

交叉隧道施工对已有隧道稳定性影响研究

陈卫忠^{1,2}, 郑东³, 于建新⁴, 李明¹, 袁敬强¹, 刘焕春⁴, 田洪铭¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 3. 中交第二公路勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430056; 4. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 近接隧道施工过程中面临地质条件复杂、围岩扰动较大等诸多问题, 合理施工方法的研究极其必要。以从莞高速新建走马岗公路隧道上方穿越东深供水隧洞工程为背景, 首先, 结合现场振动安全的施工要求, 采用数值计算提出交叉段合理施工工法。同时, 在交叉段施工过程中, 对在建隧道的围岩压力、初期支护结构的受力情况以及既有供水隧洞的断面收敛等进行了实测, 结果表明: 在建隧道的围岩压力 10 d 内基本稳定, 拱腰位置围岩压力较大, 右侧拱腰最大为 0.2 MPa, 之后缓慢减小并趋于稳定。既有东深供水隧洞内安全监测数据表明: 断面收敛及混凝土应变均相对较小, 在安全范围之内。研究成果与方法可为类似工程提供参考。

关键词: 隧道工程; 交叉隧道; 施工方法; 围岩压力; 稳定性

中图分类号: U 455

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)增1-3097-09

STUDY ON STABILITY OF CLOSE CROSS TUNNEL ON EXISTING TUNNEL

CHEN Weizhong^{1,2}, ZHENG Dong³, YU Jianxin⁴, LI Ming¹, YUAN Jingqiang¹, LIU Huanchun⁴, TIAN Hongming¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China; 3. Second Highway Consultants Co., Ltd., China Communications Construction Corporation, Wuhan, Hubei 430056, China; 4. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

Abstract: More and more cross tunnels are facing complicated geological conditions and significant disturbance of surrounding rock, and it is quite necessary to research reasonable construction methods for tunnels. Based on the project of Zoumagang highway tunnel passing through upon Guangdong Yuegang water supply tunnel. Firstly, the construction method was numerically simulated for safety and construction sequences have been suggested according to vibrate speed control criterion for DWSS tunnel. Meanwhile, the ground pressure of surrounding rockmass of primary tunnel support and section convergence of existing tunnel were monitored. The field measurements show that at the intersection of two tunnels, the surrounding rock pressures of excavating tunnel achieved stability in 10 days basically. And the maximum ground pressure was 0.2 MPa and appeared at the hance of the tunnel and then decreased to a stable value slowly. The convergence and concrete strain of the water supply tunnel were relatively little. The research results showed that this construction method was safe and reliable. The achievements from the research work will benefit work can provide reference for similar projects.

Key words: tunnelling engineering; cross tunnel; construction method; surrounding rock pressure; stability

收稿日期: 2013-12-13; **修回日期:** 2014-05-29

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(51225902, 51309217); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036006)

作者简介: 陈卫忠(1968-), 男, 博士, 1990年毕业于山东矿业学院采矿工程专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2013.1809

1 引言

近距离交叉隧道建设项目越来越多^[1]。近接交叉隧道中的开挖再一次引起已有隧道围岩和支护结构的应力重分布，对交叉段附近岩体和支护结构受力有很大的影响^[2]。如何保证新建隧道顺利穿越既有隧道是工程技术人员面临的重要课题。张玉军和刘谊平^[3]对上下行隧道立交处围岩稳定性进行了三维有限元计算，分析了围岩的应力与变形状态，相应的开挖、支护方法和施工时的监测内容提出建议。仇文革和龚伦^[4-6]提出了地下工程近接施工的分类、分区等的概念及相应准则，给出了研究和解决近接施工问题的方法，利用数值模拟及现场监测提出了控制标准及对策措施。赵旭峰等^[7]利用三维仿真计算，模拟了盾构机上作用3种不同推进力时对既有运营隧道变形和主应力的影响。张国华等^[8]结合大帽山隧道的工程实践，通过现场监控量测，研究了复杂地质条件下大断面小净距隧道双侧壁导坑法施工时围岩的稳定性。刘辉喜等^[9]采用MIDAS-GTS从衬砌变形、轴力和弯矩的角度分析了交叉隧道施工的安全性。吴占瑞和漆泰岳等^[10]采用FLAC^{3D}模拟分析了交叉隧道施工过程中的衬砌变形、受力情况和安全系数。杜立兵等^[11]基于断裂力学的Griffith准则提出了开裂安全系数CF，利用有限元软件分析了既有隧道二次衬砌的安全性。刘志强等^[12]利用数值模拟和现场监测，对既有隧道的衬砌受力、变形进行了研究，并提出了加固措施。目前，国内外对近接隧道施工工法的研究，以及在建隧道施工时的围岩压力、支护结构力学特性的现场实测研究相对较少。

鉴于此，对新建从莞高速对走马岗隧道右线穿越东深供水隧洞交叉段围岩、支护系统受力特性进行分析，提出保障既有供水隧洞安全的施工工法，为交叉隧道围岩力学特性研究、交叉隧道支护结构设计等提供了有力支撑。

