

地下水渗流对地质工程围岩稳定性的影响机制及数值模拟研究

高晓龙^{1,2}, 吕国斌^{1,2*}, 胡宸^{1,2}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150000

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/ERA.2025070028

摘 要 : 本文聚焦于地下水渗流对地质工程围岩稳定性的影响机制及数值模拟研究, 阐述了地下水渗流基本理论, 同时介绍了地质工程围岩稳定性概念, 以及 BQ 分级法、RMR 分级法等评价指标, 深入分析地下水渗流对围岩稳定性的影响。在数值模拟方法上, 详细探讨了有限元法、有限差分法和流固耦合数值模拟的原理、优缺点及应用场景。研究成果为准确评估地质工程围岩稳定性、优化工程设计与施工提供了理论依据和技术支持。

关 键 词 : 地下水渗流; 围岩稳定性; 影响机制; 数值模拟

Study on the Influence Mechanism and Numerical Simulation of Groundwater Seepage on the Stability of Surrounding Rocks in Geological Engineering

Gao Xiaolong^{1,2}, Lv Guobin^{1,2*}, Hu Chen^{1,2}

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150000

2. Harbin Black Soil Earth Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : This paper focuses on the influence mechanism and numerical simulation of groundwater seepage on the stability of surrounding rocks in geological engineering. It elaborates on the basic theory of groundwater seepage and introduces the concept of surrounding rock stability in geological engineering, as well as evaluation indexes such as the BQ classification method and RMR classification method. It provides an in-depth analysis of the impact of groundwater seepage on the stability of surrounding rocks. In terms of numerical simulation methods, the principles, advantages, disadvantages, and application scenarios of the finite element method, finite difference method, and fluid-solid coupling numerical simulation are discussed in detail. The research results provide a theoretical basis and technical support for accurately evaluating the stability of surrounding rocks in geological engineering and optimizing engineering design and construction.

Keywords : groundwater seepage; surrounding rock stability; influence mechanism; numerical simulation

引言

在影响地质工程稳定性的众多因素中, 地下水渗流是极为关键的一项。哈尔滨地铁建设中, 部分路段因地下水渗流出现围岩失稳, 其不仅改变围岩力学性质、影响结构, 还增加施工风险、延长工期、提高成本。随着数值模拟技术发展, 能通过有限元法直观观察渗流规律及对围岩稳定性的动态影响, 为二者间关系的研究提供了帮助。但目前不同地质条件下的渗流影响机制研究不足, 成果通用性差, 数值模拟参数选取也不准确可靠。本文致力于分析二者关系, 明确渗流作用规律, 为地质工程提供理论和技术支持, 降低工程风险, 保障工程安全稳定运行。

一、地下水渗流与地质工程围岩稳定性基础理论

(一) 地下水渗流基本理论

地下水渗流是地下水在岩土孔隙、裂隙或溶隙中的流动现

象, 与地表水径流差异显著。其主要驱动力为水头差与重力, 水头差促使地下水从高水头向低水头处流动, 重力则使地下水向下渗透。1852 年, 法国工程师达西 (Darcy) 做了大量实验, 提出了著名的 Darcy 定律 (又称渗透线性定律)。Darcy 定律表明,

通讯作者: 吕国斌, 邮箱: 249618122@qq.com

渗流量与渗流面积、水力坡降和渗透系数成正比^[1]。达西定律的表达式为（ Q ——渗透水量； A ——横断面积； h_1 ——渗流入口水头； h_2 ——渗流出口水头； k ——渗透系数； J ——水力坡度； s ——流动距离）。渗透系数反映了岩土允许地下水通过的能力，与岩土的孔隙结构、颗粒大小及分布等紧密相关，不同地层的岩土特性不同，导致渗透系数有差异，进而影响地下水渗流速度和流量。地下水渗流场由含水层、隔水层、地下水水位、流速、流向等要素构成，等水头线和流线可描述渗流场特征，等水头线展示水头分布，流线呈现地下水流动轨迹，二者相互垂直。通过监测绘制等水头线和流线，能直观了解地下水在各含水层的渗流规律，为地下水渗流研究提供重要依据。

