

王振明, 彭贵才, 蒋义奇等. 基于非线性流固耦合理论的富水隧洞力学响应特征研究[J]. 人民珠江, DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

基于非线性流固耦合理论的富水隧洞力学响应特征研究

王振明¹, 彭贵才¹, 蒋义奇^{2*}, 万发³, 宋明哲¹, 王宏¹, 蒋中明²

(1. 中国水利水电第六工程局有限公司, 辽宁 沈阳 118015; 2. 长沙理工大学水利与海洋工程学院, 湖南 长沙 410114; 3. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510610)

摘要: 富水隧洞开挖中国岩力学响应复杂, 传统线性流固耦合难以准确模拟隧洞力学响应。文章采用非线性流固耦合理论, 以实际工程为例, 研究隧洞开挖期、初衬期及运行期围岩渗流场、应力、位移及塑性区的时空演化。结果表明: 隧洞开挖期因卸荷排水使得孔压降低, 初衬后隧洞孔压回升且底部回升幅度大于顶部; 隧洞在进行初衬后底部应力集中, 顶部及侧部侧应力趋于稳定; 隧洞在内开挖期底部与顶部位移发展迅速, 初衬后位移进入稳态状态; 开挖完成后, 围岩出现局部拉伸破坏塑性区; 初衬施工后, 由于围岩中的应力重分布, 导致塑性区呈现扩大的趋势; 应力与渗透系数呈负相关, 应力越高的位置, 渗透系数越小。研究成果可为同类工程提供参考。

关键词: 大断面隧洞; 非线性流固耦合; 隧洞力学响应; FLAC3D 二次开发

中图分类号: TV672.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-9235(XXXX)XX-0001-10

随着中国“一带一路”倡议的持续推进与交通强国战略的深入实施, 隧洞工程不断向深部地层和复杂地质条件延伸^[1]。在穿越裂隙发育、孔隙率较大的高含水率地层时, 孔隙水压力及应力会降低围岩的力学性能与稳定性^[2]。因此, 在进行隧洞结构稳定性分析时, 考虑非线性流固耦合作用具有工程意义。

围绕流固耦合效应下的隧洞稳定性问题, 国内学者已开展了一系列研究工作。张海旺等^[3]针对强富水隧洞开展流固耦合数值分析, 结果表明流固耦合数值模型可较好地模拟预测富水破碎带浅埋隧洞下穿省道施工过程。王福斌等^[4]基于 COMSOL 软件建立了考虑流固耦合效应的三维隧洞模型, 分析施工过程中围岩受力与变形特征, 发现考虑流固耦合时应力集中更为明显, 且围岩变形模拟值与实测

数据吻合度更高。韩占波等^[5]以天秀山隧道Ⅳ级富水破碎围岩为背景, 探讨了流固耦合作用下围岩孔压演化、塑性区扩展及衬砌变形特征, 指出流固耦合会加剧围岩变形与塑性区扩展。屈克军^[6]考虑流固耦合模拟研究了饱和砂层中矩形顶管隧道开挖面极限支护力、破坏模式的特征和孔隙水压力的分布特性。侯宇航^[7]等以某浅埋富水软岩段为工程背景, 建立了考虑不同流固耦合效应的隧道施工模型, 分析隧道开挖导致的围岩变形和支护结构受力规律。然而, 上述研究大多基于达西定律所描述的线性渗流模型, 将围岩渗透系数视为常数^[8], 未考虑应力扰动引起的渗透系数动态演化^[9]。实际上, 围岩渗透系数的空间分布与施工扰动下的响应规律, 正是应力-渗流耦合分析的关键所在^[10-11]。

因此, 本文采用非线性流固耦合计算方法, 不

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42407253); 中国水利水电第六工程局轨道工程公司-环北部湾 C1 标项目-029

收稿日期: 2026-04-28 **修回日期:** 2026-06-10

作者简介: 王振明(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事引调水工程研究。

通信作者: 蒋义奇(2000—), 男, 硕士, 主要从事隧洞稳定性研究等工作。

联系作者: 致信 rmzj@pearlwater.gov.cn, 由期刊转接。

仅引入非达西渗流模型,还考虑渗透系数随应力状态的动态响应,以环北部湾广东水资源配置工程C1标根子隧洞工程为依托,系统分析隧洞开挖过程中围岩位移场、应力场的演化规律及地下水渗流的时空分布特征。并通过对比线性耦合条件下的计算结果,揭示了应力-渗流耦合影响的内在机理以及对围岩孔隙水压力的影响,这为富水隧洞工程的设计与长期稳定性评估提供参考。

1 基本理论简介

1.1 非达西渗流基本理论

非达西渗流模型是用来描述多模型是用来渗流的模型,主要适用于流体在高速流动条件下其渗流不再满足达西定律的情况,考虑了非线性效应和紊流特性^[12]。目前最常用的理论模型有Forchheimer二次型非达西渗流模型^[13],见式(1):

$$J = \frac{1}{K}V + \frac{\beta}{g}V^2 \quad (1)$$

式中: J 为水力梯度; K 为岩体初始渗透系数,m/s; β 为非达西因子, m^{-1} ; V 为渗流速度,m/s; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

