

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.04.018

某富水断层对隧道稳定性及涌水影响敏感性分析

张付军¹, 赵元科^{2,3}, 段宇⁴, 胡俊^{2,3}, 朱才辉⁴

- (1. 甘肃长达路业有限责任公司, 甘肃 兰州 730000;
2. 甘肃省桥梁隧道健康监测与安全评估技术重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 甘肃省交通科学研究院集团有限公司, 甘肃 兰州 730000;
4. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 以武九高楼山公路隧道突涌水灾害为研究背景, 针对其以断层破碎带为主控因素的隧道围岩稳定及突水问题展开调研和数值分析研究, 以期对突涌水治理措施的制定提供参考。基于 FLAC^{3D} 有限差分法及流固耦合分析原理, 研究了隧道埋深 H 、地下水位高度 h 、围岩级别 S 、侧压力系数 K_0 、断层宽度 W 、断层与隧道相对间距 d/D 、断层与水平面夹角 θ 等 7 个因素对隧道围岩稳定性及涌水量的影响规律, 并基于公路隧道规范中建议的隧道相对收敛变形及涌水量等级, 对围岩稳定性及涌水等级进行评价。结果表明: 围岩级别 S 对隧道变形、塑性区、涌水量影响最大, 其次为侧压力系数 K_0 , 再次为断层与隧道相对间距 d/D 和断层宽度 W ; 不敏感的影响因素为: 隧道埋深 H 、地下水位高度 h 及断层与水平面夹角 θ 。地层条件及断层因素是隧道突涌水的主控因素, 治理措施中应优先考虑地层的加固和限量排放双重措施。

关键词: 富水断层; 围岩稳定性; 涌水量; 敏感性分析

中图分类号: U457⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)04-0120-08

Sensitivity Analysis of Water-rich Fault Influence on the Tunnel Stability and Water Inflow

ZHANG Fujun¹, ZHAO Yuanke^{2,3}, DUAN Yu⁴, HU Jun^{2,3}, ZHU Caihui⁴

(1. Gansu Changda Highway Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Key Laboratory of Bridge and Tunnel Health Monitoring and Safety Assessment Technology of Gansu, Lanzhou, Gansu 730000, China;

3. Gansu Provincial Transportation Research Institute Group Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730000, China;

4. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Based on the water inflow problem of Wujiu highway tunnel, the tunnel stability and water inflow induced by the water-rich fault was investigated and simulated by numerical method, it will provide reference for the treatment measures of water inflow. According to the principle of coupling of fluid and solid, FLAC^{3D} was used to evaluate the tunnel stability and water inflow of the surrounding rock mass. Seven influence factors, such as the buried depth of tunnel (H), groundwater table (h), rock mass grade (S), lateral pressure coefficient (K_0), width of the fault (W), relative distance between the fault and the tunnel (d/D), fault angle to the horizontal plane (θ) were introduced to conduct numerical analysis. The upper limit value of the relative convergent deformation and the water inflow level were used to evaluate the tunnel stability and water inflow of the surrounding rock mass. The results show that the rock mass grade has the greatest influence on tunnel deformation, plastic zone and water inflow, followed by the lateral pressure coefficient, then the relative distance of fault and fault width. The insensitivity factors are: tunnel buried depth, underground water level height and the angle between fault and horizontal plane. Stratum conditions and fault are the main controlling factors of tunnel water inflow. The dual measures of strata reinforcement and the limited water drainage should be given priority in the control measures.

Keywords: water-rich fault; stability of surrounding rock; water inflow; sensitivity analysis

收稿日期: 2022-03-30

修稿日期: 2022-04-27

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2022SF-197)

作者简介: 张付军(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事公路、市政、铁路工程施工和 PPP 投资项目管理。E-mail: 549932845@qq.com

通讯作者: 朱才辉(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事黄土力学与工程等方面的研究工作。E-mail: zhucaihui123@163.com

隧道发生涌水涌泥及不稳定的形成机制较为复杂^[1],研究认为非可溶岩隧道突涌的本质是,开挖扰动触发赋存在破碎带或软弱带中的水和碎屑物在自身压力作用下涌入隧道,其孕险环境必须同时具备物质条件、空间条件和触发条件,三者缺一不可^[2]。许多学者基于以往研究成果,针对隧道突水致灾构造进行了划分:贺振宇等^[3]将隧道突水致灾构造分为五大类,并提出六种突水破坏模式。其中,断层引起隧道突水的案例逐渐引起重视,吴静^[4]将断层破碎带划分为:富水断层、导水断层、储水断层、阻水断层、无水断层五大类,并基于数值方法研究了断层不同因素对隧道涌水量的影响规律。李晓昭等^[5]通过已有隧道突水突泥归纳分析,提出了2类5种隧道突水突泥致灾构造:富水夹泥断裂带(富水断裂破碎带、夹泥断裂带)与充水充泥岩溶体(深部充水岩溶、表层裂隙岩溶带、充填岩溶洞穴),提出了不同突水突泥致灾构造的判别理论方法。李术才等^[6]对我国200多例隧道突水突泥致灾构造精心归纳划分为3类11型。

