

高速公路工程施工中软基处理关键技术分析

吕涛¹ 李林²

1. 山东省高速养护集团有限公司 山东 济南 250000

2. 山东高速交通建设集团有限公司 山东 济南 250000

摘要: 高速公路建设中,软基处理是关键环节。软土具有高含水量、高孔隙比、低抗剪强度等特性,易引发路基沉降、边坡失稳等问题。本文阐述软基特性、工程影响及风险预判,介绍勘察检测技术,分析排水固结法、复合地基法、强夯法、加筋法等关键技术,探讨施工材料、工艺质量控制及成品保护与验收要点。通过系统研究,为高速公路软基处理提供科学依据,保障工程质量与运营安全。

关键词: 高速公路;软基处理;勘察检测;关键技术;质量控制

引言:高速公路作为交通网络的重要组成部分,对区域经济发展和人员流动意义重大。软土地基是高速公路施工中常见的特殊地基类型,其独特的物理力学性质给工程建设带来诸多挑战,如路基沉降、边坡失稳等,严重影响工程质量与运营安全。因此,深入研究高速公路软基处理关键技术,准确把握软基特性,合理选择处理方案,加强施工过程质量控制,对于保障高速公路建设质量、提高运营效益具有重要的现实意义。

1 高速公路软基特性、工程影响及风险预判

1.1 软基的物理力学特性

软土作为高速公路工程中常见的特殊地基类型,具备独特的物理力学性质。这类土体含水量普遍偏高,通常处于接近或超过液限的状态,导致土颗粒间被大量自由水填充,土体呈现流塑至软塑状态^[1]。孔隙比是衡量软土密实程度的关键指标,数值往往大于1.0,部分区域甚至超过2.0,反映出土体内部存在大量连通孔隙。这种高孔隙结构直接导致软土具有显著的压缩性,在荷载作用下易产生持续沉降,且沉降量随时间增长呈现非线性变化特征。抗剪强度指标方面,软土的黏聚力与内摩擦角均处于较低水平,黏聚力通常小于20kPa,内摩擦角多在 5° ~ 15° 范围内波动,导致土体在剪切应力作用下极易发生破坏。渗透性作为影响固结速率的核心参数,软土的渗透系数普遍低于 10^{-7} cm/s量级,这种极低的渗透性使得孔隙水压力消散过程异常缓慢,进而延长了地基固结沉降的时间。

1.2 软基对高速公路工程的不利影响

软土地基的特殊性质对高速公路建设构成多重挑战。路基沉降问题尤为突出,在车辆荷载与自重共同作用下,软土层持续压缩导致路面标高逐渐降低,严重影响行车舒适性与安全性。不均匀沉降现象更为复杂,不同位置土体

压缩量的差异会引发路面开裂、错台等结构性损伤,破坏路面整体性。桥头区域因台背填土与桥台刚度差异,易形成阶梯状沉降,导致车辆通过时产生跳跃式冲击,即桥头跳车现象。边坡稳定性方面,软土抗剪强度不足的特性使边坡在重力作用下易发生滑动破坏,特别是侧向变形引发的滑塌事故,常伴随土体沿潜在滑动面整体位移。降雨等外部因素会进一步恶化边坡稳定性,雨水渗入增加土体重度,降低抗剪强度参数,同时提高孔隙水压力,形成恶性循环,显著提升边坡失稳风险。

1.3 软基工程风险预判与防控要点

基于软基的物理力学特性及对工程的不利影响,需建立针对性的风险预判机制,为后续勘察设计与施工环节提供防控方向。风险预判核心在于结合区域地质背景,识别软基分布的隐蔽性风险,如局部软土夹层、透镜体等非均匀分布形态可能引发的突发沉降或边坡失稳隐患。防控要点应聚焦于前期风险规避与施工过程风险管控的衔接,明确需重点监控的风险指标,包括土体含水量动态变化、孔隙水压力累积速率、边坡侧向位移增量等。同时,需界定风险预判与后续勘察检测的协同关系,通过预判明确勘察重点区域与检测关键指标,确保勘察资源精准投放,为软基处理方案的科学性提供前置保障。

2 软基处理前的勘察与检测技术

2.1 地质勘察技术

钻探取样是获取软基详细信息的基础手段。通过机械钻进穿透软土层,可精准确定软基的平面分布范围与垂直延伸深度,为后续处理方案提供空间定位依据^[2]。取出的土样经室内试验分析,能获取含水量、孔隙比、压缩系数等关键物理力学参数,揭示软土的工程特性。原位测试技术则直接在现场土体中进行试验,避免取样扰动对结果的影响。静力触探试验利用静压力将探头压入

土中,通过记录探头阻力变化划分土层并估算地基承载力;圆锥动力触探试验通过锤击方式使探头贯入土体,根据贯入击数判断土层密实度与强度;标准贯入试验采用标准重量的落锤自由下落击打贯入器,以贯入30cm的击数评价土的力学性质,尤其适用于砂土、粉土等粗粒土层的勘察。

