

高填方路基稳定性分析及施工控制关键技术研究

雒国锋

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 随着我国交通基础设施建设向复杂地形区域不断延伸,高填方路基工程日益增多。高填方路基因填筑高度大、荷载重、沉降与变形显著,其稳定性问题成为制约工程质量与安全的关键因素。本文系统梳理了高填方路基失稳的主要类型与成因,深入探讨了基于极限平衡理论、有限元数值模拟及可靠度分析的稳定性评价方法,并重点研究了包括地基处理优化、分层填筑与压实控制、边坡防护与排水系统设计、动态监测与信息化施工在内的施工控制关键技术。通过工程实例验证,表明综合运用上述技术可有效提升高填方路基的整体稳定性与长期服役性能。研究成果对类似工程的设计与施工具有重要的理论指导与实践参考价值。

关键词: 高填方路基;稳定性分析;极限平衡法;施工控制;动态监测

引言

近年来,随着国家“交通强国”战略的深入推进,高速公路、高速铁路等重大交通基础设施项目不断向山区、丘陵、软土地区等复杂地质环境拓展。在这些区域,为满足线路平纵线形要求、减少桥隧比例、降低工程造价,常采用高填方路基方案。一般而言,填方高度超过20米的路基被定义为高填方路基(部分规范界定为18米或25米)。此类路基具有填筑体量大、自重荷载高、应力传递路径复杂等特点,极易引发不均匀沉降、边坡滑塌、侧向位移过大等稳定性问题,严重威胁行车安全与工程耐久性。高填方路基的稳定性不仅取决于填料性质、边坡几何形态等自身因素,更受到地基承载力、地下水活动、降雨侵蚀、地震荷载等外部环境条件的显著影响。一旦发生失稳破坏,往往造成重大经济损失和不良社会影响。因此,如何科学、准确地评估高填方路基的稳定性,并在施工全过程中实施有效的控制措施,是岩土工程领域亟待解决的核心课题。

1 高填方路基失稳机理与主要模式

1.1 整体圆弧滑动

这是最常见且最具破坏性的失稳模式,尤其在均质土质边坡或软弱地基上更为突出。在重力作用下,潜在滑动面通常呈圆弧形,从坡脚附近开始,向上延伸至坡顶后方一定距离。该模式的发生与边坡高度、坡率、填料内摩擦角和粘聚力、地下水位等因素密切相关^[1]。当安全系数低于临界值(通常为1.2~1.5)时,边坡将发生整体失稳。

1.2 地基承载力不足导致的失稳

当地基土层为软弱土(如淤泥、淤泥质土、松散砂土等)时,其承载力远低于高填方路基施加的巨大附加

应力。这会导致地基发生过大沉降、侧向挤出甚至剪切破坏,进而牵连上部路基结构产生开裂、倾斜乃至整体滑移。此类失稳往往伴随着显著的工后沉降,严重影响路面平整度与使用功能。

1.3 局部坍塌与冲刷破坏

在降雨或地表水作用下,若路基边坡缺乏有效的防护与排水措施,雨水会渗入坡体,一方面增加土体自重,另一方面降低土体的有效应力和抗剪强度。同时,水流对坡面的直接冲刷会掏空坡脚,形成局部悬空,最终导致小范围的坍塌。这种破坏虽规模较小,但若不及时处理,可能诱发更大范围的连锁反应。

1.4 动力荷载下的液化或震陷

在地震活跃区,高填方路基可能遭受地震动的影响。对于饱和砂土或粉土地基,在地震作用下可能发生液化,丧失承载能力;而对于结构性较强的填土,则可能出现震陷,即在震动下发生不可逆的体积压缩。这两种现象都会严重削弱路基的整体稳定性。

2 高填方路基稳定性分析方法

2.1 极限平衡法

极限平衡法作为传统且广泛应用的边坡稳定性分析手段,其核心在于假定一个潜在滑动面形状(如圆弧或折线),并在静力平衡条件下计算维持边坡稳定所需的最小抗滑力与实际提供的抗滑力之比,即安全系数。该方法历经百年发展,形成了多种成熟算法,如忽略条间作用力的瑞典条分法、考虑条间法向力的Bishop简化法、适用于任意滑面的Janbu通用条分法,以及精度最高的Morgenstern-Price法。这些方法各有优劣:瑞典法计算简便但结果偏保守;Bishop法在圆弧滑动面分析中精度较高;而Morgenstern-Price法则通过引入条间力函数,能更

真实反映土条间的相互作用,适用于复杂工况。尽管极限平衡法概念清晰、计算效率高、易于工程人员理解和应用,但其本质仍是一种静力学近似方法,依赖于预设滑动面,无法反映土体真实的应力-应变关系,也难以处理材料非均质性、复杂边界条件及施工过程中的时序效应,因此在高填方等复杂工程中需谨慎使用或与其他方法结合。

