

裂隙岩体渗流-应力耦合作用下边坡稳定性分析

汤伟

新疆维吾尔自治区喀什地质大队，新疆 喀什 843300

DOI:10.61369/ETQM.2026030011

摘 要：裂隙岩体属边坡工程内常见介质类别，其渗流与应力所呈耦合作用径直主导边坡稳定性演变进程。本文依托岩体裂隙发育特征，深入解析渗流同应力场的耦合机理，阐释渗流场变动对岩体应力排布的干扰效应及应力重新排布对渗流通道演变的调控功用。结合耦合剖析的核心原理，探究适用于裂隙岩体边坡的耦合剖析架构与关键技术要点，揭示耦合作用下边坡失稳的内在法则。研究可给裂隙岩体边坡工程的稳定性评判与支护设计供应理论支撑，提升工程防灾减灾能力。

关 键 词：裂隙岩体；渗流应力耦合；边坡稳定性；耦合机理；稳定性评判

Slope Stability Analysis of Fissured Rock Mass under Coupled Flow and Stress

Tang Wei

Kashgar Geological Team, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Kashgar, Xinjiang 843300

Abstract： Fissured rock masses constitute a prevalent medium category in slope engineering, where the coupled interaction between seepage flow and stress directly governs slope stability evolution. This study systematically investigates the coupling mechanism between seepage flow and stress field based on the developmental characteristics of rock mass fractures. It elucidates how seepage field variations disrupt stress distribution and how stress redistribution regulates seepage channel evolution. By applying core principles of coupled analysis, the research establishes a structural framework and key technical approaches for analyzing fissured rock slope instability, revealing the intrinsic mechanisms of slope failure under coupled conditions. The findings provide theoretical foundations for stability assessment and support design in fissured rock slope engineering, thereby enhancing disaster prevention and mitigation capabilities.

Keywords： fissure rock mass; seepage stress coupling; slope stability; coupling mechanism; stability assessment

引言

于矿产资源开采、公路铁路建设、水利水电工程等众多领域，边坡工程广泛涉及裂隙岩体介质。裂隙作为岩体内部的薄弱节点，不仅破坏了岩体的完整性，更是渗流场形成与演变的主要通路，而渗流作用引发的孔隙水压力改变又会显著变更岩体的应力状况，两者相互作用、彼此影响的耦合效应，是致使裂隙岩体边坡失稳破坏的关键成因。近些年，多地由裂隙岩体渗流应力耦合作用引发的边坡滑坡灾害，造成了严重的人员伤亡与财产损失，凸显了开展相关研究的紧迫性与必要性。本文从裂隙岩体的结构特征出发，系统剖析渗流应力耦合机理，探究耦合作用下边坡稳定性的演变规律，旨在为工程实践提供更为精准的理论指引^[1]。

一、裂隙岩体渗流应力耦合机理剖析

（一）裂隙岩体的结构特征与渗流基础

裂隙岩体的渗流特性和岩体的裂隙发育程度、裂隙几何形态（像隙宽、延伸长度、产状）、裂隙网络连通性等紧密相关。和完整岩体相较，裂隙岩体的渗透性具有显著的各向异性和非均质性，其渗流过程主要发生于裂隙网络之中，孔隙渗流占比极小，可忽略不计。裂隙作为渗流通路，其隙宽会直接作用于渗流阻力，依据立方定律，渗流速度与隙宽的三次方成正比，所以隙宽

的微小改变都会引发渗流场的剧烈振荡。同时，裂隙网络的连通性决定了渗流路径的分布，连通性愈好，渗流愈顺畅，对岩体应力状况的影响范围也愈广。在自然状态下，裂隙岩体中的裂隙多处于闭合或半闭合状态，渗流量较小，但在外部应力干扰或地下水动态变化作用下，裂隙会发生张开、扩展或贯通，导致渗流场急剧改变，进而引发耦合效应^[2]。

（二）渗流应力耦合的内在作用关联

渗流应力耦合作用是一个双向反馈的动态流程，主要体现为渗流场对应力场的影响和应力场对渗流场的反作用两个层面。一

方面,渗流场通过孔隙水压力的改变作用于应力场。当地下水渗透至裂隙岩体内部之际,裂隙之内会产生孔隙水压力情形。依据有效应力原理内容,有效应力为总应力与孔隙水压力相减之结果,所以孔隙水压力的上升态势,会径直造成岩体有效应力的降低状况,使得岩体抗剪强度呈现下降趋势。与此同时,渗流作用还将引致岩体渗透力的产生现象,渗透力方向和渗流方向保持一致情况。当渗透力抵达某一程度之时,会推动岩体颗粒出现位移问题,进一步加重岩体变形程度。另一方面来讲,应力场借助改变裂隙几何形态方式,对渗流场产生反作用效果。当边坡岩体受到外部荷载比如工程荷载、自重应力改变情况或者构造应力作用时,会出现应力重分布现象,造成裂隙产生张开、闭合或者扩展情形。裂隙张开会使隙宽有所增大,让渗流阻力得以降低,提升岩体渗透性能;裂隙闭合则会让隙宽有所减小,使渗流阻力得以增大,降低渗透性能;而裂隙扩展与贯通情况,会构建新的渗流通道体系,改变渗流路径走向,让渗流场展现出复杂的动态演化特性状况。除此之外,应力作用之下岩体损伤演化问题,也会对渗流特性产生影响效应。岩体损伤程度越高情形,裂隙发育就越充分状态,渗透性能就越强情况,进而加剧渗流-应力耦合效应程度^[3]。