2 工程背景

东深供水工程，全称东江—深圳供水工程，跨越中国广东省东莞市和深圳市境内，水源取自东江，是为香港供水的大型调水工程。走马岗供水隧洞是东深供水工程一条重要的输水隧洞，其畅通安全与否直接关系到全线供水工程的运营，并直接关系到整个香港地区的饮用水问题。新建走马岗公路隧道(以下简称公路隧道)上穿既有东深供水走马岗隧洞(以下简称供水隧洞)，隧道之间平面线位夹角29.86°。公路隧道与供水隧洞交叉段处，左右线净距28.5m，中心线间距45.8m。左线(开挖断面16.5m×9.5m)与供水隧洞(净空断面7.2m×6.4m)交叉桩号为ZK22+119.2，净距21.5m。右线(开挖断面16.78m×10.11m)与供水隧洞交叉桩号为YK22+189.7，净距22.1m。新建走马岗隧道与东深供水走马岗隧洞交叉段的平面及空间位置关系如图1、2所示。

走马岗公路隧道埋深为140m，构造应力不明显。围岩为中~微风化混合花岗岩，岩质坚硬，强度较高，受构造影响严重，裂隙发育，岩体较破碎，稳定性较差，含裂隙水，施工开挖易掉块坍塌，易渗漏水。与东深供水隧道交叉段处主要岩性为混合岩，岩石坚硬，微风化，裂隙稍发育，洞内地下水呈局部渗水或滴水现象。

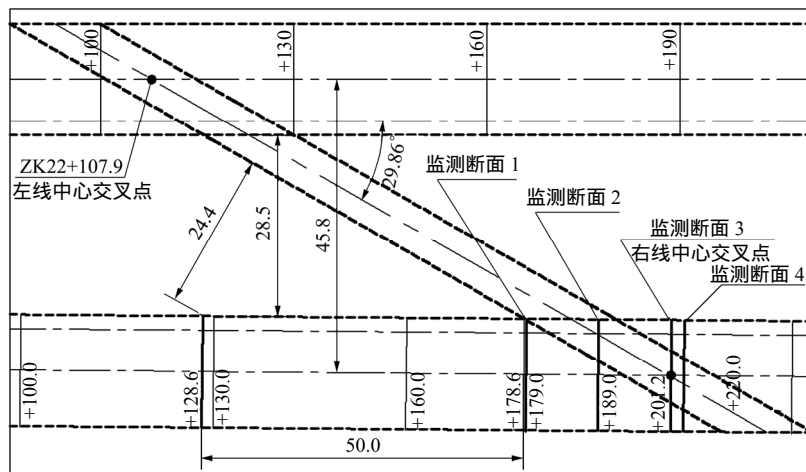


图1 两隧道交叉段平面图(单位：m)

Fig.1 Planar graph of intersection of two tunnels(unit : m)

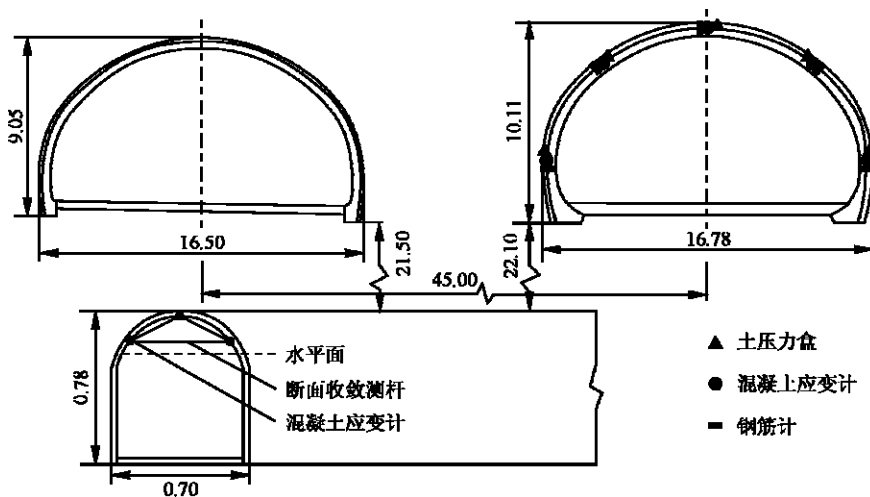


图 2 两隧道交叉段的空间位置关系(单位：m)

Fig.2 Spatial relationship between two tunnels(unit : m)

交叉段范围内，左右线公路隧道开挖跨度、开挖面尺寸均较大，造成的围岩扰动较大。通过优化施工工法，缩短单次开挖进尺，减小钻爆施工对围岩的扰动性，同时对在建隧道的围岩压力、衬砌结构受力特性以及既有隧洞的断面收敛进行监控以保证隧道施工安全，减少施工对既有供水隧洞的影响。

3 施工工法研究

3.1 交叉段施工工法

隧道掘进钻爆法施工具有经济、高效及对地质适应能力强的明显优势，所以至今仍是我国隧道掘进施工中的最重要和最常用的技术手段^[13]。对爆破振动的控制成为近距离隧道施工的重要问题。因此，在交叉段施工前期对现场隧道爆破振动进行监测，回归得到走马岗地区的萨道夫斯基公式。通过对东深供水隧洞既有结构的调查研究，发现混凝土衬砌结构已经出现多处裂隙，并有漏水现象。结合规程^[14]的规定，制定出爆破施工振动速度小于 7 cm/s 的控制标准。据此得出，采用现场爆破方案进行开挖施工时，安全距离为 30.2 m。为尽可能减少隧道施工对供水隧洞的影响，从交叉段向两侧各延伸 50 m 作为控制范围。同时，考虑到两隧道为空间斜交叉，控制范围开始桩号处与东深供水隧洞的水平最近距离为 24.4 m(见图 1)，空间最小距离为 34 m，满足安全控制范围的要求。

