DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20241101001

文章编号:1674-599X(2025)01-0060-12

引用格式:李生辉,安永林,谭格宇,等.水下隧道过断层施工稳定性分析[J].交通科学与工程,2025,41(1):60-71. **Citation**: LI Shenghui, AN Yonglin, TAN Geyu, et al. Stability analysis of underwater tunnel crossing fault during construction [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025,41(1): 60-71.

水下隧道过断层施工稳定性分析

李生辉1,安永林1,谭格宇1,刘文娟2,周鲁云1,王柯1

(1.湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201;2.湖南科技大学 材料科学与工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘 要:【目的】在隧道开挖过程中,穿越含水断层破碎带与不穿越断层区域两种情况下围岩的稳定性存在显著区 别,毛洞围岩和衬砌结构在施工和运营期间的安全状况也明显不同。【方法】为了研究渗流对围岩稳定性的劣化作 用,需分析围岩渗流场和洞周围岩开挖二次应力场之间的耦合效应,指出围岩最不利的开挖位置和受力部位。【结 果】以长沙市营盘路湘江隧道为例,采用有限元数值软件进行模拟,分析了开挖过程中围岩的渗流场、应力场、位移 场和塑性区的变化特征,确定了易发生突涌水灾害的掌子面部位和断层影响范围。【结论】上台阶渗流量显著高于 中台阶、下台阶渗流量,最大渗流量出现在掌子面的左右两侧;上台阶前突位移明显大于中台阶、下台阶前突位 移,最大前突位移发生在掌子面的中央;在断层区域各部位的沉降均显著大于在正常围岩区域各部位的沉降, 以拱顶的表现最为明显;穿越断层区域促使围岩出现更大范围的塑性区,当掌子面推进至断层前方约10m时,掌 子面前方的塑性区与断层区域贯通,并延伸到地表;断层对不同位置的围岩的劣化影响程度不同,强影响区为断层 内部和断层前后3m范围,弱影响区为断层前后20m范围。

关键词:水下隧道;断层破碎带;数值模拟;施工稳定性;掌子面突涌水

中图分类号:U455.49 文献标志码:A

Stability analysis of underwater tunnel crossing fault during construction

LI Shenghui¹, AN Yonglin¹, TAN Geyu¹, LIU Wenjuan², ZHOU Luyun¹, WANG Ke¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: [Purposes] Excavating a tunnel crossing a water-bearing fault fracture zone results in significantly different stability of the surrounding rock compared to that in a non-fault area. This difference causes changes in the safety of the surrounding rock of the unlined tunnel and lining structure during construction and operation. [Methods] For further studying the deteriorating effect of seepage on the stability of surrounding rock, it is necessary to analyze the coupling effect between the seepage field of surrounding rock and the secondary stress field of tunnel surrounding rock excavation and point out the most unfavorable excavation position and stress location. [Findings] This paper takes the actual project of Xiangjiang Tunnel on Yingpan Road in Changsha City as an example and uses finite element software for simulation. The study analyzes the change characteristics of the seepage field, stress field, displacement field, and plastic zone of the surrounding rock during excavation and

收稿日期:2024-11-01

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(22B0516);湖南省学位与研究生教学改革研究项目(2024JGYB199);湖南省自然科学基金项目(2025JJ50295)

通信作者:安永林(1981一),男,教授,主要从事隧道与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail:aylcsu@163.com

determines the location of the tunnel face that is prone to sudden water inrush disasters and the influence range of the fault. [Conclusions] The research results indicate that the seepage discharge of the upper step is significantly higher than that of the middle and lower steps, and the maximum seepage discharge occurs on the left and right sides of the tunnel face. The displacement of the upper step is significantly greater than that of the middle and lower steps, and the maximum displacement occurs in the center of the tunnel face. The settlement of various parts in the fault zone is significantly greater than that in the normal surrounding rock zone, with the most obvious change being in the arch crown. A larger plastic zone of the surrounding rock is produced when the tunnel crosses the fault zone. When the tunnel face advances to about 10 m in front of the fault, the plastic zone in front of the tunnel face connects with the fault and extends to the surface. The degree of deterioration of surrounding rock at different locations by the fault varies. The strong influence zone includes the interior of the fault and 3 m before and after the fault, while the weak influence zone includes 20 m before and after the fault. **Key words:** underwater tunnel; fault fracture zone; numerical simulation; construction stability; sudden water inrush at tunnel face

