

# 四车道特大断面大跨度隧道施工中支护体系力学 性态研究

周丁恒<sup>1</sup>, 曹力桥<sup>2</sup>, 马永峰<sup>3</sup>, 房师涛<sup>4</sup>, 王 坤<sup>5</sup>

(1. 慕尼黑工业大学, 德国 慕尼黑 81245; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 3. 中石油华东勘察设计研究院, 山东 青岛 266071; 4. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 5. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 以目前国内规模最大的双洞八车道高速公路隧道为背景, 详细介绍四车道特大断面大跨度隧道施工过程中支护体系应力现场监测的项目、方法及手段, 对不同施工工序下隧道支护体系力学性态进行监测与分析。研究结果表明: (1) 右导洞上台阶、左导洞下台阶和核心土上台阶开挖引起支护体系应力分布较大变化, 是隧道主要监测控制点; (2) 封闭支护结构及对拉锚杆的使用是改善结构受力和抑制隧道变形有效途径, 应尽早施作仰拱和形成封闭环。研究成果可为日后类似工程的设计、施工和研究提供有益的借鉴和参考。

**关键词:** 隧道工程; 四车道; 特大断面大跨度隧道; 应力监测; 力学性态

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)01 - 0140 - 09

## RESEARCH ON CONSTRUCTION BEHAVIORS OF SUPPORT SYSTEM IN FOUR-LANE ULTRA LARGE-SPAN TUNNEL WITH SUPER-LARGE CROSS-SECTION

ZHOU Dingheng<sup>1</sup>, CAO Liqiao<sup>2</sup>, MA Yongfeng<sup>3</sup>, FANG Shitao<sup>4</sup>, WANG Kun<sup>5</sup>

(1. Technical University of Munich, Munich 81245, Germany; 2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China; 3. China Petroleum East China Design Institute, Qingdao, Shandong 266071, China; 4. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China; 5. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the largest highway tunnel with two holes and eight lanes in China, the contents, technique and method of the stress monitoring of the support system are described. The tunnel stresses during different construction procedures are monitored and analyzed. The results show that: (1) The construction of the up-stage in the right hole, the down-stage in the left hole and the up-stage of the core soil are the main points changing the stress distribution of the support system greatly. (2) The enclosure of lining and using of the cross anchor are effective methods to improve the performance of lining and restrain the deformation of the tunnel. Therefore, it is important to construct the inverted arch and enclose the lining. The results can be adopted in the design, construction and research of similar tunnels.

**Key words:** tunnelling engineering; four lanes; ultra large-span tunnel with super-large cross-section; stress monitoring; mechanical behaviors

### 1 引 言

近年来为适应多车道高速公路建设, 全国各地

已建成不少大断面隧道。与普通公路隧道相比, 双洞八车道特大断面大跨度隧道的结构受力更加复杂、施工方法更为多样化。目前, 在大断面隧道围岩和衬砌的受力、变形及稳定性研究等方面都有了

**收稿日期:** 2009 - 06 - 03; **修回日期:** 2009 - 08 - 05

**作者简介:** 周丁恒(1984 -), 男, 2006年毕业于中国地质大学(武汉)地下建筑工程专业, 现为博士研究生, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。  
E-mail: zhoudingheng615@gmail.com

新的发展与提高,取得了一定的研究成果。在大断面隧道数值模拟及模型试验方面,黄生文等<sup>[1]</sup>以有限元法模拟断层对大断面大跨度隧道围岩应力影响。李亮等<sup>[2]</sup>分析了高速列车振动荷载下大断面隧道响应特征。吴梦军和黄伦海<sup>[3]</sup>对四车道公路隧道在不同施工方法下的施工动态过程进行了模型试验和数值模拟分析,得到四车道隧道在不同施工方法动态施工力学特征。李志刚等<sup>[4]</sup>模拟扁平特大断面隧道施工核心土变形及受力。袁勇和王胜辉<sup>[5]</sup>提出了四车道特大断面隧道先成结构法支护理念,并基于该理念对先成预应力结构进行了数值模拟验证。黄成造等<sup>[6]</sup>提出采用对拉锚杆来控制四车道特大断面隧道双侧比壁开挖预留核心土变形(采用导洞法)。孙兆远等<sup>[7, 8]</sup>分别对不同工法下特大断面隧道围岩变形机制和地表变形进行了分析。在大断面隧道施工辅助措施方面,黄明琦等<sup>[9]</sup>研究了软弱围岩大断面隧道径向注浆技术。在大断面隧道监测方面,谭忠盛等<sup>[10, 11]</sup>采用现场试验手段对大断面深埋或浅埋黄土隧道锚杆作用效果进行研究。龚建伍等<sup>[12]</sup>对大断面小净距隧道在爆破荷载作用下的振动响应进行了现场监测分析与研究。夏才初等<sup>[13]</sup>分析了大断面小净距隧道围岩和支护系统变形及受力特点。陈耕野等<sup>[14]</sup>对韩家岭四车道特大断面隧道施工进行了应力测试分析。

目前,对于大断面隧道国内尚未形成统一的设计与施工标准,主要研究对象为三车道隧道,而对于四车道隧道,目前相关研究<sup>[3-6, 14]</sup>较少。因四车道隧道比三车道隧道在断面面积、跨度及扁平率上有着明显的差异,使得四车道隧道围岩和衬砌的受力、变形及稳定和三车道隧道有很大的差别,不能简单用三车道隧道的相关理论来进行四车道隧道的研究,需对四车道隧道进行深入研究。此外,四车道隧道开挖跨度大、扁平率低,施工工序转换复杂,多次爆破对围岩造成多次扰动,特别是核心土受力尤为复杂。因此,采用监控量测手段,及时反馈隧道施工时支护体系状况,是当前四车道特大断面大跨度公路隧道建设中的重要研究课题之一。

