



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404293

引用格式:陈国庆,任松.隧道穿越富水断层破碎带涌水规律:以重庆英山隧洞为例[J].科学技术与工程,2025,25(13):5689-5695.

Chen Guoqing, Ren Song. Water influx pattern of tunnel through water-rich fault fracture zone: taking Yingshan tunnel in Chongqing as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(13): 5689-5695.

隧道穿越富水断层破碎带涌水规律: 以重庆英山隧洞为例

陈国庆^{1,2}, 任松^{1,2*}

(1. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学资源与安全学院, 重庆 400044)

摘要 当隧道穿越富水断层破碎带区域时,在一系列施工扰动下极易产生突水事故。为了研究断层破碎带宽度、倾角及水压对隧道涌水量的影响,以英山隧洞为工程背景,进行现场测试,并设计正交试验方案开展多因素条件下的破碎带流-固耦合数值模拟,分析断层破碎带宽度、倾角及水压对隧道涌水量的敏感性。研究表明:隧道涌水量随断层破碎带厚度、倾角及水压的增大而增加,影响隧道涌水量因素主次顺序为断层破碎带水压、倾角及宽度;数值模拟结果较好地与现场监测结果相吻合。研究结果可为富水隧道涌水量的预测及防治技术提供理论参考。

关键词 富水隧道; 断层破碎带; 数值模拟; 正交试验; 涌水量

中图分类号 X947; 文献标志码 A

Water Influx Pattern of Tunnel through Water-rich Fault Fracture Zone: Taking Yingshan Tunnel in Chongqing as an Example

CHEN Guo-qing^{1,2}, REN Song^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Resource and Security, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

[Abstract] When a tunnel crosses a water-rich fault fracture zone, it is very easy to produce a water surge accident under a series of construction disturbances. In order to study the effects of fault zone width, dip angle and water pressure on tunnel water inflow, Yingshan tunnel was used as the engineering background, field tests were carried out, and an orthogonal test scheme was designed to carry out numerical simulation of coupled flow-solidity in the fault zone under multifactorial conditions, so as to analyze the sensitivity of the fault zone width, dip angle and water pressure on the water inflow of the tunnel. The results show that the tunnel water inflow increases with the increase of fault zone thickness, dip angle and water pressure, and the factors affecting the tunnel water inflow are water pressure, dip angle and width of the fault zone. The numerical simulation results are in good agreement with the field monitoring results. The results can provide theoretical references for the prediction of water influx in water-rich tunnels and the prevention and control technology.

[Keywords] water-rich tunnel; fault-fracture zone; numerical simulation; orthogonal test; water influx

断层破碎带岩体在地质作用等影响下,呈现出胶结性差、松散破碎、渗透性强等特点,为地下水的流动、汇集提供了便利条件。当隧道施工临近断层破碎带区域时,在开挖扰动的影下,地应力的释放以及流动路径的改变都极易造成突水事故的发生,造成较大的经济损失与人员伤亡。

目前,国内外学者对含有断层破碎带的富水隧道进行了一定研究。张乐文等^[1]通过研究断层作用下隧道掌子面突水力学机理,发现当断层倾角处

于 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 时,隧道掌子面发生突水的概率增加;邬忠虎等^[2]探究了不同距离下充水溶洞对岩溶隧道突涌水灾变演化的过程,发现溶洞距离对隧道围岩破坏过程影响显著;安泰龙等^[3]借助COMSOL数值模拟软件,发现承压水的冲蚀作用致使断层涌水量急剧增大;马丹等^[4]通过发明创新渗透缸筒内壁周围注水与轴向应力加载的试验方法,发现轴压和胶结强度为破碎带岩体蠕变的主控因素;李廷春等^[5]利用建立的渗流-变形耦合模型,分析施工扰动

收稿日期: 2024-06-09 修订日期: 2025-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(51774057)

