段在预压期内完成了约85%的总沉降,卸载后工后沉降稳定在25cm左右,满足设计要求。桥头段CFG桩有效承担了绝

大部分荷载,工后沉降仅为6cm,成功解决了桥头跳车隐患。整个路段未发生任何失稳迹象,路基稳定。该案例充分体现了根据地质条件和工程要求进行分区、组合处理的成功实践。

## 5 结语

软土地基处理是公路工程建设中的关键技术难题。本文系统论述了软土的工程特性、危害形式及主流处理技术。研究表明,单一技术往往难以应对复杂的工程需求,未来的发展趋势将集中于以下几个方面:其一是智能化与信息化,通过深度融合BIM、物联网(IoT)和大数据技术,构建“感知-分析-决策-反馈”的智能管控平台,实现施工全过程的精细化、动态化管理;其二是绿色与可持续,大力推广工业废弃物(如粉煤灰、矿渣)在固化剂和轻质填料中的应用,发展低能耗、低排放的处理工艺(如电渗法、微生物固化法),以减轻对环境的负面影响;其三是高性能材料的应用,研发更高强度、更耐久的新型土工合成材料和固化剂,以提升处理效果的长期可靠性;其四是理论模型的精细化,结合先进的数值模拟(如考虑土体非线性、流变性、各向异性的本构模型)和现场足尺试验,建立更精确的沉降与稳定预测模型,为方案优化提供坚实的理论支撑。

## 参考文献

- [1]蒲磊.浅谈高速公路路基软土地基施工策略[J].汽车周刊,2025,(10):94-95+109.
- [2]周益新.浅议公路施工中的软土地基处理技术[C]//广西大学广西县域经济发展研究院.2025年第二届工程技术数智赋能县域经济城乡融合发展学术交流论文集.永嘉县公路与运输管理中心,2025:327-328.
- [3]宋哲.公路施工中的软土地基处理与加固技术探讨[J].汽车周刊,2025,(03):238-240.
- [4]廖坤.高速公路工程施工中软土地基的处理要点分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(23):59-61.