

文章编号:1671-8879(2017)05-0073-08

富水断层隧道涌水特征试验

吴昊¹, 杨晓华¹, 陈星宇^{1,2}

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 云南省交通规划设计研究院, 云南 昆明 650011)

摘要:为探究隧道穿越富水断层破碎带过程中各工况下掌子面安全厚度、涌水量以及水压力的变化特征,以模型试验和数值模拟为主要手段,研究隧道在无地表水补给无注浆、有地表水补给无注浆、有地表水补给有注浆这 3 种工况下各测量值的变化规律。模型试验以实际工况为基础,设计 1 个尺寸相似比为 1:80 的模型试验系统,其包括渗流系统、控水系统、测量系统和注浆系统 4 个部分,采用量纲分析法确定各物理力学参数的相似关系,模拟在重力场作用下隧道的涌水特征;数值模拟分析域在 X(横向)、Y(竖向)和 Z(纵向)方向上的长度分别为 240、48、160 m,隧道埋深约为 80 m,普通围岩为 V 级,断层破碎带为 VI 级。研究表明:地表水补给可显著增加隧道涌水的可能性,模型试验中,有地表水补给较无地表水补给隧道涌水量增加了 128.6%,掌子面安全厚度增加了 6 倍;采用预注水泥浆的方法可在一定范围内改善施工过程中的涌水情况,但不能将涌水量降到正常范围内,还应采取其他必要措施;围岩中的孔隙水压力呈现出以隧道为轴心的降落漏斗分布,涌水量和水压力值突变点即为掌子面临界安全厚度,为保证施工安全,建议无地表水补给无注浆时掌子面安全厚度取 0.8~1.6 m,有地表水补给无注浆时掌子面安全厚度取 2.4~4.8 m,有地表水补给有注浆时掌子面安全厚度取 1.6~3.2 m。

关键词:隧道工程;模型试验;富水断层;涌水;数值模拟;防突层

中图分类号:U451

文献标志码:A

Model test on water gushing characteristics of tunnel in water-rich fault

WU Hao¹, YANG Xiao-hua¹, CHEN Xing-yu^{1,2}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Broadvision Engineering Consultants, Kunming 650011, Yunnan, China)

Abstract: In order to explore and research the change features of safety thickness of tunnel face, inflow of water and water pressures under various working conditions in the process of tunnel crossing the water-rich fault fracture zone, this paper researched the change law of measured values under three working conditions of no surface water supplying without grouting, surface water supplying without grouting and surface water supplying with grouting by means of model test and numerical simulation. A model test system was designed in the model test with a size similarity ratio of 1:80 on the basis of actual working conditions, including seepage system, water control system, measurement system and grouting system. The similarity relation of each physical and mechanical parameter was determined by the dimensional analysis method, and water

收稿日期:2017-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51378071);广西壮族自治区科技攻关项目(桂科攻 10124006-10)

作者简介:吴昊(1984-),男,广东大埔人,工程师,工学博士研究生,E-mail:13926621@qq.com。

通讯作者:杨晓华(1961-),男,河北唐山人,教授,博士研究生导师,E-mail:xiaohuay@126.com。

gushing characteristics of the tunnel under the action of gravity field; length of the numerical simulation area were 240, 48 and 160 m in the X , Y and Z directions, respectively. The tunnel depth was about 80 m, the ordinary rock was V grade and the fault fracture zone was VI grade. The results show that surface water supply can significantly increase the possibility of tunnel water gushing. In the model test, tunnel water inflow with surface water supply increases by 128.6% compared to that without surface water supply, and the safety thickness of tunnel face increases by 6 times. The pre-filled slurry method can improve the water gushing situation during the construction process in a certain range, while the water inflow cannot be reduced to a normal range, so other necessary measures should be taken. The pore water pressure in the surrounding rock displays a cone of depression distribution with tunnel as the axis. Water inflow and catastrophe point of water pressure value are the critical safety thickness of tunnel face. To ensure the construction safety, the safety thickness of tunnel face is recommended to be 0.8 to 1.6 m for no surface water supply without grouting, 2.4 to 4.8 m for surface water supply without grouting and 1.6 to 3.2 m for surface water supply with grouting. 7 tabs, 10 figs, 18 refs.

