

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2025.01.021

引用格式: 伍军, 刘辉, 王筱萌, 等. 断层破碎带水位升降对隧道围岩稳定性的影响分析[J]. 公路与汽运, 2025, 41(1): 106-111+115.

Citation: WU Jun, LIU Hui, WANG Xiaomeng, et al. Analysis of influence of water level rise and fall in fault fracture zone on the stability of tunnel surrounding rock[J]. Highways &amp; Automotive Applications, 2025, 41(1): 106-111+115.

## 断层破碎带水位升降对隧道围岩稳定性的影响分析\*

伍军<sup>1</sup>, 刘辉<sup>1</sup>, 王筱萌<sup>2</sup>, 邓小钊<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中铁十五局集团 第二工程有限公司, 上海 201714; 3. 湖南遐途交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙 410199)

**摘要:** 为研究隧道斜穿断层破碎带时流固耦合效应和水位升降对隧道围岩稳定性的影响, 以醴娄(醴陵—娄底)高速公路周家冲隧道工程为依托, 以流固耦合效应和不同地下水位为单一变量, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分软件建立三维数值计算模型, 对比分析不同工况下隧道围岩变形和应力及塑性区分布。结果表明, 考虑流固耦合作用时, 隧道围岩位移和应力及塑性区体积均增大; 水位升高对强度高围岩处拱顶位移的影响非常小, 但会使仰拱位移进入收敛期的时间延长, 高水位时隧道仰拱易发生底鼓破坏; 围岩塑性区主要分布在断层、拱脚及拱腰处, 随着地下水位升高, 塑性区体积以拉伸塑性区增长为主。

**关键词:** 隧道; 断层破碎带; 围岩稳定性; 水位升降; 流固耦合

中图分类号: U451.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2025)01-0106-06

山岭隧道修建中经常会遇到断层破碎带。大量工程实践表明, 断层破碎带围岩脆弱、不稳定, 施工中围岩与初期支护容易发生严重变形和破坏, 特别是地下水丰富地段经常出现涌水、突泥灾害<sup>[1-3]</sup>。颜永斌、龚林金、梁松林等对穿越断层破碎带隧道的围岩失稳机制、应力应变特征及施工技术进行了研究, 取得了一定成果<sup>[4-6]</sup>。张智健等通过有限元软件 MIDAS GTS NX 分别建立不同断层破碎带夹角、倾角的隧道三维有限元模型, 对隧道围岩稳定性进行分析, 并提出了相应处置措施<sup>[7]</sup>。王茜等研究隧道入口段穿越断层破碎带时不同施工方案下隧道围岩位移、塑性区分布及受力特性, 提出了最佳施工方案<sup>[8]</sup>。孙浪等利用 MIDAS GTS NX 软件进行断层破碎带对隧道围岩稳定性的影响分析, 结果表明, 在仅考虑开敞式 TBM(Tunnel Boring Machine, 隧道掘进机)施工影响且不考虑地层初始位移的情况下, 断层破碎带围岩劣化严重及厚度增加会对隧道围岩稳定性产生不利影响<sup>[9]</sup>。韩瑀萱等利用 ANSYS Workbench 参数化建模平台和 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分软件模拟分析不同倾角、厚度和倾向断层破碎带对隧道围岩稳定性的影响, 结果表明, 在一定范围内, 断

层倾角、厚度变化对围岩稳定性影响较大<sup>[10]</sup>。罗春雨等以绵茂(绵竹—茂县)公路蓝家岩隧道为工程背景, 分析流固耦合作用下高地应力软岩大变形隧道施工稳定性, 发现考虑耦合效应时隧道拱部沉降、洞周水平位移、底部隆起、围岩压应力均较大<sup>[11]</sup>。胡涛涛等通过 FLAC<sup>3D</sup> 建立高地应力炭质板岩隧道分析模型, 分析含水率对围岩稳定性的影响, 发现随着含水率的增大, 炭质板岩的强度降低, 围岩的自稳能力减弱<sup>[12]</sup>。穆兰等建立某富水断层隧道三维数值模型模拟其施工全过程, 研究了隧道穿越富水断层时围岩变形特性、力学响应、渗流场、能量集聚及衬砌结构位移的变化规律<sup>[13]</sup>。罗燕平等分析不同地下水位高度时富水软弱破碎带大断面隧道拱顶沉降、水平收敛、围岩应力和塑性区分布, 发现隧道周围孔隙水压力、拱顶沉降和水平收敛位移与地下水位高度正相关, 围岩应力随水位高度增加呈线性增长<sup>[14]</sup>。现有研究对穿越断层破碎带隧道的围岩稳定性分析较深入, 对隧道斜穿两侧为不同风化带断层的情况研究较少, 且有些研究未考虑地下水的影响。本文以醴娄(醴陵—娄底)高速公路周家冲隧道为依托, 采用三维数值模拟方法, 分别以流固耦合效

