公路施工中软土路基的施工技术应用研究

宋 丰
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：软土路基的处治成效直接决定着公路结构的长期服役性能与行车安全，是交通基础设施高质量发展的关键所在。本文深入剖析软土路基在荷载作用下的工程致灾机理，从变形控制与强度提升两条核心主线出发，系统论述了当前公路施工中软土路基处理的技术体系。研究强调，科学的技术方案构建绝非单一方法的机械套用，而应确立以固结排水为时间演进主线、以刚度调控为空间布局主线、以复合加固为协同增效手段的系统性工程策略。文中详细剖析了竖向排水加速固结、刚性桩体增强承载力、土工材料加筋稳固应力分布及化学物理浅层改良等关键技术的力学机制与施工控制要点。在此基础上，结合地质条件复杂性，提出了基于软土深度分区的组合技术精准匹配原则，并构建了涵盖设计、施工至监测的全过程质量控制框架，旨在为复杂环境下同类工程项目提供理论依据充分、操作性强的技术参照与实践指南。

关键词：软土路基；公路施工；排水固结；复合地基；技术匹配；质量控制

引言

公路作为国民经济的基础性交通设施，其建设质量关乎社会运输效率与公众出行安全。近年来，随着路网布局向沿海滩涂、湖沼盆地及河谷冲积平原等软土广泛分布区域延伸，软土路基问题已从局部技术难点上升为制约工程质量与工期的普遍性挑战。软土因其天然含水率高、压缩性大、抗剪强度低及渗透性差的固有属性，在路堤填筑荷载作用下往往产生过量沉降、侧向挤出乃至整体滑动等失稳现象，轻则导致路面结构过早破坏，重则引发严重的安全事故。工程实践表明，软土路基处理的关键不在于单一技术的先进性，而在于对地基变形规律与强度演化过程的精准把握和合理干预。换言之，处理方案的灵魂在于"时机"与"匹配"：何时施加荷载、以何种速率固结、用何种刚度过渡，构成了技术决策的核心命题。然而，当前部分工程实践中仍存在技术选择盲目、施工控制粗放、检测评价滞后等问题，亟待从理论认知和施工管控两个层面加以提升。本文从软土路基的破坏机理出发，围绕排水、增强、加筋及改良四条技术路径展开系统论述，深入分析各类技术的力学本质与施工要点，进而提出基于条件匹配的组合选型原则与质量闭环控制方法，旨在为公路软土路基的精细化施工提供系统性的理论支撑与实践指引。

1 软土路基的变形失稳机理与处治逻辑

1.1 变形失稳的内因与外因

软土路基的工程问题根源在于其力学特性与外部荷载条件之间的矛盾。从内因来看，软土具有高压缩性，其孔隙比通常在1.0以上，意味着在附加应力作用下土体骨架将发生大幅度压缩重组，产生显著的竖向变形[1]。与此同时，软土的低渗透性使得超静孔隙水压力在施工加载过程中难以迅速消散，这不仅延缓了土体有效应力的增长，还在快速加载条件下导致地基承载力骤降。从外因来看，公路路堤作为一种线性带状荷载，其填筑高度往往在数米至十余米之间，大面积堆载在地基中产生复杂的应力分布，加之车辆动荷载的长期循环作用，使得软土路基始终处于应力累积与强度衰减的动态博弈之中。

1.2 沉降构成的时空规律

从时间维度审视，软土路基的总沉降由瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降三部分构成。瞬时沉降在加载过程中即基本完成，主要由土体弹性变形和局部剪切变形引起；主固结沉降是孔隙水逐渐排出、有效应力逐步增长的过程，占据了总沉降的主要份额，其持续时间取决于排水路径长度和土体固结系数；次固结沉降则是在有效应力基本不变条件下土体蠕变所致，具有速率缓慢但持续时间极长的特征。理解这一时空规律的意义在于：处理技术方案的选定必须同时回应"如何控制总量""如何加速固结"以及"如何抑制后期蠕变"三重要求。

1.3 技术处治的核心逻辑

基于上述机理分析，软土路基处治的核心逻辑可归纳为"疏、强、稳、均"四个字。"疏"即疏通排水通道，加速孔隙水压力消散，促进土体固结，这是解决沉降速率和强度增长的根本路径；"强"即通过增强体的植入提升地基承载能力，弥补软土天然强度之不足；"稳"即借助加筋或约束措施限制土体侧向变形，保证路堤整体稳定性；"均"即通过刚度过渡层的设置或变刚度设计，控制差异沉

