

断层破碎带公路隧道超前支护效果研究

郑书笛, 侯哲生, 宋开忠, 赵伟通

(烟台大学 土木工程学院 山东 烟台 264000)

摘要: 公路隧道穿过断层破碎带时的超前支护措施研究是隧道开挖过程中的一个重要课题。以某穿过断层破碎带的隧道为例,采用有限元分析软件 MIDAS/GTS NX 进行隧道开挖工序的数值模拟。模型着重分析研究超前小导管、超前小导管注浆以及双层超前小导管注浆对隧道软弱围岩开挖时的支护效果。结果得出双层超前小导管注浆法对隧道周围岩变形量的综合影响相比其他措施更大,其对隧道拱顶的围岩改善效果又明显优于拱腰处。方案研究可对相似地质条件下的公路隧道施工措施提供科学的参考依据。

关键词: 公路隧道;断层破碎带;超前小导管;数值模拟

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)06—0210—05

Advanced Support Effect of Highway Tunnel in Fault Fracture Zone

ZHENG Shudi, HOU Zhesheng, SONG Kaizhong, ZHAO Weitong

(School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai, Shandong 264000, China)

Abstract: Advanced support measures when highway tunnels passing through fault fracture zone is an important issue in tunnel excavation. By taking a tunnel passing through the fault fracture zone as an example, the finite element analysis software GTS NX is used to simulate the tunnel excavation process. The model focuses on the analysis of the support effect of the advanced small pipe, the advanced small pipe grouting and the double-layer advanced small pipe grouting on the excavation of the weak surrounding rock of the tunnel. The results show that the comprehensive effects of the double-layer advanced small pipe grouting on the surrounding rock deformation of the tunnel is larger than other measures, and its improvement effect on the surrounding rock of the tunnel arch is obviously better than that of the waist. The scheme study can provide a scientific reference for the construction measures of highway tunnel under similar geological conditions.

Keywords: highway tunnel; fault fracture zone; advanced small pipe; numerical simulation

作为我国交通网络中重要的组成部分,近年来公路隧道的建设规模越来越大,因此隧道施工过程中遇到的工程地质条件也更加复杂,施工困难和风险也更加严峻^[1-3]。处于断层破碎带区的围岩比较破碎,其强度和稳定性也很差。遇到这类工程地质问题的隧道,必须采取有效的超前施工处理措施^[4-5]。目前主要的超前支护措施有超前锚杆法^[6]、超前长管棚法^[7]、超前小导管法^[8]、水平旋喷注浆法^[9]、机械预切槽法^[10]、冻结法^[11]等。

其中超前小导管适用于地质条件比较软弱的隧

道开挖,且对掌子面的稳定、地表的沉降、围岩的支护与加强都有一定的效果。超前小导管是沿着隧道洞身外轮廓线,采用外径40 mm左右、壁厚3 mm左右的中空小导管以一定的外差角(超前小导管或者双层超前小导管的第一层一般为10°~15°,双层超前小导管第二层一般为40°~45°)打入洞身周围的破碎岩体内,向小导管内打入一定压力的水泥浆液(加入5%左右的水玻璃),其尾端支撑在钢拱架上,与钢拱架组成共同承载结构,以提高围岩承载力和岩体对结构的弹性抗力。现以位于荣成一乌海高速

公路线上的营尔岭隧道工程为依托,采用 MIDAS/GTS NX 软件分析研究隧道开挖时超前小导管、双层超前小导管措施对周边围岩的不同加固效果,定量分析隧道周边围岩的位移以找出最优化方案。

1 工程概况

1.1 隧道概况

营尔岭隧道位于河北省涞源县境内,是荣成—乌海高速公路线路上的重点控制性工程,为左右线分离式双向六车道高速公路,隧道内建筑界限净宽约 14.25 m,净高约 5 m。营尔岭隧道左线大约长 5 656 m,右线大约长 5 677.3 m,全程共有 16 处行人横洞,7 处行车横洞,2 处联络风道,1 处配电洞室,竖井 1 座(高度 98 m,直径 5.2 m)。

