

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202304262024061974

文章编号:1674-599X(2024)03-0091-09

引用格式:包其刚,闫云翔,姚崇凯,等.穿越断层破碎带隧道超前注浆加固效果分析[J].交通科学与工程,2024,40(3):91-99.

Citation: BAO Qigang, YAN Yunxiang, YAO Chongkai, et al. Analysis on reinforcement effect of advanced grouting for tunnel crossing fault fracture zone[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3): 91-99.

穿越断层破碎带隧道超前注浆加固效果分析

包其刚^{1,2}, 闫云翔³, 姚崇凯⁴, 王永雷^{1,2}, 张强^{1,2}

(1. 中国铁建昆仑投资集团有限公司, 四川 成都 610041; 2. 中铁建云南投资有限公司, 云南 昆明 650200;
3. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710000; 4. 旭辉集团, 四川 成都 610000)

摘要:为研究断层破碎带超前注浆加固机理,以阳宗隧道穿越多条断层破碎带实际工程为依托,运用FLAC^{3D}软件建立穿越断层破碎带三维数值模型,研究不同厚度、不同注浆范围的超前小导管注浆加固对断层破碎带围岩的控制效果。研究结果表明:1) 注浆加固层厚度的增大对隧道竖向位移,尤其是对隧道拱顶沉降的控制效果明显,对隧道围岩水平位移的控制亦有效果,但效果稍差。当采用1.5 m注浆加固层厚度时,隧道拱顶最大沉降和围岩最大水平位移分别降低了26.96%、16.03%。2) 随着超前小导管注浆范围的扩大,隧道围岩水平位移的控制效果明显变得更好,竖向位移的控制效果变化不大。当采用150°的注浆范围时,隧道拱顶最大沉降和围岩最大水平位移分别降低了26.62%、22.80%。3) 采用超前小导管注浆加固,增强了断层破碎带围岩的强度,控制了软弱围岩的变形量,使围岩整体稳定性得到有效提高。该研究成果为隧道现场施工提供了依据,对类似隧道施工具有一定的借鉴意义。

关键词:隧道工程;断层破碎带;小导管注浆;注浆范围;加固层厚度

中图分类号:U455

文献标志码:A

Analysis on reinforcement effect of advanced grouting for tunnel crossing fault fracture zone

BAO Qigang^{1,2}, YAN Yunxiang³, YAO Chongkai⁴, WANG Yonglei^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}

(1. China Railway Construction Kunlun Investment Group Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 2. China Railway Construction Yunnan Investment Co., Ltd., Kunming 650200, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710000, China; 4. CIFI Group, Chengdu 610000, China)

Abstract: To study the mechanism of advanced grouting reinforcement in fault fracture zone, based on the actual project of the Yangzong tunnel crossing multiple fault fracture zones, a three-dimensional numerical model of crossing fault fracture zone is established using FLAC^{3D} software. The control effect of advanced small pipe grouting reinforcement with different thicknesses and grouting ranges on the surrounding rock of fault fracture zones is studied. The results show that: 1) The increase in the thickness of the grouting reinforcement layer has a significant control effect on the horizontal displacement of the tunnel, especially on the settlement of the tunnel arch. It also has a control effect on the horizontal displacement of the tunnel, but it is not as effective as the control effect on the settlement of the arch. When the thickness of grouting reinforcement layer is 1.5 m, the tunnel crown settlement and maximum horizontal displacement are reduced by 26.96% and 16.03%, respectively.

收稿日期:2023-04-26

基金项目:中国铁建昆仑投资集团有限公司科技研究开发计划项目(KLTZ-KX01-2020-009)

通信作者:包其刚(1974—),男,高级工程师,主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail:6356211@qq.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

2) With the expansion of grouting range of the advanced small pipe grouting, the control effect on the horizontal displacement of the tunnel significantly becomes better, while the control effect on the vertical displacement has little change. When the grouting range is 150° is used, the tunnel crown settlement and convergence of the periphery are decreased by 26.62% and 22.80%, respectively. 3) The strength of the surrounding rock in the fracture zone of fault is enhanced, the deformation of the weak surrounding rock is controlled, and the overall stability of the surrounding rock is improved effectively through the reinforcement of the advanced small pipe grouting. The research findings provide a basis for tunnel construction on-site and are of certain reference significance for similar tunnel construction projects.

Key words: tunnel engineering; fault fracture zone; small pipe grouting; grouting range; reinforced layer thickness

当隧道穿越断层破碎带时,为避免隧道开挖引起泥石流、塌方、冒顶、大变形等灾害,应酌情采取预支护措施,有效加固围岩,控制软弱围岩的位移和变形。诸多学者已对断层破碎带预处理的加固效果进行了研究,成果丰富^[1-3]。