为模拟非达西渗流,可对达西公式进行修正实现。参考渗透系数的定义方式,引入等效渗透系数 K_N ,对式(1)整理后得式(2)、(3)^[14-16]。

$$J = \frac{1}{K_N}V \quad (2)$$

$$K_N = \frac{K}{1 + \beta KV/g} \quad (3)$$

式中: K_N 为考虑非达西渗流效应的等效渗透系数,m/s;其余符号意义同前。

1.2 应力相关渗透性理论

在实际工程中,渗流场与应力场是相互耦合的共在状态^[17]。岩土体应力状态的变化会引起其孔隙率改变,进而导致其渗透特性发生相应变化^[18]。为此,文献提出了在三维主应力与孔隙水压力共同作用下岩体渗透系数的演化表达式(4)^[19-20]:

$$K = K_0 \exp \left\{ -\frac{2[\sigma_2 + \mu(\sigma_1 + \sigma_3) - \beta p]}{k_n} \right\} \quad (4)$$

式中: K 为与应力状态相关的渗透系数,m/s; K_0 为初

始渗透系数,m/s; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一主应力、第二主应力、第三主应力,MPa; μ 为拉梅常数; k_n 为裂隙法向刚度,MPa; β 为联通系数; p 为孔隙水压力,MPa。

2 基于FLAC3D的非线性流固耦合计算方法

由于FLAC3D内置的流体模块默认采用渗透系数为常数的达西定律,无法反映非达西渗流的动态响应特性。为实现非线性流固耦合分析,本文采用基于FLAC3D内置FISH语言所开发的非线性流固耦合计算程序进行数值计算。具体实现思路如下:首先,依据计算模型的初始应力场与渗流场,采用式(4)计算基准渗透系数 K ,进而代入式(3)求得非达西渗透系数 K_N 。在此基础上在FLAC3D流固耦合计算过程中,基于前一计算时步所输出的应力、孔隙水压力等状态变量,对各单元的渗透系数 K_N 进行动态修正,从而实现非线性流固耦合演化过程的模拟。具体程序实现步骤如下:

a)打开FLAC3D流固耦合板块,设置渗流场模型为各向同性模型,并输入围岩初始渗透系数以及孔隙率,完成初始渗流场与应力场计算。

b)通过FISH内置变量z.head读取每个单元的第一、二、三主应力以及孔隙水压力,利用式(4)计算渗透系数 K 。

c)通过FISH内置变量z.flow获取每个单元内的流体速度,然后通过式(3)计算非达西渗透系数 K_N 。利用FISHCALL命令将 K_N 赋予计算单元。

经过上述3个步骤,即可在FLAC3D软件中实现隧洞施工过程中围岩渗透系数随应力动态变化的功能。最后设置求解累计时间限制即可获得目标时长下的数值计算结果。通过上述流程,实现了渗透系数随应力、渗流状态动态更新的非线性流固耦合计算功能,其程序逻辑见图1。

3 非线性流固耦合下隧洞稳定性分析

3.1 工程概况

环北部湾广东水资源配置工程C1标根子隧洞

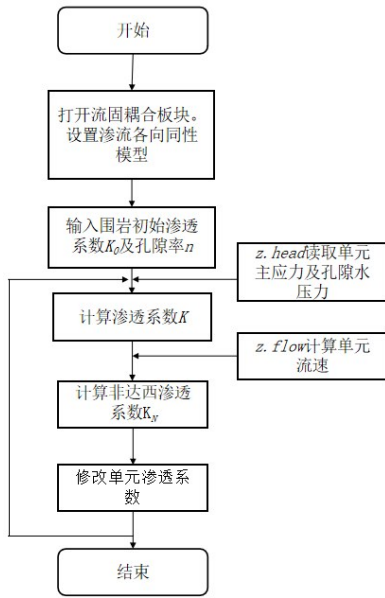


图1 应力-非达西渗流耦合计算流程

Fig. 1 Flowchart of stress-non-Darcy seepage coupling calculation

上竖井不良地质段(Ⅳ、Ⅴ类围岩)采用钻爆法开挖、衬砌后TBM机空推穿过本区域。钻爆段位于早志留世片麻状细粒黑云母花岗混合岩和早志留世条带状细粒黑云母二长花岗全、强风化带中,局部弱风化,岩体破碎、较破碎。围岩类别为Ⅳ、Ⅴ类,围岩自稳能力差,地下水较丰富,受开挖扰动及地下水影响,施工过程中易发生掉块、涌水突泥、滑塌等事故。该竖井钻爆法隧洞总长约384.303 m,下穿省道,位于Ⅴ类围岩段,围岩较破碎,洞顶距离省道最小距离约16.3 m。依托工程具有以下特点:埋深浅、安全风险大,开挖断面较大。围岩等级低,自稳能力差,地下水较丰富,施工风险高。

3.2 数值模拟及计算步骤

3.2.1 数值模型建立

根据上述资料,该隧洞下穿省道且埋深较浅围岩破碎,因此本研究选取下穿省道处隧洞断面作为研究对象。根据地质资料对隧洞简化后建立数值模型。为消除边界对隧洞渗流的影响,对隧洞两侧进行10倍洞径水平延伸,左右各延伸80 m。渗流本构模型为各向同性下的非线性渗流模型。力学边界条件为模型左右及垂直于隧洞轴线方向约束水