近年来,关于隧道的突水涌泥多场耦合理论及其评价方法的研究也取得了不少进展,任文峰^[7]基于应力-应变-渗流耦合原理,开展了隧道注浆防突的理论研究;张志成等^[8]采用改进层次分析法,建立了深长隧道突涌水灾害危险性评价模型。蔡俊华^[9]提出了基于涌水量预测、地质预报、封堵加固措施、开挖方法、施工组织管理和综合评价的风险控制机制,认为当许可评价的风险在可接受的范畴内才可以施工,避免灾害的发生。成帅等^[10]通过隧道突水全过程监测认为,突水灾害可分为:平静期、发展期、突变期和灾后期4个时期,并提出了基于多元监测信息融合分析的突水灾害状态判识方法。此外,针对隧道渗漏及治理措施方面,相关学者也开展了不少研究^[11-13],从隧道开挖、初期支护及衬砌等不同工况角度研究了地下水渗流对围岩稳定性的影响。上述针对隧道突水涌泥的形成机制、致灾构造类型、理论预测模型及治理措施方面的研究,为隧道突水、围岩稳定性预警和治理技术提供了宝贵的研究基础。本文以武九高楼山公路隧道为例,针对其以断层破碎带为主控因素的隧道围岩稳定性及涌水问题展开数值分析研究,基于FLAC^{3D}有限差分法,对本工程中隧道发生突涌水的影响因素进行流固耦合分析,探索各因素对隧道围岩稳定性及涌水量影

响的敏感程度,从而为隧道防突措施的制定提供科学参考。

1 武九高楼山隧道工程背景

武九隧道处于甘肃平凉至绵阳国家高速公路武都至九寨沟(甘川界)段,本项目路线起点位于武都区桔柑乡,与武都至罐子沟高速公路以枢纽立交相接,隧道路线全长12.48 km。武九高楼山隧道的地质构造区内断裂构造复杂,由一系列褶皱和断裂组成。主干断裂有石坊-范家坝-尖山-临江断裂,高峰坝-凡昌-明镜寺断裂带。断裂带一般较宽,断层面两侧挤压破碎强烈,角砾岩化、糜棱岩化明显,伴生的次级断裂及构造裂隙发育,断层和构造裂隙的相互交切构成了较为复杂的构造格局,造成区内岩体严重破碎。隧道通过地层的岩性主要以页岩、片岩、砂质、碳质板岩为主,岩体大多破碎,部分洞段围岩较为完整,围岩级别主要以Ⅲ(占隧道总长36.4%~37.4%)、Ⅳ(占隧道总长54.4%~55.7%)、Ⅴ级(占隧道总长7.9%~8.2%)为主,部分洞段通过断层破碎带及断裂带,隧道通过该地段可能会产生大变形及塌方危险,该区域褶皱十分发育,地下水类型较多,主要有基岩裂隙水,受地表水及大气降水的补给,局部地段接受沟流渗漏补给,深层基岩裂隙水同时接受表层风化裂隙水补给。可能会对局部洞段有渗水及涌水现象(ZK49+245处掌子面断层涌水,见图1)。

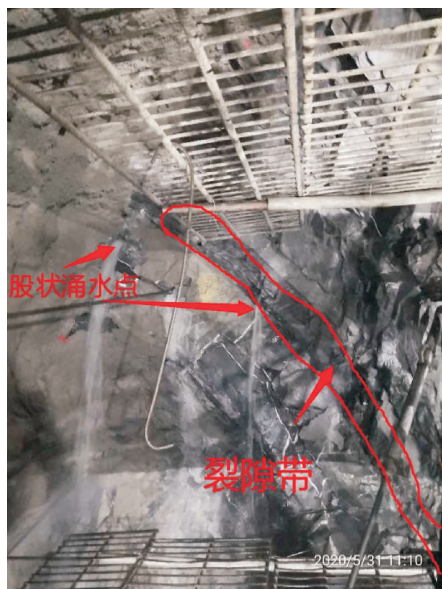


图1 ZK49+245处掌子面断层涌水

2 隧道涌水影响因素数值分析

2.1 数值分析方案

隧道施工必然会造成围岩中渗流场的改变,使岩体有效应力重新分布,有效应力改变又反作用来影响地下水的渗流,这种应力场与渗流场相互作用的现象被称为流固耦合效应,因此,有必要采用流固耦合分析方法研究隧道开挖诱发的涌水与围岩稳定性耦合问题。FLAC^{3D}中提供了流固耦合分析模型,其理论基于达西定律的运动方程,微元体小变形平衡方程,土体渗流本构方程,应变速率与速度梯度满足的相容方程建立基本微分平衡方程,进而得出不同方向位移及孔压值,来实现应力场与渗流场相互作用,隧道涌水本身就是地下水在地下岩体中破坏隧道周围岩体造成集中性的流动问题,本质也是一种开挖造成渗流场与应力场的耦合问题。为研究隧道开挖期间,隧道渗流场与变形量对隧道稳定性的影响,本文采用 FLAC^{3D}流固耦合分析中 Config

Fluid 模块,来分析隧道在流固耦合作用下围岩的稳定性及涌水量。

根据本工程的工程地质、水文地质信息勘察资料发现,富水断层破碎带的存在对隧道的影响主要体现在以下几个方面:隧道埋深 H 、地下水位高度 h 、断层与隧道不同空间距离 d (与隧道外边界垂直距离,按照与隧道等效洞径 D 来估算)、断层破碎带宽度 W 、断层破碎带与水平方向夹角 θ 、不同地应力条件(侧压力系数 K_0)、围岩级别(S)等。本文试图通过上述 7 个影响因素,开展数值仿真分析,其中各因素的取值范围,根据高楼山隧道的实际情况进行选取,具体试验方案如表 1 所示。通过上述数值试验方案,针对不同影响因素下对隧道涌水及围岩稳定性进行流固耦合分析,确定各影响因素下隧道洞周的单宽涌水量 q ,收敛变形量 U_x (水平位移)和 U_y (竖向位移),塑性区面积 A 等特征,以此来综合评价隧道发生突水等级和围岩稳定性。

