

重载交通作用下公路软土地基长期沉降控制技术与对策

李海华

江西同联建设工程有限公司 江西抚州 344000

摘要：重载交通的持续发展使公路软土地基面临更严峻的长期沉降挑战，直接威胁道路通行安全与使用寿命。本文围绕重载交通作用下公路软土地基长期沉降控制展开研究，首先剖析软土工程特性与沉降机理，明确重载荷载的长期作用效应及沉降影响因素；进而阐述以提高承载力、加速固结、减少工后沉降为核心的地基处理技术；最后从设计、施工、运营全周期提出沉降控制综合对策与过程管理方法，为提升重载交通公路工程质量提供理论与实践支撑。

关键词：重载交通；软土地基；长期沉降；地基处理

引言

公路作为物流运输的核心载体，在经济发展中发挥着关键作用。随着货运量持续增长，重载交通成为公路运输的主流形式，其对地基的荷载作用远超普通交通。软土地基具有含水率高、孔隙比大、承载力低等特点，在重载长期作用下易产生显著沉降，引发路面开裂、桥头跳车等病害。这些问题不仅增加道路维护成本、影响通行效率，更可能导致交通安全事故。在交通强国战略引领下，保障重载交通公路的安全稳定运行成为行业重点任务。深入研究软土地基长期沉降控制技术与对策，对于提升公路工程质量、延长使用寿命、降低运维成本具有重要现实意义，为软土地区重载公路建设提供可靠技术保障。

1 重载交通下软土地基沉降机理与特性

1.1 软土的工程特性与变形规律

软土是在静水或缓慢流水环境中沉积形成的特殊土类，其工程特性直接决定地基的变形能力与沉降潜力。软土的核心工程特性表现为高含水率，通常在30%至70%之间，部分淤泥质软土含水率可超过100%，导致土颗粒间连接力弱，整体结构松散。高孔隙比是软土的另一显著特征，孔隙比普遍大于1.0，土体内大量孔隙为沉降变形提供了空间。同时，软土的压缩性高、承载力低，压缩系数通常在0.5至2.0 MPa⁻¹之间，天然地基承载力多低于80 kPa，难以承受重载交通的长期荷载作用。

软土的变形规律呈现明显的时间依赖性，沉降过程可分为瞬时沉降、固结沉降与次固结沉降三个阶段。瞬时沉降在荷载施加瞬间发生，由土颗粒弹性变形引起，沉降量较小；

固结沉降是沉降的主要组成部分，随着荷载持续作用，土体内孔隙水逐渐排出，孔隙体积减小，地基产生缓慢沉降，这一过程可持续数月至数年；次固结沉降则在孔隙水压力消散后，由土颗粒重新排列、黏粒蠕变引起，沉降速率缓慢但持续时间长，对公路长期稳定性影响显著^[1]。

1.2 重载交通荷载对地基的长期作用效应

重载交通荷载与普通交通荷载相比，具有荷载量大、作用频次高、持续时间长的特点，其对软土地基的长期作用效应更为复杂。重载车辆的单轴荷载通常超过100 kN，部分特种运输车辆单轴荷载可达200 kN以上，这种高强度荷载会使地基内部产生较大的附加应力，应力影响深度远超普通荷载，可达10米至20米，涉及软土层的整个厚度范围。

长期作用下，重载荷载的反复施加会导致软土结构产生累积损伤。荷载作用时，土颗粒间的接触应力增大，原有结构连接被破坏；荷载卸除后，土颗粒无法完全恢复原位，形成残余变形。随着荷载作用频次增加，残余变形不断累积，导致地基沉降持续发展。同时，重载荷载的动荷载特性会加剧软土的液化风险，在车辆行驶产生的振动作用下，软土颗粒间的孔隙水压力瞬间升高，有效应力降低，地基承载力暂时下降，进一步促进沉降发生。

1.3 工后沉降的主要影响因素分析

软土地基工后沉降受多种因素综合影响，这些因素相互作用，共同决定沉降的总量与发展速率。地基土自身特性是基础因素，软土的含水率、孔隙比、黏粒含量直接影响其压缩性与固结速度，含水率越高、孔隙比越大，工后沉降量越大；黏粒含量越高，次固结沉降持续时间越长。地基处理

质量是关键因素,若地基处理不彻底,如加固深度不足、排水系统不完善,会导致软土固结不充分,遗留大量工后沉降。

重载交通参数对工后沉降的影响显著,荷载大小与作用频次直接决定沉降累积速度,荷载越大、通行车辆越多,沉降发展越快;车辆行驶速度则通过影响动荷载的作用时间与频率,改变地基的受力状态,低速行驶时车辆对地基的作用时间延长,会加剧局部沉降^[2]。

