



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406559

引用格式:段廷玺,兰弘杰,何会盟,等.富水节理化软岩隧道渗流与变形机制[J].科学技术与工程,2025,25(19):8233-8240.

Duan Tingxi, Lan Hongjie, He Huimeng, et al. Seepage-deformation mechanism of water-rich jointed soft rock tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(19): 8233-8240.

## 富水节理化软岩隧道渗流与变形机制

段廷玺<sup>1</sup>, 兰弘杰<sup>1\*</sup>, 何会盟<sup>1</sup>, 荣辉<sup>1</sup>, 郭华宇<sup>1</sup>, 唐亮<sup>2</sup>

(1. 中铁十二局集团有限公司, 太原 030024; 2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090)

**摘要** 针对隧道穿越富水断层破碎带围岩塌方和涌水难题,以云南渝昆高速铁路隧道为工程背景,开展隧道三台阶法施工流固耦合数值分析,结合现场围岩变形监测结果,研究穿越富水断层破碎带隧道围岩变形机制与地下水渗流规律。研究结果表明,隧道掌子面开挖至富水断层时,逆断层上盘岩土体向下塌陷,拱顶沉降急剧增大。在断层处,中、下台阶的岩土体无法为围岩提供稳定支撑,隧道净空先增大后减小。地下水主要沿着台阶面和掌子面渗流,隧道上方仍存在较大孔压,可增加排水管将水引入边沟。

**关键词** 富水断层; 流固耦合; 现场监测; 围岩变形; 渗流

**中图分类号** U25; **文献标志码** A

### Seepage-deformation Mechanism of Water-rich Jointed Soft Rock Tunnel

DUAN Ting-xi<sup>1</sup>, LAN Hong-jie<sup>1\*</sup>, HE Hui-meng<sup>1</sup>, RONG Hui<sup>1</sup>, GUO Hua-yu<sup>1</sup>, TANG Liang<sup>2</sup>

(1. China Railway 12th Bureau Group Co., Ltd., Taiyuan 030024, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China )

**[Abstract]** With respect to the surrounding rock collapse and water gushing in the water-rich fault, a high-speed railway tunnel in Yunnan was taken as the engineering background. The fluid-solid coupling numerical calculation of tunnel construction with the three-step method was carried out, and the deformation mechanism and groundwater seepage law of surrounding rock through water-rich fault were researched combined with the deformation field monitoring results. The results show that when the tunnel face is excavated to the water-rich fault, the rock and soil in the upper wall of the reverse fault will collapse downward, and the settlement of the arch roof will increase sharply. At the fault, the rock and soil mass of the middle and lower excavation parts cannot provide stable support for the surrounding rock, so the tunnel clearance increases first and then decreases. The groundwater mainly percolates along the step surface and the palm surface, and there is still a large pore pressure above the tunnel, so the drainage pipe can be added to lead the water into the side ditch

**[Keywords]** water-rich fault; fluid-solid coupling; field monitoring; surrounding rock deformation; seepage

随着“交通强国”和“西部大开发”的提出,基础设施建设的重点逐步向西部地质条件复杂的山区转移。铁路作为现代运输的主要方式之一,在复杂山区显得尤为重要。由于西部地区地质环境复杂,隧道的总长度往往占铁路总里程的50%~80%<sup>[1]</sup>。隧道在穿越断层破碎带<sup>[2-4]</sup>、岩溶<sup>[5]</sup>和软岩<sup>[6]</sup>等复杂地质环境时,易发生大变形<sup>[7]</sup>、塌方<sup>[8]</sup>和突水突泥<sup>[9-10]</sup>等灾害。为保障隧道施工安全,研究富水节理化软岩隧道施工围岩变形机理及其病害演化机制具有重要意义。

针对富水节理化软岩隧道围岩渗流规律、变形机制与失稳破坏模式,余庆锋等<sup>[11]</sup>建立了隧道突水

力学模型和数值模型,阐述了隧道突水渗流路径和,明确了重点加固区域。李守刚<sup>[12]</sup>聚焦不同断面形式的深埋隧道破碎围岩变形规律,明晰了破碎围岩开挖过程中大变形和局部垮塌机制。张治国等<sup>[13]</sup>推导了地下水远场水头和补水断层水头综合作用下隧道衬砌、注浆圈和围岩的水头分布解析解,揭示了富水断层隧道地下水渗流规律,隧道结构上水头的分布主要与断层距和断层产状有关。Li等<sup>[14]</sup>对高节理密度深埋高地应力大断面洞室开挖过程中围岩力学行为进行研究,岩体破碎膨胀程度越高,支护难度越大,应及时支护和有效控制塑性

收稿日期:2024-09-02 修订日期:2024-12-23

基金项目:重庆市自然科学基金(CSTB2023NSCQ-MSX0082);住房和城乡建设部研究开发项目(2022-K-040)