## 2 工程背景

广州龙头山隧道属双洞八车道公路隧道,始建于 2005 年 1 月,于 2006 年 5 月贯通,是京珠国道主干线绕广州公路东环段的引线工程,设计正常运营车速为 100 km/h。隧道左线长为 1 010 m,右线

长为 1 006 m,两洞间距为 25 m,包含有 II~V 级围岩段。隧道最大埋深为 98 m,最大开挖宽度为 20.7 m,最大开挖高度为 13.58 m,在临时支撑处:导洞宽度为 7.313 m,核心土宽度为 5.960 m。

根据工程地质调绘及钻探揭示,隧道区地层较为简单,局部地段基岩出露地表,隧道区主要分布第四系残坡积物,基岩为燕山晚期的花岗岩侵入体,岩性为二长花岗岩,从上至下各层分布为:砾质亚黏土、全风化二长花岗岩、强风化二长花岗岩、弱风化二长花岗岩及微风化二长花岗岩。

龙头山隧道设计断面与施工顺序如图 1 所示,开挖以左导洞超前,分上下台阶,右导洞次之(分上下台阶),核心土开挖最后(分 3 步开挖)。实际施工工序则调整为右导洞上、下台阶开挖在左导洞下台阶开挖前完成,而核心土分 2 步开挖。结构设计为复合衬砌,以锚杆湿喷钢纤维混凝土等为初期支护,并辅以钢支撑,注浆小导管等支护措施。

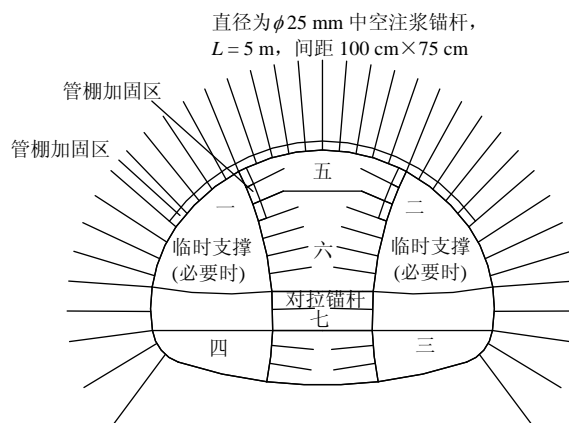


图 1 隧道设计断面与施工顺序

Fig.1 Tunnel cross-section design and construction sequence

## 3 隧道监测方案设计

四车道特大断面大跨度隧道两洞间距较小,左右洞施工相互影响,开挖工序也直接影响着隧道围岩和结构的稳定性,特别是中间核心土,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,针对该隧道的结构特点、施工工艺及地质情况,应力监测布置情况及项目所采用仪器、元件及测点数量,支护体系应力监测主要项目及量测方法如表 1 所示,支护体系应力监测断面布置如图 2 所示。

表 1 支护体系受力监测主要项目及量测方法

Table 1 Main monitoring measurement contents and methods for support system

监测序号	项目名称	测量仪器	测点或测线数/个
1	锚杆轴力	拉拔计、钢筋计	10
2	接触压力	压力盒	14
3	钢支撑内力	钢筋计	10
4	二衬内力	钢筋计、混凝土表面应变计	8

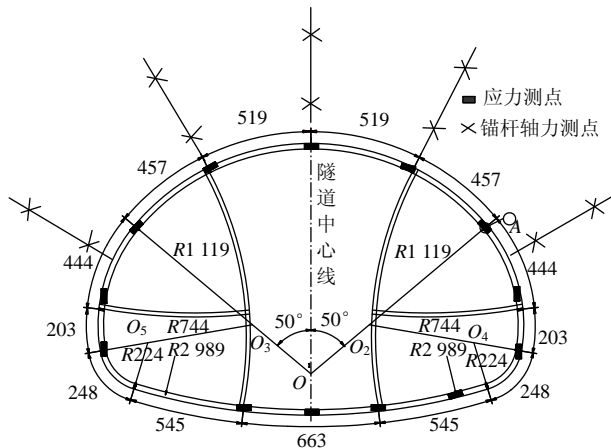


图 2 支护体系受力监测断面布置图(单位: cm)

Fig.2 Arrangement of stress monitoring of cross-section for support system(unit: cm)

### 4 施工力学性态分析

隧道监测组从2005年7月进驻现场开展监测工作,采集了大量应力监测数据。本文重点以隧道进出口V级围岩段ZK5+870断面为例,简要介绍四车道特大断面大跨度隧道不同施工工序下支护体系力学性态,并进行相关分析研究。

ZK5+870断面围岩地质图如图3所示,断面共分为4层:(1)残坡积土;(2)全风化花岗岩;(3)强风化花岗岩;(4)弱风化花岗岩(IV类),隧道位于第三层岩石中。地下水条件:裂隙水性不均匀,局部透水性较好。ZK5+870断面物理力学参数如表2所示。本文的符号约定:正号表示应力为拉应力,负号则与之相反。应力绘图时,正值在隧道外,负值与之相反;图例中开挖面距离量测断面为正值时,表示开挖面未到达量测断面,负值与之相反。本文所提到的“量测断面”均指ZK5+870断面。

#### 4.1 接触压力

##### (1) 左导洞上台阶开挖

开挖面离开量测断面一段距离后,施做初期支护,至右导洞上台阶接近量测断面,两施工工序间

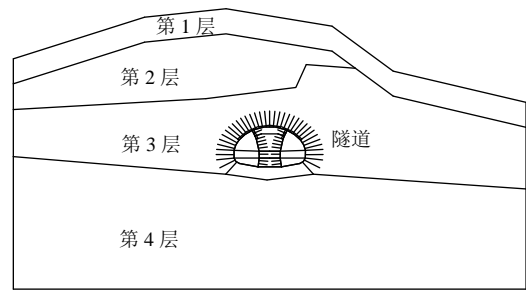


图 3 ZK5+870断面围岩地质图

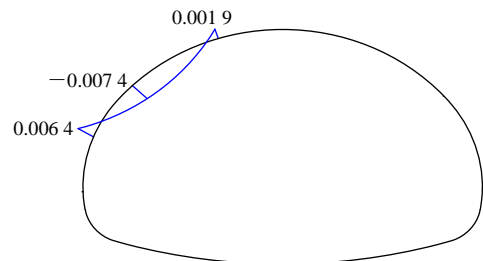
Fig.3 Geological condition of surrounding rock mass in cross-section ZK5+870

