

断层破碎带公路隧道底鼓小导管注浆数值模拟

李 勇¹, 黄凌君², 兰升元³, 宁赋岩¹

(1. 中铁十八局集团 第二工程有限公司莆炎高速 YA18 合同段项目部, 福建 三明 365004;

2. 三明学院 建筑工程学院, 福建 三明 365004;

3. 三明莆炎高速公路有限责任公司, 福建 三明 365004)

摘 要: 隧道仰拱底鼓危害较大, 处置措施中径向注浆加固较为普遍有效, 为进一步分析断层破碎带地质条件下合理的底鼓小导管注浆长度, 基于某断层破碎带富水泥质粉砂岩公路隧道底鼓全面检测, 分析注浆加固机理及成效, 利用有限元软件 FLAC^{3D} 模拟底鼓在不同长度小导管注浆时围岩竖向位移分布及塑性区变化情况, 结果表明: 径向注浆加固隧道底鼓能改善围岩力学性能, 提高承载力; 对比分析注浆小导管长度, 考虑安全和经济的前提下采用 6.0 m 长度注浆小导管最为合适; 监测结果验证注浆后支护结构渐趋稳定。

关键词: 断层破碎带; 公路隧道; 底鼓; 注浆; 小导管长度; 数值模拟

中图分类号: TU502⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)06—0153—05

Small Pipe Grouting Numerical Simulation in Bottom Drum of Complex Geological Highway Tunnel

LI Yong¹, HUANG Lingjun², LAN Shengyuan³, NING Fuyan¹

(1. Project Department of YA18 Contract Section of Puyan Expressway, China Railway 18th Bureau Group Second Engineering Co., Ltd., Sanming, Fujian 365004, China;

2. School of Construction Engineering, Sanming College, Sanming, Fujian 365004, China;

3. Sanming Puyan Expressway Co., Ltd., Sanming, Fujian 365004, China)

Abstract: The inverted bottom heave of the tunnel is more harmful, and the radial grouting reinforcement is generally effective in the disposal measures. In order to further analyze the reasonable grouting length of the small pipe in the bottom heave under the geological conditions of the fault fracture zone, based on a certain fault fracture zone rich in cementitious siltstone the bottom heave of the highway tunnel was comprehensively inspected, the mechanism and effect of grouting reinforcement were analyzed and the finite element software FLAC^{3D} was adopted to simulate the vertical displacement distribution of surrounding rock and the change of plastic zone when the bottom heave was grouted with small pipes of different lengths. The results are as follows. Radial grouting Reinforcing the bottom heave of the tunnel can improve the mechanical properties of the surrounding rock and increase the bearing capacity. Comparative analysis of the length of the grouting small pipe adopts five types of reinforcement, the 6 m length of grouting is adopted under the premise of safety and economy. Grouting small ducts are the most suitable; the monitoring results verify that the supporting structure gradually stabilizes after grouting.

Keywords: fault fracture zone; highway tunnel; floor heave; grouting; small pipe length; numerical simulation

收稿日期: 2020-08-13

修稿日期: 2020-09-09

基金项目: 中铁十八局集团第二工程有限公司研究项目(2-JF-2019-莆炎高速 YA18-2-002); 三明市科技计划项目(2019-S-30)

作者简介: 李 勇(1985—), 男, 河北唐山人, 工程师, 主要从事隧道掘进与安全管理方面的工作。E-mail: 857081543@qq.com

通讯作者: 黄凌君(1982—), 男, 三明建宁人, 硕士, 主要从事城市地下工程方面的工作。E-mail: 120565165@qq.com

表 1 石林隧道仰拱背后围岩扰动情况统计表

测段	桩号	探测位置	扰动情况/m		天线类型	备注
			实际探测深度	扰动深度范围		
1	YK14+230—YK14+350	仰拱中部	15	3.4~7.5	100M	扰动范围内围岩破碎,见有多条破碎带和脱空带。
2	YK14+230—YK14+260	仰拱中部	5	2.3~3.4	500M	扰动范围内围岩破碎,多见约 4.5~7.5 cm 左右的脱空带。

由雷达波形图和表 1 看出隧道底鼓段仰拱背后围岩存在扰动,在 2.3 m~7.5 m 范围内围岩扰动明显。

2.3 病害成因评价

通过相关资料分析,底鼓段围岩松散破碎,风化彻底。地下水频繁导致富含黏土矿物伊利石的围岩膨胀,加之穿越断层带等复杂构造下支护体系受力不均影响造成仰拱软弱围岩通过开挖形成的自由面挤压隆起,使得该隧道底鼓成为集多种成因的综合性底鼓。