Key words: tunnel engineering; model test; water-rich fault; water gushing; numerical simulation; anti-burst layer

0 引言

涌水是隧道穿越富水断层破碎带过程中常见且危害较大的地质灾害。若在施工时发生涌水,不仅影响作业环境,也会危及掌子面稳定性,降低初期支护的施工质量。特别是在高压涌水的情况下,常酿成重大安全事故^[1-4]。注浆具有防渗、堵水和固结等作用,常用于预防和治理隧道涌水^[5-7]。注浆浆液由主剂、溶剂及外加剂混合而成,分溶液型和悬浊型2类。水泥类浆液属悬浊型,具有成本低、结石抗压强度高优点,常用于填充裂隙和孔隙。然而注浆工程的复杂性和隐蔽性给注浆加固、堵水及扩散研究带来了极大的困难^[8-9]。模型试验不受简化假定的影响,更能真实地反映研究对象的各种规律及特征。中国已有众多学者开展了注浆模型试验研究:张伟杰等利用注浆模型试验开展了富水破碎岩体多孔分序帷幕注浆试验^[10];杨坪等基于注浆模型试验,研究了注浆压力、水灰比等因素对砂卵(砾)石层注浆效果的影响^[11];张庆松等依据注浆模型试验探索了隧道断层泥注浆加固机制^[12];Swedenborg等研究了注浆前后硬岩节理裂隙的力学特征^[13];Gothall等通过模型试验研究了浆液对裂隙变形的影响^[14]。对于隧道渗流场研究:周毅等以地质力学试验技术为基础,开展大比尺流-固耦合模型试验研究,再现了工程中的突涌水特征^[15];谭忠盛等利用室内模型试验研究了水下隧道的渗流场,得出隧道在不同排水方式下的水压力分布规律^[16];杜朝伟等以复变函

数和地下水的水力学理论为基础,推导出渗流场的解析解^[17]。目前,在注浆模型试验方面,已取得较为丰硕的成果,然而当前的注浆模型试验多集中于围岩加固、衬砌结构和掌子面稳定性等方面,对于隧道穿越富水断层破碎带时,开挖过程中涌水特征的模型试验研究较少。

鉴于此,本文以岑溪大隧道工程为基础,根据相似理论,采用相似材料将原型按一定比例缩小为模型,通过观测模型在无地表水补给无注浆、有地表水补给无注浆、有地表水补给有注浆这3种工况下,隧道穿越富水断层破碎带时的水压力及涌水特征,分析推测隧道原型的情况。同时,采用MIDAS/GTS对隧道涌水特征进行数值模拟,对比分析模型试验和数值模拟结果,以进行相互验证。

1 工程概况

岑溪大隧道位于广西东南部,从岑溪市岑城镇钓石村、山心村、岭脚村和大隆镇均昌村下穿过,其右线设计高程317.03~303.84 m,最大埋深约450 m,全长4 288 m。隧址区地形起伏较大,径流途径短,水力坡度大,非常利于四周地表水向低洼区域汇集。又由于受断层破碎带影响,隧道局部区域岩性以全-强风化混合岩为主,岩体极破碎,节理、裂隙发育,为地表水和地下水提供了良好的储水构造和导水通道(下页图1)。该区域内气候温湿多雨,年平均降雨量为1 400~1 600 mm,大气降水具有季节性,长期而大量的大气降水直接渗入补给潜水,

同时也可在含水层直接出露地区对承压水进行补给,由此提供了极为充足的补给水源。

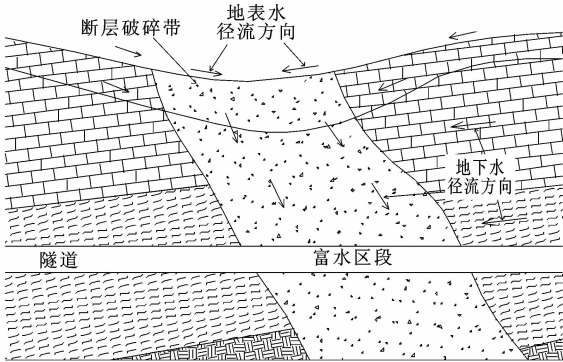


图 1 隧道右线涌水段地层渗透性示意

Fig. 1 Schematic of formation permeability in gushing water section of right line tunnel

隧道在掘进过程中,因开挖卸荷出现临空面,使得原地下水的渗流场发生变化,同时也导致一定范围的围岩受到扰动,尤其当隧道开挖逐渐接近储水构造时,长期积蓄的能量极易在瞬间释放,形成涌水事故^[18]。鉴于以上原因,右线隧道掘进过程中曾于同年 7、12 月份发生过涌水事故,最大涌水量分别达 1 200、600 m³/h。涌水直接导致隧道内初期支护严重变形及较大范围的地表沉降、开裂,地表水塘、溪流、水井等出现水位下降、断流甚至干涸。