第一作者:段廷玺(1983—),男,汉族,甘肃靖远人,高级工程师。研究方向:土木工程等。E-mail:531573639@qq.com。

\*通信作者:兰弘杰(1993—),男,汉族,山西忻州人,高级工程师。研究方向:隧道工程、地下工程等。E-mail:799357736@qq.com。

区扩展。Jin 等<sup>[15]</sup>对节理岩体隧道突水灾害进行了模拟,将节理岩体突水灾害过程划分为突变阶段、剧烈发展阶段和稳定阶段三个阶段,为节理岩体隧道突水的防治提供理论依据。Gao 等<sup>[16]</sup>研究了阻水结构厚度、地层应力和渗流力对隧道突水灾害演化特征的影响,揭示了抗水岩层的破坏过程。成国文等<sup>[17]</sup>基于 Goodman 井流假设和镜像叠加原理,计算富水断层隧道开挖地下水头分布和涌水量解析解。左清军等<sup>[18]</sup>研究沪昆高铁油坊坪隧道跨越富水断层时的围岩失稳模式,表现出弯曲内鼓和顺层滑移相结合的协同破坏模式,提出“洞内+洞外”综合处治措施。李术才等<sup>[19]</sup>统计分析 221 例突水突泥案例,断层型突水突泥灾害约占 29%,将突水突泥孕灾模式分为直接揭露型、渐进破坏型、渗透失稳型和间歇破坏型。针对隧道穿越富水断层的变形破坏机理,学者们提出了大量针对性的灾害防治措施。张金夫等<sup>[20]</sup>应对大理-瑞丽铁路穿越富水断层中的涌水突泥灾害,探索出高压动水分段引排、超高压聚合注浆施工技术。陶志刚等<sup>[21]</sup>开展青藏高原他白依隧道在未注浆、常规注浆和双梯度注浆下围岩承载力试验,确定双梯度注浆工艺和 NPR (negative poisson ratio) 锚索综合防治措施在富水断层带隧道围岩支护中的可靠性。

为进一步揭示穿越富水断层深埋隧道的围岩变形机理与失稳模型,以一穿越富水节理化软岩深埋隧道为背景,结合隧道围岩拱顶沉降和净空收敛数据,开展富水节理化软岩隧道施工围岩稳定性分析,研究富水断层带开挖过程中的地下水渗流规律、围岩变形机制与破坏模式,并对围岩超前支护和初期支护提出合理性建议。

## 1 工程概况

云南渝昆高速铁路隧道为双线隧道,全长 16.46 km,隧道最大埋深约 432 m。隧道穿越云贵高原,地貌形态复杂,地形起伏大,坡度在 15°~45°。隧道范围地层主要岩性为玄武岩、泥岩、砂岩和灰岩等,围岩等级为Ⅲ~Ⅴ级,共穿越 17 条断层。

### 1.1 FW<sub>13</sub>断层破碎带地质概况

DK578+396~DK578+428 区段,隧道穿越 FW<sub>13</sub>逆断层,产状为 37°∠80°,为经向构造体系干沟大断层的伴生断层,向东止于干沟断层,向西延伸至团菁,上下盘均为玄武岩,如图 1 所示。断层破碎带内岩体受构造影响挤压强烈,呈破碎~极破碎角砾状,结构松散,围岩等级为Ⅴ级,掌子面围岩如图 2 所示。地下水位距离地表约 15 m,地下水主要为基岩裂隙水和断层裂隙水,正常涌水量 1 140 m<sup>3</sup>/d,

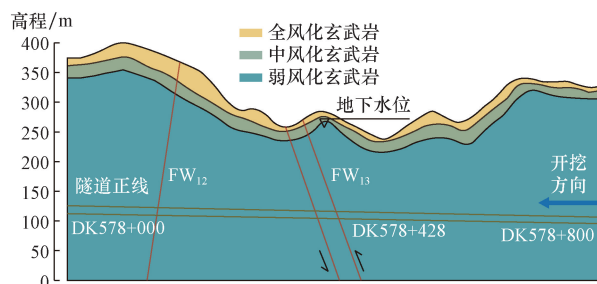


图 1 隧道地质概况

Fig. 1 Geological survey of tunnel



图 2 掌子面围岩

Fig. 2 Surrounding rock of excavation face

最大涌水量为 1 530 m<sup>3</sup>/d。隧道开挖易发生掉块、塌方和突水突泥。需加强超前地质预报,及时施工支护结构。

### 1.2 施工工况

隧道穿越断层破碎带区段采用三台阶法向小里程方向开挖,必要时施工临时横撑,开挖跨度为 14.96 m,开挖高度为 12.64 m,断面面积为 148.91 m<sup>2</sup>。掌子面超前支护采用 φ76 管棚注浆(隧道中心 150°范围)。初期支护中,隧道拱腰和拱墙采用长度为 4 m 的锚杆支护,环向和纵向间距均为 1 m;钢拱架为 I22a 型钢,间距 0.6 m;喷射 C25 混凝土,厚度为 28 cm。隧道断面及支护参数如图 3 所示。