3 底鼓注浆加固机理

隧道底鼓段治理采用基础径向小导管注浆后更换仰拱的方式,注浆前需铲除原先的 C15 片石混凝土仰拱回填,然后穿越原仰拱二衬采用一定长度小导管开展施工作业。注浆加固机理如下:

(1) 底鼓段仰拱基础围岩原先存在的裂缝是相互连通的,通过注浆使得节理填充成骨架,围岩块体粘结性加强,从而大大增加整体性,一定程度上降低围岩扰动。

(2) 经注浆填充,不易形成围岩受力集中现象,有效改善仰拱基础应力状态,减少塑性区域,避免局部破坏。

(3) 小导管注浆后浆液扩散并凝固,可以封闭原有导水裂隙,削弱富含黏土矿物的底鼓段强风化石英砂岩和千枚状粉砂岩膨胀软化。

(4) 有效提升底板围岩强度,避免断层带等复杂构造下支护体系受力不均从而使围岩挤压流动导致隆起。

4 数值模拟分析

4.1 建立模型

采用 FLAC^{3D} 程序进行数值模拟,发生底拱位置

实际埋深为 80 m,故本次模拟该深度隧道施工过程。注浆小导管长度先采用 4 m、5 m、6 m 和 7 m 加固等四种方案。围岩和隧道结构采用实体单元模拟,注浆小导管采用直径 Φ50、环向间距 0.8 m 的 Cable 单元模拟,假定钢管与注浆区无相对滑移。断层破碎带采用程序独特的接触面命令 Interface 实现,接触面采用无厚度单元,本构模型为库仑剪切模型。

4.2 计算参数确定

依据地勘资料对计算模型参数进行取值,围岩考虑砂土状强风化石英砂岩夹千枚状粉砂岩和弱风化灰岩两种,仰拱段主要是弱风化灰岩。采用小导管注浆后围岩参数资料现场缺乏,可参考文献[10]取值,注浆后围岩的弹性模量和黏聚力分别提高 50%。断层接触面围岩较为软弱^[15],黏聚力按灰岩 1/20 选取,内摩擦角按灰岩 1/2 选取,计算参数见表 2。

表 2 围岩及支护结构物理力学参数

材料类型	重度 γ /(kN·m ⁻³)	泊松比	弹性模量 /GPa	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /MPa
围岩 1(砂岩)	21.5	0.31	3.50	32.0	0.500
围岩 2(灰岩)	19.0	0.40	0.67	19.0	0.370
注浆后围岩 2(灰岩)	20.5	0.37	1.00	36.0	0.550
仰拱回填	24.0	0.21	19.50	—	—
初期支护	23.5	0.24	21.80	—	—
二次衬砌	22.0	0.22	29.80	—	—
锚杆	78.0	0.30	22.00	—	—
断层接触面	刚度为 2 GPa/m			9.5	0.018

4.3 计算结果分析

考虑篇幅因素,选取有代表性的围岩竖向位移和围岩塑性区进行分析。

4.3.1 围岩竖向位移分析

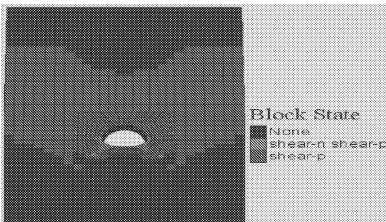
分析仅换拱但未施加注浆小导管条件下、注浆小导管先考虑 4 m、5 m、6 m 和 7 m 等四种方案。

仅换拱但未施加注浆小导管条件下,隧道顶部围岩最大竖向位移为 -52.40 mm,沉降较大,隧道仰拱位置围岩的最大竖向位移为 61.93 mm,隆起量较大;注浆小导管长度为 4 m 条件下,隧道顶部围岩最大竖向位移为 -52.17 mm,隧道仰拱位置围岩的最大竖向位移为 61.52 mm,较前一工况更小,但变形依然明显;注浆小导管长度为 5 m 条件下,隧道顶部围岩最大竖向位移为 -52.15 mm,隧道仰拱位置围岩的最大竖向位移为 60.22 mm,较前一工况略有

