

文章编号:1005-0523(2017)06-0026-07

高速铁路隧道分修过渡结构的施工力学特性研究

梁志辉^{1,2}, 杨新安^{1,2}, 江星宏³

(1. 同济大学交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;
3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘要:高速铁路隧道的分修过渡结构是合分修隧道中连接大跨隧道和小间距隧道的过渡段,该区段的横向与纵向结构变化大,是隧道施工的重点和难点。以壁板坡隧道工程为背景,分析了大跨段A断面的力学特征;通过数值建模分析小间距段岩柱变形以及围岩应力,认为分修过渡结构的最优施工顺序为“大跨段左侧开挖→左线开挖→大跨段右侧开挖→右线开挖”的开挖顺序。现场监测大跨段A断面拱顶、边墙的实测值与计算值基本一致,验证了数值模型的正确性。

关键词:高速铁路隧道;分修过渡结构;力学特性;大断面隧道

中图分类号:U459.1

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.06.002

从运营安全的角度考虑,《高速铁路隧道设计规范》^[1]中规定:“长度大于10 km的隧道宜采用两个单线隧道”。但是,由于地形、地质和与其它线路结构的衔接等方面的原因,在有的情况下,高速铁路隧道设计为“进、出口的一端为单洞双线,在洞内进行分岔变为两条单线隧道”,铁路行业中将这种隧道设计称为“合分修”隧道,沪昆铁路壁板坡隧道是典型例子^[2],而公路行业将这种隧道设计称为“分岔隧道”、“燕尾式隧道”等。

合分修隧道从单洞向双洞的过渡就是大跨隧道向小间距隧道的过渡,而“分修过渡结构”特指连接大跨隧道和小间距隧道的过渡段,该区段的横向与纵向结构变化大,大跨隧道属超大断面隧道,因此这一复杂、异型结构的施工是合分修隧道施工的重点和难点。

目前对这一复杂、异形结构施工力学的研究还很少,国内外可借鉴的经验不多,只有少量的公路分岔式隧道、燕尾式隧道的施工经验,以及现有的大跨隧道、小间距隧道的力学特性分析成果。程栋^[3]通过数值方法对比分析了合分修大跨渐变段不同工法开挖洞周变形分布与支护受力状态,得出施工风险关键步与施工控制措施。丁浩、荆永军^[4-5]介绍了长沙营盘路湘江隧道工程概况和施工关键技术,并通过数值方法分析了不同合分修大跨断面设计的力学效应,得出合理合分修结构形式与开挖工法;贾存兴^[6]以沪蓉高速漆树槽分岔隧道为例,结合实测数据,分析得出了隧道纵向变形特点、施工动态响应特点、开挖面空间效应特点;李勇^[7]以八字岭隧道合分修段为工程背景,利用相似材料的选择和组合原则,研制了一种可用于地质模型实验的铁晶砂胶结料,并制作了隧道开挖支护模型,研究了合分修隧道施工过程的稳定性。王汉鹏^[8]重点分析了超载实验过程中不同侧压系数下围岩的变形、应力分布和破坏情况,得出了合分修隧道最易破坏区域为拱顶和两帮,支护结构超载安全度为3.5。

综上所述,许多学者采用数值模拟、监控量测和模型实验三种方法,对合分修结构形式隧道的开挖工法选择、支护受力状态进行了研究。但是对分修过渡结构施工的总体方案、开挖力学特性等施工力学问题研究

收稿日期:2017-07-16

作者简介:梁志辉(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为隧道工程,城市地下工程。

通讯作者:杨新安(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为隧道工程,城市地下工程。

不多。因此,本文通过理论分析、数值模拟和工程实践相结合的方法对分修过渡结构的施工力学特性进行研究,为认识分修过渡结构的力学特点及其施工提供依据和借鉴。

1 工程概况与特点

1.1 工程概况

壁板坡特长隧道是沪昆铁路全线的控制性工程,属于Ⅰ级高风险隧道,全长14 756 m,曾经是国内高铁第一长隧。采用“进口合修、出口分修”的设计方案^[9],合分修段如图1所示,从A断面大跨隧道过渡到小间距隧道这一区段称为分修过渡结构,大跨段A断面跨度为24.84 m,高度为16.03 m,纵向长度为40 m,埋深480 m,高跨比约为0.6;小间距隧道段为双线标准隧道断面,岩柱厚度1.8~4 m。该区段地层属二叠系下统茅口组(P_{1m})厚层灰岩与二叠系下统栖霞组(P_{1q})中厚层灰岩过渡区域,岩性为弱风化,节理裂隙发育程度低,但局部有风化带,沟通含水层;大跨渐变段围岩等级为Ⅱ级,小间距段围岩等级为Ⅲ级。