表 1 数值分析方案

| 方案 | 变量因素 | 不变因素 |
|-----|--|---|
| 方案一 | $H = 100, 200, 300, 400, 500, 600$ | $S = \text{IV 级}; W = 40 \text{ m}; d/D = 0.5; \theta = 60^\circ; h = 100 \text{ m}; K_0 = 1.6$ |
| 方案二 | $S = \text{III、IV、V 级}$ | $H = 600 \text{ m}; W = 40 \text{ m}; d/D = 0.5; \theta = 60^\circ; h = 100 \text{ m}; K_0 = 1.6$ |
| 方案三 | $W = 5, 10, 20, 30, 40 \text{ m}$ | $H = 600 \text{ m}; S = \text{IV 级}; d/D = 0.5; \theta = 60^\circ; h = 100 \text{ m}; K_0 = 1.6$ |
| 方案四 | $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ | $H = 600 \text{ m}; S = \text{IV 级}; d/D = 0.5; W = 40 \text{ m}; h = 100 \text{ m}; K_0 = 1.6$ |
| 方案五 | $h = 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100 \text{ m}$ | $H = 600 \text{ m}; S = \text{IV 级}; d/D = 0.5; W = 40 \text{ m}; \theta = 60^\circ; K_0 = 1.6$ |
| 方案六 | $K_0 = 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6$ | $H = 600 \text{ m}; S = \text{IV 级}; d/D = 0.5; W = 40 \text{ m}; \theta = 60^\circ; h = 100 \text{ m}$ |
| 方案七 | $d/D = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ | $H = 600 \text{ m}; S = \text{IV 级}; W = 40 \text{ m}; \theta = 60^\circ; h = 100 \text{ m}; K_0 = 1.6$ |

2.2 数值模型的建立及模拟方法

数值模拟步骤如下:

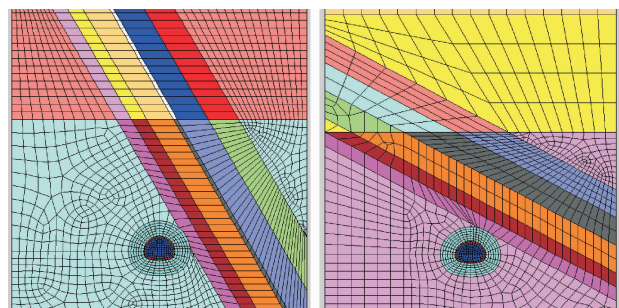
(1) 模型左右边界法向约束,底部双向约束,顶部为自由面,隧道开挖边界为零水头边界,基于流固耦合理论,模拟初始自重场和渗流场。

(2) 基于应力释放原理,模拟施工期隧道全断面一次性开挖,考虑围岩荷载分担比为 60% ~ 80%,计算围岩在施工期间的收敛变形、塑性区及洞周所有节点的渗流量。

(3) 为了单独考察工程地质、水文地质条件对隧道开挖期间围岩稳定性及涌水量的影响,不考虑初期支护和二次支护产生的支护反力作用,仅进行施工期开挖作用下的围岩力学响应及渗流量的分析。

(4) 岩层按理想弹塑性材料处理,且遵循 M-C(摩尔-库仑)屈服准则。

隧道断面形式为三圆心马蹄形,开挖轮廓宽度为 11.3 m,高度为 8.8 m,其数值分析模型如图 2 所示。



(a) 断层倾角为 60°

(b) 断层倾角为 30°

图 2 数值分析模型的建立

2.3 分析参数的取值

本文关于不同围岩级别的建议参数(见表 2),参考《武九公路高楼山隧道地质勘察报告》和《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》^[14](JTG 3370.1—

2018)(以下简称《规范》),关于围岩变形和修正涌水等级(见表 3、表 4),本文根据隧道单宽涌水量为

指标,将《规范》中涌水等级及定性描述细化为 4 级,即 A、B、C、D 四级)。

表 2 数值分析模型参数取值

| 围岩级别 | 密度 ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 弹性模量 E/GPa | 泊松比 μ | 摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 内聚力 c/MPa | 孔隙率 n | 渗透系数 $K/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|-------|--|------------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------|---------|--|
| Ⅲ级 | 2400 | 6.0 | 0.27 | 45 | 1.000 | 0.10 | 1×10^{-8} |
| Ⅳ级 | 2200 | 3.0 | 0.33 | 30 | 0.240 | 0.15 | 1×10^{-7} |
| Ⅴ级 | 1900 | 1.0 | 0.40 | 24 | 0.125 | 0.20 | 1×10^{-6} |
| 断层-Ⅲ级 | 2000 | 1.2 | 0.35 | 27 | 0.200 | 0.20 | 1×10^{-7} |
| 断层-Ⅳ级 | 1900 | 0.6 | 0.40 | 24 | 0.100 | 0.30 | 1×10^{-6} |
| 断层-Ⅴ级 | 1700 | 0.3 | 0.45 | 19 | 0.050 | 0.40 | 1×10^{-5} |

