 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i7.11045

Research on the Optimized Design of Roadbed Structures in Soft Soil Areas

Peng Lu

Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu, Henan, 476000, China

Abstract

Due to its high natural moisture content, high compressibility, and low bearing capacity, the roadbed in soft soil areas is prone to significant settlement and uneven deformation under the combined action of external loads and environmental factors, which in turn affects the overall safety and service life of road structures. Analyze the geological characteristics and deformation mechanism of soft soil engineering, integrate core influencing factors and control parameter system, study the technical approach and method system of roadbed structure improvement design, and summarize the collaborative application of technologies such as replacement, composite foundation, and geosynthetic materials. By establishing a technical system that combines structural improvement design and performance evaluation, theoretical basis and methodological support are provided to increase the overall stability and durability of roadbed engineering in soft soil areas.

Keywords

soft soil area; roadbed structure; optimize design; deformation control; reinforcement technology

软土地区路基结构优化设计研究

路鹏

商丘工学院，中国·河南 商丘 476000

摘　要

软土地区由于天然含水率高、压缩性大、承载能力低，路基在外荷载和环境因素的共同作用下容易产生较大的沉降以及不均匀变形，然后影响道路结构的整体安全性及使用寿命。对软土工程地质特性及变形机理实行分析，融合核心影响因素和控制参数体系，研究路基结构改良设计的技术途径及方法体系，归纳出换填、复合地基以及土工合成材料等技术的协同应用。借助建立结构改良设计及性能评定相结合的技术体系，为增加软土地区路基工程整体稳定性、耐久性给出理论依据和方法支持。

关键词

软土地区；路基结构；优化设计；变形控制；加固技术

1 引言

软土地区分布于河流冲积平原、滨海沉积带、湖沼相沉积区，该类地层一般有着高含水率、高孔隙比、低强度等典型工程特性，路基在填筑和运营过程中容易出现较大的变形控制问题。交通荷载长期作用下，软土结构容易出现固结沉降、侧向挤出变形，造成路面开裂、差异沉降、结构失稳等问题不停发生，给道路工程的安全运行造成持续的影响。所以，在软土地区开展路基结构改良设计研究有重要的工程意义及现实需求。目前工程实践中虽然已经大量使用了各种地基处理及加固技术，但是在结构体系协同设计、参数改良控制和长期性能评定方面还存在着不足，不能满足冗杂地质条件下高标准建设的要求。在此背景下，有必要从软土变形机理出发，融合结构改良理论以及现代分析方法，对路基设计体系实行系统的研究，增加工程整体的适应性、稳定性。

2 软土地区路基结构优化设计的工程地质特性与变形机理分析

2.1 软土层结构组成与物理力学性质特征

软土层一般由黏粒、粉粒和少量有机质组成，颗粒细小、排列松散，孔隙结构发育明显，内部水分以融合水以及自由水两种形式共存，所以整体上有着高含水率及高压缩性。工程地质表现上，软土抗剪强度低，承载力小，受外部荷载作用时容易产生较大的压缩变形以及结构重排。其物理力学性质对路基稳定性有直接影响，在填筑初期，土体排水固结速度慢，强度增长慢，容易出现初期沉降集中现象。伴随时间的推移，土体结构逐渐致密，但是还是不能完全消除长期蠕

【作者简介】路鹏（1984–），男，中国江苏徐州人，硕士，高级工程师，从事道路与桥梁研究。

变效应。不同的沉积环境，软土层的非均质性表现得比较明显，局部受力状态的差别会增大，路基结构设计的不确定性、复杂性也会随之增加，对结构改良的要求也会更高。

2.2 软土固结沉降与差异变形演化规律

软土固结沉降过程有明显的阶段性特征，在荷载施加初期主要表现为瞬时压缩变形，随后进入以孔隙水排出为主的固结发展阶段，最终形成长期缓慢蠕变沉降。由于软土渗透系数小，排水时间长，沉降效应有着明显的滞后性、累积性。空间分布上软土层厚度及土性不同会造成沉降速率不同，进而产生差异变形，造成路基不均匀下沉及结构应力集中。差异变形在道路纵向和横向都会出现明显的差别，并且会伴随交通荷载反复作用而逐渐增大。长期演化过程中土体结构一直调整，但是固结不完全的状态依旧存在，使沉降过程有着持续性特征，对路面平整度及结构安全性产生持续影响 [1]。