平位移,底部约束竖向位移。渗流边界为隧洞侧面及底部为不透水边界,隧洞断面为透水边界。为更好地模拟围岩及隧洞渗流过程,对隧洞周围网格进行细化处理。计算模型共计网格节点数22 805,单元总数13 498。具体计算网格及模型分组见图2,为研究隧洞围岩开挖过程中应力场及渗流场的分布规律,对隧洞周围围岩进行监测点布置。各监测点位置见图3,其中测点1、4、9分布位于隧洞的右侧、顶部及底部。

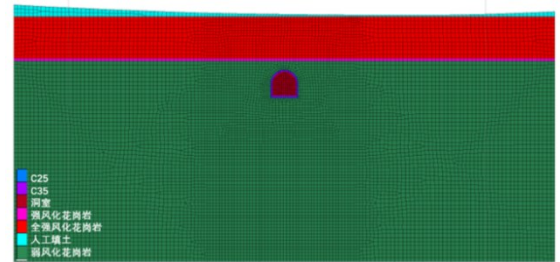


图2 隧洞断面数值模型

Fig. 2 Tunnel cross-section numerical model

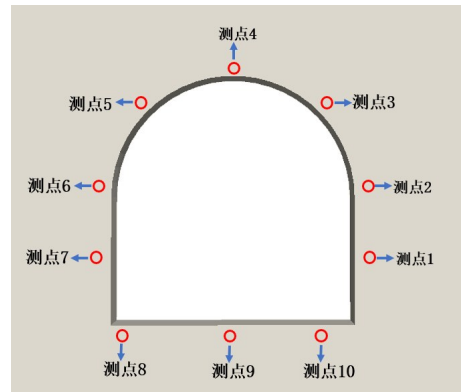


图3 隧洞测点分布

Fig. 3 Distribution of measurement points in the tunnel

3.2.2 计算步骤

本文计算采用瞬态计算,计算时间步长采用软件根据单元尺度大小和渗透系数等自动计算的结果;计算总时长与实际施工工期保持一致。根据项目现场实际施工进度安排及实际施工情况,采用渗流与力学同步求解的方式进行耦合计算,即每一时步内同时求解渗流场与应力场,确保两场在时间尺度上的匹配。拟定计算过程如下:

Step1:自重应力场计算,力学计算;

Step2:初始地下水渗流场计算,渗流计算;

Step3:根据施工方案及施工计划安排,对开挖施工期进行非线性流固耦合计算。由于隧洞处于破碎带,隧洞开挖即可进行喷混处理,时间为120 d。

Step4:根据施工进度安排,隧洞进行开挖喷混后施加初衬,时间为730 d。

根据工程地质报告及文献分析^[21],各地层计算参数取值见表1。

表1 计算参数取值

Tab. 1 The values of the calculation parameters

项目	人工填土	全风化花岗岩	强风化花岗岩	弱风化花岗岩	C25	C35
天然密度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	20.1	19.6	25	27	24.8	25
黏聚力/MPa	0.016	0.012	0.50	1.50	3.70	2.80
内摩擦角/($^{\circ}$)	14.3	20.0	35	45.0	66.08	64.60
泊松比	0.15	0.4	0.30	0.25	0.20	0.15
弹性模量/GPa	0.003	0.05	1	15	28	35
渗透系数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	6×10^{-6}	1.5×10^{-6}	5×10^{-7}	2.32×10^{-7}	1×10^{-7}	1.5×10^{-8}
孔隙率	0.45	0.35	0.30	0.25	0.30	0.25

3.3 非线性流固耦合应力-渗流耦合响应机制

由图4各测点的非线性应力以及图5对应的非线性渗透系数数据分析可知。孔隙水压力与第一、第三主应力的耦合关系总体上表现为,当压应力水平高时,围岩被压密、孔隙压缩,孔压传递受阻,因而孔压普遍偏低;当拉应力水平高时,裂隙张开、渗透性增强,孔压更易均衡,数值趋于升高。渗透系数总体上与第一主应力和第三主应力之和呈负相关趋势:即第一、第三主应力之和越小,表示压应力水平越高,渗透系数越小;反之,压应力水平越低甚至出现拉应力时,渗透系数趋于增大。从式(4)可得,渗透系数不仅受第一和第三主应力影响,还与孔隙水压力密切相关,单一主应力分量不足以完全解释渗透系数的变化规律。但整体而言,数据基本验证了三维主应力与孔隙水压力共同作用下岩体渗透系数的演化调控机制,但需综合考虑完整应力场和渗流场的协同效应。

图6、7为非线性及线性渗流下隧洞围岩渗流场分布情况。从图中看出线性渗流场的流线围绕隧洞呈对称、规则且分布均匀的放射形态,走向平顺无畸变,洞周各处流线密度基本一致,表明渗流路径规整、流速分布均匀;而非线性渗流场流线在