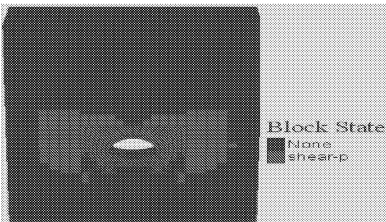
改善;注浆小导管长度为 6 m 条件下,隧道顶部围岩最大竖向位移为 -6.30 mm,沉降有较大减小,隧道仰拱位置围岩的最大竖向位移为 35.20 mm,隆起量也有较大减小;注浆小导管长度为 7 m 条件下,隧道顶部围岩最大竖向位移为 -6.30 mm,隧道仰拱位置围岩的最大竖向位移为 35.20 mm,竖向位移峰值和注浆小导管长度为 6 m 的情况相等。

4.3.2 围岩塑性区分析

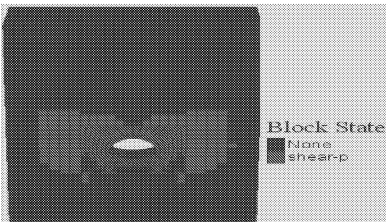
仅换拱但未施加注浆小导管条件下、注浆小导管先考虑 4 m、5 m、6 m 和 7 m 等四种方案条件下围岩塑性区分布图见图 4。



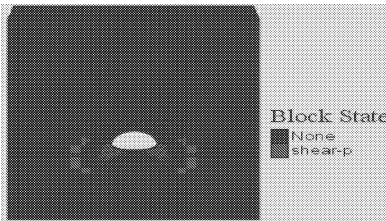
(a) 仅换拱未施加注浆小导管



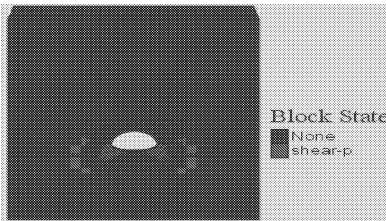
(b) 施加4m长注浆小导管



(c) 施加5m长注浆小导管



(d) 施加6m长注浆小导管



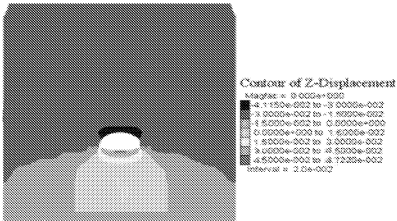
(e) 施加7m长注浆小导管

图 4 围岩塑性区分布图

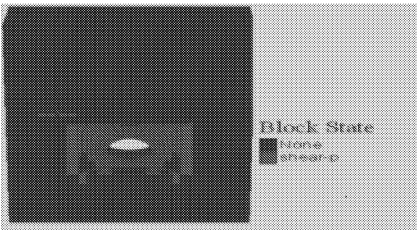
仅换拱但未施加注浆小导管条件下,隧道拱顶到拱腰范围内其围岩未出现剪切破坏,但是仰拱局部部位其围岩出现了剪切破坏;注浆小导管长度为 4 m 条件下,隧道围岩未出现剪切破坏,塑性分布较前一工况有了改善;注浆小导管长度为 5 m 条件下塑性区和上一工况相似;注浆小导管长度为 6 m 条件下隧道围岩未出现剪切破坏,塑性分布有较大改善;施加注浆小导管长度为 7 m 后,相对于注浆小导管长度为 6 m 的情况,隧道围岩的塑性分布几乎相等。

4.3.3 小导管长 5.5 m 时围岩竖向位移和塑性区分析

根据以上计算结果,注浆小导管长度为 6.0 m 条件下,围岩位移与塑性区分布较 5.0 m 条件明显改善,为了进一步分析,取小导管长度为 5.5 m 计算,所得围岩竖向位移分布云图和围岩塑性区分布图见图 5。



(a) 围岩竖向位移分布云图



(b) 围岩塑性区分布图

图 5 小导管 5.5 m 时围岩竖向位移和塑性区分布图

注浆小导管长度为 5.5 m 条件下,隧道顶部围岩最大竖向位移为 -41.1 mm,沉降较 5.0 m 小导管有一定减小,隧道仰拱位置围岩的最大竖向位移为 47.2 mm,隆起量也有一定量减小,位移开始进入变化明显阶段,但不如 6.0 m 小导管效果;注浆小导管长度为 5.5 m 条件下隧道围岩未出现剪切破坏,塑性分布较 5.0 m 小导管时有一定改善,也不如 6.0 m 时明显。

