

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.10.020

盾构隧道穿越江底富水断裂带的渗流分析

商兆涛¹, 刘武², 夏琴¹, 尚金行², 王佐才²

(1. 芜湖市轨道(隧道)交通工程质量安全监督站, 安徽 芜湖 241007; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章以芜湖城南过江隧道穿越江底富水断裂带为背景,采用三维渗流分析方法对盾构隧道渗流进行有限元数值模拟,系统分析开挖面相对断裂带位置、江水位、断裂带渗透性及其各向异性、泥水压力等因素的影响。研究表明:隧道渗流受穿越断裂带影响,开挖面掘进至断裂带时渗漏量与水压力降低幅度明显增大,断裂带对水压力分布影响范围大于其宽度;江水位越大,隧道渗漏风险越高,水位由5.64 m增至12.21 m将引起隧道渗漏量增大13%。断裂带渗透性大小与各向异性均对隧道渗流产生影响,断裂带渗透性及其各向异性比越大,开挖面前端水压力下降幅度与开挖面渗漏量越大。开挖面泥水压力有效作用可降低对断裂带内水压力的扰动以及隧道渗漏风险,但泥水压力突增会引起开挖面附近水压力迅速增大,可能对断裂带稳定不利。该研究成果可为该工程安全施工提供支撑并为类似工程研究提供参考。

关键词:三维渗流;江底隧道;数值模拟;水压力;渗漏量

中图分类号:U459.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)10-1433-08

Seepage analysis of shield tunnel crossing a water-rich fault zone at the bottom of the Yangtze River

SHANG Zhaotao¹, LIU Wu², XIA Qin¹, SHANG Jinhang², WANG Zuocai²

(1. Wuhu Rail(Tunnel) Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Station, Wuhu 241007, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Based on the crossing of the water-rich fault zone at the bottom of the Yangtze River for the Wuhu Chengnan River Crossing Tunnel, the three-dimensional seepage method was adopted to numerically simulate the shield tunnel seepage. The influences of the relative position of the excavation face to the fault zone, river water level, fault zone permeability and anisotropy, and mud-water pressure on tunnel seepage were systematically analyzed. The research results showed that tunnel seepage was affected by crossing the fault zone, and when the excavation face advanced into the fault zone, the leakage amount and the water pressure decrement obviously increased. The influence range of the fault zone on water pressure distribution was greater than its width. The larger the river water level, the higher the risk of tunnel leakage, and a rise in the water level from 5.64 m to 12.21 m would cause a 13% increase in tunnel leakage. The permeability and anisotropy of the fault zone both affected the tunnel seepage. The greater the permeability and anisotropy ratio of the fault zone, the greater the decrease in water pressure at the front of the excavation face and the greater the tunnel leakage amount. The mud-water pressure could reduce the disturbance of water pressure in the fault zone and the risk of tunnel leakage. However, a sudden increase in mud-water pressure would cause a rapid water pressure increase near the excavation face, which may be detrimental to fault zone stability. The research results can provide support for the safe construction of this project and reference for similar engineering studies.

收稿日期:2023-08-11; **修回日期:**2023-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278301);安徽省自然科学基金资助项目(2208085ME153)

作者简介:商兆涛(1983—),男,山东梁山人,芜湖市轨道(隧道)交通工程质量安全监督站高级工程师;

刘武(1988—),男,湖北仙桃人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail:liuwu168@hfut.edu.cn;

王佐才(1982—),男,湖南双峰人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

Key words: three-dimensional seepage; underwater tunnel; numerical simulation; water pressure; leakage

为缓解日益拥堵的道路交通和经济社会快速发展所带来的压力,除了最大限度地利用地表空间资源外,地下空间资源有效开发利用也变得日趋重要。在我国临江、濒海城市建设过程中,复杂地质环境下跨越长江、黄河、珠江等水系的大型过江(河)地下盾构隧道工程得到快速发展^[1-4]。当江底盾构隧道施工遭遇富水地层时,受江水与开挖隧道间高水头差产生的强渗流影响,隧道地下水渗漏风险高,且地下水渗流还对隧道开挖面稳定性极其不利。因此,深入开展江底隧道穿越富水地层的渗流场分析对于准确把握隧道渗漏风险和评价盾构开挖面稳定具有重要意义。