2 地基处理的核心控制技术

2.1 以提高地基承载力为主的加固技术

提高地基承载力是抵抗重载荷载、减少沉降的基础,核心是通过物理或化学方法增强软土的密实度与颗粒间连接力。换填法是常用的浅层加固技术,适用于软土层厚度小于3米的场景,通过将表层软土挖除,换填碎石、砂砾、灰土等强度高、渗透性好的材料,形成复合垫层。换填材料的颗粒级配需合理,确保压实后具有良好的承载能力与排水性能,能够有效扩散上部荷载,减少软土地基的附加应力。

深层搅拌法适用于深层软土加固,通过特制搅拌机械将水泥、石灰等固化剂与软土强制搅拌均匀,固化剂与软土发生一系列物理化学反应,形成具有一定强度的水泥土或石灰土桩体,与周围软土共同构成复合地基。该技术的关键在于控制搅拌均匀性与固化剂掺量,根据软土性质与承载力要求,固化剂掺量通常控制在10%至20%之间,确保桩体强度满足设计要求。高压喷射注浆法则通过高压射流将固化剂浆液注入软土,破坏原有土结构并与土颗粒混合,形成固结体,适用于处理淤泥、淤泥质土等各类软土,尤其对存在地下障碍物的复杂场地具有良好的适应性。

2.2 以加速地基固结为主的排水技术

加速软土地基固结是减少工后沉降的关键,核心是构建高效排水通道,促进土体内孔隙水快速排出,缩短固结时间。塑料排水板法是应用最广泛的排水技术,通过在软土地基中打设塑料排水板,形成垂直排水通道,结合地表砂垫层作为水平排水通道,构成完整的排水体系。塑料排水板具有排水能力强、质量轻、施工便捷等优点,其间距与打设深度需根据软土厚度、固结要求确定,通常间距控制在1.0米至2.0米之间,打设深度应穿透软土层至硬土层^[3]。

真空预压法通过在软土地基表面铺设密封膜,利用真空泵抽真空形成负压,加速土体内孔隙水排出,同时使地基产生预压固结,提高地基承载力。该技术适用于大面积软土

地基处理,尤其对环保要求高的区域,无需大量堆载材料,具有显著的经济与环境效益。真空预压的效果取决于密封膜的密封性与真空度的保持,施工中需严格控制密封膜的铺设质量,避免出现破损漏气现象,真空度通常需维持在80kPa以上。堆载预压法则通过在地基表面施加填土、砂石等堆载,利用堆载产生的附加应力促进孔隙水排出,可与塑料排水板法联合使用,形成堆载-排水联合固结体系,进一步提升固结效率。

2.3 以减少工后沉降为主的复合地基技术

复合地基技术通过在软土地基中设置增强体,与软土协同工作,显著提高地基整体承载能力,同时有效减少工后沉降,适用于重载交通等对沉降控制要求高的场景。碎石桩复合地基通过振动沉管或冲击成孔方式,将碎石填入软土中形成碎石桩,碎石桩具有良好的透水性与承载能力,既能加速软土固结,又能承担部分上部荷载,减少软土的应力负担。碎石桩的桩径与间距需根据软土性质与荷载要求设计,通常桩径为0.8米至1.2米,间距为3.0米至5.0米。

CFG桩即水泥粉煤灰碎石桩复合地基,由水泥、粉煤灰、碎石、砂等材料按一定比例混合搅拌成桩,具有强度高、变形小的特点。CFG桩与桩间土、褥垫层共同构成复合地基,能够有效传递并扩散重载荷载,大幅减少地基沉降。该技术的关键在于控制桩体材料配合比与施工质量,确保桩体强度均匀,避免出现断桩、缩颈等缺陷。对于地质条件复杂的软土地基,可采用多种增强体组合的复合地基形式,如碎石桩与CFG桩联合使用,兼顾排水固结与承载能力提升的双重效果,实现对工后沉降的精准控制^[4]。

3 沉降控制的综合对策与过程管理

3.1 设计阶段的沉降控制标准与方案优选

设计阶段是沉降控制的源头,需结合重载交通特点与软土工程特性,明确科学的沉降控制标准,优选经济可行的处理方案。沉降控制标准应根据公路等级、使用年限、重载荷载参数确定,对于高速公路、一级公路等重载交通主干道,工后沉降量通常控制在30厘米以内,桥头、涵洞等关键部位的沉降差需控制在5厘米以内,避免出现跳车现象。设计前需开展详细的地质勘察工作,通过钻探、原位测试等手段,全面掌握软土的分布范围、厚度、物理力学性质等信息,为设计提供精准依据。