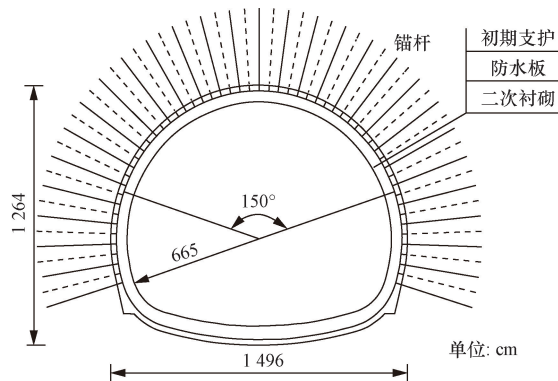


图 3 隧道断面图

Fig. 3 Tunnel profile

## 2 围岩变形监测

为监测各施工阶段围岩和支护结构受力与变形状况,确保施工安全,调整初期支护和确定仰拱、二次衬砌施工时间提供依据,施工期的隧道现场监测十分重要。针对隧道围岩拱顶沉降和净空收敛,三台阶法开挖过程中,拱顶布置一个沉降观测点,每台阶布置一条水平测线,纵向监测间距为 5 m,测点布置如图 4 所示。DK578+425 断面为隧道与 FW<sub>13</sub> 断层交界处,选取断面 DK578+415、DK578+425、DK578+435 三个断面的围岩变形数据进行分析,结果如图 5 所示。3 个监测断面的拱顶沉降在前 3 d 的变形基本一致,约为 12 mm。隧道继续向前开挖,断层上盘沿着结构面向下塌陷,DK578+425、DK578+435 拱顶沉降突然增大至 25 mm。围岩变形在第 8 天后逐渐趋于稳定,3 个断面的拱顶沉降最终值分别为 26.3、31.2、30.9 mm。测线 SL1~SL2 位于隧道肩部,水平净空收敛值最大,三个断面的收敛值分别为 22.7、24.3、27.9 mm。测线 SL5~SL6 的收敛值大致呈线性增长,但增长速率较小,三个断面的收敛值约为 5.5 mm。受开挖断层破碎带影响,监测断面 DK578+435 在拱肩和拱腰处的净空收敛值有突增现象,隧道施工过程中,应提高超前支护结构的强度和刚度,避免变形急剧增大,导致局部塌方。

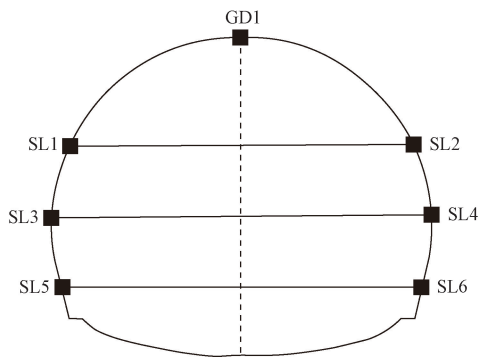


图 4 隧道围岩变形测点布置图

Fig. 4 Layout of deformation measuring points of tunnel surrounding rock

## 3 流固耦合数值分析

### 3.1 隧道台阶法开挖数值模型

为进一步揭示穿越富水断层破碎带隧道围岩变形失稳机制,建立穿越富水断层带隧道里程在 DK578+385~DK578+485 范围的流固耦合数值模型,如图 6 所示。模型尺寸为 100 m × 70 m × 70 m (长 × 宽 × 高),模型宽度约为隧道直径的 5 倍,模型高度为隧道高度的 5.5 倍。玄武岩和断层破碎带的物理力学参数通过室内试验和工程经验确定,岩体