3 软土地区路基结构优化设计的关键影响因素与控制参数体系

3.1 含水率与孔隙比对路基承载性能的影响

软土含水率、孔隙比是决定软土工程力学性质的主要参数，含水率越高，土体颗粒间的有效接触面积越小，内摩擦阻力越小，抗剪强度越低。孔隙比增大，土体结构越疏松，压缩性越大，在外荷载作用下体积压缩和结构重排越容易。两者之间存在着密切的联系，共同决定土体的承载能力以及变形特征。路基结构设计时含水率的变化受天然地质条件影响，也及施工排水、外界环境有关，控制不当会增大沉降风险。孔隙结构的改变还会对渗流途径和固结能力产生影响，使路基强度增长过程受到限制。长期运营中水分迁移、孔隙演化不停发生，使承载性能表现动态变化的特征，对结构稳定性提出更高的要求。

3.2 荷载水平与交通作用下变形控制指标

交通荷载水平直接决定软土路基受力状态，不同的轴载强度以及荷载频率对土体变形行为有较大的影响。荷载作用初期路基主要表现为弹性变形，但是伴随循环加载次数的增加，塑性变形逐渐累积，变成主要形式。变形控制指标一般有沉降量、差异沉降、侧向位移等主要参数，上述参数可以折射结构整体稳定状态以及使用性能衰减的程度。荷载作用还会引起应力重分布，使局部区域产生应力集中现象，激化结构不均匀变形。在长时间的交通运行中，由于重复荷载效应一直增大微小变形，最终会形成不可逆的结构损伤。所以，在改良设计过程中要融合考虑荷载等级、交通流特征、车辆组成，对变形控制指标实行动态约束，增加路基结构的适应能力、耐久性能。

3.3 地下水条件与排水环境对结构稳定性的制约

地下水条件对软土路基结构稳定性有较大的制约作用，地下水位高低会直接影响土体有效应力水平和抗剪强度的变化。当地下水位较高时，孔隙水压力增大，有效应力减小，路基承载能力明显下降，固结过程受到抑制，沉降时间延长。排水环境的好坏决定孔隙水排出的速度，对固结速率有重要的影响。排水条件不好时，水分不能及时排出，容易形成软弱夹层，加大局部变形的风险。地下水流动还会造成土体细颗粒迁移，改变内部结构稳定性，使路基整体均匀性下降。结构改良设计时要联系地下水动态变化规律，合理布置排水系统及隔水措施，改良排水条件以增加固结能力，进而增加路基整体稳定性及长期服役能力 [2]。

4 软土地区路基结构优化设计方法与技术路线构建

4.1 基于力学平衡的结构参数优化方法

依据力学平衡的路基结构改良方法，以应力分布均衡、变形协调为重心，靠着建立土体、结构、荷载三者耦合模型来实现参数的精确控制。在计算体系中加入分层地基模型，把软土层分成 3 到 6 个计算单元，给每个单元赋予不同的弹性模量及泊松比参数，弹性模量取值范围控制在 2MPa 到 15MPa 之间，泊松比一般取 0.35 到 0.48。使用极限平衡法融合 Bishop 简化法计算安全系数，安全系数小于 1.25 时应调整结构参数。路基填筑高度一般控制在 4m 到 8m 之间，根据加载分级原则，每级填筑厚度控制在 0.3m 到 0.5m 之间，以减少瞬时沉降集中效应。使用应力扩散角 $\theta=30^\circ \sim 45^\circ$ 的计算方法，改良荷载传递途径，使基底附加应力减少 15% ~ 35%。在参数改良过程中使用反演分析技术，对现场监测沉降数据实行拟合修正，使理论模型误差控制在 10% 以内，然后到了结构尺寸、填料模量、荷载分布的协调改良，增加整体力学平衡能力以及长期稳定性。