1.2 工程地质概况

营尔岭隧道位于中朝准地台燕山沉降带和山西中台隆的结合部位,地质构造较为复杂,隧道穿越区内断层构造发育。前期地质勘查报告表明对隧道围岩影响比较大的断层破碎带主要有 F18、F19 两条,此外还有一条影响比较小的物探推测带。此三条断层的主要结构为构造角砾岩,构造造成地层错位、岩浆岩脉频繁侵入。其中 F18 断层破碎带位于侏罗纪白云岩及安山岩接触处,洞身桩号为 YK103+540,主要为平移断层,走向北北东,倾向北西,倾角大约为 61°,断层构造长约 3 km,影响带宽度大约为 15 m。

1.3 隧道施工设计

F18 断层破碎带范围内的构造角砾岩岩体极为破碎,围岩自稳能力差,按 V 级围岩进行支护,破碎区两侧附近围岩为微风化白云岩和中风化安山岩,爆破震动过大容易导致大塌方且紧邻破碎区,均按 V 级围岩进行支护。破碎区段埋深约为 292 m,属于深埋隧道段,采用双侧壁导坑法开挖,施工过程中初期支护应及时落地封闭,必要时应采取超前支护措施。以喷混、钢筋网、钢拱架、系统锚杆等组成的初期支护与二次衬砌组成复合式衬砌作为隧道的主要支护结构。其中初期支护包括 28 cm 厚 C25 喷射混凝土、双层 $\Phi 8$ 钢筋网(间距 20 cm × 20 cm)、20b 工字钢拱架(纵向间距 60 cm);复合防水层由 350 g/m² 土工无纺布、1.5 mm 厚单面自粘防水板组成,二次衬砌为 60 cm 厚 C30 钢筋混凝土。本工程中双侧壁导坑法的具体施工工序为:①左导坑开挖;②左导坑初支及临支;③右导坑开挖;④右导坑初支及临支;⑤上台阶开挖;⑥拱顶初支;⑦下台阶开挖;⑧仰拱初支;⑨仰拱两侧二衬;⑩仰拱回填。具体衬砌设

计及开挖方法如图 1 所示。

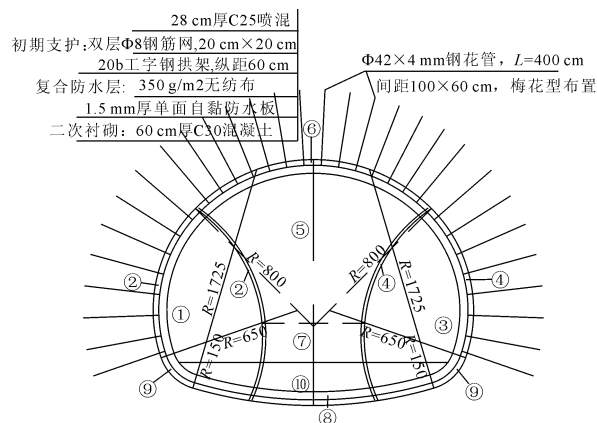


图 1 隧道衬砌设计及开挖工序断面图

超前小导管采用外径 42 mm,壁厚 4 mm 的热轧无缝钢管,钢管前端为尖锥状,尾部与 $\Phi 6$ 加劲箍焊接,管壁四周钻 $\Phi 8$ mm 注浆孔,小导管尾部 70 cm 内不设注浆孔。施工时超前小导管外差角取 15°左右,环向间距 40 cm,超前小导管设计及大样图如图 2、图 3 所示。