\* 基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ40531); 长沙市天心区重点创新人才工作(202310)

应、不同地下水位为单一变量进行隧道开挖模拟,分析不同工况下隧道围岩变形和应力及塑性区分布,为类似工程设计、施工提供借鉴。

## 1 工程概况

周家冲隧道由左右分离式隧道组成,洞身间距为 20~35 m,单洞长度为 1 990 m,最大埋深为 182.4 m。隧道围岩结构复杂,单洞三车道,断面跨度大,施工安全风险高。洞身穿越区域有 3 处断层,断层范围内岩体结构破碎,富水性较强;F19 断层走向与隧道中心线斜交,角度约为 60°,同时洞身与断层交汇处位于冲沟地段,地表水很丰富,地表水在地表汇集后沿破碎岩体、节理裂隙产生涌流状或淋雨状渗水现象。地下水主要补给来源为大气降水。按照地形地貌和地下水补给、径流、排泄条件,结合隧道各段水文地质条件等,将隧道分为 2 个水文地质分区,其中 F19 断层位于一区,该段围岩类别为 V 级。

## 2 三维数值模型

### 2.1 计算模型

采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件建立隧道三维分析模型,考虑边界效应和计算效率,模型边界取 3~5 倍洞径,模型尺寸为 130.0 m×100.0 m×95.5 m(长×宽×高)。模型中围岩分为强风化板岩、断层带和中风化

板岩三类,F19 断层宽度 10 m,倾角 60°,倾向 240°。图 1 为隧道数值计算模型。对模型的下方、四周边界设置法向约束。隧道开挖后,地下水流遵循达西定律,地下水渗流为稳定状态下单向饱和流。隧道开挖后形成临空面,隧道洞壁与掌子面的水压力设置为零。模型边界处的孔隙水压力在施工前后保持不变。隧道开挖进尺为 1 m,开挖方法为全断面法。

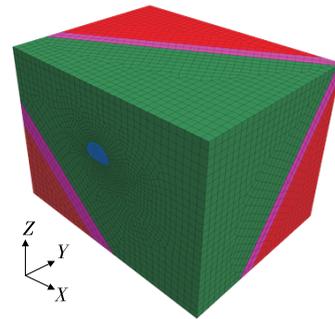


图 1 隧道三维数值计算模型

### 2.2 计算参数选取

根据周家冲隧道工程地质勘察报告确定隧道围岩、断层带和支护材料物理力学参数(见表 1)。围岩采用莫尔-库伦模型,初期支护(由钢拱架和 C25 喷射混凝土组成)采用理想弹性模型,锚杆通过 FLAC 自带的 Cable 结构单元模拟,二次衬砌作为安全储备不予模拟。

表 1 隧道围岩及支护材料的物理力学参数

围岩及支护材料	弹性模量/GPa	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> )	孔隙率
强风化板岩	1.0	20.0	0.28	150	25	1×10 <sup>-6</sup>	0.2
断层带	0.7	17.0	0.40	60	16	4×10 <sup>-6</sup>	0.3
中风化板岩	1.5	25.0	0.32	250	28	1×10 <sup>-6</sup>	0.2
初期支护	29.0	23.0	0.20	—	—	1×10 <sup>-8</sup>	0.1
锚杆	210.0	78.5	0.30	—	—	—	—

### 2.3 计算工况

以流固耦合效应为单一变量,设置 2 种计算工况:不考虑流固耦合效应(工况 I-1);考虑流固耦合效应,地下水位位于隧道拱顶上方 15 m 处(工况 I-2)。以地下水位变化为单一变量,考虑流固耦合,设置 3 种计算工况:地下水位位于隧道拱顶上方 5 m 处(工况 II-1);地下水位位于隧道拱顶上方 15 m 处(工况 II-2);地下水位位于隧道拱顶上方 25 m 处(工况 II-3)。分析单一变量改变时,隧道开挖过程中围岩位移、应力及塑性区的变化。