目前,针对超前预支护加固效果的研究方法主要有理论分析^[4-5]、现场监测^[6-8]和数值模拟^[9-12]。由于计算机的发展以及断层破碎带的复杂性,数值模拟在断层破碎带超前支护加固效果研究中有着广泛的应用。孙星亮等^[13]以广承山隧道为例,研究了超前小导管注浆对穿越断层破碎带隧道浅埋段加固的影响,研究表明,该方法使得地表沉降得到了有效控制。甘目飞^[14]结合数值模拟,以地质条件复杂的蔡家寨隧道为基础,对不同超前支护方式在断层破碎带中的安全性和适用性进行了研究,结果表明,超前帷幕灌浆在控制变形方面效果最佳。李嘉璐等^[15]通过建立数值分析模型,对比分析了超前半断面帷幕灌浆和全断面帷幕灌浆这两种灌浆方法对隧道穿越断层破碎带安全的控制效果,结果表明,这两种方法对控制隧道变形都有一定的效果,但全断面帷幕灌浆的控制效果更佳。

综上所述,各种先进的超前预支护技术的作用机理是不同的。因此,必须结合实际情况,探索一种适合实际工程的超前加固技术,以应对复杂多变的断层破碎带。本文以阳宗隧道工程为依托,利用FLAC^{3D}有限差分软件,探究超前小导管注浆方法对断层破碎带的加固效果,分析注浆厚度及注浆范围对注浆加固效果的影响,以期为隧道穿越断层破碎带施工时的超前支护提供参考与指导。

1 工程概况

阳宗隧道位于云南省昆明市,地处云贵高原,是确保昆石高速公路正常通行的关键工程。隧道东西走向,横穿宜良县阳宗镇。阳宗隧道是一条全长约8 km的分离式隧道,隧道工程起讫点里程为K42+250~K50+265,左线出口最低处的高程为1 718.23 m,直线洞身顶部最大高程为2 397.15 m,最大埋深为576.36 m,出入口高差为512.58 m。采用预留核心土的方法进行隧道开挖,在环形拱顶开挖之后施加初期支护,紧接着开挖核心土。在每一个开挖环节完成之后随机进行初期支护,初期支护的厚度为25 cm,二次衬砌施加于初期支护完成之后,厚度为50 cm。隧道断面参数如图1所示。阳宗隧道经过多条断层破碎带,工程地质条件复杂,隧道沿线的地质断面如图2所示,图中,F3~F6为断层。

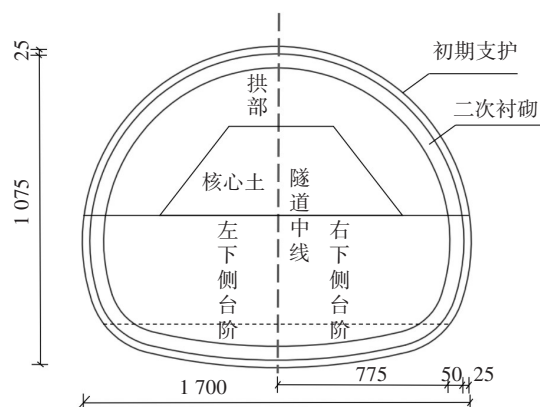


图1 阳宗隧道断面(单位:cm)

Fig. 1 Section of the Yangzong Tunnel (unit: cm)

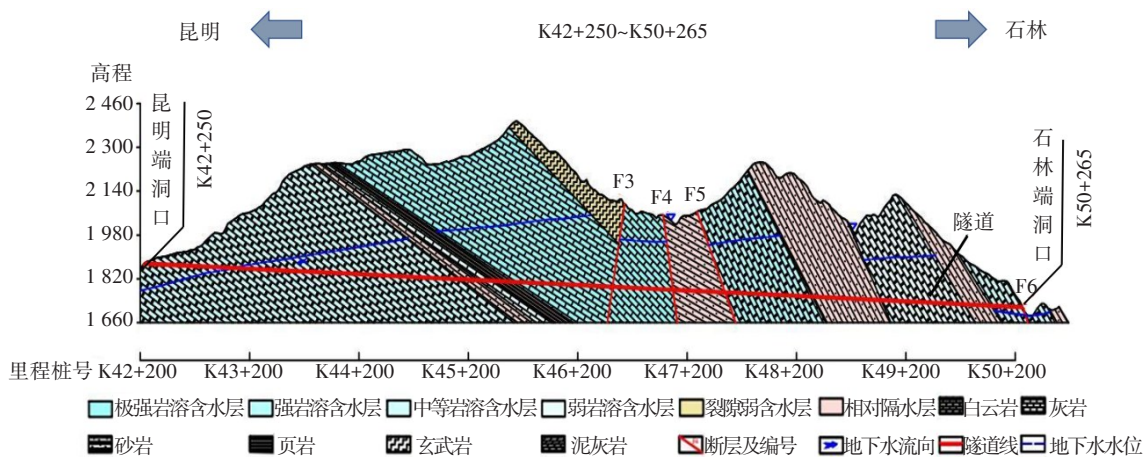


图 2 阳宗隧道地质断面图
Fig. 2 Geological cross-section map of the Yangzong Tunnel

2 数值模拟

2.1 模型尺寸及边界条件

阳宗隧道断面宽 17.0 m,高 11.1 m,隧道断层处埋深 50.0 m,断裂带厚度约 10.0 m,断层倾角约 75°。根据隧道工程的实际情况,本文建立了三维数值模型。由于隧道开挖受边界条件限制,本文对模型尺寸做了相应调整,以确保围岩扰动范围在模型计算范围内。调整后模型的长、宽、高分别为 120、100、100 m,如图 3 所示。在模型左、右两个侧面施加横向位移约束边界条件,在前、后两个面施加沿隧道往石林端洞口方向的位移约束边界条件,在底面施加全向位移约束边界条件,在顶面以隧道埋深为参考,施加自重应力边界条件。