（二）地质工程围岩稳定性概念与评价指标

地质工程围岩稳定性是指在地质工程施工及运营过程中，围岩在各种力的作用下保持自身稳定、不发生坍塌或过大变形的能力，其直接关系到地质工程的安全与正常使用。围岩稳定性受多种因素影响，包括岩体结构、岩石强度、地下水作用、地应力状态等^[2]。为了准确评估围岩的稳定性，工程领域中发展出了多种行之有效的评估手段，其中岩体质量分级是较为常用的方法之一。例如BQ分级法，该方法依据岩石的坚硬程度、岩体完整程度等关键指标，计算出岩体基本质量指标BQ。随后结合地下水状态、初始应力状态等实际情况进行修正，最终划分出岩体的质量等级。这一等级划分结果能够为工程设计和施工提供极具价值的参考依据。另一种广泛应用的RMR分级法综合考量了岩石强度、RQD值、节理间距、节理条件以及地下水等多个因素，通过全面评分的方式确定岩体质量等级。此外还可以借助全站仪、位移计、应力计等专业设备监测围岩位移、应力变化等物理量评估其稳定性，通过这些设备获取的实时数据，能够及时、准确地反映出围岩状态的变化情况^[3]。一旦发现异常，便可以迅速采取相应的措施，从而有效保障地质工程的安全。

二、地下水渗流对围岩稳定性的影响

（一）地下水渗流对围岩力学性质的影响

渗透力是地下水渗流作用于围岩的重要力学因素，当渗流发生时，地下水在岩土孔隙或裂隙中流动，会对周围的岩土颗粒施加渗透力。依据达西定律，渗流速度与水力梯度成正比，而渗透力与渗流速度相关，所以水力梯度越大，渗透力越强。在实际的地质工程中，若围岩处于地下水丰富区域，较大的水力梯度会产生可观的渗透力。这种渗透力会打破围岩原有的应力平衡，使围岩颗粒受到附加作用力，导致围岩应力状态改变。原本稳定的应力分布被破坏，部分区域应力集中加剧，增加了围岩变形和破坏的风险^[4]。岩石的矿物成分与结构决定其遇水后的软化特性，富含亲水性矿物的岩石在地下水长期浸泡下，矿物颗粒间的联结力会减弱。这是因为水分子进入岩石矿物晶格，削弱了颗粒间的化学键，使岩石强度降低。相关研究表明，部分页岩饱和状态下的抗压强度仅为干燥状态的30%–50%，抗剪强度降低幅度也在30%–40%左右。岩石强度的降低，使得围岩在自身重力和外部荷载

作用下更容易发生变形和破坏。当岩石孔隙被水充满，其重度会显著增加。假设岩石干燥时重度为 γ_d ，孔隙水重度为 γ_w ，孔隙率为 n ，那么饱和岩石重度 $\gamma_{sat} = \gamma_d + n\gamma_w$ 。对于一些大型地下工程，围岩体积庞大，地下水造成的重度增加会使围岩对支护结构产生更大压力。