第一作者: 陈国庆(1999—),男,汉族,新疆奎屯人,硕士研究生。研究方向:隧道工程灾害防治。E-mail:1211978977@qq.com。

*通信作者: 任松(1975—),男,汉族,重庆人,博士,教授,博士研究生导师。研究方向:岩土工程及可靠度。E-mail:2607327866@qq.com。

对地下水能量释放的影响规律; Wu 等^[6]通过研究充填级配对断层破碎带微观结构及渗流特性的影响; 张鹏等^[7]采用基于最小二乘-分步耦合优化的岩溶隧道围岩渗流参数反演法, 确定出隧道围岩的渗流参数; 张庆松等^[8]、Zhang 等^[9]、李博等^[10]通过自制的三维地质模型试验系统, 揭示了揭露断层后的隧道围岩渗流场、应力场、位移场以及涌出物等特征参数的变化规律。综上所述, 目前对于富水断层的宽度、倾角以及其单一因素对围岩稳定性的影响、突水的成灾机制都有一定的研究, 但对于这些因素间的影响及重要程度的研究相对较少。探究断层破碎带宽度、倾角及水压对隧道涌水量的影响, 对富水隧道突水灾害预测、防治及施工安全具有重要的理论意义和工程借鉴价值。

现依托重庆市英山隧洞工程, 进行现场测试, 并设计正交试验方案开展多因素条件下的破碎带流-固耦合数值模拟, 分析断层破碎带宽度、倾角及水压对隧道涌水量的敏感性, 以期为富水隧道涌水量的研究提供参考价值。

1 工程概况

英山隧洞位于重庆市永川区英山一带, 隧洞全长 2 945 m, 埋深 11 ~ 318 m, 隧洞断面相对较小, 均采用全断面法开挖。隧址区地下水按赋存介质分为松散岩(土)类孔隙水、碎屑岩类裂隙(孔隙)水。地下水受岩性、地貌和构造控制, 通过现有钻孔揭示进出口段钻孔地下水位埋深 3.4 ~ 15.4 m, 洞身段钻孔水位最大埋深 96.4 m。隧道掘进过程中穿越多条富水断层及破碎带(F1 ~ F7), 断层破碎带宽度 3.8 ~ 23.5 m, 倾角跨度较大, 水压在设置导水洞等排水措施后降低至 0.1 ~ 0.7 MPa, 具体情况如图 1 所示。

2 现场测试方案

2.1 测试地点选择

根据施工进度和现场施工环境, 选取英山隧道 SYK43 + 600 ~ SYK43 + 800 段开展现场试验, 该段全

长 200 m, 埋深 37.5 m, 穿越一条宽度为 8 m 的断层破碎带, 倾角为 40°, 在设置导水洞后, 水压降低至 0.25 MPa。试验断面分别为 SYK43 + 625 ~ SYK43 + 775, 实时监测该段隧道涌水量。

2.2 实测结果分析

由图 2 可知, 隧道 SYK43 + 625 ~ SYK43 + 775 段涌水量监测结果在一定范围内波动变化, 这是由于隧道现场工程环境较为复杂, 受天气、岩性、层理及裂隙等多方面因素影响。该段涌水量监测结果可为数值模拟提供良好的现场验证。

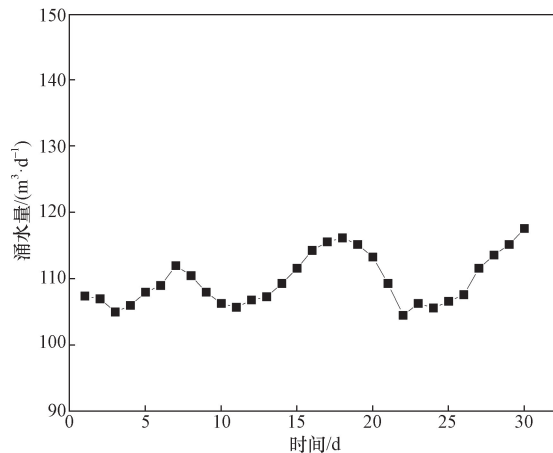


图 2 隧道 SYK43 + 625 ~ SYK43 + 775 段涌水量监测结果
Fig. 2 Surge monitoring results of tunnel section SYK43 + 625 ~ SYK43 + 775