走马岗隧道交叉段范围内围岩类别为 Ⅲ级、Ⅳ级，结合现场隧道施工机械，交叉段范围内采用长台阶法施工。整个断面分 3 部开挖，具体如图 3 所

示。首先开挖上台阶 I 部，根据开挖台车高度(图 3 虚线部分)，上台阶开挖高度为 8.5 m；下台阶分左右两部分进行开挖，开挖高度 1.8 m，一侧开挖时另一侧作为上台阶开挖的运输通道，上下台阶间距大于 50 m。现场施工情况如图 4 所示。

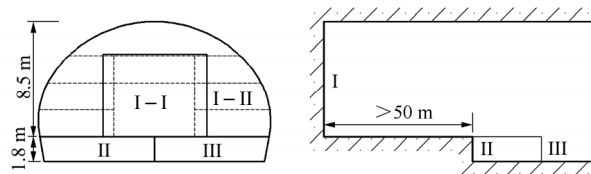


图 3 长台阶开挖示意图

Fig.3 Sketch map of long step excavation



图 4 现场工法应用

Fig.4 Field application of long step excavation

上台阶开挖进入交叉段控制范围时，逐渐从 1.5 m 进尺缩小到 1.0 m 进尺，在正式交叉段内采用 1.0 m 进尺分 2 次开挖的方式进行控制。经过交叉点后逐渐依次增大进尺，保证施工进度。分部开挖采用一次打眼，首先爆破开挖图 3 中的 I-I 部分，然后装药爆破周边 I-II 部分。由于采用长台阶法施工，上下台阶相距较远，且上台阶开挖面积较大，下台阶

相对较小，到下台阶开挖时，围岩基本稳定。同时，下台阶开挖爆破时已存在 2~3 个自由面，振动影响相对较小。但为保证施工安全，下台阶在逐渐进入交叉段控制范围时，开挖进尺由 4.5 m 缩短为 2.5 m，经过交叉段控制范围后增加进尺以保证施工进度。由于上台阶开挖断面较大，施工工法的控制及优化主要针对上台阶进行。

现场通过对爆破方案的优化，制定了如表 1 所示的上台阶进尺控制方案。限于文章篇幅，此次仅对走马岗公路隧道施工工法进行静力方面的研究，关于爆破振动控制及优化方面将另作文章详细研究。

表 1 进尺控制表

Table 1 Table of footage control

施工工法	控制里程	
	左线	右线
1.5 m 进尺一次开挖	ZK22+035.8 ~ ZK22+085.8 ZK22+160.0 ~ ZK22+180.0	YK22+128.6 ~ YK22+148.6 YK22+253.7 ~ YK22+273.7
1.0 m 进尺一次开挖	ZK22+055.8 ~ ZK22+085.8 ZK22+130.0 ~ ZK22+160.0	YK22+148.6 ~ YK22+178.6 YK22+223.7 ~ YK22+253.7
1.0 m 进尺两次开挖	ZK22+085.8 ~ ZK22+130.0	YK22+178.6 ~ YK22+223.7

3.2 工法数值模拟

为验证施工工法的可行性，首先采用大型有限元计算软件 ABAQUS 对其进行数值仿真。模型尺寸根据走马岗公路隧道和东深供水隧洞交叉点的范围确定。选取围岩条件相对较弱的右线开挖进行模拟，以右线中心线与供水隧洞中心线交叉点左右各取 80 m，共分 15 步进尺开挖，前后取 15 m，净距中心点上下各取 80 m。岩土体本构方程采用 Drucker-Prager 弹塑性非线性本构模型。计算模型见图 5。依据中交第二公路勘察设计研究院有限公司及广东省水利电力勘测设计研究院提供的走马岗

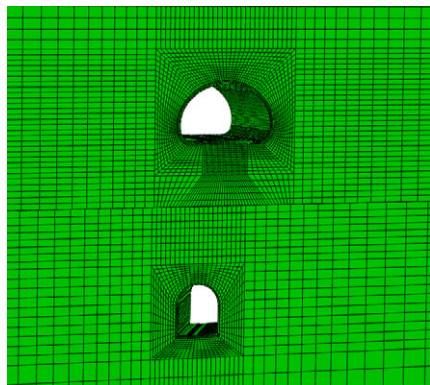


图 5 交叉段有限元模型

Fig.5 Finite element model of two tunnels

地区地勘资料^[15]，综合标准^[16]和规范^[17]，确定围岩及衬砌的基本力学参数，详见表 2。

表 2 模型材料参数

Table 2 Model material parameters

模型材料	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	黏聚力 c / MPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
II 级围岩	26.0	15.0	0.200	1.7	50
IV 级围岩	25.0	4.5	0.300	0.5	35
公路隧道初衬	24.2	25.0	0.200	-	-
公路隧道二衬	25.0	28.0	0.167	-	-
供水隧洞二衬	24.5	26.0	0.170	-	-