在交通、矿山、水利等行业的地下隧道工程建设推动下,多数学者采用理论分析与数值模拟等方法对不同隧道工程的渗流规律进行研究^[5-7]。文献[8]基于水力开度理论,依托典型滨海地区有压盾构隧道研究接缝水力劣化引发的内外水力交互渗流问题;文献[9]采用三维数值模型研究嘉陵江某输气隧道下穿河流的渗流特征和涌水量,发现断层破碎带处渗漏风险高;文献[10]以上海地铁 1 号线为背景,研究发现地层渗透性各向异性对盾构隧道渗漏影响显著,应予以考虑;文献[11]研究含水层厚度、隧道埋深比、注浆圈参数等对水头分布和隧道涌水量的影响,发现提高注浆圈抗渗性比增大注浆圈厚度更能降低隧道涌水量;文献[12]根据隧道渗流解析研究隧道注浆圈、初期支护的渗流参数与支护外水头、渗水量及水头差之间的关系;文献[13]以厦门海底隧道为背景,利用 FLAC3D 对隧道开挖后的孔隙水压力分布进行研究;文献[14]推导了双线平行隧道稳态渗流场解析模型;文献[7]采用特征函数与傅里叶级数展开方法建立盾构隧道开挖面前方渗流场三维理论分析模型,并研究初始水位与开挖面水压力对隧道渗流的影响;文献[15]研究隧道间距、相对尺寸以及初期支护参数对 4 孔山岭隧道涌水量和支护外水压力的影响,发现同侧多孔隧道间距变化的影响大于异侧同等条件变化的影响。上述研究成果虽较好地揭示了不同工程水文地质环境以及施工条件下的隧道渗流规律,但研究结果受隧道工程赋存环境影响。

在建的芜湖城南过江隧道在穿越江底富水断裂带时,受高江水位与复杂地层结构影响,盾构隧道渗流规律复杂,渗漏安全风险高,有必要专门开

展渗流研究。为此,本文以芜湖城南过江隧道穿越江底富水断裂带为研究背景,采用三维渗流有限元分析方法,系统研究盾构掘进至断裂带部位时断裂带渗透特性、江水位、泥水压力等因素对隧道渗漏以及开挖面前端水压力分布的影响。

1 工程概况

在建的安徽芜湖城南过江隧道位于长江皖江段“大拐弯”处,与下游长江大桥直线距离 9 km,为安徽省第一条下穿长江的浅埋交通隧道。隧道西起江北规划纬一路,从长江底部下越后,东至江南大工山路,全长约 4.5 km。隧道开挖采用开挖直径 D 为 15.07 m 的泥水平衡圆形断面盾构由江北向江南掘进施工,开挖完成的隧道则利用厚 0.6 m 的拼装式钢筋混凝土管片衬砌支护防水。过江隧道断裂带位置示意图如图 1 所示。工程区域属长江下游冲积平原区,地层上部均为第四系冲洪积地层,下伏白垩系、侏罗系基岩。长江底部靠近江南岸发育有一处非活动构造断裂带,其宽度约为 15 m,倾向隧道大里程方向,倾角约为 75° 。场地地下水分为第四系松散岩类孔隙潜水与基岩裂隙水,前者主要赋存于两岸上部地层,在长江河道区与江水连通紧密,近长江处地下水位与江水位存在明显联动关系;后者主要在断裂带内富集,受上部第四系孔隙水及江水下渗补给。断裂带岩性为原岩结构被破坏的灰绿色-灰黄色全风化粉砂岩,内部裂隙较发育,透水性一般,其上部为具有弱透水性的含粉砂淤泥土与粉质黏土,断裂带以北为白垩系粉砂岩,以南为侏罗系凝灰角砾岩。

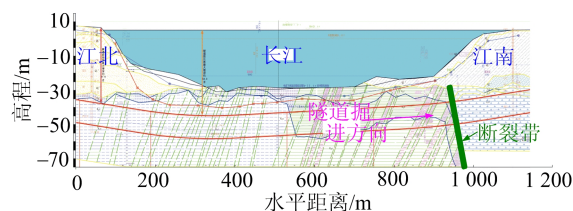


图 1 过江隧道断裂带位置示意图

长江皖江段的常水位为 5.64 m,江水位与隧道中心线高差超过 50 m。盾构隧道在穿越江底断裂带过程中,洞身围岩性质变化大并承受较大的孔隙水压力作用,施工过程控制困难,同时受刀具磨损开仓更换等影响,容易出现建仓失效问题

导致开挖面与地下水间产生显著水压力差,开挖面渗漏风险高。深入开展盾构隧道穿越断裂带过程的渗流场分析,不仅可为工程施工渗漏风险评价与防控提供指引,还可进一步为盾构隧道稳定分析提供支撑,具有重要的研究意义。

2 盾构隧道穿越断裂带的渗流分析

2.1 渗流分析理论

隧道穿越断裂带过程,洞周岩土体渗流受盾构开挖面泥水压力突增或降低影响呈非稳定变化特征。根据达西定律与水流连续条件,可得江底隧道非稳定渗流分析的控制方程为^[16]:

$$k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = S \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

其中: H 为总水头; t 为时间; k_x 、 k_y 、 k_z 分别为材料 x 、 y 、 z 方向的渗透系数; S 为介质储水率。当盾构开挖面泥水压力变化引起的非稳定渗流过程持续时间较短时,隧道渗流将快速趋于稳定。

