https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.033

深埋隧洞穿越断层带瞬态渗流机制与渗透失稳风险评价

宋志忠[1,2],张仁君[3,4],施华堂[1,2],杨志兵[3,4*],陈益峰[3,4]

1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司,湖北武汉 430010
2. 水利部水网工程与调度重点实验室,湖北武汉 430010
3. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,湖北武汉 430072
4. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室,湖北武汉 430072

摘 要: 深埋隧洞穿越大型断层带时,面临高压涌水与渗透失稳风险,其瞬态渗流机制与风险评价方法需深入研究.针对某重大引调水隧洞工程开展高精度三维瞬态渗流数值模拟,精细刻画断层带内部结构与渗控措施,并采用抛物型变分不等式方法模拟开挖渗流动态响应,提出了基于渗透坡降阈值的渗透失稳风险定量评价方法.结果表明,断层带内部渗透非均质性是控制渗流通道演化与渗透失稳的关键;超前地表定向灌浆可有效降低涌水量但会抬升灌浆圈外水头,而超前排水具有显著降压作用.二者联合应用可使总涌水量降低69.7%,并将未灌浆区最大渗透坡降降低74.9%至临界阈值以下,显著提升渗流安全水平.本研究为类似深埋隧洞的灾变风险识别与渗控优化提供了参考.

关键词: 深埋隧洞;大断层带;渗透失稳;数值模拟;风险评价;渗控措施;工程地质.

中图分类号: P642 **文章编号:** 1000-2383(2026)10-3723-16 **收稿日期:** 2025-11-18

Transient Seepage Mechanisms and Seepage Instability Risk Assessment of a Deep-Buried Tunnel through a Fault Zone

Song Zhizhong[1,2], Zhang Renjun[3,4], Shi Huatang[1,2], Yang Zhibing[3,4*], Chen Yifeng[3,4]

1. *Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan* 430010, *China*
2. *Key Laboratory of Water Grid Project and Regulation of Ministry of Water Resources, Wuhan* 430010, *China*
3. *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan* 430072, *China*
4. *Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan* 430072, *China*

Abstract: Deep-buried tunnels crossing large fault zones are exposed to significant risks of high-pressure water inrush and seepage instability, and their transient seepage mechanisms and risk assessment methods require further investigation. In this study, a water diversion tunnel project is investigated through high-resolution three-dimensional transient seepage numerical simulations. The internal structure of the fault zone and seepage control measures are explicitly characterized. A parabolic variational inequality

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(Nos. U2340228, 52588202);长江设计集团有限公司自主创新项目(No. CX2021Z01);长江设计公司自主研发项目(No. CX2023Z02-1).

作者简介: 宋志忠(1971-),男,正高级工程师,从事水利水电及水运工程设计研究工作.ORCID: 0009-0000-8659-0459. E-mail: songzhizhong@cjwsjy.com.cn

* **通讯作者:** 杨志兵(1982-),男,教授,博士生导师,主要从事多孔和裂隙介质渗流理论与控制方面的研究工作.ORCID: 0000-0002-2296-050X. E-mail: zbyang@whu.edu.cn

引用格式: 宋志忠,张仁君,施华堂,杨志兵,陈益峰,2026.深埋隧洞穿越断层带瞬态渗流机制与渗透失稳风险评价.地球科学,51(10):3723-3738.

Citation: Song Zhizhong, Zhang Renjun, Shi Huatang, Yang Zhibing, Chen Yifeng, 2026. Transient Seepage Mechanisms and Seepage Instability Risk Assessment of a Deep-Buried Tunnel through a Fault Zone. *Earth Science*, 51(10): 3723-3738.

(PVI) method is employed to simulate the transient seepage response during tunnel excavation, and a quantitative seepage instability risk assessment method based on a critical hydraulic gradient threshold is proposed. The results indicate that permeability heterogeneity within the fault zone is the key factor controlling the evolution of seepage pathways and seepage instability. Ground directional grouting effectively reduces water inflow but causes hydraulic head build up outside the grouted zone, whereas pre-drainage produces a pronounced pressure-relief effect. The combined application of grouting and drainage reduces the total water inflow by 69.7% and decreases the maximum hydraulic gradient in ungrouted zones by 74.9%, bringing it below the critical instability threshold and markedly improving seepage stability. This study provides a reference for disaster risk identification and the optimization of seepage control strategies for similar deep-buried tunnel projects.

Key words: deep-buried tunnel; major fault; seepage instability; numerical simulation; risk evaluation; seepage control measure; engineering geology.

0 引言

岩土灾变(如岩爆、塌方、涌水、突泥等)在地下工程建设中极具突发性和破坏性.随着山区铁路、公路,以及大型引调水等工程建设需求的快速发展(王梦恕, 2010; 洪开荣, 2017;孟陆波等,2024; Shao *et al.*,2025),隧道/隧洞工程频繁地穿越断层、岩溶等不良地质区域,工程建设安全面临着越发严峻的挑战(Hu *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2025).地下水瞬态渗流、隧洞开挖扰动以及不良地质条件相互耦合,形成复杂的地下水演化规律,在不利条件下会有涌水灾害风险(Li *et al.*, 2010; 李术才等, 2017; 王健华等, 2018; Gao *et al.*, 2019; 陈子全等, 2025).涌水灾害的"强隐蔽性、强复杂性、强突发性、强破坏性"特征给隧洞建设的灾害预防和控制带来困难(李术才等, 2017; 王复明等, 2025),威胁着人员、设备和工程的安全(Meng *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2025).

针对隧洞突涌水与渗流安全问题,已有研究提出了多种风险评价与分析方法,主要包括经验统计法、理论解析法与数值模拟法(吴建等, 2019).经验统计类方法(如工程地质类比、综合评分及基于机器学习的风险评估等)依赖历史工程资料或专家经验,可在信息有限的条件下快速识别高风险地段(许增光等, 2018),但主观较强,难以揭示物理机制.理论解析法基于渗流力学与地下水动力学的经典理论,通过建立简化模型计算突涌水量,能较好反映均质介质中的渗流规律,具有概念清晰、计算简便的特征,但在面对复杂非均质、各向异性断层带,以及施工扰动下的瞬态渗流问题时,解析模型的适用性明显受限(Park *et al.*, 2008; 周毅等, 2015; 张顶立和孙振宇, 2019; 张治国等, 2020).相较而言,数值模拟法以渗流力学为基础(王媛等, 2009, 2012; 李铮等, 2016; Hu *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2021; 任磊等, 2025),能够揭示非稳态渗流的演化规律,是研究地下水响应机制的重要手段.然而,现有数值模拟研究多侧重于渗流场、水头或涌水量的变化特征描述,整体上仍停留在定性或半定量分析层面,对施工期渗透失稳风险的工程判定与定量评价关注不足.

大量地质与水文研究表明,大型断层带内部普遍存在断层泥、角砾岩、剪切带、影响带等多个结构单元,其内部结构呈现显著的空间非均质性,不同条带在渗透性、力学性质及抗渗透侵蚀能力方面存在明显差异(Faulkner *et al.*, 2006; Li and Malin, 2008; 宫亚军等, 2025).断层带内部非均质结构对地下水通道的形成、渗流集中及水头重分布具有重要控制作用(Gudmundsson *et al.*, 2010; 张庆松等, 2017; Yang and Juanes, 2018; 张庆艳等, 2020).然而,在隧洞穿越断层带的渗流分析中,部分研究仍将断层带简化为等效均一介质(Zhou *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021),难以反映断层内部不同结构单元在施工扰动作用下的差异化渗流响应.这种简化处理在一定程度上限制了对渗流集中区及渗透失稳高风险区域的精细识别.

另一方面,渗透失稳是突涌水与突泥灾害的重要诱发机制之一,其发生过程通常伴随着渗流侵蚀、颗粒迁移及孔隙结构破坏等复杂物理过程.近年来,学者们通过室内试验和数值模拟等手段,对断层带及破碎岩体中渗流侵蚀与突水突泥机制开展了研究(Meng *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2022).尽管相关研究在机理认识方面取得了一定进展,但在工程实践中,如何将渗流分析结果转化为具有明确工程判定意义的渗透失稳风险评

价指标,仍然是一个亟待解决的问题,尤其是在断层带等强非均匀介质和施工期瞬态渗流等复杂条件下.

基于上述研究现状,发展融合渗流力学机理的隧洞围岩渗透失稳风险评价方法,对于提升复杂断层带区域地下工程施工安全具有重要意义.为此,本文依托某重大引调水工程深埋隧洞穿越大型断层带的实际工程背景,针对断层带内部结构非均质性显著、施工期渗流演化复杂等特点,构建了一个精细表征地层结构、断层带内部条带特征、渗控措施及隧洞开挖步进过程的三维瞬态渗流数值模型.在此基础上,系统分析隧洞开挖施工过程中的渗流场动态演化特征,提出了一种基于渗透坡降阈值判定的渗透失稳风险定量评价方法,用于识别施工期不同工况下的渗透失稳高风险区域.相关研究成果可为复杂断层带条件下深埋隧洞的灾变风险识别与渗控设计优化提供理论参考与技术支撑.

1　工程概况

某引调水隧洞工程线路长、埋深大,需穿越多种复杂地质构造,包括大型断层带及岩溶发育含水地层等.由于隧洞断面尺寸大、外水压力高,施工过程中在断层破碎带及岩溶发育段极易发生突涌水、突泥等灾害,给施工安全与工程结构稳定构成严重威胁.

工程沿线地质条件复杂多变,穿越断层F14的隧洞洞段是全线中的一个突涌水高风险段(图1).该断层走向为北西西(NWW),倾向为西南西(SWW),倾角较大,约为75°～80°,包括影响带的断层总宽度为91 m.断层带内岩体破碎、渗透性强.隧洞穿越断层F14时,采用敞开式全断面隧道掘进机(TBM)施工.为了降低隧洞掘进穿越断层带过程中的渗透失稳风险,设计采用“地表定向灌浆＋超前预排水”的联合渗控措施,以对高压地下水进行封堵与疏导.因此,亟需通过系统的非稳态渗流模拟研究,定量评估该联合渗控措施的效果并优化相关设计参数,为施工安全提供科学依据.