根据施工工法，确定计算步骤为：形成初始地应力场 引水隧洞开挖 二次衬砌施作 公路隧道第 1 步第 I-I 部分开挖 第 1 步第 I-II 部分开挖 第 1 步初期支护施作，第 2 步第 I-I 部分开挖 第 2 步第 I- 部分开挖 ... 第 15 步第 I-II 部分开挖 下导开挖 初期支护施作 二次衬砌施作。

3.2.1 公路隧道开挖稳定性分析

地下工程位移最能直接反映隧道围岩的稳定状态^[18]，根据计算结果，公路隧道开挖完成后的衬砌位移云图如图 6 所示。选取交叉点处公路隧道初衬上的 5 个典型测点得到围岩接触压力值及混凝土应力变量，如图 7 所示。

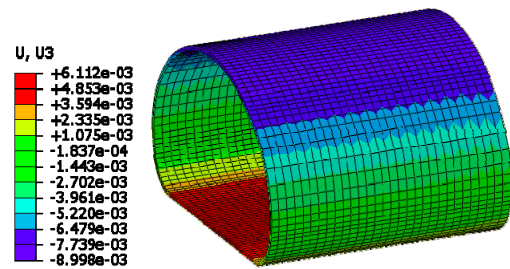


图 6 公路隧道初衬位移云图(单位：m)

Fig.6 Displacement nephogram of initial lining

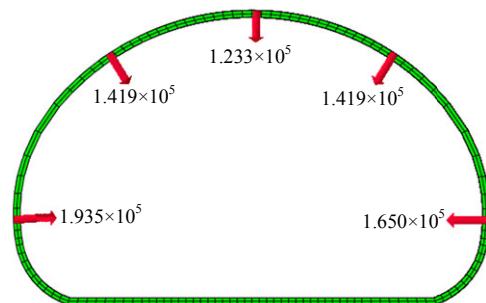


图 7 围岩 - 初衬接触压力分布(单位：Pa)

Fig.7 Pressure distribution of rock-initial lining(unit: Pa)

公路隧道开挖后，拱顶沉降最大为 9.0 mm，拱底上抬最大为 5.8 mm。这说明，隧道开挖后，应力重分布使得拱顶下沉；拱底由于失去了上部岩体荷载，出现小幅上抬。实际施工中需加强拱顶沉降的观测。围岩衬砌接触压力的变化：最大出现在左侧拱底，为 0.2 MPa；拱顶最小，为 0.12 MPa。混凝土应变计算结果显示：公路隧道初衬混凝土整体受压，拱顶为 174 $\mu\epsilon$ ，左右侧拱腰均为 121 $\mu\epsilon$ ，左右侧拱底均为 395 $\mu\epsilon$ 。文中提出的施工方案，在建隧道开挖对围岩扰动较小，支护结构满足安全要求。

3.2.2 公路隧道开挖对供水隧洞的影响分析

公路隧道开挖后，供水隧洞衬砌结构位移分布如图 8 所示。选取如图 9 所示供水隧洞衬砌拱顶、左右边墙 3 个典型测点，考察上方隧道开挖对既有隧道的影响。

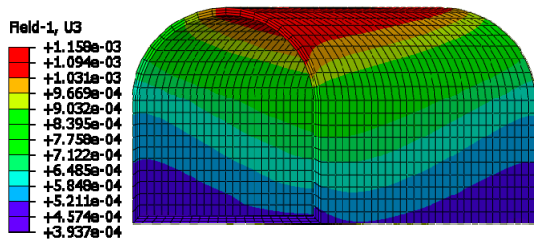


图 8 供水隧洞衬砌位移云图(单位：m)

Fig.8 Displacement nephogram of water supply tunnel lining (unit：m)

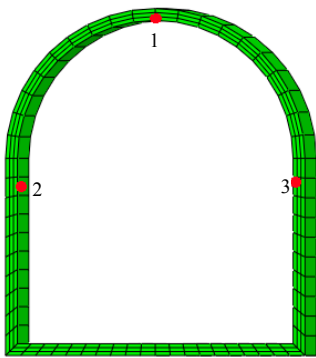


图 9 衬砌应变典型测点

Fig.9 Typical strain measuring points of water supply tunnel lining

计算结果显示：上方隧道开挖卸载，导致下方供水隧洞衬砌上抬，最大出现在拱顶位置，约为 1.2 mm，并从拱顶右侧逐渐转到拱顶左侧，这主要与两隧道为上下斜交叉有关。上方隧道开挖引起下方供水隧洞拱顶、左右侧拱腰的混凝土附加应变分别为 -66.23, 55.53, 55.38 $\mu\epsilon$ 。这说明，上方隧道开挖卸载后，下方供水隧洞上浮，引起拱顶衬砌受压，