3 英山隧道耦合数值模型

3.1 计算模型和材料参数

采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 对应力场-渗流场耦合状态下隧道开挖穿越断层破碎带进行模拟。根据圣维南定理, 隧道开挖在洞径方向的 3 ~ 5 倍范围内影响较大, 为减小边界效应对模拟结果的影响, 模型选取 150 m × 70 m × 60 m 三维模型, 各边界距离隧洞均大于 5 倍洞径, 且对隧道及断层周围网格进行局部加密, 共生成 266 858 个自由四面体网格单元, 几何模型如图 3 所示。模型底部采用固定约束, 左右及前后边界采用法向约束, 且都为

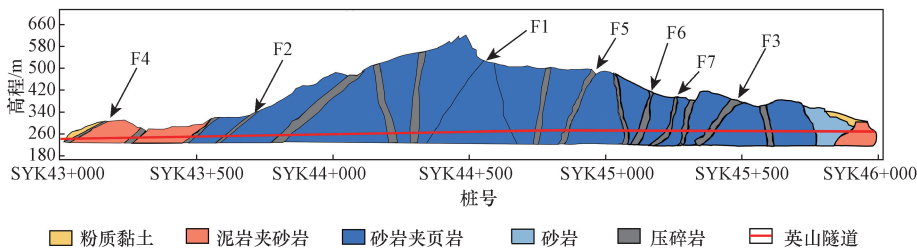


图 1 英山隧道破碎带分布示意图
Fig. 1 Schematic distribution of Yingshan tunnel fragmentation zone

不透水边界。屈服准则选用德鲁克-普拉格模型, 匹配 M-C 准则。为更好地分析隧道开挖对围岩以及隧道的影响, 开挖前模型采用应力继承、位移清零。根据英山隧道地质勘测报告及工程设计参数, 数值模型参数如表 1 所示。

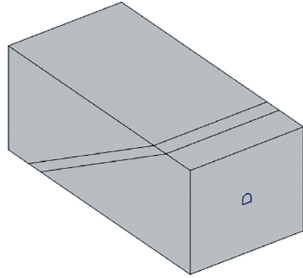


图 3 隧道穿越断层几何模型

Fig. 3 Geometric model of tunnel crossing fault

3.2 渗流-损伤耦合模型

考虑到实际工程问题的复杂性, 地下水体的渗流会改变岩体的力学性质, 同时在一系列开挖扰动下岩体力学状态的改变也会影响到地下水的渗流路径和速度。为了更准确地模拟隧道穿越富水断层破碎带过程中的渗流和应力行为, 采用三线性应力软化模型^[11]来描述岩体的损伤与渗透率、孔隙率的变化特征。当岩体塑性变形 $\xi_p = 0$ 时, 其处于弹性阶段, 此时损伤变量 $D = 0$, 其力学及孔隙率、渗透率保持初始值不变; 当岩体塑性变形 $0 < \xi_p < \xi_p^{\max}$ (ξ_p^{\max} 为软化极限塑形应变) 时, 其进入应变软化阶段, 此时岩体开始出现损伤 ($0 < D < 1$), 其力学参数呈线性减小而渗透参数呈指数增长; 当岩体塑形应变 $\xi_p > \xi_p^{\max}$ 时, 其进入残余阶段, 此时岩体损伤量 $D = 1$, 其力学参数和渗透参数则保持残余值不变, 具体如式(1)~式(4)所示。

$$D = \min \left(\frac{\xi_p}{\xi_p^{\max}}, 1 \right) \quad (1)$$

$$\begin{cases} c = (1 - D)c_e + Dc_r \\ \varphi = (1 - D)\varphi_e + D\varphi_r \\ E = (1 - D)E_e + DE_r \end{cases} \quad (2)$$

$$k = k_e e^{aD} \quad (3)$$

$$n = n_e e^{bD} \quad (4)$$

式中: ε_p 为岩体塑性变形; ε_p^{\max} 为岩体从损伤阶段到达塑性残余阶段时的软化极限塑形应变; c_e, φ_e, E_e 分别为岩体弹性阶段内聚力、内摩擦角、弹性模量; c_r, φ_r, E_r 分别为残余阶段内聚力、内摩擦角、弹性模量; k_e, n_e 分别为岩体损伤前的渗透率和孔隙率; a, β 分别为岩体伤后的渗透突变参数、孔隙突变参数。

