

高速公路软土路基处理施工技术研究

王晓博

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 针对高速公路软土路基沉降过大与失稳等病害,研究换填碾压、排水固结及化学加固三类处理技术。分析软土高压缩性、低强度等工程特征,明确沉降与稳定性控制指标。探讨换填材料选型、分层压实及质量验收方法;阐述竖向排水体布置、真空联合预压流程及固结度计算模型;研究水泥搅拌桩浆液配比、旋喷桩参数优化及排水固结与化学加固的协同效应。合理选用或组合不同处理技术,可有效控制工后沉降并提升路基长期稳定性。

关键词: 高速公路;软土路基;处理技术

引言: 高速公路软土路基因土体高压缩性与低强度特性,在荷载作用下易产生过大沉降及失稳破坏,严重制约道路运营安全与服务质量。换填碾压、排水固结及化学加固是当前主流处理技术,各类技术在适用条件、施工工艺与加固机理上各有差异。实际工程中单一技术往往难以同时满足沉降控制与承载力提升的双重要求,联合处理技术逐渐成为研究重点。围绕软土工程特征、病害成因及处理技术原理展开系统研究,对指导高速公路路基工程设计与施工具有重要意义。

1 高速公路软土路基处理技术基础理论

1.1 软土的工程地质特征与分类体系

软土通常指天然含水率高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低的细粒土体。其工程地质特征主要表现为透水性差、灵敏度高、触变性明显,在外部荷载作用下易产生较大沉降且固结过程缓慢。根据沉积环境与物理学指标的差异,软土可划分为海相沉积、湖相沉积、河滩沉积等类型,不同成因的软土层厚度与分布形态存在显著差异。在分类体系方面,依据液性指数、孔隙比及有机质含量等指标,将软土进一步区分为淤泥、淤泥质土、泥炭及泥炭质土等亚类。明确软土的类别与其基本物理力学属性,是开展路基处理设计的基础前提,也为后续稳定性分析与沉降控制提供关键参数依据。

1.2 软土路基的主要病害形态与成因机理

软土路基在行车荷载及填土自重作用下,常出现沉降过大、路基失稳、侧向挤出等典型病害形态。沉降过大主要表现为工后沉降超出允许范围,导致路面不平顺、桥头跳车等现象;路基失稳则体现为整体滑动或局部隆起,严重时可引发路基塌陷。这些病害的成因机理与软土的高压缩性、低强度及排水固结缓慢密切相关。当路堤填筑速率过快或填筑高度超过软基承载力时,地基中孔隙水压力无法及时消散,有效应力增长受限,土体抗剪强度

下降,从而诱发塑性流动破坏^[1]。地下水位变化、振动荷载作用及软土层分布不均匀,也会加剧差异沉降与变形集中。

1.3 软土路基处理的设计原则与技术评价指标

软土路基处理的设计应遵循安全适用、变形可控、经济合理的基本原则,重点控制工后沉降与整体稳定性。设计前需查明软土层分布、厚度及物理力学参数,根据路堤高度与荷载条件确定处理范围与深度。技术评价指标主要包括沉降控制指标、稳定性指标及固结时间指标。沉降控制指标涵盖总沉降量与工后沉降量,需满足路面平整度与结构衔接要求;稳定性指标通过安全系数评价路基在填筑及运营期间的抗滑能力;固结时间指标反映排水系统设计是否满足工期与沉降速率要求。

2 软土路基换填与碾压处理技术

2.1 浅层软土换填材料的选型与性能要求

浅层软土换填处理的核心在于选择适宜的换填材料,以替代原有软土层承受上部荷载并控制变形。常用换填材料包括粗粒土、砂砾料以及经过物理化学改良的细粒土。换填材料应具备较高的抗剪强度与内摩擦角,确保在静载与动载作用下不发生剪切破坏。同时材料需具有良好的透水性能,以加速地基排水固结,减小工后沉降量。材料内部不应含有泥块、植物根系及其他易腐烂或易溶蚀成分,避免在长期使用过程中产生体积收缩或强度衰减。级配优良的换填材料能够在压实后形成稳定的骨架结构,减少压缩变形并提高整体承载能力。材料的最大粒径应受到严格控制,过大颗粒会导致压实不均,进而影响路基的均匀性。换填材料的最佳含水率应处于便于机械压实的合理区间,含水率过高会造成压实后密实度不足,过低则难以形成有效的颗粒嵌锁。此外,材料还应具有足够的水稳定性,在干湿交替或地下水位上升条件下不出现崩解、软化或膨胀现象,从而保证换填层