表 2 ZK5+870断面物理力学参数

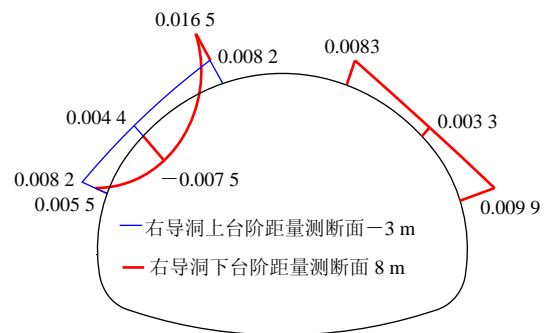
Table 2 Physico-mechanical parameters for cross-section ZK5+870

土层序号	名称	$\gamma$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$E$ /GPa	$\mu$	$\phi$ ( $^\circ$ )	$c$ /kPa
1	残坡积土	16.6	0.14	0.38	24.52	40
2	全风化花岗岩	21.0	0.65	0.30	30.00	130
3	强风化花岗岩	19.0	0.20	0.35	21.00	100
4	弱风化花岗岩(IV类)	26.1	2.50	0.21	47.60	1 055

隔短,初衬与围岩接触压力量测时间较短。图4(a)为左导洞上台阶开挖后初衬与围岩接触压力。由图4(a)可知,左拱腰处接触压力大于左导洞顶处,左导洞45°处接触压力为负值。



(a) 左导洞(上台阶距离量测断面-10 m)



(b) 右导洞

图 4 左、右导洞上台阶开挖后初衬与围岩接触压力(单位: MPa)

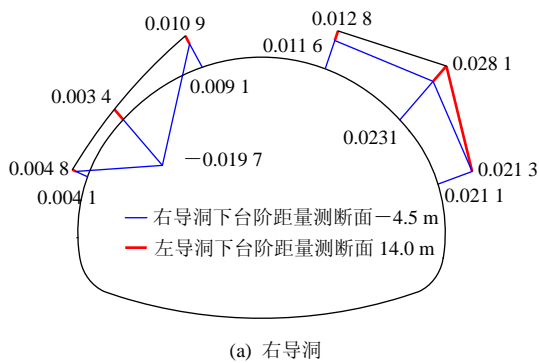
Fig.4 Contact stress between surrounding rock mass and linings after upper stage in the left and right drifts (unit: MPa)

(2) 右导洞上台阶开挖

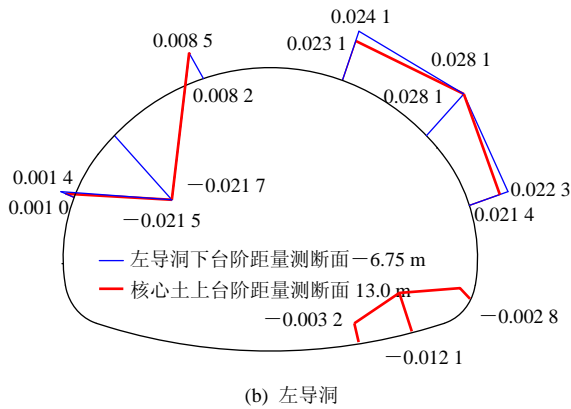
图 4(b)为右导洞上台阶开挖后初衬与围岩接触压力。由图 4(b)可知, 右导洞上台阶开挖引起左导洞顶及拱腰处接触压力进一步增大, 左导洞 45°处接触压力由负值变为正值。右导洞下台阶接近量测断面前(8 m), 左导洞顶处接触压力继续增大, 左拱腰处减小, 左导洞 45°处接触压力则由正转负; 右导洞接触压力逐渐发展, 右导洞顶和拱腰处测值均大于右导洞 45°处。

(3) 右导洞下台阶开挖

图 5(a)为右导洞下台阶开挖初衬与围岩接触压力分布。



(a) 右导洞



(b) 左导洞

图 5 右、左导洞下台阶开挖后初衬与围岩接触压力 (单位: MPa)

Fig.5 Contact stress between surrounding rock mass and linings after down stage in the right and left drifts (unit: MPa)

右导洞下台阶开挖引起左导洞接触压力向隧道内方向发展, 左导洞顶与拱腰处接触压力逐渐减小, 45°处接触压力以负值趋势增大; 右导洞接触压力继续增大, 但 45°处接触压力大于右导洞顶和拱腰。右导洞上台阶开挖停止后, 至核心土上台阶接近量测断面(14 m), 左导洞顶和拱腰处接触压力小幅增大, 45°处由负转正; 右导洞上台阶接触压力继续增