江底盾构隧道穿越断裂带渗流因开挖面与江水之间存在水头差而产生,当断裂带与隧道掘进方向基本垂直时,盾构泥水压力突增(或降低)将形成由开挖面—断裂带—断裂带周围岩体—江水(或江水—断裂带周围岩体—断裂带—开挖面)的渗流。在稳定渗流情况下,为推导开挖面渗流量理论公式,本文根据工程特点概化建立考虑断裂带影响的半球面渗流计算模型,如图 2 所示,其中 H_a 、 H_w 分别为开挖面中心距地表和江水位线的距离,开挖边界线所在的渗流等势面水头值为 H_p ,其根据开挖面中心点泥水压力确定。假设开挖面前方的水头等势面为 1 组以开挖面中心为球心的半球面,断裂带及周围岩体对隧道渗流影响可分别采用厚度为 $(r_F - D/2)$ 和 $(H_a - r_F)$ 的半球环概化,当断裂带周围岩体包含多种材料时,采用各材料渗透系数的几何平均数表征其等效渗透系数。

令断裂带及其周围岩体的各向同性渗透系数分别为 k_F 、 k_N ,则在断裂带的三维半球环区域内,达西定律可表示为:

$$Q/(2\pi r^2) = k_F dH/dr \quad (2)$$

其中: Q 为开挖面渗流量; r 为渗流等势面的半径,当 $r=D/2$ 时, $H=H_p$; $r=r_F$ 时, $H=H_F$ 。通过对式(2)积分可得:

$$H_F = H_p + \frac{Q}{2\pi k_F} \left(\frac{2}{D} - \frac{1}{r_F} \right) \quad (3)$$

同理,对断裂带周围岩体的三维半球环区域利用达西定律与边界条件可得:

$$H_w = H_F + \frac{Q}{2\pi k_N} \left(\frac{1}{r_F} - \frac{1}{H_a} \right) \quad (4)$$

根据式(3)和式(4),可得开挖面渗流量为:

$$Q = 2\pi k_F (H_w - H_p) \left[\frac{2}{D} - \frac{1}{r_F} + \frac{k_F}{k_N} \left(\frac{1}{r_F} - \frac{1}{H_a} \right) \right] \quad (5)$$

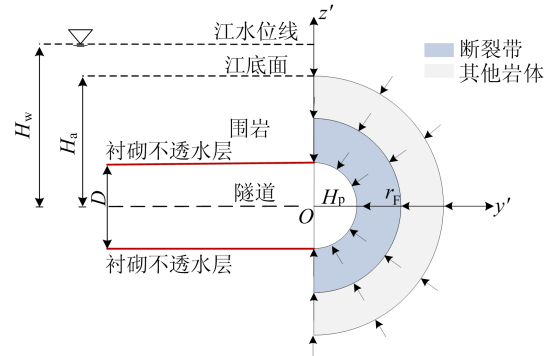


图 2 隧道穿越断裂带半球面渗流计算模型

2.2 三维有限元计算分析模型

根据芜湖城南过江隧道穿越江底断裂带段区域的结构布置特点与地层信息,建立三维渗流有限元计算模型,如图 3 所示。

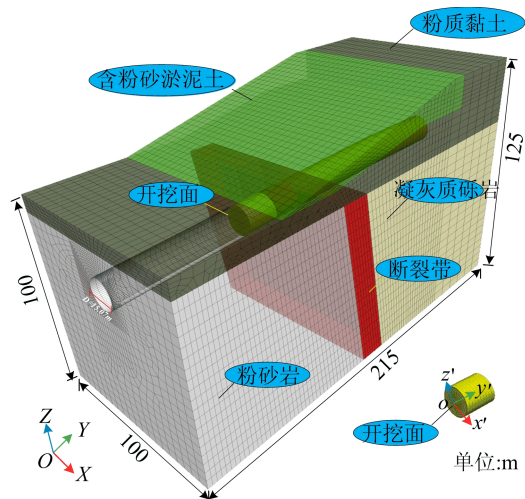


图 3 有限元计算模型

图 3 中,模型单元和节点数分别为 136 392 和 142 664,模型对地层结构、断裂带空间陡倾方位、隧道轴线非水平走向等进行三维模拟,为保证有良好的计算效率与精度,对洞周水压力变化幅度大的区域网格进行适当加密,单元均采用六面体网格。同时为减小边界效应影响,模型沿隧道轴线方向长度取 215 m,两端边界距断裂带的距离均大于 $6D$,模型底部高程取为 -122 m,距隧道

底部距离大于 $4D$, 模型顶部为长江江底地表。

2.3 计算参数及条件

根据工程地勘资料与室内外试验成果, 隧道三维渗流计算参数见表 1 所列, 其中水平方向渗透系数相同, 竖直方向渗透系数除了在研究断裂带渗透性各向异性影响时外, 认为与水平方向渗透系数相同。三维渗流分析的初始与边界条件设置如下: 模型顶部边界与靠江南侧侧边界取为固定水头边界, 水位值为江水位; 模型其他侧边界与底部边界为隔水边界; 衬砌不透水, 开挖隧道环向衬砌部位为隔水条件; 初始时模型为静水压力状态, 隧道开挖后开挖面边界条件根据泥水压力情况瞬时变化, 为保证对泥水压力的准确模拟, 泥水容重为 1.2 kN/m^3 , 开挖面泥水压力随深度变化的梯度为 12 kPa/m , 泥水压力分布根据中心点泥水压力大小换算确定。