表 3 洞周相对收敛值允许值 U/D

单位: %

| 级别 | < 50 m | | | 50 m ~ 300 m | | | > 300 m | | |
|----|------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|-----------|----------------|----------------|
| | U/D | $(U/D)_{\min}$ | $(U/D)_{\max}$ | U/D | $(U/D)_{\min}$ | $(U/D)_{\max}$ | U/D | $(U/D)_{\min}$ | $(U/D)_{\max}$ |
| Ⅲ | 0.1 ~ 0.3 | 0.1 | 0.3 | 0.2 ~ 0.5 | 0.2 | 0.5 | 0.4 ~ 1.2 | 0.4 | 1.2 |
| Ⅳ | 0.15 ~ 0.5 | 0.15 | 0.5 | 0.4 ~ 1.2 | 0.4 | 1.2 | 0.8 ~ 2.0 | 0.8 | 2.0 |
| Ⅴ | 0.2 ~ 0.8 | 0.2 | 0.8 | 0.6 ~ 1.6 | 0.6 | 1.6 | 1.0 ~ 3.0 | 1.0 | 3.0 |

注:本表中不同埋深、围岩级别收敛位移取值区间下限值为 $(U/D)_{\min}$,上限值为 $(U/D)_{\max}$ 。

表 4 隧道涌水等级

| 等级 | D | C | B | A |
|---|-----------|------------------|-----------------|----------|
| 单宽涌水量 q ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) | $q < 3.6$ | $3.6 < q < 10.8$ | $10.8 < q < 18$ | $q > 18$ |
| 定性描述 | 潮湿有滴水 | 淋雨状出水 | 线状涌水 | 股状出水 |

2.4 数值分析结果

2.4.1 隧道埋深 H 对围岩稳定性及涌水量影响分析

图 3 为隧道埋深不同情况下,围岩的相对收敛变形 U_y/D 、 U_x/D 、单位涌水量 q 及等效塑性区厚度 T_p 随埋深 H 的变化规律。其中, U_y 为隧道开挖断面最大竖向位移(拱肩断层部位), U_x 为隧道净空水平方向最大收敛位移(侧墙断层部位与另一侧侧墙部位水平位移之和), D 为隧道等效洞径,则 D 和 T_p 的关系可表示如下:

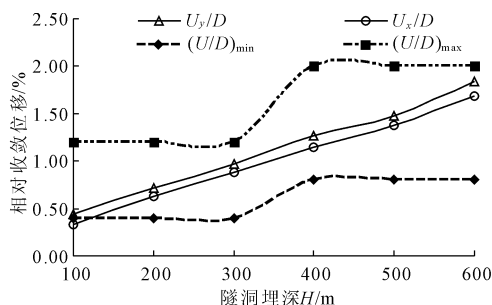
$$D = 2 \sqrt{\frac{A_0}{\pi}} \quad (1)$$

$$T_p = \sqrt{\frac{A + A_0}{\pi}} - \sqrt{\frac{A_0}{\pi}} \quad (2)$$

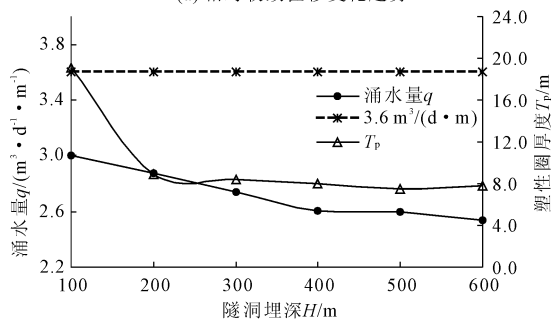
式中: A 为隧道开挖轮廓外侧塑性区面积, m^2 ; A_0 为隧道开挖断面面积, m^2 。

通过上述计算可得:随着埋深 H 的增大,围岩的相对收敛变形 U_y/D 、 U_x/D 呈线性增大,且均低于最大许可值 $(U/D)_{\max} = [2.0\%]$;围岩塑性圈的等效厚度 T_p 随隧道埋深 H 呈非线性减小趋势,当 $100 \text{ m} \leq H < 200 \text{ m}$ 时, $8.9 \text{ m} < T_p \leq 19.1 \text{ m}$,当 $H \geq 200$

m 时, T_p 基本保持不变;隧道单宽涌水量逐渐减少,且 $q < 3.6 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$,涌水等级为 D 级。表明:埋深的增大可降低地表水入渗引起断层破碎带的涌水作用,但会引起围岩变形增大,其主要原因是:埋深 H 增大导致地下水补给路线延长,短时间内向隧道涌水量明显降低,但埋深的增大导致隧道上覆荷载量略有增大,其施工期变形量明显增大。