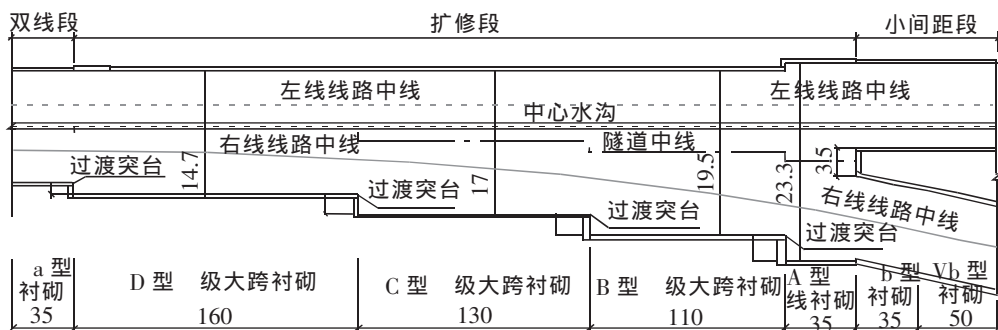


图1 壁板坡隧道合分修示意图(单位:m)

Fig. 1 Diagram of composite repair section in Wainscot Slope Tunnel (unit: m)

1.2 分修过渡结构特点

壁板坡特长隧道分修过渡结构(图2)包含大跨隧道与小间距隧道,大跨段与小间距段直接相连,因而过渡简单,同时兼具大跨隧道和小间距隧道的特点。分修过渡结构的大跨段由于跨度大、高度大的原因,易产生松弛荷载,加大了初期支护承担荷载的能力,因而初期支护应当加强;小间距段主要由中间岩柱和初期支护共同承担荷载,但是中间岩柱厚度小,强度要求高,施工中需辅以爆破控制、注浆加固、预应力锚杆等技术措施,施工工序繁琐,工期长。

另外,分修过渡结构从施工顺序方面考虑,不同的施工顺序具有不同的施工力学特性,并且该异形结构在实际开挖过程中,一般不会按照大跨段先开挖完成后再开挖小间距段的顺序,而是先开挖大跨的一部分接着开挖小间距段的左线或右线,最后迂回开挖大跨的剩余部分,从而贯通分修过渡结构。因而在整个施工过程中,施工困难,工序转化繁琐,围岩稳定较困难,中间岩柱受到多次扰动,结构变形控制难度较大。

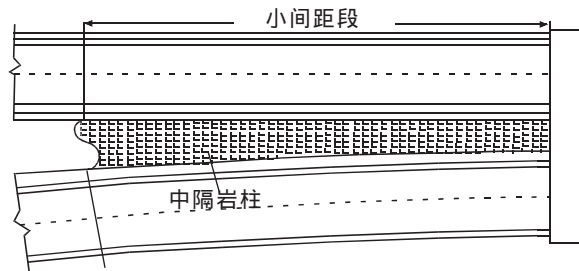


图2 合分修隧道分修过渡结构图

Fig.2 Transition structure of separated repair in the high-speed railway branched tunnel

2 分修过渡结构大跨断面理论分析

高速铁路合分修隧道的分修过渡结构的大跨隧道断面一般为扁平椭圆形,Dhar、Geldart和Udd推导出在双向受压状态下的应力分布公式,计算表达式如下^[10-11]

$$\sigma_{\theta} = p_0 \frac{m^2 \sin^2 \theta + 2m \sin^2 \theta - \cos^2 \theta}{\cos^2 \theta + m^2 \sin^2 \theta} + \lambda p_0 \frac{\cos^2 \theta + 2m \cos^2 \theta - m^2 \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta + m^2 \sin^2 \theta} \quad (1)$$

式中: σ_θ 为椭圆孔表面的切向应力; m 为椭圆洞室高跨比; p_0 为原岩竖向应力; λ 为侧压系数; θ 为计算点与圆心连线与 Y 轴正半轴夹角, 顺时针方向为正。