表 1 隧道三维渗流计算参数

地层材料	渗透系数/(m/d)	储水率/(10^{-6} m^{-1})
含粉砂淤泥土	0.01	2.6
粉质黏土	0.05	3.0
粉砂岩	0.10	1.0
断裂带	0.50	4.0
凝灰角砾岩	0.10	1.0

本文针对以下 4 种情形开展隧道渗流模拟分析。

情形 1 江水位为 5.64 m , 考虑开挖面掘进未到断裂带前 15 m 、位于断裂带中间、穿过断裂带后 10 m 等位置影响, 开挖面泥水建仓失效(对应泥水压力为 0 , 开挖面与江水间水头差最大且最危险渗漏情况)。

情形 2 盾构开挖面位于断裂带中间, 考虑长江水位上升的影响, 江水位取百年一遇水位 12.21 m , 开挖面泥水建仓失效。

情形 3 江水位为 5.64 m , 开挖面位于断裂带中间, 考虑断裂带渗透性变化以及裂隙发育可能引起的各向异性的影响, 断裂带渗透系数分别为 0.10 、 0.50 、 2.00 m/d , 渗透性各向异性比(k_z/k_x)分别为 0.10 、 0.25 、 1.00 、 4.00 、 10.00 , 开挖面泥水建仓失效。

情形 4 江水位为 5.64 m , 开挖面位于断裂带中间, 考虑泥水压力作用, 开挖面中心点泥水压力低于初始静水压力, 分别为 175 、 345 、 520 kPa , 其突增超过初始静水压力 10% 、 20% 、 50% 。

3 结果分析

3.1 开挖面不同掘进位置的影响

为评价隧道渗流场动态演化特征, 在江水位为 5.64 m , 开挖面掘进至断裂带中间时, 开展盾构泥水建仓瞬时失效情况下的非稳定渗流分析, 得到开挖面中心高程水平线($x'=0, z'=0$)上水压力随时间变化过程如图 4 所示, 其中: $ox'y'z'$ 为原点位于开挖面中心并随之变化的局部坐标系; y'/D 为归一化距开挖面距离。

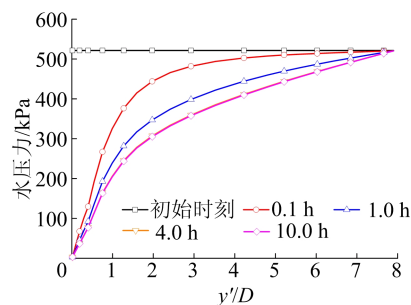


图 4 开挖面中心高程水平线上水压力随时间变化规律

由图 4 可知, 盾构泥水建仓瞬时失效时, 开挖面前端水压力随时间延长而逐渐降低, 越靠近开挖面水压力变化越快, 约 4 h 就趋于稳定。初始开挖面瞬时渗流量为 16 L/s , 约为稳定渗流量的 2.2 倍。可见, 盾构隧道非稳定渗流持续时间较短。同时考虑到实际泥水平衡盾构压力仓压力往往逐渐变化, 穿越断裂带时掘进速度慢, 且存在泥水压力时, 盾构开挖面与江水间水头差变小, 隧道开挖面泥水压力变化引起的渗流场变化将更快趋于稳定, 本文主要对隧道渗流稳定后的结果进行分析。

开挖面掘进至相对断裂带不同位置, 沿隧道中轴线竖直断面上水压力分布如图 5 所示。由图 5 可知, 水压力总体随着埋深的增加而增大, 在开挖面附近存在明显的水压力降低区域。开挖面掘进至断裂带部位时, 水压力降低区域范围明显增大。盾构开挖面未到断裂带前、位于断裂带中、穿过断裂带后时, 隧道开挖面渗流量分别为 333.3 、 628.7 、 $256.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由此可见, 断裂带对隧道渗流影响显著, 盾构开挖面掘进至断裂带时产生的渗漏风险明显增大。

为进一步分析不同开挖面相对断裂带位置对开挖面前端水压力分布特征的影响, 对比 3 条不同高程水平线($x'=0, z'=0$)、($x'=0, z'=0.5D$)、($x'=0, z'=D$)上水压力随距开挖面距离的变化, 如图 6 所示。