将隧洞穿越断层F14附近区域划分为研究区,如图1所示.研究区域内地层出露齐全,自震旦系至白垩系均有分布,岩性组成复杂多样,含有火成岩、变质岩及沉积岩(图1,图2).工程区除断层F14外,还分布有断层F28、断层F29、断层F30及断裂F_{TCH}等多条构造带.区域内岩溶发育,存在岩溶暗河系统,进一步增加了研究区域的水文地质复杂性.

引水隧洞直径为12.2 m,在隧洞穿越断层F14附近时,隧洞外围布置均匀厚度的灌浆圈(厚度12.2 m),同时在隧洞穿越断层内部时,隧洞洞周环向均匀布置6个排水孔(直径110 mm),孔深43.1 m,排水孔与隧洞轴线夹角为21.8°(布置示意见图3);排水孔共设置两环,两环间距为30 m.渗控系统结构及F14断层带内部结构如图3所示,隧洞轴向位置以桩号表示.F14断层带内部结构复杂,其内部结构划分基于工程区详勘阶段的钻孔资料、地质剖面解释及施工揭露资料确定.沿隧洞开挖方向(东北向西南)可划分为C1～C8共8个条带分层,包含断层影响带与断层带核部.条带岩性包括断层碎屑物(碎屑与泥质填充)、胶结较差的碎裂岩(泥钙质胶结)及断层影响带(碎裂化白云岩).断层分带渗透性存在差异,影响地下水的流动路径与压力分布,且各条带的抗渗透破坏能力也有不同;例如,泥质填充的断层碎屑物条带的渗透系数相对较小,且易受侵蚀.因此,在渗流模拟中应详细考虑断层内部的分层结构和渗透系数异质性,以实现对隧洞穿越断层带渗透安全的精细评价.隧洞开挖顺序与施工进度依照工程总体安排,如图3所示.

综上所述,隧洞穿越F14断层带过程中具有埋深大、地质构造复杂、岩溶发育与富水性强等典型特征,断层带岩体渗透失稳风险集中.本研究以该断层区域为研究对象,构建了一种基于瞬态渗流精细模拟和渗透坡降阈值判定的断层岩体渗透失稳风险评价思路.该思路以断层带内部结构、渗控措施和隧洞开挖步进过程的精细建模以及瞬态渗流数值模拟为核心,从模拟的渗流场时空响应特征中识别渗透失稳的关键控制因素,并以渗透坡降作为渗透稳定性的评价指标,对渗透失稳风险进行量化分析,从而实现从渗流模拟向风险定量识别的转化,系统开展渗流稳定性和渗控措施有效性的分析研究.

2　数值模拟与渗透失稳风险评价方法

2.1　瞬态渗流精细模拟与渗透失稳风险评价方法

2.1.1　渗流控制方程与求解方法　渗流分析采用地下水动力学控制方程,并考虑地层结构和断层带内部分层结构的渗透特性.隧洞工程建设过程中,研究区非稳定渗流问题可定义在任意固定区域Ω

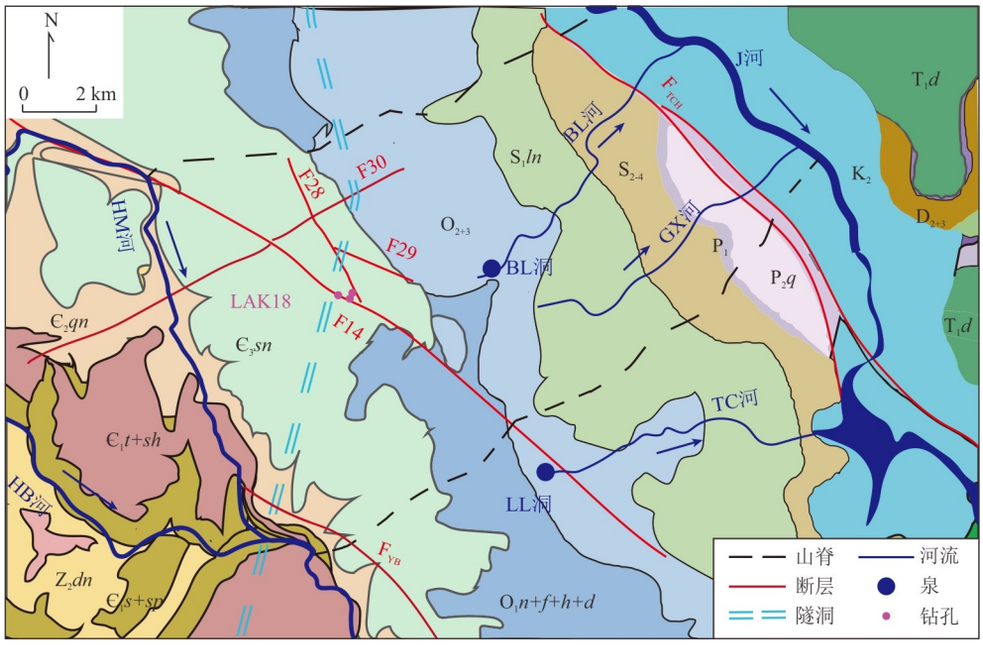

图 1 研究区域水文地质单元示意图

Fig.1 Layout of the hydrogeological units in the study area

Z_2dn.震旦系灯影组;C_1s-sp.寒武系下统水井沱组－石牌组;C_1t-sh.寒武系下统天河板组－石龙洞组;C_2qn.寒武系中统罩家庙组;C_3sn.寒武系上统三游洞组;O_1n-f-h-d.奥陶系下统南津关组－分乡组－红花园组－大湾组;O_{2-3}.奥陶系中－上统;S_1ln.志留系下统龙马溪组;S_{2-4}.志留系中－上统;D_{2-3}.泥盆系中－上统;P_1.二叠系下统;P_2q.二叠系中统栖霞组;T_1d.三叠系下统大冶组;K_2.白垩系上统

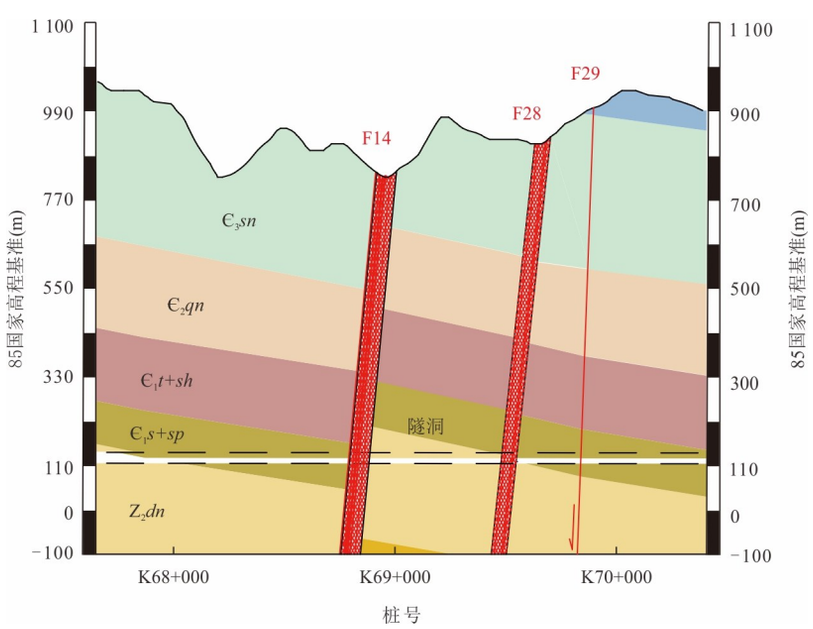

图 2 沿隧洞轴线的地质剖面图

Fig.2 Geological cross-section profile along the tunnel axis

($\Omega=\Omega_w+\Omega_d$)内.通过引入 Heaviside 函数,可将 Darcy 定律从饱和区(Ω_w)严格推广至非饱和区(Ω_d)(Chen *et al.*, 2011).地下水连续性方程可表示为:

$$(1-H)S_s\frac{\partial\varphi}{\partial t}-\nabla\cdot[(1-H)\boldsymbol{K}\nabla\varphi]=0\ , \quad (1)$$

式中:$\varphi=z+p/(\rho_w\cdot g)$为总水头(m);$p$为孔隙水压力(Pa);$z$为位置水头(m);$\rho_w$为水的密度(kg/m^3);g为重力加速度(m/s^2);S_s为介质的储水率(m^{-1});$\boldsymbol{K}$为渗透系数张量(m/s);H为 Heaviside 函数(无量

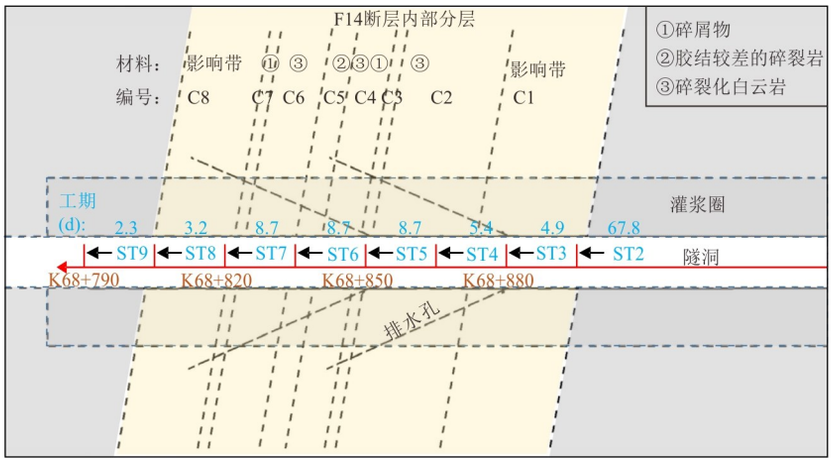

图 3　F14 断层带内部结构与隧洞开挖步方案

Fig.3　Internal structure of fault F14 and sequential stages of tunnel excavation

纲),当 $\varphi \geqslant z$ 时(对应饱和区 Ω_w),$H=0$,当 $\varphi < z$ 时(对应干区 Ω_d),$H=1$;t 为时间(s).公式(1)描述自由水面演化下的饱和－干区渗流问题,非饱和区近似视为不承载连续渗流的干区,因而不需要显式引入含水量.Heaviside 函数用于统一刻画饱和区与干区转换关系.