在不同高跨比取值下, 由式(1)可得, 椭圆洞室表面应力集中系数如图 3 所示, 可见在侧压力系数为 0.5 的条件下, 高跨比为 1 时, 边墙切应力集中系数约为 3, 拱顶一侧拉应力存在角度范围约为 30° ; 高跨比为 0.8 时, 边墙应力集中系数约为 3.5, 拱顶一侧拉应力存在角度范围约为 35° ; 高跨比为 0.6 时, 边墙切应力集中系数约为 4.4, 拱顶一侧拉应力存在角度范围约为 40° 。椭圆洞室最大切向压应力集中出现在边墙部位, 随着高跨比的减小, 切应力集中系数增加; 椭圆洞室最大切向拉应力集中出现在拱顶, 随着侧压系数的减小, 拱顶拉应力区从无到有, 由小变大, 相同侧压系数下, 拱顶最大拉应力相当, 但拉应力范围随着高跨比的增大而增加。因此, 对于壁板坡分修过渡结构大跨隧道 A 断面高跨比为 0.6 左右而言, 边墙切应力集中系数大, 拱顶受拉区范围大, 加之隧道开挖扰动区大, 应力及松动区范围大, 因而在施工过程中, 应当加强拱顶支护, 重点监测拱顶、边墙位置, 严格控制围岩收敛变形, 减小围岩塑性破坏范围, 保证施工安全。

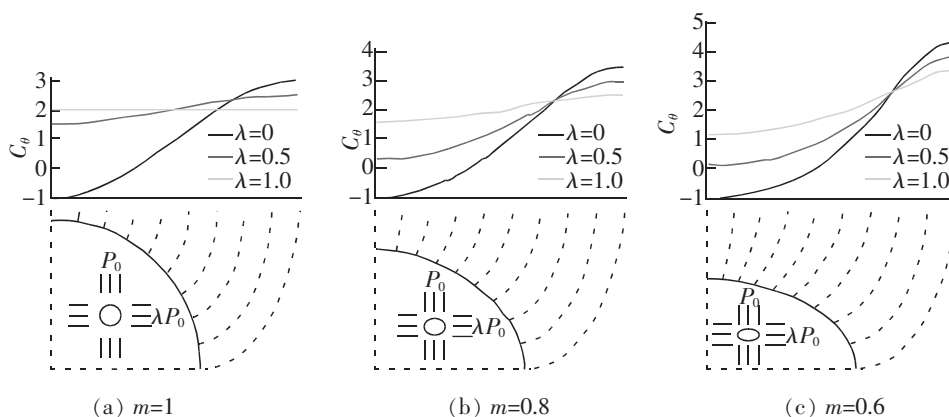


图 3 椭圆形洞室边界切向应力集中系数

Fig.3 Tangential stress concentration factor of elliptical tunnel boundary

3 分修过渡结构施工力学特性研究

3.1 模型建立

高速铁路隧道分修过渡结构数值模型的有限差分网格如图 4 所示, 模型纵向长度为 80 m, 其中大跨段 40 m, 小间距段 40 m, 岩柱厚度 1.8~4 m。围岩材料的本构模型采用摩尔库伦准则, 参考《铁路隧道设计规范》^[12]选取参数; 支护结构材料本构模型采用弹性准则, 初支 shell 单元; 锚杆采用“粘聚力等效”考虑。