## 3 模拟结果分析

### 3.1 流固耦合影响分析

将流固耦合效应作为单一变量,对考虑和不考虑流固耦合效应 2 种工况下隧道围岩位移和应力及塑性区分布进行对比分析。

#### 3.1.1 围岩位移

2 种工况下隧道拱顶和仰拱处围岩竖向位移见图 2,隧道贯通后拱顶和仰拱竖向位移的变化见图 3。

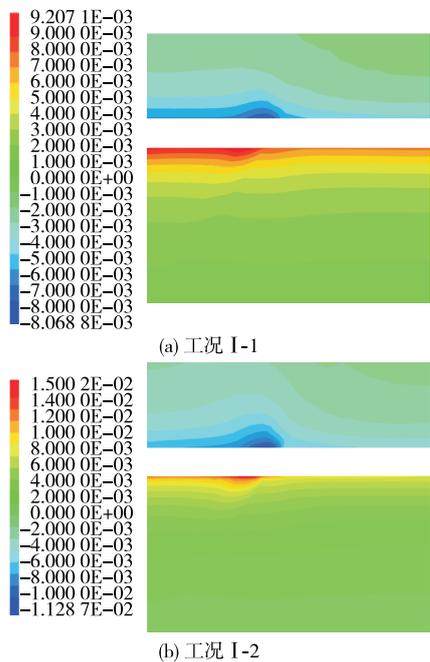


图 2 不同工况下隧道拱顶与仰拱处围岩的竖向位移云图(单位:m)

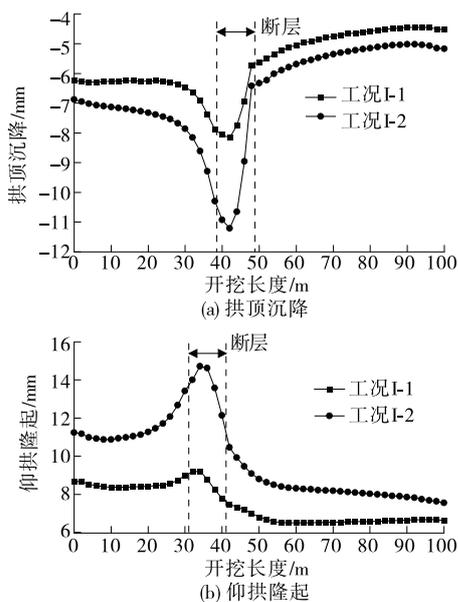


图 3 不同工况下隧道贯通后拱顶与仰拱竖向位移的变化

由图 2 可知:工况 I-1、工况 I-2 下围岩整体变形特征大致相同。

由图 3(a)可知:工况 I-1、工况 I-2 下隧道拱顶沉降趋势基本相同,穿越断层破碎带时拱顶沉降均先增大后减小,说明距离断层越远,断层对拱顶沉降的影响越小。工况 I-1、工况 I-2 下隧道拱顶沉降最大值分别为 8.16 mm、11.21 mm,均出现在Y=42 m 监测断面处。考虑流固耦合作用时,强风化围

岩与中风化围岩处拱顶沉降均增加,其中断层处拱顶沉降增加最明显。工况 I-2 下拱顶最大沉降比工况 I-1 时大 37.38%,这是由于在开挖断层破碎带时,地下水更容易向隧道内部渗透,使围岩孔隙水压力降低,导致围岩变形量增大。

由图 3(b)可知:工况 I-1、工况 I-2 下仰拱隆起均先增大后减小,说明距离断层越远,断层对仰拱隆起的影响越小。工况 I-1、工况 I-2 下仰拱隆起最大值分别为 9.22 mm、14.71 mm,均出现在 Y=34 m 监测断面处。工况 I-2 下仰拱最大隆起值比工况 I-1 时大 59.54%,与拱顶沉降相比,仰拱隆起受水的影响更大,这是由于隧道仰拱处会受到浮力作用,使其变形增大。