公式(1)需满足初始条件、水头边界条件、流量边界条件和潜在溢出边界条件.通过引入定义在全域 Ω 上的 Heaviside 函数,潜在溢出边界条件可表述为 Signorini 型互补条件,因而公式(1)可采用抛物型变分不等式法(Parabolic Variational Inequality, PVI)予以严格求解(Zheng *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2011).为模拟含复杂排水系统的强非线性渗流问题,本文采用子结构法精确表征排水孔边界条件(Chen *et al.*, 2008).排水子结构通过在母单元内构建排水孔子单元并对其内部自由度进行凝聚(图 4),将排水孔边界条件等效传递至母单元节点,同时结合 Signorini 型变分不等式实现排水孔壁渗流信息向整体模型的稳定传递,有效避免因排水孔分布密集、孔径较小而引起的网格划分难题.

为了在数值模拟中体现隧洞施工步进的影响,本研究在有限元模型中构建了各开挖步拟开挖岩体的有限元网格.模拟过程中,在初始渗流场基础上,随着隧洞开挖步进的深入,逐步移除已开挖围岩对应的单元网格,并更新开挖区域节点的边界条件,从而实现隧洞开挖步进与瞬态渗流场演化的耦合.渗流计算采用自主研发的有限元程序 THYME 3D,该程序已得到广泛验证,并在实际工程中得到了广泛应用(袁晶晶等, 2024).

2.1.2　渗透失稳风险评价方法　为实现渗流数值模拟结果向渗透失稳风险定量化评价的转化,本文构建了基于瞬态渗流精细模拟和渗透坡降阈值判定的渗透失稳风险评价方法.该方法以渗流控制方程求解得到的瞬态水力响应结果为基础,通过提取并分析渗流场中代表性的渗透坡降指标,实现对不同工况下的断层带岩体渗透稳定性的定量评估.

具体而言,本方法将施工期瞬态渗流模拟与工程风险识别紧密联系,形成了以下 4 步技术流程:(1)渗流场获取:通过高精度三维有限元模拟获得隧洞开挖过程中不同阶段的地下水渗流特征,充分考虑断层带渗透系数非均质性及开挖扰动效应;(2)关键指标提取:基于模拟结果提取掌子面及隧洞周围岩体的渗透坡降场,作为评价失稳风险的核心指标;(3)阈值对比判定:将渗透坡降与断层带工程判定的临界坡降进行对比,实现施工期失稳风险的定量识别;(4)高风险区域识别:根据阈值判定结果识别空间位置和施工阶段的高风险区域,为施工期渗控措施提供工程参考.

与传统基于数值模拟的经验性分析相比,本方法的本质区别在于:通过渗透坡降的时空演化实现量化分析;将风险评价结果与施工阶段和空间位置相关联;在保持模型物理可解释性的基础上,建立施工阶段与空间位置相关的相对风险判识框架,从而增强工程可操作性并提供高风险区域识别及施工渗控指导.

在施工期渗流安全分析中,识别超过渗透失稳临界条件的高风险区域是渗流风险防控的核心.渗透坡降作为连续变量,其大小可反映不同区域和施

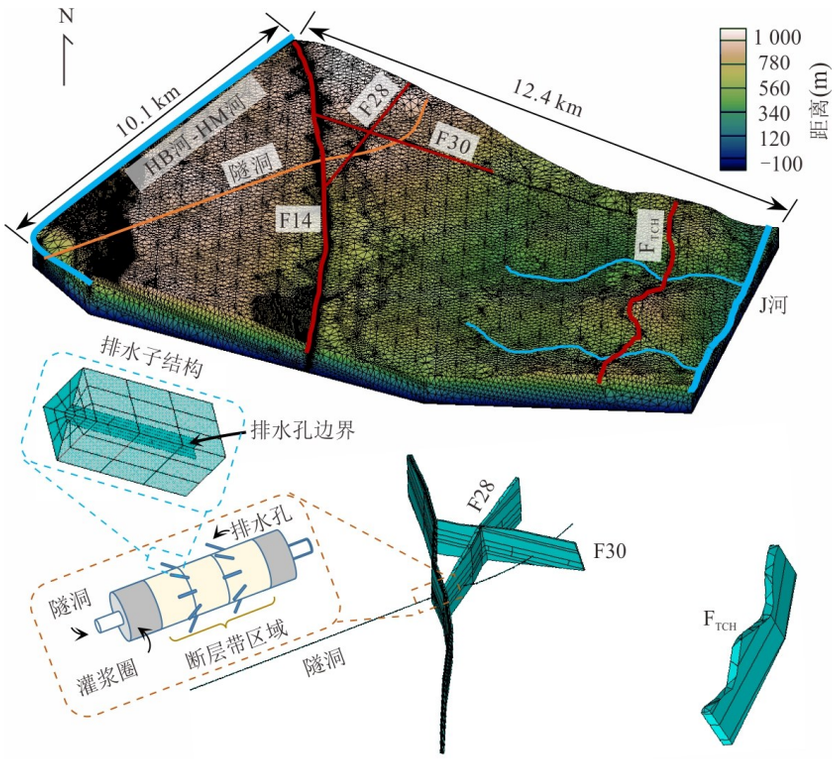

图 4 三维有限元模型

Fig.4 3D finite element model

工阶段的相对风险程度，并可进一步划分为高、中、低等级风险区，从而增强方法的工程针对性和实用性.

2.2 计算模型与计算条件

基于对地形地貌、地层岩性与地质构造的综合分析，建立的F14断层区域水文地质概念模型如图1所示.该水文地质单元面积约125 km^2，地势总体呈西南高、东北低特征，地下水流向自西南向东北.单元东侧以J河为定水头边界，西侧以HM河与HB河为定水头边界；南侧以山脊线为隔水边界；北侧因地下水沿坡向流动、垂直于坡向的水流交换微弱，亦概化为顺坡向的隔水边界.

根据钻孔压水试验成果、工程地质勘察资料及类似工程经验，确定了三维渗流场计算所需的渗流参数取值.研究区域内不同地层及断层带岩体的渗透性差异显著，参数取值过程中充分考虑了岩性组成、结构破碎程度及断层带内部非均质性特征，并采用分区赋值的方式加以体现.高渗透性地层主要包括 P_2q 和 P_1 碳质页岩夹灰岩、ϵ_3sn 白云岩及 O_{2+3} 碳质页岩，其渗透系数介于 6.2×10^{-5}～12.5×10^{-5} cm/s；低渗透性的相对隔水层则主要为 $S_{2\text{-}4}$ 与 S_1ln 砂质页岩、ϵ_2qn 白云岩，以及 ϵ_1sp+s 白云岩－灰岩－页岩互层，渗透系数普遍介于 0.2×10^{-5}～0.4×10^{-5} cm/s，较前者低约1～2个数量级；其余地层渗透性居中，多介于 1.0×10^{-5}～3.0×10^{-5} cm/s.上述取值能够合理反映不同地层间地下水流动能力的差异.

断层结构方面，F14断层带表现出强烈的非均质性.在数值模型中，结合断层带岩性组成与结构特征，将断层带内部C1～C8各条带作为相互独立的三维实体单元进行建模，以反映断层带内部结构的非均质特征.各条带在空间上的分布位置及其与隧洞轴线的相对关系均依据地质剖面进行约束，并分别赋予对应的渗透系数.胶结较差的碎裂岩条带渗透系数最高（37.4×10^{-5} cm/s），断层影响带次之（31.2×10^{-5} cm/s），断层碎屑物条带相对较低（6.2×10^{-5} cm/s），整体构成区域渗流场的优势通道与关键控制构造.F28与F30断层作为区域性导水构造，分别采用均一高渗透性赋值，其渗透系数分别为 31.2×10^{-5} cm/s 与 12.5×10^{-5} cm/s.此外，针对隧洞周边设置的灌浆圈，其渗透系数取为 0.3×10^{-5} cm/s，该取值综合参考了工程设计参数、现场灌浆工艺水平及既有类似隧洞工程经验，明显低于周边围岩及断层岩体的渗透系数，能够合理反映灌

浆圈形成低渗透阻水体、削弱地下水向隧洞汇流能力的工程效果.储水率方面,本文涉及的岩体储水率取值位于1.0×10^{-6}～1.0×10^{-5} m^{-1}的常用范围内;而灌浆圈储水率取值设为5.0×10^{-7} m^{-1}.总体而言,本文所采用的各类渗流参数取值均与研究区水文地质条件及类似工程中的常用参数范围保持一致,在体现断层带与围岩渗透性差异的同时,兼顾了工程尺度瞬态渗流分析对参数物理意义与计算稳定性的要求.

为了满足渗流场计算分析的需要,建立了与研究区水文地质单元对应的三维有限元模型,如图4所示.有限元模型的长、宽、高分别为10.1 km、12.4 km、1.1 km,对范围内的地形地貌、主要地层和地质构造、隧洞及渗控系统(排水孔、灌浆圈)都进行了精细建模.模型采用六面体和部分退化的四面体单元剖分,共计单元370万个、节点69万个;网格尺寸由工程结构向地层结构逐渐过渡,在靠近工程结构的区域进行精细划分,例如:排水孔单元最大尺寸为0.3 m、断层单元尺寸约为5～15 m,并逐步过渡至远离隧洞区域的地层单元,最大尺寸可达100 m.边界条件设置除了与水文地质单元一致的边界条件外,还在河水淹没之上的地面、排水孔与隧洞表面设为潜在溢出边界,在模型地表面的GX河、BL河设置为定水头边界.河流的定水头值设置为对应各河流的多年平均水位.

数值模拟中考虑了2种工况:(1)无渗控措施工况,即隧洞直接掘进而未采取任何渗控措施;(2)灌浆＋排水工况,即采取地表定向超前灌浆和超前排水的联合渗控措施.在此基础上,开展了渗流场瞬态演化特征分析,以及基于涌水量和最大渗透坡降的渗控措施有效性评价,以评估隧洞掘进过程的渗流安全.