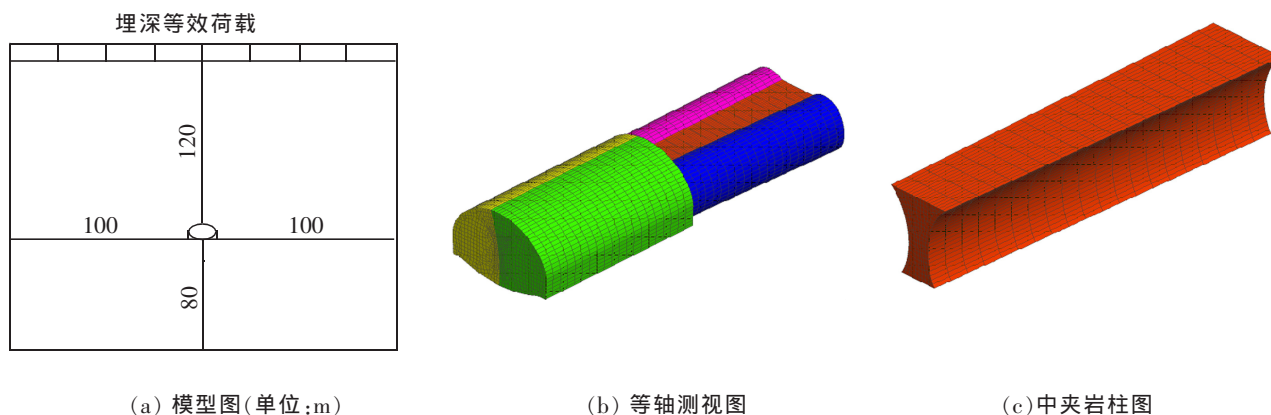


图 4 合分修隧道分修过渡模型图

Fig. 4 Transition structure model of separated repair in the high-speed railway branched tunnel

3.2 不同施工顺序的施工力学效应

高速铁路隧道分修开挖时,开挖顺序不仅影响分修过渡段的贯通速度,还会造成围岩应力、变形分布差异。分修过渡的过程中,常见开挖顺序如图5所示。顺序一为:大跨段左侧开挖→左线开挖→右线开挖→大跨段右侧开挖;顺序二为:大跨段左侧开挖→左线开挖→大跨段右侧开挖→右线开挖;顺序三为:大跨段左侧开挖→大跨段右侧开挖→左线开挖→右线开挖。

3.2.1 岩柱变形特性

分修过渡过渡结构的岩柱厚度小,其变形与稳定控制较难。不同施工顺序开挖完成后岩柱变形分布如图6所示。当开挖完成后,岩柱顶部位移较大,中部位移较小,右线左侧岩柱位移大于左线右侧岩柱水平位移在边墙部较大,拱腰部较小,左线侧边墙受右线隧道开挖影响,水平位移较大;顺序三的岩柱变形最大,其次为顺序一的岩柱变形,最小的岩柱变形为顺序二,说明“大跨段左侧开挖→左线开挖→大跨段右侧开挖→右线开挖”的顺序有利于岩柱变形控制,有利于合分修段一侧快速贯通,具有较好的力学特性,宜作为合分修隧道分修过渡施工顺序。

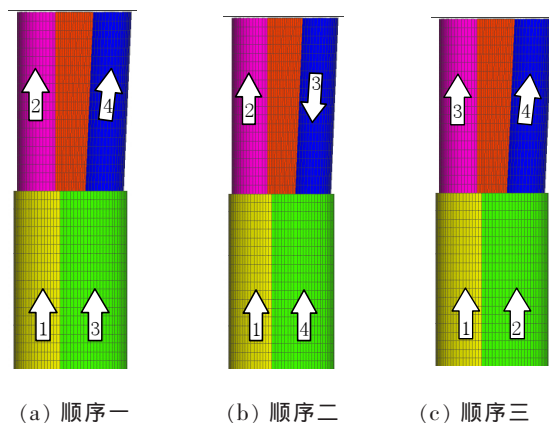


图5 分修过渡结构施工顺序示意图
Fig.5 Sketch map of construction sequence of the transition structure model of separated repair