将模型中的岩体简化为断层破碎带与非断层围岩。岩体本构模型选用莫尔-库伦(M-C)模型,隧道初期支护采用弹性本构模型壳单元进行模拟,其余结构均以 zone 实体单元进行模拟。

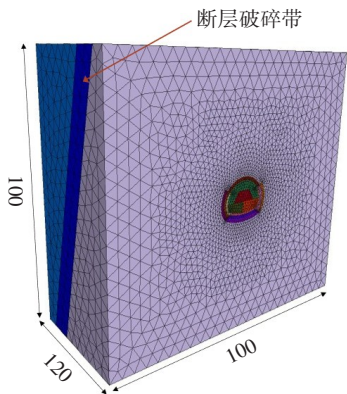


图 3 阳宗隧道计算模型
Fig. 3 Calculation model of the Yangzong Tunnel

2.2 材料及支护参数

通过查阅阳宗隧道地勘报告以及现场资料,对建模所需的地层参数予以确定,见表 1。

表 1 阳宗隧道数值模拟的地层参数
Table 1 Stratigraphic parameters for numerical simulation of the Yangzong Tunnel

围岩种类	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/GPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/MPa
非断层围岩	23	0.35	1.6	28	0.15
断层破碎带	20	0.39	0.4	23	0.06

隧道支护参数见表 2。隧道初期支护采用锚喷网支护结构。通过等效换算可得到等效材料的弹性模量,换算公式为:

$$EA = E_1A_1 + E_2A_2 + E_3A_3 \quad (1)$$

式中: E 为等效材料的弹性模量; A 为初期支护的截面面积; E_1 、 E_2 、 E_3 分别为喷射的混凝土、钢筋网片和钢拱架的弹性模量; A_1 、 A_2 、 A_3 分别为喷射的混凝土、钢筋网片、钢拱架的截面面积。

表 2 隧道支护计算参数
Table 2 Calculation parameters of tunnel support

支护	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
初期支护	24.0	30.0	0.20
二次衬砌	23.5	32.5	0.22

2.3 超前支护数值模拟

超前小导管布置形式示意图见图 4。在掘进工作面开挖前,小导管注浆与锚杆注浆具有相似的作用,即提高工作面的自稳能力。

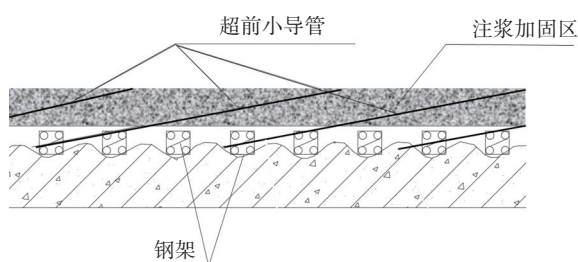


图4 超前小导管布置形式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the layout form of advanced small pipe grouting

2.3.1 超前小导管模型

超前小导管注浆的相关参数见表3。可通过式(2)计算超前小导管注浆时弹性模量的等效值:

$$E' = \frac{E'_1 I'_1 + E'_2 I'_2}{I'_1 + I'_2} \quad (2)$$

式中: E' 为小导管注浆后的弹性模量等效值; E'_1 、 E'_2 为注浆浆液、小导管本身的弹性模量; I'_1 、 I'_2 为注浆浆液、小导管本身的惯性矩。

注浆加固范围内等效弹性模量的计算公式为:

$$E'' = \rho E'_3 + (1 - \rho) E_w \quad (3)$$

式中: E'' 为注浆加固范围内弹性模量的等效值; E'_3 、 E_w 分别为注浆浆液、隧道围岩的弹性模量; $\rho = (0.5 \sim 0.6)\eta$, η 为围岩孔隙率。

表3 隧道超前支护参数

Table 3 Tunnel advanced support parameters

超前支护	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/ GPa	内摩擦角/($^\circ$)	黏聚力/ MPa
超前小导管	78	0.21	200.00		
注浆加固区	24	0.35	0.65	28	0.38

2.3.2 计算工况

本文基于隧道环向开挖模型,研究超前小导管注浆对穿越断层破碎带隧道安全的控制效果,分析加固层厚度和注浆范围对加固效果的影响程度。超前小导管注浆工况见表4,模型图见图5。

表4 超前小导管注浆工况

Table 4 Working conditions of advanced small pipe grouting

工况	注浆范围/($^\circ$)	加固层厚度/m
R1	120	1.0
R2	135	
R3	150	
T1	120	0.5
T2		1.0
T3		1.5
		1.5

