

文章编号: 1000-7598-(2009) 01-0236-05

鹤上大断面小净距隧道施工方案优化分析

龚建伍^{1,2}, 夏才初², 朱合华², 唐 颖³

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 武汉 430070; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 福建省交通规划设计院, 福州 350004)

摘 要: 结合福州国际机场高速公路鹤上大断面小净距隧道工程实际, 建立了大断面小净距隧道施工动态有限元分析程序, 对隧道施工方案的优化进行了数值模拟分析。分析中模拟了双侧壁导坑法、中隔壁法和上下台阶法 3 种施工方案, 对拱顶下沉、地表沉降、中间岩柱应力、围岩稳定性等进行了对比分析, 并结合鹤上隧道围岩实际情况, 在隧道出口 V 级围岩段, 改双侧壁导坑法为中隔壁法, 顺利完成了施工, 对降低施工成本、加快施工进度均起到了较好的作用, 研究结果可为类似条件下大断面小净距隧道的设计、施工提供借鉴与参考。

关 键 词: 鹤上隧道; 大断面; 小净距隧道; 施工方案; 优化

中图分类号: U 455

文献标识码: A

Optimal analysis of construction schemes for Heshang small-space tunnels with large section

GONG Jian-wu^{1,2}, XIA Cai-chu², ZHU He-hua², TANG Ying³

(1. School of City Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Fujian Communications Planning and Design Institute, Fuzhou 350004, China)

Abstract: According to the construction conditions of Heshang small-space tunnels with large section in Fuzhou International Airport Expressway, a finite element analysis program is established to simulate the construction process. In the program, the double-heading construction method, middle wall construction method and benching tunneling method have been simulated; and the settlements of vault and ground, stress of the interspace rock and stability of the surrounding rock are analyzed and compared; then the advantages of the three methods are compared. Considering the characteristics of Heshang Tunnel, the practical construction scheme is optimized. The experience and conclusions can be for reference in the design and construction of similar tunnels.

Key words: Heshang tunnel; large section; small-space tunnel; construction scheme; optimization

1 引 言

随着我国西部开发战略的实施, 交通基础设施建设规模逐渐扩大, 越来越多的高等级公路穿越崇山峻岭, 相应公路隧道尤其是大断面隧道的修建工作尤为突出^[1]。由于受地形、地质条件限制以及隧道分建带来的展线困难与占地多等因素的影响, 人们也越来越多地选择小净距隧道的结构形式, 投资和技术两个方面均具有很好的应用前景^[2-3]。

作为一种新型结构型式, 大断面小净距公路隧道围岩的稳定性及支护结构的受力较为复杂, 目前尚缺乏足够的设计和施工经验, 而不同的开挖方式

对隧道的影响是不同的, 一定程度上开挖方式的选择正确与否可能决定隧道建设的成败^[4-5], 因此, 有必要对不同开挖方式下围岩和支护结构的变形及力学特征进行研究, 优化隧道施工方案, 对于推动大断面小净距隧道的发展和应用, 具有重要的现实意义。

2 工程概况

鹤上隧道位于福州国际机场高速公路(1 期)工程 A3 标段, 为福建省第 1 座 3 车道小净距公路隧道(图 1), 该隧道桩号为 K6+250~K6+700, 全长 450 m, 隧道单洞最大开挖跨度为 16.692 m, 中

收稿日期: 2007-05-23

基金项目: 福建省交通厅交通科技发展项目。

作者简介: 龚建伍, 男, 1978 年生, 博士, 主要从事结构工程和地下结构方面的教学与研究工作。E-mail: gjwfang@126.com

间岩柱最小净距仅为 5.66 m。

该隧道最大埋深约为 62 m，洞口浅埋段埋深 4~10 m，从外到内穿越 V、IV 和 III 级围岩，隧道中部约有 40 m 的 F9A 断层影响区域，断层带内岩体呈碎块状、角砾状松散结构，在开挖爆破及地下水作用下围岩易发生坍塌，主要岩性为凝灰岩。

隧道采用新奥法施工，开挖前设置超前注浆小导管预加固，以锚杆、喷射混凝土、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]。

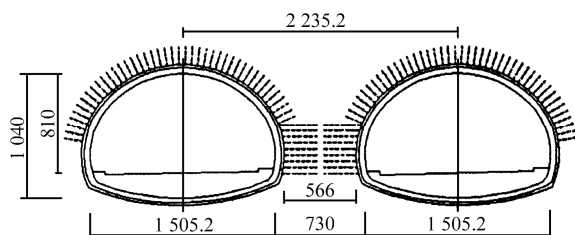


图 1 鹤上隧道断面图(单位: cm)