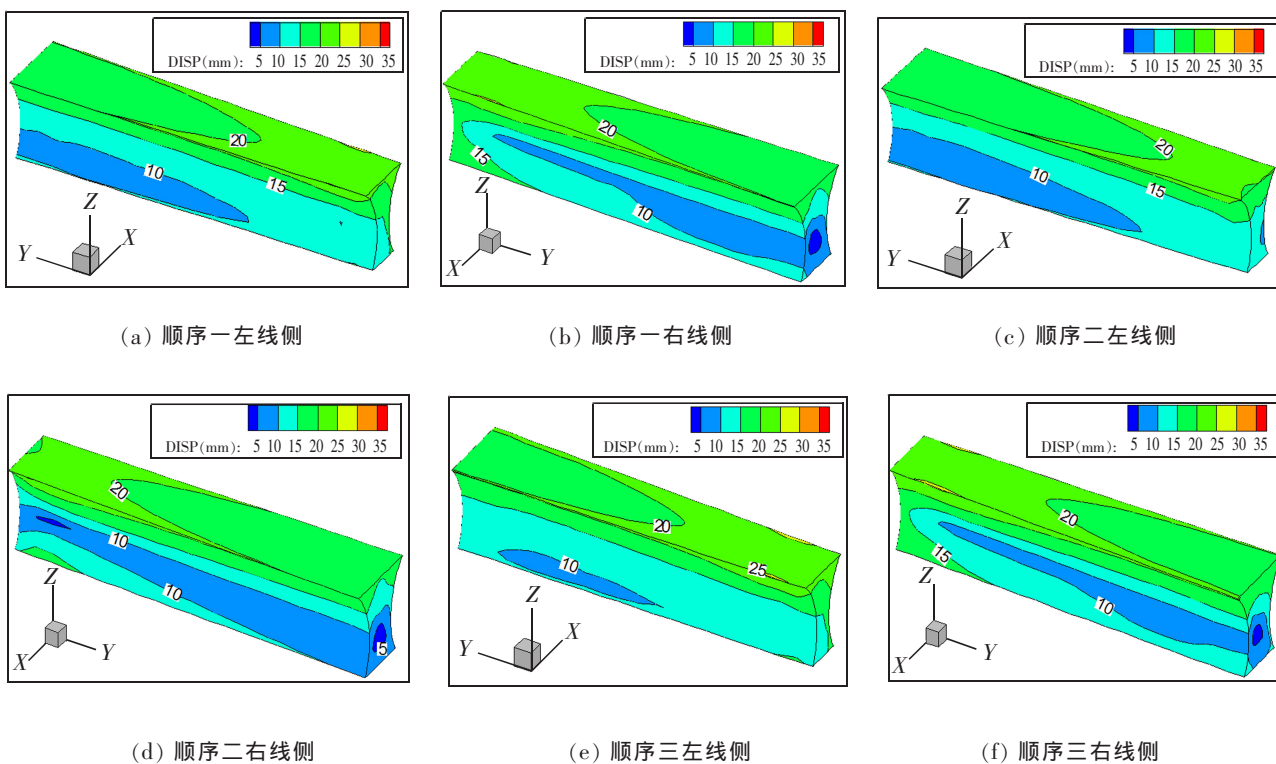


图6 合分修隧道分修小间距段岩柱位移分布

Fig.6 The displacement distribution diagram of rock pillar in the small spacing section of separated repair in the high-speed railway branched tunnel

3.2.2 围岩应力特性

由图 7 可知,不同施工顺序完成开挖后,大跨段 A 断面最大拉应力分布范围基本一致,拉应力区域主要分布在隧道仰拱和拱顶位置,最大拉应力出现在仰拱底部,拱顶拉应力区范围小于仰拱拉应力区范围。

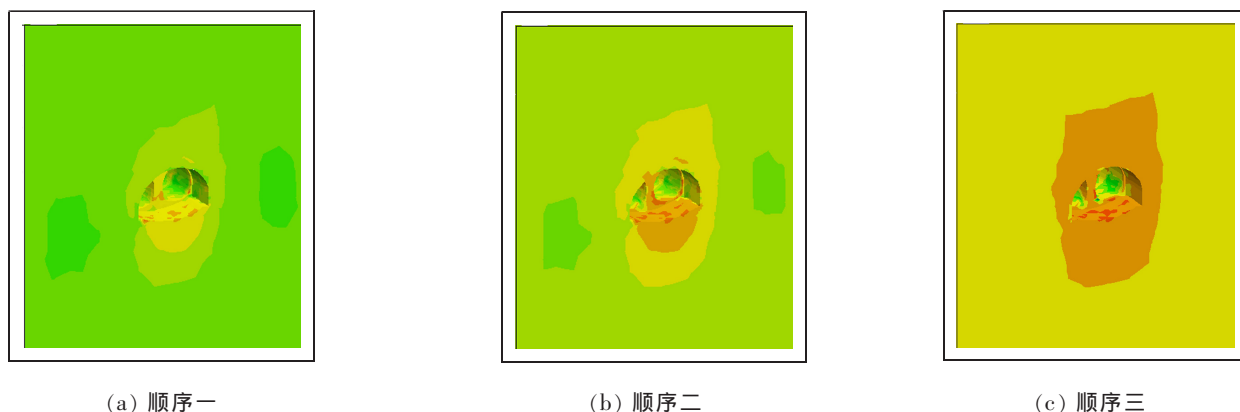


图 7 合分修隧道分修大跨段 A 断面最大拉应力分布

Fig.7 The maximum tensile stress distribution diagram in the large span tunnel section A of separated repair in the high-speed railway branched tunnel

