

公路施工中软土路基的施工技术处理研究

高 涛

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: 随着我国交通基础设施建设的不断推进,公路工程在复杂地质条件下的施工问题日益突出,其中软土路基问题尤为典型。软土具有高含水率、高压缩性、低承载力及流变性强等不良工程特性,若处理不当,极易引发路基沉降、边坡失稳甚至路面开裂等病害,严重影响公路的使用性能与服役寿命。本文系统分析了软土的基本物理力学特性及其对公路路基的危害机理,归纳总结了当前主流的软土路基处理技术,包括换填法、预压排水固结法、复合地基法、加筋土技术及化学加固法等,并结合工程实例对其适用性、优缺点及关键技术参数进行了深入探讨。在此基础上,提出了软土路基处理方案选择的原则与优化建议,强调应根据工程地质条件、工期要求、经济成本及环境影响等因素进行综合比选。最后,对软土路基处理技术的发展趋势进行了展望,指出智能化监测、绿色低碳材料应用及多技术协同处理将成为未来研究与实践的重点方向。

关键词: 软土路基; 公路工程; 地基处理; 沉降控制; 施工技术

引言

近年来,我国高速公路网持续扩展,大量新建或改扩建项目穿越湖泊、沼泽、河谷及滨海地区,这些区域普遍分布着深厚的软土层。软土作为一种典型的不良地质体,其工程性质极差,给公路路基的稳定性与长期性能带来严峻挑战。软土路基处理是公路建设中的关键技术环节,其核心目标在于提高地基承载力、减小工后沉降、加速固结过程并增强整体稳定性。随着岩土工程理论的发展与施工技术的进步,多种软基处理方法已被广泛应用于工程实践中。然而,不同处理技术在适用条件、处理效果、施工周期及经济性等方面存在显著差异,如何科学合理地选择与优化处理方案,仍是当前工程界亟待解决的重要课题。本文旨在系统梳理软土路基的工程特性与危害机制,全面评述现有主流处理技术的原理、适用范围及工程表现,并通过典型案例验证其有效性。同时,提出基于多因素综合评价的处理方案选择框架,为类似工程提供理论参考与实践指导。

1 软土的工程特性及其对公路路基的危害

1.1 软土的定义与分类

根据《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/TD31-02—2013),软土是指天然含水率高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低的细粒土,主要包括淤泥、淤泥质土、泥炭及部分冲填土等。这类土体通常形成于静水或缓慢流水环境中,沉积过程漫长,结构松散。其典型物理指标表现为天然含水率大于液限,孔隙比普遍超过1.0,压缩系数常高于 0.5MPa^{-1} ,不排水抗剪强度一般低于 30kPa ,而渗透系数则往往小于 10^{-7}cm/s 。这些指标共

同决定了软土在工程荷载作用下的不良响应特性。

1.2 软土的主要工程特性

软土最显著的特征是其高压缩性。在外部荷载施加后,土体内部孔隙水难以迅速排出,导致有效应力增长缓慢,从而引发长时间、大幅度的压缩变形。与此同时,软土的抗剪强度极低,尤其在快速加载或地震等动力条件下,极易发生剪切破坏。此外,由于其天然含水率高且颗粒间结合力弱,软土表现出明显的触变性——一旦受到扰动,结构破坏后强度急剧下降。更为棘手的是其流变特性,即在恒定荷载下仍会持续发生蠕变变形,这种时间依赖性使得路基沉降难以在短期内稳定下来。

1.3 软土对公路路基的危害

在公路工程建设中,软土的存在直接威胁路基的长期服役性能。首先,过大的沉降和不均匀沉降会导致路面纵坡异常、桥头跳车现象严重,甚至引发横向或纵向裂缝,严重影响行车舒适性与安全性。其次,在高填方或陡坡路段,软基承载力不足可能诱发路堤整体滑移或局部侧向挤出,造成灾难性失稳。再者,软土区地下水位普遍较高,加之其本身渗透性极差,使得路基排水系统难以有效运作,积水进一步软化土体,形成恶性循环^[1]。最后,即便在施工期通过预压等方式完成了大部分主固结沉降,运营阶段仍可能发生显著的次固结或蠕变沉降,使得工后沉降控制成为一项长期挑战。

2 软土路基常用处理技术分析

2.1 换填法

换填法是一种历史悠久且应用广泛的浅层软基处理方法,其基本思路是将一定深度范围内的软弱土体全部

或部分挖除, 替换为砂、碎石、灰土或其他高强度、低压缩性的材料。该方法适用于软土层厚度较薄(通常不超过3米)且具备良好弃土或取料条件的工程场景。施工过程中, 回填材料需分层铺设并严格压实, 以确保达到设计要求的密实度。换填法的优势在于施工工艺简单、效果直观、工期短, 特别适合城市道路或场地受限区域的应急处理。然而, 其局限性也十分明显: 对于深厚软土无效, 且大规模开挖与弃土不仅增加工程成本, 还可能带来环境扰动和生态破坏。因此, 在实际应用中需综合评估地质条件与周边环境约束。

