

节理发育岩体大跨公路隧道锚杆支护参数研究*

郑斌¹, 谢尚邨¹, 杨昕^{2,3}, 桑运龙^{2,4}, 吴建勋⁵

(1.宁波市北仑区交通工程建设管理中心, 浙江 宁波 315800; 2.上海同岩土工程科技股份有限公司, 上海 200092;
3.上海地下基础设施安全检测与养护装备工程技术研究中心, 上海 200092; 4.同济大学 土木信息技术教育部
工程研究中心, 上海 200092; 5.上海同济检测技术有限公司, 上海 200092)

摘要: 针对节理发育岩体的单洞三车道大跨公路隧道, 以宁波将军山隧道为工程背景, 通过离散元手段考虑岩体的非连续力学行为, 分析锚杆环向布置范围、环向间距、径向长度对隧道围岩稳定性及支护结构受力的影响, 以围岩变形、塑性区、锚杆轴力为评价基准, 得到较优的锚杆支护方案。结果表明, V 级围岩节理发育岩体隧道拱顶超前注浆环向布置 210° 、间距 1.0 m、长度 4.0 m 的系统锚杆支护较合理。

关键词: 隧道; 节理发育岩体; 锚杆参数; 围岩稳定性

中图分类号: U452.2

文献标志码: B

文章编号: 1671-2668(2019)04-0146-06

近年来, 国内外地下工程发展迅速, 越来越多的能源、交通、矿山、水利工程在山岭地区兴建。但地下工程施工条件复杂, 支护体系要求高。针对地下工程的常用支护方法即锚杆支护, 郭吉平通过数值模拟与现场监测, 综合分析、优化了不同锚杆支护体系参数; 肖明清等通过建立初期支护荷载结构模型和对应的安全系数计算方法, 提出了高铁隧道支护参数优化值; 潘锐等建立锚固体—围岩界面力学分析简化模型, 通过室内试验与现场试验确定了注浆锚杆最优支护参数; 朱家锐等通过现场试验与正交试验分析锚喷网支护的影响因素, 确定了锚喷网最优支护参数; 谭显坤等运用剪切滑移理论分析了隧道锚喷支护力学效应和锚喷支护失效原因。在实际工程中, 节理的发育对岩体力学参数与围岩稳定性影响很大, 而现行锚杆支护参数研究中考虑节理参数的较少, 导致研究成果与工程现场实际存在偏差, 无法直接应用于工程实际。该文依托浙江宁波穿山疏港高速公路梅山保税港区连接线中的将军山隧道, 结合现场地质素描、数值模拟、现场监测数据, 基于节理发育情况对隧道锚杆支护参数进行优化。

1 工程概况与围岩节理特征

1.1 工程概况

将军山隧道全长 1 375 m, 主要穿越强~微风

化晚侏罗统西山头组凝灰岩地层, 节理裂隙发育, 设计采用分离式双向六车道, 净空断面宽度为 16.80 m, 高度为 10.85 m, 属于大跨度隧道。

针对隧道左幅洞口 V 级围岩段 ZK7+693—725 进行研究, 隧道埋深 18~30 m。进行三心圆断面开挖, 采用 $\phi 25$ 中空注浆锚杆(长 4.5 m、纵向 \times 环向间距 0.5 m \times 1 m)、C25 喷射砼、I20b 工字钢钢架(间距 0.5 m)、 $\phi 6.5$ 钢筋网、2 层初期支护(26 cm+20 cm)、二次衬砌厚度 55 cm、预留变形量 17 cm 的支护方案(见图 1)。

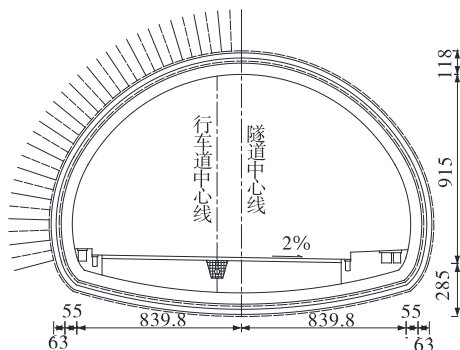


图 1 隧道支护设计方案示意图(单位:cm)