对比分析图 7 的 3 个子图可知,顺序一 A 断面最大拉应力最大,顺序二与顺序三最大拉应力相近,但是顺序三的拉应力范围大于顺序二;另外,顺序一施工时应注意及时施作上台阶支护,控制拱顶拉应力范围,顺序三在施工过程中可能会出现掉块、剥离等现象,拱顶需要加强支护,顺序二在施工过程中按照设计进行支护即可,无需再次加固的辅助措施。施工顺序二具有较好的力学特性,有利于分修过渡结构的施工和控制围岩的变形,有助于提前完成施工进度,加快隧道的贯通,适宜作为分修过渡结构的施工开挖顺序。

3.3 施工监测与结果分析

根据计算与分析结果,壁板坡隧道分修过渡结构中采取“大跨段左侧开挖→左线开挖→大跨段右侧开挖→右线开挖”施工顺序开挖,因而大跨段是整个分修过渡结构开挖的首要部位,开挖过程需要重点监测。选取 A 断面,进行监测分析实测初期支护中混凝土的轴向应变与模型计算中的初期支护的轴向应变的数值,验证上述数值模拟的真实性。

初期支护轴向应力实测与计算值对比如图 8 所示。由图 8(a)可知,A 断面拱部监测点中拱顶与右拱顶处的初期支护的轴向应力实测值和计算值在数值以及变化趋势上吻合程度较高,拱顶与右拱肩处计算值大于实测值,但变化规律相同,即在右侧台阶施工过程中应变迅速增长,仰拱施工对其影响较小。拱顶与右拱肩处的实测值偏小,此处靠近型钢钢架连接点处,后续台阶的施工将扰动其附近的初期支护,可能导致该处初期支护的受力偏小。

由图 8(b)可知,A 断面边墙监测点初期支护的实测与计算轴向应力值的变化吻合程度低,变化规律存在差异:实测中,边墙处监测点处初期支护轴向应变在仰拱施工过程及之后的 30 d 时间内迅速变化,而计算中,边墙处监测点在右侧下台阶施工、仰拱施工过程中迅速变化后达到稳定。其原因可能是:实测中,边墙处初支主要由边墙下方的仰拱承担,仰拱施工后初期支护支承点处的锁脚锚杆数量不足、垫块不及时等原因导致边墙处初期支护出现松动,随着仰拱施工进行,边墙处初期支护受力逐渐稳定并增长;模型计算中,难以考虑由实际工程引起的边墙处初期支护的松动,因此出现仰拱施工过程中边墙处初期支护受力状态迅速稳定的情况。

分析图 8 数值对比结果可知:初期支护轴向应变的实测值与计算值相差不大,均在 $-5 \times 10^{-4} \sim 0$ 范围内,数值计算结果与实际施工状态相当,从而验证数值模型及其计算结果的准确性。

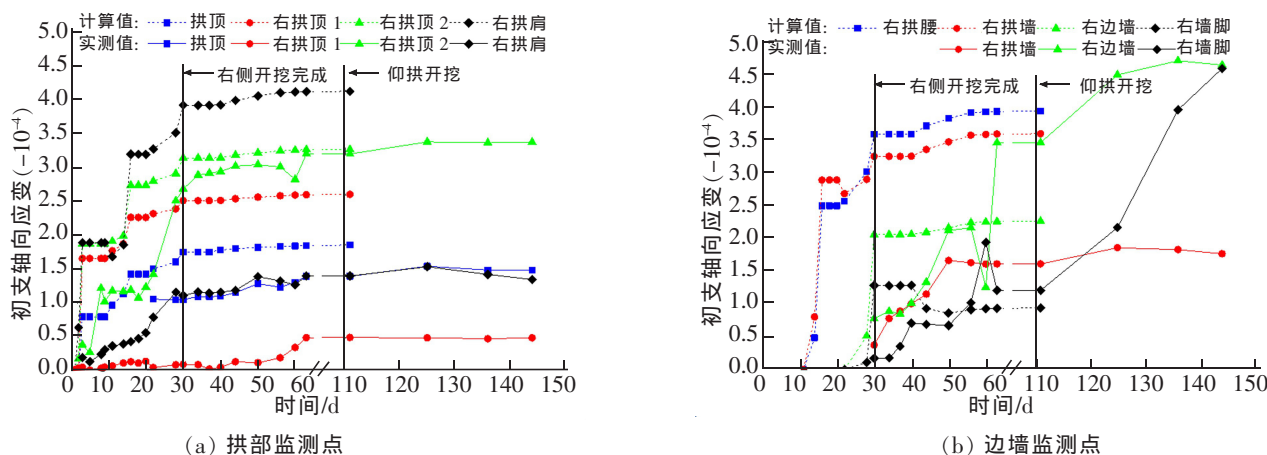


图8 A断面初期支护轴向应力实测与计算值对比图

Fig.8 Comparison of measured and calculated values of axial stress for preliminary bracing of A section