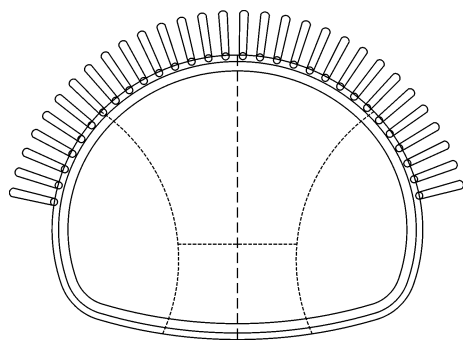


图 2 隧道超前小导管设计图

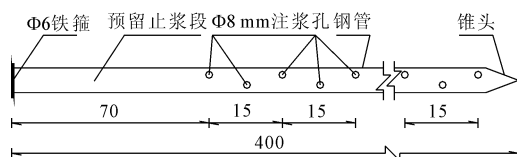


图 3 小导管大样图

浆液注浆参数:水泥浆与水玻璃体积比 1:0.5,水泥浆水灰比 1:1,水玻璃浓度取 35 波美度,水玻璃模数取 2.4。注浆压力:初压 0.5 MPa ~ 1.0 MPa,终压 2.0 MPa。单根管注浆量 Q 计算公式为^[12]:

$$Q = \pi R_k^2 L \eta \alpha \beta$$

式中: R_k 为浆液扩散半径,一般取 $(0.6 \sim 0.7) \times$ 环向间距; L 为小导管长度; η 为围岩空隙率,一般取 25%; α 为浆液填充率,一般取 0.7 ~ 1.0; β 为浆液损耗系数,一般取 1.1 ~ 1.4。

2 隧道建模

2.1 建立模型

模型选取隧道 F18 断层破碎带及附近范围,由圣维南原理^[13]和工程实际可知,在 3 倍~5 倍洞跨外的范围,隧道开挖对周围围岩的应力和应变影响一般很小。因此本模型的尺寸在此范围内选取可满足计算精度要求,最终尺寸选取为 140 m × 130 m × 46 m。拱顶距模型上表面约 72 m,拱底部距模型下表面约 48 m,拱腰距离模型两侧表面约 62.5 m。模型边界约束:隧道模型左右两侧边界约束 T_x 水平方向位移,模型底部边界约束 T_x 、 T_y 、 T_z 三个方向位移,模型前后两个边界约束 T_y 垂直方向位移^[14]。其中断层破碎区位于模型中部,倾角 61° ,隧道洞身破碎区大约位于距进口 16 m ~ 30 m 处,具体模型如图 4、图 5 所示。

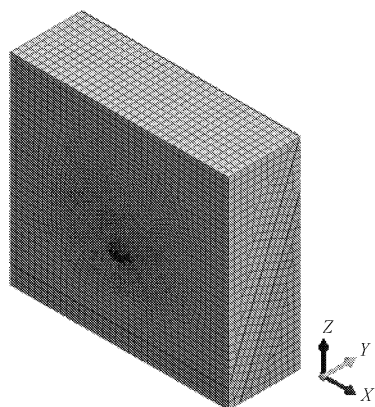


图 4 有限元计算模型

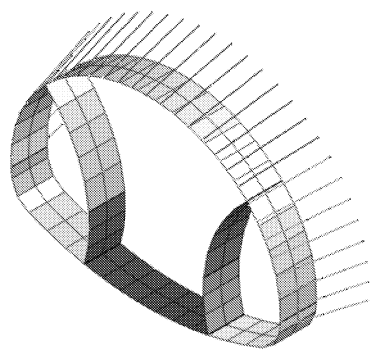


图 5 超前小导管模型图

2.2 计算参数

莫尔-库仑模型按照理想弹塑性定义,广泛应用于模拟岩土材料,对一般岩土非线性分析来说其结果较为可靠。因此本模型中围岩及注浆加固区采用莫尔-库仑本构模型,通过 3D 实体单元模拟。

初期支护、临时支护以及系统锚杆、小导管采用弹性结构模型,其中初支临支通过 2D 板单元模拟,锚杆、小导管通过 1D 植入式桁架模拟。计算参数结合《公路隧道设计规范》^[15](JTG D70—2004)及《公路隧道设计细则》^[16](JTG/T D70—2010),具体如表 1 所示。

