

文章编号:1673-9469(2023)01-0066-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.01.010

软弱围岩地段断层形态对大断面隧道的稳定性影响分析

王万锋¹,赵凯²,蔡元成²,张文接²,赖金星^{2*}

(1. 中铁建云南投资有限公司,云南昆明 650000;2. 长安大学公路学院,陕西西安 710000)

摘要: 依托三清高速西山营隧道,采用数值模拟与现场监测的方法,探究断层形态对隧道围岩变形及支护结构稳定性的影响,提出最佳加固方案。结果表明:拱顶沉降最大值随着断层厚度的增加呈“对数”曲线增长趋势,随着断层倾角增大呈“抛物线”曲线分布,当断层倾角达到90°时达到最大;最不利断层形态为倾角+厚度(83°+70 m);进而建立优化加固对比数值模型,得到管棚注浆加固能够有效控制围岩变形,抑制塑性区发展。结合实测数据发现模拟值与实测值相差较小,验证数值模拟结果的正确性。

关键词: 隧道工程;断层破碎带;拟合;数值计算;围岩变形

中图分类号: U45

文献标识码: A

Influence of Fault Thickness and Dip Angle on Stability of Large Section Tunnel in Weak Surrounding Rock Section

WANG Wanfeng¹, ZHAO Kai², CAI Yuancheng², ZHANG Wenjie², LAI Jinxing^{2*}

(1. China Railway Construction Yunnan Investment Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710000, China)

Abstract: Relying on Xishanying tunnel of Sanqing expressway, the influence of fault morphology on the deformation of surrounding rock and the stability of supporting structure of the tunnel are explored by using the methods of numerical simulation and field monitoring, and the best reinforcement scheme is put forward. The results show that the maximum value of vault settlement increases in a “logarithmic” curve with the increase of fault thickness. With the increase of fault dip angle, it is distributed in a “parabola” curve, and reaches the maximum when the fault dip angle reaches 90°; and the most unfavorable fault shape is dip angle + thickness (83° + 70 m); Then, the numerical model of optimization reinforcement comparison is established, and it is obtained that the pipe shed grouting reinforcement can effectively control the deformation of surrounding rock and inhibit the development of plastic zone. Combined with the measured data, it is found that the difference between the simulated value and the measured value is small, which verifies the correctness of the numerical simulation results. **Keywords:** Tunnel engineering; Fault fracture zone; Regression analysis; Numerical calculation; Surrounding rock deformation.

Key words: tunnel engineering; fault fracture zone; regression analysis; numerical calculation; surrounding rock deformation

断层破碎带内围岩松散破碎自稳能力较差,隧道在施工中易发生大变形甚至坍塌等工程事故。因此,为避免穿越断层时发生灾害,许多专家

及研究人员对断层区域围岩稳定性和施工控制手段展开了多种研究,获得了众多有价值的研究成果^[1-4]。

收稿日期:2022-09-03

基金项目:中铁建云南投资有限公司2021年度科技研究开发课题(YNTZ-2021-0135);国家自然科学基金资助项目(51978066)

作者简介:王万锋(1973-),男,河北滦南人,硕士,工程师,主要研究方向为隧道工程。

* 通讯作者:赖金星(1973-),男,广东龙川人,博士,教授,研究方向:隧道工程。

目前的研究方法主要集中在理论分析、模型试验、数值模拟等方面。刘国钊^[5]对断层滑动影响下隧道轴向力学响应问题进行了深入的理论研究并得到了相关的解析解,同时,聚焦于地基系数和断裂宽度这两个主要因素展开了相关敏感度分析。孟凡树^[6]以筒仓理论和极限平衡法为理论基础,依次构建了隧道纵轴与掌子面平行和正交的断层破碎带突水力学模型,并以此为基础进一步得出了防突岩盘受力的计算方法。Lin 等^[7]结合隧道应力和位移监测,研究走滑断层和非对称压力的特征。朱麟晨等^[8]通过对祥和隧道进行监控量测,提出多种加固措施,保证平导在软弱破碎围岩区域安全稳步推进。刘学增等^[9]以靖永高速棋盘石隧道为工程依托,设计室内模型试验,研究在逆断层走滑运动条件下,山岭隧道的主要灾变特征。焦鹏飞等^[10]利用 FLAC 3D 数值计算软件,分析地震动荷载作用下逆断层错动对隧道的影响情况。刘凯等^[11]采用数值模拟方法,研究高地应力状态下断层段隧道开挖过程中围岩空间应力场的演化规律和分布态势。

综上所述,目前针对断层区段隧道施工的相关研究已经取得了长足的进展,但是目前研究的着力点多集中在断层处隧道的变形破坏方面,而对断层本身形态的研究较少,尤其是断层倾角和厚度共同作用下对隧道围岩稳定性的影响程度仍需进一步研究。

1 工程概况

西山营隧道是三清高速公路的重难点工程,右线起止里程分别为: BK90+25, BK96+785, 全长 6 760 m; 左线起止里程分别为: BZ89+980, BZ96+840, 全长 6 860 m。目前,已勘测出 9 条对西山营隧道施工影响较大的构造断裂(F1—F5, F7—F10), 断层内岩体分布有许多裂缝,岩体的整体性及稳定性均较差,但受补给影响,隧道涌水量较小。