4 结语

沪昆客专线壁板坡隧道的分修过渡结构由A段面大跨隧道过渡到两条标准双线隧道,依据分修过渡结构的特点,通过理论分析、数值模拟、现场验证的方法,得到以下结论:

1) 分修过渡结构具有断面突变,过渡简单,兼具大跨隧道和小间距隧道的特点;大跨隧道跨度大,拱顶易产生松弛荷载;小间距段主要由中间岩柱和初期支护共同承担荷载,中间岩柱厚度小,施工干扰大,不同施工顺序会对其产生不同的力学效应。

2) 分修过渡结构超大断面隧道的边墙切应力集中系数大,拱顶受拉区范围大,加之隧道开挖扰动区大,应力及松动区范围大。施工中应加强拱顶支护,重点监测拱顶、边墙位置,严格控制围岩收敛变形,减小围岩塑性破坏范围。

3) 分修过渡结构采用“大跨段左侧开挖→左线开挖→大跨段右侧开挖→右线开挖”的开挖顺序,有利于岩柱位移的控制和大跨段围岩应力稳定,能够加快分修过渡段的贯通速度,是分修过渡段施工的最优开挖顺序,这一结论得到数值模拟和现场实测结果的验证。

参考文献:

- [1] 铁道第三勘察设计院. 高速铁路设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2014.
- [2] 王薇,曾鹏,肖粤秀,等. 综合超前地质预报在壁板坡隧道的应用[J]. 华东交通大学报,2016,33(4):18-23.
- [3] 程栋. 地下快速路互通立交分岔隧道设计施工关键技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.
- [4] 丁浩,郭军,蒋树屏,等. 水下隧道大跨分岔结构设计及围岩稳定分析[J]. 公路交通技术,2012(2):81-87.
- [5] 刘鹏. 胶州湾隧道浅埋分岔段的设计及施工关键技术[J]. 隧道建设,2013,33(6):81-87.
- [6] 贾存兴. 漆树槽分岔隧道施工变形监测分析研究[J]. 中外公路,2009,29(1):160-164.
- [7] 李勇. 新型岩土相似材料的研制及在分岔隧道模型试验中的应用[D]. 济南:山东大学,2006.
- [8] 王汉鹏,李术才,张强勇. 分岔隧道模型试验与数值模拟超载安全度研究[J]. 岩土力学,2008,29(9):2521-2526.
- [9] 闫明超,曾鹏,杨新安,等. 壁板坡特长隧道平导快速施工技术[J]. 铁道标准设计,2016(5):112-116.
- [10] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 科学出版社,2002:315-316.
- [11] GOEL R K, JETHWA J L, DHAR B B. Effect of tunnel size on support pressure[C]. Elsevier,1996:749-755.
- [12] 铁道第二勘察设计院. 铁路隧道设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.

Study on Construction Mechanical Characteristics of Transition Structure of Separated Repair in High Speed Railway Tunnel

Liang Zhihui^{1,2}, Yang Xin'an^{1,2}, Jiang Xinghong³

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3 China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China)

Abstract: In the transition structure of separated repair, namely the transition section connecting the large span tunnel and the small spacing tunnel in high-speed railway tunnels, both transverse and longitudinal structure vary greatly, which forms the key and difficult point in tunnel construction. Based on the engineering background of Wainscot Slope Tunnel, this paper analyzed the mechanical characteristics of the large span section A. The numerical modeling analysis of the surrounding rock deformation and the surrounding rock stress in the small spacing section shows that the optimal construction sequence of the separated repair transition structure is “the left side of the large span, the left line excavation, the right side excavation of the large span and the excavation of the right line”. The measured values of the arch and side wall of the large span section A are basically consistent with the calculated values, and the correctness of the numerical model is verified.

Key words: high-speed railway tunnel; transition structure of separated repair; mechanical characteristics; large-span tunnel

(责任编辑 王建华)