

高速公路路基软土地基处理与沉降控制技术研究

郑奕鹏

保利长大工程有限公司 广东 广州 510620

【摘要】：软土地基在高速公路路基建设中存在承载力低、沉降大及不均匀沉降问题，严重影响路基稳定性与使用寿命。通过优化地基处理技术，包括预压固结、排水加速、深层搅拌及复合处理方法，结合施工工艺设计和动态监测，实现沉降量控制与承载力提升的协同优化。施工参数和排水系统布置的精细化管理可改善土体物理力学性能，降低沉降速率并增强路基整体稳定性。工程实践验证了不同技术方案在复杂软土地基条件下的适用性和效果，为高速公路路基建设提供技术支撑。

【关键词】：软土地基；高速公路路基；沉降控制；地基处理技术

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.028

引言

高速公路建设常经过松软、饱和或淤泥质地带，地基易发生沉降和不均匀沉降，直接影响路面平整度和使用寿命。软土地基沉降问题不仅增加施工成本，还可能引发安全隐患。通过合理的地基处理与沉降控制方法，可以有效提高路基承载力并控制沉降量，保证路基长期稳定。研究不同处理技术的适用条件、施工方法及沉降控制效果，为实际工程提供科学依据和优化方案，既有助于施工管理，也能提升高速公路工程质量与可靠性。

1 软土地基特性与沉降问题分析

1.1 土质类型及工程特性

高速公路沿线软土地基多表现为淤泥质、粉质粘土及饱和黏土，其固结特性差、抗剪强度低、孔隙比高，承载力随含水量变化显著。土体易发生长期沉降且沉降速度难以预测，剪切模量和压缩模量呈非线性变化，受施工荷载及地下水位影响明显。微观结构中含有大量胶结物与水化矿物，导致土体抗压、抗拉和抗剪能力不均匀，同时产生高孔隙压力，易形成局部陷和不均匀沉降。不同土层叠置组合增加了地基整体响应复杂性，对路基设计提出高精度要求，传统承载力计算方法难以完全适用，需要结合力学模型和数值模拟进行精确分析。

1.2 沉降机理与影响因素

软土地基沉降机理主要包括即刻沉降、固结沉降及次生压缩沉降，其中固结沉降占总沉降的主要比例。土体在荷载作用下产生孔隙水排出，孔隙压力逐渐释放，土颗粒重新排列，沉降速度随时间呈非线性递减特征。影响沉降的因素复杂，包括土层厚度、土体含水量、固结系数及土壤结构类型，同时地下水位波动、施工荷载幅度和施工顺序对沉降过程存在显著干扰作用^[1]。地基表面和深层不均匀沉降可能导致路基产生倾斜、裂缝和路面不平整，影响结构长期性能和安全性。现代高精度监测和数值仿真技术可揭示不同工况下沉降演化规律，为精细化处理提供依据。

1.3 软土地基问题对路基稳定性影响

软土地基沉降直接制约高速公路路基稳定性与结构安全性。沉降引起的路基变形可导致路面纵向向裂缝、排水系统失效及护坡破坏，局部沉陷会形成应力集中区，降低路基承载能力并加速路面结构老化。软土地基低抗剪强度及高孔隙比特性在长期荷载作用下易产生剪切破坏和边坡滑移，土体内部孔隙水压力的持续变化使地基刚度下降，增加路基非均匀沉降风险。针对高速公路高交通量与重载运输要求，地基沉降对路面平整性和行车安全构成直接威胁，因此精准掌握沉降特征并制定有效控制技术是确保路基整体稳定性的关键环节，对工程设计、施工方案和养护管理具有重要指导价值。

2 地基处理技术选择与优化

2.1 预压与排水固结方法

软土地基的沉降主要受孔隙水排出速度限制，通过预压与排水固结可以加速孔隙水释放，提高土体密实度和承载力。地基表面施加均匀静荷载，使土层在排水条件下逐步固结，孔隙水压力下降，土体压缩模量增加，从而减少后期沉降量。排水固结通常采用纵向和横向排水组合，配合滤管或排水板布置，实现土层内部水分的高效引导，缩短沉降控制周期。预压荷载的大小、施加时间及荷载分布需要与地基厚度、土质特性及地下水位动态匹配，以避免局部超载或沉降不均问题。现代工程中，数值模拟与现场监测可优化荷载设计和排水布局，提高预压固结效果，并减少对路基施工工期的影响，为高速公路路基建设提供可靠沉降控制方案。

