

大断面小净距公路隧道现场监测分析研究

夏才初^{1,2}, 龚建伍¹, 唐颖³, 朱合华^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土工程重点实验室, 上海 200092;
3. 福建省交通规划设计院, 福建 福州 350004)

摘要: 针对大断面小净距隧道的特点, 对福建省鹤上隧道进行地表下沉、围岩内部位移、洞周收敛、拱顶下沉、围岩压力、衬砌内力等项目的监测工作。基于监测结果, 分析该隧道围岩和支护系统的变形及受力特点, 指出小净距隧道开挖影响的时空范围和隧道衬砌支护的最佳时机, 并为支护体系的优化提供依据。研究结论可为类似条件下工程的设计、施工和监测提供借鉴。

关键词: 隧道工程; 小净距; 大断面; 公路隧道; 监控量测

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)01 - 0044 - 07

STUDY ON SITE MONITORING OF LARGE-SECTION HIGHWAY TUNNELS WITH SMALL CLEAR SPACING

XIA Caichu^{1,2}, GONG Jianwu¹, TANG Ying³, ZHU Hehua^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Fujian Communications Planning and Design Institute, Fuzhou, Fujian 350004, China)

Abstract: Heshang tunnel is the first large-section highway tunnel with small clear spacing in Fujian Province. It is critical to make a comprehensive monitoring on the mechanical characteristics of the tunnel during construction. According to its characteristics, some monitoring tasks have been performed in Heshang tunnel, including the ground settlement, crown settlement, convergence, surrounding rocks displacement, surrounding rocks pressure and internal force in lining, etc. Based on the measured data, the deformation and stress properties of surrounding rocks and supporting system are analyzed; the interaction time-space range in the construction of two-arch tunnels with small clear spacing is presented; and the best time of support and secondary lining is given. Meanwhile, the real-time monitoring information is applied to optimizing the supporting system. The experiences and conclusions presented can be adopted in the design, construction and research of similar tunnels.

Key words: tunneling engineering; small clear spacing; large-section; highway tunnels; site monitoring

1 引言

小净距隧道是指隧道间的中间岩柱厚度小于规范建议值的特殊隧道布置形式^[1], 其双洞净距一般

小于 1.5 倍洞径。小净距隧道能很好地满足特定地质和地形条件、线桥隧衔接方式, 有利于公路整体线型规划和线型优化。因此, 小净距隧道的结构形式成为在特定地质和地形条件下修建隧道时采用较多的一种结构形式。近年来已有多座公路隧道采用

收稿日期: 2006 - 02 - 19; **修回日期:** 2006 - 04 - 29

基金项目: 福建省交通厅交通科技发展项目

作者简介: 夏才初(1963 -), 男, 博士, 1984年毕业于中南大学采矿工程专业, 现任教授, 主要从事土木工程监测技术及岩土地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: tjxiacbb@126.com

小净距隧道的结构形式, 这些隧道的设计和建成为我国小净距公路隧道的设计和施工积累了初步的经验^[2~4]。

小净距隧道施工过程中围岩的力学性态不仅受到岩石的生成条件和地质作用的影响, 还受到隧道开挖方式、支护参数、支护时机等的影响, 寻求正确反映岩体性态的物理力学模型是非常困难的, 因而, 有必要对施工过程中围岩进行监控量测, 对监控数据进行分析 and 综合判断, 进一步指导施工、完善设计, 这也是新奥法施工原理的基本要求^[5]。

三车道大断面小净距隧道在国内外并不多见, 本文结合鹤上隧道的现场监测成果, 对隧道施工过程中围岩和支护体系的变形及受力特点进行了分析研究, 为支护体系的施工优化提供依据, 并以为类似工程的设计和施工提供参考。

2 工程背景

鹤上隧道位于福州国际机场高速公路(一期)工程 A3 标段, 为福建省第一座三车道小净距公路隧道, 在国内也是罕见的。该隧道设置为接近平行的双洞, 左右线桩号均为 K6+250~K6+700, 隧道长 450 m, 设计内空断面净宽 15.052 m、拱高 8.1 m, 含仰拱总高度 10.4 m, 双洞间距 7.3 m。开挖毛洞中间岩柱净距 5.66~6.10 m, 即(0.38~0.41) B_0 (B_0 为隧道开挖跨度)。