4 正交数值模拟试验分析

4.1 正交试验方案设计

正交试验设计^[12]能够以较少的试验次数达到较好的试验结果, 大大提高试验效率, 并在因素之间可能存在交互作用时快速找出影响试验结果的主要因素。以英山隧道穿越富水断层破碎带为工程背景, 选取断层破碎带宽度、倾角及水压作为正交试验的影响因素 A、B 和 C, 每个影响因素包含 3 个水平 (I、II、III), 以隧道涌水量为表征因子。影响因素及水平如表 2 所示, 试验方案如表 3 所示。

表 2 正交试验方案影响因素及水平

Table 2 Orthogonal test program influencing factors and levels

水平	影响因素		
	A 断层宽度/m	B 断层倾角/(°)	C 水压/MPa
I	5	30	0.1
II	10	45	0.3
III	15	60	0.5

表 3 正交数值模拟试验方案

Table 3 Orthogonal numerical simulation test scheme

试验号	影响因素		
	断层宽度 A	断层倾角 B	水压 C
1	A _I	B _I	C _I
2	A _I	B _{II}	C _{II}
3	A _I	B _{III}	C _{III}
4	A _{II}	B _I	C _{II}
5	A _{II}	B _{II}	C _{III}
6	A _{II}	B _{III}	C _I
7	A _{III}	B _I	C _{III}
8	A _{III}	B _{II}	C _I
9	A _{III}	B _{III}	C _{II}

表 1 数值模型地层参数

Table 1 Numerical model stratigraphic parameters

材料	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	内聚力 c / MPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	初始渗透率 k / m^2	初始孔隙率 n
围岩	1 900	20	0.25	0.3	25	1×10^{-12}	0.2
断层破碎带	1 800	5.5	0.3	0.25	20	4.5×10^{-11}	0.3
初期支护	2 500	28	0.2	—	—	2×10^{-15}	0.15

4.2 正交数值模拟结果分析

依据表3中数值模拟试验方案进行模拟试验,得出每种试验方案涌水量大小,具体试验结果如表4所示,并对表征因子涌水量进行极差和方差分析。

表4 正交数值模拟试验结果

试验号	影响因素			涌水量/(m ³ ·d ⁻¹)
	A	B	C	
1	I	I	I	38.9
2	I	II	II	125.1
3	I	III	III	221.2
4	II	I	II	121.6
5	II	II	III	225.9
6	II	III	I	47.6
7	III	I	III	210.7
8	III	II	I	46.8
9	III	III	II	146.3

4.2.1 极差分析

正交试验设计中极差分析可以快速判断各因素对表征因子的影响程度,根据各影响因素极差值的大小初步判定断层破碎带宽度、倾角及水压对隧道涌水量的影响大小。极差计算公式如式(5)所示。

$$R = \max(\overline{K_{ij}}) - \min(\overline{K_{ij}}) \quad (5)$$

式(5)中: K_{ij} 为第 i 列因素 j 水平的表征因子之和; $\overline{K_{ij}}$ 为 K_{ij} 的算术平均值。

根据表4的数值模拟试验结果,隧道穿越断层破碎带的涌水量极差由式(5)计算,得出结果如表5所示。

由表5可知,根据各因素极差大小 $R_c > R_b > R_a$,得出影响隧道涌水量的因素主次顺序为断层破碎带水压 > 倾角 > 宽度。为了量化分析各个因素变动时表征因子涌水量的变化幅度,结合表5对各个因素进行敏感性分析,结果如图4所示。

