

超大型边坡地下径流组织方式对失稳触发条件的主控机理研究

韩涤清

河南省地质局地质灾害防治中心, 河南 郑州 450012

DOI:10.61369/ETQM.2026010028

摘要 : 超大型边坡由于其庞大的规模和复杂的地质环境, 容易受到地下水流动的影响, 导致失稳。本文研究了超大型边坡地下径流的组织方式对失稳触发条件的主控机理, 分析了地下水对边坡稳定性的作用机制。通过对不同地下水流动模式的模拟与分析, 揭示了地下水的分布、流速及其与岩土介质的相互作用对边坡失稳的影响。研究表明, 地下水流方式不仅影响边坡的渗透性与应力状态, 还在一定条件下引发失稳现象。结果为超大型边坡的稳定性评估提供了新的思路和方法, 对工程设计及风险评估具有重要意义。

关键词 : 超大型边坡; 地下径流; 失稳触发; 水流特征; 稳定性分析

Study on The Main Control Mechanism of Instability Triggering Condition of Underground Runoff Organization Mode of Super Large Slope

Han Diqing

Geological Disaster Prevention and Control Center, Henan Provincial Geological Bureau, Zhengzhou, Henan 450012

Abstract : Super large slopes, due to their massive scale and complex geological environments, are susceptible to instability triggered by groundwater flow. This study investigates the primary mechanism of instability triggering conditions influenced by underground runoff organization patterns in super large slopes, analyzing the interaction mechanisms between groundwater flow and slope stability. Through simulations and analyses of different groundwater flow patterns, the research reveals how groundwater distribution, flow velocity, and their interactions with rock-soil media affect slope instability. The findings demonstrate that groundwater flow patterns not only influence slope permeability and stress states but may also induce instability under specific conditions. These results provide new approaches and methodologies for stability assessment of super large slopes, offering significant implications for engineering design and risk evaluation.

Keywords : super large slope; underground runoff; instability trigger; flow characteristics; stability analysis

引言

超大型边坡常见于复杂的地质环境中, 承载着重要的工程功能和生态价值。边坡稳定性一直是地质灾害研究的核心内容, 而地下水流动的影响因素往往被忽视。地下水在边坡内的流动模式和流速, 直接关系到其稳定性状态。特别是在大规模边坡工程中, 地下水流对边坡稳定性可能产生极为复杂的作用。因此, 如何合理分析地下水流动的组织方式, 并深入探讨其对边坡失稳的主控机理, 成为亟待解决的关键问题。通过对地下水流动特征及其与边坡相互作用的深入研究, 可以为未来边坡工程的安全设计提供有力支持。

一、超大型边坡地下径流的流动特性分析

由于边坡规模庞大, 地下水流动的特点较为复杂, 呈现出不同于小型边坡的多变性和不确定性。不同的地质结构、土壤类型和水文条件, 使得地下水的流动呈现出不均匀的分布, 这种不均

匀性在一定程度上增加了地下水与边坡土体之间的相互作用强度。地下水的流动方向、速度和分布方式, 都在影响边坡稳定性的过程中起到了至关重要的作用。尤其是在大规模的边坡上, 地下水流动的路径不仅受地质结构的限制, 还受外界降水、地表水和地下水的相互关系影响。^[1-4]

作者简介: 韩涤清 (1997.02-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 地质水工环。

在超大型边坡中，地下水的流动往往不是单一的线性流动。水流的组织方式更加复杂，可能呈现出层流、湍流或不规则流动。不同的地下水流动模式对边坡的影响各异。层流通常表现为地下水沿着较为规则的流动通道向下渗透，可能导致边坡稳定性逐渐下降。而湍流则可能在局部区域产生强烈的冲刷作用，改变土体结构和孔隙分布，进而提高了失稳的风险。非均质的地质条件使得地下水流动表现出更加复杂的特征，例如局部区域可能出现地下水流动速率急剧增大的现象，这种变化可能在某些条件下引发突发性失稳。^[5-8]

水流的渗透性和边坡土体的结构性密切相关。当地下水流动经过某些土体层时，若渗透性较差的土层阻止水流的进一步扩展，水流会在上层或下层堆积，造成应力集中，进而引发滑坡或其他失稳现象。水流与土体间的相互作用也会影响边坡的孔隙水压力分布，进而影响土体的强度特性。地下水的渗透作用不仅会改变土体的力学特性，还可能通过水化反应影响土体的稳定性。^[9]

二、地下水与边坡稳定性的相互作用机制

在超大型边坡中，地下水不仅在流动过程中改变了土体的应力分布，还通过渗透作用对土体的结构、强度和刚度产生了深远影响。地下水的渗透性、流速和压力分布直接影响边坡内部应力场的变化，进而可能导致滑坡、崩塌等灾害性事件的发生。水流与土体的相互作用首先体现在孔隙水压力的变化上。当地下水流动穿越不同土层时，由于土体的渗透性差异，水流的速度和路径会发生改变，局部地区可能出现较高的孔隙水压力。这些局部压力的积累会在边坡的某些关键部位形成应力集中，降低土体的抗剪强度，甚至引发滑移。特别是在上层土壤饱和的情况下，孔隙水压力显著增加，会削弱土体的剪切强度，使得边坡容易发生失稳。^[10]