Fig.1 Cross-section of Heshang tunnel(unit: cm)

3 隧道施工数值模拟

3.1 计算模型与参数

数值模拟采用平面应变弹塑性本构模型、Druker-Prager 屈服准则和相关联流动法则，通过设置不同开挖步模拟隧道开挖阶段，并以对各开挖步在不同荷载增量步加设锚喷支护或衬砌结构来模拟支护施作时机的影响，由此达到模拟隧道开挖施工过程的目的^[7]。

计算模型中，围岩采用四边形实体单元模拟，锚杆和初衬采用二维杆单元模拟，二衬采用二维梁单元模拟。考虑初衬与二衬之间有一定滑动，在二者之间设接触面单元。超前支护等效为围岩材料性质的提高。

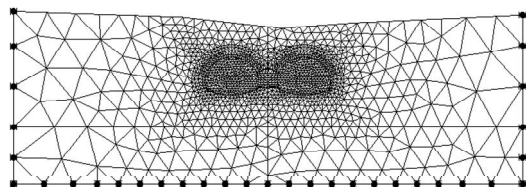


图 2 平面应变有限元模型网格图

Fig.2 Mesh map for finite element model

按隧道开挖影响范围的大小，计算模型边界范围：上边界至地表自由面，下边界至开挖洞底距离为 3 倍洞高，左右边界距洞口距离分别为 4 倍隧道跨度。两侧边界节点采用水平方向约束，底部边界

节点采用竖直方向约束^[8]，计算网格划分如图 2 所示，具体计算参数见表 1~2。

表 1 实体单元计算参数表

Table 1 Parameters of solid element

名称	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	重度 $\gamma / (\text{kN/m}^3)$	凝聚力 c / kPa	摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
V 级围岩	1.5	0.32	20	200	30
注浆加固	1.5	0.32	22	280	32

表 2 梁、杆单元计算参数表

Table 2 Parameters of beam and bar elements

名称	弹性模量 E / GPa	重度 $\gamma / (\text{kN/m}^3)$	截面积 A / m^2	惯性矩 I / m^4
系统锚杆	200	78	0.000 6	
初衬	25	23	0.27	
中隔壁	25	23	0.18	0.000 49
二衬	28.5	25	0.55	0.013 86

3.2 隧道开挖计算方案

本文选取计算断面为出口端 K6+630，该断面隧道围岩为 V 级围岩。根据工程经验及小净距隧道的特点，本文选取双侧壁导坑法、中隔壁法和台阶法 3 种施工方案进行数值模拟对比分析，以确定该条件下大断面小净距隧道最优化施工方案。3 种方案开挖示意如图 3(图中数字代表开挖施工步)所示。

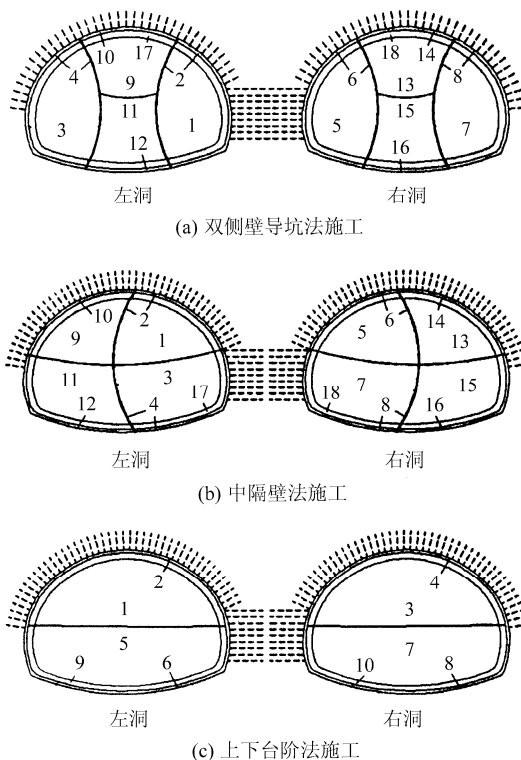


图 3 3 种施工方案施工步示意图

Fig.3 Simulating step of three construction schemes

4 计算结果分析

通过对大断面小净距鹤上隧道出口段围岩采用双侧壁法、中隔壁法和上下台阶法施工过程的模拟计算,得到隧道围岩位移、应力以及稳定性等在上述 3 种施工方法下的变化与分布特点。