该隧道路段属剥蚀低山丘陵地貌, 进口段天然坡角 16°, 出口天然坡角 20°, 地形起伏较大, 洞身段最大埋深约 62 m, 洞口浅埋段埋深 4~10 m, 洞

口从外到内为 V, IV 级围岩, 隧道中部 F_{9A} 断层附近有约 40 m 的 V, IV 级围岩, 其余均为 III 级围岩, 主要岩性为凝灰熔岩。

隧道设计断面尺寸与施工顺序如图 1 所示(图中 ①~③⑩为施工顺序)。V 级围岩段采用中隔壁法施工, 开挖前设置超前注浆小导管预加固, 结构设计为复合衬砌, 以锚杆湿喷混凝土、钢筋网等为初期支护, 并辅以钢支撑、注浆小导管等支护措施^[6]。

3 监测概况

小净距隧道双洞间距小, 左右洞开挖相互影响, 开挖工序也直接影响着隧道围岩和结构的稳定性, 特别是中间岩柱, 受力尤为复杂, 而当前可供借鉴的工程经验较少, 设计和施工方法都还不成熟。因此, 加强现场施工监控量测, 是保证隧道安全施工必不可少的手段。

根据公路隧道施工规范的基本要求, 针对该小净距隧道的结构特点、施工工艺及地质情况, 监测内容主要包括衬砌内力、围岩变形及地表沉降监测等, 共布设有 3 个代表性的监测断面(K6+300, K6+500, K6+630)和若干一般性监测断面。监测项目布置情况如图 2 所示(左右洞对称布置), 代表性监测断面测点布置情况如图 3 所示。