由图4(a)可知,破碎带宽度从5 m增加至15 m时,涌水量增加了6.2 m³/d,这是由于随着破碎带宽度的增加,一方面岩石的破碎程度可能越严重,另一方面地下水流入隧道的通路变多,进而增加地

表5 隧道涌水量的极差值

指标	试验因素		
	A	B	C
K_{1j}	385.2	371.2	133.3
K_{2j}	395.1	397.8	393.0
K_{3j}	403.8	415.1	657.8
$\overline{K_{1j}}$	128.4	123.7	44.4
$\overline{K_{2j}}$	131.7	132.6	131.0
$\overline{K_{3j}}$	134.6	138.4	219.3
极差 R	6.2	14.7	174.9

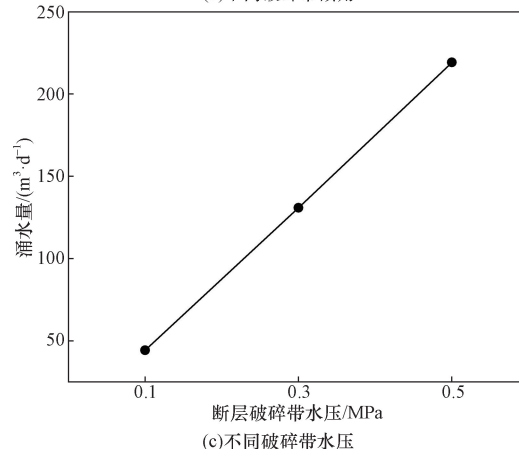
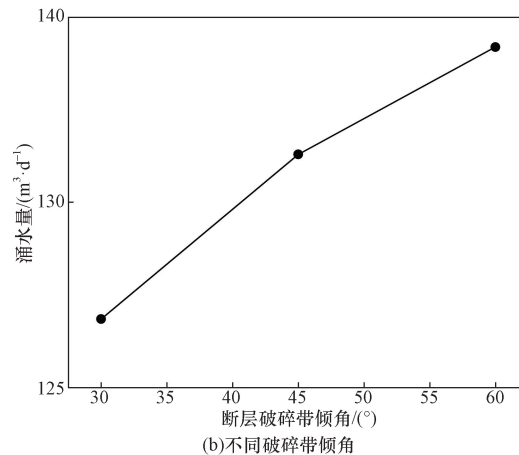
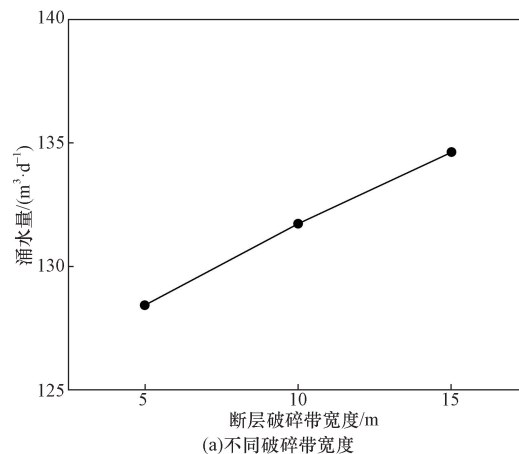


图4 敏感性分析

Fig. 4 Water pressure sensitivity analysis

下水与隧道之间的连通性,从而导致隧道涌水量的增加^[13-14]。

由图4(b)可知,破碎带由30°增加至60°时,涌水量由123.7 m³/d增加至138.4 m³/d。断层破碎带倾角的增加,即破碎带与隧道更接近垂直关系,从而增加了破碎带与隧道之间的水力坡降,使得地下水更易通过破碎带进入隧道^[15]。其次,破碎带倾角较大意味着与水平面的倾角也较大,这使得断层在形成过程中会受到更大的地质应力作用,从而断层破碎带的破碎程度就更为强烈,也就增加了破碎