4.3.4 计算结果小结

由以上计算结果可以发现仅换拱但未施加注浆小导管条件下,隧道顶部围岩沉降较大,仰拱位置隆起量偏大,隧道拱顶到拱腰范围内其围岩未出现剪

切破坏,但是仰拱局部部位其围岩出现了剪切破坏。隧道围岩位移分布特性的改善作用有限,因此有必要在换拱的基础上施加注浆小导管,以改善隧道围岩和衬砌的位移及主应力分布特性;在仅换拱的基础上先施加注浆小导管(长度为 4.0 m)后,隧道围岩的最大竖向位移略有减小,隧道围岩的塑性分布也有改善;当注浆小导管增长为 5.0 m 后,相对于 4.0 m 的情况,隧道围岩仰拱位置竖向位移减小了 2.1%,两种长度对隧道围岩塑性分布的改善效果几乎相等;当注浆小导管增长为 6.0 m 后,相对于 5.0 m 的情况,隧道围岩仰拱位置竖向位移减少 42.5%,变化明显,且隧道围岩的塑性分布也改善较大;当注浆小导管增加为 7.0 m 后,相对于 6.0 m 的情况,两种长度对隧道围岩的位移和塑性分布改善效果几乎相等;当注浆小导管长度为 5.5 m 时,围岩竖向位移仰拱位置较 5.0 m 时减少 21.5%,位移开始进入明显变化阶段,隧道围岩的塑性分布也有一定改善,但不如 6.0 m 小导管。

对比分析注浆小导管长度采用 4.0 m、5.0 m、5.5 m、6.0 m 和 7.0 m 加固等五种方案,考虑到安全和经济的前提下,对于本工程采用 6.0 m 长度的注浆小导管是最为合适的。

5 现场监控量测

为验证小导管注浆措施实施前后过程中隧道稳定性,对 YK14 + 260—YK14 + 320 底鼓灾害段范围进行隧道路基仰拱应力、围岩压力监测及填充层底鼓变形观测。

5.1 路基仰拱应力及围岩压力监测

为掌握加固后型钢的变形动态,对更换仰拱进行了监测,选择 YK14 + 272 断面同步安装了压力盒及钢筋计,安装压力盒 1 只,钢筋计 2 根,压力盒紧贴仰拱下翼缘底面,钢筋计两端与仰拱上翼缘朝上面焊接,如图 6—图 8 所示。



图 6 压力盒及钢筋计埋设图

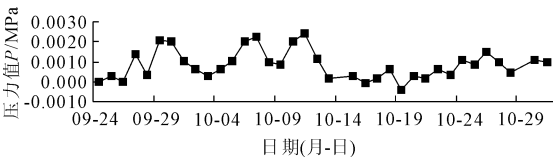


图 7 隧道右线 YK14 + 272 断面压力盒曲线图

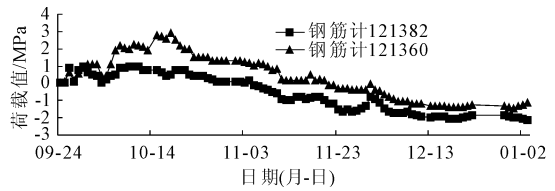


图 8 隧道右线 YK14 + 272 断面钢筋计曲线图

由图可知混凝土回填过程中对仪器有所扰动,压力盒和钢筋计监测数据存在一些变化。从总体上看,压力盒数据波动较稳;121382 和 121360 两根钢筋计应力值变化趋势相似,都由原来的微小拉应力转变为微小压应力,数值均较小,监测应力—时间曲线比较平稳。

5.2 填充层底鼓变形观测

针对路基隆起及开裂实际情况,进行了路基隆起监测,路面的中心点共布设 9 个断面,每断面 3 个测点,共计 27 个测点,如表 3 所示。

表 3 石林隧道右线路基隆起测点里程及测点编号

测点里程	左侧测点 编号	中心线测 点编号	右侧测点 编号
YK14 + 240	L1	Q1	R1
YK14 + 255	L2	Q2	R2
YK14 + 265	L3	Q3	R3
YK14 + 280	L4	Q4	R4
YK14 + 290	L5	Q5	R5
YK14 + 300	L6	Q6	R6
YK14 + 315	L7	Q7	R7
YK14 + 325	L8	Q8	R8
YK14 + 340	L9	Q9	R9

通过结果分析,在监测断面中,仅个别断面因二次应力调整路基隆起较明显,具有代表性的测点编号为 Q4、Q5,累积隆起分别为 12.2 mm 和 10.2 mm,但在后续的监测中两断面未出现继续增大的趋势,只有轻微的隆起。而其他断面路基隆起位移变化较小,综合分析说明隧道围岩内部二次应力在长时间内不断地调整,变形有逐渐趋于稳定的迹象。

6 结 论

通过对项目隧道底鼓治理分析,得到如下结论:
(下转第 171 页)

桩身内力及变形数值分析[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(3):629-636.