为保证隧道顺利穿越富水断层,指导实际施工,开展了以隧址区富水断层为原型的模型试验研究,探索隧道掘进过程中 3 种工况下的渗流场情况,并结合数值模拟验证本文模型试验结果。

2 隧道涌水模型试验设计

2.1 注浆试验系统设计

隧道涌水模型试验系统包括渗流系统、控水系统、测量系统和注浆系统 4 个部分,主要仪器及设备如图 2 所示。渗流系统由尺寸为 3.2 m(长)×0.62 m(宽)×2.0 m(高)的模型试验箱及浇筑好的隧道衬砌模型组成。控水系统是在模型箱内用防水塑料布营造一个四周与底面皆封闭的空间,利用 PVC 材料制作圆柱形蓄水池,该蓄水池上下底面均不封闭,将其埋入砂层(即模拟断层破碎带)中,用该蓄水池蓄水,以此作为注水通道及模拟地表水对地下水的补给。以 U 形压力计、0~1 000 mL 量筒、秒表等仪器来实现对试验数据的实时监测,采用 SB-2.5 手动压力泵及花管进行预注浆。

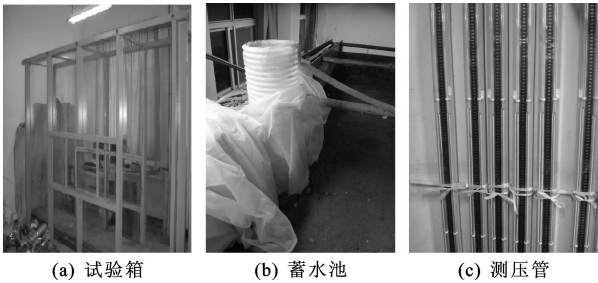


图 2 试验仪器和设备

Fig. 2 Test instrument and equipment

2.2 相似常数的确定

本次模型试验采用量纲分析法来确定其物理力学参数的相似关系。该模型为应力场及渗流场共同作用下的双场耦合模型。

应力场中所需的物理量有几何尺寸 l 、重度 γ 、应力 σ 、应变 ϵ 、泊松比 μ 、弹性模量 E ,于是有方程

$$f(l, \gamma, \sigma, \epsilon, \mu, E) = 0 \quad (1)$$

流场中所需的物理量有几何尺寸 l 、重度 γ 、渗透系数 k 、流速 v 、渗流量 Q ,于是有方程

$$f(l, \gamma, k, v, Q) = 0 \quad (2)$$

根据量纲分析法,取几何尺寸、重度、渗透系数为基本物理量,推导出各物理力学参数的相似常数,其中重度、渗透系数、流速、泊松比的相似常数为 1,几何尺寸、时间、应力、弹性模量、水头高度、水压力的相似常数为 80,渗流量的相似常数为 6 400。

2.3 相似材料

该模型试验依托广西岑溪大隧道断层破碎带原型制备试验材料。依据实例原型,普通围岩为 V 级,断层破碎带为 VI 级,普通围岩及断层破碎带主要物理力学参数如表 1 所示。

表 1 围岩及断层破碎带原型的物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of prototypical surrounding rock and fault fracture zone

围岩	重度/ (kN · m ⁻³)	渗透系数/ (m · d ⁻¹)	弹性模量/ GPa	泊松比
普通围岩	18.8	1	1.0~2.0	0.35~0.45
断层破碎带	15.0~17.0	6~8	0.5~1.0	0.40~0.50

本模型试验采用细砂、黏土、凡士林和水的混合物作为普通围岩的相似材料,其质量比 $m_{xs} : m_{nt} : m_{fsl} : m_w = 1 : 3 : 0.001 : 0.45$;采用细砂、凡士林和水的混合物模拟断层破碎带的相似材料,其质量比 $m_{xs} : m_{fsl} : m_w = 1 : 0.001 : 0.08$,凡士林在相似材料中作为黏结材料。模拟普通围岩及断层破碎带的主要物理力学参数见下页表 2。

表 2 模拟普通围岩及断层破碎带相似材料的物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of simulative surrounding rock and fault fracture zone similar materials				
模拟围岩	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	弹性模 量/MPa	含水率(质 量分数)/%
模拟普通围岩	19.5	1.25	34.7	16.41
模拟断层破碎带	16.8	9.40	18.8	

对于本模型试验原型,根据《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)确定衬砌结构的物理力学参数及几何参数。衬砌模型以石膏、水、重晶石粉为原料,其质量比按 $m_{\text{sg}}:m_{\text{w}}:m_{\text{zlf}}=1:1.4:0.1$ 的比例混合而成,衬砌原型和衬砌模型的弹性模量分别为 28、0.35 GPa,泊松比皆为 0.2。模拟衬砌的主要成份是石膏,由于石膏的耐水性差,故用防水胶带纸将其密封,以防止试验过程中遇水软化。