水流在土体中的传播也影响了边坡土体的水力传导性。水流的导水性、流向和流速与土层的孔隙结构、土体的孔隙率及水分的含量密切相关。较大的水流速度可能带来土体的侵蚀效应，局部区域的水流可能对土层的稳定性造成破坏，进而导致土层的崩塌或变形。水流的非均匀性也导致了地下水流动过程中出现水流路径的错综复杂，这种流动的不规则性加剧了边坡失稳的风险。在地下水作用下，边坡的土体水化反应也发挥着重要作用。水流中的溶解物质可能与土体中的矿物发生反应，导致土体结构的变化，进而改变其力学特性。这种水化作用不仅改变了土层的刚度，还可能导致土体的膨胀或收缩，进一步影响边坡的稳定性。

三、失稳触发条件的关键因素及其分析

在超大型边坡中，多个因素的相互作用可能引发失稳现象。地下水的流动特性是影响边坡失稳的重要因素，尤其是水流的速度、路径及其与土体的相互作用。在不同的地质和水文条件下，地下水的路径可能产生较大的变化，这些变化在特定条件下可能导致土体的抗剪强度下降，进而引发失稳。地下水渗透与孔隙

水压力的增加在失稳触发中起着关键作用。当水流通过边坡土层时，由于土体的非均质性，地下水在某些区域积聚并导致孔隙水压力显著升高。孔隙水压力的上升会使得土体的有效应力减少，进而降低其抗剪强度，特别是在饱和条件下，水流的侵蚀作用和水力压降效应会加剧这一过程。这种压力积累会在边坡内部形成弱面，土体在外部扰动或应力变化的作用下可能发生滑移或崩塌。随着水流不断渗透和积聚，失稳的可能性逐渐增大。

边坡的地质条件和土体特性也是决定失稳触发的关键因素之一。土体的粒径分布、土层结构以及土壤的含水率都会影响水流的渗透性和边坡的稳定性。岩层的分布和破碎带的存在会使得地下水流动路径发生偏移，进而改变水流的流速和压力分布。如果水流集中于某一破碎带或低渗透层中，可能导致局部地区的水压急剧增加，从而在应力作用下触发边坡失稳。土体中的有机质含量、矿物成分以及土壤的塑性也决定了边坡的稳定性。低塑性土体在水流渗透作用下容易发生流变性变化，导致边坡的变形和滑动。

外部因素，特别是降水量、地震或人为扰动等，也可能是失稳触发的关键因素。在极端降水条件下，地下水位的快速上升可以迅速改变边坡的稳定状态，尤其是在雨季或暴雨后，边坡的水分饱和度增大，导致土体失去部分支撑力，进一步降低边坡的稳定性。地震或其他动态加载也可能引发已存在的地下水压力或裂隙中的水流加剧，造成潜在的失稳。而人为因素，如开挖、填埋或水利工程建设，也可能改变地下水的原始模式，进一步加剧边坡失稳的风险。综合考虑地下水流动、土体特性、外部环境因素等，失稳触发条件的分析不仅依赖于静态的水文地质条件，还要关注动态因素的影响。在实际工程应用中，对这些因素的精准评估有助于识别潜在的失稳风险，并采取有效的加固措施以避免灾害发生。

四、地下水对超大型边坡失稳的影响模式

地下水对超大型边坡失稳的影响模式十分复杂，涵盖了水流的流动机制、土体与水流的相互作用以及水流在土体内的分布特征。地下水在边坡中的流动不仅直接影响土体的力学性质，还通过改变土体孔隙水压力、应力状态和渗透特性，促进了边坡稳定性变化。在超大型边坡中，地下水流动方式多种多样，其对边坡稳定性的影响模式也因此呈现出不同的特征。在超大型边坡中，地下水的渗透作用通常首先表现为土体内部孔隙水压力的变化。当水流进入土体时，水压通过渗透作用逐渐积累，这种孔隙水压力的增加降低了土体的有效应力，从而使得土体的抗剪强度减弱。在饱和条件下，孔隙水压力的增高特别容易导致边坡内部的土体产生滑动或变形，形成潜在的失稳面。水流的侵蚀作用进一步加剧了土体的结构破坏，尤其是在存在裂隙或不均质层的土体中，地下水可以通过裂隙系统加速土体的侵蚀，削弱土体的整体稳定性。

不同类型的地下水流动模式也会对边坡稳定性产生不同程度的影响。层流状态下，水流沿着一定的路径均匀渗透，虽然流动

速度较慢，但长期的水流作用会使得土体的强度不断下降，形成较为均匀的水压力分布。与之相对的是湍流模式，水流的不规则性和速度的增加会导致局部区域水流的侵蚀作用加剧，可能会在边坡内形成高压水区，进而触发边坡失稳。特别是在具有复杂地质条件的边坡中，水流路径的变化更加复杂，可能在某些局部区域形成强烈的水流集中现象，导致局部土体的剪切强度降低，从而加剧了边坡的失稳风险。