4.1 拱顶下沉分析

拱顶下沉是评价围岩位移大小及稳定性的一个重要指标,3 种施工方案下左右洞最终拱顶下沉值见表 3。从表 3 可以看出,双侧壁法开挖产生拱顶下沉最小,中隔壁法次之,但差别不大,台阶法最大。以双侧壁法下沉值为基准,中隔壁法施工引起左、右洞拱顶下沉分别比双侧壁法大 3.6 % 和 7.1 %,而台阶法施工引起的左、右洞拱顶下沉分别比双侧壁法大 19.3 % 和 25.8 %,即台阶法施工引起拱顶下沉明显大于双侧壁法和中隔壁法。

表 3 3 种施工方案拱顶最终下沉值

Table 3 Values of crown settlement under three schemes

开挖方式	拱顶下沉/mm	
	左洞	右洞
双侧壁法	10.7	9.6
中隔壁法	11.1	10.3
台阶法	12.8	12.1

4.2 地表沉降分析

地表沉降分析点选取左、右洞中线及中间岩柱竖向轴线与地表的 3 个交点,3 种方案下 3 个选取点处地表最终沉降见表 4。由表 4 可见,双侧壁法开挖产生地表沉降最小,中隔壁法次之,但差别不大,台阶法最大。仍以双侧壁法最终沉降为基准,则中隔壁法施工引起的 3 点地表沉降分别比双侧壁法大 3.5 %、8.8 % 和 9.4 %,而台阶法分别达到 24.3 %、37.9 % 和 34.4 %。

表 4 3 种施工方案地表最终沉降值

Table 4 Values of ground settlement under three schemes

开挖方式	沉降/mm		
	左洞地表	中间地表	右洞地表
双侧壁法	7.9	7.0	7.2
中隔壁法	8.2	7.7	7.9
台阶法	9.8	9.7	9.7

4.3 中间岩柱应力分析

中间岩柱应力分析点选取岩柱近左洞侧 A 点、岩柱中部 B 点和岩柱近右洞侧 C 点(图 4)。采用双侧壁法、中隔壁法和台阶法开挖时,中间岩柱 A 、 B 、 C 处最大、最小主应力值见表 5。

从各点应力分布情况看,不论采用哪种施工方案,中间岩柱近左右洞开挖边界侧(A 、 C 点)应力均大于岩柱中间部位(B 点),而 A 、 C 两点应力差别不大。同时,采用不同开挖方式时 $A \sim C$ 三点的应力变化程度也是不同的, A 、 C 点变化显著,而 B 点则相对较小。

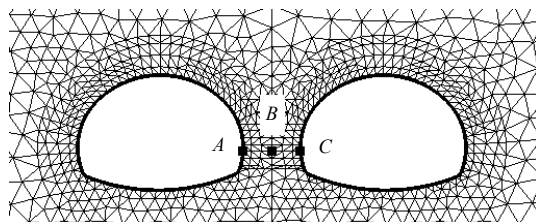


图 4 3 种施工方案下中间岩柱应力选取特征点

Fig.4 Typical points of interspace rock stress under three construction schemes

表 5 3 种施工方案下中间岩柱应力

Table 5 Stress of interspace rock under three schemes

开挖方式	最大主应力/kPa			最小主应力/kPa		
	A	B	C	A	B	C
双侧壁法	517.9	496.4	504.2	278.1	283.7	267.4
中隔壁法	561.2	520.9	563.9	270.3	286.6	259.7
台阶法	851.5	593.2	897.1	301.6	327.0	299.8

从不同施工方案看,台阶法开挖引起各点最大、最小主应力远大于中隔壁法和双侧壁法,而后者应力差别不大。以 A 点最大主应力为例进行分析,采用中隔壁法和台阶法开挖时,引起的 A 点最大主应力分别比双侧壁法大 43.3 kPa 和 333.6 kPa,即中隔壁法引起的最大主应力仅比双侧壁法大 8.4 %,而台阶法开挖则比双侧壁法要高出 64.4 %。