(a) 相对收敛位移变化趋势



(b) 等效塑性圈厚度及涌水量变化趋势

图 3 U_y/D 、 U_x/D 、 q 、 T_p 与 H 关系

2.4.2 地下水位高度 h 对围岩稳定性及涌水量影响

图 4 为地下水位高度 h 不同情况下,围岩的相对收敛变形 U_y/D 、 U_x/D ,单位涌水量 q 及等效塑性区厚度 T_p 的变化规律。

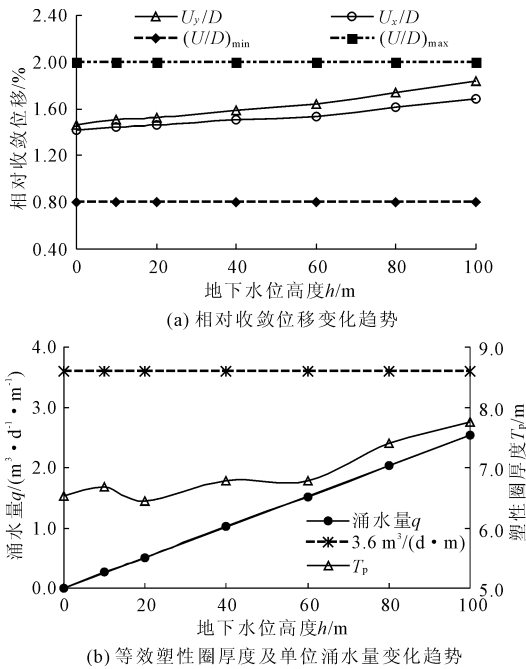


图 4 U_y/D 、 U_x/D 、 q 、 T_p 与 h 关系

通过上述计算可知:随着地下水位高度 h 的增大, U_y/D 、 U_x/D 基本呈线性增大,且 $U_y/D > U_x/D$ 。且低于规范最大许可值 $(U/D)_{max} = [2.0\%]$;围岩塑性圈的等效厚度 T_p 随地下水位 h 增大呈缓慢增大趋势;隧道涌水量 q 呈直线增长趋势,且 $q < 3.6 \text{ m}^3/(d \cdot m)$,涌水级别为 D 级。表明:地下水位增加,水头压力增大,造成隧道涌水量增加和围岩变形增大,其主要原因是:随着地下水位高度的增大,导致隧道围岩承担的外水压力和总渗流量的增大,必然导致围岩单宽上的渗流量、变形及塑性区的增大,因此降低断层内部的地下水位是保证隧洞不发生涌水和围岩稳定性重要手段。

2.4.3 隧道围岩级别 S 对突涌水及围岩稳定性影响

图 5 为不同围岩级别下,围岩的相对收敛变形 U_y/D 、 U_x/D ,单位涌水量 q 及等效塑性区厚度 T_p 随围岩级别 S 的变化规律,本算例中考虑了有断层和无断层影响情况下的计算结果对比。通过上述计算可知:

(1) 当不考虑断层破碎带影响时,随着围岩级别 S 的降低,围岩的相对收敛变形 U_y/D 、 U_x/D 呈快速增大趋势,当围岩级别较好时($S = \text{III}$ 级), U_y/D

$= 0.2\% < [1.2\%]$;当围岩较差时($S = \text{IV}$ 级),平均值 $U_y/D = 5.37\% > (U/D)_{max} = [2.0\%]$,围岩变形超过许可值;当考虑断层破碎带影响时, $S = \text{III}$ 级时, $U_y/D = 0.20\% < [1.2\%]$, $S = \text{IV}$ 级时, $U_y/D = 10.38\% > (U/D)_{max} = [2.0\%]$,表明:隧道周围断层破碎带对围岩较差的隧道稳定性会产生较大的影响。

(2) 围岩塑性圈的等效厚度 T_p 随围岩级别 S 呈增长趋势,无断层影响时 $1.18 \text{ m} < T_p \leq 15.72 \text{ m}$,有断层影响时 $1.45 \text{ m} < T_p \leq 20.49 \text{ m}$,表明随着围岩变差,塑性区扩展深度将呈指数增加,且受断层影响较大。

(3) 围岩变差时,隧道单宽涌水量 q 呈指数增加趋势,且断层破碎带的存在使得相对收敛变形 U_y/D 、塑性区等效厚度 T_p 、涌水量 q 分别平均增加了约 1.7、0.3、0.41 倍。表明:围岩较差情况下,隧道单宽涌水量 $q = 16.1 \text{ m}^3/(d \cdot m) \sim 23.0 \text{ m}^3/(d \cdot m)$,容易发生较为严重的 B 级及以上的涌水风险。

由此可见,围岩级别对隧洞涌水及围岩稳定性起着控制作用,围岩性质越差,隧洞的整体渗透性增强、成洞条件减弱,且在断层的影响下,隧洞发生涌水及失稳的可能性更为显著,对于富水断层隧洞而言,对围岩进行超前预支护和断层导水措施是保证施工安全的前提。