随着我国经济的快速发展,越来越多的海底和 过江隧道相继修建,而水下隧道的最大特点是地下 水丰富,水压极高,在施工中极易产生突涌水灾害, 造成人身伤害及财产损失。水一方面会产生物理 效应,降低岩土体的孔隙率,另一方面会产生化学 效应,侵蚀岩体与土体。随着地下水渗流所引起的 事故激增,学者们倾向于研究隧道开挖中的流-固耦 合效应^[1-2]。然而,由于岩土体本身的复杂性以及水 和岩体的耦合作用极其复杂,我国各地的水文地质 情况也大相径庭,国内外对自然界广泛存在的水-土 耦合效应研究还不够全面。当隧道通过软弱岩层 时,在渗流的作用下,由于施工扰动引起应力场-位 移场-渗流场的剧烈变化,增强了断层中岩石的破碎 程度,岩体的渗透性大大提高,对隧道周围的岩体 造成严重损伤,进一步加剧了隧道失稳破坏的可能 性,也在很大程度上增加了工程的建设成本,制约 着施工和运营期间隧道的稳定与安全[3-4]。水下工 程建设中所发生的安全事故,大多是由地下水渗流 引起的。渗流场和围岩应力场的耦合作用,主要体 现在岩土变形引起渗透性能的改变,导致流体的孔 隙压力发生变化,而流体孔隙压力的改变又使得岩 土的应力状态发生变化,同时改变了岩土的物理力 学性质。随着我国的水下交通工程日趋增多,安全 问题不容忽视,安永林等[5-7]针对水下隧道渗透水问 题,指出水下并行隧道施工时先行洞对后行洞会造 成多方面的显著不利影响,并从富水程度、富水时 间、超挖汇水等多个角度,详细阐述了渗流对隧道 掌子面和支护结构安全性的影响。LI等^[8]利用有限

元数值软件,分析了岩体渗流与二次应力场的耦合 效应,得出了地下水作用下的隧道围岩塑性区的发 展规律。李清川等^[9]以青岛地铁2号线工程为背 景,建立了开挖失稳破坏力学模型,并利用数值软 件验证了理论模型的有效性。

当隧道穿越富水断层破碎带时,掌子面及洞周 受高水压、高地应力的作用,引发的突水突泥灾害 时有发生。关于断层隧道掌子面稳定性的研究,一 般集中在隧道所赋存的地质环境和岩体破坏力学 特征上^[10]。ZHANG等^[11]提出反映断层作用效应的 力学模型,并推导了断层等效参数计算公式,用以 研究断层对隧道的破坏模式。孟凡树等[12]通过筒 仓理论和极限平衡法建立断层破碎带水力破坏模 型,以计算防突岩盘受力特征。XUE等[13]利用数值 计算比较了不同支护方式下,围岩的塑性变形特 征。刘凯等[14]采用数值模拟方法研究了开挖过程 中高地应力断层围岩空间应力场的演化特征和分 布规律。LI等^[15]基于有限元基本原理,得出岩体渗 流会受断层和断层平面沿切向向下渗透的影响,据 此建立了地下工程渗流数值模拟的隐式复合元计 算方法。

综上所述,国内外对于流-固耦合效应、渗流场 分布规律、围岩力学破坏特征的研究较多,但研究 内容多针对单一的地质条件,对于流-固耦合效应下 隧道穿越不良富水断裂带的研究极少。为补全此 项研究的缺失,本文以长沙市营盘路湘江隧道为 例,采用有限元数值软件建立计算模型,通过定义 断层前后的5个典型断面,开展隧道穿越富水断层 施工的稳定性研究。主要内容为:首先,分析开挖 过程中孔隙水压和掌子面流速的变化规律;其次, 讨论断层对关键部位位移和掌子面前突位移的影 响;然后,探究塑性区的演化规律和断层对正常围 岩的作用程度;最后,总结易发生突涌水灾害的掌 子面部位和断层影响范围。