二、裂隙岩体渗流-应力耦合分析架构与关键技术内容

(一) 耦合分析的核心思维理念

裂隙岩体渗流-应力耦合分析的核心思维,在于达成渗流场与应力场的动态耦合求解目标,也就是通过构建耦合数学模型体系,把渗流场与应力场的物理方程内容、本构关系情况、边界条件要素有机融合起来,借助迭代计算的方式途径,逐步接近两者真实耦合状态情形。耦合分析需要遵循“先分离之后再耦合、先线性之后再非线性”的原则要求,首先分别构建渗流场和应力场的单独计算模型体系,明确两者基本参数与边界条件内容,接着通过耦合项将两个模型进行关联操作,考虑两者相互作用情况,开展动态迭代计算工作,直至获取收敛的计算结果为止。耦合分析的最终目的,是揭示耦合作用之下边坡岩体的应力分布状况、变形特征情况、渗流规律等内容,进而对边坡稳定性进行评价工作^[4]。

(二) 耦合数学模型的构建工作

耦合数学模型的构建事宜,是耦合分析的基础内容,主要涵盖渗流场控制方程内容、应力场控制方程内容以及两者耦合方程内容三个部分。渗流场控制方程依据达西定律和质量守恒定律建立起来,考虑裂隙隙宽变化对渗透性能的影响情况,把渗透性张量作为应力场的函数内容,实现渗流场与应力场的关联关系。应力场控制方程依据弹性力学或者弹塑性力学理论建立起来,采用有效应力原理内容,把孔隙水压力作为外力项纳入应力平衡方程体系,考虑渗流作用对岩体应力状态的影响效应。耦合方程则是通过渗透性张量与应力的关系内容、孔隙水压力与有效应力的关系内容,将渗流场控制方程与应力场控制方程有机耦合起来,形成完整的耦合数学模型体系。构建进程当中,裂隙岩体的实际状

况需加以依照,本构模型的选择应做到合理恰当,岩体若呈现变形较大且损伤显著之情形,弹塑性本构模型的采用实有必要,岩体非线性变形和损伤演化进程的精准刻画可籍此达成^[5]。

(三) 耦合分析关键技术要点方面

渗流-应力耦合分析的开展,裂隙网络的精准表征堪称基础所在,现场勘查、室内试验以及数值模拟技术需进行综合运用,裂隙的几何与分布特征、发育规律以及力学渗流特性方得获取,契合实际的裂隙网络模型方可进而构建。非均质且各向异性的岩体参数,像弹性模量、抗剪强度以及渗透性张量,其确定乃耦合分析的核心内容,现场与室内试验和反演分析需结合起来加以运用,参数在耦合作用之下的动态响应亦需予以考虑^[6]。高度非线性耦合模型面前,数值求解成为关键手段,边坡规模和裂隙特征需加以依据,有限元法、离散元法或者有限差分法等方法需进行选用,多方法耦合策略亦可予采用,岩体变形、渗流以及裂隙扩展进程的精确模拟目标得以实现^[7]。

三、耦合作用下裂隙岩体边坡稳定性评价相关情况

(一) 稳定性评价核心指标情况

耦合作用之下,裂隙岩体边坡稳定性评价的核心指标包含安全系数、位移量、孔隙水压力以及岩体损伤程度。边坡稳定性评价最为直观的指标当属安全系数,边坡沿潜在滑动面的抗滑力与滑动力的比值通过计算得出,边坡的稳定状态据此得以判断,安全系数大于1时边坡处于稳定状态,小于1时边坡则会失稳。位移量这一指标能够反映出边坡岩体的变形程度,边坡关键部位的位移变化通过监测可知,边坡的变形趋势可据此作出判断,位移量若出现突变或者呈现持续增大态势,即表明边坡稳定性有所下降,存在失稳风险。孔隙水压力的变化会对岩体的有效应力产生直接影响,孔隙水压力的分布与变化规律通过监测掌握,渗流作用对边坡稳定性的影响即可得以揭示。岩体损伤程度通过损伤变量来进行表征,损伤变量数值越大,意味着岩体破坏程度越严重,边坡稳定性也就越差^[8]。

(二) 稳定性评价方法体系情况

耦合作用之下,裂隙岩体边坡稳定性评价的方法体系主要涵盖定性评价方法、定量评价方法以及综合评价方法。定性评价方法主要以现场地质勘查和工程经验为依据,边坡的地质条件、裂隙发育特征、渗流情况等通过分析,边坡的稳定状态得以直观判断,该方法具有简单快捷的特点,但精度相对较低,适用于初步评价阶段。定量评价方法以力学理论和数值模拟为基础,耦合数学模型通过建立,安全系数、位移量等核心指标得以计算,边坡的稳定性得以精准评价,该方法精度较高,适用于详细评价环节,极限平衡法、数值模拟法等是常用的定量评价方法。综合评价方法则是将定性评价与定量评价有机融合,现场监测数据加以结合,边坡的稳定性得以全面、系统地评价,该方法兼顾了评价的直观性与精准性,成为目前边坡稳定性评价的主流方法^[9]。