2.3　初始渗流场三维特征及模型有效性验证

基于2.2节所述渗流参数取值和边界条件,模拟得到的初始渗流场水头分布如图5所示,为后续施工期非稳态渗流模拟提供了初始条件.模拟结果显示,初始渗流场以西侧水位较高的HM河和HB河为上游补给边界,水流整体自西南流向东北方向的J河.数值模拟较好地再现了地下水渗出地表并汇聚成河的水文地质特征,即:在地表高程较低的单元中部区域,地下水从地表渗出并汇集,形成了BL河与GX河等地表水系.

为验证渗流模型及参数取值的合理性,选取沿隧洞轴线布置的钻孔观测水位与模拟结果进行对比分析(图5).结果显示,模拟水位与观测水位的绝对误差不超过10 m,平均误差为5.2 m,在研究区地下水埋深达500 m以上的条件下,该误差小于总水头的2%;且水头分布整体趋势和空间分布特征一致,能够较好地反映研究区地下水位的实际分布情况.考虑到研究区尺度较大、地层与断层结构复杂,该精度水平满足工程渗流分析的要求;此外,初始渗流场在整体水头数值上存在的小幅误差,不会改变渗流场的演化趋势及高渗透坡降区域的空间分布特征,对施工期渗流安全分析与渗透失稳风险判定的影响有限.因此,本文建立的三维渗流模型及其参数取值具有良好的可靠性.

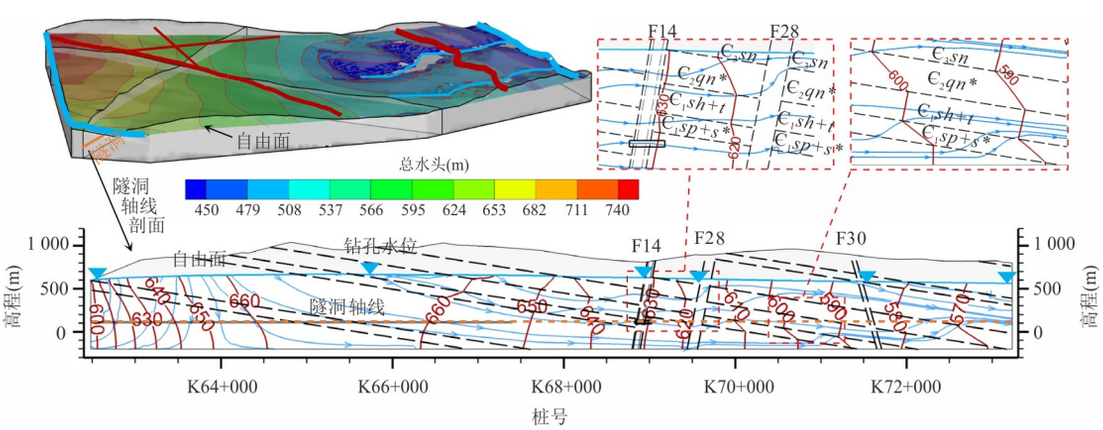

图5　研究区域初始渗流场三维特征

Fig.5　Three-dimensional characteristics of the initial seepage field in the study area

ϵ_3sn.寒武系上统三游洞组;ϵ_2qn.寒武系中统覃家庙组;ϵ_1t-sh.寒武系下统天河板组－石龙洞组;ϵ_1s-sp.寒武系下统水井沱组－石牌组

从隧洞轴线剖面图中的水头线与流线分布可见，该剖面内的水流方向在桩号 K64＋000 处发生分异：小于该桩号区域水流向东南（小桩号方向），大于该桩号区域则向东北（大桩号方向）流动，这与三维流场特征一致．该现象主要原因在于：西北角区域较高的地形与水头条件，导致在 K64＋000 附近出现指向小桩号方向的水流速度分量．剖面图中流线与等水头线未完全正交，是由于三维渗流场在二维投影过程中损失了部分流速方向信息．

图 5 所示的隧洞轴线剖面图中以“*”符号标示出了相对隔水层；可以看出，隧洞轴线位于地下水自由面以下 505～550 m 的深度，承受较大的孔隙水压力．从放大插图可以注意到，断层与地层之间的渗透性非均质特征对地下水流动行为具有显著影响：首先，由于地层间渗透系数的非均质性，等水头线在地层界面处发生明显转折；其次，在相对隔水层（ϵ_2qn、ϵ_1sp+s）区域，流线较为稀疏，水流主要集中于导水性较好的地层（ϵ_3sn、ϵ_1sh+t）．此外，断层 F28 的上下盘错动，导致透水性较好的岩体在空间上不连续；而导水性能良好的断层 F28 则形成连通上、下盘的渗流通道．地下水在从桩号较小的一侧穿越断层 F28 并进入较大桩号区域的过程中，由于断层 F28 导水性强，流线在此处明显地向地表方向上翘．相反，对于上下盘几乎不存在错动的断层 F14，断层带内渗透系数最低的条带（断层碎屑物）与围岩渗透系数处于同一数量级，地下水在垂直穿越断层 F14 时未观察到明显的流线弯折现象．

3 施工期渗流场演化与风险分析

3.1 渗流场演化特征

在完成初始渗流场的建立后，对隧洞施工期“无渗控措施”与“灌浆＋排水”两种典型工况的非稳态渗流场进行动态模拟，以分析开挖步进和渗控措施对地下水场的影响规律，重点揭示了断层带非均质结构对渗流通道、水头分布和渗透坡降的控制效应．

3.1.1 无渗控措施工况 图 6 与图 7 展示了在无渗控措施工况下，沿隧洞轴线剖面的总水头与渗透坡降分布特征．由图 6 可知，隧洞开挖形成新的排水边界，导致已开挖洞段周围水头显著下降，形成以隧洞为中心的渗流扰动区，同时伴随着隧洞附近渗透坡降的升高．图 7 表明，随着开挖掌子面逐渐接近并穿越断层 F14，地下水扰动范围持续向开挖方向扩展．位于地下水自由面以下隧洞的排水作用引起地下水位下降，尤其在断层 F14 与断层 F28 地表出露区域附近更为明显；断层导水性强，地下水迅速向隧洞排泄，自由面降幅达 30～70 m．此外，断层带内

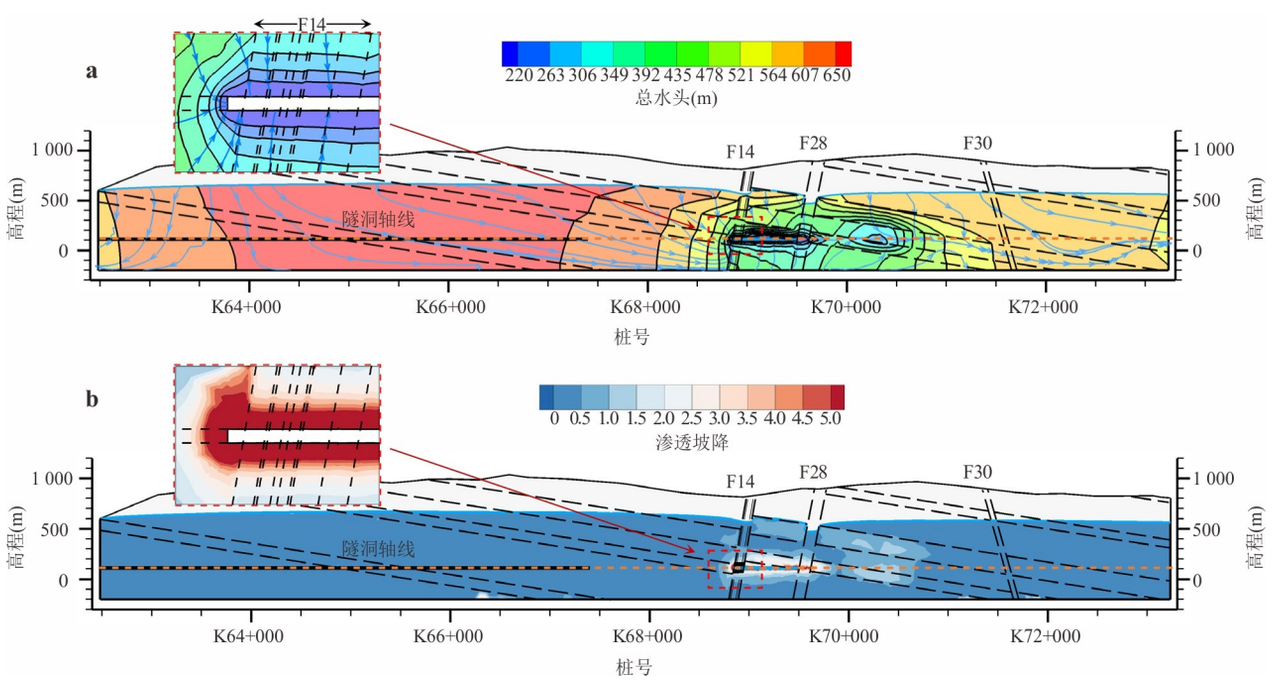

图 6 无渗控措施工况下隧洞轴线剖面的渗流场分布（开挖步 step 9）

Fig.6 Seepage field along the tunnel axis section at excavation step 9 under the condition without seepage control measures