为进一步探究断层处隧道围岩位移的变化,在断层破碎带中部的监测断面(Y=40 m)拱顶、仰拱和右拱腰处设置监控点,监测隧道施工中其位移变化,结果见图 4。

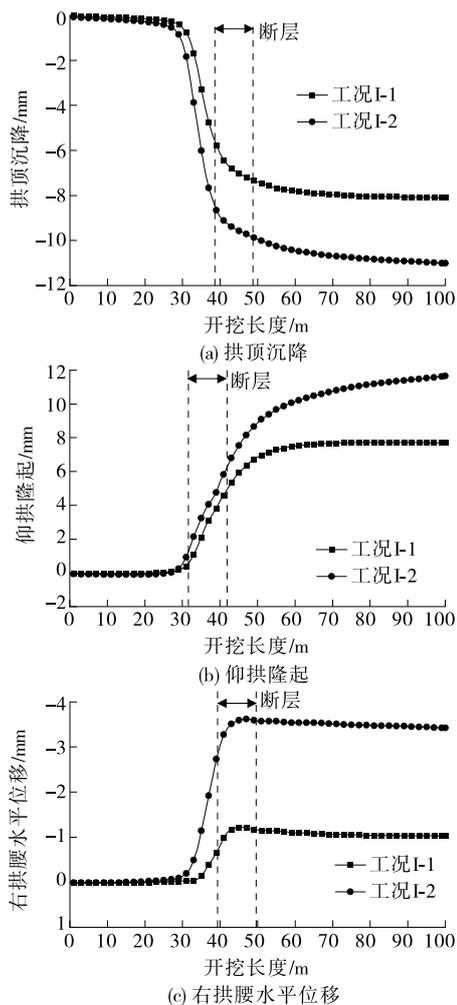


图 4 不同工况下 Y=40 m 监测断面处围岩位移随隧道开挖的变化

由图 4 可知:围岩位移变化可分为平稳期、突变期、收敛期 3 个阶段。隧道开挖初期,监测断面处围岩位移变化较小,为平稳期;随着隧道开挖进尺的增加,从进入断层至离开断层,围岩位移急剧增大,为突变期;远离断层后,围岩位移变化趋于平稳,为收敛期。考虑流固耦合作用时围岩竖向和水平最终位移均比不考虑流固耦合作用时大;工况 I-1、工况 I-2 下拱顶沉降和拱腰水平位移突变范围相差不大,但考虑流固耦合作用时仰拱隆起的突变范围比不考虑流固耦合作用时大,进入收敛期所需时间更长。

### 3.1.2 围岩应力

隧道开挖后围岩应力发生重分布,图 5 为 2 种工况下围岩最小主应力云图。

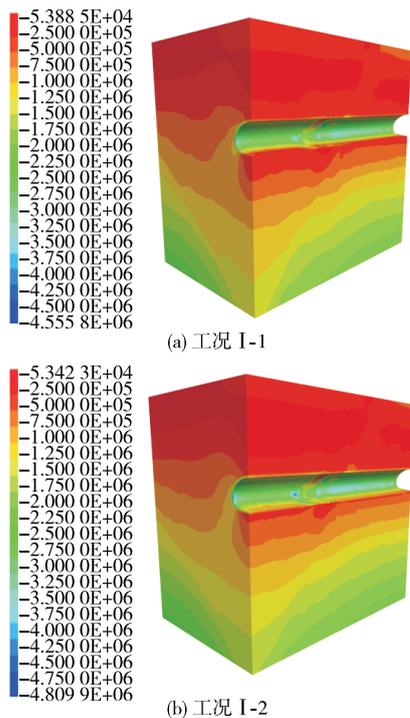


图 5 不同工况下围岩最小主应力云图(单位:Pa)

由图 5 可知:隧道开挖结束时,围岩最小主应力(压应力)主要集中在拱腰至拱脚处,该区域围岩主应力明显大于拱顶和仰拱处围岩主应力;工况 I-1、工况 I-2 下围岩最大压应力分别为 4.56 MPa、4.81 MPa,流固耦合作用增加了围岩应力,相比于非流固耦合状态,流固耦合状态下围岩最大应力增大 5.48%。