地下水水流的长期作用不仅改变了土体的力学性质，还可能引起水化作用，导致土体的膨胀或收缩。这种膨胀或收缩现象会进一步影响土体的密实性和强度，特别是在粘土或膨胀土等易受水流影响的土质中，地下水水流的作用更为显著。水流与土体的相互作用可能导致土体在某些区域发生剪切破坏或发生滑坡，尤其是在极端降水或快速水位变化的情况下。地下水水流的另一种影响模式是在特定地质条件下对边坡滑移面位置的影响。水流通过地下裂隙或层间渗透，可能导致滑移面的位置发生变化，进而引发整个边坡的失稳。水流不仅在滑移面上增加了滑动力，也可能通过局部压力波动的形成，触发土体内原本较弱的结构面发生滑动。通过不同的水流模拟与土体分析，可以更加精准地识别地下水对边坡稳定性影响的具体模式，为边坡失稳的预警和防控提供理论依据。

五、基于地下径流分析的边坡稳定性评估方法

基于地下径流分析的边坡稳定性评估方法是通过综合考虑地下水流动特性及其与边坡土体的相互作用，来准确评估边坡在不同水文地质条件下的稳定性。这种方法涉及地下水流动模拟、土体力学分析以及边坡稳定性理论的结合，旨在揭示地下水对边坡失稳的具体影响，为边坡的风险评估和工程设计提供科学依据。在评估过程中，地下水流动的模拟是核心环节之一。通过建立地下水流动的数值模型，能够准确模拟地下水在边坡土体中的分布及流动路径。利用渗透性、土壤孔隙率等参数，水流的速度、压

力以及渗透深度得以精准计算，进而获得地下水流动对边坡的实际影响。通过模拟水流的动态变化，可以揭示水流在不同条件下对边坡稳定性的影响，特别是在强降水或极端天气情况下，地下水的突发性变化对边坡的潜在威胁。

土体力学分析也是评估方法中不可或缺的一部分。根据地下水流动产生的孔隙水压力变化，结合边坡土体的强度参数，能够计算出土体的有效应力和抗剪强度。通过对不同土层、不同土质特征的详细分析，可以识别出哪些区域可能在地下水水流的作用下出现剪切破坏或滑移。利用极限平衡法或滑坡稳定性分析方法，能够量化地下水在不同边坡工况下对稳定性的影响，评估边坡的安全系数，进而判断其失稳的可能性。

除了数值模拟和力学分析外，基于地下径流的评估方法还需考虑边坡的地质特征和水文条件。地质条件的变化，如不同岩土层的渗透性差异、裂隙的存在以及土体的结构性，都对地下水水流的流动方式和边坡的稳定性有着显著影响。此外，水文条件的长期变化，例如季节性地下水位波动，也需纳入考虑范畴。通过综合这些因素，可以对边坡在长期和短期内的稳定性作出全面评估，识别潜在的失稳风险区域。这种基于地下径流的边坡稳定性评估方法，为实际工程提供了更为精准的判断依据，能够在设计阶段及实际运行中为防范边坡失稳提供有力支持。

六、结语

本研究通过分析超大型边坡地下径流的流动特性及其对边坡稳定性的影响，揭示了地下水流动、孔隙水压力、土体力学特性等多重因素在边坡失稳中的重要作用。基于地下水水流的边坡稳定性评估方法为工程设计提供了新的视角，能够有效识别潜在的失稳风险。未来，在复杂地质条件下，结合多种评估手段将有助于进一步提高边坡稳定性评估的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] 刘建国,王勇.超大型边坡地下水流动特征与稳定性分析[J].地质力学学报,2023,29(4):92-104.
- [2] 李雪,孙立军.边坡稳定性评估中的地下水流动模拟方法[J].岩土工程技术,2023,40(3):56-64.
- [3] 陈伟,张健.基于水流模拟的边坡失稳风险分析[J].工程地质学报,2022,30(5):78-87.
- [4] 王涛,黄志强.复杂地质条件下边坡失稳触发机制研究[J].土木工程学报,2023,40(2):112-123.
- [5] 杨鹏,李东.边坡稳定性分析中水文地质条件的影响[J].地质灾害与环境保护,2023,34(1):15-22.
- [6] 王强,周阳.边坡稳定性分析方法的比较与选择[J].水利水电工程学报,2022,40(6):133-145.
- [7] 赵杰,朱铭.地下水对边坡稳定性影响的数值模拟[J].工程与建设,2022,34(4):99-107.
- [8] 刘亮,徐林.超大型边坡地下水水流对失稳机制的影响[J].土地科学,2023,31(2):45-52.
- [9] 陈晨,李明.边坡水流作用下的稳定性分析方法研究[J].水土保持学报,2022,39(3):56-65.
- [10] 张宏伟,王飞.基于地下水流动的边坡稳定性评估及其应用[J].岩土工程学报,2023,45(1):12-21.