4 监测结果分析

隧道监测组从 2004 年 7 月进驻现场开展监测工作以来, 采集了大量监测数据。本文重点以隧道出

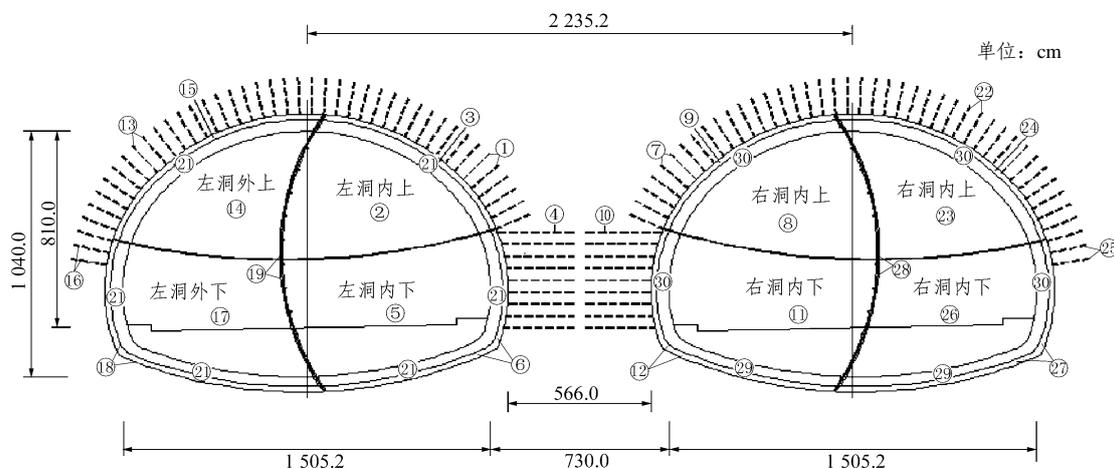


图 1 隧道设计断面尺寸与施工顺序
Fig.1 Tunnel section and construction sequence

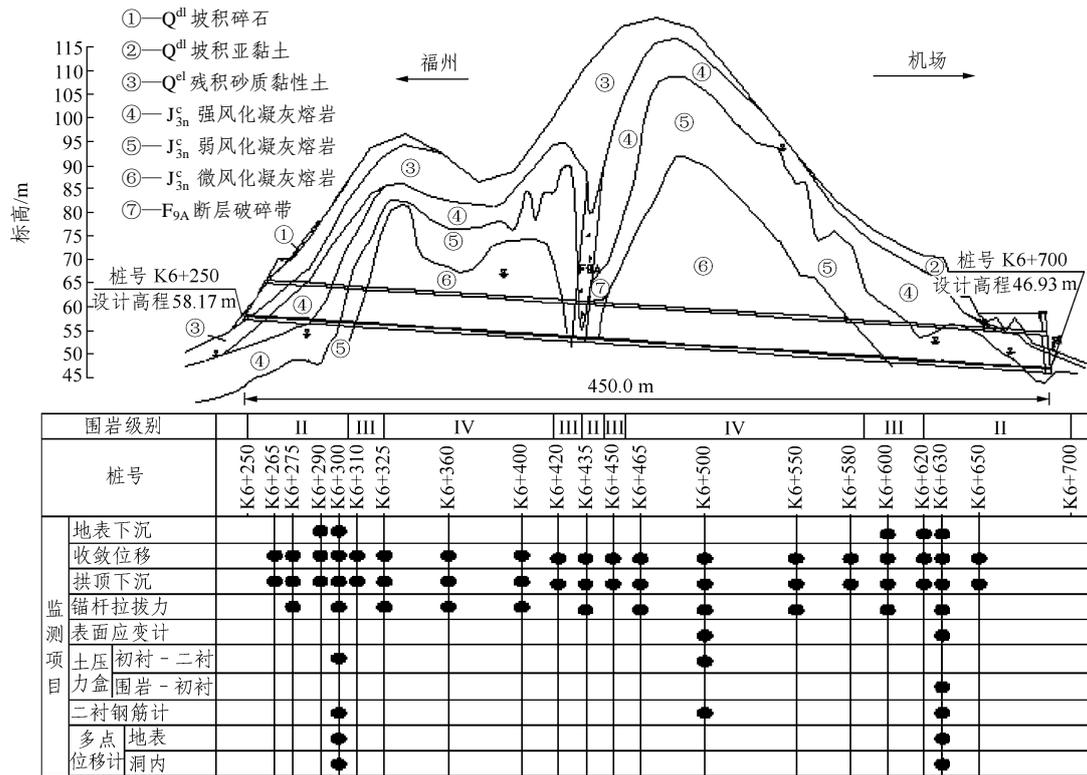


图2 监测项目布置图

Fig.2 Arrangement of monitoring items

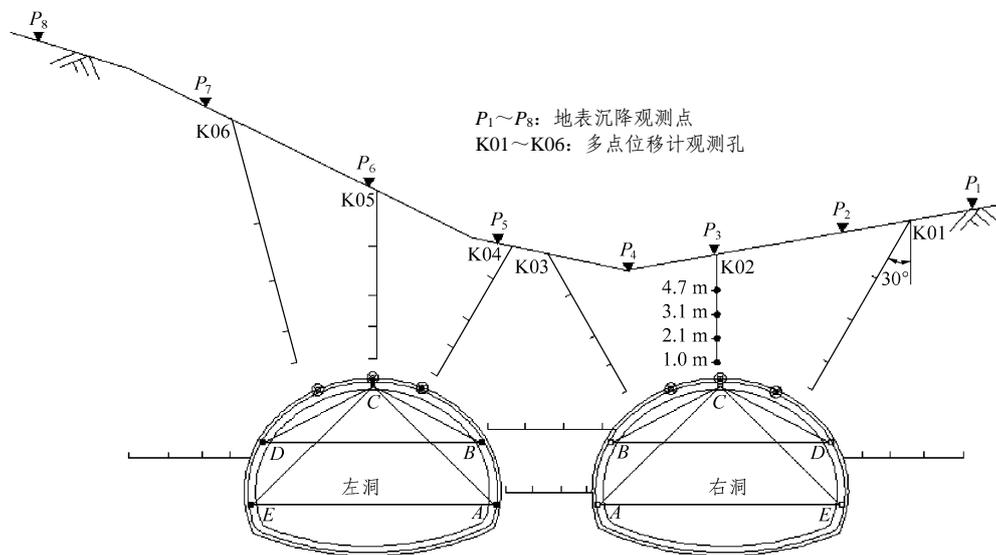


图3 代表性监测断面测点布置图

Fig.3 Layout of monitoring points on typical section

口端代表性监测断面为例，简要介绍小净距隧道的监测成果，并进行相关分析研究。

4.1 围岩变形监测结果及分析

(1) 地表下沉

在隧道出口端地表布置了3组地表下沉测线(K6+630, K6+620, K6+600断面)，每组埋设8个地表观测点(P1~P8)，如图3所示。以K6+630断面

为例，各测点地表下沉变形趋势及地表下沉时程曲线分别如图4, 5。

从图4中可以看出，该里程左洞地表下沉值平均大于右洞。这与地表地质和施工开挖等有关，左洞地表土体松散，受施工及爆破振动影响较大，而中间岩柱部位则基本出露为基岩，受振动影响小，后行右洞开挖扰动及多次振动爆破使得先行左洞地