2.2 深层搅拌与加固材料应用

深层搅拌技术通过机械搅拌将土体与水泥、石灰或其他胶结材料均匀混合形成土-基复合体，提高土体强度和稳定性。搅拌深度、搅拌效率以及材料掺量直接影响改良土的抗剪强度和压缩模量，控制土体的沉降速率和幅度。新型材料的应用如高早强水泥、聚合物改性剂，可增强改良体的耐水性和持久性，实现土体内部微结构优化，改善孔隙分布和粘聚力^[2]。施工过程中的动力参数、搅拌次数及浆液均匀性需严格控制，以避免

改良不均匀或形成弱层。通过深层搅拌与加固材料组合使用，软土地基在高速公路重载作用下表现出高承载力和低沉降特性，同时减少路基长期沉降和维护需求，提高整体结构可靠性。

2.3 复合处理技术组合策略

复合处理技术将预压、排水固结和深层搅拌等多种处理方法进行协同应用，根据地基厚度、土层性质及荷载要求进行优化组合。上层采用预压与排水板加速固结，中下层利用深层搅拌形成高强度改良体，实现沉降梯度控制与承载力提升的双重目标。复合策略需考虑各处理方法间相互作用，如荷载施加顺序、材料相容性及施工时机，以确保土体整体响应协调且沉降分布均匀。通过数值模拟和现场监测优化复合处理参数，可实现施工效率和经济性兼顾，同时保证高速公路路基的长期稳定性和安全性。复合处理不仅改善软土地基物理力学性能，还能通过沉降控制精细化管理，为复杂地质条件下高速公路建设提供技术保障和实践指导。

3 施工工艺设计与实施措施

3.1 施工流程与工序安排

软土地基施工流程需综合地质条件、土体性质和路基设计要求进行精细化安排。地基处理应从土体勘察、地基预处理、排水系统布置到荷载施加形成闭环施工序列，确保各工序紧密衔接。预压和排水固结需根据沉降速率和土层厚度设定荷载增量及持续时间，深层搅拌需同步考虑材料配比、搅拌深度及机械参数，以保证改良体均匀性和强度达标。施工顺序不仅影响沉降控制效果，也直接决定路基承载力提升效率，同时降低不均匀沉降风险。整个施工流程应结合动态监测数据调整工序节奏，优化工序安排，实现沉降控制、施工安全及工期效率的统一，满足高速公路高负荷运营要求。

3.2 施工监测与质量控制

施工过程中监测系统需覆盖地基沉降、孔隙水压力、改良土强度及地基位移等关键参数，形成实时反馈与数据分析机制。沉降板、压力计及地表沉降观测点应布置合理，监测数据需与设计沉降曲线对比分析，以便及时调整施工荷载或改良方案^[3]。质量控制不仅关注施工结果，还应覆盖施工材料配比、搅拌均匀性、排水系统性能及施工机械运行状态，确保改良土体物理力学性能达到设计指标。高精度监测与严格质量控制相结合，可降低沉降不均匀风险，提高地基承载力，同时为复合处理技术优化提供数据支撑，实现施工科学化与精细化管理。

3.3 施工环境与施工条件适应性

软土地基施工必须针对多变环境和复杂施工条件进行适应性设计，包括地下水位变化、降雨条件、土层湿度及施工机械可操作性。土体含水量和环境温湿度对沉降速度和改良材料反应过程具有直接影响，施工方案需调整荷载施加速率、浆液水灰比及排水策略，以保证施工期间地基稳定性。施工环境的

不均匀性要求在不同土层中采用分层处理、局部加固或改良体加密布置，实现整体沉降控制目标。通过优化施工条件与环境适应性措施，可确保高速公路路基在复杂地质与施工条件下保持高承载力和低沉降特性，同时提升施工安全性与工艺效率。

4 沉降控制技术应用效果评价

4.1 路基沉降量监测与分析

沉降量监测采用多层次、连续化布点策略，通过沉降板、孔隙水压力计及地表位移测点获取土体响应数据，实现路基整体与局部沉降特征的动态跟踪。监测数据经过时序分析与空间分布评估，可揭示不同处理方法对沉降速率、沉降量及沉降均匀性的影响规律。沉降曲线与设计预期进行对比，可识别潜在沉降异常区域及沉降梯度分布，评估地基承载力变化趋势。通过沉降数据与施工参数关联分析，可进一步优化处理工艺，调整荷载施加方案及排水策略，确保软土地基在施工及运营阶段的沉降控制达到预期水平，实现路基结构长期稳定性和安全性精细化管理。

4.2 承载力提升及性能评估

地基处理后的承载力评估结合静载试验与数值模拟方法，对改良土体的抗压强度、抗剪强度及变形模量进行系统量化。承载力提升效果不仅体现为地基整体抗沉降能力增强，还反映在路基对重载交通荷载的长期适应性。土体密度提升、孔隙水压力降低和改良土体均匀性改善是承载力提高的关键指标^[4]。性能评估通过对不同深度、不同处理方法改良体的力学参数进行对比分析，可揭示工艺参数与土体响应的内在关系，为后续施工方案优化提供数据支撑，同时实现沉降控制与承载力提升的协同优化，保证高速公路路基在高频率荷载条件下保持稳定。