带的透水性^[16]。

由图 4(c)可知,断层破碎带水压由 0.1 MPa 增加至 0.5 MPa 时,涌水量由 44.4 m³/d 增加至 219.3 m³/d,增加了近乎 4 倍。主要原因是断层破碎带水压的增加会直接增加隧道边界的渗透压力,从而导致隧道边界的通量增大,其次断层破碎带水压的增加会导致围岩进一步的破碎和位移,改变隧道边界的渗透性^[17],进而影响隧道边界的通量。

由图 4 可知,随各因素水平的变化,隧道涌水量变化幅度由大到小依次为断层破碎带水压、倾角及宽度。根据上述研究成果,针对穿越不同断层破碎带宽度、倾角和水压的隧道时,根据实际地质状况做好突水灾害防治,灵活改变隧道施工方法和工序,对有突水危险的地层加强防排水措施,保证隧道施工安全。

4.2.2 方差分析

通过极差分析对各因素的影响程度进行初步判定后,再采用方差分析考虑因素间的交互作用对表 4 的数据再次分析,分析结果如表 6 所示。

表 6 隧道涌水量的方差值

方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F
A	57.8	2	28.9	0.56
B	329.0	2	164.5	3.20
C	45 886.5	2	22 943.3	446.40
误差 e	102.8	2	51.4	
总和	46 376.1	8		

对表 6 计算结果进行 F 检验,检验标准取 $F_{0.05}(2, 2) = 19.0$,可知, $F_A < 19.0$, $F_B < 19.0$, $F_C \gg 19.0$,这表明断层破碎带水压 C 相对于断层破碎带宽度 A 和倾角 B 对试验结果涌水量有显著影响,破碎带水压的不同水平导致了试验结果的显著差异,即可以拒绝零假设(该因素对试验结果影响较小)而接受备择假设(该因素对试验结果有显著影响)。可以得出,3 个因素对隧道涌水量的影响程度为断层破碎带水压 > 断层破碎带倾角 > 断层破碎带宽度,通过方差分析进一步有效验证了试验结果的准确性及可靠性。

4.3 现场监测结果验证

为确保数值模拟结果的可靠性及准确性,依据英山隧道现场监控量测资料,统计隧道穿越不同断层宽度、倾角及水压条件下涌水量数据,选取其中 7 条破碎带进行模拟结果验证,如图 1 中 F1 ~ F7,破碎带具体参数如表 7 所示,现场监测结果如图 5 所示。

表 7 破碎带 F1 ~ F7 具体参数

破碎带编号	里程桩号	宽度/m	倾角/(°)	水压/MPa
F1	SYK44 + 320	5.3	59	0.25
F2	SYK43 + 570	11.2	50	0.26
F3	SYK45 + 390	16.3	57	0.22
F4	SYK43 + 050	9.2	29	0.23
F5	SYK44 + 830	12.8	62	0.21
F6	SYK45 + 100	13.8	65	0.12
F7	SYK45 + 220	12.2	64	0.48