本项目所处区域,地质环境恶劣,尤其是断裂

十分发育。在隧址区内,隧道与 9 条断层破碎带相交,即 F1—F5, F7—F10, 断层破碎带与隧道前进方向之间的角度介于 73°~102°的范围内,厚度介于 50~70 m 的范围内,各破碎带岩性情况相似:岩体裂隙发育,派生裂缝较多,结构破碎,稳定性差,施工时可能出现坍塌、掉块和大变形,开挖时需及时施做合理的支护结构。地下水以基岩裂隙水为主,水量匮乏。各断层破碎带沿隧道的分布见表 1。

表 1 断层破碎带沿隧道分布情况

Tab. 1 Distribution of fault fracture zone along tunnel

参数	断层								
	F1	F2	F3	F4	F5	F7	F8	F9	F10
倾角 / (°)	80	83	96	102	73	75	75	84	87
厚度 / m	60	70	69	59	50	60	63	50	59

2 模型建立

2.1 隧道断面设计和参数选取

西山营隧道属于深埋特长隧道,根据《公路工程设计规范》、西山营隧道的设计资料和地质勘探资料,结合地质环境、岩体性质以及本隧道开挖方法等,确定岩层及隧道衬砌设计参数。西山营隧道所采用衬砌结构以及在围岩破碎带地段所选用的预支护技术如表 2、表 3 所示^[12]。

研究对象是西山营隧道隧址区内的断层地段,围岩等级为 V 级,该地段岩体内裂缝发育、结构破碎、围岩的稳定性较差,施工时可能出现塌顶和大变形等灾害,施工时应及时做好预加固措施并采取合理的支护体系。地下水主要为基岩裂隙水,水量较小,施工时以点滴状出水,影响较小,在对施工过程进行数值模拟分析时可忽略不计。在断层破碎带地段施工时,施工工法主要采取中隔壁法。本模型所选取的各参数如表 4 所示。

表 2 西山营隧道衬砌结构设计

Tab. 2 Lining structure design of xishanying tunnel

初期支护										二衬
喷射混凝土		系统锚杆			钢筋网		钢架			
设置部位	厚度/cm	设置部位	长度/m	环×纵/m	设置部位	间距/cm	设置部位	材料规格	间距/m	厚度/m
全环	29	拱墙	4.0	10×0.6	拱墙	15×15 双层	全环	122b	0.6	70※

表 3 西山营隧道超前支护设计

Tab. 3 Advanced support design of Xishanying tunnel

类型	材质	管径/mm	长度/m	外插角/(°)	搭接长度/m	环向间距/cm	纵向间距/m
超前单层小导管	无缝热轧钢	42	4.5	3~5	≲1	40	3

表4 模型计算参数表

Tab.4 Model calculation parameters

名称	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 C/MPa	内摩擦角 $\psi/(\text{°})$
V级风化岩	1.3	0.35	17	0.2	27
断层	0.95	0.4	15	0.18	20
二次衬砌	30	0.2	24	—	—
初期支护	30	0.25	24	—	—
钢拱架	210	0.3	78.5	—	—
注浆锚杆	205	0.3	78	—	—
超前小导管	210	0.3	78.5	—	—
注浆加固区	2.5	0.26	21	400	33

表5 模型和单元的选取

Tab.5 Selection of models and units

项目	围岩	二次衬砌	初期支护	中隔壁	锚杆	超前小导管
模型	莫尔-库伦	弹性	弹性	弹性	弹性	弹性
单元	3D实体	3D实体	2D板	2D板	植入式桁架	植入式梁

2.2 模型构建

根据设计和地勘资料,对隧道工程区域进行适当的简化处理,本模型的建模概要如下:洞室周围岩体的变形不考虑受开挖扰动和水文地质的影响,并且认为其为各向同性。将隧道洞室的围岩视为理想的弹塑性介质。隧道模型和单元的选取见表5。

由圣维南原理,隧道洞室的施工对围岩的扰动范围有限,通常由于隧道施工导致洞室周围岩体在各个方向上应力重分布的距离为:洞室直径的3~5倍长度内^[13-14]。因此,计算模型的尺寸选取如下:沿X轴宽度取60m,沿Y轴长度取120m,沿Z轴高度取60m,隧道位于本地质模型中央部位。所研究的穿越断层破碎带的隧道埋深220m左右。将地层模型上表面以上未体现的地层简化为Z轴方向的均布荷载作用在模型的上边界,以减少单元总数,提高计算效率。并且在建模时按照等效原则将钢筋网及钢拱架的弹性模量折算给初期支护。其计算公式如式(1)所示^[15]。计算后初支的弹性模量为33.5GPa,其计算模拟如图1。式中: E 为混凝土计算后弹性模量; E_0 为原混凝土的弹性模量; S_g 为钢拱架的截面积; S_c 为混凝土截面积; E_g 为钢拱架的弹性模量。