1 隧道项目概况

长沙市营盘路湘江隧道位于银盆岭大桥和橘 子洲大桥之间,呈东西走向,横跨潇湘大道和湘江 大道,距橘子洲大桥约1.3 km,距银盆岭大桥约2.1 km。隧道东端连接道路为营盘路,西侧连接道路为 咸家湖路,东岸有进口匝道在主线南侧与湘江中路 相连,西岸有一进一出两匝道连接主线北侧的潇湘 北路,东岸的出口匝道在主线北侧与湘江中路相 连。隧道平面布置如图1所示。

据湘江长沙站观测,最高洪水位为39.18 m,最 低水位为25.16 m,水位最大变幅为14.02 m,多年平 均水位为29.48 m,多年平均变幅为10.00 m,最大流 量为20 800 m³/s,最小流量为134 m³/s。场区覆盖层 主要为湘江河漫滩及阶地堆积层,东西两岸主要为 阶地沉积物。隧道过断层施工,造成断层影响范围 内岩体破碎,虽有断裂带但不属于活动性断裂,拟 建场地区域地质稳定。



图1 隧道平面布置图 Fig.1 Plan of tunnel

2 有限元模型

2.1 基本模型

本章依托上述实际隧道,利用有限元分析软件 建立三维数值模型,有限元模型如图2所示。根据 隧道的时空影响效应可知,开挖影响范围为3~5倍 洞径,设置三维模型尺寸为70m×70m×100m,施加 荷载为重力荷载。计算模型的约束条件为前后左 右四侧施加水平方向的单位位移约束,下侧施加竖 直与水平方向的单位位移约束,上侧为自由端。水 位边界考虑上部河床水压的作用,在模型的表面施 加常水位29.48m。隧道开挖后渗流边界条件的变 化,通过在掌子面及隧道环周施加零水头来实现。 初始平衡考虑渗流与自重的流-固耦合影响,先进行 初始渗流场计算,再进行初始应力场计算。围岩单 元为3D实体单元,喷混及钢拱架为2D板单元。



 (b) 隧道与断层

 (c) 台阶法开挖过程

 图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

2.2 模型参数

本文岩体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型, 支护采用线弹性模型,具体的材料参数见表1 和表2。

长沙市营盘路湘江隧道工程的地质勘察报告 对断层破碎带的描述为:"岩性为碎裂岩,灰、青灰 色,碎裂结构,富水,风化强烈,岩体呈碎石状,少量 的块状柱状,受破碎带影响,其两侧岩体破碎,岩芯 多为岩屑、岩粉,全风化,板岩结构为松疏的砂土 状、角砾状、碎裂状"。根据以上描述可确定断层破 碎带为V~ \I级围岩,断层破碎带的参数见表3。

Table 1 Parameters of soil layers 容重/ 弹性模 泊松 内摩擦 黏聚力/ 渗透系数/ 土层 $kN\boldsymbol{\cdot}m^{-3}$ 量/MPa 比 角/(°) kPa $(m \cdot s^{-1})$ 5.79×10⁻⁵ 粉细砂 20 15 0.30 18 5 圆砾 21 32 0.30 45 0 4.63×10^{-4} 中风化 23 3 000 0.35 40 500 1.27×10⁻⁶ 板岩

表1 土层参数

表2	结构参数
----	------

 Table 2
 Structure parameters

结构	容重/kN·m ⁻³	弹性模量/GPa	泊松比		
喷混+钢拱架	23	28	0.2		
仰拱	20	25	0.3		

表3	断层参数				
Table 3	Fault parameters				

able.	3 F	ault	param	eters

岩体	弹性模	泊松	重度/	黏聚力/	内摩擦	渗透系数/
类型	量/GPa	比	(kN·m ⁻³)	MPa	角/(°)	(m·s ⁻¹)
断层	20	15	0.3	18	5	1×10 ⁻⁵

3 基于实际工况的隧道穿越江底断 层破碎带施工稳定性分析

3.1 典型断面定义

为方便研究,定义断层中心为D断面,前方5、 10,15 m 分别为 C, B, A 断面, 后方 5, 10, 15 m 分别为 E、F、G断面,具体标定如图3所示。



3.2 孔隙水压力分布规律

隧道在不同施工阶段的孔隙水压力云图如图4 所示。由图4可知,隧道开挖前,土体孔隙水压力随 深度的增加而线性增加,整体呈静水压力状态。随 着开挖的进行,周围土体水压力明显降低,原因是