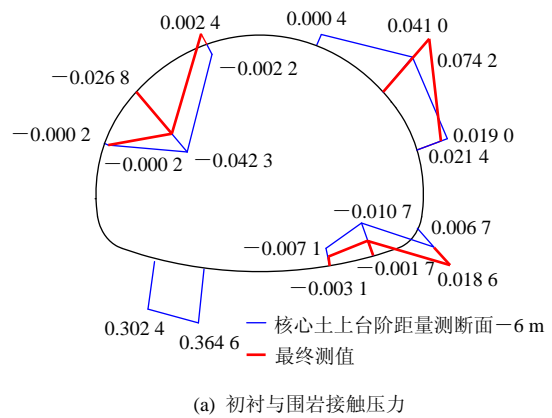
大, 但变化幅度较小。

(4) 左导洞下台阶开挖

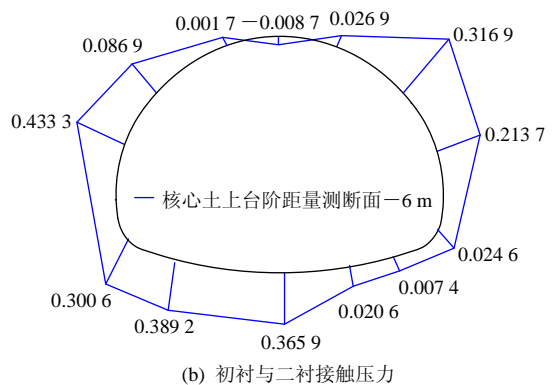
图 5(b)为左导洞下台阶开挖初衬与围岩接触压力分布。左导洞下台阶开挖引起左导洞接触压力继续向隧道内发展; 除右导洞顶处接触压力有较大幅度增大外, 其他位置接触压力变化幅度不大。核心土上台阶开挖面接近量测断面前(13 m), 左导洞接触压力变化较小; 右导洞顶和拱腰均有一定程度的减小, 右导洞拱脚处出现负值压力。由图 5 可知, 左导洞下台阶开挖, 对左、右导洞应力重分布均有较大影响。

(5) 核心土开挖

图 6 为核心土开挖后接触压力。核心土开挖引起左导洞接触压力进一步向隧道内方向发展, 当左导洞顶和拱腰中间位置的接触压力达到-0.042 3 MPa 时, 拱脚处出现较大的接触压力; 右导洞顶处接触压力减小, 拱腰处基本保持不变, 右导洞顶和拱腰中间位置继续增大, 拱脚由负值变为正值。由图 6(a)可知, 核心土开挖对左右导洞应力重分布均有较大的影响。核心土开挖后, 支护体系逐渐趋于稳定, 左、右导洞接触压力分布情况变化不大, 可



(a) 初衬与围岩接触压力



(b) 初衬与二衬接触压力

图 6 核心土开挖后接触压力(单位: MPa)

Fig.6 Contact stresses between the rock and lining after the construction of core soil(unit: MPa)

不考虑围岩变形的时间效应所引起的支护体系应力分布变化。

断面形成后开始施作二衬，故初衬与二衬接触压力在核心土开挖后量测，图 6(b)为初衬与二衬接触压力最终分布情况，接触压力均小于 0.4 MPa，左拱腰至隧道底部及右拱腰以上 45°的区域初衬与二衬接触压力明显大于其他区域。

### 4.2 锚杆轴力

#### (1) 左导洞上台阶开挖

图 7(a)为左导洞上台阶开挖后锚杆轴力。右导洞上台阶开挖面距量测断面 10 m 时，此时左导洞上台阶已远离量测断面，左拱腰处测值为负值，而左导洞顶测值轴力较左拱腰处小。

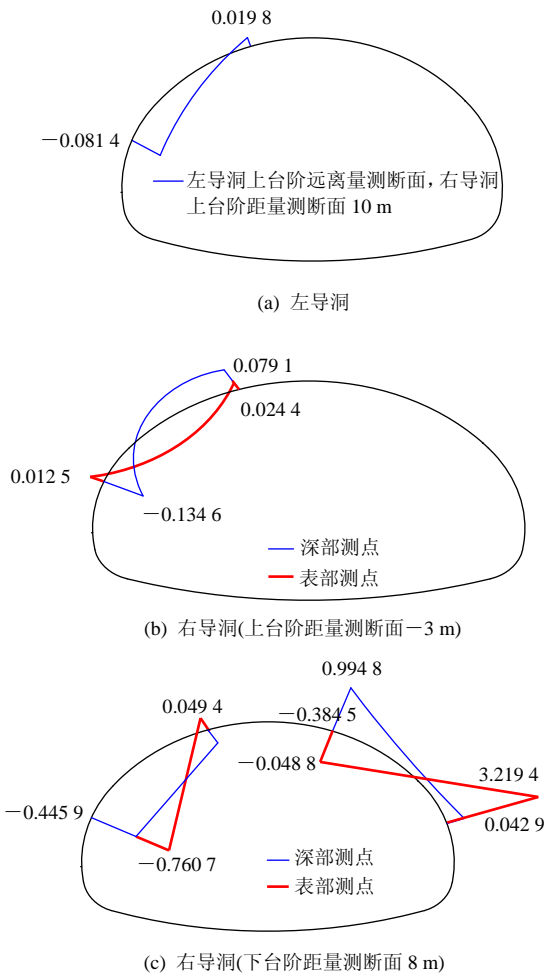


图 7 左、右导洞上台阶开挖后锚杆轴力(单位: kN)  
Fig.7 Bolt's axial forces after the upper stage in the left and right drifts(unit: kN)

#### (2) 右导洞上台阶开挖

图 7(b), (c)为右导洞上台阶开挖后锚杆轴力。右导洞上台阶开挖引起左导洞顶和拱腰处锚杆轴力深部测值沿各自方向进一步增大，而表部测值均较

小。右导洞下台阶接近量测断面(8 m)前，对于深部测值：左拱腰深部测值继续增大，左导洞顶深部测值方向发生变化，右导洞顶深部测值较大；对于表部测值，左右导洞范围内锚杆轴力最为明显的变化是右拱腰测值达到 3.2 kN。比较图 7(a)~(c)可知，右导洞上台阶开挖对锚杆轴力分布有较大影响。

