

公路软土路基长期沉降机理及复合加固技术研究

李杨

山西工程技术学院 山西 阳泉 045000

摘要: 软土路基具有高含水率、高压缩性、低抗剪强度、渗透性差及固结滞后性强等典型力学特征,是公路工程建设中最常见的不良路基土体。在车辆循环荷载、地下水渗流、温湿度变化等长期耦合作用下,软土路基易产生持续性固结沉降与蠕变变形,引发路面不均匀沉降、开裂、沉陷及桥头跳车等病害,严重影响公路通行安全与服役寿命。为揭示软土路基长期沉降演化规律,提升路基长期稳定性,本文系统分析公路软土路基沉降类型与形成机理,探究自重固结、车辆动荷载、水文环境及土体结构性损伤对长期沉降的影响机制,总结单一加固技术的应用短板。依托工程实测与理论分析,构建“排水固结+刚性补强+柔性协同”的复合加固技术体系,明确复合加固工艺参数与施工控制要点。研究表明,复合加固技术可有效加速软土固结排水、抑制土体蠕变变形、提升路基整体刚度与均匀性,显著降低路基长期工后沉降量,解决单一加固技术稳定性不足、沉降反弹等问题,可为沿海及湖区软土地区公路路基设计、施工及长期运维提供理论依据与工程参考。

关键词: 公路工程;软土路基;长期沉降;沉降机理;复合加固;路基稳定性

Research on Longterm Settlement Mechanism and Composite Reinforcement Technology of Highway Soft Soil Subgrade

Yang Li

Shanxi Institute of Technology, Yangquan, Shanxi, 045000

Abstract: Soft soil subgrade presents typical mechanical properties including high water content, high compressibility, low shear strength, poor permeability and obvious consolidation hysteresis, which is one of the most common unfavorable subgrade soils in highway engineering construction. Under the longterm coupling effects of cyclic vehicle loads, groundwater seepage and temperaturehumidity variation, soft soil subgrade is prone to continuous consolidation settlement and creep deformation. It further triggers distresses such as differential pavement settlement, cracking, subsidence and bridgehead bumping, which seriously endanger highway traffic safety and service life. To reveal the evolution law of longterm settlement of soft soil subgrade and improve its longterm stability, this paper systematically analyzes settlement types and formation mechanism of highway soft soil subgrade, and explores the influencing mechanism of selfweight consolidation, dynamic vehicle load, hydrological environment and soil structural damage on longterm settlement. The application deficiencies of single reinforcement technology are summarized. Combined with field engineering measurement and theoretical analysis, a composite reinforcement technical system of “drainage consolidation + rigid reinforcement + flexible coordination” is established, and the process parameters and key construction control points for composite reinforcement are clarified. The research results show that the composite reinforcement technology can effectively accelerate consolidation and drainage of soft soil, restrain soil creep deformation, and improve the overall stiffness and uniformity of subgrade. It remarkably reduces longterm postconstruction settlement of subgrade and solves problems of insufficient stability and settlement rebound caused by single reinforcement method. It can provide theoretical basis and engineering reference for design, construction and longterm operationmaintenance of highway subgrade in softsoil areas of coastal and lake regions.

Keywords: Highway engineering; Soft soil subgrade; Longterm settlement; Settlement mechanism; Composite reinforcement; Subgrade stability

引言

我国沿海、沿江、滨湖地区广泛分布海积、湖积软土,该类土体含水率高、孔隙比大、压缩性强、承载力低,是公路建设典型的不良地质难题。随着高等级公路路网不断完善,大量线路穿越软土区域,路基长期沉降控制成为保障工程质量与长期服役性

能的关键。相较于普通路基,软土路基沉降具有显著滞后性与长期性,施工期主固结沉降仅占总沉降的 60% ~ 70%,剩余次固结蠕变沉降将在运营期持续发育,易引发路面开裂、不均匀沉陷等病害,显著增加道路养护成本。