隧道开挖破坏了原本的水压平衡,隧道周边的地下 水涌向洞内,在施工中有很大可能引起突涌水、突 泥等风险。



为进一步明确隧道周围土体孔隙水压力的变 化过程,提取隧道开挖至不同断面时,掌子面前方 孔隙水压力分布曲线如图5(a)所示。由图5(a)可 知,掌子面前方孔隙水压力随着距掌子面距离的增 加而增加,且隧道开挖至不同断面时,孔隙水压力 分布呈现出明显的阶段特征。当开挖至C断面之 前,前方孔隙水压力分布出现明显拐点,且拐点位 置在C断面处,这是由于断层岩体质量差,储水能力 强,当地下水发育时,断层内水压将显著高于正常 围岩。当隧道开挖至C断面时,即揭露断层瞬间,掌 子面前方孔隙水压力出现明显降低,且原先存在的 拐点消失,这代表当开挖至断层时,水压得到迅速 释放。在实际工程中,这种现象表现为瞬间的突水 突泥,此阶段的施工危险性大,应加强监控量测,避 免灾害。当开挖至D断面之后,掌子面前方孔隙水 压力基本稳定,整体呈流畅的抛物线状,周围地下 水形成了新的动态平衡,发生灾害的可能性较小。

D断面拱顶至地表的孔隙水压力分布随隧道开 挖的变化规律如图5(b)所示。由图5(b)可知,该路 径的孔隙水压力随着隧道的开挖逐渐减小,呈现出 明显的阶段性特征。开挖至C断面之前,即尚未揭 露断层时,孔隙水压力线性分布,随着深度的增加 而增加,整体呈静水压力状态。开挖至D断面时,掌 子面已位于富水断层内部,岩体渗透系数显著提 高,孔隙水压力明显下降,突涌水灾害几乎是瞬时 发生的,越接近拱顶,下降越明显,越接近地表,受 开挖的影响越小。开挖至E断面后,施工扰动影响 逐渐减弱,距离拱顶越近,水压越小,而距离拱顶越 远,水压越大,表明隧道穿越断层区域后,该路径的 孔隙水压力逐渐稳定,危害性降低。



3.3 掌子面流速分布规律

当隧道揭露断层时,极有可能瞬时发生突水突 泥灾害,为进一步明确隧道开挖过程中的涌水情 况,提取上台阶掌子面推进至不同位置时的流速云图,上台阶掌子面渗流量如图6所示。

由图6可知,当上台阶开挖至A、B断面时,掌子 面最大流速均出现在掌子面两侧的底部;当上台阶 开挖至C断面时,即上台阶揭露断层的瞬间,掌子面 最大流速出现在掌子面中心线的两侧,呈对称分 布;而当上台阶开挖至D、E断面时,掌子面最大流 速出现的位置又回到掌子面两侧的底部。从掌子 面最大流速出现的位置来看,当上台阶揭露断层的 瞬间,周围水流会有一个往掌子面中央集中的趋 势,这是由于断层内储存了大量的水,在揭露断层 的瞬间在掌子面中心产生了极高的渗透力,在施工 中极易击穿掌子面,造成灾害^[16]。





Fig. 6 Seepage discharge of tunnel face at upper step

为进一步明确掌子面涌水量的变化规律,提取 三台阶掌子面各观测点的流速变化,掌子面观测点 流速如图7所示。由图7可知:1)从三台阶在断层 区域各观测点的最大流速来看,上台阶最大流速为 10.80~14.48 m/d, 中台阶最大流速为 0.89~7.50 m/d,下台阶最大流速为0.71~5.20 m/d,上台阶流速 明显大于中台阶、下台阶流速,在实际工程中,若是 采用台阶法开挖,应注意上台阶开挖的稳定性;2) 各观测点流速变化规律基本相同,在台阶揭露断层 瞬间,上台阶观测点4的流速从3.24 m/d 增加至 14.48 m/d, 中台阶观测点 8 的流速从 1.12 m/d 增加 至 7.50 m/d, 下台阶观测点 12 的流速从 0.76 m/d 增 加至5.20 m/d,各观测点流速急剧增加至最大值,而 后随开挖的推进又快速下降,在穿越断层后,流速 基本趋于平缓,突水的风险降低;3)上台阶观测点4 的最大流速为14.48 m/d,上台阶涌水量较大的位置 位于上中台阶交界面的两侧,中台阶观测点8的最 大流速为7.50 m/d,中台阶涌水量较大的位置位于 掌子面两侧,下台阶观测点12的最大流速为5.20 m/d,下台阶涌水量较大的位置位于仰拱底部。