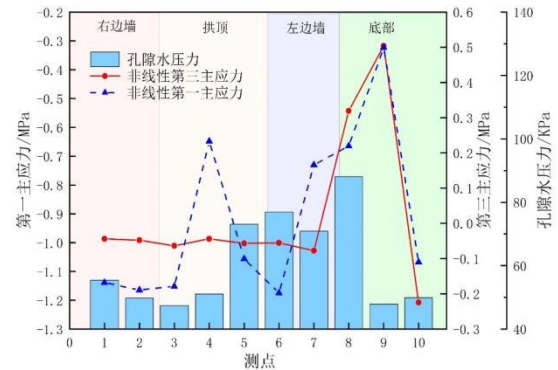


图4 各测点应力及孔隙水压力值

Fig. 4 Stress values and pore water pressure values at each measurement point

隧洞底部更为密集,拱顶及侧墙上部则相对稀疏,整体呈现下部渗流更集中、上部相对平缓的非均匀特征,同一位置处非线性渗流下的孔压小于线性渗流。结合渗透系数分布分析,线性渗流遵循达西定律,围岩渗透系数为恒定均匀值,仅黏滞阻力控制渗流运动,因此流线与孔隙水压力分布均保持对称均匀;非线性渗流在流速和应力的作用下,有效渗透系数降低,隧洞底部渗流阻力增大、导致流线向洞底集中、水力梯度在此处增大,最终形成与线性渗流场不同的非均匀分布特征。

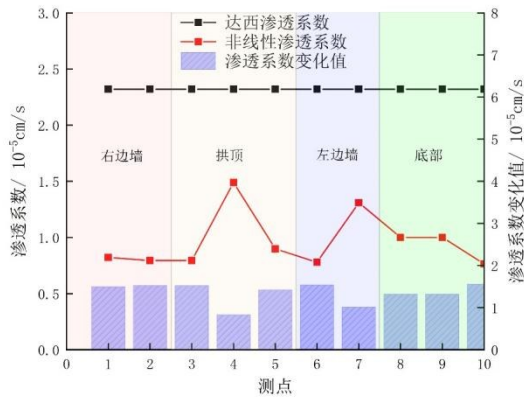


图5 各测点渗透系数变化值

Fig. 5 The variation values of permeability coefficients at each measurement point

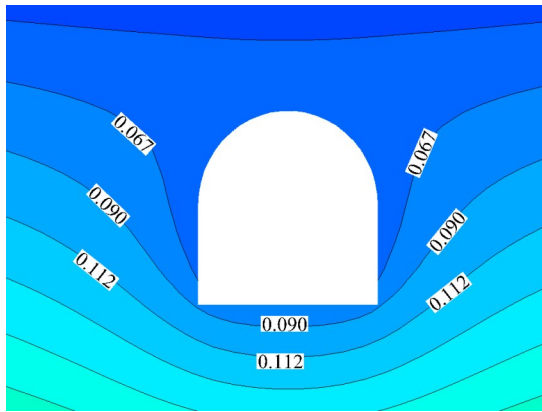


图6 非线性渗流下围岩孔隙水压力分布/MPa

Fig. 6 Pore water pressure distribution of surrounding rock under nonlinear seepage conditions/MPa

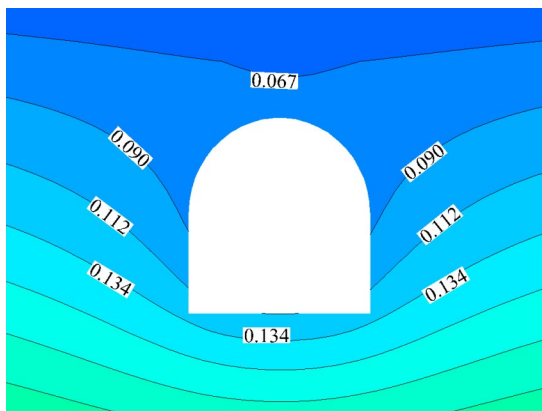


图7 线性渗流下围岩孔隙水压力分布/MPa

Fig. 7 Pore water pressure distribution in surrounding rock under linear seepage/MPa

3.4 隧洞围岩应力-渗流时空演变规律

3.4.1 隧洞围岩孔隙水压力时空演变分析

图8为隧洞围岩在开挖期及初衬期内各测点处孔隙水压力随时间的变化规律。开挖期内围岩孔隙水压力快速衰减并趋于稳定。初衬期内在地下水持续渗透补给下,围岩孔压普遍回升,初期地下水补给量大于排泄量导致压力快速上升;随后补给与排泄逐渐平衡,压力增长放缓并最终稳定,体现了地下水在初衬约束下对围岩孔压的修复效应。稳定后孔压整体处于低位,对结构安全无显著影响。洞室底部初始孔隙水压力最高,开挖期内减小至0.045 MPa并稳定,初衬后增长并维持在0.054 MPa。洞室右侧和顶部初衬前孔隙水压力一致,在进行初衬后洞室顶部孔隙水压力略小于洞室右侧。

3.4.2 隧洞围岩应力时空演变分析

图9、10为隧洞围岩在开挖期及初衬期内各测点处应力随时间的变化规律。在FLAC3D中压应力表征为负值,拉应力表征为正值,符号仅表示力的作用方向,不代表应力大小。从图中看出在整个建设周期内围岩各应力值表征为压应力。围岩处3个测点第一主应力整体变化相似,均为在0~30 d内攀升后趋于平缓,120 d后开挖期结束,在初衬期前期出现小幅增长后长期稳定。这表明初衬对围岩有着主动约束效应,使得围岩形成新的应力平衡。第三主应力在开挖后120 d内先减后稳。底部因自重荷载残留,稳定后应力较大;顶、侧部因临空面卸荷,应力衰减幅度更大。初衬期内底部应力增大,顶、侧部应力稳定,初衬的力学约束弥补了围岩自重荷载下的应力损失。