#### (3) 右导洞下台阶开挖

图 8 为右、左导洞下台阶开挖锚杆轴力分布图。右导洞下台阶开挖引起左拱腰和左导洞顶深部测值进一步增大；右导洞顶深部测值增大约至 2.00 kN，右拱腰处未发生明显变化。表部测值变化不明显。至左导洞下台阶接近量测断面前(14 m)，左右导洞锚杆轴力变化不大。

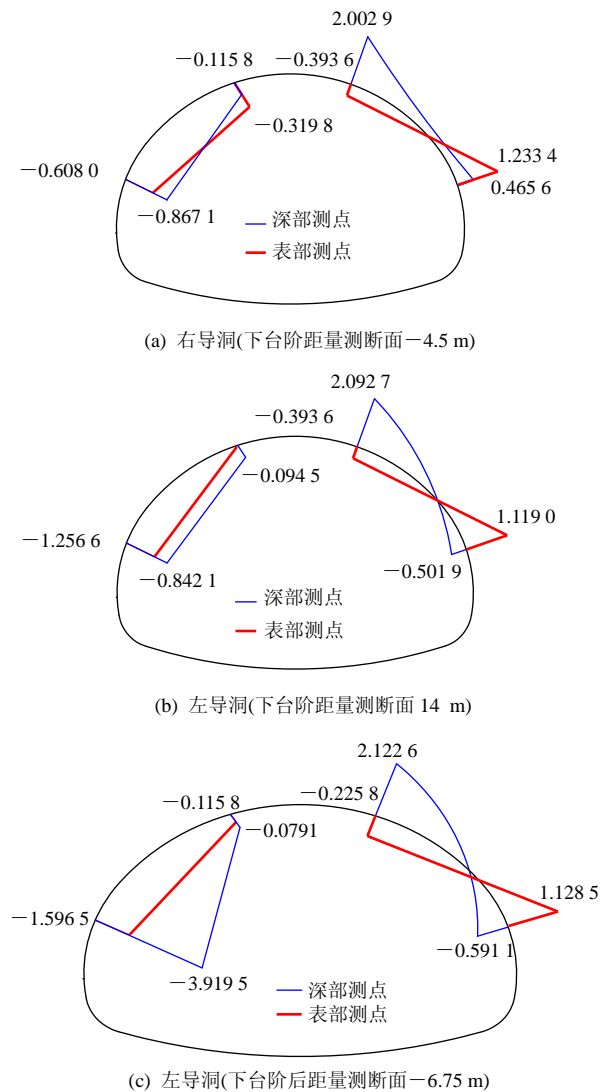


图 8 右、左导洞下台阶开挖后锚杆轴力分布(单位: kN)  
Fig.8 Bolt's axial forces after the down stage in the right and left drifts(unit: kN)

#### (4) 左导洞下台阶开挖

左导洞下台阶开挖后, 立即开挖核心土, 图 8(c) 为左导洞下台阶开挖结束时的分布情况。由图 8(b), (c)可知, 左导洞下台阶开挖引起左拱腰深部测值较大幅度增大, 开挖结束后, 其锚杆轴力约 3.92 kN, 左导洞顶锚杆轴力深部测值变化较小; 左拱腰、左导洞顶处表部测值变化幅度较小。左导洞下台阶开挖基本未对右导洞锚杆轴力变化产生影响。

(5) 核心土开挖

图 9 为核心土开挖后锚杆轴力分布。

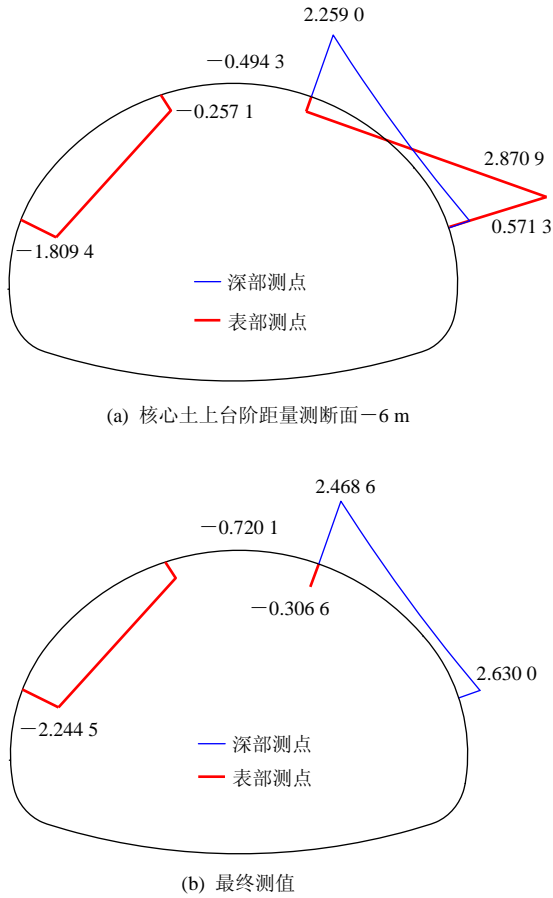


图 9 核心土开挖后锚杆轴力分布(单位: kN)

Fig.9 Bolt's axial forces after the construction of core soil (unit: kN)

核心土开挖引起左导洞上台阶内部测点锚杆轴力继续增大, 右导洞上台阶锚杆轴力深部测值变化不大; 表部测值增大一倍左右。由此可知, 核心土上台阶开挖对右导洞锚杆轴力影响较大。核心土下台阶开挖后, 支护体系趋于稳定, 锚杆轴力测值与核心土上台阶开挖后基本一致, 变化较小。