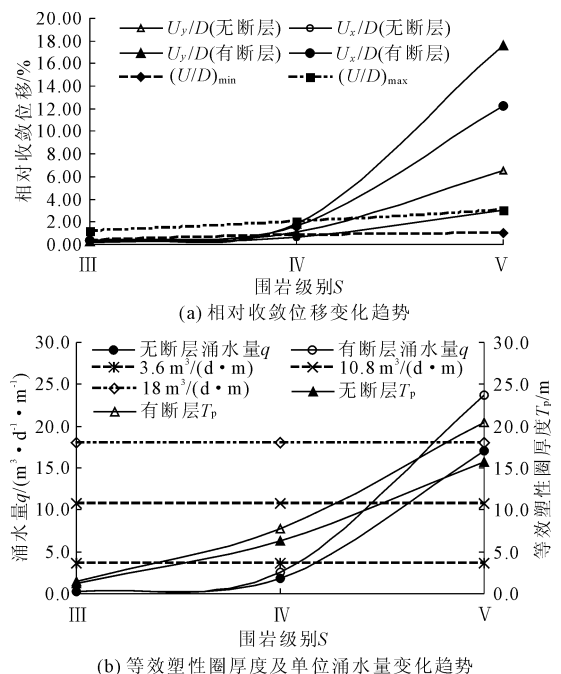


图 5 U_y/D 、 U_x/D 、 q 、 T_p 与 S 关系

2.4.4 断层宽度 W 对围岩稳定性及突水影响

图 6 为不同断层宽度 W 情况下,围岩的相对收敛变形 U_y/D 、 U_x/D ,单位涌水量 q 及等效塑性区厚度 T_p 的变化规律。

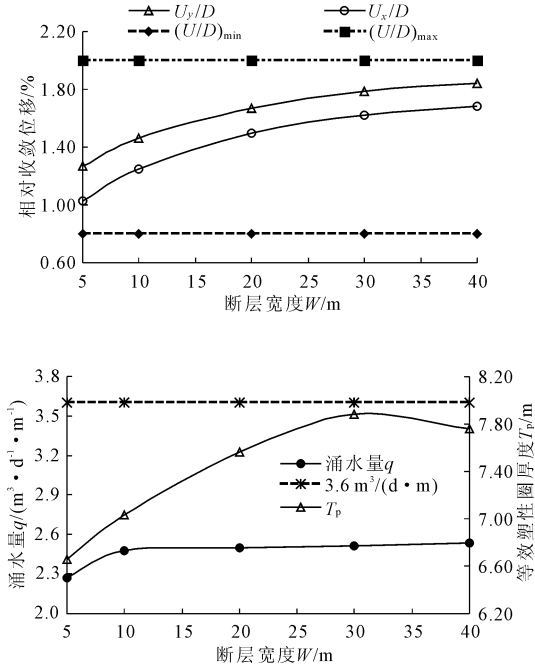


图 6 U_y/D 、 U_x/D 、 q 、 T_p 与 W 关系

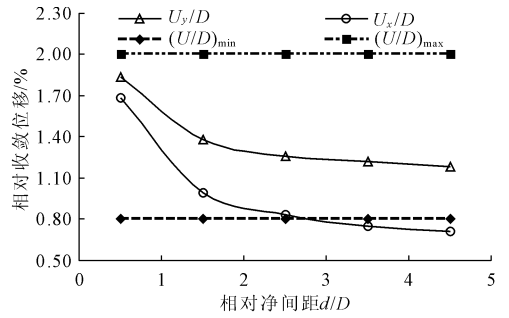
通过上述计算可知:随着断层宽度 W 的增大,围岩的相对收敛变形 U_y/D 、 U_x/D 呈缓慢增大趋势后区域平缓;围岩塑性圈的等效厚度 T_p 呈线性增大趋势;隧道单宽涌水量 q 先增加后趋于平稳。可见,临近隧道的断层在一定宽度范围内 ($W \leq 3D$) 会对隧道的涌水及稳定性会产生显著的影响,超过此范围将对隧道施工期安全影响不大。

2.4.5 相对间距 d/D 对围岩稳定性及突水影响

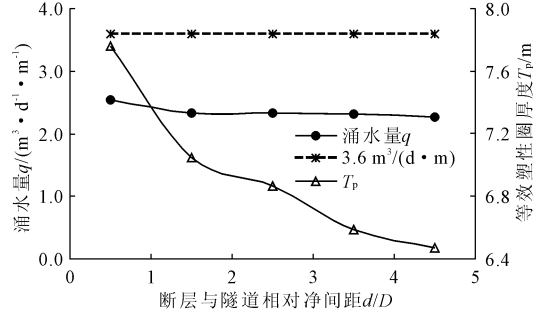
图 7 为断层不同相对间距 d/D 情况下,围岩的相对收敛变形 U_y/D 、 U_x/D ,单位涌水量 q 及等效塑性区厚度 T_p 的变化规律。

通过上述计算可知:当断层相对间距 $0.5 < d/D < 1.5$ 时, U_y/D 、 U_x/D 迅速减小, $1.5 < d/D < 4.5$, U_y/D 、 U_x/D 缓慢减小并趋于稳定;围岩塑性圈的等效厚度 T_p 呈减小趋势,表明:断层越接近隧道,塑性区扩展深度会明显增大,围岩的稳定性将变差; q 呈陡降后缓慢减小趋势。其主要原因是,随着断层破碎带相对间距 d/D 增大时,表明断层软弱带远离隧道影响区,隧道周围地层岩性相对由差变强,自承能力提高,隔水效果变强,涌水量逐渐减小,隧道的收敛变形及塑性区也逐渐减小,围岩更趋于稳定,因此,隧洞在选线期间应注意洞线与断层之间的距离,