3.4.3 隧洞围岩位移时空演变分析

图11展示了隧洞围岩在开挖期与初衬期内位移的时空演化规律,其中正位移表示指向隧洞围岩向隧洞收敛变形或底部向上隆起,负位移表示隧洞围岩向外挤压变形或顶部向下沉降。从时间维度分析,喷混阶段中,底部和顶部位移均呈快速增大;而右侧围岩位移保持相对稳定。初衬施加后,各部位位移趋于稳定。底部正向隆起、顶部、右侧收敛

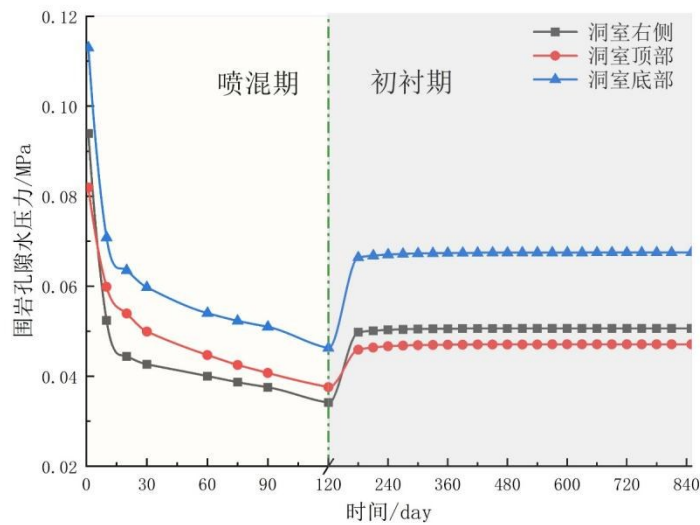


图8 隧洞围岩孔隙水压力时空演变

Fig. 8 Spatiotemporal Evolution of Pore Water Pressure in Tunnel Surrounding Rock

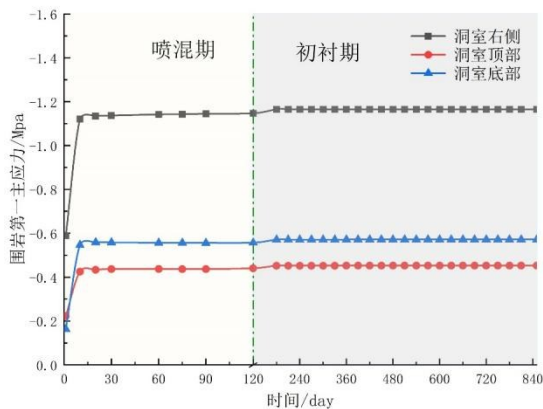


Fig. 9 The first principal stress of the surrounding rock

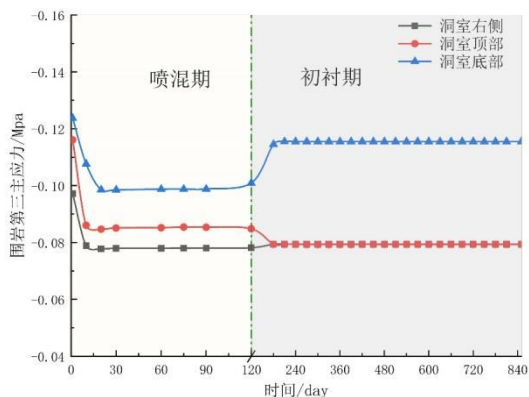


Fig. 10 The third principal stress of the surrounding rock

变形状态均未发生变化,表明初衬有效抑制了位移演化,促使围岩由动态变形过渡至稳态。结合前期无初衬阶段的围岩卸荷过程,体现了允许围岩释放

初期变形能量,再通过初衬锁定稳定状态的工程逻辑。

从空间维度看,洞室底部呈现隆起变形,这源于上部岩体自重驱动下开挖卸荷引发的压缩变形;顶部拱顶发生沉降收敛,是围岩向临空面变形的典型表现;右侧位移的稳定,表明该区域围岩在地应力与初衬双重约束下应力重分布平稳,体现了围岩的强承载特性与初衬侧向刚度的协同效应。

3.4.4 隧洞围岩塑性区时空演变分析

图12、13为隧洞施工120、840 d的围岩塑性区分布,二者分别代表着开挖期及初衬期这2个施工阶段。由图可知,隧洞围岩塑性区均以拉伸破坏为主导,120 d时塑性区主要表现为历史拉伸屈服状态。而840 d时塑性区扩展为历史拉伸屈服与当前拉伸屈服两种状态共存,且范围向侧壁及深部围岩扩展。这一演化差异源于长期非线性流固耦合作用:随着施工时间延长,初衬的存在使得地下水补给导致孔隙水压力回升,进而引起围岩应力重分布(有效应力原理),最终导致原本稳定的围岩进入新的拉伸屈服,形成当前拉伸屈服塑性区。因此,虽然围岩破坏类型均为拉伸,但施工各阶段塑性区的变化,体现了长期渗流环境下围岩渗流变化与应力重分布的非线性演化特征,这会对富水隧洞的长期稳定性构成威胁。