2.2 预压排水固结法

预压排水固结法通过施加外部荷载促使软土中的孔隙水排出, 从而加速固结、提高强度。其中, 堆载预压法是最传统的方式, 即在路基表面堆填土石等重物作为临时超载, 使软土在附加应力作用下排水压缩。为缩短排水路径、加快固结速率, 常配合设置竖向排水体, 如塑料排水板或砂井。尽管该方法能有效控制沉降, 适用于深厚软土地区, 但其最大弊端在于工期冗长, 往往需要数月甚至数年才能完成主固结, 且堆载材料需求量大, 后期还需卸载, 增加了施工复杂性。相比之下, 真空预压法则通过在地表铺设密封膜并抽真空, 在软土内部形成负压环境, 利用大气压力差驱动孔隙水排出。该方法无需额外堆载, 避免了因附加荷载过大而导致的地基失稳风险, 同时固结效率通常优于同等条件下的堆载预压^[2]。然而, 真空预压对施工密封性要求极高, 一旦漏气将严重影响处理效果; 此外, 在有机质含量高或渗透性极低的黏土中, 其排水效率也会显著降低。因此, 工程实施中需严格控制密封质量, 并结合地质条件合理设计真空度、排水板间距及预压周期。

2.3 复合地基法

复合地基法通过在软土中设置桩体, 形成由桩与桩间土共同承担上部荷载的增强体系, 从而显著提升地基整体承载能力并抑制沉降。水泥搅拌桩是其中应用最广的技术之一, 其原理是利用深层搅拌机械将水泥浆或干粉与原土充分混合, 经水化反应形成具有一定强度的柱状加固体。该方法特别适用于饱和黏性土, 能有效提高地基模量, 减少差异沉降。然而, 当软土中含有大量有机质(如泥炭土)时, 水泥的固化反应可能受到抑制, 导致桩体强度不足。此外, 施工过程中搅拌均匀性、水泥掺量及提升速度等参数的控制对成桩质量至关重要。另一种常见的复合地基形式是碎石桩, 其通过振动沉管或冲击成孔后填入碎石并振密成型。碎石桩不仅通过挤密作用改善周围土体结构, 还能作为竖向排水通道加速

固结, 兼具加筋与排水双重功能。该方法在砂性或粉土类软基中效果显著, 但在高含水率黏土中易出现“缩颈”或“断桩”现象, 影响整体均匀性。设计时需合理确定桩径、桩距及置换率, 通常桩间距控制在桩径的2至4倍之间, 置换率维持在10%至25%范围内, 以兼顾经济性与处理效果。

2.4 加筋土技术

加筋土技术通过在路堤填料中水平铺设土工合成材料(如土工格栅或土工布), 利用筋材与填料之间的摩擦咬合作用, 形成一个整体性更强的复合结构。该技术的核心机理在于限制土体的侧向变形, 均匀分布应力, 从而提高路基的整体稳定性与抗沉降能力。尤其在浅层软基、桥头过渡段或旧路拓宽工程中, 加筋土技术能有效缓解差异沉降, 防止路面开裂。其施工便捷、成本低廉且对环境影响小, 已成为现代公路软基处理的重要辅助手段。然而, 加筋效果高度依赖于筋材与填料的界面特性, 若填料粒径过细或压实不足, 可能导致筋材滑移失效。因此, 施工中应选用级配良好的粗粒填料, 并确保足够的覆盖厚度与压实度, 以充分发挥加筋作用。

2.5 化学加固法

化学加固法通过向软土中注入化学浆液(如硅酸钠、聚氨酯或水泥基浆材), 使其填充孔隙或与土颗粒发生胶结反应, 从而形成具有一定强度和低渗透性的加固体。该方法适用于局部渗漏封堵、既有结构基础托换或紧急抢险等特殊场景。其优势在于可精准注浆、快速凝固, 能在狭小空间内实施。然而, 化学浆液成本高昂, 且部分有机类浆材可能存在地下水污染风险, 环保性较差^[3]。此外, 加固范围有限, 难以用于大面积软基处理。因此, 尽管技术上可行, 但在常规公路工程中应用较少, 更多作为辅助或应急手段。

3 工程实例分析: 某高速公路软基处理(真空预压+塑料排水板)

