

高填方路基边坡雨季渗流现象与稳定性关系研究

李诗吟

湖北交投建设集团有限公司 湖北 武汉 430070

【摘要】：高填方路基边坡在雨季的稳定性与渗流现象密切相关。降雨入渗会改变土体水力特性、降低土体强度，从而显著增加边坡失稳风险。本文研究了渗流条件下水力和土力相互作用机制，分析了不同渗流状况对稳定性的影响。研究表明，采用非饱和-饱和渗流理论与稳定性动态耦合的数值模型进行设计，并结合坡体立体排水与坡面柔性防护措施，可有效提升路基稳定性。研究成果为相关工程的设计与防护提供了理论依据和实践参考，但其结论基于典型工况，在土质空间变异性显著或遭遇超标准极端降雨时，适用性仍需进一步验证。

【关键词】：高填方路基；边坡稳定性；渗流现象；非饱和土；孔隙水压力；雨季；土体强度

DOI:10.12417/2811-0528.26.06.024

高填方路基雨季稳定性是工程关键课题。强降雨引发渗流改变土体水力特性，降低强度，增加滑坡风险。当前工程虽采用排水等措施，但在非饱和渗流精细化模拟、气候适应性设计和智能预警方面仍显不足。现有规范对非饱和区基质吸力丧失及降雨入渗动态耦合效应的考虑尚不充分。工程决策需兼顾技术机理与工程成本、环保要求、施工周期及政策法规等社会经济因素。理想的渗流防护方案应置于技术可行性、经济合理性与环境可持续性相融合的综合决策框架中比选优化，同时需重视不同土质对降雨响应的差异，发展分类与差异化处治策略。

1 渗流现象对高填方路基边坡稳定性的影响机制

高填方路基边坡的稳定性受多种因素的影响，其中渗流现象是一个至关重要的因素。在雨季，由于大量降水的影响，土体内部的水流分布发生变化，水分通过土体的渗透作用，改变了土体的水力特性。渗流水的压力和土体的水合作用相互作用，可能导致边坡土体的强度下降，进而引发边坡失稳。渗流水在土体中的迁移会引起孔隙水压力的变化，尤其是在高填方路基的边坡部位，水流的积聚可能导致局部水头的升高。这种升高通过产生渗透力（或体积力）和降低滑动面的有效正应力直接影响稳定性。虽然不存在普适的破坏阈值，但可通过建立安全系数与孔隙水压力（或基质吸力）的定量关系，确定特定工程场地的临界警戒值^[1]。

水流的渗透作用使得土体的剪切强度降低，尤其在多孔性较强的土层中，渗流作用会加剧土体的塑性变形，导致土体内部发生位移。这一过程对饱和土而言主要遵循有效应力原理，渗流停止并充分排水后，强度可部分恢复；但对非饱和土，雨水入渗导致的基质吸力丧失是强度衰减的主因，此过程具有显著的非可逆性。

长期渗流会逐步改变土体孔隙结构，导致土粒滑动、物理性质改变和凝聚力破坏，使边坡承载力下降。这种微观结构损

伤是粘聚力等参数缓慢衰减的量变过程，但可能在极端降雨等扰动下诱发整体失稳的质变。通过监测孔隙水压力和深部位移可对其预警。

2 渗流条件下的边坡稳定性分析与评估方法

在渗流条件下，边坡稳定性评估需综合土体力学与力学特性。渗流会改变孔隙水压力、削弱抗剪强度并引发变形。分析方法需结合渗流理论与土体力学，常采用基于水力传导方程的渗流模型，模拟降水入渗过程，确定水分分布与孔隙水压力场，从而识别潜在薄弱区域，为稳定性评价提供关键依据。边坡稳定性评估需要将渗流条件下的孔隙水压力与土体的抗剪强度进行结合。常见的分析方法包括极限平衡法和数值分析法。对于高填方路基这类复杂工况，极限平衡法（如 Bishop 法、Janbu 法）概念清晰、计算高效，适用于多方案比选，但其难以反映真实的应力-应变关系和复杂的渗流路径。数值分析法（如有限元 FEA、有限差分 FDM）则能精细模拟非稳态渗流过程、应力-应变场及其动态耦合，是深入研究与最终设计验证的关键工具。工程中常二者结合，优势互补^[2]。

通过数值模拟，分析人员可以针对不同的降水条件和渗流速率，评估边坡的响应特征，进一步预测可能发生的滑坡或其他失稳现象。结合渗流模型和边坡稳定性分析，可以评估在不同渗流条件下，土体的变形和应力状态，进而得到边坡失稳的临界条件。在实际应用中，渗流对边坡稳定性的影响不仅仅体现在静态水力学分析上，还需要考虑动态因素，如降水强度变化、土体的流变特性以及外部负荷的变化。

渗流作用下边坡稳定性评估具有动态复杂性。为全面评估极端降雨等风险，需超越单一安全系数，引入考虑土体参数空间变异性的可靠性或概率风险评估方法。模型准确性关键在于获取精确的渗透系数、抗剪强度等参数，这依赖于钻孔取样、原位测试（如 CPTU）与室内试验的综合应用，并结合参数敏