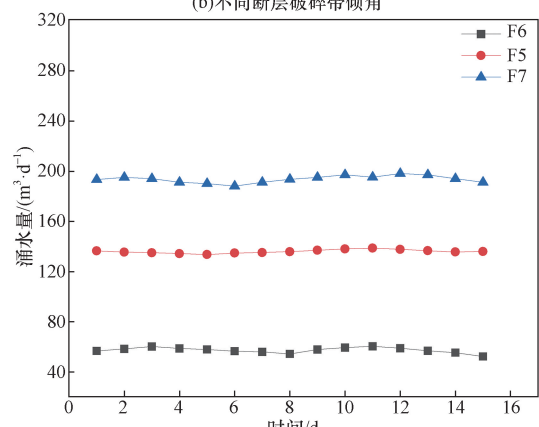
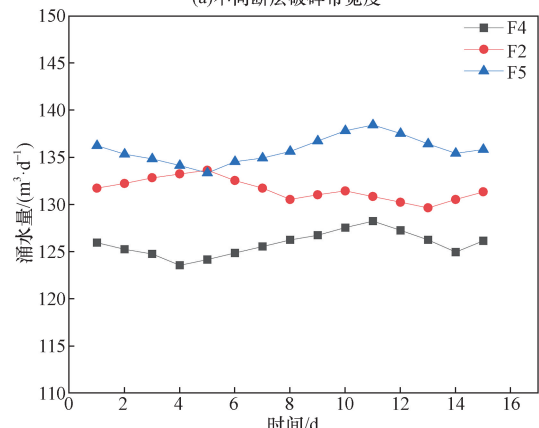
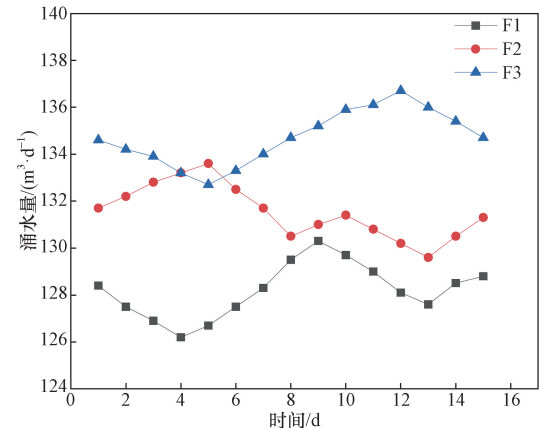


图 5 涌水量监控量测结果

Fig. 5 Monitoring and measuring results of water influx

对比分析图4和图5,随着断层破碎带宽度、倾角及水压的增加,隧道涌水量依次增加了6.5、9.7、136.1 m³/d,数值模拟结果与现场监测结果整体趋势一致,验证了数值模拟的可行性。同时表明不同断层破碎带宽度、倾角及水压条件下隧道涌水量影响因素敏感性分析是合理的。

5 结论

(1)隧道涌水量随断层破碎带水压的增加近似呈线性快速增加;当断层破碎带倾角由30°增加至60°时,隧道涌水量增加;当断层破碎带宽度由5 m增加至15 m时,隧道涌水量缓慢增加。

(2)正交试验极差和方差分析结果表明,影响隧道涌水量的主次顺序依次为断层破碎带水压、倾角及宽度。在隧道穿越复杂富水地层施工过程中,根据实际地质状况做好突水灾害防治,灵活改变隧道施工方法和工序,对有突水危险的地层加强防水措施,保证隧道施工安全。

(3)采用现场监测与正交数值模拟相结合的方法,得出隧道穿越不同断层破碎带宽度、倾角及水压条件下涌水量的变化规律,现场监测结果与数值模拟结果具有较好的一致性,说明上述方法分析富水隧道涌水量变化规律的可行性与准确性,也为突水灾害防治提供一定的理论指导。

参考文献

- [1] 张乐文, 吴静, 张翔宇. 断层作用下隧道掌子面突水力学机理研究及工程应用(英文)[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(3): 934-946.
Zhang Lewen, Wu Jing, Zhang Xiangyu. Mechanical mechanism of tunnel water breakage at the tunnel face under faults and its engineering application[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(3): 934-946.
- [2] 郭忠虎, 崔恒涛, 宋怀雷, 等. 动力扰动下岩溶隧道突涌水渗流-应力-损伤试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(5): 2093-2099.
Wu Zhonghu, Cui Hengtao, Song Huailai, et al. Experimental study on water seepage-stress-damage in a karst tunnel under dynamic disturbance [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(5): 2093-2099.
- [3] 安泰龙, 姚邦华, 李硕, 等. 底板承压水作用下断层破碎带岩体冲蚀-渗流灾变规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(2): 354-360.
An Tailong, Yao Banghua, Li Shuo, et al. Study on the erosion and seepage catastrophe law of rock body in fault fracture zone under the action of bottom plate pressurized water[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2023, 40(2): 354-360.
- [4] 马丹, 段宏宇, 张吉雄, 等. 断层破碎带岩体突水灾害的蠕变-冲蚀耦合力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(9): 1751-1763.