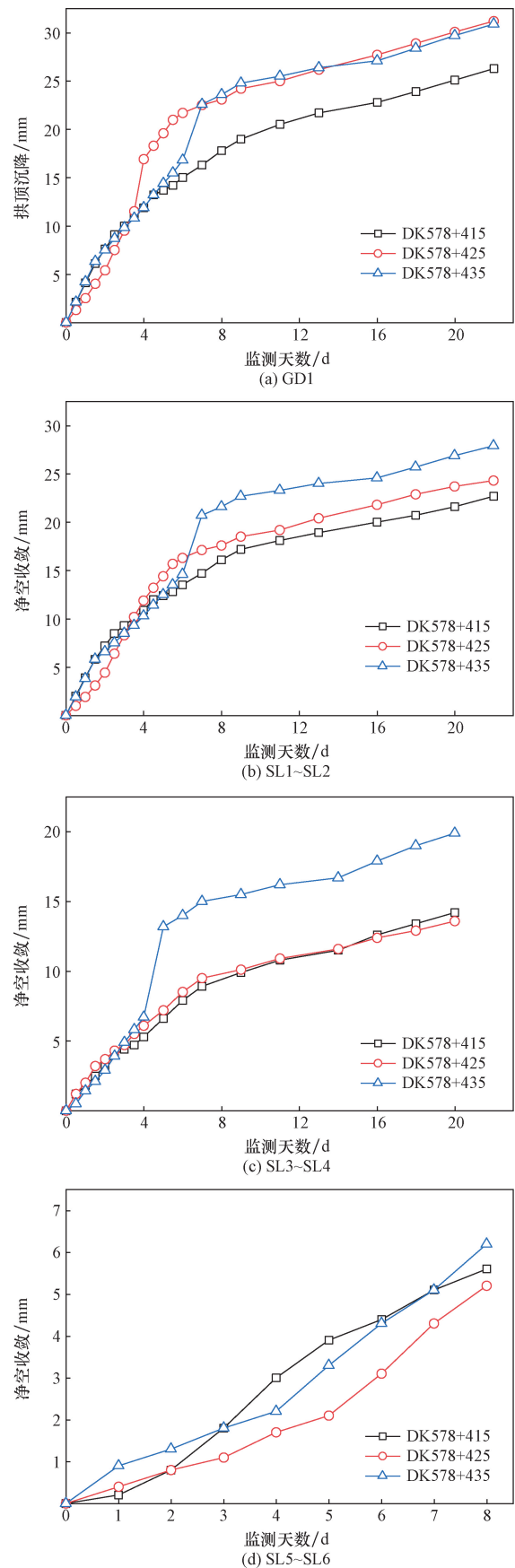


图 5 围岩变形时程曲线

Fig. 5 Deformation time history curve of surrounding rock

采用理想弹塑性模型,遵循摩尔库伦屈服准则,衬砌采用弹性模型,具体参数见表1所列。管棚和锚杆分别采用梁单元、杆单元模拟,尺寸和实际工程一致,如图6所示。

表1 围岩与支护结构物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and supporting structure

名称	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	泊松比	黏聚力/ MPa	摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
玄武岩	2 200	2 850	0.33	0.41	41.4
断层	1 800	1 670	0.36	0.21	30.6
注浆区	2 340	6 460	0.32	0.70	50
初衬	2 500	26 500	0.20	—	—
二衬	2 500	2 500	0.22	—	—

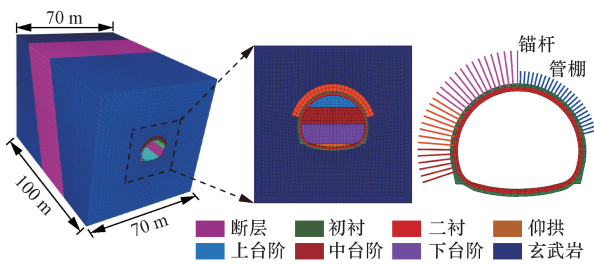


图6 隧道数值模型

Fig. 6 Numerical model of tunnel

根据单元应力与孔压的耦合计算方式不同,流固耦合计算分为仅流体计算、单向流固耦合和全耦合,此次采用全耦合进行计算,流体服从达西定律,渗流方程和土体渗流本构方程为

$$q_i = -K_{ij} \hat{k}(s) \partial(p - \rho_f x_j g_j) / \partial x_j \quad (1)$$

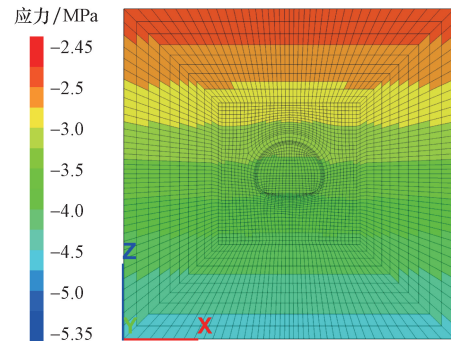
$$\alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial \xi}{\partial t} - \frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2)$$

式中:  $q_i$  为渗流速率;  $s$  为饱和度;  $K_{ij}$  和  $\hat{k}(s)$  分别为绝对渗透系数张量和相对渗透系数;  $p$  为孔隙水压力;  $\rho_f$  为流体密度;  $x_j$  为笛卡坐标分量;  $g_j$  为重力加速度分量;  $M$  为比奥模量;  $\alpha$  为比奥系数;  $\varepsilon$  为应力引发的体积应变;  $\xi$  为流体体积变化量;  $i = 1, 2, 3$ ;  $j = 1, 2, 3$ ;  $l = 1, 2, 3$ 。

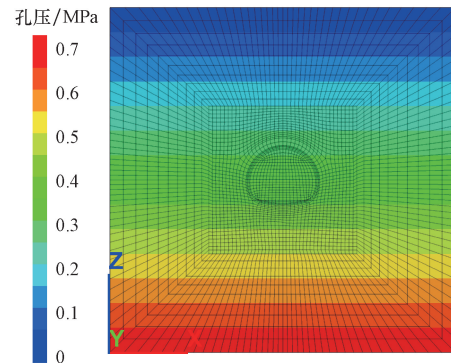
隧道地层的地下水接近于地表,数值模型中将水位设置在模型上表面。隧道上覆 125 m 岩体以荷载形式施加在模型上表面,大小为 2.75 MPa。在模型四周和底部施加法向位移约束,并进行地应力平衡,计算结果如图7所示。