长期保持密实且稳定的工作状态。

2.2 换填施工的分层铺设与压实工艺控制

换填施工采用分层铺设并结合逐层压实的工艺方法,其施工质量直接决定换填处理的成效。每层铺设厚度需要根据压实机具的功率和材料特性综合确定,厚度过大时底部区域难以获得足够的压实能量,厚度过小则会显著增加施工层数与作业时间。铺设作业开始前,应对下承层表面进行整平处理并进行初步压实,清除松软或不平整部位,确保新旧材料层之间接触均匀且无软弱夹层^[2]。材料摊铺过程中应严格控制每层厚度的均匀性,使用平地机或推土机将材料均匀分布,避免局部堆积或空缺。压实作业通常采用振动碾压方式,碾压速度、振动频率及碾压遍数应通过现场试验段进行验证后确定。碾压顺序宜从路基边缘向中心逐步推进,利用边缘土体提供侧向约束,防止材料向两侧挤出。每完成一层压实后应及时检测该层的压实度,检测合格后方可进行下一层材料的铺设。在压实过程中应动态监测材料的含水率,当含水率偏离最佳范围时,采取洒水增湿或翻晒降湿的调控措施。雨后或地下水位上升导致材料过湿时,应暂停施工并采取排水晾晒处理。

2.3 换填处理后的沉降监测与质量验收标准

换填处理施工完毕后,需要开展系统性的沉降监测工作,以评估换填层及其下卧土体在后续荷载作用下的变形响应。沉降监测点应沿路基纵向及横向按一定间距布设形成监测网络,重点布设于断面变化位置、填筑高度较大的区段以及地质条件复杂区域。监测点采用稳固的测点装置埋设于路基顶面或换填层界面上,确保其在长期观测过程中不发生松动或移位。监测频率按照沉降发展速率动态设定,换填完成后初期应加密观测,随着沉降速率减缓可逐步放宽观测间隔。沉降稳定判定的核心依据是在连续多个观测周期内累计沉降量低于规定限值,表明换填地基已达到变形收敛状态。质量验收工作主要包括压实度检验、换填厚度复核以及路基顶面回弹模量检测^[3]。压实度检测采用现场取样方法,按一定间距随机选取检测点,每层换填材料均应达到设计要求的密实度指标。换填厚度通过开挖探坑或采用物理探测手段进行测量,确认软弱土层已被有效置换至设计深度。路基顶面回弹模量采用承载板法或其他适用方法测定,其测定值应满足路面结构层对下承层刚度的要求。各项验收指标全部合格后,方可准许开展后续路面结构层的施工。

3 软土路基排水固结处理技术

3.1 竖向排水体的布置形式与施工工艺

竖向排水体是加速软土层排水固结的核心构件,通

过在软土中设置垂直排水通道,缩短排水路径,促进孔隙水压力快速消散。竖向排水体的布置形式主要采用等边三角形或正方形网格,两种布置方式均可形成均匀的排水网络。三角形布置具有更高的排水效率,适用于厚度较大且固结时间要求较紧的软土层;正方形布置便于施工放样与机具行走,适用于一般工况。排水体间距是影响固结速率的关键参数,间距越小则排水路径越短,固结越快,但工程投入相应增加。排水体打设深度应根据软土层厚度及下卧层透水条件确定,通常要求穿透主要压缩层并进入相对硬层或透水层。施工工艺方面,采用振动沉管或静压沉管方式将排水体送入预定深度,随后拔出套管并将排水体留置于软土中。施工过程中应控制套管的垂直度与打设速度,避免对周围土体产生过度扰动。排水体顶部应设置水平排水垫层,使各排水体协同工作,形成完整的排水系统。

3.2 堆载预压与真空联合预压的实施流程

堆载预压是在软土地基上逐级施加填土荷载,使地基在荷载作用下完成大部分沉降后再进行上部结构施工。实施流程包括铺设水平排水垫层、打设竖向排水体、分级堆载填土以及沉降与孔压监测。分级堆载需根据地基强度增长规律控制加载速率,每级荷载下待孔压消散达到稳定后再施加下一级荷载,确保地基不发生剪切破坏。真空联合预压是在堆载预压基础上增设密封膜与真空泵系统,通过抽真空在地基中形成负压,促使孔隙水向排水体汇聚并排出。实施时先在排水垫层上铺设密封膜,膜下布设抽真空管网,抽真空使膜下形成负压区。负压作用可等效为附加荷载,且不增加填土高度,适用于填土受限的区域。联合预压将堆载的正压作用与真空的负压作用叠加,大幅提高固结效率^[4]。施工过程中需严格控制密封系统的气密性,监测膜下真空度与孔压响应,确保预压效果达到设计要求。