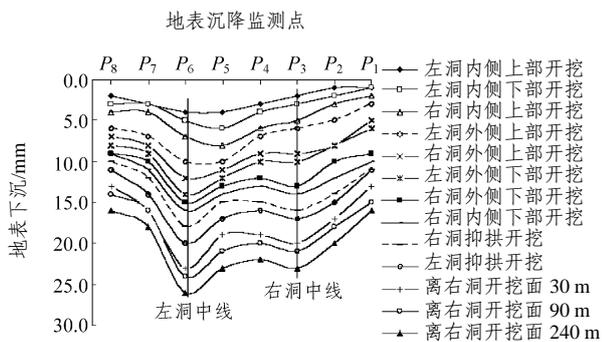


图 4 K6+630 断面各测点地表下沉变形趋势

Fig.4 Tendency curves of ground settlements at section K6+630

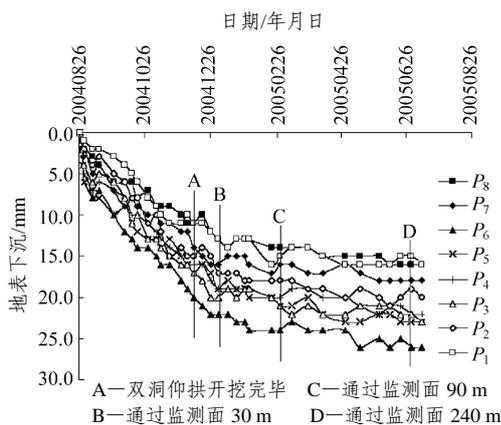


图 5 K6+630 断面地表下沉时程曲线

Fig.5 Curves of ground settlements with time at section K6+630

表下沉增大。

随着隧道开挖, 地表各测点下沉波动较大, 上断面开挖和仰拱开挖对地表下沉影响显著, 下断面开挖的影响则相对较小。另外, 从图 5 中可以看出, 当仰拱开挖完毕时, 各点下沉量平均达到最终下沉量的 70%~80%, 而当工作面通过监测面约 30 m, 即约 2 倍洞径时, 各测点下沉量为最终下沉量的 85%左右, 以后下沉量缓慢增长直至稳定。

(2) 拱顶下沉

左右洞拱顶下沉纵向分布曲线如图 6 所示(图中 III~V 指围岩级别), 部分监测断面的拱顶下沉时程曲线如图 7 所示, 按围岩分级的拱顶下沉统计值见表 1。

从图 6 中可以看出, 左洞平均拱顶下沉稍大于右洞, 洞口变形值大于洞身段, 左洞平均下沉为 15 mm, 右洞平均下沉为 11 mm, 同样表明后掘进右洞开挖对先行左洞有一定影响。