2.2 数值模拟法

随着计算力学与计算机技术的飞速发展,以有限元法为代表的数值模拟方法已成为高填方路基稳定性分析的重要工具。该方法能够基于连续介质力学原理,建立包含真实几何形态、材料分区及边界条件的三维或二维模型,并引入Mohr-Coulomb、Drucker-Prager等非线性本构模型,精确模拟土体在加载过程中的应力、应变与位移演化规律^[2]。尤为重要的是,结合强度折减法(SRM),数值模拟能够自动搜索最危险滑动面并计算对应的安全系数,无需人为预设滑动形态。强度折减法的基本思路是将土体的抗剪强度参数(粘聚力 c 和内摩擦角 φ)同步除以一个折减系数 F ,逐步增大 F 直至计算模型出现塑性贯通区或不收敛,此时的 F 值即为边坡的安全系数。该方法物理意义明确,能真实反映破坏过程,克服了极限平衡法的诸多局限,尤其适用于高填方路基这类具有复杂应力路径和非线性响应的工程问题。然而,其计算成本较高,对建模精度和参数选取依赖性强,需结合现场试验数据进行校准。

2.3 可靠度分析法

传统的确定性分析方法将土体力学参数视为固定值,忽略了岩土材料固有的空间变异性、测试误差及模型不确定性。可靠度分析法则将 c 、 φ 、重度 γ 等关键参数视为随机变量,利用概率统计理论计算边坡失效概率(Pf)或可靠指标(β),从而实现对边坡风险的量化评估。常用的方法包括一次二阶矩法(FOSM)、蒙特卡洛模拟(MCS)及响应面法(RSM)等。其中,蒙特卡洛模拟通过大量随机抽样计算失效样本比例,结果最为准确但计算量巨大;FOSM则通过泰勒展开近似求解,效率高但精度受限。可靠度分析不仅能够揭示边坡安全储备的真实分布特征,还能为风险管理、保险定价及维护决策提供科学依据,代表了高填方路基稳定性评价从“是否安全”向“有多安全”的范式转变,是未来智能化、精细化岩土工程的重要发展方向。

3 高填方路基施工控制关键技术

3.1 地基处理优化技术

针对不同地质条件,需因地制宜选择适宜的地基处

理方案。对于浅层软弱土,换填法是一种经济有效的手段,即将软土挖除后回填级配良好、透水性强的砂砾或碎石,形成承载力较高的持力层。对于深层松散土体,强夯法则通过重锤自由落体产生的高能量冲击波,使土颗粒重新排列密实,显著提高地基承载力与抗液化能力。而在深厚软土地区,单一处理方法往往难以奏效,此时CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩)复合地基技术展现出显著优势:通过在软土中设置具有一定刚度的桩体,形成桩-土共同承担荷载的复合体系,不仅能大幅提高地基承载力,还能有效控制差异沉降^[3]。此外,对于工期允许的项目,真空预压或堆载预压结合塑料排水板的组合工艺,可通过加速软土固结排水,显著减小工后沉降。无论采用何种方案,均需通过现场载荷试验、静力触探等手段验证处理效果,并根据监测数据动态调整设计参数,确保地基处理达到预期目标。

3.2 分层填筑与压实控制技术

必须严格遵循“分层填筑、分层压实”的基本原则。每层松铺厚度应根据压实机械的性能合理控制,通常不超过30厘米,过厚会导致下层压实不足,形成薄弱夹层。填料的选择至关重要,应优先选用级配良好、CBR值高、水稳定性强的粗粒土;对于细粒土,可通过掺加石灰、水泥等无机结合料进行改良,提升其强度与抗水损害能力。压实过程中,含水率是影响压实效果的关键因素,必须将其控制在最优含水率 $\pm 2\%$ 的范围内,过高则形成“弹簧土”,过低则难以压实。压实度的检测应贯穿施工全过程,可采用灌砂法、核子密度仪或先进的无核密度仪进行实时监控,确保每一填筑层均达到设计要求的压实标准(通常不低于95%)。此外,施工组织应避免雨季作业,或在雨天来临前完成临时覆盖与排水措施,防止已填筑层被雨水浸泡软化,影响整体质量。