尽量避免断层走向与隧洞轴线方向一致。



(a) 相对收敛位移变化趋势

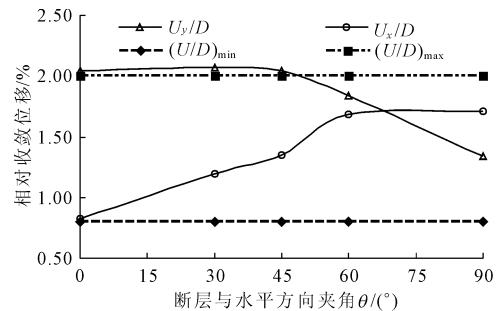


(b) 等效塑性圈厚度及涌水量变化趋势

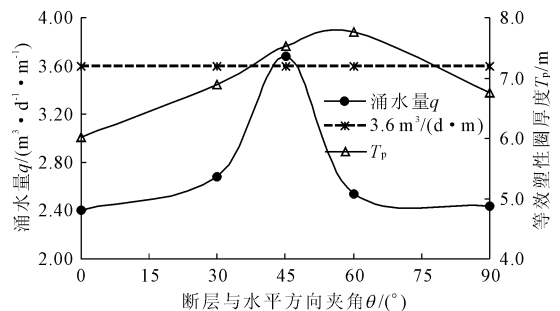
图 7 U_y/D 、 U_x/D 、 q 、 T_p 与 d/D 关系

2.4.6 夹角 θ 对围岩稳定性及突水影响

图 8 为断层夹角 θ 不同情况下,围岩的相对收敛变形 U_y/D 、 U_x/D ,单位涌水量 q 及等效塑性区厚度 T_p 的变化规律。



(a) 相对收敛位移变化趋势



(b) 等效塑性圈厚度及涌水量变化趋势

图 8 U_y/D 、 U_x/D 、 q 、 T_p 与 θ 关系

通过上述计算可知:随着断层与水平方向夹角

θ 的增大, U_y/D 呈缓慢减小趋势、 U_x/D 呈缓慢增大趋势, 当 $\theta < 45^\circ$ 时, $U_y/D = 2.07\% > (U/D)_{\max} = [2.0\%]$, 围岩变形大于许可值; 当 $\theta > 45^\circ$ 时, $U_y/D = 1.34\% < (U/D)_{\max} = [2.0\%]$; T_p 随 θ 的增大也呈上凸的抛物线型, 当 $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 时, $6.0 \text{ m} \leq T_p \leq 7.7 \text{ m}$, 当 $60^\circ < \theta \leq 90^\circ$ 时, $6.7 \text{ m} \leq T_p \leq 7.7 \text{ m}$, 表明随着 θ 的增大, 塑性区扩展深度会存在一个峰值, 当 θ 接近 45° 时, 洞周围岩最容易发生破坏, 塑性区达到最大, 且单位涌水量 q 也达到峰值 $q = 3.7 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 。表明: 在 θ 接近 45° 时, 隧道与断层破碎带之间最容易形成裂隙贯通渠道, 隧道发生失稳和涌水概率最大, 其主要原因是, 断层的走向与隧道的轴线夹角越接近 $45^\circ \sim 60^\circ$, 隧洞围岩沿着断层发生剪切滑移破坏的可能性越大, 隧洞发生涌水和失稳的趋势越明显。

2.4.7 侧压力系数 K_0 对围岩稳定性及突水影响

图 9 为不同侧压力系数 K_0 情况下, 围岩的相对收敛变形 U_y/D 、 U_x/D , 单位涌水量 q 及等效塑性区厚度 T_p 的变化规律。

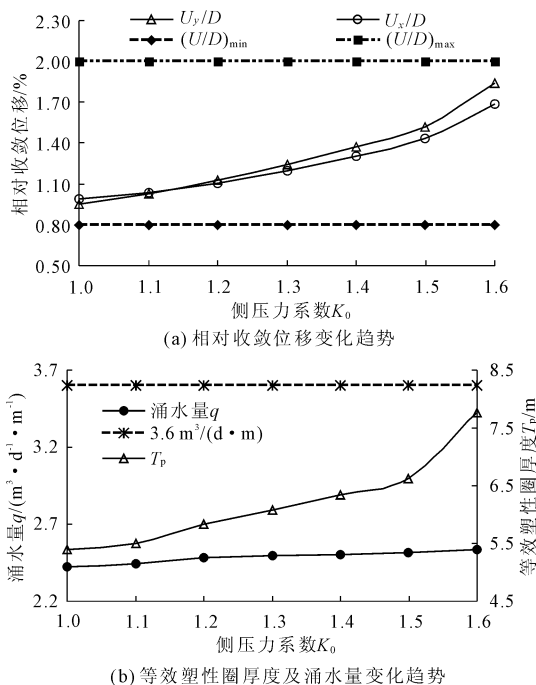


图 9 U_y/D 、 U_x/D 、 q 、 T_p 与 K_0 关系

通过上述计算可知:

随着侧压力系数 K_0 的增大, U_y/D 、 U_x/D 均呈线性增大, 当 $K_0 = 1.0 \sim 1.6$ 时, $U_x/D = 0.95\% \sim 1.84\% < (U/D)_{\max} = [2.0\%]$, 围岩变形低于许可值。

围岩塑性区的等效厚度 T_p 呈非线性增大趋势,

表明洞周围岩的应力集中现象增强, 塑性区扩展深度增大。

洞周单位宽度涌水量 q 呈线性增大趋势, 表明隧道围岩侧压力系数的增大一定程度上不利于隧道的稳定性, 且有涌水隐患。其主要原因是: 侧压力系数直接反映了初始应力场的大小, 侧压力系数越大反映了围岩处于高地应力的不利状态越显著, 对围岩的稳定性影响越剧烈, 随着高地应力场的出现, 隧道围岩可能会发生岩爆现象, 此时地下水将难以在高地应力状态下发生渗流现象, 涌水与岩爆往往不可能在同一种地质灾害环境中发生, 因而侧压力系数的增大对隧道涌水量几乎无影响。在实际工程中, 选线期间尽量避开这类不良地质条件。

2.5 敏感性分析

为了对比分析不同影响因素对围岩稳定性及涌水量的影响程度, 采用敏感度系数 Q 定量描述各影响因素对隧道相对收敛位移 U 、塑性圈等效厚度 T_p 、单宽涌水量 q 的影响^[15]。其中:

$$Q_U = \frac{\Delta(U/D)/(U/D)}{\Delta x/x} \quad (3)$$

$$Q_T = \frac{\Delta T_p/T_p}{\Delta x/x} \quad (4)$$

$$Q_q = \frac{\Delta q/q}{\Delta x/x} \quad (5)$$

式中: $\Delta U/U$ 为隧道相对收敛位移变化率; $\Delta T_p/T_p$ 为隧道塑性圈等效厚度变化率; $\Delta q/q$ 为隧道单宽涌水量变化率; $\Delta x/x$ 为影响因素的变化率; $Q > 0$ 表示隧道变化量与影响因素变化趋势相同, $Q < 0$ 表示隧道变化量与影响因素变化趋势相反。根据式(3)~式(5) 计算得到各敏感度系数见表 5。