从表 1 中可以看出, 围岩变形及稳定时间与地质条件也有较大的关系, 地质条件越差, 拱顶下沉

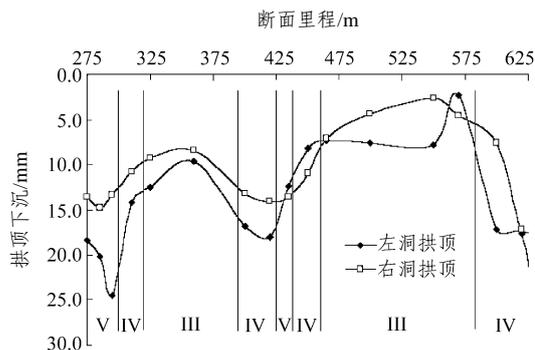


图 6 拱顶下沉纵向分布曲线

Fig.6 Longitudinal curves of crown settlements

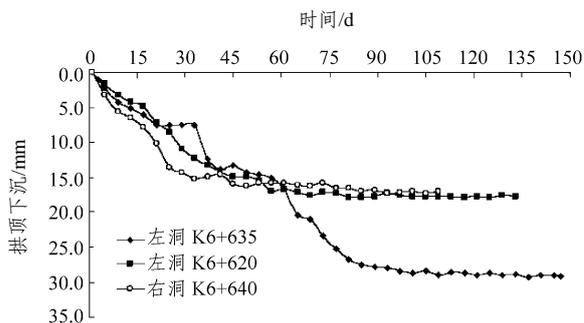


图 7 拱顶下沉时程曲线

Fig.7 Time-dependent curves of crown settlements

表 1 按围岩分级的拱顶下沉统计值

Table 1 Values of crown settlements mm

围岩级别	洞的类别	拱顶下沉		
		最大值	平均值	双洞平均
V	左洞	29.04	21.2	18.2
	右洞	17.21	15.2	
IV	左洞	17.21	12.6	11.5
	右洞	14.05	10.4	
III	左洞	15.64	8.3	6.7
	右洞	8.45	5.0	

变形越大, 稳定时间也越长。对于 V 级围岩, 开挖初期拱顶下沉快速增长, 锚喷支护后 30 d 左右, 下沉速率减小, 变形缓慢增长, 大约 60 d 后基本达到稳定, 对于 IV, III 级围岩, 锚喷支护 20 d 左右, 下沉速率减缓, 大约 40 d 后基本达到稳定。

(3) 洞周收敛

各断面洞周收敛测线布置如图 3 所示。

由于隧道洞口浅埋段岩性较差, 且施工开挖复杂、扰动大, 使得收敛变形相对较大, 量测的最大水平测线收敛变形为 11 mm, 但相对收敛均小于 0.1%, 洞身段收敛测线变形相对较小, 平均为 4 mm,

且收敛稳定时间较快，对于 V 级围岩，稳定时间大约 30 d，IV，III 级围岩大约 20 d 基本达到稳定。整体上，水平测线收敛变形比其他测线收敛变形大，可以认为变形主要来自山体两侧，表明围岩水平挤压作用较明显。

图 8 为左洞 K6+650 断面水平测线收敛变形、测线离掌子面的距离与时间的关系曲线。从图 8 中可以看出，下断面开挖和仰拱开挖均使水平测线产生较大的收敛，但随后便迅速减小达到稳定。监测数据表明，当下开挖面距离监测面 60 m 左右时变形趋于稳定，当仰拱面距离监测面 40 m 时变形趋于稳定，时间大约是 20 d。围岩变形与测点到开挖面的距离(L)和隧道直径(D)密切相关，理论上，收敛位移与 L/D 成指数关系，一般在 L/D 达到 2~3 后基本稳定，以后就迅速减小直至稳定^[7]。

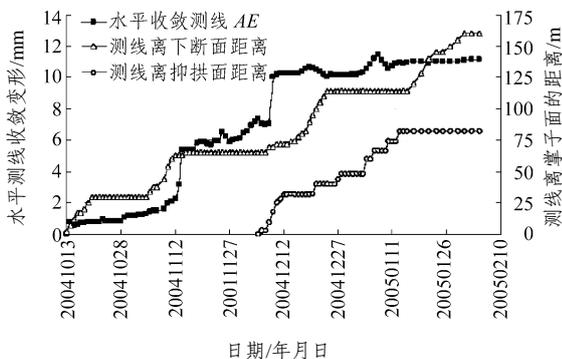


图 8 左洞 K6+650 断面水平测线收敛变形、测线离掌子面的距离与时间的关系曲线

Fig.8 Curves of horizontal convergence deformations with time and excavation at section K6+650 in left tunnel

(4) 围岩内部位移

在隧道地表及洞内同断面埋设多点位移计，对开挖过程中洞周围岩及中间岩柱的位移进行实时监测，测点布置如图 3 所示。以 K02 多点位移计观测孔为例，该测孔位于 K6+630 断面右洞拱顶，属于 V 级围岩，4 个测点位移时程曲线及位移变化趋势线分别如图 9，10 所示。

从图 9 中可以看出，隧道洞周围岩位移基本上经历了“急剧变化→缓慢变化→基本稳定”的过程。隧道开挖初期，洞周围岩内部各测点变形很小，当隧道各开挖部先后通过监测面时，各测点位移显著增长，且离洞周壁面最近测点位移最大，离洞周越远位移越小。从稳定时间和空间上看，当仰拱开挖完毕时，测点位移达最大位移的 85%左右，而当仰