方案优选需采用多方案比选的方法,综合考虑技术可

行性、经济合理性与环境影响。某重载公路项目途经软土分布区域，软土层厚度达8米至12米，设计阶段提出三种处理方案：CFG桩复合地基、塑料排水板+真空预压、碎石桩+堆载预压。通过对比分析，CFG桩方案虽处理效果好，但成本较高；塑料排水板+真空预压方案成本低，但处理周期长；碎石桩+堆载预压方案兼顾成本与周期，且能满足沉降控制要求。结合项目工期与预算需求，最终选择碎石桩+堆载预压方案，并优化碎石桩间距与堆载分级施加方式，确保处理效果。同时，设计中需考虑重载交通的长期作用，预留一定的沉降余量，避免后期沉降超出允许范围。

3.2 施工过程中的质量控制与动态调整

施工过程是沉降控制措施落实的关键环节，需建立严格的质量控制体系，同时根据现场监测数据进行动态调整，确保施工质量符合设计要求。地基处理施工前需进行试桩或试验段施工，确定最优施工参数，如深层搅拌法的搅拌速度、固化剂掺量，塑料排水板的打设深度与间距等。试桩结果需经检测合格后，方可大面积施工。施工中需加强对关键工序的质量管控，如碎石桩施工中控制成孔深度与碎石充盈系数，CFG桩施工中控制桩体材料搅拌时间与浇筑连续性，避免出现施工缺陷。

动态调整以现场监测数据为依据，建立包含沉降观测、孔隙水压力监测、地基承载力监测的综合监测体系。沉降观测通过布设沉降板，定期测量地基沉降量与沉降速率，当沉降速率超过预警值时，需减缓施工进度或增加排水措施；孔隙水压力监测通过埋设孔隙水压力计，掌握土体内孔隙水压力变化规律，指导堆载预压的分级施加，避免因荷载增加过快导致地基失稳。某重载公路软土地基处理项目中，施工初期发现部分区域沉降速率达到15毫米/天，远超5毫米/天的预警值，现场立即暂停堆载施加，增加塑料排水板数量，并调整堆载分级，将原来的三级堆载改为五级堆载，通过动态调整确保了地基稳定，最终沉降控制效果满足设计要求^[5]。

3.3 运营阶段的沉降监测与维护对策

运营阶段的沉降监测与维护是保障公路长期稳定的重要手段，需建立长期监测机制，及时发现沉降问题并采取针对性维护措施。运营阶段的监测频率应根据沉降发展情况确定，通车初期沉降速率较快，监测频率为每月1次至2次；沉降稳定后可适当降低频率，每季度1次至半年1次。监测

点应重点布设在桥头、涵洞、软土深厚区域等沉降敏感部位，同时覆盖全线路基，确保监测数据全面反映沉降分布情况。

根据监测数据制定差异化维护对策，对于沉降量较小且趋于稳定的区域，加强日常巡查，及时修复路面轻微破损；对于沉降量较大但仍在发展的区域，采取注浆加固措施，通过向地基土中注入水泥浆液，填充土体内孔隙，抑制沉降发展。此外，运营中需加强对重载车辆的管理，规范车辆载重与通行路线，避免超载车辆集中通行导致局部沉降加剧，同时定期对路面结构进行养护维修，提升路面承载能力与抗变形能力。

4 结语

重载交通作用下公路软土地基长期沉降控制是一项复杂的系统工程，涉及地质勘察、设计、施工、运营多个环节，需以软土沉降机理为基础，采用针对性的地基处理技术与全周期管理对策。软土的高含水率、高孔隙比特性与重载荷载的长期作用是沉降发生的核心原因；提高承载力、加速固结、减少工后沉降的三类地基处理技术，能够从不同角度控制沉降发展；设计阶段的方案优选、施工阶段的质量控制与动态调整、运营阶段的监测与维护，构成了沉降控制的完整体系。在重载交通持续发展的背景下，软土地基沉降控制技术需不断创新与优化，结合新型材料、信息化监测等技术，提升沉降控制的精准性与高效性。公路建设与运营单位应充分认识沉降控制的重要性，将沉降控制理念贯穿工程全生命周期，严格落实各项技术与管理措施。

参考文献：

- [1] 孙喜杰.路桥施工技术对软土地基的处理分析[J].汽车周刊, 2023(12):0118-0120.
- [2] 宣庐峻,付桂.海工重载场地软土地基加固设计与现场试验[J].水运工程, 2020(11):6.DOI:10.3969/j.issn.1002-4972.2020.11.028.
- [3] 李鑫.岩溶覆盖层土洞扩机理及对重载铁路路基稳定性的影响[D].北京交通大学, 2022.
- [4] 尹紫红,朱仁政.弹射冲击荷载下重载铁路路基动应力特征[J].中国铁道科学, 2020, 41(5):11.DOI:CNKI:SUN:ZGTK.0.2020-05-003.
- [5] 王新.软土地区交通重载下条形深基坑支护设计[J].城市道桥与防洪, 2022(12):244-247.