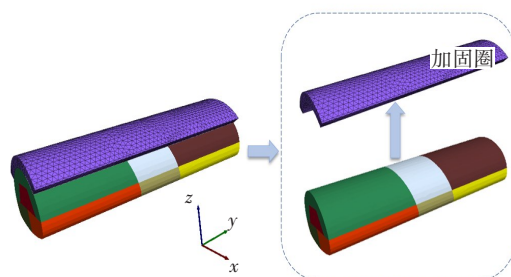


图5 超前小导管注浆模型图

Fig. 5 Model drawing of advanced small pipe grouting

3 模型优化

3.1 超前小导管注浆加固效果分析

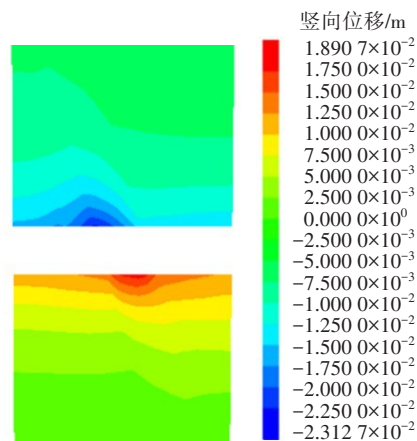
通过有限差分软件对注浆加固后的三维模型进行计算,并将结果与未进行支护工况下的结果进行比较,分析围岩位移场和塑性区的变化规律。

3.1.1 围岩竖向位移分析

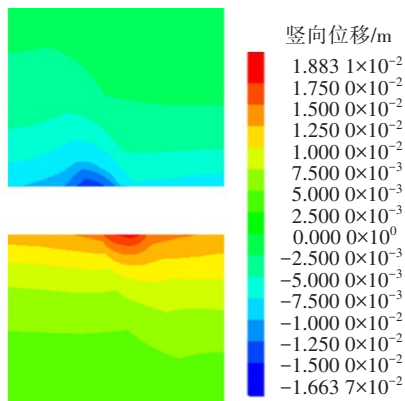
有无超前支护的围岩竖向位移云图见图6。由图6可知,围岩的竖向位移变化较大,隧道的拱顶最大沉降由未施加支护时的 23.13 mm 降至 T3 工况下的 16.64 mm,减小了 28.06%;最大仰拱隆起由未施加支护时的 18.91 mm 降至 18.83 mm,减小了 0.42%。说明施加超前小导管注浆加固对隧道围岩的竖向位移,特别是对拱顶沉降有明显的控制效果,但对仰拱隆起的影响较小。

3.1.2 围岩水平位移分析

T3 工况与未施加超前小导管情况下得到的围岩水平位移云图见图7。由图7可知,施加小导管对围岩水平位移的变化趋势没有影响,但对围岩水平位移进行了有效控制。在 T3 工况下进行超前小导管注浆加固后,围岩最大水平位移由 13.68 mm 降至 11.44 mm,减小了 16.37%。相比于未进行超前小



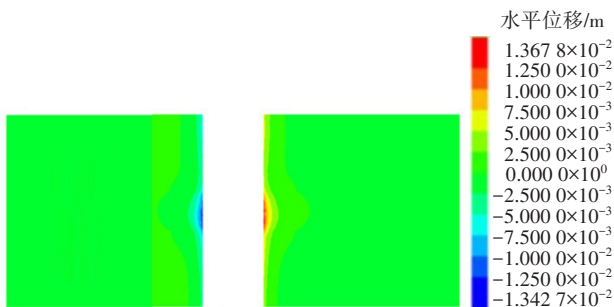
(a) 无超前支护



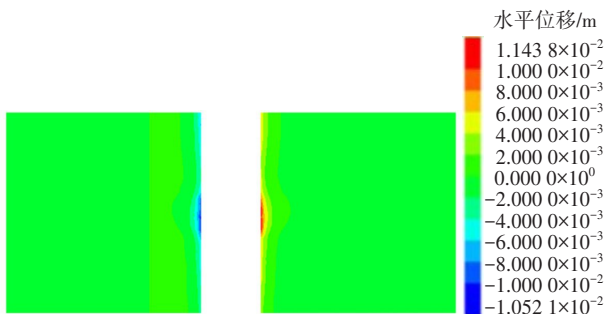
(b) T3工况

图6 有无超前支护的围岩竖向位移云图

Fig. 6 Nephogram of vertical displacement of the surrounding rock with or without advanced support



(a) 无超前支护



(b) T3工况

图7 有无超前支护的围岩水平位移云图

Fig. 7 Nephogram of horizontal displacement of the surrounding rock with or without advanced support

导管注浆,在T3工况下,围岩水平位移有效减小,说明隧道围岩的扰动得到了有效控制。

3.2 加固层厚度对加固效果的影响

3.2.1 竖向位移分析

改变加固层厚度,观察超前小导管注浆加固效果的变化规律,进而得出注浆加固效果和加固层厚度之间的关系。改变加固层厚度能显著抑制围岩

的变形,特别是减小隧道拱顶的竖向位移,但对隧道仰拱的影响不大。在固定注浆加固范围为 120° 的情况下,调整加固层厚度得到围岩竖向位移(T1~T3工况),如图8所示。由图8可知,在未施加超前小导管注浆加固时,隧道拱顶沉降最大达到了23.78 mm;当采用0.5 m的注浆加固层厚度时,隧道拱顶最大沉降由23.78 mm降至20.95 mm,减小了约11.90%;当采用1.0 m的注浆加固层厚度时,隧道拱顶最大沉降由23.78 mm降至18.84 mm,减小了约20.77%;当采用1.5 m的注浆加固层厚度时,隧道拱顶最大沉降由23.78 mm降至17.37 mm,减小了约26.96%。由此可知,增加加固层厚度能够使拱顶沉降减小,对拱顶沉降的控制效果较为明显。