该高速公路穿越太湖流域, 沿线分布厚达8至12米的淤泥质软土, 天然含水率超过60%, 地基承载力不足50kPa。为控制工后沉降并确保工期, 工程采用了“塑料排水板+真空预压”联合处理方案。施工时, 先铺设50厘米厚的砂垫层作为水平排水通道, 随后按1.2米间距正三角形布置塑料排水板, 插入深度达12米。其上覆盖双层密封膜, 通过真空泵维持不低于85kPa的负压, 持续预压6个月。监测数据显示, 地基固结度超过85%, 最终工后沉降控制在15厘米以内, 满足高速公路对沉降的严格要求, 通车后运行状况良好。

4 软土路基处理方案的选择与优化

4.1 选择原则

软土路基处理方案的制定不应孤立看待技术本身，而需立足于工程全生命周期进行系统考量。首要原则是地质适应性，即处理方法必须与软土的成因类型、厚度分布、物理力学参数相匹配。其次，应紧密结合工程具体需求，如设计允许沉降值、施工工期、交通等级及未来维护条件。经济性同样是不可忽视的因素，需在初建成本、运营维护费用与寿命周期效益之间取得平衡。此外，在生态文明建设背景下，环境友好性日益重要，应优先选用低能耗、少弃土、可循环利用的技术路径。最后，施工可行性必须纳入评估，包括现场作业空间、设备可获得性、技术成熟度及施工队伍经验等。

4.2 多技术协同处理

面对复杂的软基条件，单一技术往往难以兼顾沉降控制、稳定性提升与工期压缩等多重目标。因此，多技术协同已成为现代软基处理的主流趋势。例如，在深厚软土区，“塑料排水板+真空预压”组合可实现无堆载条件下的高效固结；在高填方路堤中，“水泥搅拌桩+土工格栅”既能提供刚性支撑，又能通过加筋作用协调变形；而在浅层软基与桥台衔接处，“换填+加筋”则能有效缓解刚柔过渡带来的差异沉降^[4]。这种集成化设计理念不仅提升了处理效果，也增强了工程系统的整体韧性。

4.3 数值模拟与监测反馈

随着计算技术的发展，数值模拟已成为软基处理方案比选与优化的重要工具。借助PLAXIS、MIDASGTS等岩土专业软件，工程师可在施工前对不同方案进行沉降预测、稳定性验算及应力场分析，从而优选技术参数。更重要的是，施工过程中应建立完善的监测体系，布设沉降板、孔隙水压力计、测斜仪等传感器，实时采集数据并反馈至设计模型，实现“动态设计、信息化施工”。这种闭环管理模式不仅能及时发现潜在风险，还可根据实测沉降速率调整预压时间或加载速率，确保工程安全与质量。

5 发展趋势与展望

未来软土路基处理技术将朝着智能化、绿色化与韧性

化方向深度融合。一方面，BIM与GIS技术的集成将实现地质信息、设计方案与施工进度的三维可视化管理，而无人机航测与InSAR遥感技术则可实现大范围、高精度的沉降监测。另一方面，在“双碳”战略驱动下，工业固废如粉煤灰、矿渣微粉等被广泛探索作为水泥替代品或固化剂，不仅降低碳排放，还实现资源循环利用。轻质填料如泡沫混凝土（LFC）和聚苯乙烯（EPS）块体的应用，可大幅减轻路堤自重，从源头上减少附加应力，特别适用于桥头及邻近既有构筑物区域。此外，生态修复理念正逐步融入软基处理工程，尤其在滨海湿地等敏感区域，强调工程措施与自然恢复相结合。最后，面对气候变化带来的极端降雨、海平面上升等新挑战，软基处理设计需引入韧性思维，提升公路基础设施应对不确定性的能力。

6 结语

软土路基处理是保障公路工程安全与耐久的关键环节。本文系统梳理了软土的工程特性及其危害，全面评述了换填、预压固结、复合地基、加筋及化学加固等主流处理技术的原理与适用性，并通过工程实例验证了其有效性。研究表明，单一技术难以应对复杂地质条件，多技术协同、信息化施工与全生命周期成本优化是未来发展方向。在“双碳”目标与高质量发展背景下，绿色、智能、韧性的软基处理技术将得到更广泛应用。工程实践中应坚持“因地制宜、技术可行、经济合理、环境友好”的原则，科学制定处理方案，确保公路工程的安全、高效与可持续。

参考文献

- [1] 鄢小东.公路施工中软土路基处理技术分析及应用[J].汽车周刊,2026,(01):84-86.
- [2] 刘佳.公路工程中软土路基施工技术探讨[J].交通科技与管理,2025,6(17):76-78.
- [3] 梁斌.公路施工中软土路基的施工技术处理初探[J].四川建材,2025,51(07):189-192.
- [4] 徐于轩,丰伍龙.公路施工中软土路基处理技术分析[C]//中国智慧工程研究会.2025智慧设计与建造经验交流会论文集.浙江交工宏途交通建设有限公司,2025:154-156.