1.2 围岩节理特征

对 ZK7+693—725 段进行节理特征(倾角、倾向、迹长、间距)采集, 通过统计分析绘制节理极点等密度图(见图 2)。从图 2 来看, 该段隧道有 2 组优

* 基金项目: 宁波市交通运输科技项目(201406); 国家自然科学基金项目(51478342); 深圳市交通公用设施建设中心交通建设工程课题(20160318002B)

势发育节理。运用正态分布拟合优势节理参数,结果见表 1。根据断面优势节理参数进行断面节理重构,实现精细化描述(见图 3)。

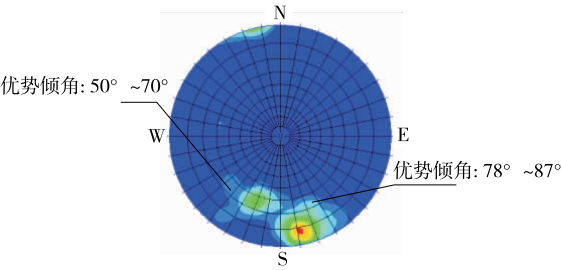


图 2 节理极点密度图

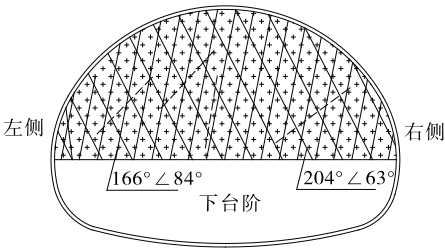


图 3 隧道开挖断面节理重构图

表 1 隧道断面优势节理参数

分组 编号	倾向正态 拟合分布 参数 $\theta/(^{\circ})$	倾向正态 拟合分布 参数 $\theta/(^{\circ})$	迹长正态 拟合分布 参数 L/m	间距正态 拟合分布 参数 D/m
I	84.3	166.2	6.28	0.4
II	63.5	204.4	5.47	0.6

2 考虑节理特征的隧道开挖模拟

2.1 计算模型及工况

根据该隧道 V 级围岩节理特征,采用离散元软件 UDEC 建立计算模型。采用上下台阶法模拟开挖,考虑地下洞室的边界影响范围,上边界取至地表约 20 m,左右两侧及下边界取 3 倍洞径;左右两侧施加水平向约束,底部施加竖向约束(见图 4)。

2 层初期支护之间的接触采用绑定约束,研究锚杆环向布置范围、锚杆间距、锚杆长度等支护参数对隧道围岩稳定性的影响,分析不同锚杆支护参数下隧道围岩的变形规律。锚杆支护设计参数计算工况见表 2。

2.2 参数选取

岩体与节理面均采用 Mohr—Coulomb 模型,参照地质勘察报告、JTG D70—2004《公路隧道设计规范》等选取 V 级围岩、节理、喷射砼及锚杆参数(见

表 3~6)。

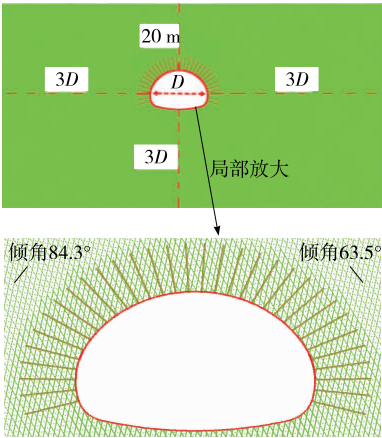


图 4 隧道模拟计算模型

表 2 锚杆支护设计参数计算工况

工况 编号	锚杆环向布置 范围/(°)	锚杆间 距/m	锚杆长 度/m	开挖工法
1	90	1.0	4.5	上下台阶法
	120			
	180			
	210(原设计方案)			
2	210	0.8	4.5	上下台阶法
		1.0		
		1.2		
		1.4		
3	210	1.0	3.0	上下台阶法
			3.5	
			4.0	
			4.5	

表 3 围岩块体参数

项目	参数值
密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	1 900
弹性模量/GPa	1.5
泊松比	0.4
粘聚力/kPa	130
内摩擦角/ $(^{\circ})$	24