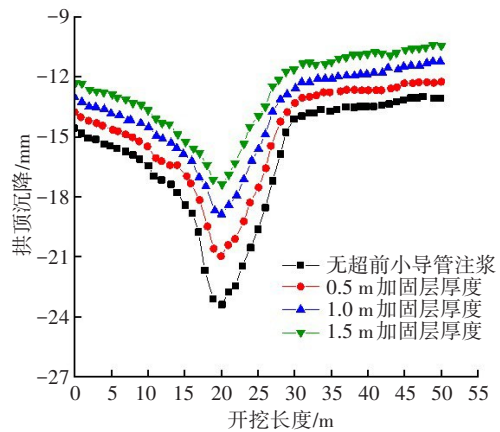


图8 不同注浆加固层厚度下隧道拱顶沉降

Fig. 8 Settlement of tunnel crown with different grouting reinforcement thickness

3.2.2 水平位移分析

图9所示为不同注浆加固层厚度下围岩的水平位移。从图9可以看出,不同注浆加固层厚度下围岩水平位移曲线的变化趋势基本相似,仅在数值上有所变化,在进出断层破碎带处,围岩的水平位移较为明显,呈倒“V”形分布。当未施加超前小导管注浆加固时,围岩水平位移最大达到了28.69 mm;当注浆加固层厚度为0.5 m时,围岩的最大水平位移由28.69 mm降至26.93 mm,减小了6.13%;当注浆加固层厚度为1.0 m时,围岩的最大水平位移由28.69 mm降至25.24 mm,减小了12.03%;当注浆加固层厚度为1.5 m时,围岩的最大水平位移由28.69 mm降至24.09 mm,减小了16.03%。由此可见,注浆加固层厚度的增大可使围岩水平位移有所减小,超前小导管注浆可有效控制围岩水平位移。

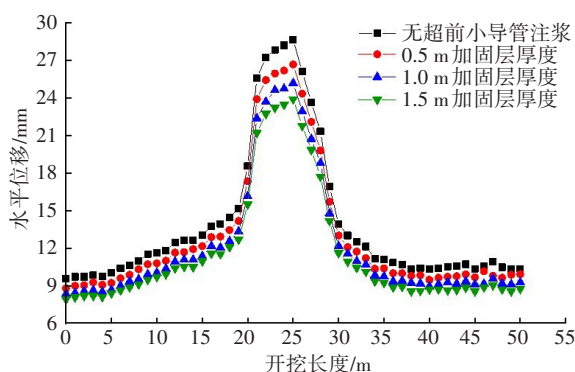


图9 不同注浆加固层厚度下围岩水平位移

Fig. 9 Horizontal displacement of the surrounding rock with different grouting reinforcement thickness

3.2.3 塑性区影响分析

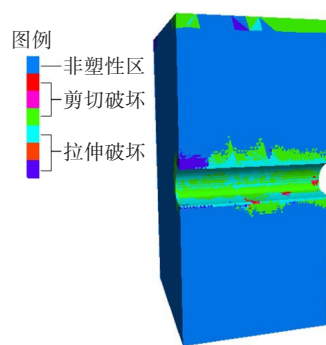
图10所示为不同注浆加固层厚度下围岩的塑性区分布情况。由图10可以看出,在采用了超前小导管注浆后,围岩塑性区的分布面积有所减小,且在断层破碎带处变化较为明显;随着注浆加固层厚度的增加,塑性区范围进一步缩小。

3.3 环向注浆范围对断层破碎带控制效果的影响

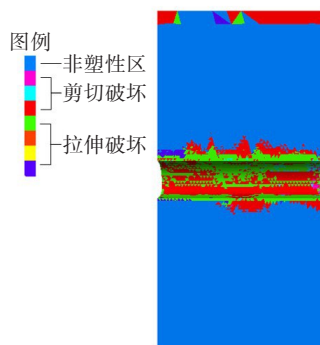
固定加固层厚度为1.0 m,选取120°、135°和150°三个环向注浆范围,通过模型计算围岩的加固情况,分析环向注浆范围对拱顶沉降和围岩水平位移的控制效果。

不同环向注浆范围下隧道拱顶沉降如图11所示。由图11可以看出,在隧道未施加超前小导管注浆时,拱顶的最大沉降为23.78 mm;当环向注浆范围为120°时,隧道拱顶的最大沉降由23.78 mm降至19.25 mm,减小了19.05%;当环向注浆范围为135°时,隧道拱顶的最大沉降由23.78 mm降至18.46 mm,减小了22.37%;当环向注浆范围为150°时,隧道拱顶的最大沉降由23.78 mm降至17.45 mm,减小了26.62%。与无超前小导管注浆加固相比,采用超前小导管注浆后,隧道拱顶沉降得到了有效控制。对于不同的环向注浆范围,拱顶沉降变化趋势基本相同。随着环向注浆范围的不断增大,竖向位移的控制效果不断增强,但拱顶沉降控制效果增加得不明显。