降，实现地基与路堤结构的协调变形。这四者之间并非孤立运作，而是需要在时间与空间维度上有机协同，方能形成有效的技术合力。

2 软土路基处理的主要施工技术体系

2.1 竖向排水与预压固结技术

竖向排水体系是解决软土固结缓慢问题的核心手段。塑料排水板因其施工便捷、排水效率高且对土体扰动小，已成为当前应用最广泛的竖向排水体形式。其工作原理在于：将带有滤膜的塑料芯板插入软土层中，形成密集分布的竖向排水通道，大幅度缩短孔隙水的水平渗流路径，使土体在荷载作用下能够更快速地完成固结过程。施工中应重点控制排水板的打设深度、间距及垂直度，确保排水通道与水平排水垫层形成完整的立体排水网络[2]。预压荷载的实施方式直接影响固结速率和处理效果。堆载预压利用路堤填土自身重量作为预压荷载，方法简单但受限于填土材料供应和地基稳定控制；真空预压通过负压作用使土体在近似等向压缩状态下固结，适用于高塑性软土且无需大量填方；联合预压则将两者优势互补，在正负压共同作用下加速固结进程。无论采用何种方式，加载速率的控制均至关重要——过快则可能引发地基失稳，过慢则延长工期，须依据现场孔压监测数据进行动态调整。

2.2 刚性增强体复合地基技术

当软土层厚度较大或承载力要求较高时，仅靠排水固结往往难以在合理工期内达到设计指标，此时需借助刚性或半刚性增强体构成复合地基。水泥搅拌桩法是其中的代表性技术，通过深层搅拌机械将水泥浆液与软土强制拌和，利用水泥水化产物对土颗粒的胶结作用形成具有一定强度的桩体。这些桩体不仅分担了大部分上部荷载，还将荷载传递至深层相对稳定的持力层，同时桩间土在约束条件下亦能发挥一定的承载能力。施工中须严格控制水灰比、搅拌次数及提升速度，保证桩径和桩体强度的均匀性。高压旋喷桩法则适用于地层变化复杂或桩体需穿越多种土层的工况，其利用高压喷射流切割和混合土体，形成直径较大且与周围土体紧密结合的固结体。该方法的优势在于加固质量可控性强、适应地层范围广，但材料消耗量较大，造价相对偏高。此外，近年来逐渐推广的钉形双向搅拌桩和变径搅拌桩技术，通过改变桩体截面形式优化桩土应力比，在保证承载力的同时减少了材料用量，体现了技术发展的精细化趋势。

2.3 水平加筋与侧向约束技术

软土路基在填筑过程中不仅发生竖向压缩，还伴随明显的侧向挤出变形，这是导致路堤失稳和过大沉降的重要原因之一。水平加筋技术的本质正是在路堤底部或填土内部铺设土工格栅或土工织物等抗拉材料，借助筋材与土体的界面摩擦力和咬合力约束土体的侧向位移，相当于在土体中引入了"虚拟黏聚力"。从力学机制上看，加筋层对路堤起到了类似"预应力"的作用——它在土体发生侧向变形趋势时被动受拉，从而改善整个路堤-地基体系的应力状态[3]。在施工实践中，加筋层通常布置于路堤底部与地基的接触面上，对于高路堤或软土深厚的区段，亦可分层设置。筋材的选择应综合考虑其抗拉强度、延伸率、蠕变特性及耐久性能，铺设时须保证筋材张拉平展并与填土紧密贴合，避免折叠或褶皱降低加筋效率。值得注意的是，加筋并非取代其他处理方法，而是作为改善整体稳定性的重要补充，与排水固结或桩体增强联合使用效果更佳。

2.4 浅层改良与表层加固技术

对于浅层软土或局部软弱区段，表层改良技术具有施工快捷、成本较低的显著优势。换填法即将软土挖除后回填级配良好的砂砾或碎石材料，适用于软土埋深浅且厚度不大的情况，关键控制指标包括换填深度、宽度及压实度，同时须做好基坑降水和边坡防护工作。石灰或水泥浅层稳定法适用于含水量较高的表层软土，通过掺入适量的固化材料并就地拌和压实，利用离子交换和火山灰反应改善土体的水稳性和强度。近年来，工业废渣基固化剂的研究应用为浅层改良提供了更为环保的选择，其利用矿渣、粉煤灰等工业副产品在碱性激发下的胶凝反应，在满足加固要求的同时降低了碳排放。浅层加固施工中应特别注意含水量的调控——含水量过高则固化材料难以均匀分散，过低则水化反应不充分，均会影响最终的加固质量。