### 3.2 围岩变形分析

依据现场施工工序,数值计算中采用三台阶法按照上台阶、中台阶右侧、中台阶左侧、下台阶右侧、下台阶左侧和仰拱的顺序开挖,每一个开挖循环进尺 1.6 m。提取掌子面 DK578 + 415、DK578 + 425、DK578 + 435 三个断面在隧道开挖过程中的围



(a) 竖向应力



(b) 孔压

图7 地应力平衡结果

Fig. 7 Geostress balance results

岩变形数据,如图8所示。数值计算中,重点分析断层破碎带处围岩变形机制,为简化计算,隧道超前支护、初衬和二衬均与富水断层破碎带处相同。因此,DK578 + 415 断面的围岩变形结果比现场监测结果小,其他围岩变形数值计算结果与现场监测结果基本一致,验证了数值模型的可行性。

DK578 + 425 和 DK578 + 435 断面位于富水断层破碎带,围岩竖向变形和水平收敛均大于 DK578 + 415 断面。监测断面围岩竖向变形如图9所示,拱顶形成明显的坍塌拱,同时,隧道底部上拱。隧道开挖断面未通过监测断面时,监测点 GD1 受到施工轻微扰动,拱顶沉降约为 2 mm。监测断面开挖后,拱顶迅速向下变形,沉降值约为 17.5 mm。受断层破碎带的影响,DK578 + 435 断面变形速率最大,并且受开挖扰动时间最长。随着掌子面向前推移,监测断面的沉降速率下降,三个断面的最终沉降值分别为 20.19、22.20、25.76 mm。

当上台阶开挖时,SL1 ~ SL2 测线的收敛值为 1 ~ 2 mm,小于总变形量的 10%。当中台阶和下台阶开挖后,围岩水平变形迅速整长,并迅速趋于稳定,围岩变形量超过总变形的 80%,围岩水平变形最大值出现在拱脚处,如图10所示。在上台阶开挖后,中、下台阶的土体上拱值为 7.33 mm,测线的两个监测点向两侧变形,DK578 + 415 断面的收敛值