拱腰位置受拉，但均小于混凝土抗拉强度。因此，上方隧道施工对下方供水隧洞衬砌结构的影响均在安全范围之内，可以采用该施工工法进行现场施工。

4 现场试验

4.1 支护方案

监测试验段，选取围岩条件相对较差、开挖断面相对较大的右线交叉段进行监测。根据交叉段设计资料，监测断面采用 S4c 支护型式，支护参数见表 3。

表 3 初期支护参数
Table 3 Parameters of primary support system

项目	物理量	单位	支护参数
喷射混凝土	C25 早强混凝土	cm	24
钢筋网	直径	mm	8
	网格间距	cm	25×25
格栅钢拱架	钢筋直径	mm	25
	纵向间距	cm	120
中空注浆锚杆	直径	mm	25
	长度	m	3.5
	锚杆布置	cm	120×120

4.2 走马岗隧道围岩监测

根据交叉段范围及隧道支护设计方案，从开始交叉到中心线交叉点共布置 4 个监测断面，断面桩号 S1 :YK22+179 ,S2 :YK22+189 ,S3 :YK22+199 ,S4 :YK22+203，如图 1 所示。S4 断面为 S4c 与 S3b 支护型式交界处，为最后一榀钢拱架支护结构。

每个交叉断面内布置土压力盒、钢筋计、混凝土应变计各 5 个。以隧道开挖前进方向为正，左右侧拱腰、左右侧拱底、拱顶各布置 1 个测点，监测得到各个断面处的围岩、支护系统应力应变特性。各监测试验断面布置如图 2 所示，单个测点 3 种仪器的现场布置见图 10，仪器具体型号参数见表 4。



图 10 现场仪器布置

Fig.10 Arrangement of in-situ instruments

表 4 监测项目及仪器

Table 4 Monitoring sections, contents and instruments

监测项目	仪器名称	单位	仪器型号	测点数量
围岩压力	压力盒	MPa	JTM-V2000D	每个断面 5 个
钢筋受力	钢筋计	MPa	JTM-V1000	
混凝土应变	应变计	μ ϵ	JTM-V5000	

4.3 既有隧洞围岩力学响应监测

由于东深供水隧洞已经施工完毕，并运行多年，采用提前在与公路隧道右线交叉点处布置断面收敛计、混凝土表面应变计的方式，监测公路隧道施工时，供水隧洞断面收敛及衬砌应变变化情况。2012年在供水隧洞内布置健康监测系统，实时监控下方隧洞的安全健康状况。监测仪器采用 GK-4425 收敛计、SM-5A 振弦式混凝土表面应变计，由于运行期隧洞内充水，因此在水平面以上布置测点，一个断面共布置 3 个测点，右线交叉点断面处测点布置情况如图 11 所示。

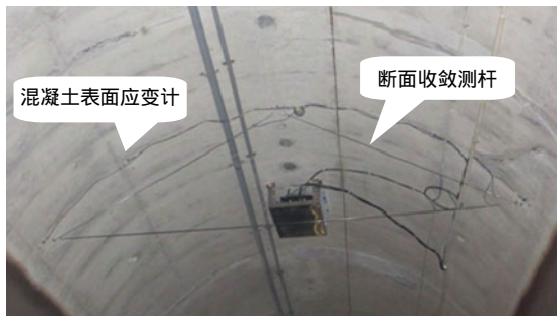


图 11 供水隧洞仪器现场安装

Fig.11 Arrangement of in-situ instruments in the water supply tunnel

5 试验结果分析

由于公路隧道右线与供水隧洞交叉点处距离最小，选取两隧道交叉点处的监测断面为典型断面，对监测结果进行分析。

5.1 在建公路隧道监测结果分析

(1) 围岩与支护接触压力分析

在围岩与支护结构之间埋设土压力盒测试围岩的变形压力，得到隧道开挖并形成支护体系后各断面接触压力随时间的变化曲线。各监测断面的围岩压力变化曲线见图 12，最终压力分布见图 13。

从图 12 中围岩压力随时间的变化可以看出，在支护系统形成后第 1~5 d 内，围岩压力基本呈直线上升趋势，在第 5~10 d，上升趋势逐渐减小，第 10 d 之后虽仍有上升，但基本处于趋于稳定状态。

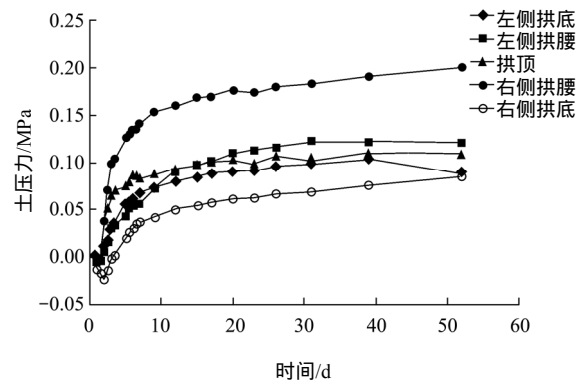


图 12 围岩压力-时间变化曲线

Fig.12 Time-dependent curves of surrounding rock stress

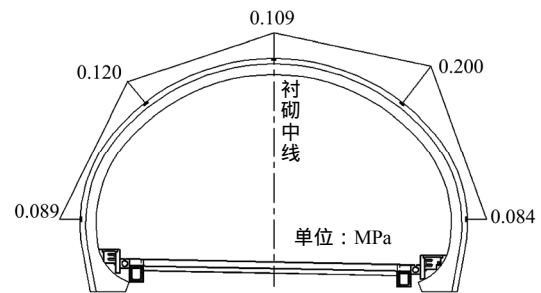


图 13 围岩最终接触应力分布

Fig.13 Final distribution of surrounding rock stress

围岩监测压力基本成对称分布，监测值相对较小，最大值出现在右侧拱腰为 0.2 MPa，说明拱腰位置围岩变形较大。现场监测结果比数值计算结果偏小，说明现场围岩条件相对较好。两侧拱底监测结果较小，这与安装仪器时围岩已经进行了部分应力释放有关。

