

公路工程软土地基处理技术分析

曹鸣锋

桐乡市交通工程有限公司 浙江 嘉兴 314500

摘要: 公路工程中,软土地基因高含水量、低承载力等特性,易致路堤失稳、不均匀沉降等危害,影响工程安全与质量。本文阐述了软土地基的定义、工程特性及危害,详细介绍换填法、排水固结法、复合地基法、加筋法等常见处理技术,分析各技术适用范围与特点。同时,从施工质量控制、监测方法与内容、监测数据分析处理三方面提出质量控制与监测要点,最后探讨技术选择策略与经济性,为公路工程软土地基处理提供参考。

关键词: 公路工程;软土地基;处理技术

引言:在公路工程建设中,软土地基因其高含水量、低承载力、高压缩性等特性,成为影响工程安全与质量的重大隐患。若处理不当,易引发路堤失稳、不均匀沉降等问题,造成严重经济损失与社会影响,因此如何科学选择并有效实施软土地基处理技术,成为公路工程领域的关键课题。本文结合工程实践,系统分析常见处理技术,提出质量控制与监测要点,并探讨技术选择策略与经济性,为相关工程提供参考。

1 公路工程软土地基的特性与危害

1.1 软土地基的定义

在公路工程领域,软土地基通常指地表下一定深度范围内,由淤泥、淤泥质土、泥炭土或其他高压缩性土构成的地基,其定义需满足多项工程指标。根据《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》,软土天然含水量需大于液限,天然孔隙比大于1.0,压缩系数 a_{1-2} 大于 0.5MPa^{-1} ,承载能力特征值小于 80kPa 。这类地基多形成于第四纪后期静水或缓流水环境,在我国东南沿海等地分布集中。判定需结合地质勘察数据,通过标准贯入试验等手段确定土层性质,避免处理方案不当。准确界定是后续技术选择与施工基础,关乎建设成本与运营安全,工程实践要严格依规范开展勘察判定。

1.2 软土地基的工程特性

软土地基具有显著的工程特性,这些特性直接决定了其对公路工程的影响程度。首先是高含水量与高孔隙比,典型软土天然含水量可达35%~70%,孔隙比普遍在1.2~2.0之间,部分泥炭土孔隙比甚至超过2.5,导致土体密度低、结构松散。其次是低承载能力,软土地基承载能力特征值通常在 $40\text{--}80\text{kPa}$ 之间,远低于公路工程要求的 $120\text{--}150\text{kPa}$,无法直接承受路堤荷载。另外,软土地基还具有触变性与流变性,受振动或扰动后土体结构易破坏,强度急剧下降,且在长期荷载作用下会发生缓慢

的creep变形。这些特性相互作用,使软土地基成为公路工程中需重点处理的地质条件,施工前必须通过详细勘察明确其特性参数^[1]。

1.3 软土地基对公路工程的危害

软土地基处理不当,对公路工程危害大,贯穿建设运营周期。施工时路堤易失稳,边坡滑塌、路基开裂,未处理路段边坡滑塌率超30%,致工期延误、成本超支。通车后不均匀沉降突出,路面波浪起伏、纵向开裂,影响行车。沉降使结构物与路基衔接处错台,形成“桥头跳车”,加速路面车辆损耗。流变性致沉降长期持续,通车5年累计沉降或超 10cm ,养护成本增40%~60%。严重时路面破损、结构物损坏,迫使限速或封闭交通,损失巨大。

2 公路工程软土地基常见处理技术

2.1 换填法

换填法是处理浅层软土地基的常用技术,适用于软土厚度小于 3m 的路段,核心原理是将基础底面下一定深度的软土挖除,换填强度高、压缩性低的材料。常用换填材料包括碎石、卵石、级配砂石、灰土等,其中碎石换填应用最广,其承载能力可达 $200\text{--}300\text{kPa}$,压缩模量较软土提升5~8倍。施工时需严格控制挖除深度与范围,采用分层开挖方式,每层开挖厚度不超过 1.5m ,避免基坑边坡失稳。换填材料需分层压实,压实度需达到95%以上,大型压路机碾压次数不少于6遍,碾压速度控制在 $2\text{--}3\text{km/h}$ 。该技术优点是施工工艺简单、工期短、质量易控制,在乡村公路及低等级公路中应用率超过40%。缺点是处理深度有限,软土厚度超过 3m 时成本显著增加,且易产生弃土污染问题,施工中需结合环保要求合理处置挖除的软土。