四、工程防控对策建议

(一) 渗流控制措施

渗流控制为缓解渗流-应力耦合效应、增进边坡稳定性的关

键手段。一方面,可运用设置排水体系,像排水孔、排水廊道、截水沟之类,降下地下水位,缩小孔隙水压力,提升岩体有效应力。排水孔需布置于裂隙发育繁密区域与渗流通道主要分布区域,保证排水成效;截水沟应设立在边坡顶端,拦截地表径流,减少降雨入渗。另一方面,可通过注浆加固办法,堵塞裂隙通道,降低岩体渗透性。注浆材料宜挑选强度大、渗透性佳的材料,例如水泥浆、化学浆液等,借助高压注浆的途径,使浆液填充裂隙,形成完整的防渗帷幕,阻断渗流路线,减少渗流数量^[10]。

（二）应力调控措施

应力调控手段主要经由优化工程设计、设置支护构造等方式,转变岩体的应力分布,减小应力集中,缓解耦合效应。在工程挖掘过程当中,应采用分层挖掘、分段支护的形式,防止一次性挖掘造成应力急剧分布,减少裂隙的张开与扩展。同时,合理把控挖掘坡度,避免边坡过陡引发应力集中。支护构造的设置能有效分散岩体的自重应力和渗透力,常用的支护构造包含锚杆、锚索、抗滑桩、挡土墙等。锚杆、锚索通过施加预应力,对岩体产生约束功能,抑制裂隙张开与变形;抗滑桩、挡土墙则通过提供抗滑力量,阻止边坡岩体滑动,提升边坡稳定性。

（三）动态监测与预警措施

构建动态监测与预警系统,可实时掌握耦合作用下边坡的稳

定性演化状况,及时发出预警讯息,避免灾害发生。监测内容应涵盖位移、孔隙水压力、应力、渗流数量等核心指标,监测点需布置在边坡关键部位,比如坡顶、坡脚、裂隙发育区域等。采用自动化监测装置,实现监测数据的实时采集、传输与分析,通过建立预警模型,依据监测数据的变化趋势,设定预警阈值,当监测指标达到预警阈值时,自动发出预警讯息,指导相关人员采取应急处置办法。同时,定期对监测数据进行分析总结,优化防控手段,提升边坡工程的防灾减灾能力。

五、结论

裂隙岩体渗流-应力耦合作用是一种双向反馈的动态进程,渗流场通过孔隙水压力和渗透力作用于应力场,应力场通过改变裂隙形态反作用到渗流场,二者的相互作用主导着边坡稳定性的演化。耦合分析的核心是构建精确的耦合数学模型,实现渗流场与应力场的动态耦合求解,而裂隙网络的精确表征、耦合参数的确定和数值求解技术是耦合分析的关键之处。耦合作用之下,边坡稳定性呈现出动态演化规律,渗流扰动和应力扰动都会加剧耦合效应,降低边坡稳定性。

参考文献

[1]周创兵,陈益峰,胡冉,杨志兵,周佳庆.裂隙岩体非线性渗流理论与应用[J].岩石力学与工程学报,1-36.

[2]刘东东,邓先琪,宋远,许学昭,钟国,杨涛.随机裂隙山岭隧道下穿水库渗流规律与注浆策略研究[J].现代隧道技术,2025,62(S1):247-253.

[3]吴兵,盛建龙,叶祖洋,周新.单裂隙岩体非线性渗流-法向应力耦合模型研究[J].岩土力学,2025,46(08):2495-2504.

[4]杨晓亮,汪云峰,盛建龙,周新,王楠,周文.低温作用下岩体裂隙冻结渗流规律可视化试验研究[J].矿业研究与开发,2025,45(07):218-226.

[5]孙意成,魏玉峰,胡舒寒,秦兴州.考虑离散裂隙网络非线性渗流的岩体渗透特性研究[J].岩石力学与工程学报,2025,44(09):2444-2455.

[6]刘新荣,张吉禄,周小涵,等.考虑轴向应力作用的贯通裂隙岩体变形及渗流特性研究[J].岩土力学,2024,45(12):3596-3612.

[7]周新.岩体粗糙裂隙两相驱替渗流规律及其几何结构影响机制研究[D].武汉大学,2024.

[8]季慧,王鲁珥,吴则祥,等.裂隙岩体三维随机裂隙建模与渗流数值仿真研究[J].计算力学学报,2024,41(04):718-725.

[9]施炎,王团乐,宛良朋,等.干湿循环作用下裂隙岩体渗流特性演化规律研究[J].人民长江,2024,55(07):198-203.

[10]张延飞.渗流-应力耦合作用下边坡支护稳定性分析[D].兰州交通大学,2022.