表 4 围岩节理面参数

项目	参数值
法向刚度/ $(GPa \cdot m)$	9
切向刚度/ $(GPa \cdot m)$	3
粘聚力/kPa	50
内摩擦角/ $(^{\circ})$	22
抗拉强度/kPa	0

表5 喷射砼参数

项目	参数值
密度/(kg·m ⁻³)	2 200
泊松比	0.2
弹性模量/GPa	23
抗压强度/MPa	13.5
抗拉强度/MPa	1.3
残余强度/MPa	0.55

表6 锚杆参数

项目	参数值
截面积/m ²	4.9×10 ⁻⁴
密度/(kg·m ⁻³)	7 857
极限拉应变	0.01
抗压极限/kN	164
抗拉极限/kN	164
弹性模量/GPa	210

考虑初期支护中含有钢筋、钢拱架等材料,将钢拱架等效成等厚砼,利用抗弯等效原则进行刚度叠加,公式如下:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = E_3 I_3 \quad (1)$$

式中: E_1 、 I_1 分别为砼的弹性模量和惯性矩; E_2 、 I_2 分别为钢拱架的弹性模量和惯性矩; E_3 为等效弹性模量。

3 计算结果分析

3.1 锚杆环向布置范围影响分析

3.1.1 围岩变形

图5为不同范围锚杆支护下围岩竖向变形云图。由图5可知:不同锚杆支护范围下隧道竖向位移整体表现为拱顶沉降、拱底隆起,沉降量从拱顶到

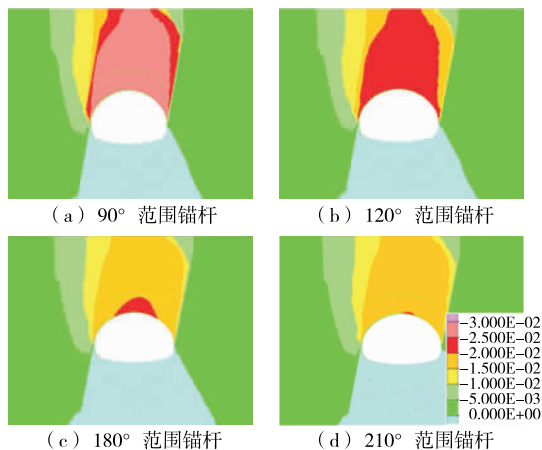


图5 不同锚杆布置范围下围岩竖向变形云图(单位:m)

地表逐渐减小,拱底隆起量从拱底到围岩深处逐渐减小,水平位移最大值出现在左、右边墙处。

图6为锚杆布置范围与地表、拱顶沉降的关系。由图6可知:隧道地表和拱顶沉降均随锚杆支护范围的增大而减小,在拱顶90°范围内支护时,拱顶沉降最大为28.96 mm。隧道拱顶超前注浆加系统锚杆工况(环向布置范围210°)下拱顶沉降最小,为20.1 mm,比90°、120°、180°范围锚杆支护分别减小44.1%、17.3%、3.3%。

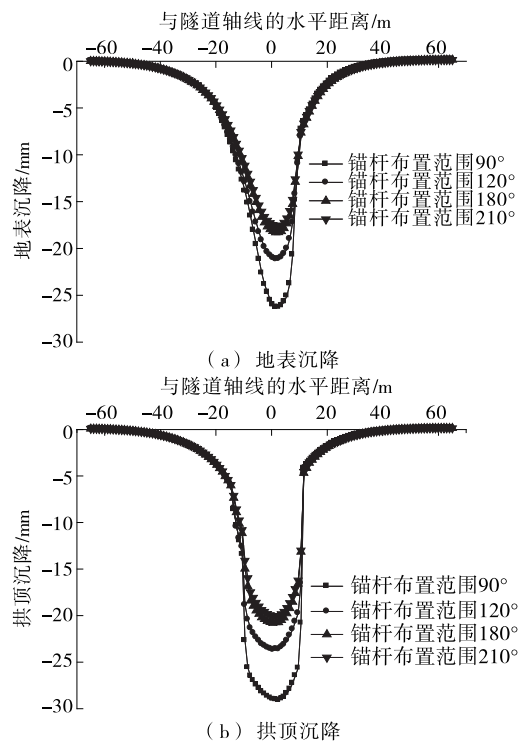


图6 锚杆布置范围与地表、拱顶沉降的关系

图7为锚杆布置范围与隧道收敛变形的关系。由图7可知:与隧道沉降变化规律类似,隧道收敛变形随着锚杆布置范围的增大而减小,隧道拱顶注浆加系统锚杆工况下收敛变形最小,为15.4 mm。