4.2 数值模拟在路基结构优化中的应用路径

数值模拟技术在软土路基改良设计中主要使用有限元分析的方法，对繁复的受力过程实行可视化和量化分析，常用的软件有 PLAXIS 2D/3D 以及 ABAQUS。在建模过程中，软土使用修正 Cam-Clay 模型或 Mohr-Coulomb 模型，参数输入囊括黏聚力 5kPa 至 25kPa、内摩擦角 5° 至 15° 以及渗透系数 10^{-6} 至 10^{-8}m/s。模型网格划分密度一般控制在 0.5m 到 2m 之间，到了计算精度和能力的平衡。施工模拟阶段用分步加载的方式模拟填筑过程，每一施工阶段的时间步长为 1 天到 7 天，来折射固结演化规律。设置交通荷载模型，标准轴载取值 100kN 到 140kN，加载频率取 0.5Hz 到 2Hz，分析循环荷载下的累积变形特征。模拟结果输出沉降曲线、剪应变分布、孔隙水压力变化云图，与现场监测数据误差比较，一般沉降预测误差控制在 8% 以内 [3]。利用参数敏感性分析可以找出影响稳定性的重要因素，为结构优化提供定量的依据。

4.3 多目标协同优化设计模型构建方法

多目标协同改良设计模型以沉降控制、成本最小化、稳定性最大化为设计目标，用数学改良函数来实现融合平

衡。目标函数一般为 F=min(w1S+w2C−w3St)，其中 S 为最终沉降量，控制目标为小于 20cm 至 30cm，C 为工程造价，单位为每平方米 800 元至 1500 元，St 为结构稳定性指标，安全系数大于 1.3，权重系数 w1、w2、w3 分别取 0.3、0.3 及 0.4 来体现安全优先的原则。改良算法用遗传算法或者粒子群算法，种群规模设为 40 到 80 个个体，迭代次数设为 100 到 200 次，收敛精度设为 10^{-3}。设计变量有填筑高度、地基处理深度（一般为 6m ~ 18m）、材料模量、排水间距等参数。约束条件最大沉降不超过设计值的 85%，差异沉降控制在 1/500 以内。凭借 Pareto 前沿解集选择最优方案，到了成本和性能的平衡改良，使结构体系在冗杂的软土条件下保持高适应性、稳定性，图 1 为软土地区路基改良设计数据分析图。

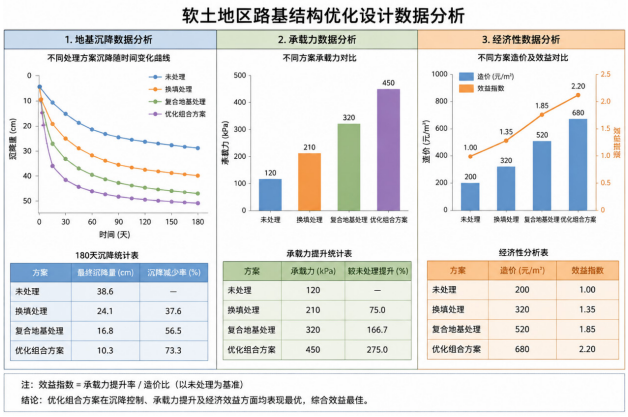


图 1 软土地区路基优化设计数据分析图

5 软土地区路基结构优化设计中的加固技术与组合结构体系

5.1 换填与浅层处理加固结构优化方案

换填法、浅层处理技术适合于软土厚度小、承载力不足、地下水位稳定的地区。换填材料一般使用级配碎石或砂砾料，粒径控制在 5mm ~ 80mm 之间，压实系数不小于 0.93 ~ 0.97，分层填筑厚度一般控制在 0.3m ~ 0.4m。换填深度根据软土厚度来定，一般处理深度为 1.5m 到 3.0m，可使基底承载力增加 30% 到 60%。浅层加固常以及灰土处理技术融合使用，石灰掺量控制在 8% ~ 12%，水泥掺量为 5% ~ 10%，借助强制搅拌形成稳定基层，无侧限抗压强度可到了 1.0MPa 以上。施工时用振动碾压设备，压实遍数不少于 6 遍，碾压速度控制在 2km/h 至 4km/h 之间，保证密实度均匀。设置排水盲沟间距 10m ~ 20m，加快孔隙水排出，增加固结能力。该组合方案可以有效地减少初期沉降 20% 到 40%，并且可以改良路基整体均匀性 [4]。