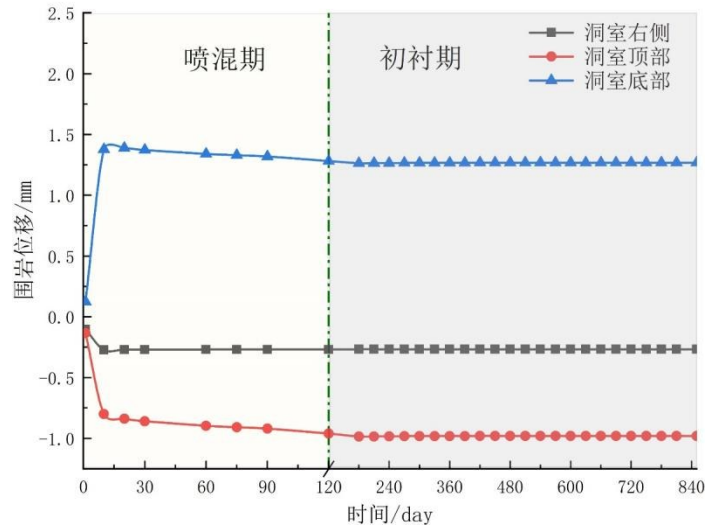


图 11 隧洞围岩位移时空演变

Fig. 11 Spatio-temporal evolution of tunnel surrounding rock displacement

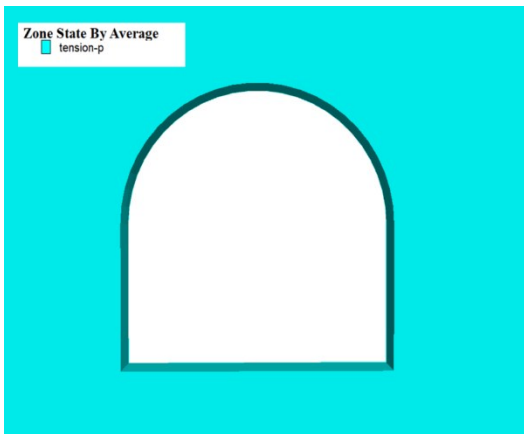


图 12 隧洞施工 120 天时围岩塑性区

Fig. 12 Plastic zone of surrounding rock at 120 days of tunnel construction

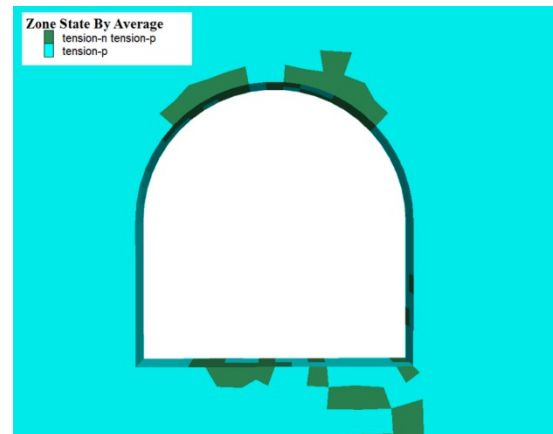


图 13 隧洞施工 840 天时围岩塑性区

Fig. 13 Plastic zone of surrounding rock at 840 days of tunnel construction

4 结论

本文通过采用非线性流固耦合方法研究了浅埋富水隧洞围岩在开挖期与初衬期的应力、位移、孔隙水压力、塑性区演化规律。通过对比线性耦合条件下的计算结果,揭示了应力-渗流耦合影响的内在机理以及对围岩孔隙水压力的影响。主要结论如下:

a) 隧洞围岩在施工过程中处于受压状态。第一主应力在施工周期内呈初期攀升、后期稳定特征;第三主应力表现为底部应力水平较高、顶侧部衰减

幅度较大。初衬施加后,底部应力二次集中,顶侧部应力趋于稳定,表明初衬可有效弥补自重荷载下的应力损失,使围岩形成了新的力学平衡。

b) 围岩位移、孔压及塑性区演化具有时空关联性:开挖期隧洞底部与顶部位移发展迅速,而右侧位移稳定;初衬后各部位位移进入稳态,体现了“先释放能量、后锁定变形”的工程逻辑。孔压受渗流补给与初衬共同控制:初衬前因开挖致孔压降低,初衬后孔压回升,底部回升幅度大于顶部。由于围岩中的应力重分布,导致塑性区呈现扩大的趋势。

c) 非线性渗透系数总体与主应力之和呈负相

关:压应力水平越高渗透系数越小,出现拉应力时渗透系数增大。非线性渗流下等效渗透系数随应力动态变化,导致隧洞底部渗流集中。非线性流固耦合对渗透系数的实时调控改变了渗流路径与压力分布,忽略此效应可能低估局部孔压值,影响围岩稳定性评价的准确性。

参考文献:

- [1] 闫爱玲. 基于不同强度准则的高水压隧洞松动圈计算方法[J]. 铁道建筑技术, 2026(5): 128-133.
Yan Ailing. Calculation Method for the Loosening Zone of High-Water-Pressure Tunnel Based on Different Strength Criteria [J]. Railway Construction Technology, 2026 (5): 128-133. (in Chinese)
- [2] 吉小明. 隧道工程中水力耦合问题的探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2006(1): 149-154.
Ji Xiaoming. Discussion on the Issue of Hydro-Mechanical Coupling in Tunnel Engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006 (1): 149-154. (in Chinese)
- [3] 张海旺, 王振明, 万发, 等. 富水破碎带浅埋隧洞下穿省道开挖超前支护效果研究[J]. 人民珠江, 2025, 46(11): 35-43.
Zhang Haiwang, Wang Zhenming, Wan Fa, et al. Effectiveness of Advanced Support for Shallow-Buried Tunnel Excavation Under-Crossing Provincial Highway in Water-Rich Fractured Zone [J]. Pearl River, 2025, 46(11): 35-43. (in Chinese)
- [4] 王福斌, 于奎, 隋昊良, 等. 考虑流固耦合的浅埋富水软岩隧洞稳定性分析[J]. 福建建材, 2024(5): 58-61.
Wang Fubin, Yu Kui, Sui Haoliang, et al. Stability Analysis of Shallow Buried Water-Rich Soft Rock Tunnel Considering Fluid-Solid Coupling [J]. Fujian Building Materials, 2024(5): 58-61. (in Chinese)
- [5] 韩占波, 刘永刚. 考虑流固耦合效应的富水破碎围岩隧道开挖力学特性研究[J]. 中国铁路, 2024(10): 34-42.
Han Zhanbo, Liu Yonggang. Research on Mechanical Characteristics of Tunnel Excavation in Water-rich Broken Surrounding Rock Considering Fluid-solid Coupling Effect [J]. China Railway, 2024 (10): 34-42. (in Chinese)
- [6] 屈克军. 考虑流固耦合效应的浅埋矩形顶管隧道开挖稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(5): 2055-2062.
Qu Kejun. Face Stability Analysis of Shallow Rectangular Pipe Jacking Tunnel Considering Fluid-Solid Coupling Effect [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(5): 2055-2062. (in Chinese)
- [7] 侯宇航, 李孟凯, 蔡海兵, 等. 基于流固耦合的富水软岩隧道稳定性分析[J]. 低温建筑技术, 2023, 45(8): 118-122, 133.
Hou Yuhang, Li Mengkai, Cai Haibing, et al. Stability Analysis of Water-Rich Soft Rock Tunnel Based on Fluid-Solid Coupling [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2023, 45 (8): 118-122, 133. (in Chinese)
- [8] Qian Jiazhong, Wang Mu, Zhang Yong, et al. Experimental study of the transition from non-Darcian to Darcy behavior for flow through a single fracture [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2015, 27(5): 679-688.
- [9] Nie R S, Fan X, Li M, et al. Modeling transient flow behavior with the high velocity non-Darcy effect in composite naturally fractured-homogeneous gas reservoirs [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 96. DOI: 10.1016/j. jngse. 2021. 104269.
- [10] 常宗旭, 赵阳升, 胡耀青, 等. 三维应力作用下单一裂缝渗流规律的理论研究与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(4): 620-624.
Chang Zongxu, Zhao Yangsheng, Hu Yaoqing, et al. Theoretical and experimental studies on seepage law of single fracture under 3D stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(4): 620-624. (in Chinese)
- [11] 郑少河, 赵阳升, 段康廉. 三维应力作用下天然裂隙渗流规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999(2): 15-18.
Zheng Shaohe, Zhao Yangsheng, Duan Kanglian. An Experimental Study on the Permeability Law of Natural Fracture under 3-D Stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999 (2): 15-18. (in Chinese)
- [12] 许增光, 李煜婷, 曹成. 岩土体介质非达西渗流特性研究进展[J]. 应用力学学报, 2024, 41(6): 1211-1236.
Xu Zengguang, Li Yuting, Cao Cheng. Research progress on non-Darcy seepage characteristics of soil and rock masses [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2024, 41 (6): 1211-1236. (in Chinese)
- [13] 张营丰, 陈益峰, 陈锴锟, 等. 岩体渗流参数统计模型及其在应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(12): 1513-1526.
Zhang Yingfeng, Chen Yifeng, Chen Kaikun, et al. Development and application of statistical models of seepage parameters in rocks [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(12): 1513-1526. (in Chinese)
- [14] 陈君, 刘明明, 李星, 等. 一种基于地质指标的裂隙岩体渗透系数估算模型[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1706-1714.
Chen Jun, Liu Mingming, Li Xing, et al. A geological indexes-