3.3 边坡防护与排水系统设计

构建“防、排、截、疏”一体化的综合防护与排水体系。坡面防护不仅要兼顾美观,更要具备良好的抗冲刷与固土能力。对于中低边坡,可采用植草、三维植被网等生态防护形式;对于高陡边坡,则需结合拱形骨架、浆砌片石护面墙甚至锚杆(索)框架梁等结构措施进行加固,以增强整体稳定性。地表排水系统应在坡顶设置截水沟,拦截山坡汇水,防止其直接冲刷坡面;在分级平台处设置平台沟,引导坡面径流有序下泄;坡脚则需设置排水沟,汇集边沟水并引离路基。地下排水同样不可忽视,应在边坡体内合理布设仰斜式排水孔、渗沟或盲沟,主动降低地下水位,消散孔隙水压力,从根本上削弱水对边坡稳定的不利影响。此外,在路床顶部铺设

土工膜等防渗层,可有效阻隔路面雨水下渗,形成多重防水屏障。

3.4 动态监测与信息化施工

实施全过程动态监测是实现信息化施工、及时预警与科学决策的关键。监测内容应覆盖沉降、水平位移、孔隙水压力及土压力等多个维度:在路基中心、两侧及代表性断面布设沉降板,实时掌握总沉降量及沉降速率;在坡脚、坡面及地基深层埋设测斜管,监测侧向位移发展趋势;在软土地基中安装孔压计,跟踪超孔隙水压力的消散过程;在关键受力部位布置土压力盒,验证设计荷载分布。监测频率应根据施工阶段动态调整,填筑高峰期加密至每日或每周一次,进入稳定期后可逐步延长^[4]。更重要的是,需建立科学的预警机制,设定如日沉降速率大于5毫米/天、累计位移超过设计允许值等阈值,一旦超限立即停工分析,并采取反压护道、卸载、增设排水等应急措施。借助BIM+GIS平台集成多源监测数据,可实现施工过程的可视化、智能化管理,真正实现“动态设计、动态施工”的现代工程理念。

4 工程实例分析

4.1 工程概况

某高速公路K25+300~K26+100段穿越丘陵沟谷区,最大填方高度达32米,属典型高填方路段。地基上部为3~5米厚粉质黏土,下伏10~15米厚淤泥质土,承载力低,压缩性高。区域年降雨量大,地质灾害风险高。

4.2 稳定性分析与设计

针对该工程的复杂地质条件,设计团队首先采用GeoStudio软件进行稳定性验算。初始方案采用自然放坡(1:1.75)且未处理地基,经极限平衡法(Morgenstern-Price)与强度折减有限元法联合分析,得出最小安全系数仅为1.05,远低于规范要求的1.35,存在严重失稳风险。为此,优化方案综合采用了多项技术措施:地基采用CFG桩复合地基处理,桩长15米,桩间距1.8米,以提高承载力并控制沉降;路基边坡采用分级放坡形式(1:1.75主坡+2米宽平台+1:2.0二级坡),降低单级高度;坡面采用

拱形骨架内植草进行生态防护;同时设置完善的截水沟、平台沟、排水沟及仰斜排水孔组成的综合排水系统;并在关键位置预埋沉降板、测斜管和孔压计用于施工期监测。优化后复核显示,最危险滑动面安全系数提升至1.42,满足规范及安全储备要求。

4.3 施工控制与监测结果

施工过程中,项目严格执行分层填筑(松铺厚度25厘米)、压实度不低于96%的质量控制标准,并避开雨季集中填筑。动态监测数据显示,路基最大累计沉降量为28厘米,沉降速率在填筑完成后3个月内逐渐趋于稳定,日沉降量小于1毫米;坡脚最大水平位移仅为15毫米,远低于30毫米的预警阈值;孔隙水压力在预压期结束后基本完全消散,表明地基固结效果良好。

5 结语

本文针对高填方路基稳定性,进行机理分析、评价方法与施工控制技术探讨,得出:高填方路基失稳模式多样,需针对具体工程精准识别;稳定性分析应多方法融合,极限平衡法用于初步设计,有限元强度折减法反映更真实状态,可靠度分析为风险量化提供新思路;施工控制是核心,要构建四位一体全过程控制体系,重视地基处理等环节。信息化施工是未来方向,可提升安全性与经济性。未来可聚焦复杂环境下长期性能演化规律、基于机器学习的边坡稳定性智能预测与预警模型,以及绿色低碳型填料应用技术。高填方路基安全稳定意义重大,需坚持理论创新与实践结合。

参考文献

- [1]曾文.公路高填方路基施工稳定性分析[J].交通世界,2025,(22):110-112.
- [2]张楠.高填方路基稳定性分析与填筑施工技术研究[J].交通世界,2025,(Z1):176-178.
- [3]王坤明,刘再宝,陈永亮.高填方路基稳定性分析及防护措施研究[J].运输经理世界,2024,(13):19-21.
- [4]石磊,王传军,窦创战.高速公路高填方路基施工及稳定性分析[J].山西建筑,2025,51(08):112-115.