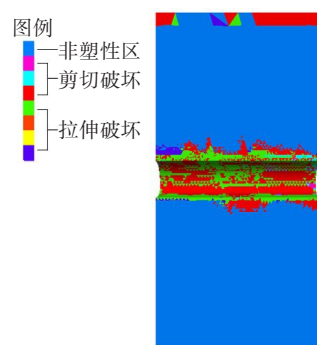
不同环向注浆范围下隧道围岩的水平位移如图12所示。由图12可以看出,在隧道未施加超前小导管注浆时,围岩的最大水平位移为28.69 mm;当环向注浆范围为120°时,围岩的最大水平位移由



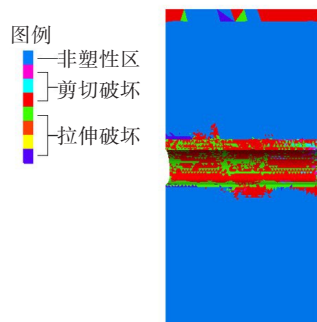
(a) 无超前支护



(b) 0.5 m 注浆加固层厚度



(c) 1.0 m 注浆加固层厚度



(d) 1.5 m 注浆加固层厚度

图10 不同注浆加固层厚度下围岩塑性区分布

Fig. 10 Distribution of plastic zone of surrounding rock with different grouting reinforcement thickness

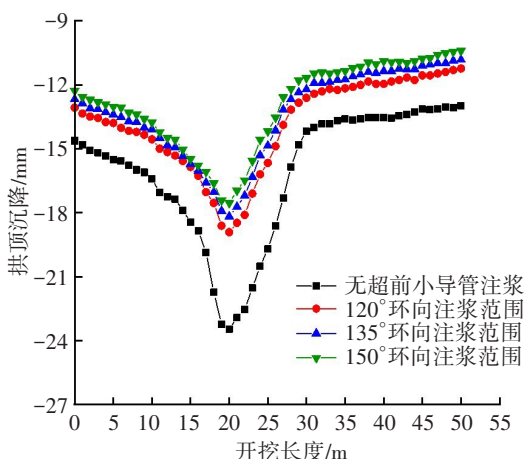


图11 不同环向注浆范围下隧道拱顶沉降

Fig. 11 Settlement of tunnel crown under different circumferential grouting ranges

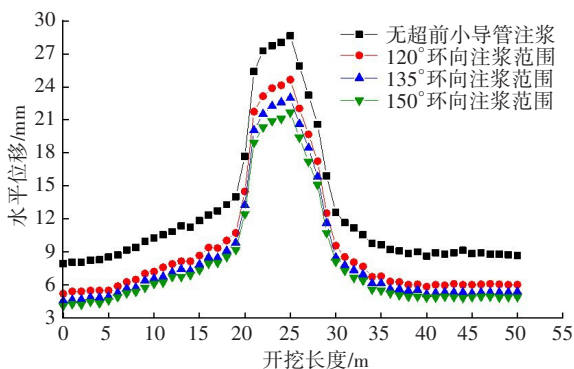


图12 不同环向注浆范围下围岩水平位移

Fig. 12 Horizontal displacement of surrounding rock under different circumferential grouting ranges

28.69 mm 降至 25.64 mm, 减小了 10.63%; 当环向注浆范围为 135° 时, 围岩的最大水平位移由 28.69 mm 降至 23.97 mm, 减小了 16.45%; 当环向注浆范围为 150° 时, 围岩的最大水平位移由 28.69 mm 降至

22.15 mm, 减小了 22.80%。说明环向注浆可有效减小隧道围岩的水平位移, 且环向注浆范围越大, 对隧道围岩最大水平位移的控制效果越明显。

4 现场实测数据对比分析

4.1 监测点的布置

根据数值计算中模型监测点的布置, 在施工现场选取 K46+520 断面进行断层破碎带的监测, 水平位移测线布置及监测断面如图 13 所示, 图中 S_1 、 S_2 为水平位移测线。分别采用徕卡 TS11 型全站仪、JSS30A 型数显收敛仪监测隧道拱顶沉降、拱腰水平位移, 频率为 1 次/d, 共监测 36 d。

4.2 结果验证及对比分析

监控并测量断层破碎带某一断面的拱顶沉降及拱腰水平位移, 将实测数据与数值模拟结果进行对比分析, 以验证数值模拟的准确性。图 14~15 所示为 T3 工况下隧道拱顶沉降与拱腰水平位移的现场实测和数值模拟对比情况。

由图 14~15 可以看出, T3 工况下隧道拱顶最大沉降和拱腰最大水平位移分别为 16.64、11.43 mm。现场监测拱顶最大沉降和拱腰最大水平位移分别为 24.12、13.68 mm。超前小导管注浆加固后拱腰最大水平位移的数值模拟结果与实测数据比较接近, 但两者的拱顶最大沉降差距较大。