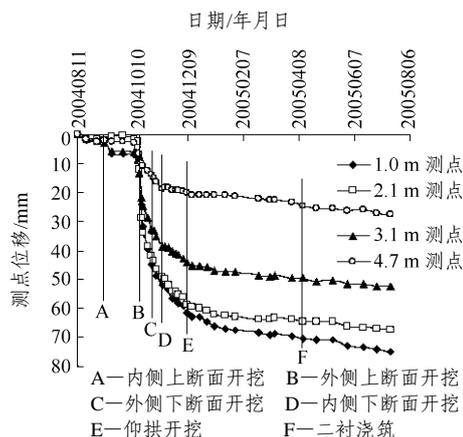


图 9 K02 多点位移计观测孔各测点位移时程曲线
Fig.9 Displacement-time curves of surrounding rocks

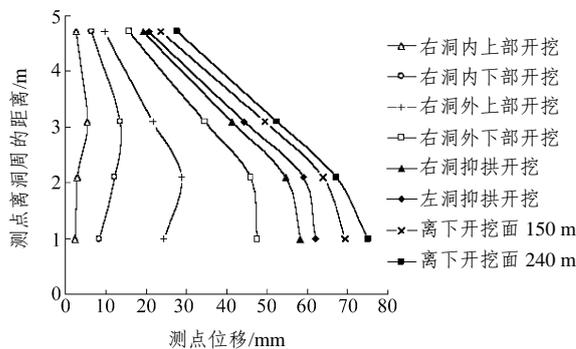


图 10 K02 多点位移计观测孔各测点位移变化趋势线
Fig.10 Tendency curves of surrounding rocks displacements

拱面通过监测面大约 30 m 时，各点位移已基本达到稳定。

4.2 支护应力监测结果及分析

隧道出口 K6+625 断面围岩压力盒和钢筋计布设如图 11 所示，图中，Z(Y)1~10 分别为左(右)洞各仪器布设位置编号，括号内为压力盒编号，其余为钢筋计编号(部分仪器已破坏)。

(1) 围岩压力监测结果分析

隧道左、右洞 K6+625 断面各测点压应力 - 时间曲线分别如图 12，13 所示。

由于隧道分部开挖相互影响，压力盒埋设初期，随掌子面推进，各测点监测压应力起伏较大，但从整体上看，当仰拱浇筑后，各点压应力基本达到稳定，表明喷层起到了支撑的作用；当二衬浇筑时，洞周应力重分布，各测点压力盒有所波动，但很快便趋于稳定。其中，2005 年 4 月 7 日，左洞施作二衬，可能由于施工扰动引起围岩松动以及二衬整体受力水平挤压作用，使得隧道拱顶部压力发生突变，应力增大约 0.2 MPa，最大应力值达 0.48 MPa，但随后便保持稳定，且其他各测点压应力也稳定

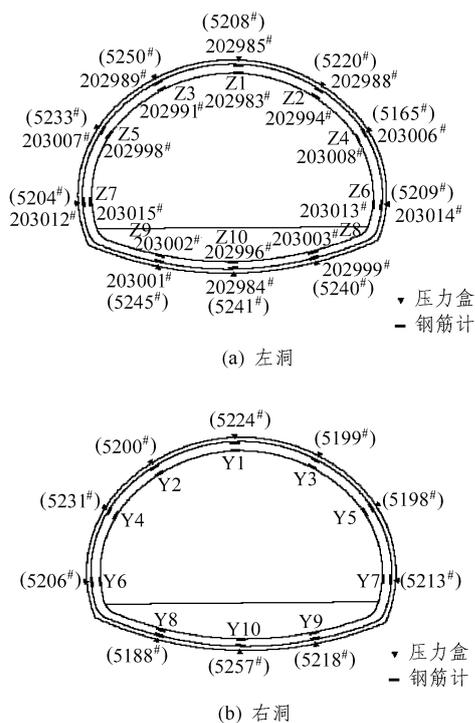


图 11 K6+625 断面围岩压力盒和钢筋计布置图
Fig.11 Layout of pressure gauges and stress gauges at K6+625