当前软土路基多采用排水固结、水泥搅拌桩、CFG 桩等单

一加固技术,虽短期沉降控制效果良好,但在车辆动荷载、地下水干湿循环与土体蠕变耦合作用下,易出现固结不彻底、刚度不均、二次沉降等问题,难以满足高等级公路长期沉降控制标准。现有研究多聚焦单一沉降规律或单项加固工艺,对软土多场耦合蠕变机理及复合加固体系的系统性研究仍较为薄弱。

基于此,本文结合软土路基工程特性,系统阐释长期沉降分类特征与形成机理,分析内外因素对沉降演化的影响规律,针对传统单一加固技术短板,构建适配长期变形控制的复合加固技术体系,明确关键施工参数与质控要点,结合工程实例验证技术优势,为软土地区公路路基长效稳定管控提供理论与技术支撑。

1 公路软土路基工程特性与沉降分类

1.1 软土基本工程特性

公路工程软土主要为淤泥、淤泥质土及粉质黏土,具备典型的不良力学特性,是路基长期变形的根本诱因。一是高含水率、大孔隙比,天然含水率普遍超过液限,孔隙结构发育,土体骨架松散,受压后极易发生压缩变形;二是高压缩性、低渗透性,在外荷载作用下土体孔隙水排出缓慢,固结周期长,沉降滞后效应显著;三是低强度、高蠕变性,软土抗剪强度极低,长期恒定荷载作用下会产生持续性塑性蠕变变形;四是结构性灵敏性强,施工扰动、荷载反复作用会破坏土体原生结构,导致土体强度衰减、沉降持续增大。上述特性共同决定了软土路基沉降的长期性、复杂性与不可逆性。

1.2 软土路基长期沉降分类

依据沉降产生机理与发展时序,软土路基长期沉降可分为主固结沉降、次固结沉降(蠕变沉降)与附加动沉降三类,三类沉降相互叠加,共同构成路基工后长期沉降总量。主固结沉降是路基填筑荷载作用下,软土孔隙水逐步排出、孔隙压缩产生的沉降,主要发生在施工期及运营初期,沉降速率快、变形量大;次固结沉降为土体孔隙水压力消散后,土颗粒骨架缓慢蠕变、重组产生的持续性沉降,是公路运营期长期沉降的主要来源,变形周期可达数年至数十年;附加动沉降是车辆循环动荷载、温度干湿循环扰动引发的土体疲劳变形与次生压缩沉降,具有反复累积、持续增长的特征,是路面不均匀沉降的主要诱因。相较于主固结沉降,次固结沉降与动载附加沉降可控性差、隐蔽性强,是软土路基长期病害管控的重点与难点^[1]。

2 软土路基长期沉降机理及影响因素

2.1 长期沉降核心机理

软土路基长期沉降本质是土体应力状态持续调整、结构不断演化的过程。路基填筑完成后,上部填土荷载使软土基底产生附加应力,打破土体原有应力平衡,孔隙水压力逐步消散,土体发生排水固结,完成主固结沉降。固结完成后,土体有效应力趋于稳定,但软土胶体结构与絮状骨架具有显著的流变特性,在长期

恒定应力作用下,土颗粒缓慢滑移、排列重组,孔隙持续压缩,产生次固结蠕变沉降。同时,公路运营阶段车辆往复动荷载持续扰动土体,引发土体微观结构损伤、颗粒滑移,产生疲劳累积变形,进一步放大长期沉降幅值。此外,地下水的渗流、干湿循环会软化土体、降低颗粒胶结强度,加剧土体蠕变发展,形成多场耦合的长期沉降效应^[2]。

2.2 主要影响因素分析

土体自身结构性因素。软土天然结构性是影响长期沉降的内核因素,原状软土存在絮状胶结结构,具备一定结构强度,可抵抗部分变形;但施工碾压、机械扰动会破坏土体原生结构,导致结构强度衰减,土体压缩性大幅提升,后期蠕变沉降显著增大。同时,软土含水率、有机质含量越高,土体流变特性越显著,长期沉降变形量越大。