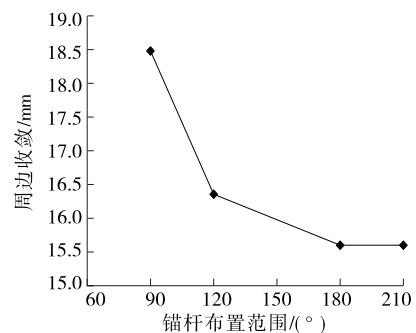


图7 锚杆布置范围与隧道收敛变形的关系

3.1.2 围岩塑性区

围岩屈服块体数量反映围岩塑性区范围的大小,其与锚杆环向布置范围的关系见图8。由图8可知:围岩屈服块体数量随着锚杆布置范围的增大而减小,锚杆支护范围 90° 时数量最大,为4 394块;拱顶超前注浆加系统锚杆工况下围岩屈服块体数量最小,为3 967块,比 90° 工况减小10.7%。

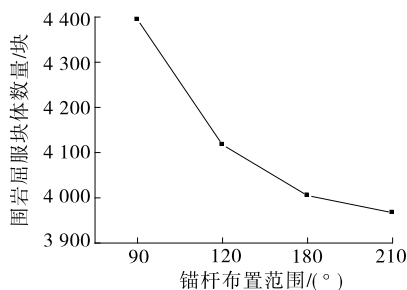


图8 围岩屈服块体数量与锚杆环向布置范围的关系

3.1.3 锚杆轴力

不同锚杆布置范围下锚杆轴力见图9。由图9可知:环向布置范围 120° 工况下锚杆轴力最大,为103.2 kN;布置范围为 90° 时锚杆最大轴力较小,其他3种工况下锚杆最大轴力接近,锚杆受力合理。

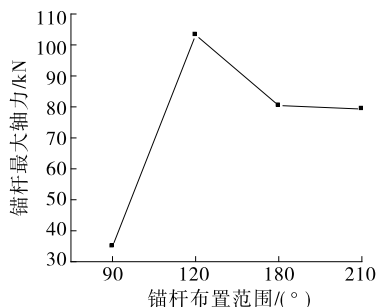


图9 锚杆最大轴力与环向布置范围的关系

3.2 锚杆环向间距影响分析

在锚杆环向分布范围为 210° 、锚杆长度为4.5 m的条件下,锚杆间距分别选取0.8、1.0、1.2、1.4 m进行锚杆环向间距优化分析。

3.2.1 围岩变形

锚杆间距与地表、拱顶沉降的关系见图10。由图10可知:隧道地表、拱顶沉降随锚杆支护间距的增加而增加,锚杆间距为0.8 m时隧道拱顶沉降最小,为19.72 mm,比锚杆间距1.4 m(沉降最大)时减小11%。