5.2 复合地基与深层加固技术集成应用

复合地基技术是利用桩体与周围土体共同作用来增加承载能力，主要有 CFG 桩、碎石桩、水泥搅拌桩。其中 CFG 桩桩径一般为 0.4m 至 0.6m，桩长控制在 8m 至 20m，桩间距 2.0m 至 3.5m，单桩承载力可到了 300kN 至 800kN。水泥搅拌桩水泥掺量为 15% 至 20%，28 天抗压强度可达 1.5MPa 至 3.0MPa。碎石桩直径 0.6m ~ 1.0m，用振冲法成孔，置换率控制在 15% ~ 35%。在深层加固体系中，用桩土应力比 n=2 到 6 实行改良设计，使荷载有效传递到深层稳定土体上。复合地基设计中使用等沉降面理论，使桩土共同变形协调误差控制在 5% 以内。施工监测使用静载试验以及低应变检测相结合的方式，检测覆盖率不低于总桩数的 20%。该技术体系可以使得整体地基承载力增加 2 倍以上，大大降低长期蠕变沉降速率。

5.3 土工合成材料在路基结构中的增强机制

土工合成材料主要有土工格栅、土工织物及土工膜，在软土路基中起到加筋和隔离的作用，增加整体稳定性。土工格栅抗拉强度一般为 50kN/m 至 200kN/m，延伸率控制在 10% 至 15%，铺设间距一般为 0.3m 至 0.8m。界面摩擦系数增加到 0.6 到 0.8，可以明显提高土体的侧向约束能力。路基底部铺设双层土工织物，可使细颗粒迁移率减少 40% 到 70%，改良排水条件。土工膜渗透系数可以控制在 10^{-11}m/s 以下，用来阻隔地下水上升。加筋作用凭借应力分散来减少基底附加应力 20% 到 30%，增加抗剪强度 15% 到 25%。施工时搭接长度大于 30cm 至 50cm，用 U 型钉固定，间距 1.0m 至 1.5m。使用碎石垫层或者砂垫层以及之组合使用，可以形成复合增强结构体系，使路基整体刚度得到明显提高，同时也能抑制差异沉降的发展 [5]。

6 结语

软土地区路基结构改良设计以地质特性分析为基础，以变形控制以及稳定性增加为重心，用力学分析、数值模拟及多目标改良方法的融合应用来实现结构参数和工程性能的协同增加。融合换填处理、复合地基、土工合成材料等加固技术，可以改良软土的承载能力、固结特性，减少沉降、差异变形的风险。工程实践中要强化结构设计以及施工控制的衔接，精进全过程监测及反馈机制，使设计参数可以动态修正和改良，然后增加路基结构的长期服役性能以及整体安全水平，为繁复软土地区交通基础设施建设给出可靠的技术支撑。

参考文献

[1] 张力.软土地区路基加固施工技术的应用与效果评估分析[J].运输经理世界,2026,(07):46-48.

[2] 高兵.高速公路非饱和软土地区路基沉降计算与预测[J].交通世界,2026,(Z2):117-119.

[3] 王楚文.深厚软土地区路基沉降分析与预测研究[D].导师：孙海霞;宋志强.沈阳工业大学,2025.

[4] 赵志会.水泥土搅拌桩技术在软土地区路基处理中的应用[J].四川水泥,2025,(05):252-254.

[5] 方军.岩溶软土地区路基加固及路面改造设计施工关键技术[J].建筑机械,2025,(03):174-179.