a. 总水头；b. 渗透坡降

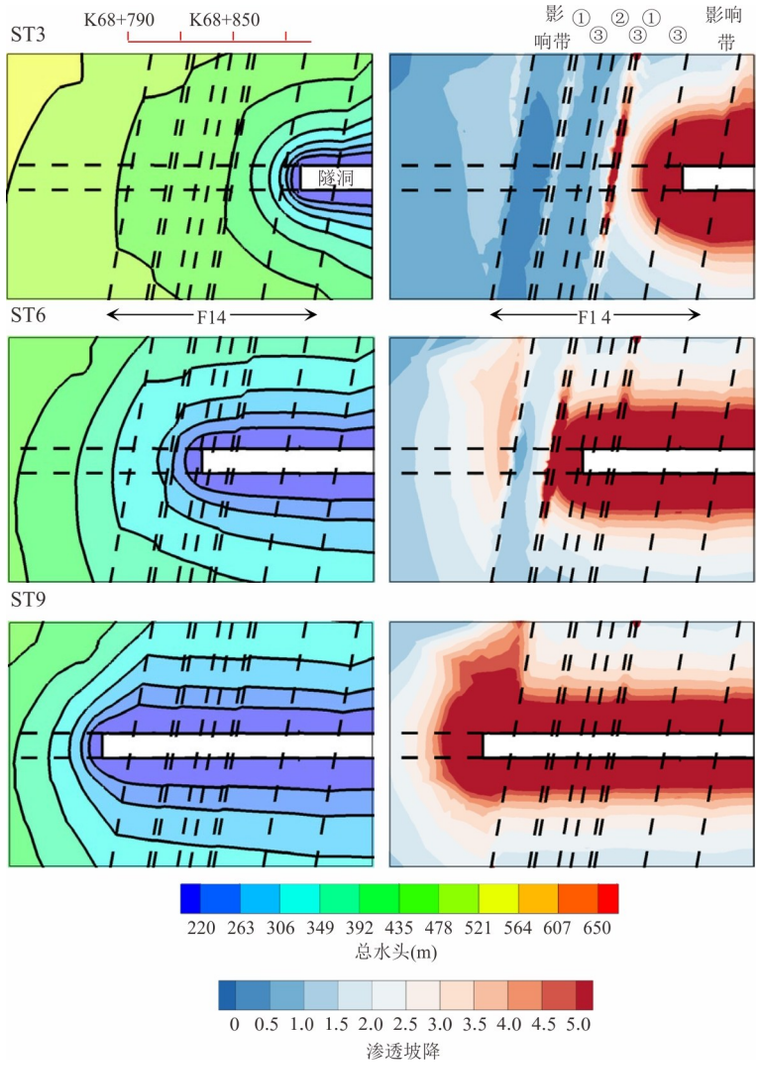

图 7　无渗控措施工况下渗流场随开挖步的演化

Fig.7　Evolution of the seepage field with excavation steps under the condition without seepage control measures

部各分层间的渗透性差异也导致等水头线在分层界面处出现转折.此外,尽管断层碎屑物条带①的厚度远小于其他条带,但其较低的渗透系数仍导致穿越该条带的地下水等水头线弯折明显.

对于渗透坡降分布,在隧洞穿越断层 F14 过程中,最高渗透坡降集中于掌子面及其附近的洞周区域;渗透坡降最大值介于 15～50,反映出隧洞对地下水的强烈汇聚作用,以及该区域存在较高的渗透失稳风险.此外,在断层 F14 内部,较低渗透系数的条带渗透坡降同样较大.具体而言,渗透性较低的断层碎屑物条带(条带①)中渗透坡降显著高于胶结较差的碎裂岩条带(条带②)与碎裂化白云岩条带(条带③),该现象在图 7 中的第 6 开挖步尤为突出.断层碎屑物本身抗渗透侵蚀能力较弱,因此其渗透失稳风险较大.在远离隧洞区域,相对隔水的 $\epsilon_2 qn$ 与 $\epsilon_1 sp+s$ 地层中,渗透坡降约为 1～2,高于其他岩层接近于 0 的渗透坡降,进一步揭示渗透系数非均质性对渗流响应的重要控制作用.

3.1.2　灌浆+排水工况　图 8 和图 9 展示了灌浆+排水工况下,沿隧洞轴线剖面的总水头与渗透坡降分布特征.需要指出的是,在“灌浆+排水”工况中,超前灌浆与超前排水并非同时生效,而是随隧洞开挖步进呈明显的阶段性特征.在隧洞开挖至断层带外侧及初始进入断层阶段(开挖步 4 之前),洞周仅设置低渗透性的灌浆圈,排水孔尚未发挥作用,此阶段渗流场演化主要受超前灌浆控制;而随着隧洞进一步向断层内部掘进(开挖步 4 之后),排水孔逐步投入使用,形成新的地下水排泄边界,渗流场特征开始显著受超前排水控制.因此,通过对不同开挖阶段渗流场特征的对比分析,可以在不额外增加

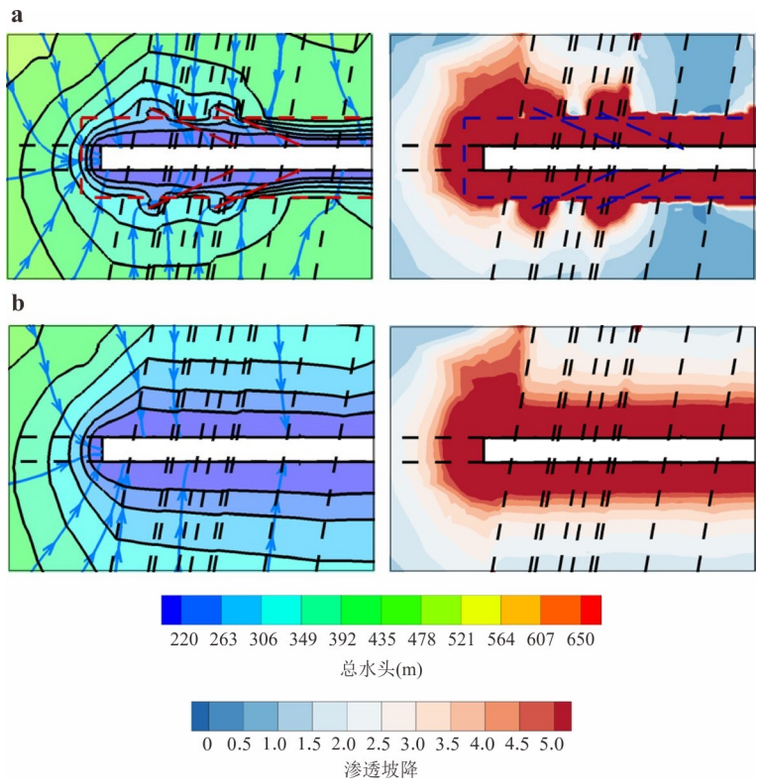

图 8 灌浆＋排水渗控措施对隧洞周边渗流场的影响

Fig.8 Influence of pre-grouting and pre-drainage seepage control measures on the seepage field around the tunnel

a. 灌浆＋排水工况；b. 无渗控措施工况

工况数量的前提下，实现对不同渗控措施主导效应的定性区分，同时符合工程施工过程中的实际实施顺序.

如图 8 所示，在断层外侧未设置排水孔的灌浆圈区域，隧洞周围渗流场形态主要受超前灌浆控制.灌浆圈渗透性低于围岩，导致灌浆圈内部水头迅速下降，等水头线分布密集，渗透坡降显著增大，并且在隧洞临空面附近达到最大值.这表明灌浆圈起到了明显的阻水作用，但也由于其低渗透性，外侧水头较未采取渗控措施时显著升高，增幅达约 170 m.

随着隧洞开挖进一步推进到断层 F14 内部(图 9)，排水孔的设置引入了新的地下水排泄边界，使洞周地下水经排水孔汇入隧洞内，洞周水头显著下降，等水头线分布明显稀疏于仅设灌浆圈但未设排水孔的洞段，显示出排水孔良好的降压效果.灌浆与排水的协同作用在提高岩体固结程度与稳定性的同时，有效降低了洞周水头，并使高渗透坡降集中于抗渗性较强的灌浆圈内和排水孔孔壁附近.与未灌浆的工况相比，未经灌浆固结区域的断层岩体所承受的渗透坡降显著减小.

3.2 涌水量与渗透失稳风险分析

上述施工期渗流场的演化特征从物理机制层面对数值模拟结果的合理性进行了间接验证.模拟结果显示，隧洞开挖后洞周水头显著下降、渗透坡降在掌子面及低渗透性条带内集中，超前灌浆导致洞周水头抬升而超前排水具有明显降压作用，这些现象均与地下水动力学和工程实践中已认识的渗流规律高度一致，进一步表明模拟结果在物理机制层面具有合理性.

本节基于数值计算结果，对不同工况下的隧洞总涌水量、断层岩体最大渗透坡降及渗透稳定性进行综合分析，通过将渗透坡降与渗透失稳临界坡降值进行对比，识别渗透失稳潜在高风险区，评价渗控措施的效果.

3.2.1 涌水量变化规律 图 10 对比了两种工况下隧洞涌水量随时间的动态变化，揭示了超前灌浆与超前排水措施对涌水控制的影响规律.超前灌浆对抑制涌水量效果显著：在无渗控措施条件下，当隧洞穿越断层 F14 的破碎带(C1)时(即开挖步 2～开挖步 3，对应于图 10 中的第 0～4.9 d)，涌水量骤增 21 050 m^3/d，这是由于断层影响带渗透系数较高、