对比分析现场监测数据和数值模拟结果可知, 两者的曲线发展趋势比较接近, 但现场施工过程中存在的扰动使现场实测数据比数值模拟结果稍大。尽管如此, 仍然可以通过建立的数学模型预测隧道拱顶沉降、拱腰水平位移, 为现场施工提供一定的指导。

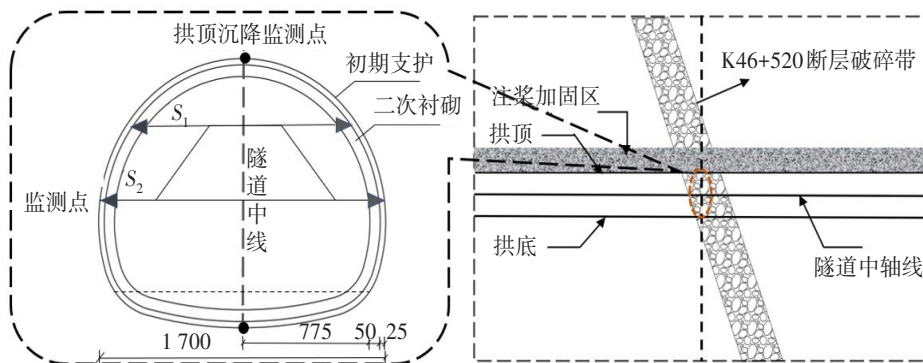


图13 测线布置及监测断面图(单位:mm)

Fig. 13 Layout of measuring lines and monitoring section (unit: mm)

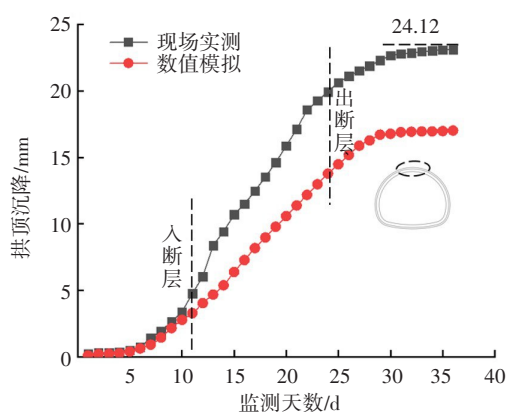


图14 隧道拱顶沉降曲线对比

Fig. 14 Comparison of settlement curves of tunnel crown

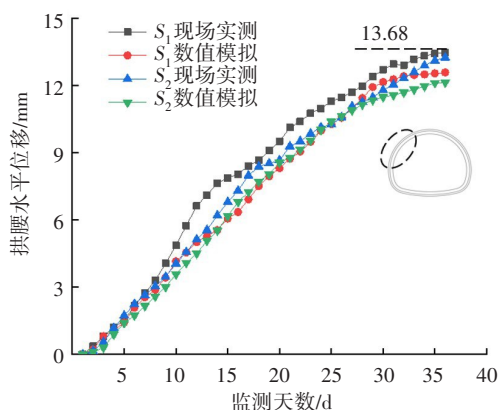


图15 隧道拱腰水平位移曲线对比

Fig. 15 Comparison of horizontal displacement curves of tunnel arch waist

5 结论

1) 采用超前小导管注浆加固隧道穿越的断层破碎带,可以有效控制隧道围岩变形。

2) 与未进行超前小导管注浆加固相比,采用0.5、1.0、1.5 m注浆加固层厚度时,隧道最大拱顶沉降分别减小了11.90%、20.77%、26.96%,隧道围岩最大水平位移分别减小了6.13%、12.03%和16.03%。注浆加固层厚度的增加,对隧道竖向位移尤其是拱顶沉降有明显的加固效果,对隧道围岩水平位移也有所控制,但效果明显差一些。

3) 当采用120°、135°、150°注浆范围进行环向注浆时,隧道最大拱顶沉降分别减小了19.05%、22.37%、26.62%,围岩最大水平位移分别减小了10.63%、16.45%、22.80%。超前小导管注浆范围的扩大对隧道围岩水平位移的影响较大,对隧道拱顶

沉降的影响稍小。

参考文献(References):