### 3.1.3 围岩塑性区

2 种工况下隧道围岩塑性区分布见图 6,塑性区体积见表 2。

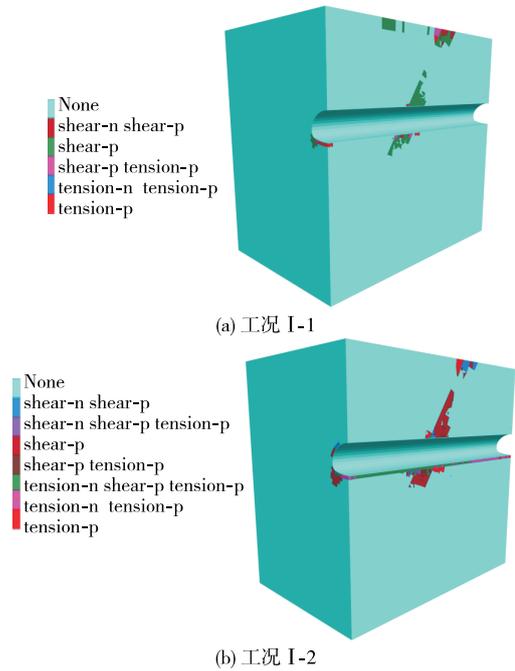


图 6 不同工况下围岩塑性区分布

表 2 不同工况下围岩塑性区体积 单位:m<sup>3</sup>

工况 编号	剪切塑性区		拉伸塑性区		合计
	now	past	now	past	
I-1	2 776.37	20 612.0	1 346.54	5 232.78	29 967.69
I-2	4 548.56	23 147.8	1 991.72	5 690.38	35 378.46

从图 6 可以看出:隧道拱腰处围岩主要发生剪切破坏,拱顶、拱脚和仰拱处围岩发生剪切破坏和受拉破坏。塑性区主要在断层区域沿断层分布,上下延伸较大,面积远大于断层两侧普通围岩区域;其次分布在隧道拱腰与拱脚处。断层带的施工风险大,开挖时应加大支护等级,并加强对拱腰和拱脚处围岩的监测。

从表 2 可以看出:工况 I-1、工况 I-2 下围岩塑性区体积分别为 29 967.69 m<sup>3</sup>、35 378.46 m<sup>3</sup>,与工况 I-1 相比,工况 I-2 下塑性区体积增加 18.06%。

## 3.2 地下水影响分析

将地下水位作为单一变量,对地下水位分别位于隧道拱顶上方 5 m、15 m、25 m 处 3 种工况下隧道围岩位移和应力及塑性区分布进行对比分析。

### 3.2.1 隧道位移

隧道贯通后,不同地下水位时隧道竖向位移见图 7。

由图 7(a)可知:3 种工况下隧道拱顶沉降趋势一致,最大沉降均出现在 Y=42 m 监测断面处,分

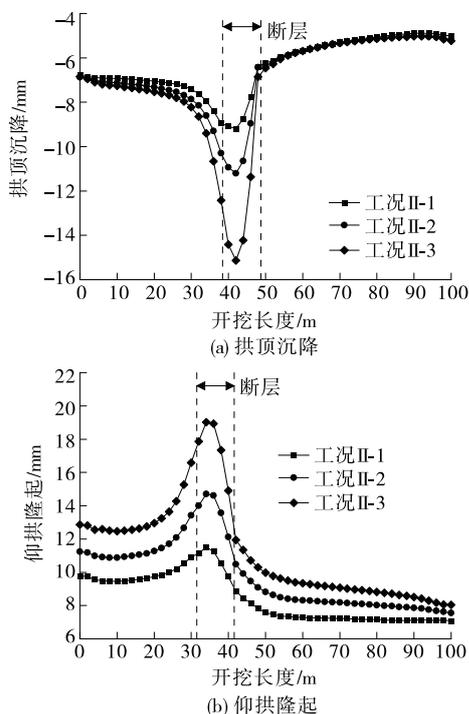


图 7 不同地下水位时隧道竖向位移

别为 9.19 mm、11.21 mm、15.13 mm，与工况 II-1 相比，工况 II-2、工况 II-3 时拱顶最大沉降分别增大 21.98%、64.64%；3 种工况下强风化围岩拱顶的位移差距较小，中风化围岩拱顶的位移差距较大，说明围岩越破碎、强度越低，地下水位变化对拱顶位移的影响越显著。

由图 7(b)可知：3 种工况下隧道仰拱隆起趋势一致，与拱顶沉降相比，仰拱隆起在强风化围岩与中风化围岩中的差距较大，越接近断层，不同工况下仰拱隆起位移差距越大；仰拱最大隆起出现在  $Y=34$  m 监测断面处，分别为 11.51 mm、14.71 mm、19.01 mm，与工况 II-1 相比，工况 II-2、工况 II-3 下仰拱隆起分别增大 27.80%、65.16%。

以  $Y=40$  m 监测断面处隧道拱顶、仰拱和右拱腰的位移变化(见图 8)为例，分析不同地下水位时断层处围岩位移的变化。由图 8 可知：隧道开挖初期，不同地下水位下监测断面处围岩位移变化差距较小；随着隧道开挖进入断层，地下水位越高，位移增长速率越快，最终位移数值越大。隧道开挖初期，仰拱出现微小沉降，地下水位越高，沉降越大；地下水位越高，竖向位移进入收敛期所需时间越长。