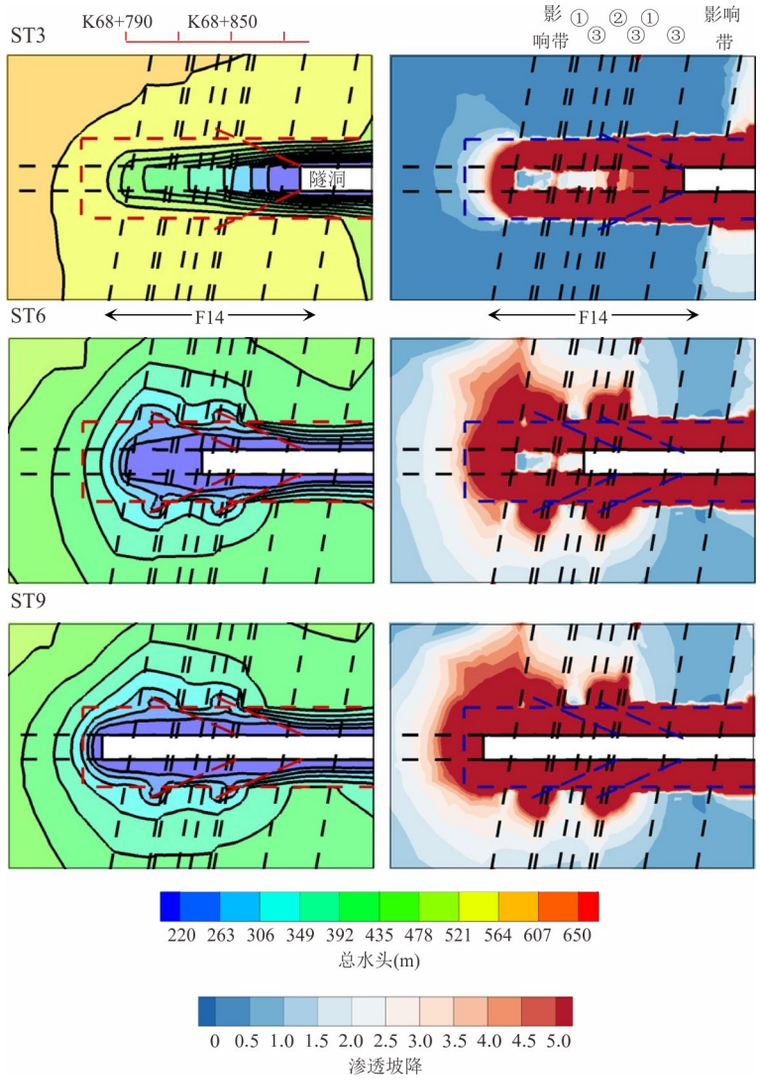

图 9　灌浆＋排水工况下渗流场随开挖步的演化

Fig.9　Evolution of seepage field with excavation steps under the condition with pre-grouting and pre-drainage measures

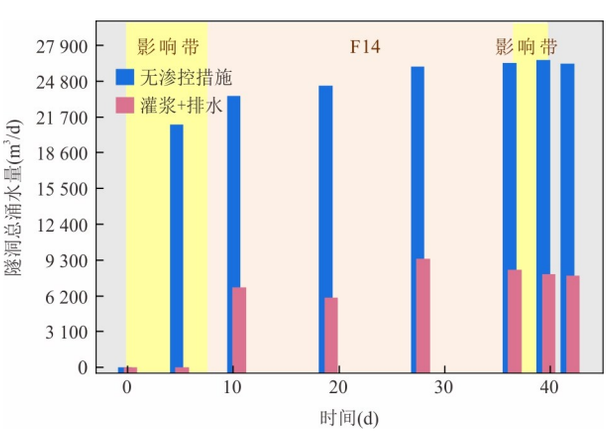

图 10　不同工况下隧洞涌水量随时间的变化

Fig.10　Variation of tunnel inflow over time under different conditions

导水能力强;而在考虑超前灌浆后,该阶段涌水量仅增加 26.7 m^3/d,说明低渗透性的灌浆圈具有较好的阻水性能,显著降低了隧洞涌水.

超前排水措施通过将排泄边界延伸至断层岩体内部,增强了地下水向隧洞汇集的能力,从而导致涌水量上升.在开挖步 4 和开挖步 6(对应于图 10 中的第 10.3 d 和第 27.7 d),“灌浆＋排水”工况下的涌水量增量分别为 6 892 m^3/d 与 3 398 m^3/d,明显高于“无渗控措施”工况下的 2 464 m^3/d 与 1 673 m^3/d,体现了排水孔对地下水的有效引导与排出作用.

尽管超前灌浆与超前排水对涌水量的影响机制不同,但二者联合使用仍能实现涌水总量的有效控制.在开挖步 9 时(即第 41.9 d),“无渗控措施”工况下涌水量高达 26 300 m^3/d,而采用超前灌浆与超前排水联合措施后,涌水量降至 7 958 m^3/d,降幅达

69.7%，显示出协同控制策略的综合效益.

3.2.2 最大渗透坡降分布 图 11 和图 12 分别展示了断层 F14 中各条带(C1～C8，分布位置见图 3)在未灌浆区域内的最大渗透坡降统计值和空间分布.整体而言，在无渗控措施工况下，断层带范围内的最大渗透坡降多为 0～30，但在两个区域出现明显集中，存在较高的渗透失稳风险：一是在渗透性较低的断层影响带(C1)中，当开挖进入第 2 步、隧洞掌子面刚触及 C1 条带时(第 0 d)，掌子面附近岩体的最大渗透坡降达到 49.2；二是在低渗透性的断层碎屑物条带(C3)中(第 19 d)，随着开挖进入该区域，掌子面附近渗透坡降急剧上升至 54.0～59.8.由此可见，断层条带 C1 与 C3 承受了较大的渗透坡降，渗流失稳风险较高，需采取针对性防控措施.上述高风险区域的识别也表明，在有限元模型中考虑断层带内部渗透系数的非均质性，有助于更准确地识别容易发生渗透失稳的关键开挖阶段.

在采用超前灌浆与超前排水联合措施后，未灌浆固结的岩体区域(灌浆圈外)渗透坡降显著降低，普遍处于 0～13 之间；高渗透坡降主要分布在 C3 和 C7(断层碎屑物)、C4(碎裂化白云岩)以及 C8(断层影响带)等条带，最大值约为 15，较无渗控工况下的峰值 59.8 下降约 74.9%.尽管灌浆圈内部渗透坡降仍处于较高水平，但灌浆的胶结作用能有效增强围岩抗渗稳定性(Li *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2020).因此，超前灌浆与超前排水的联合应用可显著抑制断层 F14 未灌浆固结岩体中的渗透坡降，提升隧洞开挖施工的渗流安全水平.

3.2.3 渗透失稳风险判定 依据第 2.1 节建立的渗透失稳风险评价方法，对不同渗控工况下的渗透坡降进行阈值对比分析，以判定潜在渗透失稳高风险区域.在渗流稳定性分析中，临界渗透坡降是判定岩体是否发生渗透失稳的重要判据；然而，在实际工程中确定渗透失稳的临界阈值仍具有较大不确定性.断层带岩体发生渗透失稳的临界渗透坡降与岩性组成、结构特征、充填物性质及工程尺度条件密切相关，其并非严格意义上的材料常数.通过结合断层 F14 的工程地质条件、施工期地下水压力特征及既有类似工程经验，可以选取渗透坡降 $i_c=22$ 作为施工期渗透失稳的工程判定参考阈值，以用于不同开挖阶段和不同渗控工况下渗透失稳风险的相对识别，而非对断层岩体发生渗透破坏临界条件的严格界定.

为验证所选参考阈值在数值上的合理性，本文参考了 Wang *et al.* (2025)针对充填型断层材料开展的渗流侵蚀试验研究.该研究表明，当渗透坡降

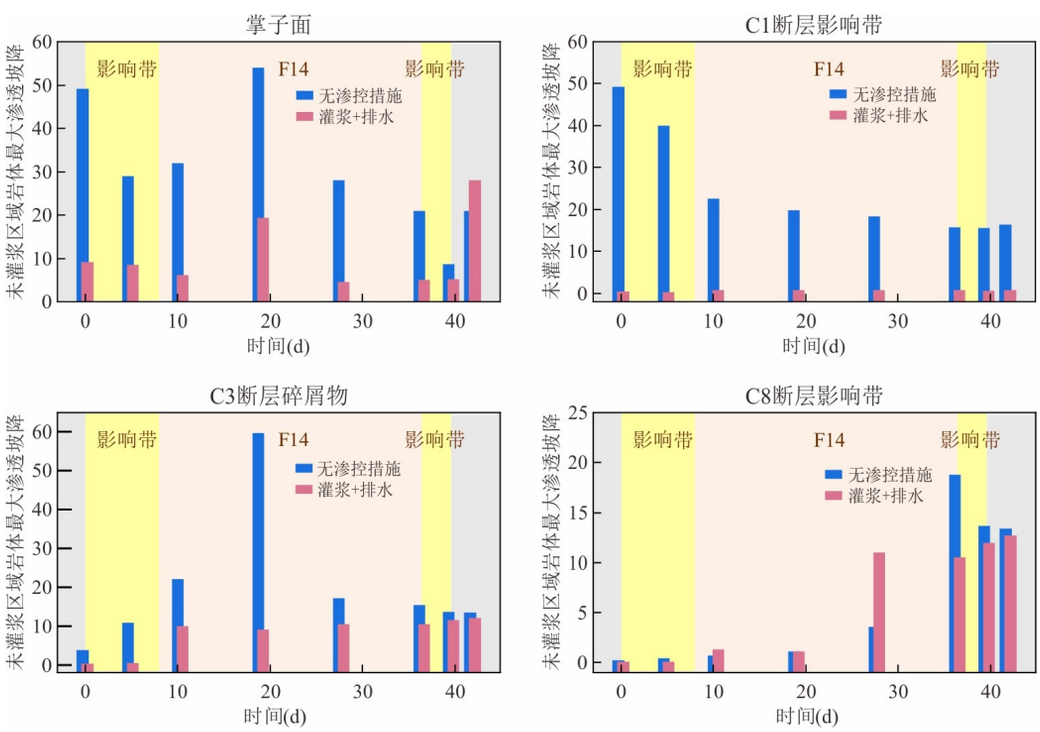

图 11 不同工况下未灌浆区域岩体最大渗透坡降随时间的变化

Fig.11 Variation of maximum hydraulic gradient in the ungrouted rock mass over time under different conditions