- [1] 谢龙, 张德兵, 梁顺. 回采巷道注浆锚索超前支护优化及效果模拟[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(3): 50-60. DOI: 10.13532/j. jmsce. cn10-1638/td. 20220309. 001.
XIE Long, ZHANG Debing, LIANG Shun. Optimisation and simulation of the effect of grouted cable bolts as advanced support in longwall entries [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(3): 50-60. DOI: 10.13532/j. jmsce. cn10-1638/td. 20220309. 001.
- [2] 李术才, 陈红宾, 章冲, 等. 粉质黏土隧道超前支护作用效果研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊2): 287-294. DOI: 10.16285/j. rsm. 2017. S2. 040.
LI Shucai, CHEN Hongbin, ZHANG Chong, et al. Study on the effect of advanced support in silty clay tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(sup 2): 287-294. DOI: 10.16285/j. rsm. 2017. S2. 040.
- [3] 郑书笛, 侯哲生, 宋开忠, 等. 断层破碎带公路隧道超前支护效果研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(6): 210-214. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-1144. 2019. 06. 037.
ZHENG Shudi, HOU Zhesheng, SONG Kaizhong, et al. Advanced support effect of highway tunnel in fault fracture zone [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(6): 210-214. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-1144. 2019. 06. 037.
- [4] 宋战平, 田小旭, 周冠南, 等. 隧道洞内管棚超前预支护力学行为的理论分析[J]. 中国公路学报, 2020, 33(4): 89-98. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372. 2020. 04. 009.
SONG Zhanping, TIAN Xiaoxu, ZHOU Guannan, et al. Theoretical analysis of mechanical behavior of advanced pre-support of pipe-roof in tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(4): 89-98. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372. 2020. 04. 009.
- [5] 王志龙, 王明年, 严志伟, 等. 考虑超前支护作用效应的围岩-支护相互作用机制研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(10): 1748-1755. DOI: 10.3973/j. issn. 2096-4498. 2021. 10. 014.
WANG Zhilong, WANG Mingnian, YAN Zhiwei, et al. Surrounding rock-support interaction mechanism considering effect of tunnel advance supports [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(10): 1748-1755. DOI: 10.3973/j. issn. 2096-4498. 2021. 10. 014.
- [6] 陈志广. 隧道内超前小导管长度确定探讨[J]. 铁道勘察, 2018, 44(5): 62-66. DOI: 10.19630/j. cnki. tdke. 201805210001.
CHEN Zhiguang. Study on the length of leading small

- pipes in tunnel[J]. Railway Investigation and Surveying, 2018, 44 (5) : 62-66. DOI: 10.19630/j. cnki. tdkc. 201805210001.
- [7] 徐剑波, 姜平, 朱颂阳, 等. 基于现场监测和数值模拟的隧道初期支护效果分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(5) : 2061-2069. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.05.053.
- XU Jianbo, JIANG Ping, ZHU Songyang, et al. Analysis of initial support effect of tunnel based on on-site monitoring and numerical simulation method [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20 (5) : 2061-2069. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.05.053.
- [8] 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.
- GONG Linjin, REN Rui, WANG Yaqiong, et al. Analysis on deformation characteristics of surrounding rock of tunnel crossing fault fracture zone with different dip angles[J]. Highway, 2021, 66(7) : 313-319.
- [9] 梁裔举, 高山, 陈璐. 岩溶地区浅埋隧道变形分析及处治[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(2) : 49-54. DOI: 10.116544/j.cnki.cn43-1494/u.20230403001.
- LIANG Yiju, GAO Shan, CHEN Lu. Deformation analysis and treatment of shallow tunnel in karst area[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (2) : 49-54. DOI: 10.116544/j. cnki. cn43-1494/u. 20230403001.
- [10] 张军, 李洪瑶, 樊斌. 六月田隧道岩溶坍塌地段洞内管棚支护稳定性分析[J]. 公路与汽运, 2022(1) : 142-146, 154. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.01.036.
- ZHANG Jun, LI Hongyao, FAN Bin. Stability analysis of pipe shed support in karst collapse section of Liuyuetian tunnel [J]. Highways & Automotive Applications, 2022(1) : 142-146, 154. DOI: 10.3969/j. issn.1671-2668.2022.01.036.
- [11] 刘军安, 李琦, 游黔峰, 等. 强、中风化泥岩地层中超前支护小管幕施工关键技术研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58 (6) : 204-209. DOI: 10.13807/j. cnki. mtt. 2021.06.024.
- LIU Jun'an, LI Qi, YOU Qianfeng, et al. Study on key construction technology of advanced small-pipe curtain support in strongly and moderately weathered mudstone stratum [J]. Modern Tunneling Technology, 2021, 58 (6) : 204-209. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2021.06.024.
- [12] 贾锋. 富水半砂半岩隧道下穿建筑物注浆技术数值模拟研究[J]. 铁道勘察, 2019, 45(1) : 90-95, 101. DOI: 10.19630/j.cnki.tdkc.201810290006.
- JIA Feng. Numerical simulation study on grouting technology in water-rich semi-sand and semi-rock tunnel beneath buildings [J]. Railway Investigation and Surveying, 2019, 45(1) : 90-95, 101. DOI: 10.19630/j. cnki.tdkc.201810290006.
- [13] 孙星亮, 侯永会. 断层破碎带隧道施工过程的三维数值模拟[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(2) : 9-12, 38. DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2006.02.003.
- SUN Xingliang, HOU Yonghui. 3D numerical simulation of tunnel excavation in fragmentized zone at fault [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2006, 19 (2) : 9-12, 38. DOI: 10.13319/j. cnki. sjztdxxbzb.2006.02.003.
- [14] 甘目飞. 隧道穿越压扭性断层段变形处理技术研究[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(4) : 7-12.
- GAN Mufei. Study on deformation processing technique for railway tunnel passing through compression-shear fault[J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(4) : 7-12.
- [15] 李嘉璐, 张微, 杨晓华, 等. 超前全断面与半断面帷幕注浆效果分析[J]. 公路, 2021, 66(2) : 304-311.
- LI Jialu, ZHANG Wei, YANG Xiaohua, et al. Effect analysis of curtain grouting in full-section and half-section in advance[J]. Highway, 2021, 66(2) : 304-311.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:杜雪明)