表 1 计算参数

材料	γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	E /GPa	μ	c /Pa	Φ /($^\circ$)
破碎区	20.0	0.4	0.39	60	23
中风化安山岩	23.0	1.6	0.35	150	28
加固区	22.0	1.6	0.30	150	35
初支	23.8	31.5	0.21	—	—
临支	23.5	32.5	0.22	—	—
锚杆	78.0	210.0	0.27	—	—
小导管	78.0	210.0	0.27	—	—

3 数值模拟与结果分析

模型按照双侧壁导坑法的开挖顺序进行不同工况的模拟,每一步开挖后及时施作初期支护或超前支护。其中开挖后开挖左导坑 4 m 后开挖右导坑,开挖右导坑 6 m 后开挖上台阶,开挖上台阶 8 m 后开挖下台阶。开挖过程中每一开挖进尺为 2 m,开挖长度为 46 m,一共分为 64 个施工步。具体工况如下:工况 1 无超前支护开挖;工况 2 仅超前小导管支护开挖;工况 3 超前小导管注浆开挖;工况 4 双层小导管注浆开挖。

3.1 开挖完成后围岩变形分析

由于隧道开挖过程中拱腰两侧的水平位移和拱顶的竖向沉降是影响隧道安全的重要因素,现选取四种不同工况下隧道开挖完成后周边围岩的水平位移和竖向位移情况,即最后一个施工步 S64 阶段的最大水平位移和竖向位移分析,最大绝对位移量以及距离隧道进口的具体距离统计如表 2 所示。

由表 2 可知,在距隧道进口 25 m 的左导坑拱底处,四种工况下拱底围岩的最大竖向拱起量均在 32 mm 左右,可见超前小导管、超前小导管注浆以及双层超前小导管注浆对隧道拱底的支护作用很小。

工况 1 与工况 2 相比较,在距离隧道进口 17 m 的右拱腰处,围岩最大水平位移量由 42.79 mm 下降到 27.76 mm,相对降低了 35.13%,效果明显。左拱腰处围岩的最大水平位移由 39.99 mm 减少到

32.42 mm,相比右拱腰仅降低了 18.9%,但最大水平位移位置却由左拱腰 17 m 处转移到左临支 8 m

处。工况 2 下破碎区拱顶的最大沉降比工况 1 下相对降低了 7.41%。

表 2 S64 施工阶段不同工况下围岩位移量及距进口距离

工况	T_{Xmax}	T_{Xmax}	T_{Xmax} 距	T_{Xmin}	T_{Xmin}	T_{Xmin} 距	T_{Zmax}	T_{Zmax}	T_{Zmax} 距	T_{Zmin}	T_{Zmin}	T_{Zmin} 距
	/mm	出现地点	进口距离/m	/mm	出现地点	进口距离/m	/mm	出现地点	进口距离/m	/mm	出现地点	进口距离/m
工况 1	39.99	左拱腰	17	-42.79	右拱腰	17	32.42	左拱底	25	-38.21	拱顶	29
工况 2	32.42	左临支	8	-27.76	右拱腰	17	32.21	左拱底	25	-35.38	拱顶	29
工况 3	28.43	左临支	10	-26.61	右临支	4	32.66	左拱底	25	-21.58	右拱肩	27
工况 4	27.85	左临支	10	-26.24	右临支	4	33.77	左拱底	25	-18.91	左拱肩	46

工况 2、工况 3、工况 4 相比较,从最大绝对位移出现位置来看,工况 2 与工况 3 的处理效果差别较大,而工况 3 与工况 4 的最大绝对位移量以及出现位置两个指标相差几乎不大。工况 3 下,最大水平位移和负向水平位移以及最大竖向位移依次比工况 2 下相对降低了 12.31%、4.14%、39.01%;工况 4 下比工况 3 分别相对降低了 2.04%、1.39%、12.37%。可以看出工况 3 下对围岩的加固效果要明显优于工况 2,而工况 4 下对围岩的加固效果略优于工况 3。但工况 3、工况 4 对隧道拱顶的沉降处理效果要远优于前两种工况,且工况 4 对拱顶的沉降抑制比工况 3 效果更明显。