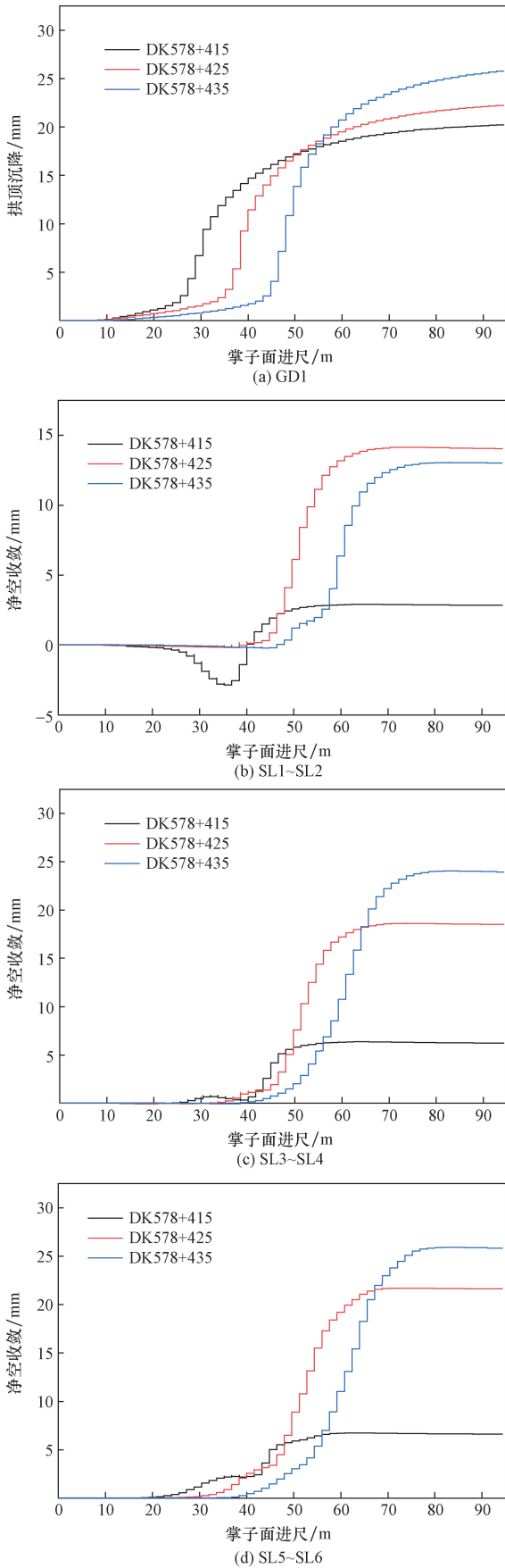


图8 围岩变形时程曲线

Fig. 8 Deformation time history curve of surrounding rock

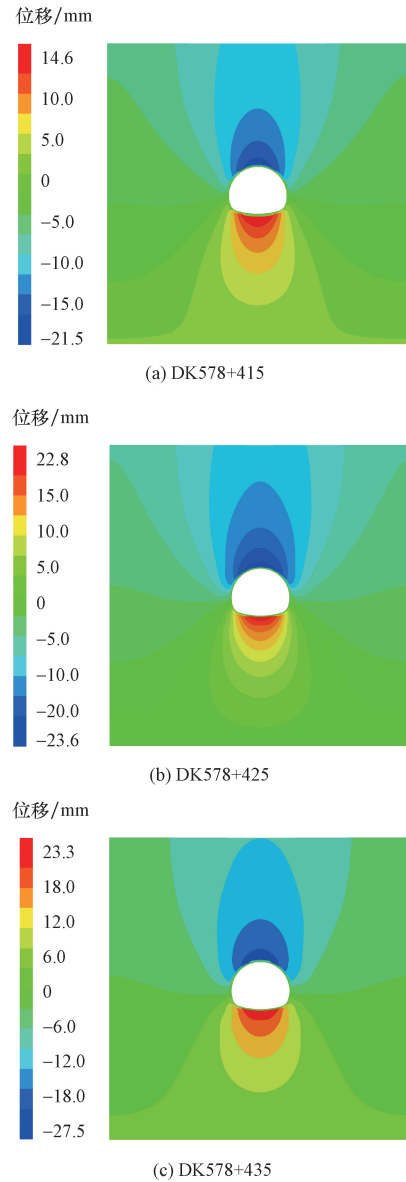


图9 围岩沉降

Fig. 9 Settlement of surrounding rock

为负;在断层处,中、下台阶的土体上拱值为 23.5 mm,无法为围岩提供稳定支撑,监测点向隧道内变形[图 8(b)~图 8(d)]。

### 3.3 地下水渗流分析

隧道开挖数值计算过程中,每个分部开挖后,开展流固耦合计算,隧道孔压分布如图 11 所示。当隧道掌子面开挖至富水断层破碎带时(DK578+433),隧道开挖区域上方 14 m 和中间 28 m 范围内的水位下降显著,开挖边界处的孔压为 0。地下水渗流过程中,由于隧道顶部施加了中管棚注浆,并及时施工初期支护,地下水主要沿着台阶面和掌子面渗流。穿越富水断层带时,应对掌子面进行超前注浆加固。当掌子面施工至 DK578+481 断面,隧道横向的泄压范围为 32 m,但隧道上方泄压范围达

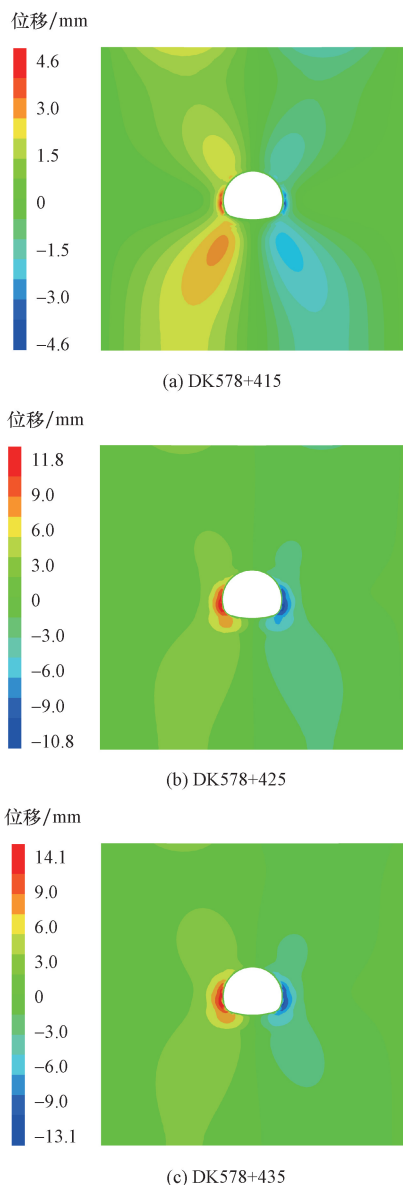


图 10 围岩水平变形

Fig. 10 Horizontal deformation of surrounding rock

到23 m。隧道掌子面开挖 96 m 时,隧道上方仍存在较大孔压,为减少衬砌结构受力,可增加排水管将水引入边沟。

隧道掌子面开挖至断层处时,在开挖卸荷和地下水渗流共同作用下,断层内的岩体沿着断层面向下滑动,与围岩拱顶沉降监测一致,如图 12 所示。当隧道穿越断层带后,断层区隧道上方的沉降和隧道底部的上拱值的变形均比两侧围岩大。隧道开挖后,截取 8 个断面的剪切破坏塑性区(图 12 中的绿色区域)。断层破碎带范围内的 4-4 断面~7-7 断面与其他 4 个断面的塑性区分布明显不同,在断层破碎带以外,塑性区分布绕掌子面分布较为均匀,拱脚处区域较大,掌子面围岩卸荷松动范围较小。在断层破碎带范围内,4-4 断面、5-5 断面和 6-6 断面