2.4 量测元件布设

本次模型试验布设 1 条走向与隧道轴线方向垂直的断层破碎带,倾角为 80° ,倾向隧道出口方向。同时,在距洞口 50 cm 处,布置 1 个测试断面,如图 3 所示。测压管分别布设在拱顶、拱腰、边墙及仰拱处,因模型结构的对称性只需在衬砌结构的一侧布置即可,测压管的布置位置及实际埋设如图 4、图 5 所示。

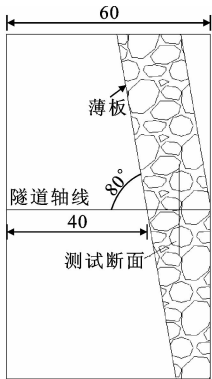


图 3 断层破碎带及测试断面布置

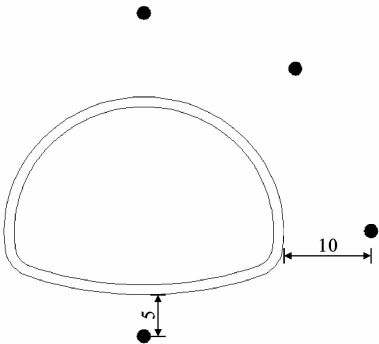
Fig. 3 Fault fracture zone and layout of test section

2.5 注浆量确定

模型试验中所用浆液为纯水泥浆液(水灰比为 0.75:1),以防渗、堵水为主要目的,且是向砂层内注浆,因此基于渗透理论进行注浆设计。对于渗透注浆,有

$$Q=\pi r^2 h n \alpha (1+\beta)$$

式中: Q 为注浆量(cm^3); r 为渗透半径(cm); h 为注浆厚度(cm); n 为土体孔隙率; α 为有效注浆系数; $1+\beta$ 为注浆损失系数。



单位: cm

图 4 测压管布置示意

Fig. 4 Sketch of layout of piezometric tube



图 5 测压管埋设

Fig. 5 Piezometer pipe burial

式(3)中各参数取值参考《岩土注浆理论与工程实例》,结果见表 3。

表 3 注浆量计算参数

Tab. 3 Calculation parameters of grouting

参数	渗透半 径/cm	注浆厚 度/cm	土体孔 隙率	有效注 浆数	注浆损 失系数
取值	15	10	0.42	0.9	1.5

将参数值代入式(3),计算得到试验注浆量为 $4\,005.855\text{ cm}^3$,约为 4 L。为便于试验操作,模拟注浆过程采用 SB-2.5 手动压力泵及花管,从地表插入到模拟断层破碎带中进行预注浆,压力泵每次压入 35 mL。根据注浆经验,最大注浆压力一般取 1~2 倍的上覆土层压力和上部结构载荷之和。试验中上覆土层压力为 18.8 kPa,因此本文以最大注浆压力 37.6 kPa 在隧道附近的断层破碎带中均匀压入 115 次。

2.6 试验实施

为使断层破碎带和围岩的填筑效果满足要求,在两者之间设置 1 块大小合适的薄板,倾角、倾向如图 3 所示,采用分层堆填、分层压实的方式,向模型试验箱内填筑围岩材料,以保证围岩的物理力学参数符合设计值;同时,将已制作好的隧道衬砌模型预

埋入土中,埋深 1 m,并根据测试元件布置埋设 U 形测压管,填筑完成后抽取薄板。试验中的测量数据为隧道开挖过程的涌水量及水压力值,为简化试验过程,采用台阶法开挖,每循环开挖步长为 1 cm,相当于实际开挖 0.8 m,每循环所需时间为 1 h。每循环开挖结束后,使用 U 形压力计、量筒、秒表等仪器测量水压力值和涌水量。

根据模型试验方案,向断层破碎带内注水,静置 12 h 后,开始模拟隧道开挖,3 种工况分别为:无地表水补给无注浆(工况 I);有地表水补给无注浆(工况 II);有地表水补给有注浆(工况 III)。