$$E = E_0 + \frac{S_g \times E_g}{S_c} \quad (1)$$

2.3 施工步骤

本隧道采用中隔壁法开挖,具体工序如图2所示:①左侧上导坑开挖→②左侧上导坑初期支护及

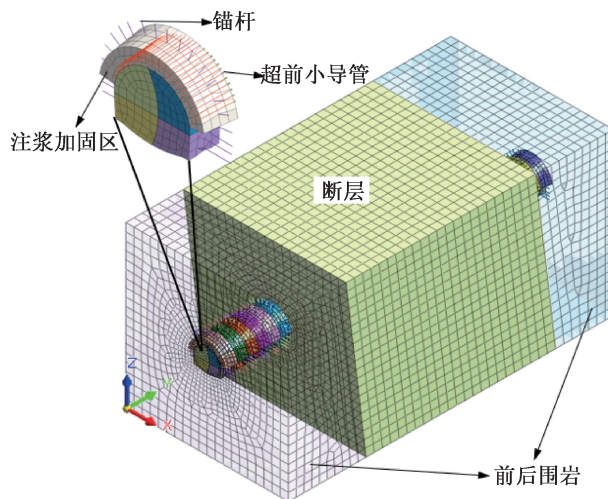


图1 计算模型概况

Fig.1 Overview of calculation model

中隔壁临时支撑施工→③左侧下导坑开挖→④左侧下导坑初期支护及中隔壁临时支撑施工→⑤右侧上导坑开挖→⑥右侧上导坑初期支护施工→⑦右侧下导坑开挖→⑧右侧下导坑初期支护施工→拆除中隔临时支撑→分步施工防排水系统,仰拱、边墙、拱部二次模筑混凝土衬砌。

3 断层形态对隧道围岩稳定性的影响

依据《公路隧道施工技术规范》隧道围岩稳定性的判别方法主要有根据隧道最大位移值来判断;根据隧道位移变化速率来判断;根据隧道位移速率变化趋势来判断。为了方便读取数据采用隧道最大位移来判断围岩稳定性。

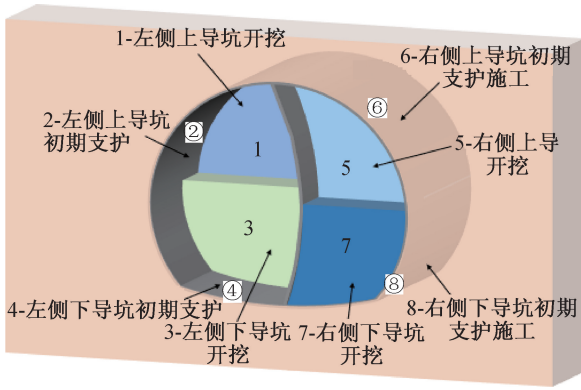


图 2 中隔壁法开挖示意图

Fig. 2 Schematic diagram of middle wall excavation

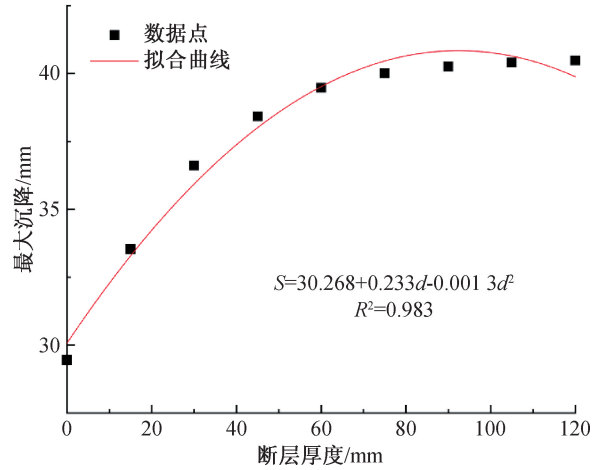


图 4 断层厚度拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of fault thickness

3.1 断层厚度对隧道围岩稳定性的影响

研究断层厚度对隧道围岩稳定性的影响,沿隧道开挖方向断层厚度从 0 m 递增到 120 m,其倾角始终保持 90°不变。模型示意图如图 3 所示。

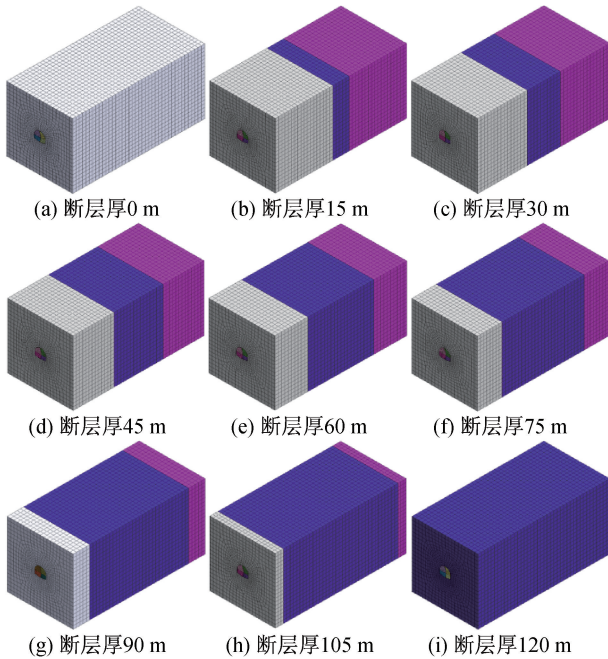


图 3 不同厚度计算模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of different thickness calculation models

参与多项式函数进行拟合,即 $S = 30.268 + 0.233d - 0.0013d^2$ 。散点分布即拟合曲线如图 4 所示。

3.2 断层倾角对隧道围岩稳定性的影响

研究断层倾角对隧道围岩稳定性的影响^[16],沿隧道开挖方向断层倾角从 30°递增到 150°,沿隧道纵向厚度始终保持 60 m 不变。模型示意图如图 5 所示。通过计算得到隧道穿越不同倾角断层产生的最大位移如表 6,根据散点分布形式选择近似