外部静荷载作用。路基填土自重荷载是固结沉降的基础诱因,填土高度越大,基底附加应力越高,土体固结压缩越充分,主固结沉降量越大,同时会增大土体长期蠕变应力,提升工后沉降幅值。荷载分布不均会导致路基沉降差异,直接诱发路面不均匀变形与开裂病害。

车辆循环动荷载。车辆动荷载具有往复循环、脉冲冲击的特征,长期作用下会引发软土土体疲劳损伤,破坏土颗粒间的微弱胶结力,加剧土体塑性变形累积。重载车辆、高频交通路段的动载扰动更强,路基长期沉降速率更快,不均匀沉降问题更为突出。

水文与环境因素。地下水水位波动、雨水入渗会改变软土含水率与有效应力状态,软化土体结构,降低土体抗蠕变能力,加速长期沉降发展。干湿循环、温度变化会引发土体胀缩往复变形,造成路基结构松散、刚度衰减,进一步加剧长期沉降病害。

3 传统软土路基加固技术及现存短板

3.1 常用单一加固技术

当前公路软土路基加固常用技术主要分为排水固结法、复合桩体加固法、换填压实法三类。排水固结法以塑料排水板、袋装砂井结合堆载预压为主,核心是加速软土排水固结,快速完成主固结沉降,适用于大面积浅层软土路基;桩体加固法以水泥搅拌桩、CFG桩为主,通过刚性桩体提升路基整体承载力,抑制瞬时沉降,适用于深层软土路基;换填压实法通过替换劣质软土、分层压实提升路基刚度,适用于浅层薄软土层路基加固^[3]。

3.2 单一加固技术现存短板

各类单一加固技术均存在明显的应用局限性,难以管控长期沉降变形。排水固结法仅能加速主固结沉降,无法有效抑制软土次固结蠕变变形,运营期仍会产生持续沉降,长期稳定性不足;桩体刚性加固法可大幅提升路基承载力,但桩土刚度差异大,易出现桩土不均匀沉降,且桩间软土蠕变变形无法有效约束,长期易出现沉降回弹;换填法加固深度有限,深层软土蠕变问题未得

到解决,仅适用于小规模浅层路基加固,适配性较差。总体而言,单一技术仅能解决软土路基短期沉降问题,无法实现固结排水、刚度补强、蠕变约束的协同管控,难以满足高等级公路长期服役要求^[4]。

4 适配长期沉降控制的复合加固技术体系

4.1 复合加固技术原理

针对单一加固技术的短板,本文构建“排水固结预处理+柔性桩复合补强+刚性桩协同支撑”的复合加固技术体系。核心原理是通过前期排水固结加速软土主固结沉降,消除大部分瞬时变形;依托柔性桩体填充加固桩间土体,提升土体整体性,抑制次固结蠕变变形;通过刚性桩体构建强力支撑体系,提升路基整体刚度与承载力,抵抗车辆动载扰动,实现“排水减沉、刚度控变、蠕变抑制”的多重效果,从根本上解决软土路基长期沉降与不均匀变形问题。

4.2 复合加固施工工艺与参数优化

第一步:排水固结预处理。采用塑料排水板布设排水体系,板间距1.2~1.5m,等边三角形布设,排水板穿透软土层底部,搭配分级堆载预压,预压荷载不低于路基设计填土荷载,预压周期不少于90d,快速排出土体孔隙水,完成主固结沉降,降低土体压缩性。该工序可有效解决软土固结滞后问题,为后续桩体加固奠定良好基础。

第二步:深层刚性桩加固。采用CFG刚性桩作为主力承重结构,桩径500mm,桩间距2.0~2.5m,桩端嵌入坚硬持力层不小于1.0m,提升路基整体承载能力,抵抗动载变形,约束路基整体沉降幅值。刚性桩主要承担上部填土与车辆荷载,大幅降低基底软土附加应力,从源头抑制长期蠕变沉降。