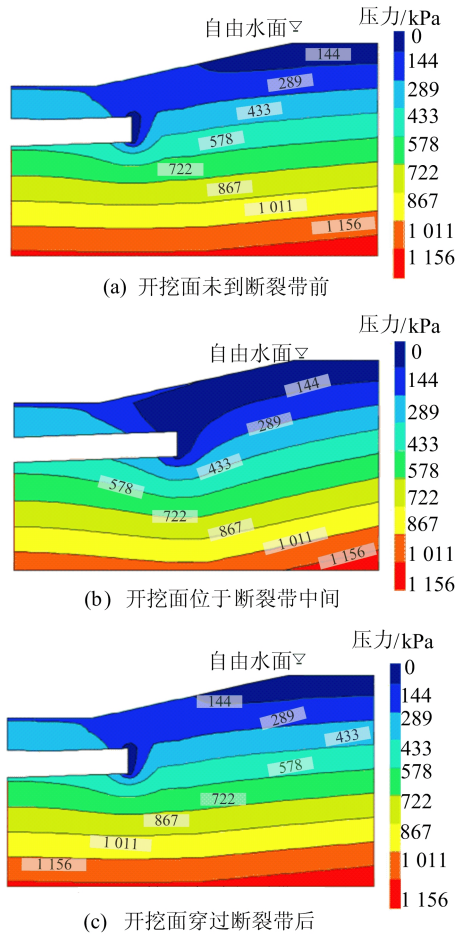


图 5 不同开挖面与断裂带相对位置下的水压力分布云图

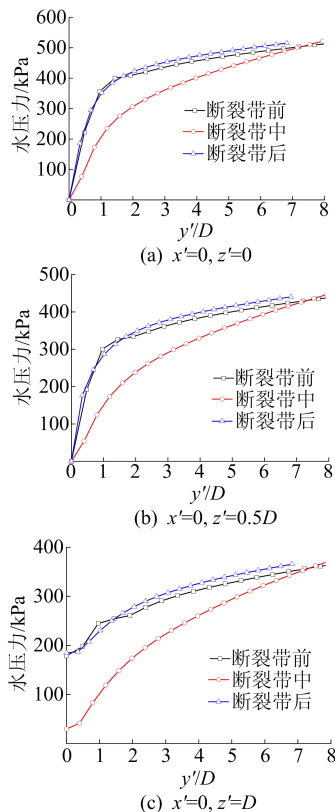


图 6 不同相对断裂带位置下水压力随距开挖面距离的变化

从图 6 可以看出,随着距开挖面距离的减小,开挖面前端水压力逐渐降低。开挖面未到断裂带前与穿过后,水压力变化规律接近,主要在开挖面前端 2 倍洞径区域内发生显著降低,而开挖面掘进至断裂带时,水压力明显降低,隧道开挖对水压力分布影响的范围显著扩大,断裂带对水压力分布影响的范围明显大于其宽度。开挖面未到断裂带前、位于断裂带中、穿过断裂带后时距开挖面中心 1 倍洞径位置的水压力分别为 360.3、205.4、348.2 kPa,相应位置的初始静水压力为 530.6、521.5、515.4 kPa,降幅分别为 32.1%、60.6%、32.4%。可见,盾构穿越断裂带过程,断裂带对开挖面前端水压力分布影响大。

3.2 江水位的影响

开挖面掘进至断裂带中,江水位分别为 5.64、12.21 m 时开挖面前端水压力随距开挖面距离的变化如图 7 所示。

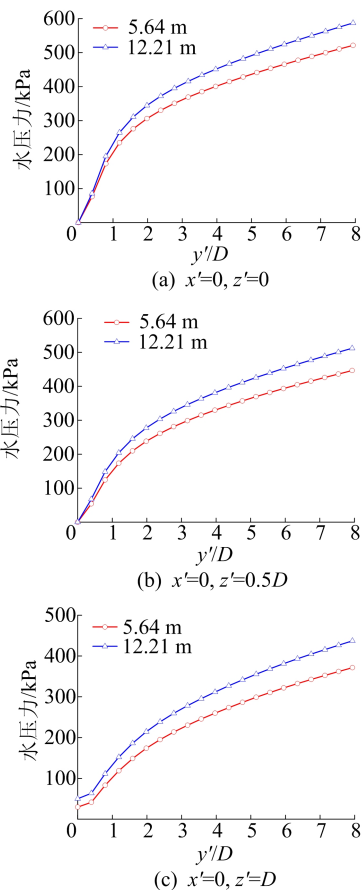


图 7 不同江水位下水压力随距开挖面距离的变化

从图 7 可以看出,江水位上升将引起开挖面前端水压力增大,江水位增大,开挖面前端水压力随距开挖面距离减小而降低得更为明显,由此产生的渗透力对开挖面稳定更为不利。在江水位为

12.21 m 时,隧道开挖面渗流量为 707.4 m³/d,比常水位时增大 13%。可见,江水位越大,盾构隧道渗漏风险越高,考虑到盾构隧道穿越断裂带部位时难度大、施工过程控制困难,宜在低水位下进行。