2.2 排水固结法

排水固结法通过加速软土地基中水分排出,促进土

体固结,提高地基强度,适用于软土厚度5-15m、透水性差的淤泥质土路段。该技术主要包括堆载预压、真空预压及真空-堆载联合预压三种形式,其中真空预压因工期短、效果好应用日益广泛。施工时先在软土地基表面铺设砂垫层作为排水层,再插入塑料排水板,排水板间距通常为1.0-1.5m,深度直达硬土层。真空预压需维持膜下真空度不低于80kPa,预压时间根据软土厚度确定,一般为3-6个月,可使地基承载力提升2-3倍,沉降量减少60%-80%。堆载预压则通过分级施加荷载,避免地基失稳,每级荷载施加后需静置观测,待沉降稳定后再施加下一级^[2]。该技术缺点是预压周期较长,对工期紧张的工程适用性受限,且需做好排水系统保护,防止施工中排水通道堵塞。

2.3 复合地基法

复合地基法通过在软土地基中设置增强体,与土体共同承担荷载,形成复合地基,适用于软土厚度3-10m的中深层处理。常见形式包括碎石桩、水泥土搅拌桩、粉喷桩及CFG桩等,其中水泥土搅拌桩在高速公路建设中应用率超过50%。水泥土搅拌桩采用深层搅拌机械将水泥浆与软土强制搅拌,形成直径50-60cm的桩体,桩间距1.2-1.8m,水泥掺量为软土质量的10%-15%,28天无侧限抗压强度可达1.5-2.5MPa。CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩)则适用于承载力要求较高的路段,桩体强度可达5-10MPa,复合地基承载能力特征值可提升至150-250kPa。施工中需控制桩身垂直度偏差不超过1%,桩长偏差不大于50cm,确保增强体与土体协同工作。该技术优点是处理效果稳定、适用范围广,缺点是施工机械投入大,对施工工艺控制要求高,需加强桩身质量检测。

2.4 加筋法

加筋法通过在软土地基中铺设筋材,利用筋材的抗拉强度约束土体变形,提高地基稳定性,适用于软土表层处理及路堤边坡加固。常用筋材包括土工格栅、土工布、土工格室等,其中双向土工格栅因抗拉强度高(可达50-100kN/m)、耐久性好应用最广。施工时先平整软土地基表面,铺设第一层土工格栅,格栅搭接宽度不小于20cm,采用U型钉固定,再填筑填料,填料需分层压实,压实度不低于96%。筋材铺设层数根据软土厚度与路堤高度确定,一般为2-4层,层间距0.8-1.2m。该技术可使路堤边坡稳定性提升30%-50%,有效减少路基沉降与侧向位移,在软土地区公路路堤建设中应用率逐年提高。优点是施工便捷、工期短、成本适中,缺点是筋材易受紫外线老化影响,施工中需避免长时间暴露,且需确保筋材与填料紧密结合。

2.5 其他处理方法

除上述常用技术外,公路工程软土地基处理还有夯实法、灌浆法、冻结法等特殊方法,适用于特定地质与工程条件。夯实法包括强夯法与重锤夯实法,强夯法通过8-30t重锤从8-20m高度落下,对地基进行强力夯实,适用于软土厚度较薄、下伏硬土层较浅的路段,可使地基承载力提升1.5-2倍,但施工振动大,不适用于临近建筑物的区域。灌浆法通过向软土地基注入水泥浆、化学浆液等,填充土体孔隙,胶结土体颗粒,适用于处理岩溶地区或存在空洞的软土地基,灌浆压力一般控制在0.3-0.8MPa,确保浆液均匀扩散^[3]。冻结法通过人工制冷使软土冻结成坚硬土体,适用于含水量极高的软土或水下软土地基,冻结温度需控制在-10℃以下,形成的冻结壁强度可达2-5MPa,但成本高、工期长,仅在特殊工程中应用。这些方法需根据工程实际综合选用,实现技术经济性统一。

3 公路工程软土地基处理技术的质量控制与监测

3.1 施工质量控制要点

软土地基处理施工质量控制必须全方位、全流程地严格把控,其中材料质量、施工工艺以及关键参数管控是核心要点。在材料质量方面,换填所使用的碎石,粒径应精准控制在20-50mm范围内,且含泥量不得超过5%;水泥土搅拌桩采用的水泥,必须选用P.O42.5级及以上,水泥进场后,要立即开展强度与安定性检测。施工工艺控制上,换填法要严格把控分层开挖与压实厚度,每层压实后,都要进行压实度检测,若不合格,坚决不得开展下一道工序;排水固结法要确保塑料排水板插入深度与间距严格符合设计要求,真空膜密封要严密不漏气。关键参数管控方面,水泥土搅拌桩要重点关注水泥掺量与搅拌均匀性,采用注浆量与喷浆压力双重控制手段,以保障桩身质量;加筋法要严格控制土工格栅搭接宽度与固定质量,防止施工中出现移位。此外,施工前务必进行工艺性试验,以此确定最佳施工参数,如压路机碾压速度、搅拌桩提升速度等。施工中严格执行“三检制”,隐蔽工程必须经监理验收合格后,方可进行后续施工。