为了分析各影响因素对围岩稳定性及突水的影响程度, 将隧道位移、塑性圈厚度、涌水量对应的敏感度指标 Q 来综合分析各因素的敏感程度:

$$Q = \frac{1}{3} \sum (|Q_U| + |Q_T| + |Q_q|) \quad (6)$$

根据式(6) 计算得到上述不同影响因素下, 围岩稳定性及涌水量对其综合敏感程度, 并对其进行排序见图 10。

由表 5 和图 10 可见: 富水断层条件下隧道开挖施工期间, 围岩级别 S 对隧道变形、塑性区、涌水量影响最大, 其次为侧压力系数 K_0 , 再次为断层与隧道相对间距 d/D 和断层宽度 W ; 不敏感的影响因素为: 隧道埋深 H 、地下水位高度 h 及断层与水平面夹角 θ 。由此可见: 对于受近距离、大倾角断层和受高

地应力影响的围岩条件较差的隧道,其整体稳定性与涌水灾害较为明显,应采取合适的排水和围岩加固措施,适当降低水头压力的同时,改善围岩条件,

提高围岩的自稳能力,才能降低涌水灾害和围岩大变形效应。

表5 敏感度系数

| 参数 | H | h | S | | W | d/D | θ | | K_0 |
|-------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|-------------------------|--------------------------|-------|
| | | | 无断层 | 有断层 | | | $0^\circ \sim 45^\circ$ | $45^\circ \sim 90^\circ$ | |
| Q_U | 0.003 | 0.004 | 3.148 | 8.671 | 0.016 | -0.164 | 0.000 | -0.016 | 1.487 |
| Q_T | -0.029 | 0.008 | 6.635 | 10.400 | 0.026 | -0.263 | 0.027 | -0.014 | 3.083 |
| Q_q | -0.001 | 0.025 | 8.430 | 11.705 | 0.008 | -0.068 | 0.028 | -0.028 | 0.183 |

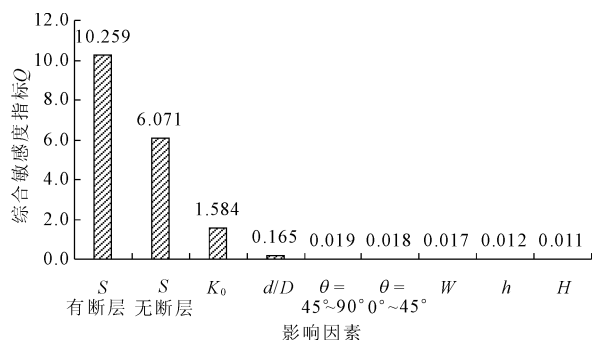


图10 综合性敏感性指标排序

3 结论

(1) 隧道相对收敛位移随着隧道的埋深 H 、地下水位高度 h 、围岩级别 S 、断层破碎带宽度 W 、侧压力系数 K_0 的增大而增大,随断层相对间距 d/D 的增大而减小,随断层倾角 θ 的增大拱顶位移 U_y 逐渐减小,边墙处水平位移 U_x 逐渐增大。隧道整体稳定性及涌水等级受围岩级别影响最大,其次为侧压力系数,再次为断层相对间距和宽度,而隧道埋深、地下水位高度和断层夹角对隧道整体稳定性及涌水量等级敏感程度相对较低。

(2) 对于受近距离、大倾角断层和高地应力影响的围岩条件较差的隧道,其整体稳定性与涌水灾害较为明显,应采取相应的排水和注浆措施,适当降低水头压力的同时,改善围岩条件,提高围岩的自稳能力,才能降低涌水灾害和围岩大变形效应。

参考文献:

[1] 王媛,金 华,李冬田. 裂隙岩体深埋长隧洞断裂控水模型及突、涌水量多因素综合预测[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(8):1567-1573.

[2] 陈礼彪,刘泉声,张国华,等. 非可溶岩隧道突涌灾害预测研究及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(4):786-796.

[3] 贺振宇,郭佳奇,陈 帆,等. 隧道典型致灾构造及突水模式分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2017,28(2):97-107.

[4] 吴 静. 深埋引水隧洞穿越断层涌水量预测与注浆效果研究[D]. 武汉:中国地质大学,2017.

[5] 李晓昭,黄 震,许振浩,等. 隧道突水突泥致灾构造及其多尺度精细观测技术[J]. 中国公路学报,2018,31(10):79-90.

[6] 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折[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(5):1041-1069.

[7] 任文峰. 高水压隧道应力场-位移场-渗流场耦合理论及注浆防水研究[D]. 长沙:中南大学,2013.

[8] 张志成,卢 浩,李 集,等. 一种深长隧道涌突水灾害危险性评价模型及其应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2015,26(4):67-74.

[9] 蔡俊华. 基于破碎带涌水预测的山岭隧道施工许可机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(4):964-976.

[10] 成 帅,李术才,李利平,等. 基于多元监测信息融合分析的突水灾害状态判识方法[J]. 岩土力学,2018,39(7):2509-2517.

[11] 庞小冲,王永刚,唐学军. 帷幕注浆在阿尔金山隧道突泥涌水处治中的实践与思考[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(6):186-192.

[12] 朱明俊,饶平平. 考虑渗流影响的隧道开挖支护力分析[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(3):137-143.

[13] 关振长,任璐璐,何亚军,等. 山岭隧道渗流及衬砌等效渗透系数的实用计算[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(6):52-56.

[14] 公路隧道设计规范 第一册 土建工程:JTG 3370.1—2018[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.

[15] Zhu C H, Li N. Ranking of influence factors and control technologies for the post-construction settlement of loess high-filling embankments [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 118:103320.