3.4 隧道不同部位位移变化规律

隧道开挖完毕后各关键位置的位移如图8所 示。开挖完毕后,拱顶发生沉降,仰拱发生隆起,拱 肩及拱腰出现收敛位移,各部位在断层区域的位移 显著大于在正常围岩区域的,拱顶沉降最为明显, 各部位的位移变化规律也有明显的区别。

拱顶沉降、仰拱隆起、拱腰与拱肩的收敛位移

最大值均出现在断层中心,拱肩沉降略低于拱顶; 在断层中心拱顶沉降最大值为6.20 mm,约为正常 围岩处拱顶沉降平均值(4.26 mm)的1.46倍;拱肩沉 降最大值为5.84 mm,约为正常围岩处拱肩沉降平 均值(3.84 mm)的1.52倍;仰拱隆起最大值为0.96 mm,约为正常围岩处仰拱隆起平均值(0.55 mm)的 1.75倍。相较于拱顶和拱肩位移,仰拱位移受断层 影响的程度略大。

拱腰收敛受断层影响的程度比拱肩的大,在断 层中心拱腰收敛最大值为3.70 mm,约为正常围岩 处拱腰收敛平均值(1.01 mm)的3.66倍。拱肩收敛 最大值1.65 mm,约为正常围岩处拱肩收敛平均值 (0.74 mm)的2.23倍。







上台阶开挖至不同位置时拱顶位移如图9所示。图9中,横坐标0m(x=0m)处即为断层中心,右侧图例表示上台阶掌子面所处位置。

当上台阶开挖面距离断层较远,在图9中

x=-30 m处时,隧道开挖引起断层处土体的变化,断 层区域内土体的沉降值大于断层前后小范围内正 常围岩处土体的沉降值,土体沉降形成漏斗状分 布,该状态一直持续至上台阶开挖面揭露断层前。 断层的存在使周围土体的位移场发生了明显的变 化。观察断层前后方土体的沉降,可发现掌子面掘 进在 x=-30 m 至 x=-10 m时,断层后 20 m处的土体 沉降较为明显,而当掌子面掘进在 x=20 m 至 x=40 m 时,断层前 20 m处的土体沉降比较显著。可以认 为,断层的主要影响范围为其前后 20 m范围。掌子 面前方的拱顶沉降显著低于掌子面后方的,这代表 掌子面对围岩起到了一定的支撑作用。

当隧道揭露断层后,掌子面处拱顶沉降急剧增加,隧道的开挖开始对断层后50m范围的围岩产生影响。当掌子面穿过断层中心后,断层中心处的拱顶沉降成为断层前后50m范围内拱顶沉降的最大值,这意味着张拉性断层的围岩状态是突变的,断层与正常围岩的性质明显不连续。

隧道开挖完毕后,在整个隧道路径上拱顶沉降 呈两头高、中间低的漏斗状分布,断层区域内的拱 顶沉降明显比正常围岩区域的大,对这一范围的周 围岩体应及时采取注浆加固措施。同时,断层区域 的衬砌支护参数也应强于普通围岩区域的^[17]。





随着开挖的进行,断层中心处隧道各关键位置 的位移变化规律如图10所示。总体来看,D断面处 拱顶和仰拱的位移均随着开挖的推进而增大,尚未 进入断层前,拱顶沉降与仰拱隆起较小,揭露断层 后,两者均发生突变,拱顶位移的突变程度比仰拱 位移的大,拱顶沉降在上台阶穿过E断面后趋于稳 定,仰拱隆起在中台阶穿过E断面后也趋于稳定。





拱肩与拱腰收敛有明显的阶段性变化:1) 拱腰 收敛随掌子面的推进逐渐增大,在上台阶揭露断层 前,增速较慢,揭露断层后,增速急剧增大,并一直 持续到下台阶穿过E断面,当下台阶穿过E断面后, 拱腰收敛趋于稳定;2) 拱肩收敛随掌子面的推进逐 渐增大,与拱腰收敛的情况类似,在上台阶揭露断 层后,拱肩收敛急剧增大,在上台阶穿过D断面后, 拱肩收敛有所下降,穿过E断面后,拱肩收敛继续上 升,在中台阶穿过E断面后趋于稳定。