3 模型试验结果分析

按照事先设计好的试验方案对隧道进行开挖,每循环开挖 1 cm,用时 1 h,直至掌子面发生破坏,即隧道产生大量涌水(图 6)。



图 6 隧道涌水
Fig. 6 Tunnel gushing

3.1 隧道涌水量

图 7 为 3 种工况下,模拟隧道穿越断层破碎带过程中的涌水量随开挖进程的变化曲线。

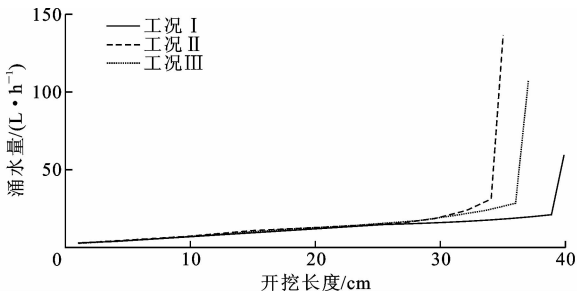


图 7 三种工况下隧道开挖中涌水量变化曲线(试验结果)
Fig. 7 Change curves of water inflow of tunneling under three different conditions (test results)

由图 7 可知,随着隧道开挖的进行,3 种工况下隧道初期涌水量均呈现出缓慢、稳定的上升趋势。工况 II 隧道开挖至第 35 个循环(距断层破碎带 5 cm)时,隧道涌水量出现较大突变,从之前的掌子面渗水变为掌子面涌水,且涌水中夹带有部分细砂;

相较于工况 II,工况 I 开挖至第 40 个循环,即隧道与富水断层破碎带完全贯通时,才发生隧道涌水;而工况 III 隧道开挖至第 37 个循环(距断层破碎带 3 cm)后发生涌水,涌水量及含砂量均比工况 II 小。

根据涌水量相似常数($C_Q=6\ 400$),换算出 3 种工况下实际隧道开挖过程中的涌水量,并与现场实测最大涌水量作对比,具体数值见表 4。

表 4 三种工况下的最大涌水量
Tab. 4 Maximum water inflow under three different conditions

		m ³ /h		
工况	工况 I	工况 II	工况 III	
试验(换算后)最大涌水量	394.75	902.40	691.20	
现场实测最大涌水量	600.00	1 200.00	850.00	

从表 4 可知:工况 II 的试验(换算后)最大涌水量较工况 I 增加了约 1.28 倍;工况 III 较工况 II 降低了 23.4%,但与工况 I 相比仍增加了 75%。由此可知,采用预注纯水泥浆液的方式,在一定范围内有效地改善了隧道施工过程中的涌水情况,降低了隧道的最大涌水量,但不能将隧道涌水量降到正常范围内。较实际最大涌水量,试验(换算后)最大涌水量均有所下降,平均降低了 25.8%。

3.2 水压力

3 种工况下,隧道开挖过程中各测点水压力值变化情况见下页图 8。

由图 8 可知,工况 I 隧道开挖过程中掌子面不断有水渗出,水头高度也相应降低,各测点水压力随之减小,整个开挖过程就是一个能量平缓释放的过程。工况 II 和工况 III 由于地表水的不断补给,隧道开挖并未使地下水水头高度降低,由水头高度产生的势能也无法缓慢释放,当掌子面前方岩体不足以抵抗地下水压力时,将会出现能量的突然释放,即发生涌水。各工况下水压力曲线突变点与涌水量曲线突变点相对应,进一步说明预注浆可在一定范围内起到防渗加固作用,但当掌子面前方岩体不足以抵抗水压力时,仍会发生隧道涌水。

3.3 掌子面防突层安全厚度

掌子面防突层厚度是指隧道在富水地段开挖时,掌子面与富水结构之间的围岩厚度。地处富水断层破碎带的隧道,在开挖掘进过程中,掌子面防突层厚度逐渐减小,当防突层厚度不足以抵挡掌子面前方的水压力时,掌子面前方围岩被破坏并伴随着大量涌水,即发生涌水事故。隧道恰好发生涌水时的防突层厚度即为防突层临界安全厚度,图 7 中涌水量突变点和图 8 中的水压力突变点就是隧道在模