- Ma Dan, Duan Hongyu, Zhang Jixiong, et al. Experimental study on creep-erosion coupling mechanical properties of rock body sudden water hazard in fault fracture zone[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(9): 1751-1763.
- [5] 李廷春, 吕连勋, 段会玲, 等. 深埋隧道穿越富水破碎带围岩突水机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(10): 3469-3476.
Li Tingchun, Lu Lianxun, Duan Hailing, et al. Mechanism of water-surge in surrounding rock of deep-buried tunnel through water-rich fracture zone[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2016, 47(10): 3469-3476.
- [6] Wu Y, Huang Z, Gu Q, et al. Experimental investigation on the pore structure and Water Inrush Evolution Law of weakly cemented fault fracture zone with different filling gradations[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1): 162.
- [7] 张鹏, 李彦霏, 田世宽, 等. 基于最小二乘-分步解耦的泄渗漏带与隧道围岩渗流参数方法[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(15): 6221-6229.
Zhang Peng, Li Yanfei, Tian Shikuan, et al. Least-squares-stepwise decoupling method for leakage zones and seepage parameters of tunnel peripheral rock[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(15): 6221-6229.
- [8] 张庆松, 王德明, 李术才, 等. 断层破碎带隧道突水突泥模型试验系统研制与应用[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(3): 417-426.
Zhang Qingsong, Wang Deming, Li Jucui, et al. Development and application of modeling test system for water and mud surges in tunnels with fault fracture zones[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(3): 417-426.
- [9] Zhang Q, Jiang Q, Zhang X, et al. Model test on development characteristics and displacement variation of water and mud inrush on tunnel in fault fracture zone [J]. *Natural Hazards*, 2019, 99(1): 467-492.
- [10] 李博, 武强, 班文韬. 掘进巷道富水型断层突水多场灾变演化规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(12): 161-167.
Li Bo, Wu Qiang, Ban Wentao. Research on the evolution law of multi-field catastrophe of water-rich fault water breakage in digging roadway[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(12): 161-167.
- [11] 林志斌, 李亚豪, 林培忠, 等. 损伤-渗流耦合作用下上覆溶洞隧道突水灾变规律研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2025, 44(2): 154-163.
Lin Zhibin, Li Yahao, Lin Peizhong, et al. Study on the sudden flooding law of overlying cavern tunnels under damage-seepage coupling[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2025, 44(2): 154-163.
- [12] 李莉. 统计学原理与应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 2019.
Li Li. Principles and applications of statistics [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2019.
- [13] 张海东. 断层破碎带宽度对逆断层活化规律影响的模拟研究[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(1): 96-99.
Zhang Haidong. Simulation study on the effect of fault fracture zone width on the activation law of reverse fault [J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(1): 96-99.
- [14] 杨超, 邹永木, 李磊, 等. 深大断层破碎带隧道突水突泥机理

- 研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(3): 173-179.
- Yang Chao, Zou Yongmu, Li Lei, et al. Research on the mechanism of water-surge and mud-surge in tunnels with deep and large faults and fracture zones[J]. Industrial Building, 2023, 53(3): 173-179.
- [15] 钟志群. 倾角对断层活化应力演化规律的计算机模拟研究[J]. 煤矿开采, 2017, 22(5): 81-85.
- Zhong Zhiqun. Computer simulation study on the evolution law of dipping angle on fault activation stress[J]. Coal Mining, 2017, 22(5): 81-85.
- [16] 李利平, 李术才, 石少帅, 等. 基于应力-渗流-损伤耦合效应的断层活化突水机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 3295-3304.
- Li Liping, Li Shucui, Shi Shaoshuai, et al. Study on the mechanism of fault-activated water-surge based on the coupling effect of stress-percolation-damage[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3295-3304.
- [17] 宋振骥, 郝建, 汤建泉, 等. 断层突水预测控制理论研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1511-1515.
- Song Zhenqi, Hao Jian, Tang Jianquan, et al. Theoretical study on the prediction and control of fault water burst[J]. Journal of Coal, 2013, 38(9): 1511-1515.