3.2.2 围岩应力

隧道贯通后，工况 II-2 下围岩最小主应力与图 5(b)一致，II-1、II-3 工况下围岩最小主应力见图 9。

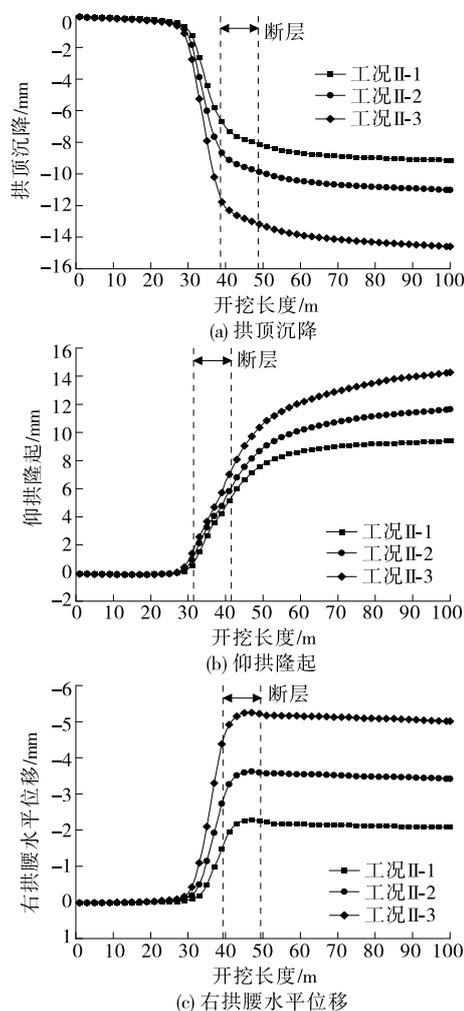


图 8 不同地下水位时  $Y=40$  m 监测断面处围岩位移随隧道开挖的变化

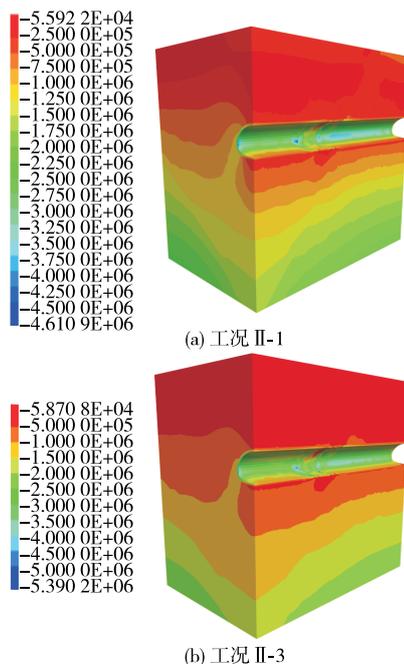


图 9 不同地下水位时围岩应力云图(单位:Pa)

从图 9 可以看出:隧道开挖结束后,不同地下水位时围岩最小主应力(压应力)主要集中在拱腰至拱脚处,随着地下水位的上升,围岩主应力增大,并在断层处仰拱范围出现应力集中现象。工况 II-1、工况 II-2、工况 II-3 下最大压应力分别为 4.61 MPa、4.81 MPa、5.39 MPa,与工况 II-1 相比,工况 II-2、工况 II-3 时围岩应力分别增大 4.34%、16.92%。