感性分析与反演分析以处理不确定性。通过建立典型数值模型，模拟不同降雨下渗流与稳定的耦合过程，可直观揭示孔隙水压力演变、滑移面形成及安全系数变化，从而验证方法、对比防护措施，并将理论机制转化为具工程指导价值的设计参数。

引导渗透水流流出边坡，防止水分积聚导致的孔隙水压力增大。在实践中，需通过渗流数值模拟对排水系统的布置方案（如间距、深度、角度）进行优化，以实现疏导效果与工程成本的最佳平衡。同时，必须考虑其长期服役性能，设计时需预留检查清淤通道，并探索采用抗淤堵材料或可监测的智能排水系统。

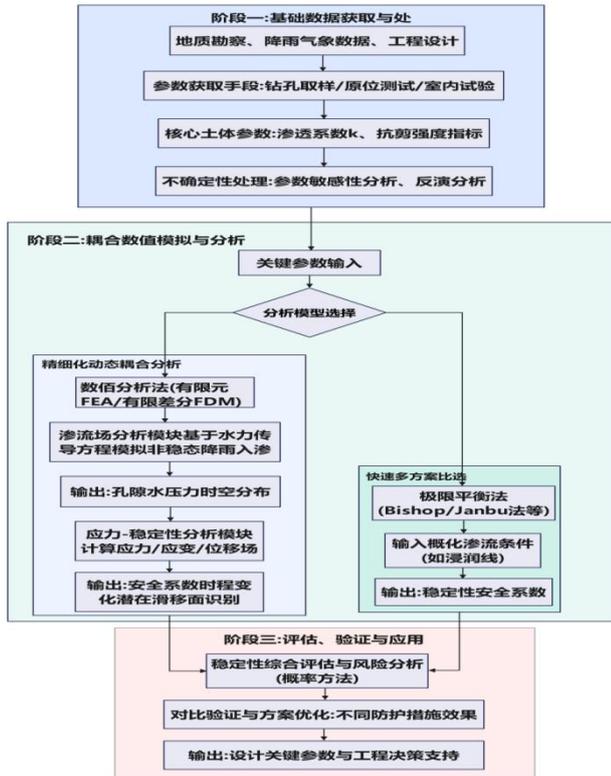


图1 渗流条件下高填方路基边坡稳定性评估方法图

3 渗流防护措施与边坡稳定性的提升策略

渗流防护措施是提高高填方路基边坡稳定性的关键手段。为有效应对渗流引起的边坡失稳问题，必须采取综合性的防护策略，既要考虑水流的疏导，也要增强土体的抗渗能力，以减少水流对土体强度的负面影响。通过设置排水系统，可以有效减少边坡内的水压力^[3]。排水孔、排水管和透水层等设施能够

加强边坡土体的抗渗能力是提升边坡稳定性的另一重要手段。可以通过采用防渗膜或粘土衬垫等材料，形成有效的防水屏障，防止降水渗透到边坡内部。对边坡进行加固处理，增加边坡的抗滑能力，也是提高稳定性的有效措施。通过施加锚固桩、土钉墙或滑坡带加固，可以有效减少边坡在渗流作用下的滑移风险^[4]。

在渗流防护的过程中，还可以采取植被恢复或绿化措施，通过种植深根系植物，增强边坡的土壤结构稳定性^[5]。需科学评估植被的净效应：虽然根系可能创造新的渗流优势通道，但其蒸腾排水、根系加筋及冠层截留的正面效益通常更为显著。关键在于选择适生植物并合理配置，以最大化其固土与水文调节功能。通过上述渗流防护措施的综合应用，可以显著提升高填方路基边坡的抗渗性能和稳定性，减少因渗流现象引起的土体破坏和边坡失稳的风险。所有防护措施的实施效果，应通过布设渗压、位移等监测设备进行验证，并纳入“设计-施工-监测-反馈-优化”的闭环工程管理流程，以实现动态设计与全生命周期性能保障。

4 结语

本成果聚焦高填方路基雨季工况，系统整合渗流理论与稳定性分析方法。创新点在于揭示非饱和-饱和渗流动态过程与边坡稳定的耦合机制，阐明水力驱动、力学弱化与结构损伤的协同演进规律，提出基于动态耦合数值模型与立体排水、柔性防护的综合设计理念。这为传统依赖静态经验的边坡工程提供了精细化分析框架。面对极端降雨频发趋势，需加强非稳态渗流耦合分析，发展智能监测预警与生物岩土技术，并将气候预测纳入风险评估体系。

参考文献:

[1] 陈兴吉.公路高填方路基变形特性影响因素研究[J].中国新技术新产品,2025,(22):93-95.
 [2] 李勤任.高填方路基边坡稳定性评估加固设计[J].科技视界,2024,14(36):106-109.
 [3] 张长轩,陈亮辉,赵刚刚,等.基于强度折减法的高填方路基边坡稳定性分析[J].甘肃水利水电技术,2024,60(06):41-43+56.
 [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.
 [5] 刘凯.强降雨条件下填方路基边坡稳定性分析[J].交通世界,2023,(14):14-16+19.