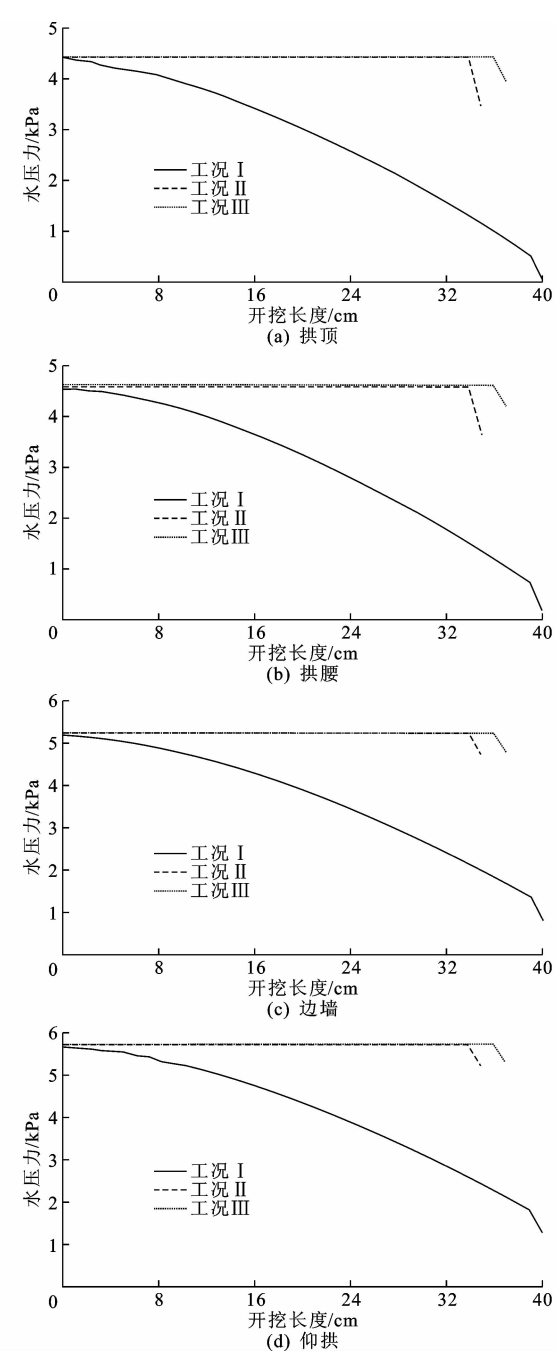


图 8 三种工况下隧道开挖中各测点水压力变化曲线
Fig. 8 Change curves of water pressure of measuring points of tunnel under three different conditions

拟开挖过程中达到了掌子面防突层安全厚度的临界值。

分析图 7、图 8 可知,工况 I、II、III 涌水量和水压力发生突变时,隧道模拟开挖分别进行了 40、35、37 cm,即此时掌子面前方的防突层厚度分别是 1、6、4 cm,根据相似常数将其转化为实际开挖过程中的防突层厚度分别是 0.8、4.8、3.2 m,如表 5 所示。

由表 5 可见,无注浆条件下,有地表水补给的掌子面防突层临界安全厚度是无地表水补给时的

表 5 三种工况下防突层临界安全厚度
Tab. 5 Critical safety thicknesses of against-inrush rock under three different conditions

临界安全厚度	工况 I	工况 II	工况 III
模拟开挖	0.01	0.06	0.04
实际开挖	0.80	4.80	3.20

6 倍。由此可知,地表水的补给不仅增大了隧道开挖过程中的涌水量,还极大地增加了隧道开挖过程中所需的防突层安全厚度,即显著增加了安全隐患。当都有地表水补给时,有注浆的隧道防突层临界安全厚度较无注浆时降低了 33.3%,这说明向富水断层破碎带中注射水泥浆液可减小防突层临界安全厚度,降低隧道开挖过程中涌水的可能性,然而降低的幅度还不足以保证隧道安全通过富水断层破碎带,还需辅以其他必要的安全措施。

4 隧道涌水数值模拟

数值模拟采用 MIDAS/GTS 有限元分析软件,以达西定律为控制方程,模拟隧道在 3 种工况下穿越断层破碎带时的渗流场及涌水特征,并将其结果与模型试验结果进行对比分析。

4.1 模型选取

为使数值模拟结果与模型试验结果具有可比性,参照模型试验箱尺寸及隧道开挖影响范围,确定数值模拟分析域在 X(横向)、Y(竖向)和 Z(纵向)方向上的长度分别为 240、48、160 m,隧道埋深约为 80 m,普通围岩为 V 级,断层破碎带围岩为 VI 级,注浆半径为 10 m。

4.2 材料参数选取

模型中各材料的物理力学参数参照《工程地质手册》、《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)及实际隧道勘察资料选取,见表 6、表 7。

表 6 材料的物理参数

材料类型	渗透系数/ (m · s ⁻¹)	天然重度/ (kN · m ⁻³)	饱和重度/ (kN · m ⁻³)
断层破碎带	8.00 × 10 ⁻³	15.5	16.3
风化岩	1.74 × 10 ⁻⁵	17.5	18.8
注浆圈	6.32 × 10 ⁻⁴	18.7	19.3

表 7 材料的力学参数

材料类型	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
断层破碎带	900	0.45	15	31.0
风化岩	1 504	0.40	86	21.7
注浆圈	1 900	0.33	200	27.0