曲线形式如表 7 所示。

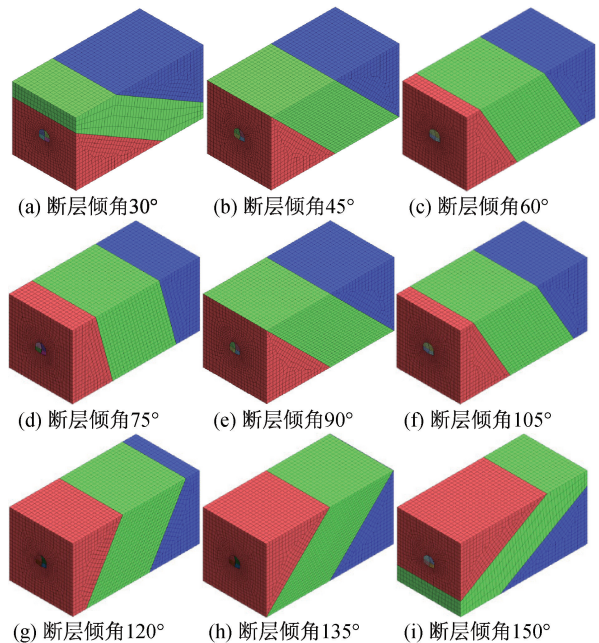


图 5 不同倾角计算模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of different inclination calculation models

表 6 隧道穿越不同倾角断层产生的最大位移

Tab. 6 Maximum displacement caused by tunnel crossing faults with different dip angles

断层倾角/(°)	最大位移/mm
30	37.446 2
45	38.600 8
60	38.993 8
75	39.427 6
90	39.548 0
105	39.432 0
120	38.956 0
135	38.595 8
150	37.330 6

由表 7 可知,最大位移 S 选取的关系曲线相关系数均相同,为了使拟合函数尽可能简化,采用多项式函数作为拟合函数,即 $S = f(a) = 34.916 + 0.104a - 0.00058a^2$ 。散点分布即拟合曲线如图 6 所示。

表 7 断层倾角 a 与最大位移 S 拟合曲线
Tab. 7 Fitting curve between fault dip a and maximum displacement S

序号	函数形式	拟合曲线表达式	相关系数
1	多项式	$S = 34.916 + 0.104a - 0.00058a^2$	0.979
2	高斯	$S = -23252.634 + 23292.211 \times e^{(-0.5 \times ((a-89.477)/4472.364)^2)}$	0.979
3	正弦	$S = -7732.23 + 7771.806 \times \sin(\pi(a + 3968.525)/8116.003)$	0.979

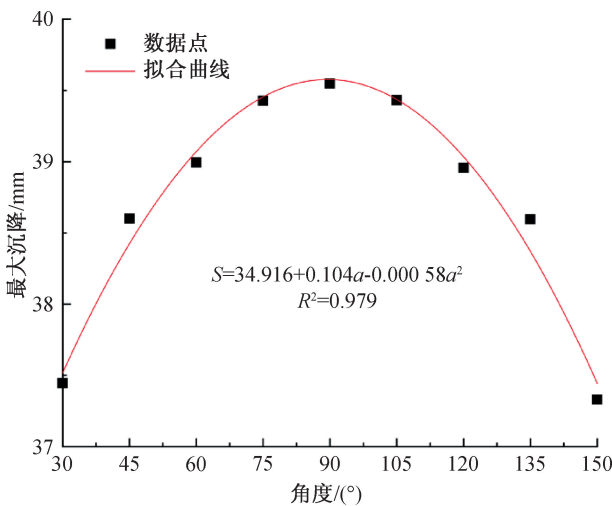


图 6 断层倾角拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of fault dip angle

3.3 断层厚度与倾角对隧道稳定性的综合影响

整合上述两个单因素曲线,隧道最大沉降与断层厚度、断层倾角的多因子曲线基本表达式为

$$S = f(d) + f(\alpha) = \alpha_1 + \alpha_2 d + \alpha_3 d^2 + \alpha_4 a + \alpha_5 a^2$$

式中 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 为拟合系数。依据前述断层厚度与断层倾角的数据通过 MATLAB 软件计算出各拟合系数,得到隧道最大沉降与断层厚度、断层倾角的多因子曲线表达式为

$$S = 25.4893 + 0.2345d - 0.0013d^2 + 0.1021\alpha - 0.0006\alpha^2$$

通过计算得到各组数据的残差如表 8 所示。

由表 8 可以看出各组数据计算的残差均较小,最终确定隧道最大沉降与断层厚度、断层倾角的关系式为

$$S = 25.4893 + 0.2345d - 0.0013d^2 + 0.1021\alpha - 0.0006\alpha^2$$

表 8 残差计算表

Tab. 8 Residual calculation table

最大沉降/mm	断层厚度/m	断层倾角/(°)	残差
29.4484	0	90	-0.6085
33.5288	15	90	0.2402
36.6064	30	90	0.6590
38.4194	45	90	0.3862
39.4734	60	90	-0.0727
40.0070	75	90	-0.4789
40.2520	90	90	-0.6009
40.3972	105	90	-0.2496
40.4728	120	90	0.6050
37.4462	60	30	-0.0820
38.6008	60	45	0.1829
38.9938	60	60	-0.0570
39.4276	60	75	0.0008
39.5480	60	90	0.0019
39.4320	60	105	0.0235
38.9560	60	120	-0.0582
38.5958	60	135	0.2328
37.3306	60	150	-0.1245