3.2 监测方法与内容

软土地基处理监测对于评估处理效果、保障施工安全起着关键作用。监测方法需依据工程类型与处理技术灵活选择,监测内容广泛涵盖变形、受力及环境等多个方面。变形监测包含沉降监测与水平位移监测,沉降监测采用沉降板与水准仪,沉降板布设间距为50-100m,每3-7天观测一次;水平位移监测使用测斜仪与位移计,布设在路堤边坡及坡脚处,监测频率与沉降监测相同。受

力监测主要针对复合地基与加筋地基,通过土压力盒监测地基反力,利用钢筋应力计监测筋材拉力,监测数据实时传输至监控中心。环境监测包括周边土体沉降与地下水位监测,防止施工对周边环境产生不良影响。真空预压工程需额外监测膜下真空度,采用真空表每24小时观测一次;堆载预压要监测荷载施加速率与地基沉降速率,当沉降速率超过10mm/d时,需暂停加载。同时,要做好监测点保护措施,避免施工损坏,确保数据连续可靠。

3.3 监测数据的分析与处理

监测数据的分析与处理必须严格遵循科学性、及时性原则,以此为施工调整与质量评估提供坚实依据。数据处理时,首先要进行异常值剔除,运用 3σ 准则判断异常数据,剔除后对有效数据进行平滑处理,消除观测误差。沉降数据需绘制沉降-时间曲线,通过曲线形态判断地基固结阶段,当连续30天沉降速率小于0.5mm/d时,可判定地基基本固结稳定。水平位移数据要分析位移变化趋势,当水平位移速率超过5mm/d时,需及时预警,并采取放缓施工进度、增设加固措施等应对方案。复合地基监测数据要计算复合地基承载力与桩土应力比,验证处理效果是否满足设计要求,若桩土应力比偏离10-20的合理范围,需调整桩体间距或材料配比。监测数据需每周形成分析报告,及时反馈给设计与施工单位。当数据出现突变时,要立即组织专项分析,查找原因并制定整改措施,确保软土地基处理质量始终处于可控状态。

4 公路工程软土地基处理技术的选择策略与经济性分析

4.1 技术选择策略

公路工程软土地基处理技术选择需综合考量地质条件、工程要求、环境影响等多方面因素。地质条件是首要依据,若软土厚度小于3m,优先采用换填法,其工艺简单、成本可控;对于5-15m的软土,排水固结法能有效加速固结;中深层软土(3-10m)则适合复合地基法。工程要求方面,高速公路等高等级公路对承载力与沉降控制要求高,多采用水泥土搅拌桩等复合地基技术;低

等级公路可灵活选择换填法或加筋法。环境影响也不容忽视,临近建筑物的路段应避免强夯法等振动大的技术,以免对周边环境造成破坏^[4]。

4.2 经济性分析

不同处理技术的成本构成与效益存在差异。换填法成本主要源于挖除软土、运输弃土与购置换填材料,在浅层软土处理中经济性突出,但软土厚度增加时成本急剧上升。排水固结法成本集中在排水系统铺设与预压时间成本,虽预压周期较长,但材料成本较低,整体经济性良好。复合地基法施工机械投入大,但处理效果稳定,长期养护成本低,适用于对质量要求高的工程。加筋法材料与施工成本适中,施工便捷,在中低等级公路中经济性优势明显。在技术选择时,需进行全生命周期成本分析,权衡初期投资与后期养护费用,实现经济效益最大化。

结束语

公路工程软土地基处理至关重要,关乎工程的安全、质量与经济效益。处理技术多样,需依据地质条件、工程要求和环境影响等因素合理选择。施工时,要严格把控质量,做好监测工作,依据数据及时调整施工。经济性分析也不可或缺,通过全生命周期成本分析,实现经济效益最大化。未来,随着技术发展,软土地基处理技术将更完善,为公路工程建设提供更有利支撑,推动行业持续进步。

参考文献

- [1]张伟,李明,王强.公路软土地基处理技术及效果评价研究[J].公路工程,2024,49(03):123-128+134.
- [2]刘洋,陈浩,赵宇.软土地基处理技术在公路工程中的应用对比分析[J].交通科技与经济,2023,25(05):65-70.
- [3]陈小桃,贺清娇.公路工程施工中的软土地基处理技术分析[J].中国设备工程,2020(23):225-226.
- [4]潘开磊.公路软土地基加固及施工方法研究[J].智慧城市,2020,6(20):90-91.