4.3 钢支撑内力

(1) 左导洞上台阶开挖

图 10(a)为左导洞上台阶开挖后钢支撑内力, 至

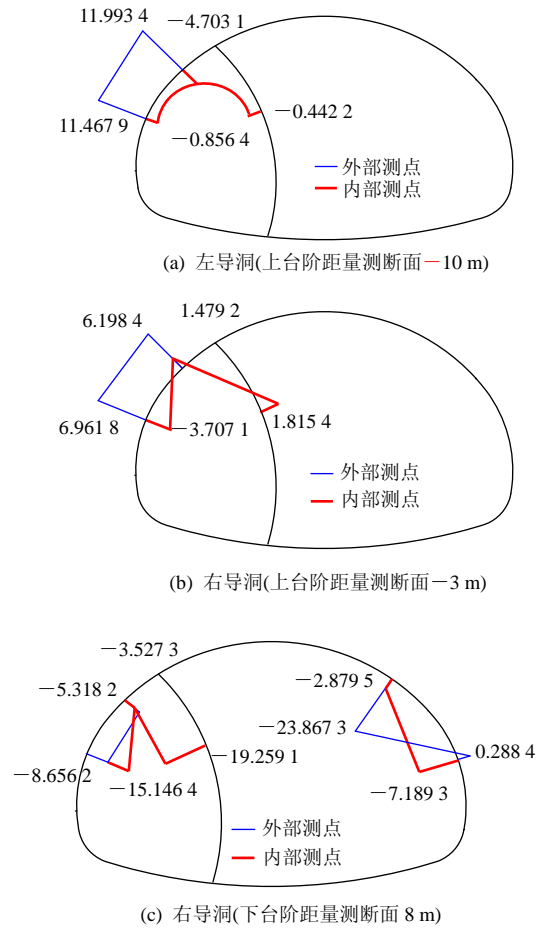


图 10 左、右导洞上台阶开挖后钢支撑内力分布(单位: MPa)

Fig.10 Steel stress distribution after the upper stage of the left and right drifts(unit: MPa)

右导洞上台阶开挖前, 左导洞顶和拱腰支撑内力外部测值均为正值, 而左导洞上台阶区域内部测值均为负值。

(2) 右导洞上台阶开挖

图 10(b), (c)为右导洞上台阶开挖后钢支撑内力分布图。左导洞顶和拱腰支撑内力外部测值逐渐减小, 变化幅度基本一致; 左拱腰内部测值以负值形式继续增大, 而左导洞顶和核心土内部测点支撑内力由负值变为正值, 变化幅度亦较大。由图 10(b), (c)可知, 右导洞上台阶开挖对支护应力变化影响较大。

至右导洞下台阶接近量测断面(8 m), 左导洞顶和拱腰外部测值由正值变为负值, 变化幅度很大; 左拱腰内部测值继续增大, 左导洞顶和核心土内部测值方向和大小均发生较大变化, 尤以核心土内部测点最为明显。由图 10(b), (c)可知, 右导洞上台阶开挖后仍对支护体系应力有较大影响。

(3) 右导洞下台阶开挖

图 11 为左、右导洞下台阶开挖时钢支撑内力分布。右导洞下台阶开挖引起左导洞顶和拱腰处钢支撑内力进一步增大，核心土处内部钢支撑内力减小。对于右导洞外部测值：拱腰处由较小的正值变为负值，拱顶处变化不大；对于内部测值：拱腰处变化较小，导洞顶处则由较小的负值变为正值。至

左导洞下台阶开挖接近量测断面前，钢支撑内力与右导洞下台阶开挖结束后分布情况基本一致，变化较小。

(4) 左导洞下台阶开挖

图 11(c), (d)为左导洞下台阶开挖后钢支撑内力分布。左导洞下台阶开挖引起左、右导洞支撑内力变较大变化，对于外部测值：左拱腰处从约-15.52 MPa 变为 5.89 MPa 左右，左导洞顶和右拱腰处则增大 6 MPa 左右，右导洞顶处变化不大；对于内部测值：左拱腰处测值减小 4 MPa 左右，左导洞顶处则增大 6 MPa 左右，右导洞顶和拱腰处支撑内力均沿各自方向变化 10 MPa 左右。至核心土开挖前，支撑内力分布与左导洞下台阶开挖结束后基本一致，变化较小。

(5) 核心土开挖

图 12 为核心土开挖后钢支撑内力分布。核心土上台阶开挖后，左右导洞钢支撑内力均有所减小，除左导洞顶位置外部测点内力变化较大，其他位置钢支撑内力变化均在 2~4 MPa 范围内，此时右拱脚出现负值的支撑内力。核心土下台阶开挖后，应力趋于稳定，支撑内力较上台阶开挖后，发生一定程度的变化，变化较为明显的位置为左拱腰内部测