4.3 不同技术方案对比与优化

技术方案对比分析基于沉降量、承载力及经济性等综合指标，通过多工况模拟和现场数据验证，对预压固结、深层搅拌及复合处理技术的适用性进行量化评估。各方案在土层厚度、土质类型及施工条件下的沉降控制效果存在差异，需综合考虑施工周期、成本、环境适应性及长期性能表现。优化策略通过调整处理深度、材料配比、荷载施加顺序及排水系统布置，实现方案间优劣互补。技术方案对比与优化不仅提高沉降控制精度，还为复杂软土地基工程提供决策依据，使高速公路路基在不同地质条件下获得高承载力、低沉降和稳定的长期性能，实现施工效率与技术效果的最佳平衡。

5 高速公路路基稳定性技术总结

5.1 处理技术适用性总结

不同地质条件下软土地基处理技术的适用性需结合土体物理力学性质、厚度及承载需求进行综合分析。预压与排水固

结适用于低承载力、孔隙比大且地下水位相对稳定的地层，可通过调整荷载施加速度和排水系统布置，实现沉降控制与地基加固同步优化。深层搅拌技术适用于厚层软土及高水含量土体，通过土-基复合体形成高强度改良体，提高抗剪强度和压缩模量，同时降低沉降速率。复合处理技术通过多方法协同应用，实现上中下层沉降梯度优化和整体承载力提升。技术适用性分析不仅考虑短期施工效果，还需兼顾长期稳定性和经济性，结合数值模拟、材料性能及沉降预测结果进行动态优化，以满足高速公路路基在高荷载和复杂土层条件下的稳定性要求，为工程设计和施工提供精细化技术支撑。

5.2 沉降控制关键措施归纳

沉降控制关键措施应覆盖土体改良、荷载施加、排水系统布置及施工工序管理全过程。通过精确确定荷载大小与施加时间，实现预压与排水固结的沉降调控，同时结合深层搅拌改良土体结构和孔隙分布，提高抗压强度和均匀性^[5]。排水系统布置应兼顾纵向排水效率与土层透水性，保证孔隙水及时排出，降低固结沉降周期。施工工序需按地基响应特征动态调整，确保各层处理方法协调作用，避免局部沉降集中和应力不均。沉降控制措施不仅强调施工过程精细化管理，还通过实时监测和反馈调整优化策略，使高速公路路基在多变荷载和环境条件下保持稳定的沉降分布和长期承载力，为高质量路基建设提供

科学依据。

5.3 工程实践经验与技术指导

工程实践表明，软土地基处理与沉降控制需建立系统化技术体系，包括施工工艺设计、材料选用、监测方法及施工管理策略的整体协调。地基改良方法选择需依据土层厚度、土质特性及交通荷载要求，施工参数通过监测数据实时校正，实现沉降量和承载力的双重优化。技术指导强调施工与设计一体化，施工顺序、荷载施加方案和排水系统布置均应与地基响应动态匹配。工程经验还表明，复合处理策略在复杂地质条件下能有效控制沉降梯度和提升承载力，同时减少长期维护需求。系统化技术指导可为高速公路软土地基施工提供标准化、可操作的实施方案，提高施工效率与路基稳定性，实现地基处理科学化和沉降控制精细化管理，增强路基安全性与使用寿命。

6 结语

高速公路软土地基处理与沉降控制技术的应用已成为提升路基稳定性和长期性能的核心环节。软土地基的独特物化特性导致沉降和承载力不足问题显著，通过合理选择和组合处理方法、优化施工工艺并强化监测数据分析，可显著改善地基承载力并控制沉降发展趋势。技术集成与施工精细化管理有效支撑路基在复杂地质条件下保持稳定表现，为高速公路工程建设提供了可靠的技术路径和优化依据。

参考文献：

- [1] 贺勋.高速公路软土地基路基沉降控制措施研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(12):041-044.
- [2] 冯世伟.高速公路路基施工中软土地基处理技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(10):084-087.
- [3] 徐松,王凯华,于宝义.复合地基处理技术在软土地基高速公路建设中的应用研究[J].科学技术创新,2025(18):141-144.
- [4] 刘永东.高速公路拓宽工程软土地基处理方案的设计和施工技术[J].工程建设与设计,2025(5):166-168.
- [5] 张祯.路基软基处理技术在高速公路施工中的应用[J].工程技术研究,2025,10(2):62-64.