依据上式,选取该隧道穿越的 9 条断层并计算在不同断层厚度与倾角下的隧道拱顶最大位移如表 9 所示。由表 9 可知在 9 个断层中,隧道拱顶沉降变形最大的为 F2 断层,最大位移值为 39.8752 mm。

表 9 不同断层的最大位移

Tab. 9 Risk factors of different faults

断层	断层倾角/(°)	断层厚度/m	最大位移/mm
F1	80	60	39.2073
F2	83	70	39.8752
F3	96	69	39.7525
F4	102	59	38.9713
F5	73	50	38.2202
F7	75	60	39.1618
F8	75	63	39.3856
F9	84	50	38.3071
F10	87	59	39.1408

4 数值模拟结果分析

4.1 隧道变形

根据上述分析可知在所有断层中,F2 断层为最危险断层,因此对该断层进行分析。考虑对该隧道进行管棚注浆加固,并通过数值模拟对加固前后的隧道进行分析^[17]。

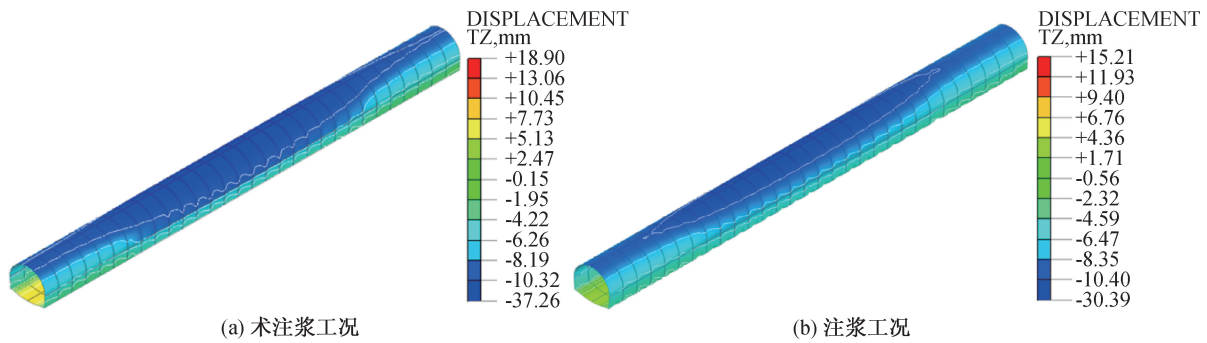


图 7 拱顶沉降云图

Fig. 7 Cloud diagram of vault settlement

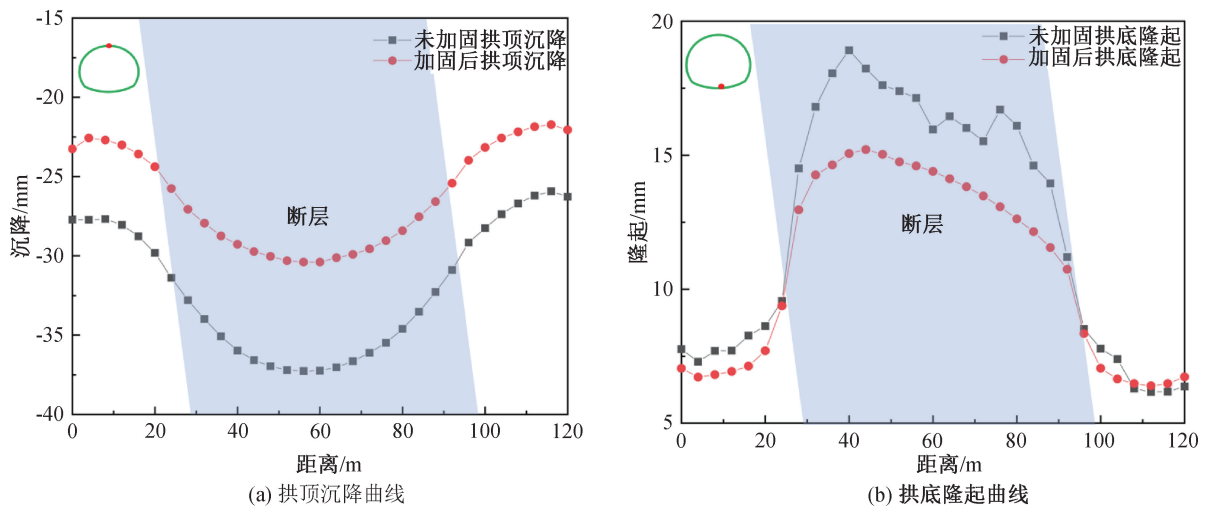


图 8 竖向位移曲线

Fig. 8 Vertical displacement curves

图 7 为隧道竖向变形在两种工况下的变形云图,每隔 4 m 提取一个监测数值,将其绘制为曲线图,如图 8(a)所示。由图可知,两种工况下拱顶沉降曲线呈现对称分布,未注浆工况拱顶沉降最大值为 37.26 mm,注浆后沉降最大值为 30.39 mm,减少幅度约为 18.44%。提取隧道拱底隆起值如图 8(b)所示,两种工况下隆起曲线呈现不对称分布,隧道施工扰动使得断层前半部分的拱底隆起值大于后半部分,未注浆工况下的隆起最大值为 18.9 mm,注浆后隆起最大值为 15.21 mm,减少幅度约为 18.52%。显然,进行管棚注浆可以有效改善隧道围岩的变形,减少施工对围岩的扰动效应。