（二）地下水渗流对围岩结构的影响

地下水渗流对围岩结构的影响是多维度的，涉及到岩体结构面的力学特性改变、溶蚀作用引发的结构破坏以及对潜在滑动面的影响，这些都严重威胁着地质工程的安全稳定。结构面在岩体中广泛存在，是影响岩体力学性质和稳定性的关键因素。地下水渗流会改变结构面的力学特性，其中最突出的是降低结构面的抗剪强度^[5]。结构面的抗剪强度遵循库仑定律，即 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ （ τ 为抗剪强度， c 为黏聚力， σ 为正应力， ϕ 为内摩擦角）。地下水的存在会使结构面的黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 减小，一方面，地下水在结构面间的润滑作用降低了颗粒间的摩擦力，导致内摩擦角减小；另一方面，长期的水–岩相互作用会溶解结构面间的胶结物质，使黏聚力下降。研究显示在富含黏土矿物的结构面中，地下水长期作用后，黏聚力可能降低40%–60%，内摩擦角减小 $10^\circ - 20^\circ$ 。这使得结构面更容易发生滑动，从而破坏岩体的整体稳定性，在地质工程中可能引发围岩失稳坍塌事故。在可溶岩地区，地下水的溶蚀作用对围岩结构破坏严重。地下水含有一定量的碳酸等酸性物质，在长期渗流过程中，会与可溶岩发生化学反应。随着时间推移，溶蚀作用使岩石孔隙不断扩大，形成溶蚀裂隙和溶洞^[6]。这些溶蚀结构的出现，不仅削弱了岩石的强度，还改变了岩体的完整性和连续性。在岩溶地区的隧道工程中，若遇到大规模溶洞，可能导致隧道顶部坍塌、突水突泥等严重事故，给工程建设和运营带来巨大风险。此外地下水渗流还会对潜在滑动面产生影响，在地质构造复杂区域，岩体中存在许多潜在的滑动面，地下水的渗流会增加滑动面上的孔隙水压力。根据有效应力原理，有效应力 $\sigma' = \sigma - u$ （ σ 为总应力， u 为孔隙水压力），孔隙水压力的增加会减小有效应力，进而降低滑动面上的抗滑力。同时地下水的浸润作用会使潜在滑动面附近的岩土体软化，抗剪强度降低。

三、地下水渗流数值模拟方法

（一）有限元法

有限元法是地下水渗流数值模拟中广泛应用的一种方法，它的核心思想是将连续的求解区域离散为有限个互不重叠的单元，这些单元通过节点相互连接。在处理地下水渗流问题时，基于渗流的基本方程对每个单元进行分析，建立单元的渗流方程。以二维稳定渗流为例，将渗流区域剖分成三角形或四边形单元，假设单元内的水头函数为线性或二次函数形式，通过在单元边界上满足一定的条件，利用变分原理或加权余量法，推导出单元的有限元方程。之后将所有单元的有限元方程进行组装，形成整个渗流区域的总体有限元方程。该方程通常是一个大型的线性代数方程组，通过求解这个方程组，就能得到各个节点的水头值。有限元

法具有很多优势,对复杂边界条件和非均质介质有很强的适应性,在模拟具有不规则形状边界的含水层或包含多种不同渗透系数岩土体的渗流区域时,能够灵活地划分单元以贴合实际情况。在模拟哈尔滨地区地下水渗流时,由于该地区含水层结构复杂,存在不同类型的岩土体,有限元法可以根据实际地质条件,合理划分单元,准确模拟地下水在不同介质中的渗流情况^[7]。同时它还可以方便地处理各种类型的边界条件,如给定水头边界、流量边界等。不过有限元法也存在一定的缺点,如计算过程相对复杂,需要较多的前处理工作来划分单元和确定节点信息,计算量较大,对计算机的内存和计算速度要求较高。

(二) 有限差分法

有限差分法是另一种常用的地下水渗流数值模拟方法,它的基本原理是用差商来近似代替微商,从而将渗流的偏微分方程转化为差分方程进行求解。对于一维非稳定渗流的基本方程,采用向前差分、向后差分或中心差分格式对时间和空间导数进行离散。例如在空间上采用中心差分格式,在时间上采用向前差分格式,将这些差分近似代入渗流方程就可以得到离散后的差分方程^[8]。有限差分法的优点是概念直观、计算格式简单,易于理解和编程实现,在处理简单的渗流问题,如均质、规则边界的含水层渗流时,能够快速得到计算结果。但它对复杂边界条件和非均质介质的处理能力相对较弱,在模拟具有复杂地形或多种岩土体分布的区域时,需要对差分格式进行特殊处理,否则会影响计算精度。例如在模拟哈尔滨市部分存在断裂构造的区域地下水渗流时,由于断裂带附近岩土体性质变化大,边界条件复杂,有限差分法若不进行精细处理,很难准确模拟地下水在该区域的渗流情况。

(三) 流固耦合数值模拟

在实际的地质工程中,地下水渗流与岩土体变形之间存在着相互作用,这种相互作用被称为流固耦合。流固耦合数值模拟就是考虑这种相互作用,同时求解渗流方程和岩土体变形方程,以更准确地模拟地下水渗流对地质工程的影响。流固耦合的基本理论包括渗流理论和岩土力学理论,渗流方面遵循达西定律等基本渗流规律,描述地下水在岩土体孔隙中的流动;岩土力学方面则基于弹性力学、塑性力学等理论,分析岩土体在应力作用下的变