为了解正常围岩区域各关键位置位移变化规 律,提取随上台阶掌子面的推进横坐标 30 m(x=30 m)处断面的位移变化,如图11所示。由图11可知, 拱顶位移随着开挖的进行逐渐下降,开挖至该断面 时沉降快速增加,穿过断层后,沉降又再一次突然 增大,在揭露断层后,断层对后方的拱顶沉降依然 产生作用。仰拱的竖向位移随着上台阶的推进逐 渐下降,穿过该断面后,竖向位移开始上升,一直持 续至上台阶揭露断层,穿越断层后竖向位移趋于稳 定,该断面仰拱的竖向位移主要受上台阶影响,中 下台阶对其影响较小。拱腰收敛随上台阶的推进 有明显的阶段性变化,表现为上升,下降,再上升, 最后稳定。初始上升阶段是开挖至该断面后10 m 时(中台阶揭露该断面),随后是下降阶段,该阶段 掌子面位于该断面后10 m至断层范围内,揭露断层 后,收敛继续增加,随后趋于稳定。这说明断层对 整体的影响较大,即使是已开挖的部分,仍然会受 到断层的影响。



Fig. 11 Displacement change of key positions (x=30 m)

3.5 掌子面前突位移分布规律

隧道突水突泥必然伴随着掌子面前突位移,了 解其变化规律,有助于防范突水对人员和设备的危 害,保证建设的安全^[17]。上台阶掌子面前突位移云 图如图12所示,上中下三台阶掌子面前突位移变化 如图13所示。研究发现:1)三台阶掌子面前突位 移最大值均出现在掌子面揭露断层时,与掌子面前 方孔隙水压力骤降的位置吻合,故可认为当掌子面 揭露断层时,施工风险极高,极易发生突水突泥灾 害;2)中台阶开挖至*C*、*D*断面时掌子面位移明显比 开挖至*B*、*E*断面时的大,应着重防控;3)中台阶及 下台阶开挖时掌子面前突位移显著低于上台阶开 挖时掌子面前突位移,需关注上台阶的施工状况。







Fig. 13 Displacement variation of tunnel face

3.6 塑性区分布规律及安全系数

掌子面开挖至不同位置时土体的塑性区分布 如图14所示。当上台阶掌子面未接近断层时,塑性 区为拱顶上方5m,上台阶掌子面前方5m,下台阶 掌子面下方10m围成的椭圆形区域;当上台阶开挖 至距断层10m时,前方塑性区与断层贯通,并延伸 至地表,由于岩体破碎,储水能力强,导致突水概率 激增;随着掌子面继续推进,当上台阶开挖至断层 内部时,塑性区集中在断层内部,并沿着正常围岩 与断层的交界面延伸至地表,此时掌子面上方岩体 松动,极易发生塌方;当掌子面穿过断层后,塑性区 范围开始减小,隧道上方的塑性区逐渐消失,塑性 区开始往隧道下方移动,这说明中下台阶开挖的影 响范围集中在隧道下部。总体而言,当隧道使用台阶 法开挖时,灾害易发生在上台阶开挖的过程中,而 中下台阶相对来说安全性较高。





(b)掌子面距断层中心10m



利用强度折减法,得到上台阶开挖至不同断面 时隧道的安全系数如图15所示,图中横坐标0m处 为断层中心。由图15可知,断层对隧道稳定性的影 响很明显,当隧道开挖至断层附近时,掌子面前方 土体的隔水效应减弱,岩土体受渗流场弱化的影响 加剧,围岩的物理力学条件加速劣化,隧道的安全 系数显著降低;当掌子面向前推进逐步远离断层 时,断层内渗透水对正常围岩的影响明显减弱,隧 道的安全系数又恢复至正常值;当隧道尚未开挖至 断层区域时,或者隧道开挖至远离断层之后,隧道 的安全系数均稳定在6左右。从安全系数上来看, 断层的影响范围为上台阶开挖至断层前10m到断 层后20m,特别是断层中心到断层后10m,这一范 围为整个隧道开挖的高风险区域,在施工中应着重 防控。