3.3 固结度计算模型与工后沉降预测方法

固结度计算模型用于描述软土层在排水固结过程中平均固结程度随时间的变化规律。经典计算模型基于太沙基一维固结理论,将竖向排水体作用下的固结过程分解为竖向排水与径向排水两个分量,两者共同决定地基的整体固结速率。模型中引入排水体间距、排水体直径、扰动区渗透系数等参数,反映实际施工对土体结构的改变。计算时需区分瞬时加载与逐级加载两种工况,对逐级加载情形采用时间叠加原理处理。工后沉降预测是在预压卸载前评估软土层在运营期内可能发生的残余沉降量。预测方法依据现场监测数据反算固结参数,并结合拟采用的运营荷载条件进行推算。常用的预测手段包括

曲线拟合与数值分析两类,曲线拟合法利用沉降监测数据建立时间与沉降量的经验关系,外推获得最终沉降量;数值分析法通过求解固结方程获得沉降发展曲线。预测结果需与工后沉降允许值对比,若预测值超限则应延长预压时间或补充处理措施,确保高速公路长期运营的平整度与安全性。

4 软土路基化学加固与复合地基处理技术

4.1 水泥深层搅拌桩的浆液配比与成桩控制

水泥深层搅拌桩通过搅拌机械将水泥浆液与软土强制混合,利用水泥水化反应及离子交换作用使土体固化。浆液配比是决定桩体强度的核心因素,水泥掺入量需根据软土的天然含水率与有机质含量确定,含水率越高则所需水泥用量越大。水灰比控制浆液的流动性与可泵性,水灰比过小易造成管路堵塞,过大会降低桩体强度。为改善加固效果,可有限度添加外加剂调节浆液凝结时间与早期强度发展。成桩控制涉及钻头提升速度与搅拌转速两个关键参数,提升过快导致浆液混合不均,过慢则易产生过度扰动。搅拌时应采用多次复搅工艺,确保浆液与土体在空间上分布均匀^[5]。桩体垂直度与桩径需满足设计要求,钻机就位后应调整水平状态,施工过程中定时校验钻杆偏位情况。桩底应进入持力层一定深度,避免桩端悬吊于软弱层内。成桩后需进行取芯检测与无侧限抗压强度试验,验证桩身完整性及强度达标情况。

4.2 高压旋喷桩与注浆加固的施工参数优化

高压旋喷桩利用高压喷射流切割原状软土,注入水泥浆液并搅拌混合,形成直径较大的圆柱状加固体。喷射压力是决定切割半径与土体破碎程度的首要参数,压力过低无法有效破坏土体结构,压力过高则易引发地表冒浆。提升速度与旋转速度的匹配关系直接影响桩径大

小与桩体均匀性,提升过快会造成桩径缩颈,旋转过快则浆液分布不均匀。喷嘴直径与数量需根据设计桩径及地层条件合理选定,多喷嘴结构可提高施工效率。注浆加固是通过压力将浆液注入软土孔隙中,填充空隙并胶结土颗粒。注浆压力应控制在土体劈裂阈值以内,避免对周围环境产生扰动。浆液扩散半径与注浆量呈正相关,通过现场试验确定合理的单孔注浆量。注浆顺序宜采用跳孔间隔注浆,减少浆液串通现象。注浆结束后需进行钻孔取芯或波速测试,评估加固区域的密实程度与均匀性。

结束语: 针对高速公路软土路基的沉降与失稳问题,系统研究了换填碾压、排水固结及化学加固三类核心技术,并探讨了排水固结与化学加固联合处理的协同机制。软土的高压缩性与低强度特性决定了处理方案需综合考虑沉降控制与稳定性要求。换填碾压适用于浅层软土,排水固结可有效加速深部土体固结,化学加固则显著提升短期承载力,联合处理在深厚软基中展现出互补优势。合理选择并优化组合各项技术,可实现高速公路软土路基的安全、经济与长效运营。

参考文献:

- [1]付云.软土路基施工技术在高速公路施工中的应用[J].汽车周刊,2024,(08):124-126.
- [2]王晨.高速公路施工中的软土路基施工技术研究[J].四川建材,2024,50(07):180-181+184.
- [3]张东世.公路施工中软土路基的施工技术处理对策[J].四川建材,2024,50(06):155-157.
- [4]杨昊文.公路施工中的软土路基施工技术探究[J].工程建设与设计,2024,(09):203-205.
- [5]冯晓辉.汾石高速公路施工中路基土方开挖技术[J].黑龙江交通科技,2024,47(04):38-41.