锚杆间距与隧道收敛变形的关系见图11。由图11可知:隧道收敛变形随着锚杆间距的增大而增加,但锚杆间距为1.0、1.2、1.4 m的工况下周边收敛

位移接近。

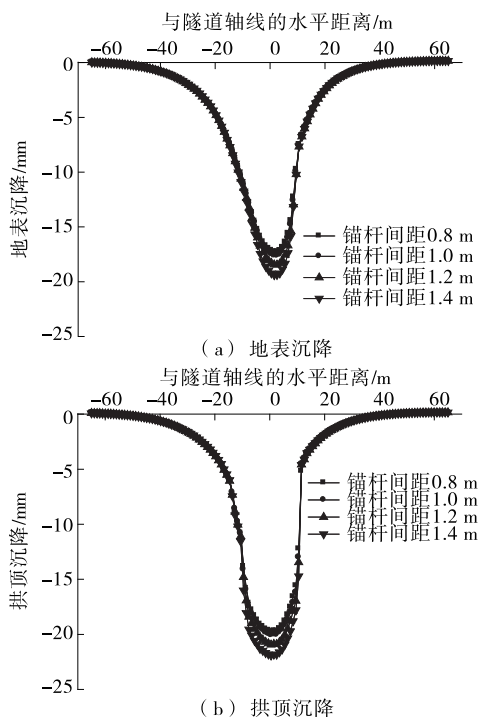


图10 锚杆间距与地表、拱顶沉降的关系

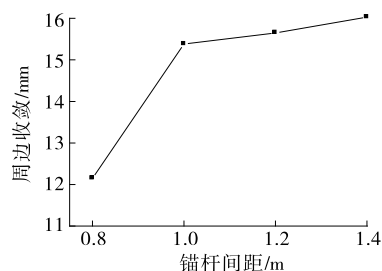


图11 锚杆间距与隧道收敛变形的关系

3.2.2 围岩塑性区

围岩屈服块体数量与锚杆环向间距的关系见图12。由图12可知:围岩屈服块体数量随着锚杆间距的增大而增大,锚杆间距0.8 m工况下围岩屈服块体数最小,为3 890块,比锚杆间距1.4 m工况减小5.9%。

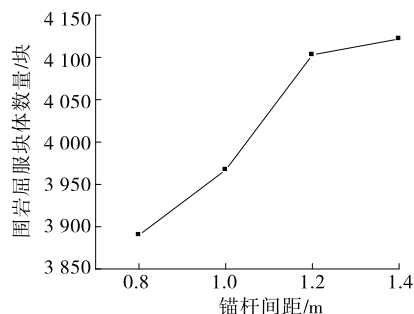


图12 围岩屈服块体数量与锚杆环向间距的关系

3.2.3 锚杆轴力

锚杆最大轴力与锚杆环向间距的关系见 13。由图 13 可知:锚杆最大轴力随着锚杆间距的增大而增大,环向间距 0.8 m 工况下锚杆最大轴力最小,为 71.86 kN。

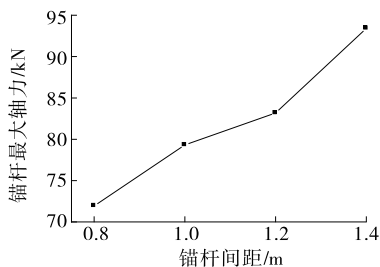


图 13 锚杆最大轴力与锚杆环向间距的关系

基于隧道围岩变形、围岩塑性区及锚杆轴力进行综合分析,锚杆间距 0.8 及 1.0 m 的支护形式优于 1.2、1.4 m 的支护形式,锚杆间距 0.8、1.0 m 工况下围岩变形、塑性区、锚杆轴力等较接近,但锚杆间距 1.0 m 较经济合理,建议采用隧道拱顶超前注浆系统锚杆、锚杆间距 1.0 m 的方式进行支护。

3.3 锚杆径向长度影响分析

在锚杆环向分布范围为 210° 、锚杆间距为 1.0 m 的条件下,锚杆长度分别选取 3.0、3.5、4.0、4.5 m 进行锚杆长度优化分析。

3.3.1 围岩变形

锚杆长度与地表、拱顶沉降的关系见图 14。由图 14 可知:隧道地表、拱顶沉降随锚杆支护长度的增大而减小,锚杆长度 4.5 m 工况下拱顶沉降最小,为 2.01 mm,比锚杆长度 3.0 m 工况(沉降最大)减小 10.4%。

图 15 为锚杆长度与隧道收敛变形的关系。由图 15 可知:隧道收敛变形随着锚杆长度的增大呈先减小后增大的趋势,锚杆长度 4 m 工况下收敛变形最小,为 14.2 mm。

3.3.2 围岩塑性区

图 16 为围岩屈服块体数量与锚杆环向布置长度的关系。由图 16 可知:围岩屈服块体数量随着锚杆长度的增大而减小,锚杆长 3.5、4 m 工况下屈服块体数量相近。