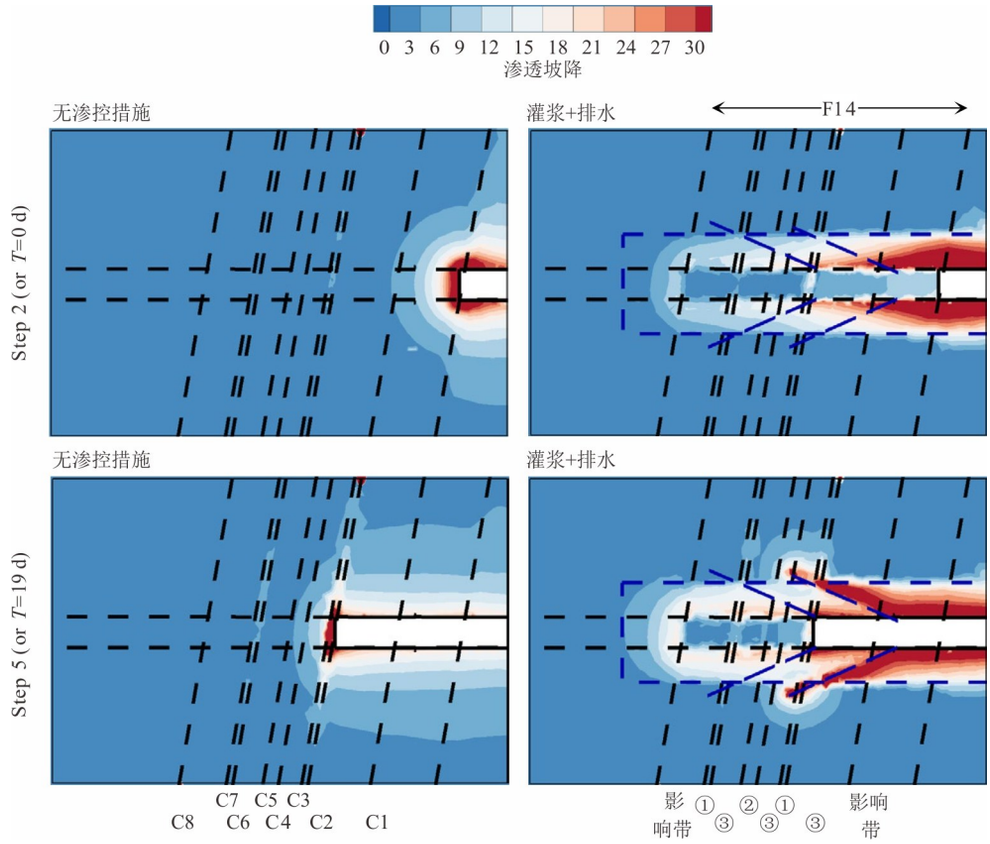

图 12　不同工况下未灌浆区域岩体渗透坡降在第 0 d 和第 19 d 的分布情况

Fig.12　Hydraulic gradient distribution in the ungrouted rock mass for day 0 and day 19 under different conditions

接近 25 时,试样内部出现明显的颗粒迁移与持续侵蚀现象.本文所采用的临界坡降值与上述试验结果在数量级上具有一致性,因此可作为工程判定的参考依据;而将临界渗透坡降取为定值,能保证了评价方法的物理可解释性,也提高了工程应用中的可操作性.

图 13 给出了 2 种工况下最大渗透坡降随时间的变化规律.结果显示,在“无渗控措施”工况下,断层 F14 内的最大渗透坡降最大值可达 59.8,远超临界阈值(i_c=22),存在显著的渗透失稳风险;而在“灌浆+排水”联合渗控工况下,渗透坡降始终被有效控制在 0~13 范围内,显著低于临界值,渗透失稳风险较低.需要指出的是,本研究以 i_c=22 作为代表性工程判定阈值,重点用于不同工况和施工阶段之间的相对风险对比;不同临界渗透坡降取值(比如 i_c=20 或 25)会影响风险区的绝对范围,但不会改变高风险区在空间位置及其随施工阶段演化的相对规律.

总体来看,从渗流场分布特征、涌水量、渗透坡降以及渗透稳定性等方面综合分析可知,所采用的

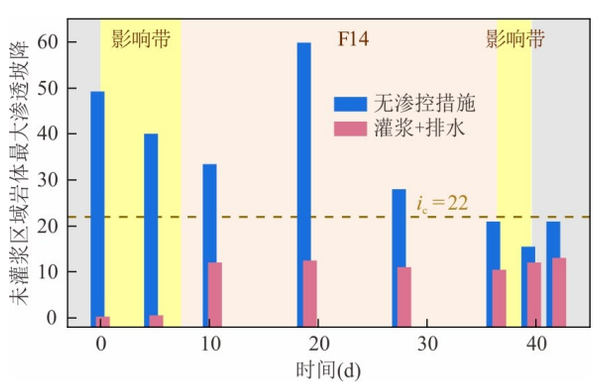

图 13　不同工况下渗透稳定性评估

Fig.13　Evaluation of seepage stability under different conditions

渗控措施设计合理、渗控效果显著.在保证施工质量的前提下,渗控措施能有效抑制隧洞涌水、降低孔隙水压力,其防渗效果能满足隧洞工程安全施工的要求.基于渗透坡降定量分析与渗透失稳阈值评估验证了本文风险评价思路的可行性,为复杂断层带条件下隧洞渗透失稳风险的预测与防控提供了方法参考.

4 结论

本文针对深埋隧洞穿越复杂断层带时的渗流特征及渗控措施效果评价问题,提出了一种基于瞬态渗流精细模拟和渗透坡降阈值对比的渗透失稳风险定量评价方法.该方法以瞬态渗流模拟为核心,结合渗流场关键特征参数(渗透坡降)与渗透失稳临界判据,实现了渗透失稳风险的精细识别与定量评估,为复杂地质条件下地下工程的风险预测与安全设计提供可操作的技术路径.

基于该方法,本文以某引调水工程的深埋隧洞穿越大型断层带F14为工程背景,建立高精度三维瞬态渗流有限元模型,采用抛物型变分不等式方法,系统分析了隧洞开挖过程中地下水水头、渗透坡降及涌水量的动态响应特征,揭示了断层带内部渗透系数非均质性对渗流场演化的关键控制作用,并定量评估了超前灌浆与超前排水措施的协同控制机制及效果.本文主要研究结论如下:

(1)断层带内部渗透系数非均质性是控制渗流场演化与渗透稳定性的关键因素.低渗透性条带易形成高渗透坡降,增大局部渗透失稳风险;而高渗透性条带则有利于地下水疏导.在数值模型中考虑断层内部各条带渗透特性的差异,能够更准确地捕捉隧洞掘进过程中地下水动态响应特征及渗透失稳风险演变规律.

(2)超前灌浆形成的低渗透性灌浆圈具有良好的阻水效果,可显著抑制隧洞涌水量,但会导致灌浆圈外侧水头抬升,局部增幅约达170 m.超前排水孔具有较强的降压作用,但会增大局部涌水量;灌浆与排水联合使用能够在实现水头有效控制的同时,使总涌水量降低69.7%.

(3)在无渗控措施条件下,断层影响带(C1)与断层碎屑物条带(C3)为渗透失稳高风险区域,掌子面附近最大渗透坡降分别达49.2与59.8;采用灌浆与排水联合措施后,未灌浆固结区域的岩体渗透坡降最大值下降约74.9%,降至临界坡降以下,显著提升了隧洞施工的渗流安全水平.

本研究所提出的隧洞穿越断层带瞬态渗流分析与隧洞围岩渗透稳定性评价方法,可为类似水文地质和工程地质条件下隧洞工程的渗透稳定性分析与防控设计提供理论依据与实践参考.

References

Chen, Y. F., Hu, R., Zhou, C. B., et al., 2011. A New Parabolic Variational Inequality Formulation of Signorini's Condition for Non-Steady Seepage Problems with Complex Seepage Control Systems. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(9): 1034−1058. https://doi.org/10.1002/nag.944

Chen, Y. F., Zhou, C. B., Zheng, H., 2008. A Numerical Solution to Seepage Problems with Complex Drainage Systems. *Computers and Geotechnics*, 35(3): 383−393. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2007.08.005

Chen, Z. Q., He, C., Yu, B. X., et al., 2025. Evolution Characteristics of Seepage-Stress Fields and Optimization of Waterproof-Drainage System during Operation Period of Urban Tunnels with Small Interval. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 47(8): 1572−1582 (in Chinese with English abstract).

Faulkner, D. R., Mitchell, T. M., Healy, D., et al., 2006. Slip on 'Weak' Faults by the Rotation of Regional Stress in the Fracture Damage Zone. *Nature*, 444(7121): 922−925. https://doi.org/10.1038/nature05353

Gao, C. L., Zhou, Z. Q., Yang, W. M., et al., 2019. Model Test and Numerical Simulation Research of Water Leakage in Operating Tunnels Passing through Intersecting Faults. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 94: 103134. https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103134

Gong, Y. J., Zhang, K. H., Wang, J. D., et al., 2025. Structure, Permeability and Fluid Flow in Sedimentary Clastic Rock Fault Zone. *Earth Science*, 50(5): 1968−1986 (in Chinese with English abstract).

Gudmundsson, A., Simmenes, T. H., Larsen, B., et al., 2010. Effects of Internal Structure and Local Stresses on Fracture Propagation, Deflection, and Arrest in Fault Zones. *Journal of Structural Geology*, 32(11): 1643−1655. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.08.013

Hong, K. R., 2017. Development and Prospects of Tunnels and Underground Works in China in Recent Two Years. *Tunnel Construction*, 37(2): 123−134 (in Chinese with English abstract).

Hu, H., Zhang, B. W., Zuo, Y. Y., et al., 2018. The Mechanism and Numerical Simulation Analysis of Water Bursting in Filling Karst Tunnel. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(2): 1197−1205. https://doi.org/10.1007/s10706-017-0386-6

Li, S. C., Li, S. C., Zhang, Q. S., et al., 2010. Predicting Geological Hazards during Tunnel Construction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(3): 232−242. https://doi.org/10.3724/sp.j.1235.2010.00232

Li, S. C., Liu, C., Zhou, Z. Q., et al., 2021. Multi-Sources Information Fusion Analysis of Water Inrush Disaster in Tunnels Based on Improved Theory of Evidence. *Tunnelling and Underground Space Technolo-*

gy, 113: 103948. https://doi. org/10.1016/j. tust.2021.103948

Li, S. C., Liu, R. T., Zhang, Q. S., et al., 2016. Protection against Water or Mud Inrush in Tunnels by Grouting: A Review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5): 753－766. https://doi. org/10.1016/j.jrmge.2016.05.002

Li, S. C., Wang, K., Li, L. P., et al., 2017. Mechanical Mechanism and Development Trend of Water-Inrush Disasters in Karst Tunnels. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 49(1): 22－30 (in Chinese with English abstract).