### 3.2.3 围岩塑性区

隧道贯通后,不同地下水位时隧道围岩塑性区分布见图 10,塑性区体积见表 3。

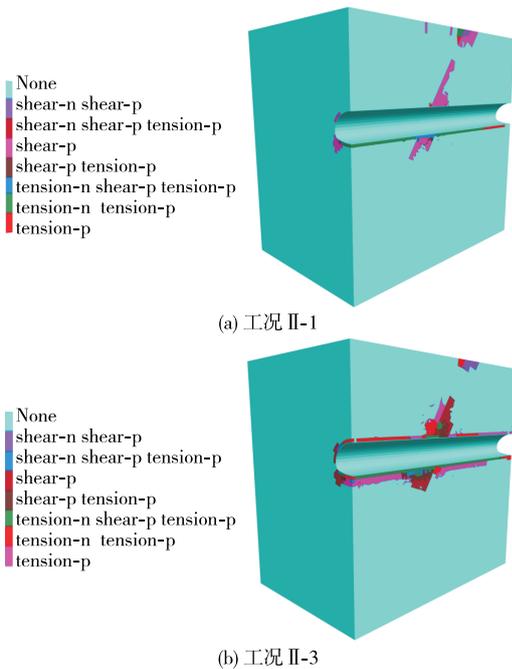


图 10 不同地下水位时围岩塑性区分布

表 3 不同地下水位时围岩塑性区体积 单位: m<sup>3</sup>

工况 编号	剪切塑性区		拉伸塑性区		合计
	now	past	now	past	
II-1	4 620.62	24 046.50	1 528.94	4 128.07	34 324.13
II-2	4 548.56	23 147.80	1 991.72	5 690.38	35 378.46
II-3	3 635.35	21 954.10	3 972.61	12 422.10	41 984.16

从图 10 可以看出:随着地下水位的升高,孔隙水压力增大,围岩有效应力降低,隧道开挖后塑性区分布范围扩大,断层处塑性区开始向两端普通围岩延伸;工况 II-3 时,拱腰与拱脚处塑性区范围增大,拱顶与仰拱处围岩主要发生受拉破坏,仰拱处围岩塑性区范围增长十分明显。

由表 3 可知:工况 II-1、工况 II-2、工况 II-3 时围岩塑性区体积分别为 34 324.13 m<sup>3</sup>、35 378.46 m<sup>3</sup>、

41 984.16 m<sup>3</sup>,与工况 II-1 相比,工况 II-2、工况 II-3 时围岩塑性区体积分别增大 3.07%、22.32%。地下水位越高,围岩塑性区增长幅度越大,高水位时要及时通过注浆、增设锚杆等措施提高隧道围岩的强度,减少塑性区范围大幅度增加。

## 4 结论

本文以湖南省醴娄高速公路周家冲隧道为背景,采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件建立三维分析模型,从变形特性、力学响应及塑性区分布方面研究隧道开挖穿越断层区域时围岩的稳定性,得出以下结论:

(1) 隧道贯通后,流固耦合作用对隧道围岩变形会产生较大影响,围岩位移最大值均出现在断层处,围岩强度越高,位移增长越小。随着地下水位的增加,断层处围岩位移增大,水位变化对强度高围岩处拱顶位移的影响非常小。

(2) 断层处监测断面位移变化大致可分为平稳期、突变期、收敛期 3 个阶段。流固耦合作用对平稳期位移变化影响很小,在突变期会大大加快位移增长速率,对拱顶沉降与拱腰水平位移进入收敛期的时间影响较小,但仰拱隆起进入收敛期的时间会延后。随着地下水位的增加,围岩位移与位移增长速率增大,其中隧道仰拱隆起变形增长幅度最大,进入收敛期所需时间增长,水位越高,隧道仰拱处越容易发生破坏。

(3) 围岩最小主应力(压应力)主要集中在拱腰至拱脚处,考虑流固耦合作用时,围岩应力增大;随地下水位增加,处于断层与两侧围岩交界面附近的拱腰至拱脚处应力增长最明显,同时仰拱范围内出现应力集中现象。

(4) 围岩塑性区集中分布在断层及隧道拱腰与拱脚处,围岩破坏以剪切破坏为主。考虑流固耦合作用时,塑性区增长集中在断层及隧道拱腰与拱脚处;随着地下水位的升高,仰拱范围内塑性区扩张幅度最大,地下水位进一步提高,仰拱范围内出现大范围受拉破坏。

### 参考文献:

[1] 许振浩,邵瑞琦,林鹏,等.隧道不良地质识别:方法、现状及智能化发展方向[J].地球学报,2024,45(1):5-24.  
 [2] 岳嵩山.断层破碎带大管棚超前支护加固效果分析[J].公路与汽运,2017(3):186-189.

小导管注浆及周边径向钢花管注浆,形成坚固的支护系统,有效保障施工安全和结构稳定性。

(2) 采用 CRD 法,分区域、分步骤进行开挖和支护,能有效适应不稳定的岩溶地质条件,减少地质风险,确保工程的顺利进行,并提高施工效率。

(3) 处理溶洞时必须综合考虑施工进度、成本和安全性,采用科学合理的工程措施和技术手段,实现隧道在复杂地质条件下的安全施工。

#### 参考文献:

- [1] EBRAHEEM M O, IBRAHIM H A. Detection of karst features using ground-penetrating radar: a case study from the western limestone plateau, Assiut, Egypt[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(18): 563.
- [2] BAI M Z, CHEN Y, WANG C L, et al. Radar spectral analysis and evaluation of the effect of grouting treatment in karst caves and soil caves[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(24): 795.
- [3] MA J J, GUAN J W, DUAN J F, et al. Stability analysis on tunnels with karst caves using the distinct lattice spring model stability analysis on tunnels with karst caves using the distinct lattice spring model[J]. Underground Space, 2020, 2020(11): 1-26.
- [4] 胡小强. TRT7000 超前地质预报系统在岩溶发育隧道中的应用[J]. 福建交通科技, 2023(2): 54-57.
- [5] 周中, 邓卓湘, 鄢海涛, 等. 岩溶区隧道新型绿色注浆材料试验研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(7): 63-68.