3.3.3 锚杆轴力

锚杆最大轴力与锚杆环向布置长度的关系见图 17。由图 17 可知:锚杆最大轴力随着锚杆长度的增加而增加,锚杆长度为 4.5 m 时最大轴力为 79.31 kN,是锚杆长度 3.0 工况下最大轴力的 1.2 倍。

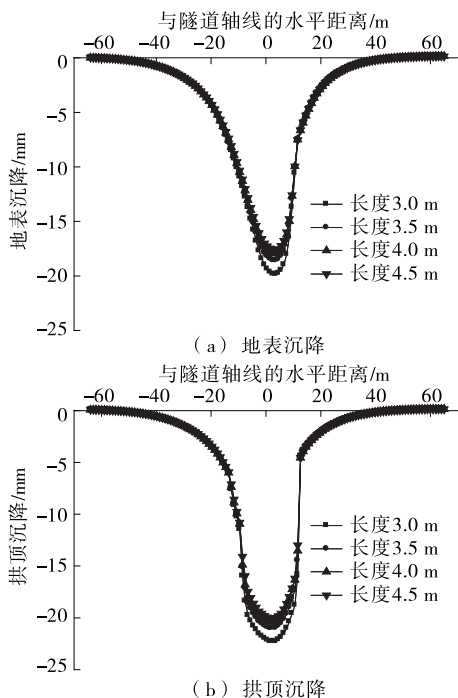


图 14 锚杆长度与地表、拱顶沉降的关系

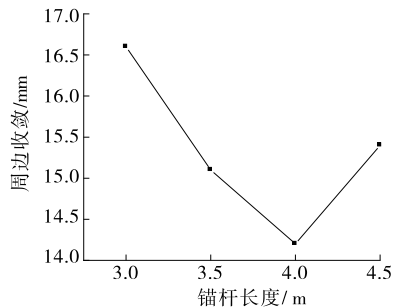


图 15 锚杆长度与隧道收敛变形的关系

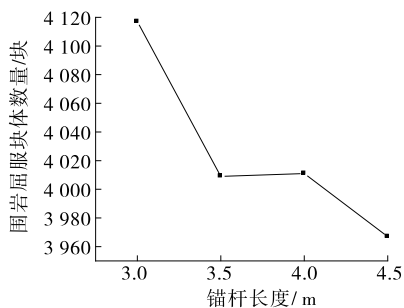


图 16 围岩屈服块体数量与锚杆长度的关系

综上所述,对隧道围岩变形、围岩塑性区及锚杆轴力进行综合分析,锚杆长度 4.0 m 工况下围岩变形、塑性区、锚杆轴力等较合理,能有效控制隧道收敛变形,建议采用拱顶超前注浆环向布置 210° 、间距 1.0 m、长度 4.0 m 的系统锚杆进行隧道支护。将军山隧道支护设计较合理。

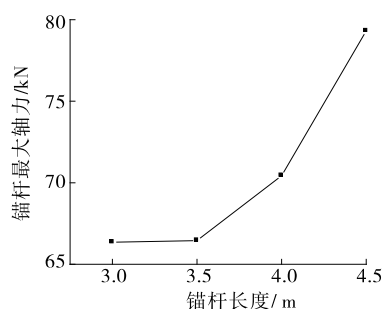


图17 锚杆最大轴力与锚杆长度的关系

3.4 现场监测数据对比分析

基于围岩地质特征与现场施工条件,选取V级围岩段ZK7+705断面开展现场监测,隧道锚杆轴力、围岩压力分布见图18、图19。由图18、19可知:隧道左、右拱腰处的锚杆轴力较大,最大轴力为18 kN,远小于数值计算值,主要是因为锚杆布设在隧道开挖、出渣后进行,相对滞后;左边墙和拱顶处的压力较大,分别为128.9、116.9 kPa。

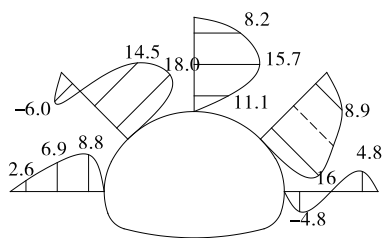


图18 锚杆轴力(单位:kN)