- based empirical model for estimation of permeability coefficient in fractured rock mass [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37 (6): 1706–1714. (in Chinese)
- [15] 孔祥言编著. 高等渗流力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2020
- Kong Xiangyan ed.). *Advanced Flow Mechanics* [M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2020. (in Chinese)
- [16] 刘梦悦. 达西与非达西渗流海底隧道涌水量预测及区隔防水优化设计[D]. 济南:山东建筑大学,2024.
- LIU Mengyue. Prediction of Water Flow Volume in Darcy and Non-Darcy Seepage Submarine Tunnels and Optimization Design of Zone Separation and Drainage for Water Control [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2024. (in Chinese)
- [17] 杨逢杰,蒋军,杨健,等. 基于水荷载增量过程的深埋高外水水工隧洞混凝土衬砌受力特性研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2025,50(5):112–121.
- Yang Fengjie, Jiang Jun, Yang Jian, et al. Mechanical Characteristics of Concrete Lining in Deeply Buried Hydraulic Tunnels with High External Water Pressure Based on the Incremental Process of Water Load [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science)*, 2025, 50(5): 112–121. (in Chinese)
- [18] 张俊伟. 基于流固耦合效应隧道下穿施工围护桩变形研究[J]. 江苏建筑职业技术学院学报,2021,21(1):15–19,23.
- Zhang Junwei. Study on deformation of retaining piles of underground passage caused by tunnel undercrossing construction based on fluid-solid coupling effect [J]. *Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology*, 2021, 21(1): 15–19, 23. (in Chinese)
- [19] 赵阳升,段康廉,胡耀青,等. 块裂介质岩石流体力学研究新进展[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),1999(5): 459–462.
- Zhao Yangsheng, Duan Kanglian, Hu Yaoqing, et al. New Advances of Block-fractured Medium Rock Fluid Mechanics [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 1999 (5): 459–462. (in Chinese)
- [20] 赵阳升. 多孔介质多场耦合作用及其工程响应[M]. 北京:科学出版社,2010.
- Zhao Yangsheng. Coupling Effects of Multiple Fields in Porous Media and Their Engineering Responses [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [21] 刘雨萌. 浅埋富水全风化花岗岩隧道变形机理及控制技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2023.
- Liu Yumeng. Study on deformation mechanism and control technology of shallow-buried tunnel in fully weathered granite stratum [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023. (in Chinese)

Research on the Mechanical Response Characteristics of Water-Rich Tunnels Based on Nonlinear Fluid-Solid Coupling Theory

Wang Zhenming¹, Peng Guicai¹, Jiang Yiqi^{2*}, Wan Fa³, Song Mingzhe¹, Wang Hong¹, Jiang Zhongming²

(1. Sinohydro Bureau 6 Co., Ltd, Shenyang 118015, China; 2. School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510610, China)

Abstract: During the excavation of water-rich tunnels, the mechanical response of the surrounding rock is significantly influenced by the coupled effect of groundwater seepage and in-situ stress, exhibiting complex spatiotemporal evolution. Conventional linear fluid-solid coupling models, which rely on Darcy's law and assume a constant permeability coefficient, fail to capture nonlinear seepage behavior under high hydraulic gradients or the dynamic stress-dependent regulation of permeability, thus cannot accurately reflect the actual mechanical response. To address this limitation, this study adopts a nonlinear fluid-solid coupling framework that incorporates non-Darcy effects and stress-dependent permeability, and establishes a stress-non-Darcy seepage coupled numerical model. Using FLAC3D and its built-in FISH language, a secondary development is carried out to enable real-time updating of the permeability coefficient based on the local stress state. Taking an actual water-rich tunnel project as a case study, comprehensive numerical simulations are performed to investigate the spatiotemporal evolution of the seepage field, stress, displacement, and plastic zone in the surrounding rock during the excavation, primary lining, and operation stages, with the results compared against those from linear coupling calculations to reveal the underlying mechanisms. Regarding pore water pressure, excavation induces a rapid drop due to

unloading and drainage. After the primary lining, pore pressure gradually recovers under external groundwater recharge and eventually stabilizes at a relatively low level, with the recovery amplitude at the tunnel bottom being significantly greater than that at the top. This spatial discrepancy is attributed to higher self-weight stress and stronger seepage accumulation at the bottom, whereas stress release is more complete at the top. In terms of stress response, the surrounding rock remains under compression throughout the construction process. The first principal stress increases rapidly at first and then tends to stabilize; the third principal stress is larger at the bottom and decreases at the top and sides. After primary lining, stress concentration occurs at the bottom, while stresses at the top and sidewalls reach a stable state, indicating the establishment of a new mechanical equilibrium. A negative correlation is observed between stress and the nonlinear permeability coefficient. Regarding displacement, the bottom and top develop rapidly during excavation, while sidewall displacement remains relatively stable; after primary lining, all displacements gradually enter a steady state. As for plastic zone evolution, the plastic zone mainly exhibits historical tensile yield during the excavation period. During the primary lining phase, it expands to a composite state where historical and current tensile yield coexist, indicating progressive deterioration driven by pore pressure recovery and increased seepage force. In summary, the nonlinear fluid-solid coupling significantly alters seepage paths and pressure distribution through the real-time regulation of permeability by stress and flow velocity. Ignoring this effect may lead to underestimation of local pore-pressure peaks and thus compromise the accuracy of stability assessment. This study elucidates the regulatory mechanism of nonlinear fluid – solid coupling on the mechanical response of water-rich tunnels, providing a theoretical basis for seepage control design, support optimization, and long-term stability evaluation of similar projects.

Keywords: large-section tunnel; nonlinear fluid-solid coupling; tunnel mechanical response; secondary development of FLAC3D

(责任编辑:程 茜)