[11] 李 波,曾亮亮,任东伟,等. 某路堑高边坡稳定性评价及优化设计[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):115-121.

[12] 杨校辉,朱彦鹏,周 勇,等. 山区机场高填方边坡滑移过程时空监测与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(S2):3977-3990.

[13] 王衍汇,倪万魁,石博溢,等. 延安新区黄土高填方边坡稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(5):52-56.

[14] 张 硕,裴向军,黄润秋,等. 黄土高填方坡体加载过程变形 - 力学响应特征研究[J]. 工程地质学报,2017,25(3):657-670.

[15] 魏恺鸿,裴向军,张世殊,等. 基于 IBIS - L 的某黄土高填方边坡支护结构变形特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2018,48(5):1556-1565.

[16] 朱彦鹏,陶 钧,杨校辉,等. 框架预应力锚托板结构加固高填方边坡设计与数值分析[J]. 岩土力学,2020,41(2):612-623.

[17] 高填方地基技术规范:GB 51254—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社出版,2018.

[18] 铁路路基支挡结构设计规范:TB 10025—2006[S]. 北京:中国铁道出版社,2006.

[19] 王家全,陆梦梁,周岳富,等. 土工格栅纵横肋的筋土承载特性分析[J]. 岩土工程学报,2018,40(1):186-193.

[20] 陈 榕,李 博,郝冬雪,等. 基于黏聚力模型的土工格栅筋土界面作用模拟方法[J]. 岩土工程学报,2020,42(5):934-940.

[21] 土工合成材料 塑料土工格栅:GB/T 17689—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社出版,2008.

[22] 郑建国,曹 杰,张继文,等. 基于离心模型试验的黄土高填方沉降影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(3):560-571.



(上接第 157 页)

(1) 隧道底鼓所处地质条件及应力状态较复杂,采用有限元分析方法是可行的。

(2) 径向注浆加固隧道底鼓能改善围岩力学性能,提高承载力。

(3) 对比分析注浆小导管长度采用 4.0 m、5.0 m、5.5 m、6.0 m 和 7.0 m 加固等五种方案,考虑安全和经济的前提下采用 6.0 m 长度注浆小导管最为合适。

(4) 监测结果验证注浆后隧道支护结构渐趋稳定。

参考文献:

[1] 贺建清,李和志,赵永清,等. 底鼓隧道的底板支护锚杆长度确定方法[J]. 自然灾害学报,2012,21(6):214-220.

[2] 王正胜,李建忠,林 健,等. 深部高应力富水黏土软岩大巷底鼓机理及控制技术[J]. 煤炭科学技术,2020(1):11-21.

[3] 张田涛,张淮漪. 隧道仰拱底鼓产生的关键点及控制方法研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(6):162-166.

[4] 曹力铭,袁 超,王卫军,等. 采动影响下暗斜井机头大断面硐室底鼓治理技术[J]. 矿业工程研究,2019,34(4):44-52.

[5] 张 建,梁庆国,王永刚,等. 黄土隧道底鼓机理分析与防治技术[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2020(7):

84-90.

[6] 屈小七,孟陆波. 软岩隧道底鼓变形机理及防治措施综述[J]. 人民长江,2019,50(S2):143-148,215.

[7] 高 登. 某高速公路隧道底鼓原因分析及处治措施研究[J]. 公路,2019,64(3):326-331.

[8] 王文才,王 政,尹 旭,等. 底板注浆及帮角锚杆加固技术控制巷道底鼓研究[J]. 煤炭技术,2019,38(4):6-9.

[9] 秦玄烨,张英华,王晶晶,等. 基于数值模拟的软岩巷道底鼓机理实验研究[J]. 矿业研究与开发,2019,39(9):51-56.

[10] 王进博,黄 滚,唐建新,等. 水平层状页岩隧道底鼓机理及处治技术[J]. 安全与环境学报,2017,11(6):2246-2251.

[11] 牛德林. 关家崖矿回风大巷底鼓支护方案应用研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2017.

[12] 孟令宝. 南吕梁山隧道底鼓机理及整治措施研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2017.

[13] 徐嵩基,王育奎. 公路软岩隧道底鼓注浆加固厚度数值模拟[J]. 山东交通学院学报,2016,24(3):60-66.

[14] 王 猛,苏卫强,吕 苑. 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.

[15] 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.