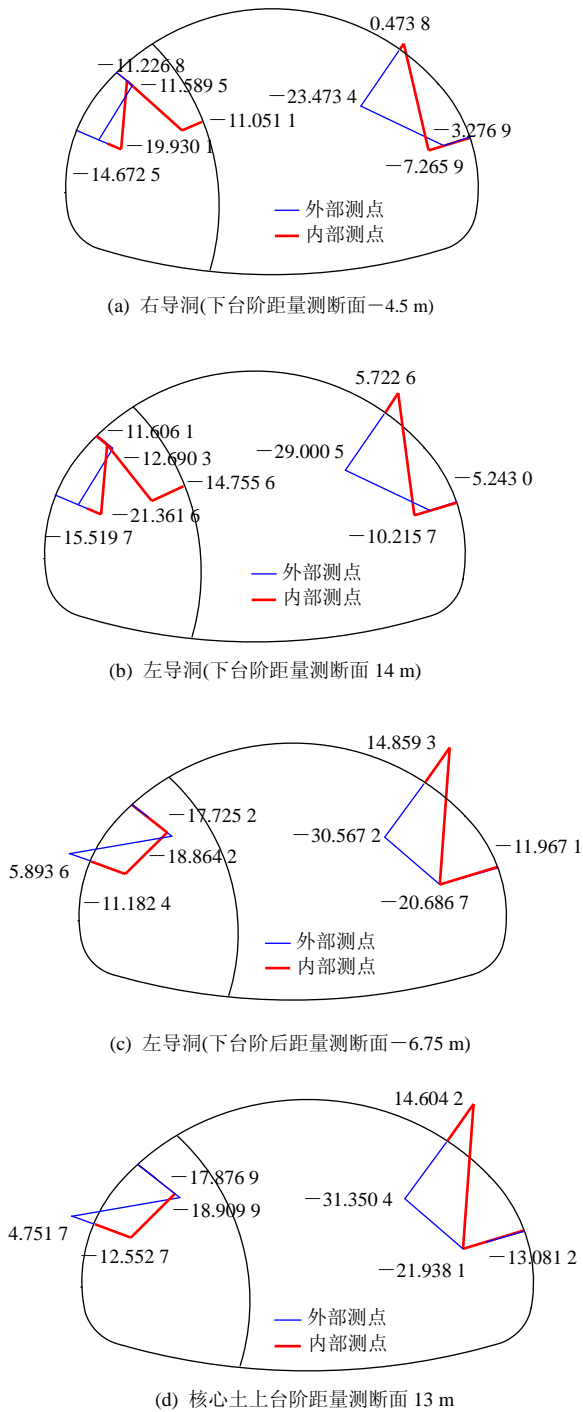


图 11 左、右导洞下台阶开挖时(后)钢支撑内力分布(单位: MPa)

Fig.11 Steel stresses after the down stage of the left and right drifts during(after) excavation(unit: MPa)

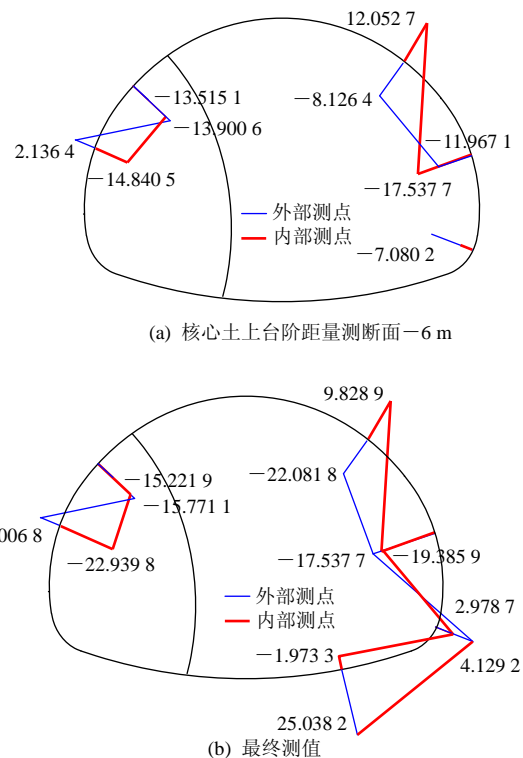


图 12 核心土开挖后钢支撑内力分布(单位: MPa)

Fig.12 Steel stresses after construction of core soil(unit: MPa)

点、右导洞顶外部测点及右导洞拱脚和底部位置测点。由此可知, 核心土下台阶开挖较上台阶对钢支撑内力变化影响更大。

#### 4.4 二衬内力

图 13 为 ZK5+870 断面二衬内力分布。由图 13 可知, 二衬内力外侧和内侧测值分布基本一致, 两者差别在右导洞上台阶处, 外侧测值为正, 而内侧测值为负。整体分布特征上, 核心土拱顶和左导洞下台阶处二衬内力均较其他位置大。

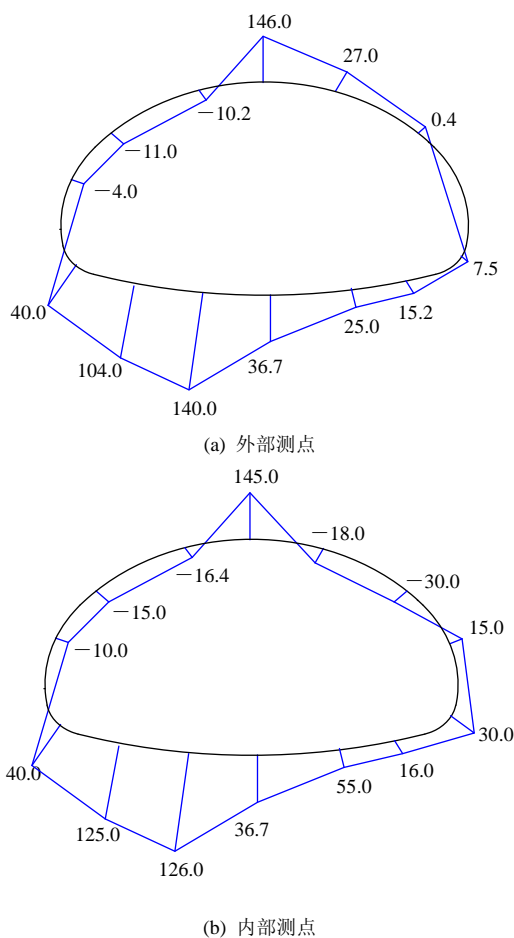


图 13 ZK5+870 断面二次衬砌钢筋内力分布(单位: MPa)

Fig.13 Distribution of stresses of steel bars in the secondary lining for cross-section ZK5+870(unit: MPa)

## 5 结 论

四隧道特大断面大跨度公路隧道跨度大、扁平率低, 施工工序转换复杂, 多次爆破开挖对围岩造成多次扰动, 尤其是核心土受力尤为复杂, 及时反馈支护体系力学性能是保证特大断面大跨度隧道施工安全的关键。本文依据不同施工工序下支护体系应力现场监测试验的系统分析, 得到以下结论:

(1) 四车道特大断面大跨度隧道断面面积大、跨度大以及扁平率低, 施工工序转换复杂, 多次爆破开挖对围岩造成多次扰动, 特别是核心土受力尤为复杂。龙头山隧道的应力监测表明, 隧道施工过程中, 应力转换十分复杂, 只有通过监控量测掌握支护体系的受力状态, 依据反馈的实测数据修正设计参数和施工工序, 采取即时有效的辅助加强措施, 才能保证特大断面大跨度隧道施工的安全。

(2) 在特大断面大跨度隧道施工过程中, 右导洞上台阶开挖、左导洞下台阶开挖以及核心土上台阶开挖引起支护体系应力的较大变化, 表明以上施工工序对支护体系影响较大, 是支护体系稳定性控制关键工序, 尤以左导洞下台阶及核心土上台阶开挖时, 应力转换频繁、幅度大, 为施工稳定性控制的重中之重。

(3) 对于四车道特大断面大跨度隧道出口段的软弱围岩段, 由于拱顶围岩自承能力很差, 即使有相当兼顾的初期支护, 仅靠其达到拱顶围岩完全趋于稳定是非常困难的。因此, 即时施作二次衬砌, 并尽快封闭成环十分重要。

#### 参考文献(References):

- [1] 黄生文, 司铁汉, 陈文胜, 等. 断层对大跨度隧道围岩应力影响的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 3 788 - 3 793. (HUANG Shengwen, SI Tiehhan, CHEN Wensheng, et al. Finite element analysis of influence of fault on large-span tunnel surrounding rock stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 788 - 3 793.(in Chinese))
- [2] 李 亮, 张丙强, 杨小礼. 高速列车振动荷载下大断面隧道结构动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4 259 - 4 265. (LI Liang, ZHANG Bingqiang, YANG Xiaoli. Analysis of dynamic response of large cross-section tunnel under vibrating load induced by high speed train[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4 259 - 4 265.(in Chinese))
- [3] 吴梦军, 黄伦海. 四车道公路隧道动态施工力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 3 057 - 3 062.(WU Mengjun, HUANG Lunhai. Research on dynamic construction mechanics of four-lane highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3 057 - 3 062.(in Chinese))
- [4] 李志刚, 丁文其, 杨重存, 等. 扁平特大断面公路隧道核心土模拟与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 627 - 632.(LI Zhigang, DING Wenqi, YANG Zhongcun, et al. Simulation and analysis of core



- rock in flat and large-span highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 627 - 632.(in Chinese))
- [5] 袁 勇, 王胜辉. 超大断面低扁平率公路隧道先成预应力结构新型支护体系数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 240 - 244.(YUAN Yong, WANG Shenghui. Numerical modeling of pre-built and pre-stressed innovative support system for super cross-section highway tunnel with lower flat-ratio[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 240 - 244.(in Chinese))
- [6] 黄成造, 严宗雪, 张晓荣. 某公路隧道破碎围岩塌方段处理及对拉锚杆的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 923 - 927. (HUANG Chengzao, YAN Zongxue, ZHANG Xiaorong. Tension-anchor and its application to fracture zone in highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5): 923 - 927.(in Chinese))
- [7] 孙兆远, 焦 苍, 罗 琼, 等. 不同工法开挖超大断面隧道引起围岩变形机制分析[J]. 铁道建筑, 2006, (9): 35 - 37.(SUN Zhaoyuan, JIAO Cang, LUO Qiong, et al. Analysis of surrounding rock deformation in super-large section tunnel under different construction methods[J]. Rail Engineering, 2006, (9): 35 - 37.(in Chinese))
- [8] 刘建平, 罗 琼, 孙兆远, 等. 客运专线超大断面隧道不同工法引起地表变形数值分析[J]. 铁道工程学报, 2006, (9): 55 - 58.(LIU Jianping, LUO Qiong, SUN Zhaoyuan, et al. Numerical analysis of surrounding rock deformation for tunnel excavation in passenger-dedicated railway line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, (9): 55 - 58.(in Chinese))
- [9] 黄明琦, 郭衍敬, 张 斌. 软弱围岩大断面隧道径向注浆变形的控制[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(5): 512 - 516.(HUANG Mingqi, GUO Yanjing, ZHANG Bin. Control of radial grouting deformation in surrounding soft rock of large-section tunnel[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(5): 512 - 516.(in Chinese))
- [10] 谭忠盛, 喻 渝, 王明年, 等. 大断面深埋黄土隧道锚杆作用效果的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1 618 - 1 625. (TAN Zhongsheng, YU Yu, WANG Mingnian, et al. Experimental research on bolt anchorage effect on large-section deep-buried tunnel in loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1 618 - 1 625.(in Chinese))
- [11] 谭忠盛, 喻 渝, 王明年, 等. 大断面浅埋黄土隧道锚杆作用效果的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 491 - 495, 506.(TAN Zhongsheng, YU Yu, WANG Mingnian, et al. Experimental study of bolt effect on large-section shallow-buried loess tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 491 - 495, 506.(in Chinese))
- [12] 龚建伍, 夏才初, 郑志东, 等. 鹤上三车道小净距隧道爆破震动测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1 882 - 1 887. (GONG Jianwu, XIA Caichu, ZHENG Zhidong, et al. Measurement and analysis of blasting vibration in Heshang three-lane tunnels with small clear space[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1 882 - 1 887.(in Chinese))
- [13] 夏才初, 龚建伍, 唐 颖, 等. 大断面小净距公路隧道现场监测分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 44 - 50.(XIA Caichu, GONG Jianwu, TANG Ying, et al. Study of site monitoring of large section highway tunnels with small clear spacing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 44 - 50.(in Chinese))
- [14] 陈耕野, 刘 斌, 万明富, 等. 韩家岭大跨度公路隧道应力监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 2): 5 509 - 5 515.(CHEN Gengye, LIU Bin, WAN Mingfu, et al. Analysis of stress monitoring of a large-span highway tunnel in Hanjialing mountain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5 509 - 5 515.(in Chinese))