2.2 检测技术

地基承载力检测是评估软基处理效果的直接指标。平板载荷试验通过在现场铺设刚性承压板并逐级加载,观测土体变形与荷载关系曲线,可确定地基极限承载力与变形模量,为设计提供可靠依据。沉降观测是监控软基处理过程的关键环节,沉降板法通过埋设于地基中的沉降板,定期测量高程变化,反映地基整体沉降趋势;剖面沉降仪法利用磁性环与沉降仪配合,可连续监测不同深度土层的分层沉降量,揭示沉降的空间分布规律。孔隙水压力监测对分析软土固结过程至关重要,孔隙水压力计埋设于土体内部,实时记录孔隙水压力随时间的变化数据,结合有效应力原理,可计算土体固结度与沉降速率,为施工参数调整提供科学支撑。这些技术手段相互补充,共同构建起软基处理前的完整勘察检测体系。

3 软基处理关键技术

3.1 排水固结法

排水固结法通过构建排水通道加速软基中孔隙水排出,促使土体固结沉降,提升地基承载力。该技术核心在于排水系统与加压系统协同作用。排水系统设置兼顾水平与垂直排水。水平排水层通常用中粗砂铺设成砂垫层,厚度控制在0.5至1.0米,确保排水路径畅通,且砂料级配良好以防堵塞。垂直排水依赖塑料排水板,借助打设机将带状排水体垂直插入土中,板间距依土层渗透性确定,一般在1.0至1.5米,对于渗透性差的黏性土层需适当加密。加压系统选择结合工程条件,堆载预压通过分层填筑土石料施加荷载,荷载大小要超过设计荷载1.1倍,填筑速率与排水能力匹配。真空预压通过铺设密封膜并抽真空形成负压,真空度维持在80kPa以上,定期检查密封性。真空-堆载联合预压结合二者优势,可显著缩短预压周期,适用于深厚软土层处理。

3.2 复合地基法

水泥搅拌桩以水泥为固化剂,用深层搅拌机械将水泥浆与软土强制混合,形成具水稳定性和强度的桩体^[3]。施工时严格控制定位精度,偏差不得超过5厘米,定位误差大会使桩体分布不均。预搅下沉阶段保持匀速,避免扰动土体,下沉速度过快易破坏土体结构。水泥浆制备按设计配比掺入外加剂提升早期强度,外加剂种类依土质

特性选择。提升喷浆阶段控制喷浆压力与搅拌速度,确保水泥土充分混合,压力不足会使浆液分布不均。重复上下搅拌消除桩体内部缺陷,提升均匀性,搅拌次数依桩长和土质确定。碎石桩通过振动或冲击成孔后填筑碎石形成桩体,成孔方法有振动沉管法与冲击成孔法。振动沉管法利用高频振动使套管沉入土中,适用于黏性土层,但要控制振动频率防止土体液化。冲击成孔法通过重锤冲击破碎土体,适用于砂砾石层,注意成孔垂直度。填料阶段分层填筑,每层厚度控制在0.3至0.5米,通过振密工艺使碎石紧密排列,形成具较高摩擦角的桩体,振密次数依碎石级配和密实度要求确定。

3.3 强夯法

强夯法是一种极为有效的地基处理技术,它巧妙地利用重锤自由落体产生的强大冲击能来改造地基,从而增强地基的承载能力与稳定性。此方法尤其适用于处理砂土、粉土及杂填土等非饱和土层,能显著改善这些土层的工程性质。夯击能的选择需依据土层深度与性质来确定,单击夯击能通常控制在800至6000kN·m,对于深厚软土层,则需采用较大夯击能以达理想加固效果。夯击点布置呈正方形或梅花形,间距取夯锤直径的1.5至2.5倍,间距小能量重叠,间距大影响加固范围。夯击遍数依设计要求分2至4遍,每遍间隔时间保证孔隙水压力消散,黏性土层间隔时间不少于2周,砂性土层可缩短至3至5天,间隔时间不足易致土体液化。施工过程实时监测夯沉量与隆起量,确保加固效果满足设计标准,夯沉量大可能表明土体未充分固结,隆起量异常需检查夯击能或土层均匀性,从而及时调整施工参数。

3.4 加筋法

加筋法是提升地基性能的又一重要手段,其中土工格栅通过出色的抗拉作用,能够显著提升地基的整体稳定性。在铺设土工格栅时,需依据受力方向精确定主受力方向,以确保其抗拉效能充分发挥。横向铺设层数依设计承载力要求确定,一般不少于2层,若层数不足,则抗拉能力难以满足需求。填土压实工艺与格栅铺设需紧密配合进行,采用轻型压路机进行碾压,既能有效压实填土,又能防止格栅位移或破损,确保压实度达到设计要求。此外,土工织物也通过过滤、排水与加筋功能,有效改善软基性质。作为反滤层时,需保证织物孔径小于被保护土颗粒直径,以防止土体流失;作为加筋垫层时,则与砂石垫层复合使用,通过织物与土体的摩擦作用限制侧向变形,提升地基抗剪强度,复合厚度同样需依设计承载力来确定。