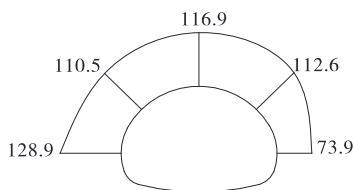
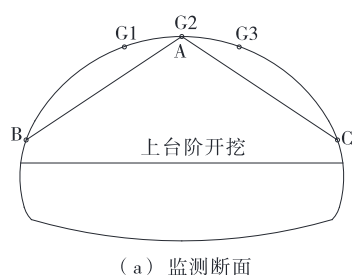
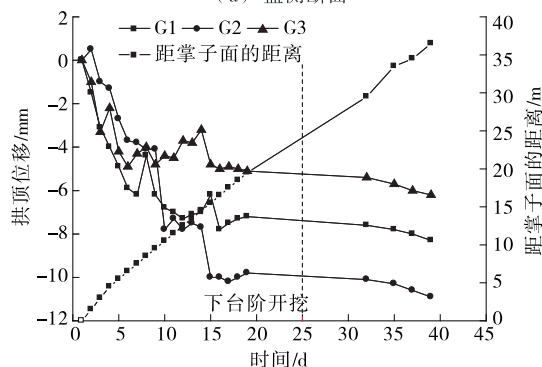


图19 围岩压力分布(单位:kPa)

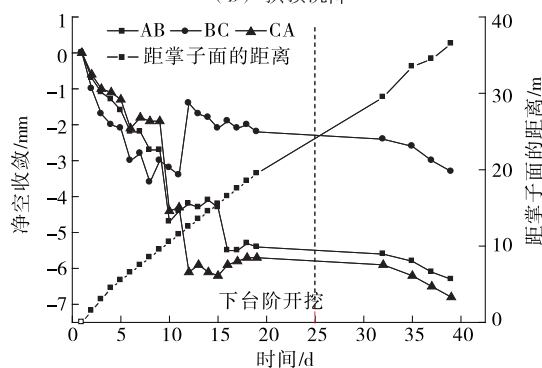
隧道变形随施工过程的变化见图20。由图20可知:隧道上台阶开挖后拱顶沉降开始增大,且略有波动,主要是因为距离掌子面较近,受前方爆破震动的影响较大;随着掌子面向前推进,爆破震动对拱顶部位的影响减小,下台阶开挖后拱顶沉降继续增大,达到11 mm后趋于稳定。隧道整体向内收敛,最大为7 mm。锚杆轴力、围岩变形现场监测数据与数值计算结果相比偏小,究其原因,主要是因为隧道开挖瞬间及监测布设之前围岩产生一定应力释放,监测相对滞后;数值建模中围岩节理按贯通状考虑,围岩条件有偏差。



(a) 监测断面



(b) 拱顶沉降



(c) 边墙收敛

图20 隧道变形随施工过程的变化

4 结论

针对节理发育岩体大跨度公路隧道,结合现场地质素描、数值模拟、现场监测数据对隧道锚杆支护参数进行研究,得到以下结论:穿越强~微风化晚侏罗统西山头组凝灰岩地层的双向六车道隧道采用拱顶超前注浆环向布置 210° 、间距1.0 m、长度4.0 m的系统锚杆支护方案较合理。

该文采用二维数值模拟方法对隧道锚杆支护设计参数进行研究,未考虑隧道开挖过程中的空间效应,下一步可采用三维数值模拟或模型试验方法进行完善。

参考文献:

[1] 张向东,孙国志,侯雷,等.软岩斜井锚喷支护施工遇到

(下转第176页)

更科学合理。根据 10 条山区高速公路的数据资料估算其中 1 条高速公路的单位里程造价,估算结果与其实际造价接近,模型估算准确度高。但该模型对待估算项目造价的计算需建立在有样本项目数据支持的基础上,存在局限性,有待完善。

参考文献:

- [1] 袁助.基于项目总控模式的高速公路造价动态控制方法研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.
- [2] 孙笑峰.山区高速公路典型工程项目造价特征分析[D].西安:长安大学,2009.
- [3] 李珏,肖丽红,黄祺.基于案例推理模型的公路工程造价估算研究[J].长沙理工大学学报:社会科学版,2013,28(1).
- [4] 段慧锐.基于 GN-BP 的高速公路工程造价预测模型研究[J].新技术新工艺,2017(3).
- [5] 郑晓蕾,张仕廉.基于主要特征因素与 BP-GEP 网络的公路工程造价预测模型探究[J].公路工程,2018,43(1).
- [6] 林佑性.公路工程投资决策阶段造价控制的主要问题及对策[J].科技经济市场,2008(9).
- [7] 曹洁梅.基于支持向量机的高速公路工程造价估算方法研究[D].长沙:长沙理工大学,2013.
- [8] 王运琢.基于 BP 神经网络的高速公路工程造价估算模型研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2011,24(2).
- [9] 郭颖.灰色预测在公路工程造价控制中的应用[J].东北林业大学学报,2007,35(6).
- [10] Cui J, Liu S F, Zeng B, et al. A novel Grey forecasting model and its optimization[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(6).
- [11] Liu S F, Forrest J. The current developing status on Grey system theory [J]. Journal of Grey System, 2007, 19(2).
- [12] Wu Z, Shen R. Safety evaluation model of highway construction based on fuzzy grey theory [J]. Procedia Engineering, 2012, 45(2).
- [13] Yan H Y. The construction project bid evaluation based on gray relational model [J]. Procedia Engineering, 2011, 15.
- [14] 张王乐元,张荠丰,孙增林,等.基于灰色理论的公路工程施工造价动态控制研究[J].交通科技与经济,2017,19(1).
- [15] 陈源,崔文浩,赖应良.基于案例推理的山区高速公路工程造价估算研究[J].价值工程,2016,35(33).
- [16] 田民,刘思峰,卜志坤.灰色关联度算法模型的研究综述[J].统计与决策,2008(1).
- [17] Yu W D, Skibniewski M J. Integrating neurofuzzy system with conceptual cost estimation to discover cost-related knowledge from residential construction projects [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2010, 24(1).
- [18] 王元庆,付建广,周伟.公路工程造价指数的编制方法及其应用[J].公路,2004(9).
- [19] 张道德.公路工程造价指数分析与预测[J].中国物价,2009(6).
- [20] 李强.基于灰色关联分析的高速公路改扩建工程造价控制影响因素及对策研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [21] 周泰,叶怀珍.基于模糊物元欧式贴近度的区域物流能力量化模型[J].系统工程,2008,26(6).
- [22] Lewis C. Industrial and business forecasting methods [M]. Butterworth-Heinemann, 1986.

收稿日期:2018-11-17

(上接第 151 页)

- 的问题及对策[J].科学技术与工程,2007,7(17).
- [2] Delhomme F, Debicki G. Numerical modelling of anchor bolts under pullout and relaxation tests [J]. Construction & Building Materials, 2010, 24(7).
- [3] 于凤海,赵同彬,胡善超,等.大松动圈围岩锚网索联合支护参数确定方法探讨[J].岩土力学,2016,37(7).
- [4] 刘华荣.支护参数对大跨度双连拱隧道稳定性的影响分析[J].地下空间与工程学报,2014,10(4).
- [5] 郭吉平.软弱碎裂岩体中隧道锚杆支护优化分析[J].中外公路,2016,36(6).
- [6] 肖明清,陈立保,徐晨,等.高速铁路隧道支护参数的计算研究[J].隧道建设,2018,38(3).
- [7] 潘锐,王琦,王雷,等.深井巷道锚注补强力学效应及支护参数研究[J].采矿与安全工程学报,2018(2).
- [8] 朱家锐,毛明发,常伟华,等.基于正交试验对深部巷道锚喷网支护参数的设计与优化[J].煤炭技术,2017,36(12).
- [9] 谭显坤,左昌群,刘代国,等.软岩大变形隧道锚喷支护的力学效应及失效原因分析[J].科学技术与工程,2015,15(8).
- [10] 桑运龙,李军,刘学增.水平、垂直节理发育条件下的隧道稳定性分析[J].现代隧道技术,2015,52(2).
- [11] JTG D 70-2004,公路隧道设计规范[S].

收稿日期:2018-11-22