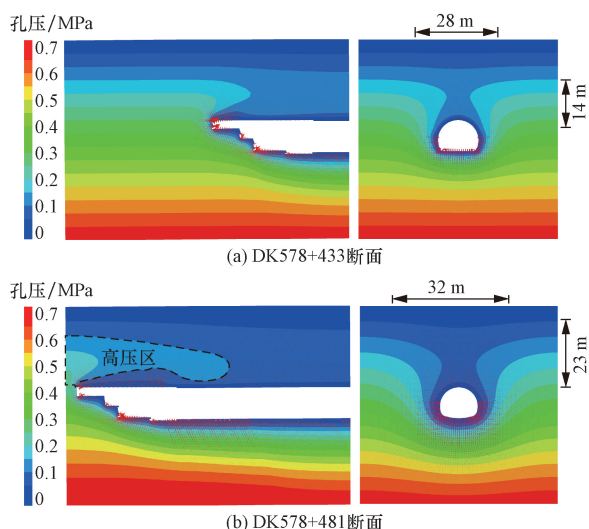


图 11 隧道孔压分布图

Fig. 11 Pore pressure distribution of tunnel

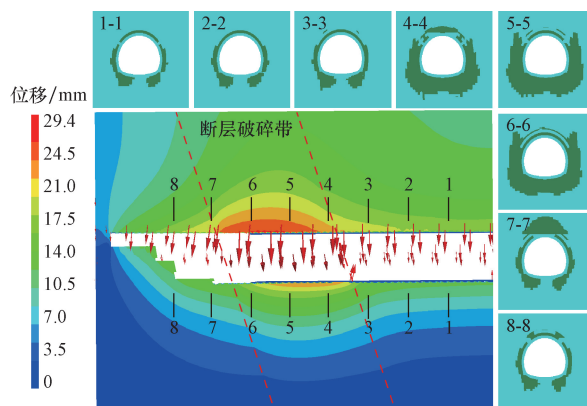


图 12 隧道围岩变形

Fig. 12 Deformation of surrounding rock

掌子面底板围岩质量差,掌子面侧墙和底板分布大范围剪切破坏塑性区,该范围需要对拱脚和底板加固结构进行加强。7-7 断面顶部处于断层内,侧墙和底板围岩较好,仅掌子面顶部剪切破坏层较厚,需要对拱顶进行补强,避免掌子面坍塌、冒顶。

### 4 结论

(1) 现场围岩监测与数值计算结果表明,隧道掌子面开挖至富水断层破碎带时,地下水渗流与工程卸荷共同作用下,逆断层上盘岩土体突然向下塌陷,拱顶沉降急剧增大。隧道施工过程中,应提高超前支护结构的强度和刚度,避免变形急剧增大,导致局部塌方。

(2) 隧道开挖断面未通过监测断面时,拱顶围岩受到轻微施工扰动,监测断面开挖后,拱顶迅速向下变形,拱顶形成明显的坍塌拱,隧道底部上拱。断层区 DK578 + 435 断面变形速率最大,并且受开

挖扰动时间最长。

(3) 当上台阶开挖时,SL1 ~ SL2 测线的收敛值小于总变形量的 10%;当中台阶和下台阶开挖后,围岩变形量超过总变形的 80%,围岩水平变形最大值出现在拱脚处。在断层处,上台阶开挖后,中、下台阶的土体上拱值为 23.5 mm,无法为围岩提供稳定支撑,监测点向隧道内变形,其他区域无此现象。

(4) 当隧道掌子面开挖至富水断层破碎带时(DK578 + 433),隧道开挖区域上方 14 m 和中间 28 m 范围内的水位下降显著。由于隧道顶部施加了中管棚注浆,并及时施工初期支护,地下水主要沿着台阶面和掌子面渗流。隧道上方仍存在较大孔压,为减少衬砌结构受力,可增加排水管将水引入边沟。