四种工况下的最大绝对位移只有竖向拱起量这一指标都发生在左拱底 25 m 处,位置基本无变化,除此之外其他情况下的最大绝对变形量以及变形位置两个指标基本都发生了变化。为更好的利用控制变量法进一步研究超前支护措施对最不利点的处理效果,现以工况 1 除拱底之外的三个最不利点为固定参考点,分析这三个最不利点在不同超前支护工况下的水平或竖向位移情况,具体位移量如图 6 所示。

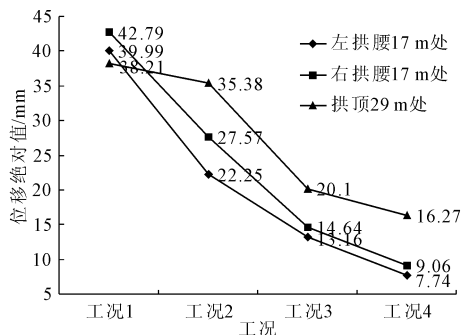
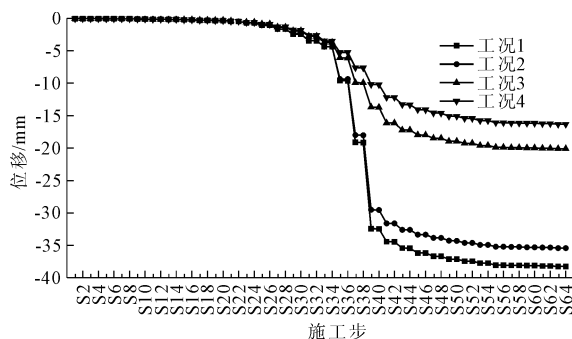


图 6 不同工况下参考点的位移对比

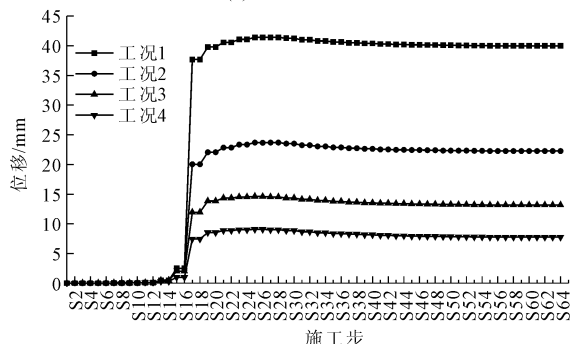
从折线图 6 来看,工况 1 即无任何超前支护情况下拱顶的竖向位移以及左右拱腰的水平移最大,三种超前支护方式对最不利点的处理效果超前小导管注浆要优于仅采用超前小导管,而双层小导管注浆要优于超前小导管注浆。

3.2 开挖过程中不同工况对破碎区的扰动

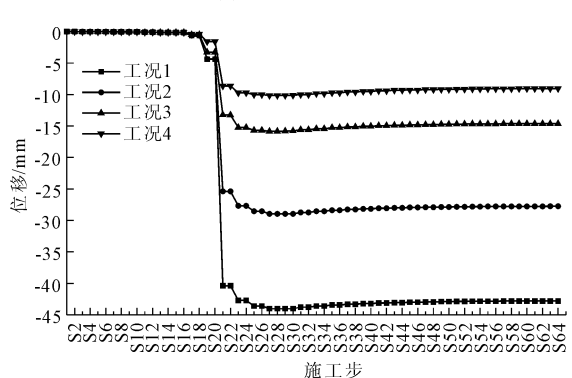
以破碎区内拱顶 29 m 处、左拱腰 17 m 处、右拱腰 17 m 处三个最不利点为例,探究隧道开挖过程中不同超前支护措施对掌子面前方围岩位移的影响。图 7 为隧道开挖过程中破碎区各点位移变化。