(2) 钢拱架受力分析

在格栅钢拱架内布置钢筋计，监测初期支护体系形成后钢筋结构随围岩变形的受力特性。典型监测断面的钢筋应力时间变化曲线见图 14，最终应力状态如图 15 所示。

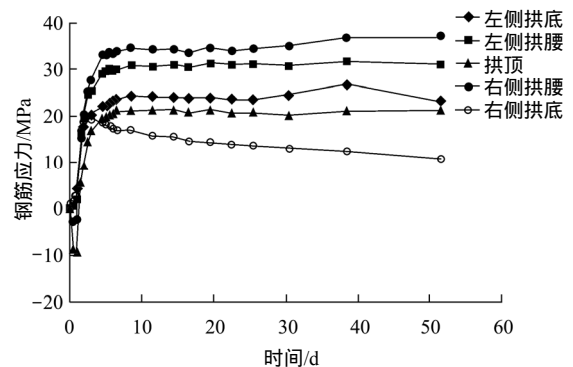


图 14 钢筋应力-时间变化曲线

Fig.14 Time-dependent curves of steel stress

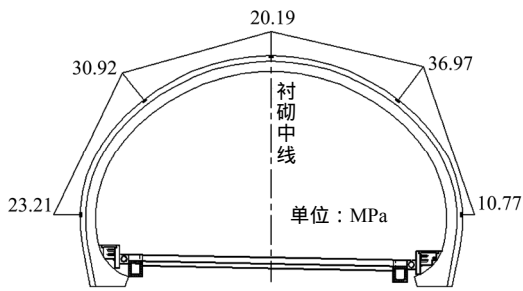


图 15 钢筋最终应力状态
Fig.15 Final distribution of steel stress

从钢筋受力时间变化曲线可以看出，支护系统刚形成后，在第 1~3 d 内，钢筋受力基本呈直线上升趋势，第 3~5 d，上升趋势明显减弱，第 5 d 以后基本处于稳定。说明围岩压力分布在第 5 d 以后已经趋于稳定，这与围岩压力监测结果较为一致。钢筋最终应力状态分布，断面左右拱腰处受力最大，分别为 30.92 和 36.97 MPa。对比围岩压力，除右侧拱底测点观测值相对较小外，其他测点基本与围岩压力监测结果对应。究其原因，可能与右侧拱腰应力相对集中有关，右侧拱腰钢筋受力明显，当钢筋为连续介质时，拱底受力则相应减小。

(3) 混凝土应变分析

为监测混凝土应变，将混凝土应变计浇筑在初支喷射混凝土内，监测混凝土在形成之后的应变特性。典型监测断面的混凝土应变变化曲线见图 16。

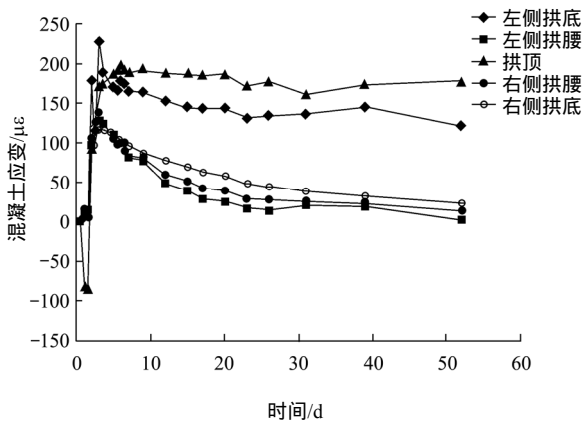


图 16 混凝土应变-时间变化曲线
Fig.16 Time-dependent curves of concrete strain

从混凝土应变时间变化曲线可以看出，在支护系统刚形成之后，在第 1~3 d 内，混凝土应变基本呈直线上升趋势，并在第 5 d 左右达到最大值。拱顶及左侧拱腰处在第 8 d 左右基本处于稳定状态，其他位置缓慢减小在 30 d 以后处于稳定状态。初衬

喷射后，随水化热释放，混凝土及应变计受热膨胀，产生拉应变^[19]。混凝土应变计测量环向应变，围岩压缩初衬，拱顶及左侧拱底测点变形较小，左右侧拱腰及右侧拱底受压，逐渐由拉应变转为压应变，变化值最大均不超过 140 με，说明衬砌受压力很小。

对在建隧道围岩压力、支护系统受力特性的分析表明，采用本文提出的施工工法对围岩的扰动较小，保证了交叉段内在建隧道的顺利施工。

5.2 既有供水隧道断面收敛性分析

在建隧道右线在 2013 年 4 月 19 日开始在平面上接触东深供水隧洞，5 月 10 日穿越与供水隧洞交叉点，5 月 25 日顺利穿过与供水隧洞交叉段。2013 年 6 月 24 日，上方隧道全线通过交叉段控制范围。考察整个施工过程中对下方隧洞的影响，对健康监测监测系统监测得到的实时数据进行分析。与公路隧道右线交叉点处，供水隧洞断面收敛及混凝土表面应变时间变化曲线如图 17，18 所示。