形和破坏^[9]。在数值模拟中,通常采用有限元法或有限差分法对渗流方程和岩土体变形方程进行离散求解。以二维流固耦合问题为例,将渗流区域和岩土体变形区域离散为单元,建立渗流场和应力场的控制方程。渗流场控制方程反映地下水的流动规律,应力场控制方程描述岩土体在荷载作用下的力学响应。通过考虑孔隙水压力对岩土体应力-应变关系的影响,以及岩土体变形对渗流参数的影响,实现渗流场和应力场的耦合求解^[10]。流固耦合数值模拟能够更真实地反映实际工程中地下水渗流与岩土体变形的相互关系,对于分析地质工程中的诸多问题,如地下洞室开挖引起的围岩变形、地面沉降等具有重要意义。在模拟哈尔滨地区地下工程时,考虑流固耦合作用可以更准确地预测地下水渗流对围岩稳定性的影响,为工程设计和施工提供更可靠的依据。但流固耦合数值模拟计算复杂度高,需要同时考虑多个物理场的相互作用,对计算资源要求更高,且在模型参数选取和验证方面也面临更大的挑战

四、结束语

本文深入剖析了地下水渗流基本理论,明确了达西定律等关键原理在渗流研究中的核心地位,详细阐述了渗透系数与岩土特性的紧密联系,以及渗流场各要素间的相互作用关系。同时也精准界定了地质工程围岩稳定性概念,系统梳理了BQ分级法、RMR分级法等评价指标体系,为后续研究奠定了坚实的理论根基。在影响机制研究方面,全面揭示了地下水渗流对围岩力学性质和结构的多重影响。数值模拟方法研究中,系统对比了有限元法、有限差分法和流固耦合数值模拟的优劣。但本文仍存在一些不足,例如对一些特殊地质条件和复杂环境因素的考虑还不够全面;模型参数的准确性和模型的普适性还有待提高,难以精准反映实际情况。未来可进一步拓展影响机制研究范围,涵盖更多特殊地质和环境因素;加强对数值模拟方法的优化,结合大数据、人工智能等新技术提高模型参数的准确性和模型预测的可靠性;通过更多现场监测和实验研究,验证和完善理论与模拟结果。

参考文献

- [1] 贾晶玺. 浅埋富水隧洞围岩稳定性分析及施工措施研究[D]. 黑龙江大学, 2023.DOI:10.27123/d.cnki.ghlj.2023.001802.
- [2] 解丽. 流固耦合作用下断层破碎带隧道围岩稳定性研究[D]. 中国石油大学(华东), 2022.DOI:10.27644/d.cnki.gsydu.2022.000423.
- [3] 陈俊熙. 裂隙水流作用下地下水封库围岩稳定性分析[D]. 福州大学, 2020.DOI:10.27022/d.cnki.gfzhu.2020.000599.
- [4] 周峰, 郝忠, 张英姿, 等. 道路荷载及地下水渗流对盾构隧道围岩稳定性影响[J]. 路基工程, 2018, (06): 189-194.DOI:10.13379/j.issn.1003-8825.2018.06.40.
- [5] 舒安齐. 含煤隧道围岩稳定性分析及支护结构优化[D]. 湖北工业大学, 2016.
- [6] 雷明明. 基于流固耦合岩溶隧道围岩稳定性研究[D]. 重庆交通大学, 2014.
- [7] 孙珍平. 渗流作用下巷道围岩稳定性分析研究[D]. 安徽理工大学, 2013.
- [8] 李鹏飞. 海底隧道围岩稳定性分析与控制研究[D]. 北京交通大学, 2011.
- [9] 荣传新, 程桦. 地下水渗流对巷道围岩稳定性影响的理论解[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, (05): 741-744.
- [10] 张旭海. 城市轨道交通车站基坑围护结构渗漏点对其周边地下水渗流场变化规律的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(08): 217-222.DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.037.