3.7 隧道过断层影响分区

考虑到数值模拟方式是基于理论手段来进行 研究的,若仅以数值计算的结果进行影响分区,尚 不能直观表现出断层对其他正常区域围岩的影响 程度,故以无断层时隧道的位移为基准,将断层导 致的位移变化与基准位移的百分比作为分区的依 据,强影响区与弱影响区的分界标准为30%,弱影 响区与无影响区分界标准为5%。断层影响分区如 图16所示。由图16可知,断层仅影响其前后的部 分区域,超出一定范围后断层的影响有限。



Fig. 16 Zoning of fault influence

4 结论

针对隧道过富水断层破碎带施工的安全问题, 本文基于实际工况,运用数值模拟软件从孔隙水压 力、掌子面渗流量、关键位置位移、掌子面前突位 移、塑性区及安全系数、断层影响分区等多个方面 对江底断层隧道施工稳定性进行研究,具体结论 如下:

1) 隧道开挖使周围土体的孔隙水压力明显降低,掌子面抵近断层后,断层内较高的孔隙水压力 迅速释放,易造成突涌水灾害;各台阶开挖时最大 渗流量均出现在掌子面揭露断层时,上台阶掌子面 渗流量显著高于中台阶、下台阶掌子面渗流量,对 整个掌子面来说,最大渗流量出现在掌子面左右 两侧。

2) 开挖完毕后,断层内的拱顶沉降、拱腰收敛 以及仰拱隆起均显著大于正常区域的,其中又以拱 顶沉降最为明显;各台阶最大前突位移均发生在掌 子面揭露断层时,上台阶前突位移显著大于中台 阶、下台阶前突位移,最大前突位移发生在上台阶 掌子面的中央。

3) 隧道开挖会在掌子面周围形成塑性区,当掌子面推进至断层前方约10m时,掌子面前方的塑性 区与断层贯通,并延伸到地表。

4) 断层强影响区为断层内部和断层前后3m 范围,弱影响区为断层前后20m范围。

参考文献(References):

- [1] 刘平,刘池,王洪涛,等.富水砂层影响下隧道围岩变 形破坏机制的数值模拟研究[J].现代隧道技术,2020, 57(4):74-81.DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2020.04.010.
 LIU Ping, LIU Chi, WANG Hongtao, et al. Numerical simulation study on the deformation and failure mechanism of tunnel surrounding rock under the effect of water-rich sand layer [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(4):74-81.DOI: 10.13807/j.cnki. mtt.2020.04.010.
- [2] 吉小明,王宇会,阳志元.隧道开挖问题中的流固耦合 模型及数值模拟[J].岩土力学,2007,28(增刊1): 379-384.

JI Xiaoming, WANG Yuhui, YANG Zhiyuan. Fluid structure coupling model and numerical simulation in tunnel excavation problems [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(sup 1): 379-384.

[3] 彭益成, 龚琛杰, 丁文其, 等. 考虑管片接头渗流的盾

构隧道流固耦合模型研究[J].土木工程学报, 2022, 55 (4): 95-108. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2020.S1.031. PENG Yicheng, GONG Chenjie, DING Wenqi, et al. Fluid-structure coupling model of shield tunnel considering seepage of segmental joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55 (4): 95-108. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2020.S1.031.

[4] 刘继国,朱光仪,郭小红,等.厦门海底隧道建设中涌水量流固耦合数值模拟[J].现代隧道技术,2006,43
(2): 34-37,43.DOI: 10.3969/j.issn.1009-6582.2006.02.008.
LIU Jiguo, ZHU Guangyi, GUO Xiaohong, et al.

Coupled fluid-mechanical numerical simulation on water inflow capacity in Xiamen subsea tunnel during construction [J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43 (2) : 34-37, 43. DOI: 10.3969/j. issn. 1009-6582. 2006.02.008.

- [5] 安永林, 胡文轩, 岳健. 水下并行隧道施工后行洞对先行洞的影响分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2016, 31(2): 66-70. DOI: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2016.02.011.
 AN Yonglin, HU Wenxuan, YUE Jian. Analysis of the impact of the downstream tunnel on the upstream tunnel during underwater parallel tunnel construction [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 31(2): 66-70. DOI: 10.13582/j.cnki.1672-91022.02.011.
- [6] 安永林,曾贤臣,赵丹,等.富水程度及饱水时间对隧道掌子面稳定性影响[J].铁道科学与工程学报,2019,16 (5):1260-1265. DOI: 10.19713/j. cnki. 43-1423/u.2019.05.020.