3.3 断裂带渗透性的影响

考虑到断裂带结构复杂,渗透系数存在空间变异性,通过对地勘资料中渗透系数建议值进行放宽后,研究断裂带渗透系数变化的影响,断裂带渗透系数分别为 0.10、0.50、2.00 m/d 时开挖面前端水压力随距开挖面距离的变化如图 8 所示。

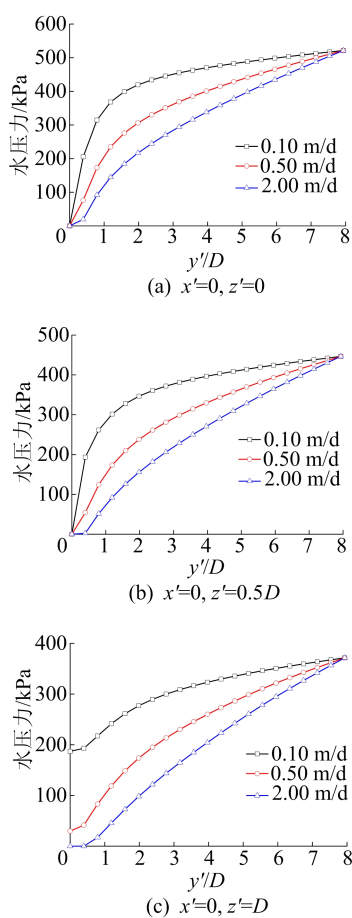


图 8 不同断裂带渗透系数下水压力随距开挖面距离的变化

由图 8 可知,隧道开挖面前端水压力随着距开挖面距离减小而降低,且断裂带渗透系数越大,水压力降低越快。断裂带渗透系数为 2.00 m/d 时,江水通过断裂带往开挖面渗流作用强烈,隧道开挖面前端水压力降低幅度大,开挖面顶部及上部地层中存在一定范围区域未达到饱和。断裂带渗透系数由 0.50 m/d 减小至 0.10 m/d,开挖面渗流量减小至 252.4 m³/d,降幅达 59.8%;而增加至 2.00 m/d 时,渗流量增大为 942.3 m³/d,增

幅为 49.9%。由此可见,隧道渗流受断裂带渗透系数影响大,目前盾构还未抵达断裂带部位,应加强对其渗透性的准确表征。断裂带渗透性越强,隧道发生漏水时的危害越大,实际穿越前有必要利用盾构机自带钻探、注浆系统对隧道周围尤其其洞顶断裂带进行有效的注浆加固,封堵可能存在的渗漏通道,降低江水渗漏的风险。

3.4 断裂带渗透性各向异性的影响

受内部裂隙发育影响,断裂带渗透性可能在水平与垂直方向呈现明显各向异性特征。通过选取断裂带渗透性各向异性比为 0.10、0.25、4.00、10.00,研究其对隧道渗流的影响。不同断裂带渗透性各向异性比下开挖面前端水压力随距开挖面距离的变化如图 9 所示。

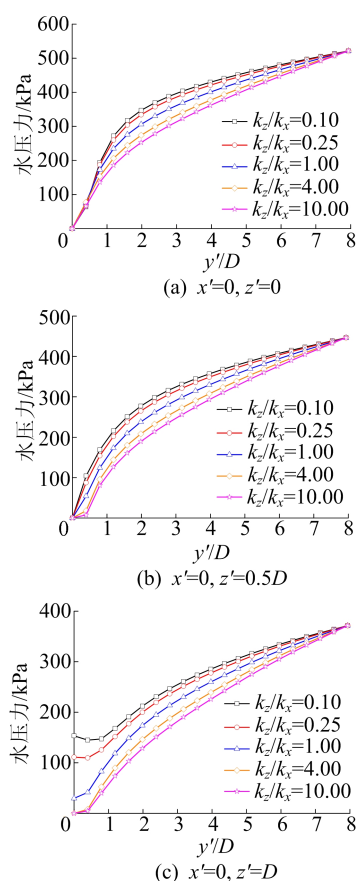


图 9 不同各向异性比下水压力随距开挖面距离的变化

由图 9 可知,随着断裂带渗透性各向异性比的增大,开挖面前端水压力不断减小,这主要是由于断裂带竖直方向渗透性增大导致江水往隧道开挖面渗流引起的降压作用增强。断裂带渗透性各向异性比由 0.10 增大到 10.00 时,开挖面前端水平线($x'=0, z'=0$)上水压力最大降幅为 94.4 kPa,位于距开挖面 2 倍洞径处,而水平线($x'=0, z'=D$)

0.5D)和($x'=0, z'=D$)上水压力最大降幅位于开挖面所在剖面附近,分别为 96.6、153.4 kPa。断裂带渗透性各向异性比为 0.10、0.25、4.00、10.00 时,开挖面渗流量分别为 467.0、517.0、754.7、833.5 m^3/d 。断裂带垂直方向渗透系数增大为水平方向的 10 倍时,渗流量增大 32.6%。可见,断裂带渗透性各向异性比越大,盾构隧道穿越断裂带的渗漏风险越大,隧道渗流明显受断裂带渗透性各向异性影响,应予以重视避免形成竖向向江水集中渗漏通道。