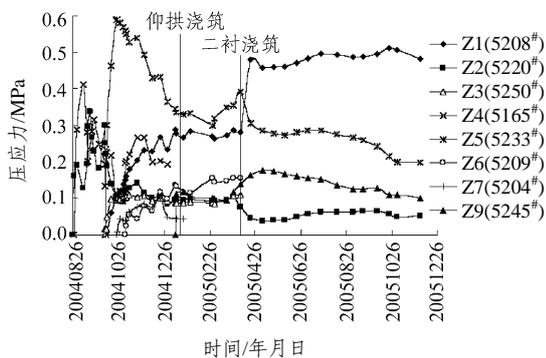


图 12 隧道左洞 K6+625 断面各测点压应力 - 时间曲线
Fig.12 Stress-time curves of pressure gauges at section K6+625 in left tunnel

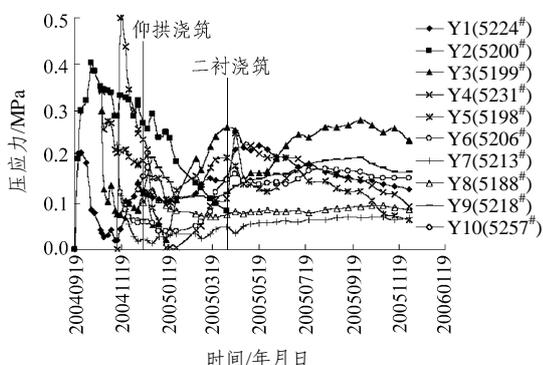


图 13 隧道右洞 K6+625 断面各测点压应力 - 时间曲线
Fig.13 Stress-time curves of pressure gauges at section K6+625 in right tunnel

收敛, 最终量测值均较小, 从整个断面来看, 隧道是稳定的。

另外, 由于隧道断面大, 在分部开挖时, 后施工部分对先施工邻近支护和围岩会产生多次扰动, 监测中表现为压应力读数逐渐减小, 有时甚至出现突变, 如左洞外侧上导坑拱脚 5233#压力盒、内侧上导坑拱脚 5165#压力盒、右洞外侧下导坑拱脚 5213#压力盒和内侧下导坑拱脚 5206#压力盒等, 根据监测结果, 开挖后及时支护并在相应拱脚处打设锁脚锚杆加固, 从随后的监测数据看, 加固的效果非常明显。

(2) 二衬内力监测结果分析

隧道左洞 K6+625 断面二衬各测点轴力 - 时间和弯矩 - 时间曲线分别如图 14, 15 所示(轴力以受压为正, 弯矩以二衬外侧受拉为正)。

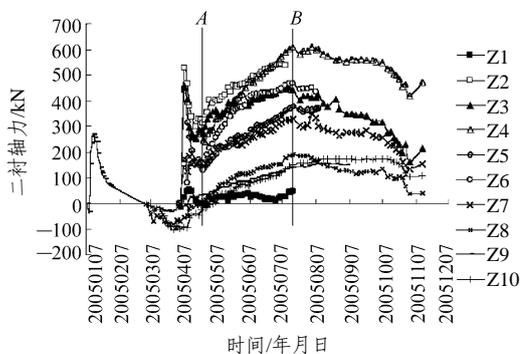


图 14 隧道左洞 K6+625 断面二衬各测点轴力 - 时间曲线
Fig.14 Force-time curves of monitoring points at section K6+625 of left tunnel

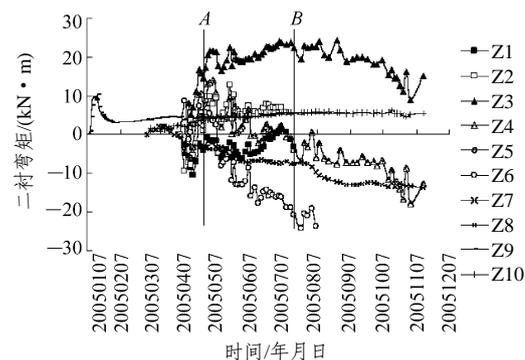


图 15 隧道左洞 K6+625 断面二衬各测点弯矩 - 时间曲线
Fig.15 Bending moment-time curves of monitoring points at section K6+625 of left tunnel

分析仰拱外侧 Z9 测点, 外半幅仰拱浇筑初期, 仰拱轴力迅速增长, 随左洞内半幅仰拱开挖, 压应力很快降低并转变为受拉, 当内半幅仰拱浇筑后, 内外侧仰拱封闭共同受力, 各测点压应力缓慢增长直至稳定, 表明仰拱已承受洞周围岩及二衬传递的