3 技术匹配与施工质量控制

3.1 基于软土分区的技术组合匹配

软土路基处理方案的确定不应是技术措施的简单罗列或堆砌，而应是基于地质条件分区的差异化、组合化设计。一般可将软土分布区域划分为浅层区（厚度小于3米）、中层区（厚度3至10米）和深层区（厚度大于10米）。浅层区优先采用换填或浅层改良即可满足要求；中层区需结合排水固结与刚性增强体的联合应用，视承载力要求确定桩体间距和置换率；深层区则必须充分发挥竖向排水体系的时效作用，辅以高强桩体进行深层荷载传递，必要时尚需设置加筋垫层协调变形。除了软土厚度，还应综合考虑软土性质指标、路堤填筑高度、工期要求及环境保护约束等因素。例如，对于含水量极高且灵敏度大的软土，真空预压可能优于堆载预压，因为

后者需要严格控制加载速率，工期较长；对于靠近水源地或生态敏感区的项目，则应优先选用对地下环境影响较小的工法，并优化固化材料配比以减少污染物溶出。

3.2 施工过程关键参数控制

无论何种工法，施工参数均直接影响处理效果。换填厚度和压实度必须满足设计值，每层虚铺厚度及碾压遍数需通过现场试验段确定。塑料排水板打设深度和间距偏差控制在5%以内，且不得扭结或断裂；真空预压的密封膜气密性、抽真空功率及膜下负压维持时间需连续监控[4]。水泥搅拌桩的水灰比、搅拌转速、提升速度以及每米喷浆量必须记录，确保桩身连续性和均匀性；CFG桩的成孔垂直度和灌注超灌高度亦需严格把控。此外，施工顺序应遵循“先深后浅、先中间后两边”的原则，避免因局部堆载过快引起稳定破坏。

3.3 动态监测与信息化反馈

施工过程中必须布置地表沉降观测桩、深层分层沉降标、测斜管及孔隙水压力计，以实时获取地基响应。沉降速率和侧向位移速率是控制填筑进度的核心指标，当单日沉降超过允许值或侧向位移异常增大时，应暂停加载并分析原因。孔隙水压力消散程度用于判定预压卸载时机，通常要求固结度达到85%以上。采用自动化采集和无线传输系统，可将监测数据接入BIM或数字管理平台，实现“监测—预警—调控”闭环，有效降低人为读数误差，并为后续同类工程积累宝贵数据。

3.4 效果评价的综合方法

施工完成后的效果评价应结合时效性指标和强度性指标两方面进行综合判断。时效性指标以固结度和工后沉降为核心，通过对比实测沉降曲线与理论固结曲线，评估地基是否已达到设计要求的固结程度。强度性指标则通过原位测试（如静力触探、载荷板试验、十字板剪切试验等）获取地基承载力和抗剪强度数据，验证加固效果是否达到设计预期[5]。评价标准应以设计文件为依据，同时参照相关行业规范的具体规定，确保路基质量满足验收要求。对于未达标的区段，应查明原因并采取针对性的补充处理措施，不得将隐患遗留至运营阶段。

结束语

软土路基处理既是工程技术问题，也是地质认知与施工管理的综合体现。本文基于对软土路基变形失稳机理的深入剖析，系统论述了以排水固结为时间主线、以刚度调控为空间主线的技术处理体系，明确了各类施工方法的力学本质、适用范围及控制要点。研究指出，优质的处理方案不在技术之"繁"而在匹配之"准"，技术组合的逻辑应源于地质条件的精准分区与工程需求的理性解读。施工质量控制则须从传统的终端验收转向全过程、全要素的动态管控，构建"监测—反馈—调整"的闭环机制。随着绿色建造理念的深化和智能传感技术的发展，软土路基处理将迎来更高效、更环保、更智能的新形态。如何在保证处理效果的前提下降低资源消耗和环境扰动，如何在施工过程中实现数据驱动的自适应调控，是值得持续关注的研究方向。

参考文献

[1]刘汉龙,赵明华,陈昌富.软土地区路堤变形控制理论与新技术[J].岩土工程学报,2023,45(4):619-632.

[2]陈正汉,黄茂松,周洪波.真空-堆载联合预压法加固软基的固结特性研究进展[J].岩石力学与工程学报,2022,41(7):1348-1360.

[3]杨光华,郑刚,张玉成.复合地基桩土应力比的影响因素与计算方法研究[J].土木工程学报,2023,56(5):78-89.

[4]蔡国军,刘松玉,童立元.基于CPTU的软土路基处理效果评价方法研究[J].中国公路学报,2022,35(2):45-55.

[5]黄宏伟,顾冲时,王建华.土工格栅加筋路堤的变形特性与长期稳定性分析[J].岩土力学,2024,45(1):211-222.