3.5 泥水压力的影响

本节研究泥水压力作用的影响,首先考虑开挖面中心点泥水压力分别为 175、345、520 kPa 的情形。不同泥水压力作用下开挖面前端水压力随距开挖面距离的变化如图 10 所示。

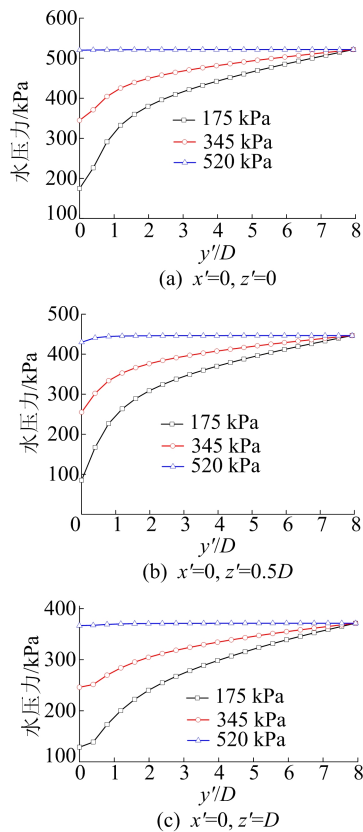


图 10 不同泥水压力下水压力随距开挖面距离的变化

由图 10 可知,隧道开挖面前端水压力均随着开挖面泥水压力的增大而增加。开挖面泥水压力越大,水压力随距开挖面距离减小而降低的幅度越小。当开挖面中心点泥水压力 520 kPa 与初始静水压力 521.5 kPa 接近时,3 条不同高程水平线($x'=0, z'=0$)、($x'=0, z'=0.5D$)、($x'=0, z'=D$)上水压力基本保存水平,最大变幅分别为 0.3%、

3.7%、1.2%,隧道开挖对水压力的扰动影响非常小。

在泥水压力低于初始静水压力情形下,通过数值计算与采用式(5)计算得到的开挖面渗流量如图 11 所示,其中 $H_w=52$ m、 $H_a=35$ m、 $k_N=\sqrt{0.1 \times 0.05}=0.07$ m/d、 $r_F=11.4$ m 为开挖面中心距断裂带顶部的距离与正前方断裂带厚度的均值。

由图 11 可知,开挖面渗流量数值解与理论公式计算值较为吻合,随着泥水压力的增大,开挖面渗流量逐渐变小,两者很好地服从线性变化规律。当盾构中心点泥水压力为 520 kPa 时,渗流量为 0.5 m^3/d ,与 3.1 节中无泥水压力下计算结果相比,减幅 99.9%。由上可知,盾构泥水压力作用对控制隧道渗流至关重要,隧道开挖面中心点泥水压力设置与初始静水压力相当有利于大幅减小盾构隧道穿越断裂带过程对水压力的扰动影响,并显著降低隧道渗漏的安全风险。本文提出的盾构穿越断裂带的开挖面渗流量理论公式适用性较好,但受实际工程地质条件复杂影响,需注意相关参数的合理选取。

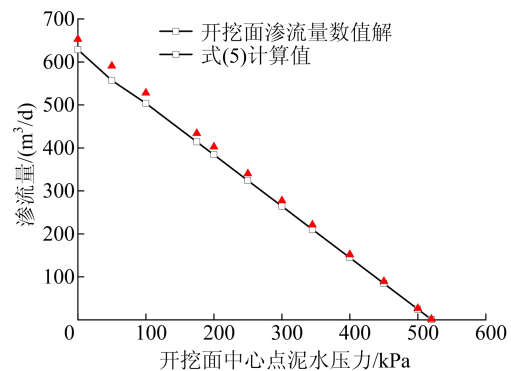
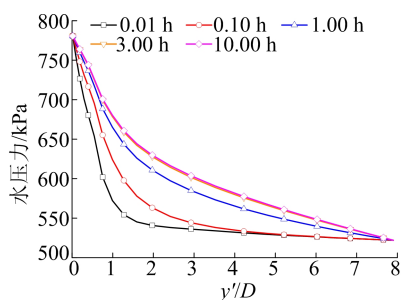


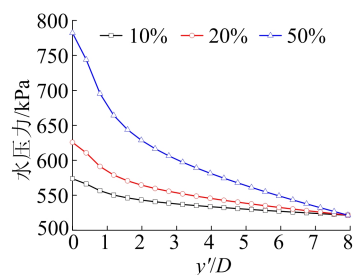
图 11 开挖面渗流量随中心点泥水压力大小的变化

进一步考虑泥水压力突增的影响,开挖面中心点泥水压力分别突增超过初始静水压力 10%、20%、50%,引起的开挖面前端水压力变化如图 12 所示。由图 12a 可知,泥水压力突增超过初始静水压力 50%时将引起开挖面前方水压力随着时间的延长逐渐增大,时间越长,水压力增高区域范围越大,约 3 h 趋于稳定。当泥水压力突增维持时间较短时,引起的水压力增大主要集中在开挖面前端 1 倍洞径范围内。由图 12b 可知,开挖面前端水压力随泥水压力突增幅度的变大而增加。可见,开挖面附近水压力对泥水压力突增的响应显著,产生的水压力突增效应将引起断裂带内有