4.3 数值模拟分析过程

- (1)定义各材料属性,包括断层破碎带、风化岩和注浆圈的材料属性。
- (2)确定模型几何尺寸,利用几何工具进行建模,并对模型进行网格划分。
- (3)定义节点水头边界,在模型的左右边界施加节点水头,上边界为自由水头边界;同时,在隧道开挖的每一循环断面(掌子面)处设置渗流边界。
- (4)定义施工阶段,通过“激活”和“钝化”功能模拟隧道的开挖及渗流过程。
- (5)根据分析要求定义工况。

4.4 数值模拟结果

4.4.1 孔隙水压力

图 9 为隧道开挖前后孔隙水压力等值线。从图 9 可知:隧道开挖前,围岩内各点的孔隙水压力与该点的埋深成正比,孔隙水压力成层分布;隧道开挖后,孔隙水压力则是以隧道为轴心的降落漏斗分布。这是因为在隧道开挖过程中,由于地下水不断向隧道开挖临空面渗流,造成了开挖临空面附近孔隙水压力的减小。

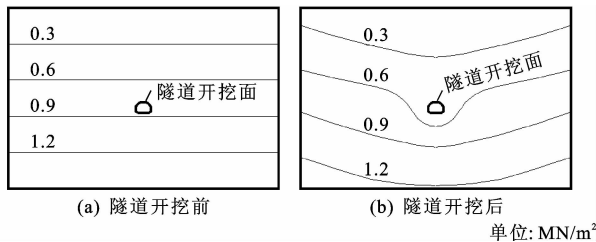


图 9 隧道开挖前后孔隙水压力等值线

Fig. 9 Pore water pressure contours before and after tunneling

4.4.2 隧道涌水量及掌子面防突层安全厚度

掌子面发生破坏时(涌水量突变点),防突层厚度已小于临界安全厚度。图 10 为数值模拟得到的 3 种工况下隧道涌水量变化曲线。

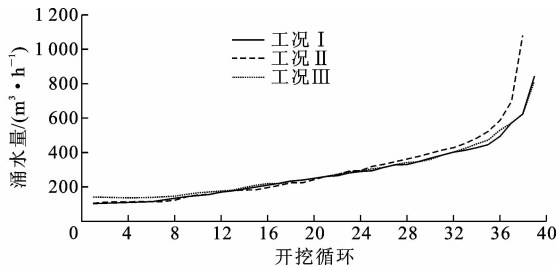


图 10 三种工况下隧道开挖中涌水量变化曲线(模拟结果)

Fig. 10 Change curves of water inflow under three different conditions during tunneling (simulated results)

从图 10 可以看出,隧道涌水量的变化趋势与模型试验中的趋势基本一致,但是最后的突变点及涌

水量不同,数值模拟中工况 I、Ⅲ在隧道第 39 个循环时涌水量突然增大,其最大涌水量分别为 839.2、802.9 m³/h;工况Ⅱ在隧道开挖至第 38 个循环时涌水量突然增大,最大涌水量达到 1 076.7 m³/h。结合涌水量突变点可知,工况 I、Ⅱ、Ⅲ对应的防突层临界安全厚度分别为 1.6、2.4、1.6 m。

结合模型试验和数值模拟结果,建议无地表水补给无注浆时掌子面安全厚度取为 0.8~1.6 m,有地表水补给无注浆时掌子面安全厚度取为 2.4~4.8 m,有地表水补给有注浆时掌子面安全厚度取为 1.6~3.2 m。

5 结 语

(1)地表水补给是隧道涌水事故发生的主要诱因之一,有地表水补给时,仅采用预注水泥浆的方法可在一定范围内改善施工过程的涌水情况,但不能将涌水量降到正常范围内,还应采取其他必要措施。

(2)隧道在富水断层破碎带掘进过程中,围岩中的孔隙水压力呈现出以隧道为轴心的降落漏斗分布,为保证施工安全,建议无地表水补给无注浆时掌子面安全厚度取 0.8~1.6 m,有地表水补给无注浆时掌子面安全厚度取 2.4~4.8 m,有地表水补给有注浆时掌子面安全厚度取 1.6~3.2 m。

(3)后续研究可增加不同断层破碎带厚度、倾向、倾角和走向对富水断层隧道涌水量及掌子面安全厚度的影响。

参考文献:

References:

[1] 刘泉声,卢超波,卢海峰,等. 断层破碎带深部区域地表预注浆加固应用与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,32(增 2):3688-3695.
LIU Quan-sheng, LU Chao-bo, LU Hai-feng, et al. Application and analysis of ground surface pre-grouting strengthening deep fault fracture zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(S2):3688-3695.