(a) 拱顶 29 m 处 Z 方向位移



(b) 左拱腰 17 m 处 X 方向位移



(c) 右拱腰 17 m 处 X 方向位移

图 7 隧道开挖过程中破碎区各点位移变化

由图 7 可知,隧道拱顶 29 m 处开挖是在 S39 阶段,而在 S35 阶段(隧道拱顶 25 m 处)四种工况的竖向位移开始出现较大差异,分别为 -9.57 mm、 -9.31 mm、 -6.03 mm、 -5.17 mm。从 S35 阶段到 S39 阶段工况 3、工况 4 下的竖向沉降相对于工况 1、工况 2 急剧减少,而工况 1、工况 2 的沉降曲线却相差不大,S39 阶段过后四条曲线随着围岩开挖应力重分布后之后逐渐趋于稳定。左、右拱腰 17 m 处的开挖分别在 S17、S21 两个阶段,其中左拱腰水平位移在 S15 阶段(左拱腰 15 m 处)开始出现较大差异,分别为 2.49 mm、 2.48 mm、 1.98 mm、 0.97 mm;右拱腰水平位移在 S18 阶段(右拱腰 14 m 处)开始出现较大差异,分别为 -0.62 mm、 -0.62 mm、 -0.52 mm、 -0.37 mm。

4 结 论

本文以穿过断层破碎带的营尔岭隧道为例,研究分析了超前小导管、超前小导管注浆、双层超前小导管注浆等超前支护措施的支护效果,可以得出以下结论:

(1) 超前小导管、超前小导管注浆以及双层超前小导管注浆等对隧道仰拱处的围岩变形影响较小。

(2) 仅采用超前小导管对极破碎围岩拱腰处的加固效果要优于拱顶处;超前小导管注浆对极破碎围岩拱顶处的加固效果明显优于拱腰处,双层小导管注浆对极破碎围岩拱顶处的沉降处理效果优于超前小导管。

(3) 三种超前支护方式对最不利点的处理效果超前小导管注浆要优于仅采用超前小导管,而双层小导管注浆要优于超前小导管注浆。

(4) 仅采用超前小导管对掌子面前方破碎岩体的加固改善范围较小;超前小导管注浆以及双层超前小导管注浆对掌子面前方 4 m 内的拱顶范围破碎围岩加固改善效果较为明显,而对于拱腰处,掌子面前方 3 m 范围内的围岩加固效果较为明显。

参考文献:

- [1] 张志恩. 富水断层破碎带隧道施工方案及参数优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
- [2] 万 飞,谭忠盛,马 栋. 关角隧道 F2-1 断层破碎带支护结构优化设计[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(3):531-538.
- [3] 张晓勇. 公路隧道断层破碎带围岩变形规律数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(5):192-195,215.
- [4] 关宝树. 软弱围岩隧道变形及其控制技术[J]. 隧道建设,2011,31(1):1-17.
- [5] 王 猛,苏卫强,吕 苑,等. 加固措施对富水断层破碎带隧洞围岩稳定的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(2):200-204.
- [6] 易运洋,李林安. 超前锚杆加固机理的研究[J]. 机械科学与技术,2016,35(8):1241-1246.
- [7] 韩吉坤,侯哲生,顾 洋. 深埋隧道软弱围岩管棚处理效果研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(2):86-91.
- [8] 闵 书. 隧道超前小导管注浆预加固数值分析[D]. 重庆:重庆大学,2013.
- [9] 任 鹏. 水平高压旋喷桩在隧道软弱围岩加固中的应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [10] 张 召. 预切槽法开挖黄土隧道地层变形规律及掌子面稳定性研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [11] 孟庆军,刘东双. 冻结法在富水圆砾地层联络通道施工中的应用[J]. 施工技术,2019,48(7):70-74,79.
- [12] 张 朋,李晓红,卢义玉,等. 小导管注浆技术在浅埋富水岩溶隧道中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2008(3):517-522,560.
- [13] 徐芝纶. 弹性力学简明教程.[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2013.
- [14] MIDAS 理论指南[M]. 北京:北京迈达斯技术有限责任公司,2005.
- [15] 公路隧道设计规范:JTG D70—2004[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [16] 公路隧道设计细则:JTG/T D70—2010[S]. 北京:人民交通出版社,2010.