- [6] 刘永超, 袁振宇, 程雪松, 等. 不同注浆材料对隧道漏水漏砂封堵效果试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 2): 249-252.
- [7] 王成亮, 白明洲, 岐峰军, 等. 综合地质超前预报技术在岩溶隧道中的应用分析[J]. 铁道建筑, 2013, 53(5): 65-68.
- [8] 许增光, 线美婷, 熊伟, 等. 基于集对分析模型的岩溶区浅埋穿河隧道突涌水危险性评价[J]. 应用力学学报, 2023, 40(1): 135-145.
- [9] 刘桂卫, 王衍汇, 常天龙, 等. 遥感技术在岩溶区铁路地质勘察中应用研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(12): 6-10+23.
- [10] 李达. 城市高架桥桩基工程溶洞处理技术应用探讨[J]. 公路与汽运, 2024, 40(5): 124-128.
- [11] 李子丰, 张永杰, 黄金鑫, 等. 考虑溶洞空间形态的岩溶路基顶板稳定性分析[J]. 公路与汽运, 2023(3): 66-72.
- [12] 梁裔举, 高山, 陈璐. 岩溶地区浅埋隧道变形分析及处治[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(2): 49-54.
- [13] 沈洪伟. 岩溶区隧道溶洞的综合预报及治理方案研究[J]. 山西建筑, 2024, 50(15): 175-178.
- [14] 宋洋, 周林峰. 特大跨度铁路隧道浅埋段 CRD 工法临时支撑拆除危险性评价研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(增刊 1): 19-25.
- [15] 肖凯刚, 刘名. 叙毕铁路岩溶隧道防排水措施及隧底溶洞处理方案研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(增刊 1): 155-159.

收稿日期: 2024-08-14

\*\*\*\*\*

(上接第 111 页)

- [3] 姜克寒, 刘邦, 秦坤元, 等. 断层破碎带中泥水盾构掘进参数优化研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 43-49.
- [4] 颀永斌, 董建华. 断层破碎带内隧道纵向受荷特征和变形分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 211-224.
- [5] 龚林金, 任锐, 王亚琼, 等. 隧道斜穿不同倾角断层破碎带围岩变形特征分析[J]. 公路, 2021, 66(7): 313-319.
- [6] 梁松林, 张瑞富, 段绪彬, 等. 软弱破碎围岩隧道开挖支护中 CD 法与环形开挖留核心土法对比分析[J]. 公路与汽运, 2023(3): 151-154.
- [7] 张智健, 梁斌, 徐红玉, 等. 富水软弱围岩隧道穿越断层破碎带的稳定性分析及施工技术[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 356-364+378.
- [8] 王茜, 凌同华, 刘唐利, 等. 穿越断层破碎带隧道入口段施工数值模拟[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(4): 78-84.
- [9] 孙浪, 欧湘萍, 闫志濠, 等. 断层破碎带地质特征对隧道

- 围岩稳定性的影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2020, 42(3): 23-31.
- [10] 韩瑀莹, 江腾飞, 谭碧舸, 等. 隧道穿越不同形态断层破碎带围岩稳定性分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(5): 162-173.
- [11] 罗春雨, 钱志豪, 刘富华, 等. 基于流固耦合效应的高地应力软岩大变形隧道开挖稳定性分析[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(9): 88-94.
- [12] 胡涛涛, 葛峻恺, 刘可萌. 含水率对高地应力炭质板岩隧道围岩稳定性的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(5): 169-175+182.
- [13] 穆兰, 胡宇庭. 隧道穿越富水断层围岩稳定性流固耦合研究[J]. 公路工程, 2017, 42(4): 108-113.
- [14] 罗燕平, 刘得第, 王生, 等. 富水软弱破碎带大断面隧道施工渗流影响及控制效果分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5756-5763.

收稿日期: 2023-10-27