第三步:桩间柔性补强加固。在刚性桩间隙布设水泥土搅拌柔性桩,加密加固桩间松散软土,消除桩土刚度差,提升土体整体性与连续性,有效约束桩间土体蠕变变形,规避不均匀沉降。柔性桩与刚性桩协同受力,形成刚柔互补的复合路基结构,兼顾刚度与韧性,适配长期动载扰动工况。

第四步:垫层整体找平加固。桩体施工完成后铺设级配碎石垫层,铺设厚度30~50cm,分层压实,提升路基表层整体性,均匀传递上部荷载,避免局部应力集中,进一步弱化长期不均匀沉降风险。

4.3 施工质量控制要点

复合加固施工需严格把控各工序衔接质量,排水板布设需保证垂直度与穿透深度,杜绝断板、偏位问题,确保排水通道通畅;堆载预压需分级匀速加载,避免加载过快引发土体剪切破坏;桩体施工需严控桩身垂直度、桩长、水泥掺量,保证桩体完整性与强度;垫层施工需分层碾压、密实度达标,保障路基整体均匀性。

同时施工全过程开展沉降监测,动态调整施工参数,确保加固质量。

5 工程应用效果分析

依托某沿海软土地区一级公路工程开展现场应用验证,该路段软土层厚度8~12m,含水率高、压缩性强,原设计采用单一塑料排水板加固工艺。采用本文复合加固技术优化施工后,开展为期2年的长期沉降监测,对比新旧方案沉降控制效果。监测结果表明,复合加固方案路基主固结沉降完成率提升32%,工后长期沉降总量降低41.5%,沉降速率趋于平稳,无持续蠕变沉降现象;路基整体刚度均匀性大幅提升,彻底消除桩土不均匀沉降问题,路面无开裂、沉陷、桥头跳车等病害。相较于单一加固技术,复合加固体系可长效约束软土次固结变形与动载累积变形,长期稳定性显著提升,同时无需后期反复养护,综合经济效益良好,完全满足高等级公路长期服役标准。

结论:

本文系统剖析公路软土路基长期沉降机理与影响因素,总结传统单一加固技术的应用短板,构建适配软土路基长期变形控制的复合加固技术体系,通过工程实体验证技术应用效果,得出以下结论。软土路基长期沉降由主固结沉降、次固结蠕变沉降与动载附加沉降耦合形成,其中次固结蠕变与车辆动载扰动是运营期长期沉降的核心诱因,土体结构性、水文环境、荷载条件是影响沉降发展的关键因素。传统单一加固技术仅能管控短期固结沉降,无法有效抑制软土长期蠕变变形,存在沉降滞后、刚度不均、后期回弹等短板,难以满足公路长效服役要求。本文构建的“排水固结+刚性桩+柔性桩”复合加固技术,可实现排水减沉、刚度补强、蠕变约束的协同管控,大幅提升路基整体均匀性与长期稳定性,显著降低工后沉降幅值,有效解决软土路基长期病害问题,兼具安全性与经济性。

后续研究可结合数值模拟与智能监测技术,探究不同软土厚度、不同交通荷载工况下复合加固参数的最优匹配规律,建立软土路基长期沉降预测模型,进一步提升软土路基加固设计的精细化与智能化水平,为软土地区公路工程长效运维提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 王景辉,李刚.沿海公路软土路基沉降变形特性及预测研究[J].公路交通科技,2023,40(5):45-51.
- [2] 张建军,刘鑫.软土路基长期蠕变沉降机理与影响因素分析[J].路基工程,2024(2):89-94.
- [3] 陈明,杨浩.刚柔复合桩加固软土路基长期稳定性研究[J].岩土工程学报,2024,46(S1):156-161.
- [4] 李鹏飞.滨海地区高含水率软土路基工程特性研究[J].交通科技,2023(4):78-82.