[2] 李生杰,谢永利,朱小明. 高速公路乌鞘岭隧道穿越 F4 断层破碎带涌水塌方工程对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,32(增 2):3602-3609.
LI Sheng-jie, XIE Yong-li, ZHU Xiao-ming. Research on countermeasure of water gushing with collapse in process of Wushaoling Highway Tunnel crossing F4 fault fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(S2):3602-3609.

- [3] 刘新荣,石建勋,刘元锋,等.隧道水灾害模型试验研究[J].中国公路学报,2013,26(1):121-126.
LIU Xin-rong, SHI Jian-xun, LIU Yuan-feng, et al. Study on tunnel model test of water disasters[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1):121-126.
- [4] 郭佳奇.岩溶隧道突灾厚度及突水机制研究[D].北京:北京交通大学,2011.
GUO Jia-qi. Study on against-inrush thickness and waterburst mechanism of karst tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [5] 崔光耀,赵清,王明年,等.断层破碎带隧道结构二衬防垮塌抗震配筋技术[J].长安大学学报:自然科学版,2015,35(2):107-113.
CUI Guang-yao, ZHAO Qing, WANG Ming-nian, et al. Aseismic reinforcement technology of second liner collapse control of tunnel structure in fault rupture zone[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35(2):107-113.
- [6] NIKBAKHTAN B, OSANLOO M. Effect of grout pressure and grout flow on soil physical and mechanical properties in jet grouting operations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(3):498-505.
- [7] VAROL A, DALGIC S. Grouting applications in the Istanbul metro, Turkey[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(6):602-612.
- [8] 俞文生,李鹏,张霄,等.可变倾角单裂隙动水注浆模型试验研究[J].岩土力学,2014,35(8):2137-2143,2149.
YU Wen-sheng, LI Peng, ZHANG Xiao, et al. Model test research on hydrodynamic grouting for single fracture with variable inclinations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8):2137-2143, 2149.
- [9] 钱七虎.地下工程建设安全面临的挑战与对策[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10):1945-1956.
QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10):1945-1956.
- [10] 张伟杰,李术才,魏久传,等.富水破碎岩体帷幕注浆模型试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(9):1627-1634.
ZHANG Wei-jie, LI Shu-cai, WEI Jiu-chuan, et al. Model tests on curtain grouting in water-rich broken rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9):1627-1634.
- [11] 杨坪,唐益群,彭振斌,等.砂卵(砾)石层中注浆模拟试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(12):2134-2138.
YANG Ping, TANG Yi-qun, PENG Zhen-bin, et al. Study on grouting simulating experiment in sandy gravels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12):2134-2138.
- [12] 张庆松,李鹏,张霄,等.隧道断层泥注浆加固机制模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(5):924-934.
ZHANG Qing-song, LI Peng, ZHANG Xiao, et al. Model test of grouting strengthening mechanism for fault gouge of tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(5):924-934.
- [13] SWEDENBORG S, DAHLSTRÖM L O. Rock mechanics effects of cement grouting in hard rock masses[C]//ASCE. Proceedings of the 3rd International Conference on Grouting and Ground Treatment. Reston: ASCE, 2003:1089-1102.
- [14] GOTHALL R, STILLE H. Fracture-fracture interaction during grouting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(3):199-204.
- [15] 周毅,李术才,李利平,等.地下工程流-固耦合试验新技术及其在充填型岩溶管道突水模型试验中的应用[J].岩土工程学报,2015,37(7):1232-1240.
ZHOU Yi, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. New technology for fluid-solid coupling tests of underground engineering and its application in experimental simulation of water inrush in filled-type karst conduit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7):1232-1240.
- [16] 谭忠盛,李志宏,周振梁,等.临海大断面隧道结构防水系统试验研究[J].中国公路学报,2016,29(12):109-115.
TAN Zhong-sheng, LI Zhi-hong, ZHOU Zhen-liang, et al. Experiment study on waterproofing system of large section near sea tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(12):109-115.
- [17] 杜朝伟,王梦恕,谭忠盛,等.水下隧道渗流场解析解及其应用[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增2):3567-3573.
DU Chao-wei, WANG Meng-shu, TAN Zhong-sheng, et al. Analytic solution for seepage field of subsea tunnel and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2):3567-3573.
- [18] 陈星宇.断层破碎带隧道涌水特征试验研究[D].西安:长安大学,2015.
CHEN Xing-yu. An experimental study of the characteristics of tunnel water burst in fault fracture zone[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.