效应力的变化,可能对断裂带稳定产生不利影响。



(a) 突增50%开挖面中心线上水压力变化过程



(b) 不同突增幅度的影响

图 12 开挖面泥水压力突增诱发的水压力变化特征

4 结 论

1) 芜湖城南过江隧道渗流受穿越富水断裂带影响,与开挖面在断裂带前、后方相比,开挖面位于断裂带中时渗漏量明显增大至 $628.7 \text{ m}^3/\text{d}$,开挖面前端水压力降低幅度增大且影响范围扩大,渗漏风险增加。

2) 隧道开挖面渗漏量和前端区域水压力均随着江水位的增大而增加,江水位增至百年一遇洪水位,为 12.21 m ,隧道渗漏量增幅 13% ,考虑到断裂带部位盾构施工本身难度大,宜在低水位下穿越以降低风险。

3) 隧道渗流受断裂带渗透性大小与各向异性的影响,渗透性及其各向异性比越大,开挖面前端水压力下降幅度越大,渗漏量也越大,隧道发生漏水时的危害越大,建议提前注浆加固洞身周围断裂带降低盾构穿越断裂带的江水渗漏风险。

4) 泥水压力作用可显著降低盾构穿越断裂带过程的渗漏风险以及对水压力的扰动,盾构中心点泥水压力 520 kPa 时,开挖面渗流量减幅达 99.9% ,但泥水压力突增会引起开挖面前端水压力迅速增大,可能对断裂带稳定不利,宜设置与初始静水压力相当的泥水压力以控制隧道渗流。

实际隧道穿越富水断裂带过程,应关注断裂带位置、渗透特性以及江水位变化对隧道渗流的

影响,建议穿越前对隧道周围尤其洞顶断裂带进行有效注浆加固,并在掘进过程严格控制掘进参数减小压力波动,注意保障盾构开挖面泥水压力对控制渗流的有益作用,降低江水渗漏的风险。

[参 考 文 献]

- [1] 何川,陈凡,黄钟晖,等. 复合地层双模盾构适应性及掘进参数研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 43-52.
- [2] 唐少辉,张晓平,刘浩,等. 复杂地层水下盾构隧道工程难点及关键技术研究及展望[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1477-1487.
- [3] 刘世伟,赵书争,付迪,等. 长期渗漏水条件下海陆相浅埋盾构隧道顶水土荷载计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 2149-2160.
- [4] 谢雄耀,杨昌植,王强,等. 南京和燕路过江通道盾构穿越长江大堤的沉降分析及控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 2): 3313-3322.
- [5] LI Y, CHEN Y, JIANG Q, et al. Performance assessment and optimization of seepage control system; a numerical case study for Kala underground powerhouse[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 306-315.
- [6] 袁帅,冯德旺,张森豪,等. 考虑水力参数空间变异性的盾构隧道开挖面稳定性分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 3153-3162.
- [7] DI Q, LI P, ZHANG M, et al. Three-dimensional theoretical analysis of seepage field in front of shield tunnel face[J]. Underground Space, 2022, 7(4): 528-542.
- [8] 谢家冲,黄昕,金国龙,等. 局部水力交互下盾构隧道渗流与力学响应研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 1179-1189.
- [9] 荆少东,张彬,樊东生,等. 下穿河流的输气隧道渗流安全性评价[J]. 油气储运, 2023, 42(3): 291-297.
- [10] 张晓,周建,蒋熠诚,等. 接头渗漏和土体渗透各向异性对盾构隧道渗流影响的数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 1012-1022.
- [11] 马少坤,陈彩洁,段智博,等. 基于镜像法的有限含水层内隧道渗流场解析解及其验证[J]. 工程力学, 2023, 40(5): 172-181.
- [12] 赵建平,李建武,毕林,等. 富水区隧道渗流场解析解及合理支护参数[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(11): 2142-2150.
- [13] 李廷春,李术才,陈卫忠,等. 厦门海底隧道的流固耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 397-401.
- [14] 朱成伟,应宏伟,龚晓南,等. 水下双线平行隧道渗流场解析研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 355-360.
- [15] 李鹏飞,刘江,张素磊. 平行 4 孔山岭隧道渗流场解析解及影响参数分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(12): 1996-2005.
- [16] 刘武,陈益峰,胡冉,等. 基于非稳定渗流过程的岩体渗透特性反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 362-373.

(责任编辑 吴 亮)