4.2 塑性区分布

图 9 为两种工况下塑性区的变化情况。由图可得,未加固工况下,隧道拱顶处与拱脚处塑性区范围较大,拱腰处塑性区范围较小。注浆加固后,拱顶与拱腰处的塑性区明显减小,尤其是处于断层中的塑性区范围变化更为明显,而拱脚处塑性

区没有显著变化。且无论是加固前还是加固后,断层位置处的塑性区远大于前后围岩。综合以上塑性区变化特征可以得到,注浆对隧道的塑性区有较为明显加固效果。

5 现场监测结果分析

为保证隧道的围岩变形不超出预警值,对隧道拱顶下沉进行监测^[18-19]。隧道拱顶下沉监测采用水准仪。根据西山营隧道监测方案,选取 3 个典型的监测断面 BK91+220、BK91+180、BK91+260。这 3 个断面分别位于断层及断层前后土体内,其位置如图 10 所示。提取以上三个断面的拱顶沉降监测数据,隧道施工引起拱顶沉降规律如图 11 所示。

从图 11(a)中可以看出,3 个监测断面布设的监测点的拱顶变形均随着开挖时间呈现曲线增长,变化规律大致相似,随着隧道掘进天数的推移,处于断层破碎带中的断面 BK91+180 累计沉降量达到最大值为 39.98 mm,断面 BK91+220 累计