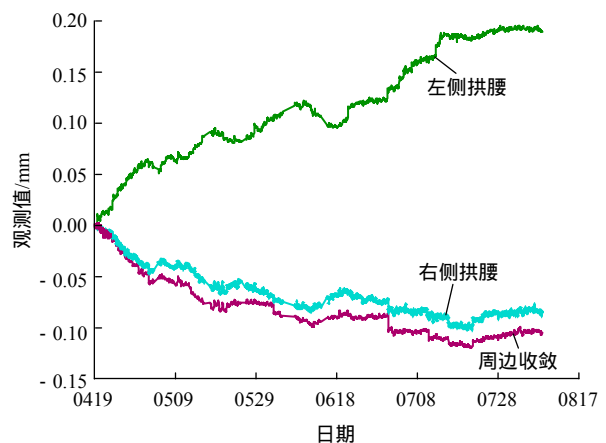


图 17 断面收敛-时间变化曲线
Fig.17 Time-dependent curves of section convergence

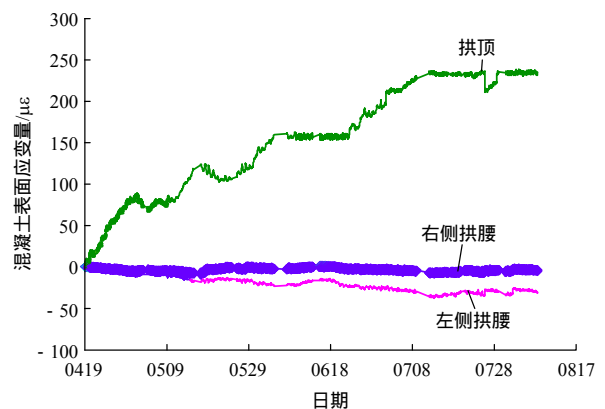


图 18 混凝土表面应变-时间变化曲线
Fig.18 Time-dependent curves of concrete surface strain

从图 17 可以看出，在整个穿越过程中，隧道左

侧逐渐受压,在上方隧道施工完毕后,观测值为 0.19 mm。右侧拱腰及周边收敛测杆缓慢受拉,施工完毕后稳定值分别为 -0.087 和 -0.10 mm。拱顶混凝土表面应变变化较大并出现一定的波动,最终受压最大为 236 $\mu\epsilon$ 。左右侧拱腰变化相对稳定,变化量均较小,主要为拉应变,稳定值分别为 -28, -3.0 $\mu\epsilon$ 。拱顶距离上方隧道最近,上方隧道开挖应力释放后,下方隧道拱顶上浮幅度较大,导致拱顶混凝土应变观测值较左右侧拱腰处要大。现场监测结果与数值模拟存在一定的差距,主要原因可以理解为:数值计算采用连续性介质模拟,而岩体是存在裂隙和结构面的,变化不完全连续。但两方面的结果都说明,上方公路隧道采用此方法施工对下方供水隧洞的影响很小,施工工法安全有效。在遇到类似工程时可参考使用,实际工程中要数值计算与现场监测相结合,才能得到更加全面可靠的信息,保证工程安全。

6 结 论

针对新建隧道上穿既有供水隧洞工程,对施工工法进行优化,并采用数值计算及现场监测进行验证,取得了良好效果,主要研究结论如下:

(1) 近接隧道施工时,进入交叉段逐渐减小进尺,在交叉段内采用台阶开挖。围岩扰动得到控制的同时,现场大型机械化设备得以运用。

(2) 新建走马岗隧道现场实测数据显示,在建隧道围岩压力及结构受力主要集中在拱顶及拱腰位置。围岩压力在第 10 d 基本达到稳定,最大值出现在右侧拱腰处为 0.2 MPa。

(3) 新建隧道开挖卸载引起下方既有隧道出现一定上浮。供水隧洞监测结果显示,断面收敛观测变化量均小于 0.2 mm,混凝土表面应变变化量小于 250 $\mu\epsilon$,均在安全范围以内,满足施工要求,上方隧道施工对既有隧道的影响很小。

参考文献(References):

[1] 陈卫军,朱忠隆. 近距离交叠隧道研究现状及评析[J]. 现代隧道技术,2002,39(1):42-47.(CHEN Weijun,ZHU Zhonglong. A review on the technology used in closely overlapped tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology,2002,39(1):42-47.(in Chinese))

[2] 刘金朋. 复杂交叉隧道开挖的相关力学特性研究[硕士学位论文][D]. 重庆:重庆大学,2008.(LIU Jinpeng. Study on the

excavation- mechanical characteristics of complicated intersecting tunnels[M. S. Thesis][D]. Chongqing :Chongqing University,2008.(in Chinese))