4 软基处理施工过程中的质量控制

4.1 施工材料质量控制

原材料质量是软基处理效果的基础保障^[4]。水泥作为复合地基法与注浆加固的关键材料,需满足强度等级要求,进场检验抗压强度、初凝时间等指标,严禁使用受潮结块或过期水泥,受潮水泥固化效果降低,过期水泥影响强度发展。碎石用于碎石桩施工时,粒径控制在20至50毫米,含泥量不超过3%,级配符合连续级配要求,确保桩体密实度,含泥量高降低桩体摩擦角。土工合成材料质量检验涵盖物理与力学性能,土工格栅抗拉强度达设计值1.2倍以上,延伸率控制在10%以内,抗拉强度不足加筋效果失效。土工织物等效孔径小于被保护土颗粒直径的0.3倍,垂直渗透系数满足排水要求,孔径大或渗透系数不足影响过滤和排水功能。所有材料进场后依规抽样复验,合格后投入使用,复验项目覆盖关键指标。

4.2 施工工艺质量控制

施工参数控制是保障处理效果的核心环节。排水固结法中,塑料排水板打设深度穿透软土层进入持力层,板间距依土层渗透性确定,黏性土层取1.0至1.2米,砂性土层放宽至1.5米,打设深度不足影响排水效果。预压荷载分阶段施加,堆载预压每层填筑厚度不超过0.8米,真空预压维持80kPa以上真空度持续90天以上,填筑过快或真空度不足致固结不充分。复合地基法中,水泥搅拌桩桩长穿透软土层进入硬壳层,桩径控制在0.5至0.8米,桩间距依单桩承载力计算确定,一般取1.2至1.5倍桩径,桩长不足或桩径小降低承载力。碎石桩桩径宜为0.8至1.2米,桩间距取2.5至3.5倍桩径,成孔后及时填筑碎石并振密,振密不足致桩体松散。强夯法施工时,夯击能依土层深度选择,单击能控制在1000至5000kN·m,夯击点间距取夯锤直径的2倍,夯击遍数依设计要求分3至4遍,每遍间隔时间依孔隙水压力监测确定,参数控制不当影响加固深度和均匀性。施工过程实时监测夯沉量、排水量等参数,发现异常立即调整,确保处理效果符合设计要求。

4.3 成品保护与验收

软基处理完成后采取针对性保护措施。排水固结区

设置临时排水沟,避免地表水浸泡,浸泡致孔隙水压力回升,影响固结效果。复合地基区域限制重型机械通行,防止桩体破坏,重型机械通行可能致桩体断裂或倾斜。强夯区覆盖防尘网,减少扬尘污染,保护周边环境。验收标准严格执行规范要求,排水固结法以最终沉降量与沉降速率双控,设计允许工后沉降量满足道路使用要求,沉降量超标影响结构安全。复合地基通过静载试验检验单桩承载力,特征值达设计值1.1倍,承载力不足致地基失稳^[5]。强夯区采用标准贯入试验检测加固深度,锤击数较处理前提高3倍以上,锤击数不足表明加固效果未达标。验收方法包括资料审查、现场检测与监测数据分析,所有检测项目合格率达100%方可通过验收,资料审查核对施工记录和检测报告,现场检测覆盖关键部位,监测数据分析处理效果随时间变化规律。

结束语

高速公路软基处理需综合考量地质条件、工程需求与经济性,通过科学勘察精准识别软基分布与特性,合理选择排水固结、复合地基、强夯或加筋等技术,并严格把控材料质量、施工参数及成品保护。验收环节需结合沉降监测、承载力试验等数据综合评判,确保处理效果满足设计要求。只有将技术措施与质量管理贯穿全过程,才能有效提升软基稳定性,为高速公路长期安全运营奠定坚实基础。

参考文献

- [1]费载德,李广华.高速公路工程施工中软基处理关键技术[J].运输经理世界,2023(33):22-24.
- [2]付晓彤,沙运斌.高速公路工程施工中软基处理关键技术分析[J].中州建设,2024(6):35-37.
- [3]何斌.高速公路路基施工中软土地基处理技术应用分析[J].工程技术研究,2025,7(10):31-33.
- [4]杨和海.高速公路路基施工中软土地基处理技术应用分析[J].建筑与施工,2025,4(14):195-196.
- [5]张祯.路基软基处理技术在高速公路施工中的应用[J].工程技术研究,2025,10(2):62-64.