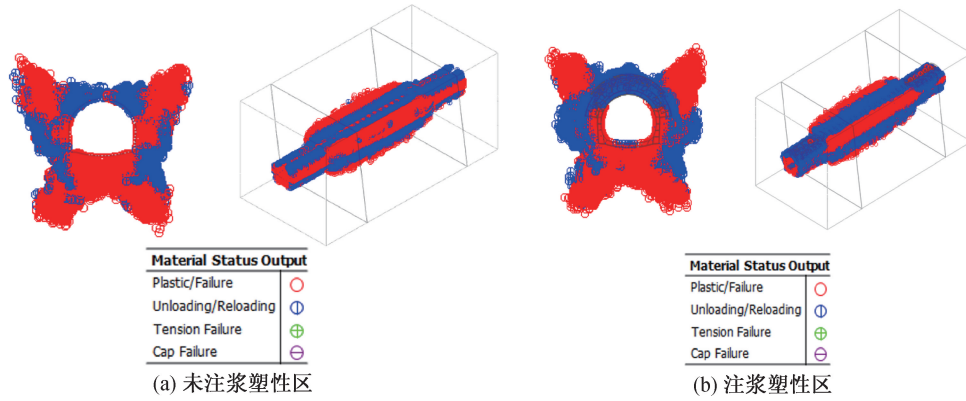


图9 两种工况下塑性区变化

Fig. 9 Variation of plastic zone under two working conditions

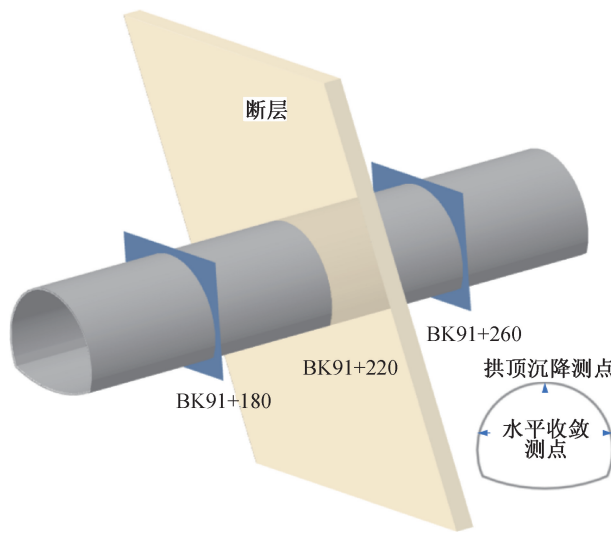


图10 监测断面位置图

Fig. 10 Location of monitoring section

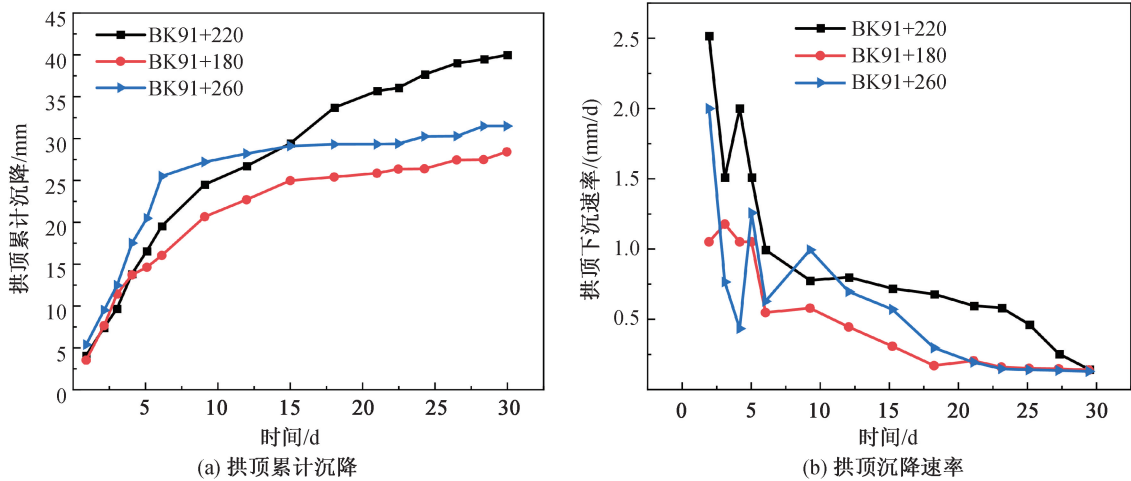


图11 拱顶沉降曲线

Fig. 11 Vault settlement curve

沉降量为 28.42 mm, 断面 BK91+260 累计沉降量为 31.49 mm。从图 11(b) 中可以看出, 拱顶测点的沉降速率规律大致相似, 随着开挖时间呈现逐

渐减小趋势, 在掌子面开挖前两周内, 拱顶沉降速率波动比较大, 断面 BK91+180 最大沉降速率为 2.5 mm/d, 断面 BK91+220 最大沉降速率为

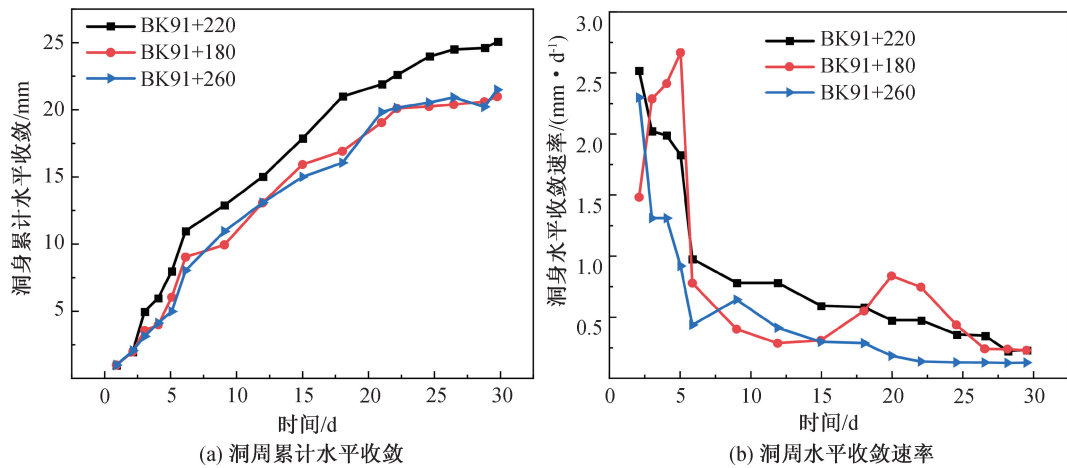


图 12 洞周水平收敛曲线

Fig. 12 Horizontal convergence curve around the tunnel

1.3 mm/d, 断面 BK91 + 260 最大沉降速率为 2.05 mm/d。第三周开始,拱顶沉降速率开始减缓,在第四周左右沉降速率趋于稳定。提取以上三个断面的洞周水平收敛监测数据如图 12 所示。

从图 12(a)中可以看出,3 个监测断面布设监测点的洞周水平收敛均随着开挖时间呈现曲线增长,变化规律大致相似,随着施工天数的推移,断面 BK91+180 累计沉降量为 25.05 mm,断面 BK91+220 累计沉降量为 20.98 mm,断面 BK91+260 累计沉降量为 21.49 mm。从图 12(b)中可以看出,洞周水平监测点的收敛速率规律大致相似,随着开挖时间呈现曲线减小,在掌子面开挖前两周内,洞周收敛速率波动比较大,断面 BK91+180 最大洞周水平收敛速率为 2.9 mm/d,断面 BK91+220 最大洞周水平收敛速率为 2.3 mm/d,断面 BK91+260 最大洞周水平收敛速率为 2.5 mm/d。第三周开始,洞周水平收敛速率开始减缓,在第四周左右收敛速率趋于稳定。

6 结论

1)隧道的最大位移随着断层厚度的增大不断增加,且其变化趋势类似于抛物线,随着断层厚度的增加,其最大位移的变化趋势逐渐变得平缓。当断层倾角为 90° 时,隧道的变形最大,随着断层的倾角逐渐远离 90° ,隧道的变形也逐渐减小。

2)在断层倾角和断层厚度对隧道变形的影响中,断层厚度的影响更大,且随着断层厚度的不断增加,其对隧道变形的影响逐渐趋于平缓。

3)预测值与模拟值之间的偏差仅为 6%,说明预测值具有较大可信度。针对未加固与加固两个

工况的数值模拟可以看出,管棚加固对隧道竖向变形,塑性区分布均有很好的加固效果,综合来看其加固效果可到达 18%左右。

4)将数值模拟结果与实测数据进行对比,通过数值分析得到的拱顶累计沉降与洞身累计水平收敛模拟值均小于现场监测结果,但两者之间的差距较小。说明数值模拟能在一定程度上反应隧道的真实情况,可通过数值模拟结果对后续施工提供参考。

参考文献:

- [1] ZHAO K, CHEN W Z, YANG D S, et al. Mechanical Tests and Engineering Applicability of Fibre Plastic Concrete Used in Tunnel Design in Active Fault Zones [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 88:200-208.
- [2] KUN M, ONARGAN T. Influence of the Fault Zone in Shallow Tunneling: A Case Study of Izmir Metro Tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 33: 34-45.
- [3] 吴昊,杨晓华,陈星宇. 富水断层隧道涌水特征试验 [J]. *长安大学学报:自然科学版*, 2017(37):73-80.
- [4] 周凯. 断层带深埋隧道围岩稳定性影响因素分析及施工方案优化[D]. 长沙:长沙理工大学, 2016.
- [5] 刘国钊,乔亚飞,何满潮,等. 活动性断裂带错动下隧道纵向响应的解析解 [J]. *岩土力学*, 2020, 41 (3): 203-212.
- [6] 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.
- [7] LIN D M, YUAN R M, SHANG Y J, et al. Deformation and Failure of a Tunnel in the Restraining Bend of a Strike-slip Fault Zone: An Example from Hengshan

- Mountain, Shanxi Province, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76(1): 263-274.
- [8] 朱麟晨,廖余.祥和隧道平导软弱围岩变形控制探讨[J].现代隧道技术,2016,53(2):196-201.
- [9] 刘学增,唐精,桑运龙,等.逆断层黏滑错动对跨断层隧道影响机制的模型试验研究[J].隧道建设:中英文,2020,40(4):481-489.
- [10] 焦鹏飞,来弘鹏.不同倾角逆断层错动对隧道结构影响理论分析[J].土木工程学报,2019,52(2):110-121.
- [11] 刘凯,孔超,唐凌哲,等.高地应力断层破碎带衬砌力学特性对比与分析[J].铁道标准设计,2014(12): 105-109+114.
- [12] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S].
- [13] 赵文财,范飞飞,李子琦,等.基于大管棚支护的大断面黄土隧道穿越冲沟地貌控制效果分析[J].公路,2020,65(8):380-385.
- [14] 邵珠山,赵鑫.基于隧道施工诱发地表沉降随机介质理论预测模型的拓展[J].长安大学学报:自然科学版,2021,41(6):73-81.
- [15] 郭宏博,仇文革,牛晓宇,等.新建通道密贴下穿地铁车站施工影响范围研究[J].土木工程学报,2021,54(S1):113-120.
- [16] 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.
- [17] 徐前卫,程盼盼,朱合华,等.跨断层隧道围岩渐进性破坏模型试验及数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2016,35(3):433-445.
- [18] 蔡元成,王强,张强,等.浅埋偏压隧道边坡稳定性分析[J].河北工程大学学报:自然科学版,2022,39(3):56-64.
- [19] 李志强.深长隧道穿越艰险山区断层破碎带施工稳定性分析[D].青岛:山东科技大学,2020.

(责任编辑 王利君)

(上接第54页)

4)根据建(构)筑物与掌子面前后位置关系,分别运用掌子面前后方围岩振速预测公式计算安全药量,实现穿越建(构)筑物前后过程中的精准爆破振动控制,既能保证建(构)筑物安全,又能极大地提高施工效率。

参考文献:

- [1] 肖文涛,肖文芳,房泽法,等.地铁隧道掘进爆破地表震动效应研究[J].武汉理工大学学报,2011,33(10):113-117.
- [2] 高文学,颜鹏程,李志星,等.浅埋隧道爆破开挖及其振动效应研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S2):4153-4157.
- [3] 张震,周传波,路世伟,等.超浅埋地铁站通道爆破暗挖地表振动传播特征[J].中南大学学报:自然科学版,2017,48(8):2119-2125.
- [4] 王超,周传波,路世伟,等.城市暗挖隧道爆破地震波传播规律研究[J].科学技术与工程,2017,17(6): 158-162.
- [5] 任永华.隧道穿越既有建筑物爆破施工影响及方案优化[J].铁道建筑,2018,58(4):61-65.
- [6] 傅洪贤,赵勇,谢晋水,等.隧道爆破近区爆破振动测试研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(2): 335-340.
- [7] 高宇璠,傅洪贤,季相臣,等.小净距隧道钻爆施工中夹岩振动规律研究及应用[J].岩石力学与工程学报,39(S2):3440-3449.
- [8] 季相臣,傅洪贤,孔恒,等.大跨小间距隧道微振钻爆施工及夹岩振动特性研究[J].中国公路学报,2021,34(4):220-230.
- [9] 张继春,曹孝君,郑爽英,等.浅埋隧道掘进爆破的地表震动效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005(22):4158-4163.
- [10] 肖文芳,李宇坤,方凯明,等.地铁隧道钻爆施工地表振动速度特征研究[J].工程爆破,2018,24(1): 72-77.
- [11] 喻军,刘松玉,童立元.浅埋隧道爆破振动空洞效应[J].东南大学学报:自然科学版,2010,40(1): 176-179.
- [12] 蔡军,苏莹,邱秀丽.爆破荷载作用下空洞效应对围岩振动速度的影响[J].矿冶工程,2021,41(5): 10-13+17.
- [13] 管晓明,余志伟,宋景东,等.隧道超小净距下穿深埋供水管线爆破监测及减振技术研究[J].土木工程学报,2017,50(S2):160-166.

(责任编辑 王利君)