AN Yonglin, ZENG Xianchen, ZHAO Dan, et al. Influence of water content and saturation time on the stability of tunnel face [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16 (5) : 1260-1265. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2019.05.020.

- [7] 安永林, 郭晋东, 周进, 等. 局部超挖汇水下隧道支护 结构受力特性[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 91-98. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2022.05.012.
 AN Yonglin, GUO Jindong, ZHOU Jin, et al. Influence of catchment caused by local overbreak on the mechanical characteristics of tunnel support structure[J].
 Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(5): 91-98.
 DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2022.05.012.
- [8] LI C, ZHOU T, JIANG S, et al. Finite element analysis for the stress field and seepage field interaction within Qingdao submarine tunnel rockmass [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 405-408: 1278-1282. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.405-408.1278.
- [9] 李清川, 李术才, 王汉鹏, 等. 上覆流沙层隧道开挖面 稳定性分析与数值试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39 (7): 2681-2690. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1620.

LI Qingchuan, LI Shucai, WANG Hanpeng, et al. Stability analysis and numerical experiment study of excavation face for tunnels overlaid by quicksand stratum [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (7) : 2681-2690. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1620.

- [10] 安永林,李佳豪,曹前,等.上软下硬地层隧道掌子面 稳定性及塌方形态[J].中国铁道科学,2019,40(1): 79-87. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2019.01.11.
 AN Yonglin, LI Jiahao, CAO Qian, et al. Tunnel face stability and collapse shape in upper-soft and lower-hard strata[J]. China Railway Science, 2019, 40(1): 79-87. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2019.01.11.
- [11] ZHANG Z, CHEN F, LI N, et al. Influence of fault on the surrounding rock stability for a mining tunnel: distance and tectonic stress [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(5): 2054938. DOI: 10.1155/ 2019/2054938.
- [12] 孟凡树, 王迎超, 焦庆磊, 等. 断层破碎带突水最小安 全厚度的筒仓理论分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 89-95. DOI: 10.11918/201810155.
 MENG Fanshu, WANG Yingchao, JIAO Qinglei, et al. Analysis of the minimum safe thickness of water inrush in fault fracture zone based on the silo theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(2): 89-95. DOI: 10.11918/201810155.
- [13] XUE Y, ZHOU B, WU Z, et al. Mechanical properties of support forms for fault fracture zone in subsea tunnel
 [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2020, 56(6); 436-444. DOI: 10.1007/s11204-020-09627-6.
- [14] 刘凯, 孔超, 唐浚哲, 等. 高地应力断层破碎带衬砌力 学特性对比与分析[J]. 铁道标准设计, 2014(12): 99-

103, 108. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.2014.12.024. LIU Kai, KONG Chao, TANG Junzhe, et al. Comparison and analysis of mechanical properties of lining in fault fracture zone with high geostress [J]. Railway Standard Design, 2014 (12) : 99-103, 108. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.2014.12.024.

- [15] LI L, XIAO M. Study on implicit composite element method for seepage analysis in underground engineering
 [J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(10): 1617-1626. DOI: 10.1007/s11431-015-5888-y.
- [16] 吴波,李雅婷,徐世祥,等.基于博弈论组合赋权-灰关 联投影法的山岭隧道突涌水风险评价[J].科学技术与 工程,2024,24(25):10946-10955.DOI:10.12404/j. issn.1671-1815.2306820.

WU Bo, LI Yating, XU Shixiang, et al. Risk assessment of water inrush in mountain tunnel based on game theory combination weighting-grey relation projection method [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24 (25) : 10946-10955. DOI: 10.12404/j. issn. 1671-1815.2306820.

- [17] 苑郁林,周群立.乌鞘岭隧道穿越F7断层隧道变形机 理分析及其支护措施的探讨研究[J].中国铁路,2005, 36(2):20-23. DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2005.02. 004.
 - YUAN Yulin, ZHOU Qunli. Analysis on the tunnel deformation mechanism of Wushaoling Tunnel crossing F7 faultage and exploration on its support measure [J]. China Railway, 2005, 36(2): 20-23. DOI: 10.19549/j. issn.1001-683x.2005.02.004.

(责任编辑:熊怡)