- [3] 张玉军,刘谊平. 上下行隧道立交处围岩稳定性的有限元计算[J]. 岩土力学,2002,23(4):511-515.(ZHANG Yujun,LIU Yiping. 3D finite element analysis for stability of surrounding rockmass at grade separation section of up tunnel and down tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics,2002,23(4):511-515.(in Chinese))
- [4] 仇文革. 地下工程近接施工力学原理与对策的研究[博士学位论文][D]. 成都:西南交通大学,2003.(QIU Wenge. The study on mechanics principle and countermeasure of approaching excavation in underground works[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu :Southwest Jiaotong University,2003.(in Chinese))
- [5] 龚 伦,仇文革. 既有铁路隧道受下穿引水隧洞近接施工影响预测[J]. 中国铁道科学,2007,28(4):29-33.(GONG Lun,QIU Wenge. Closely constructing influence forecast of hydraulic tunnel under-cross existing railway tunnel[J]. China Railway Science,2007,28(4):29-33.(in Chinese))
- [6] 龚 伦. 上下交叉隧道近接施工力学原理及对策研究[博士学位论文][D]. 成都:西南交通大学,2008.(GONG Lun. Study on mechanics principle and countermeasures of adjacent excavation in up-down cross tunnels[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu :Southwest Jiaotong University,2008.(in Chinese))
- [7] 赵旭峰,王春苗,孙景林,等. 盾构近接隧道施工力学行为分析[J]. 岩土力学,2007,28(2):409-414.(ZHAO Xufeng,WANG Chunmiao,SUN Jinglin,et al. Analysis of mechanical action of shield driving for approaching excavation[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(2):409-414.(in Chinese))
- [8] 张国华,陈礼彪,钱师雄,等. 大断面小净距大帽山隧道现场监控量测及分析[J]. 岩土力学,2010,31(2):489-496.(ZHANG Guohua,CHEN Libiao,QIAN Shixiong,et al. On-site supervision measure and analysis of Damaoshan tunnels with large section and small clear-distance[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(2):489-496.(in Chinese))
- [9] 刘辉喜,刘明高,黄始南,等. 交叉隧道近接施工安全的数值分析研究[J]. 中外公路,2011,(3):221-224.(LIU Huixi,LIU Minggao,HUANG Shinan,et al. The study of numerical analysis of adjacent construction safety for cross tunnels[J]. Journal of China and Foreign Highway,2011,(3):221-224.(in Chinese))
- [10] 吴占瑞,漆泰岳. 跨线风道近接施工力学特性研究[J]. 铁道标准设计,2012,(4):99-103.(WU Zhanrui,QI Taiyue. Mechanical behaviors of adjacent construction of air duct through subsea tunnel[J]. Railway Standard Design,2012,(4):99-103.(in Chinese))

- [11] 杜立兵,严松宏,蔡白洁.小净距空间交叉隧道台阶法施工安全性研究[J].隧道建设,2013,33(5):378-382.(DU Libing, YAN Songhong, CAI Baijie. Study on safety of small-spaced intersecting tunnels constructed by bench-cut method[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(5): 378-382.(in Chinese))
- [12] 刘志强,王斌,邢晓飞.成渝客专新中梁山隧道上穿施工对既有襄渝铁路中梁山隧道的影响分析[J].隧道建设,2013,33(5):373-377.(LIU Zhiqiang, WANG Bin, XING Xiaofei. Analysis on influence on existing Zhongliangshan tunnel on Xiangyang-Chongqing railway imposed by construction of above-crossing new Zhongliangshan tunnel on Chengdu-Chongqing passenger-dedicated railway[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(5): 373-377.(in Chinese))
- [13] 郭陕云.隧道掘进钻爆法施工技术的进步和发展[J].铁道工程学报,2007,(9):67-74.(GUO Xiayun. Progresses and developments of tunnel construction technology with bored blast method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, (9): 67-74.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. GB6722—2003 爆破安全规程[S].北京:中国标准出版社,2003.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB6722—2003 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.(in Chinese))
- [15] 白海山.东深供水改造工程走马岗隧洞围岩分类[J].西部探矿工程,2001,(4):82-83.(BAI Haishan. Surrounding rock classification of Zoumagang tunnel of East river-Shenzhen water supply reconstructing project[J]. West-China Exploration Engineering, 2001, (4): 82-83.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50218—94 工程岩体分级标准[S].北京:中国计划出版社,1995.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50218—94 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1995.(in Chinese))
- [17] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50287—2008 水利水电工程地质勘察规范[S].北京:中国计划出版社,2008.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50287—2008 Code for water resources and hydropower engineering geological investigation[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.(in Chinese))
- [18] 李元松,李新平,代翼飞,等.隧道围岩与衬砌受力特性测试与数值分析[J].岩土力学,2007,28(7):1348-1352.(LI Yuansong, LI Xinping, DAI Yifei, et al. Mechanical property testing and numerical calculating on surrounding rock mass and support system of tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1348-1352.(in Chinese))
- [19] 王衍森,杨维好,黄家会,等.龙固副井冻结凿井期外壁混凝土应变的实测研究[J].煤炭学报,2006,31(3):296-300.(WANG Yansen, YANG Weihao, HUANG Jiahui, et al. Study of freeze sinking period concrete strain of outer shaft wall of Longgu Coal Mine auxiliary shaft[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(3): 296-300.(in Chinese))