Li, Y. G., Malin, P. E., 2008. San Andreas Fault Damage at SAFOD Viewed with Fault-Guided Waves. *Geophysical Research Letters*, 35(8): 2007GL032924. https://doi.org/10.1029/2007gl032924

Li, Z., He, C., Yang, S. Z., et al., 2016. Experimental Study on Tunnel Inflow without Considering the Influence of Excavation Disturbance. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(12): 2499－2506 (in Chinese with English abstract).

Liu, J. Q., Chen, W. Z., Yang, D. S., et al., 2018. Nonlinear Seepage-Erosion Coupled Water Inrush Model for Completely Weathered Granite. *Marine Georesources & Geotechnology*, 36(4): 484－493. https://doi. org/10.1080/1064119x.2017.1340373

Ma, D., Duan, H. Y., Zhang, J. X., 2022. Solid Grain Migration on Hydraulic Properties of Fault Rocks in Underground Mining Tunnel: Radial Seepage Experiments and Verification of Permeability Prediction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 126: 104525. https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104525

Meng, L. B., Li, H. Y., Li, T. B., et al., 2024. Study on Explosive Rockburst Mechanism Based on Two-Dimensional Meso-Fracture Model. *Earth Science*, 49(8): 2789－2798 (in Chinese with English abstract).

Meng, Z. P., Li, G. Q., Xie, X. T., 2012. A Geological Assessment Method of Floor Water Inrush Risk and Its Application. *Engineering Geology*, 143: 51－60. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.06.004

Park, K. H., Owatsiriwong, A., Lee, J. G., 2008. Analytical Solution for Steady-State Groundwater Inflow into a Drained Circular Tunnel in a Semi-Infinite Aquifer: A Revisit. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(2): 206－209. https://doi. org/10.1016/j. tust.2007.02.004

Ren, L., Wang, X. R., Jing, L. H., et al., 2025. Deformation Law of the Main Canal Bottom Plate under Coupling Effect of Main Canal Leakage and Shield Tunneling. *Earth Science*, 50(6): 2387－2399 (in Chinese with English abstract).

Shao, R. Q., Lin, P., Xu, Z. H., et al., 2025. Machine Learning of Element Geochemical Anomalies for Adverse Geology Identification in Tunnels. *Journal of Earth Science*, 36(3): 1261－1276. https://doi. org/10.1007/s12583-024-0090-4

Wang F. M., Cai Z. Y., Guo C. C., et al., 2025. Review on Water Disaster Prevention of Tunnels. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 47(11): 2225－2236 (in Chinese with English abstract).

Wang, J. H., Li, S. C., Li, L. P., et al., 2018. Dynamic Evolution Characteristics and Prediction of Water Inflow of Karst Piping-Type Water Inrush of Tunnels. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 40(10): 1880－1888 (in Chinese with English abstract).

Wang, M. S., 2010. An Overview of Development of Railways, Tunnels and Underground Works in China. *Tunnel Construction*, 30(4): 351－364 (in Chinese with English abstract).

Wang, M. X., Ma, S. J., Zhou, Z. Q., et al., 2025. Impact of Initial Dry Density on the Evolution Mechanism of Mud and Water Burst in Fault Fracture Zones: A Series of Experimental Studies. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 158: 106423. https://doi. org/10.1016/j.tust.2025.106423

Wang, Y., Qin, F., Xia, Z. H., et al., 2012. Non-Darcy Flow Model and Numerical Simulation for Predicting Water Inflow in Deep Tunnel. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(9): 1862－1868 (in Chinese with English abstract).

Wang, Y., Wang, F., Ni, X. D., 2009. Prediction of Water Inflow in Tunnel Based on Stochastic Finite Element of Unsteady Seepage. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(10): 1986－1994 (in Chinese with English abstract).

Wu, J., Zhou, Z. F., Li, M. W., et al., 2019. Advance on the Methods for Predicting Water Inflow into Tunnels. *Journal of Engineering Geology*, 27(4): 890－902 (in Chinese with English abstract).

Xu, Z. G., Wang, Y. P., Xiao, Y., et al., 2018. Risk Rating Index and Evaluation Method for Water Inrush in Long-Deep Tunnels. *China Journal of Highway and Transport*, 31(10): 91－100 (in Chinese with English abstract).

Xu, Z. Y., Chen, Z. Q., Zou, X. H., et al., 2025. Impact of Fault Fracture Zones on the Seepage Field Distribution and Groundwater Discharge of Tunnels. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(5): 231. https://doi.org/10.1007/s10064-025-04254-7

Yang, Z. B., Juanes, R., 2018. Two Sides of a Fault: Grain-Scale Analysis of Pore Pressure Control on Fault Slip. *Physical Review E*, 97(2): 022906. https://doi. org/10.1103/physreve.97.022906

Yuan, J. J., Chen, Y. F., Hu, R., et al., 2024. Seepage Be-

havior and Its Control Performance Assessment for a High Concrete Faced Rockfill Dam in Karst Areas. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 43(2): 481－494 (in Chinese with English abstract).

Zhang, D. L., Sun, Z. Y., 2019. An Active Control Waterproof and Drainage System of Subsea Tunnels and Its Design Method. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(1): 1－17 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Q. S., Wang, D. M., Li, S. C., et al., 2017. Development and Application of Model Test System for Inrush of Water and Mud of Tunnel in Fault Rupture Zone. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 39(3): 417－426 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Q. Y., Chen, W. Z., Yuan, J. Q., et al., 2020. Experimental Study on Evolution Characteristics of Water and Mud Inrush in Fault Fractured Zone. *Rock and Soil Mechanics*, 41(6): 1911－1922, 1932 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z. G., Wang, J. C., Zhao, Q. H., et al., 2020. Analytical Solution of Water Head Distribution on Tunnel Structure Adjacent to Water Replenishment Fault in Water-Rich Mountain Area. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(S2): 3378－3394 (in Chinese with English abstract).

Zhao, J. H., Bo, L., Chen, J. T., et al., 2020. Mechanism of Seepage-Stress Fault Water Inrush and Grouting Seal. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(11): 404. https://doi.org/10.1007/s12517-020-05319-5

Zheng, H., Liu, D. F., Lee, C. F., et al., 2005. A New Formulation of Signorini's Type for Seepage Problems with Free Surfaces. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 64(1): 1－16. https://doi.org/10.1002/nme.1345

Zheng, X. K., Yang, Z. B., Wang, S., et al., 2021. Evaluation of Hydrogeological Impact of Tunnel Engineering in a Karst Aquifer by Coupled Discrete-Continuum Numerical Simulations. *Journal of Hydrology*, 597: 125765. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125765

Zhou, Y., Li, S. C., Li, L. P., et al., 2015. 3D Fluid-Solid Coupled Model Test on Water-Inrush in Tunnel Due to Seepage from Filled Karst Conduit. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(9): 1739－1749 (in Chinese with English abstract).

Zhou Z. Q., Li L. P., Shi S. S., et al., 2020. Study on Tunnel Water Inrush Mechanism and Simulation of Seepage Failure Process. *Rock and Soil Mechanics*, 41(11): 3621－3631. https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0131

中文参考文献

陈子全，何川，喻炳鑫，等，2025. 城市小净距隧道运营期渗流场－应力场演变规律及防排水结构优化. 岩土工程学报，47(8): 1572－1582.

宫亚军，张奎华，王金铎，等，2025. 沉积碎屑岩断裂带结构特征、渗透性及流体运移规律. 地球科学，50(5): 1968－1986.

洪开荣，2017. 我国隧道及地下工程近两年的发展与展望. 隧道建设，37(2): 123－134.

李术才，王康，李利平，等，2017. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势. 力学学报，49(1): 22－30.

李铮，何川，杨赛舟，等，2016. 不考虑开挖扰动影响的隧道涌水量预测模型试验研究. 岩石力学与工程学报，35(12): 2499－2506.

孟陆波，李昊禹，李天斌，等，2024. 基于二维细观裂隙模型的爆喷型岩爆机制. 地球科学，49(8): 2789－2798.

任磊，王晓睿，景来红，等，2025. 盾构掘进与干渠渗漏耦合作用下干渠变形规律. 地球科学，50(6): 2387－2399.

王复明，蔡直言，郭成超，等，2025. 隧道工程水灾害防治研究进展. 岩土工程学报，47(11):2225－2236.

王健华，李术才，李利平，等，2018. 隧道岩溶管道型突涌水动态演化特征及涌水量综合预测. 岩土工程学报，40(10): 1880－1888.

王梦恕，2010. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况. 隧道建设，30(4): 351－364.

王媛，秦峰，夏志皓，等，2012. 深埋隧洞涌水预测非达西流模型及数值模拟. 岩石力学与工程学报，31(9): 1862－1868.

王媛，王飞，倪小东，2009. 基于非稳定渗流随机有限元的隧洞涌水量预测. 岩石力学与工程学报，28(10): 1986－1994.

吴建，周志芳，李鸣威，等，2019. 隧洞涌水量预测计算方法研究进展. 工程地质学报，27(4): 890－902.

许增光，王亚萍，肖瑜，等，2018. 长深隧洞突涌水危险性等级指标及评价方法. 中国公路学报，31(10): 91－100.

袁晶晶，陈益峰，胡冉，等，2024. 岩溶地区高面板坝渗流特性与防渗安全评价. 岩石力学与工程学报，43(2): 481－494.

张顶立，孙振宇，2019. 海底隧道主动控制式防排水系统及其设计方法. 岩石力学与工程学报，38(1): 1－17.

张庆松，王德明，李术才，等，2017. 断层破碎带隧道突水突泥模型试验系统研制与应用. 岩土工程学报，39(3): 417－426.

张庆艳，陈卫忠，袁敬强，等，2020. 断层破碎带突水突泥演化特征试验研究. 岩土力学，41(6): 1911－1922，1932.

张治国，汪嘉程，赵其华，等，2020. 富水山岭地区邻近补水断层隧道结构上的水头分布解析求解. 岩石力学与工程学报，39(增刊2): 3378－3394.

周毅，李术才，李利平，等，2015. 隧道充填型岩溶管道渗透失稳突水机制三维流－固耦合模型试验研究. 岩石力学与工程学报，34(9): 1739－1749.