### 参 考 文 献

- [1] Dong W J, Ji S H, Li C Q, et al. The influence of different influencing factors in the jointed rock formation on the failure mode of the tunnel[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2023, 41: 1183-1201.
- [2] 薛君, 张城瑞, 叶子剑, 等. 东天山隧道进口段断层及强风化富水带综合地质预报[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(6): 171-176.  
Xue Jun, Zhang Chengrui, Ye Zijian, et al. Compressive geological prediction of dongtianshan tunnel entrance passing through the fault and intensely weathered water-rich zone[J]. *Morden Tunnelling Technology*, 2020, 57(6): 171-176.
- [3] 张庆艳, 陈卫忠, 袁敬强, 等. 断层破碎带突水突泥演化特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(6): 1911-1922, 1932.  
Zhang Qingyan, Chen Weizhong, Yuan Jingqiang, et al. Experimental study on evolution characteristics of water and mud inrush in fault fractured zone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(6): 1911-1922, 1932.
- [4] 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.  
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.
- [5] 舒宗运, 彭丁茂, 刘骏, 等. 隧道穿越溶洞及断层突水机理与防控对策研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(S2): 993-1000.  
Shu Zongyun, Peng Dingmao, Liu Jun, et al. Study on water inrush mechanism and prevention and treatment measures of tunnel crossing karst area and fault zone[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(S2): 993-1000.
- [6] 刘毅, 陈梦发, 程谦恭. 川中红层软岩高速铁路隧道基底上拱机理研究[J]. *铁道工程学报*, 2023, 40(4): 55-59, 66.  
Liu Yi, Chen Mengfa, Cheng Qiangong, et al. Research on the mechanism of base arching in red stratum soft rock high-speed railway tunnel in central Sichuan[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2023, 40(4): 55-59, 66.
- [7] 田四明, 王伟, 唐国荣, 等. 川藏铁路隧道工程重大不良地质应对方案探讨[J]. *隧道建设*, 2021, 41(5): 697-712.  
Tian Siming, Wang Wei, Tang Guorong, et al. Study on countermeasures for major unfavorable geological issues of tunnels on Sichuan-Tibet Railway[J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(5): 697-712.
- [8] 杨建辉, 沈恺, 周杰, 等. 穿越富水断层破碎带隧道塌方机理分析与预防[J]. *工程地质学报*, 2023, 31(1): 248-257.  
Yang Jianhui, Shen Kai, Zhou Jie, et al. Mechanism and prevention of tunnel of tunnel collapse through water-rich fault fracture zone[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(1): 248-257.
- [9] 卓越, 孙国庆. 齐岳山隧道 F11 高压富水断层带注浆施工技术[J]. *中国工程科学*, 2009, 11(12): 82-86.  
Zhuo Yue, Sun Guoqing. Grouting construction technology of high pressure and rich water fault F11 in Qiyueshan Tunnel[J]. *Strategic Study of CAE*, 2009, 11(12): 82-86.
- [10] 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.  
Luo Yanping, Liu Dedi, Wang Sheng, et al. Analysis on seepage influence and control effect of large section tunnel construction in water rich weak fracture zone[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(13): 5756-5763.
- [11] 余庆锋, 吴立, 尹翔, 等. 高速铁路隧道岩溶突水发生机理研究[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(30): 1671-1815.  
Yu Qingfeng, Wu Li, Yin Xiang, et al. Study on Karst water inrush mechanism in high-speed railway tunnel[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(30): 1671-1815.
- [12] 李守刚. 高地应力破碎围岩隧道变形受力特征试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(4): 1574-1580.  
Li Shougang. Experimental study on deformation and stress of tunnels in fault zone surrounding rock under high ground stress[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(4): 1574-1580.
- [13] 张治国, 汪嘉程, 赵其华, 等. 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[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(S2): 3378-3394.  
Zhang Zhiguo, Wang Jiacheng, Zhao Qihua, et al. Analytical solution of head distribution on tunnel structure adjacent water-filled fault in water-enriched mountain region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S2): 3378-3394.
- [14] Li G, Hu Y, Tian S M, et al. Analysis of deformation control mechanism of prestressed anchor on jointed soft rock in large cross-section tunnel[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80: 9089-9103.
- [15] Jin A B, Wang B X, Zhao Y Q, et al. Analysis of the deformation and fracture of underground mine roadway by joint rock mass numerical model[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12: 559.
- [16] Gao J Y, Peng S Y, Chen G Q, et al. Coupled hydro-mechanical analysis for water inrush of fractured rockmasses using the discontinuous deformation analysis[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 156: 105247.
- [17] 成国文, 李皓, 傅鹤林, 等. 断层影响区内隧道涌水的 Goodman 解析解[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(3): 768-775.

- Cheng Guowen, Li Jie, Fu Helin, et al. Goodman analytical solution of tunnel inflow in fault-affected area[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(3): 768-775.
- [18] 左清军, 吴立, 林存友, 等. 富水软岩隧道跨越断层段塌方机制分析及处治措施[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 369-377.
- Zuo Qingjun, Wu Li, Lin Cunyou, et al. Collapse mechanism and treatment measures for tunnel in water-rich soft rock crossing fault [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 369-377.
- [19] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041-1069.
- Li Shucai, Xu Zhenhao, Huang Xin, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1041-1069.
- [20] 张金夫, 汶文钊. 大瑞铁路大柱山隧道高压富水断层处理技术[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(3): 160-166.
- Zhang Jinfu, Wen Wenzhao. Construction technology for the Dazhushan tunnel in a high-pressure fault with abundant water [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(3): 160-166.
- [21] 陶志刚, 周子琮, 杨晓杰, 等. 富水断层带隧道变形力学机制及双梯度注浆 NPR 补偿对策[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(6): 768-779.
- Tao Zhigang, Zhou Zicong, Yang Xiaojie, et al. Mechanics of tunnel deformation in water-rich fault zone and double-gradient grouting NPR compensation counter measures[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(6): 768-779.