压应力。就整体而言,开挖过程中仰拱存在拉力,但所测得的拉力值均较小,而且随后逐渐降低转变为压力,并基本达到稳定,最大压力约为 160 kN,在监测后期,各测点压力均略有减小之势,但基本已达到稳定。

从图 14, 15 中可以看出,钢筋计埋设初期 20 d 左右,洞周二衬内力经历了调整期(A 线),主要为二衬浇筑混凝土固结及应力重分布所致。随掌子面推进,二衬轴力稳步增长,表明二衬开始承受部分围岩压力,大约 90 d 后各点轴力达到最大值,二衬弯矩则基本保持稳定(B 线)。同时,根据衬砌混凝土与钢筋位移协调,推算出洞周二衬混凝土最大压应力值约为 6 MPa,远小于混凝土的抗压强度,表明二次衬砌起到了安全储备的作用。

另外,位于左洞拱顶内侧的钢筋计(202983)在监测全过程中基本为拉应力,而拱顶外侧钢筋计(202985)在监测全过程中均为压应力,表明二衬拱顶部分从测点布设初期即受到较大的围岩压力,这与从压力盒监测到的数据是吻合的。该测点混凝土拉应力最大值为 0.56 MPa,且基本保持稳定,尽管不会有强度破坏问题,但这种情况需要引起注意,特别是大断面浅埋隧道,拱顶部分的受力状况更差,其稳定性必须得到保证。

5 结 论

(1) 从地表下沉和洞周变形监测结果看,隧道出口 V 级围岩段采用中隔壁法分部开挖是可行的,尽管其施工工序复杂,但在进洞初期可以较好地控制围岩变形。

(2) 隧道变形是时空效应共同作用的结果,开挖过程中,工作面影响范围一般为前后 30~40 m,即 2~3 倍洞径范围,相应时间大约 30 d,而且围岩质量越好,稳定的时间也越短。

(3) 比较隧道左、右两洞的变形和受力状态可以看出,右洞的状况相对要比左洞好一些,后行右洞的开挖对先行左洞的影响十分明显,设计和施工时应对此有充分的考虑。

(4) 从监测结果来看,初期支护所起作用相当明显。同时,隧道下断面开挖后要及时进行支护,并确保上断面初期支护拱脚的稳定,防止产生滑移,危害隧道整体稳定。

(5) 对于小净距隧道,二衬是支护手段的重要组成部分,必须重视后行隧道对围岩的扰动导致对先行隧道二衬的应力重分布。根据变形及应力量测结果,洞口段工作面掘进 20~30 m 即可施筑二次衬砌;对于洞身段,建议 40 m 后施筑二次衬砌。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ042 - 94 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1995.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTJ042 - 94 Technical specifications for construction of highway tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 1995.(in Chinese))
- [2] 刘 伟. 小净距公路隧道净距优化研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2004.(LIU Wei. Studying on little distance project optimization of highway tunnel[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2004.(in Chinese))
- [3] 刘艳青, 钟世航, 卢汝媛, 等. 小净距并行隧道力学状态试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 590 - 594.(LIU Yanqing, ZHONG Shihang, LU Rusui, et al. Experimental study on mechanical characteristics of twin tunnels with small spacing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 590 - 594.(in Chinese))
- [4] 黄拔洲, 陈少华, 秦 峰. 小净距隧道在京福高速公路上的实践[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(10): 19 - 22.(HUANG Bazhou, CHEN Shaohua, QIN Feng. Development of parallel tunnels with super-small interval in Beijing - Fuzhou freeway engineering[J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(10): 19 - 22.(in Chinese))
- [5] 夏才初, 李永盛. 地下工程测试理论与监测技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999.(XIA Caichu, LI Yongsheng. Testing theory and monitoring technology of underground engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1999.(in Chinese))
- [6] 福建省交通规划设计研究院. 福州国际机场高速公路一期工程(A3 标段)两阶段施工图设计[R]. 福州: 福建省交通规划设计研究院, 2004.(Fujian Communications Planning and Design Institute. Two stage construction design of the first phase project(tender A3) of Fuzhou International Airport Highway[R]. Fuzhou: Fujian Communications Planning and Design Institute, 2004.(in Chinese))
- [7] 崔茂玉. 公路隧道三维动态信息监控与施工力学分析研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2000.(CUI Maoyu. Three-dimensional information monitoring and construction mechanical analysis of road tunnel[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2000.(in Chinese))