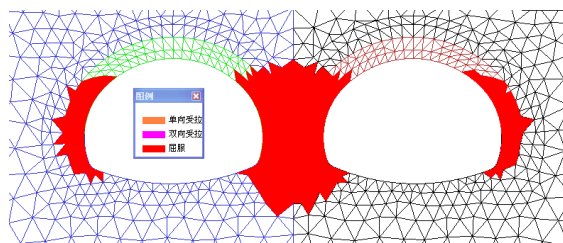
4.4 围岩稳定性分析

计算模型中,在参考规范取的 V 级围岩物理力学指标条件下,3 种施工方法只在仰拱与中间岩柱交接处有范围很小的屈服区。为研究 3 种施工方法下围岩的稳定性情况,降低围岩的力学指标,取 $c = 100 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 50^\circ$ 进行模拟分析,3 种施工方法下围岩屈服区范围如图 5 所示。从计算结果可以看出,随着围岩物理力学指标的降低,屈服区范围扩大,双侧壁法和中隔壁法开挖屈服区范围差别不大,前者略小于后者,而台阶法屈服区范围最大。

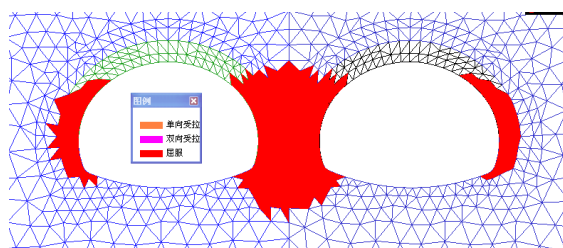
由于双侧壁法和中隔壁法施工先行开挖左右侧导洞,减小隧道开挖跨度,同时采用中隔壁支护,且在初期支护成形之后才拆除,可以有效防止围岩失稳,围岩相对不易屈服。而台阶法开挖时,虽然开挖过程对围岩的扰动较少,但是,由于开挖断面较大,围岩约束解除的较快,不利于控制围岩的

变形。尤其是在软弱围岩地段，开挖上半部时，由于跨度大、矢跨比小，在上台阶的两个下端会产生很大的应力集中，不利于承受外部荷载。

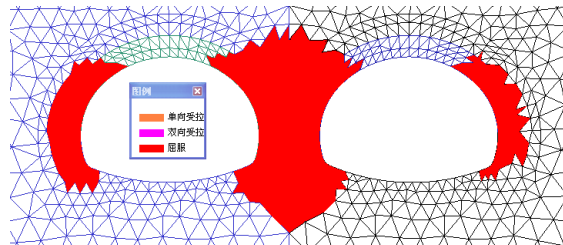
在V级围岩条件下采用双侧壁导坑法和中隔壁法，均可较好的控制围岩变形和稳定，而台阶法则相对最不利。



(a) 双侧壁导坑法施工



(b) 中隔壁法施工



(c) 上下台阶法施工

图5 3种施工方案围岩屈服区范围

Fig.5 Yield zone of rock under three construction schemes

5 实施方案选取及监测分析

5.1 实施方案的选取

结合上述模拟分析，从施工力学角度看，3种施工方案均可行，其中双侧壁法和中隔壁法开挖引起的围岩位移较小、应力分布较均匀，同时围岩塑性区也相对较小，整体上二者差别不大，前者稍优于后者，而台阶法则相对为最不利。从施工工序角度看，双侧壁法工作面较小，施工相互影响较大，施工缓慢，中隔壁法开挖工作面稍大，有利于加快施工进度。虽然台阶法开挖工作面最大，施工进度最快，但台阶法施工要求施工工艺衔接必须及时和适当，支护迅速，施工要求较高，施工质量不易保证。

通常，在软弱围岩情况下侧壁法开挖隧道可充分发挥喷层和锚杆的支护作用，较易于控制围岩的变形和稳定，特别是在断层破碎带，多导洞开挖更显其优势^[9]，因而在施工预设计中初步拟定的施工方案为双侧壁导坑法。

实际施工过程中，由于多方面的原因，隧道工程施工进度有所滞后，鉴于鹤上隧道作为机场高速公路控制性工程之一，其能否按期完成对工程整体施工进度有重大影响，为加快施工进度，结合鹤上隧道现场地质条件，综合考虑施工力学因素、施工工序要求以及当前施工技术和水平，通过比较分析，拟定改双侧壁导坑法为中隔壁法施工。

5.2 监测结果分析

由于前述数值模拟结果是在理想施工状态下得出的，实际施工中达到理想状态比较困难，因而围岩实际位移和应力状态可能比理论计算结果要差。鉴于此，在施工过程中开展了现场变形和应力监测工作，其目的旨在通过监测结果，及时调整施工参数，为优化施工方案提供保证和支持。

结合施工进度，在施工过程中进行了相应地表下沉、拱顶下沉、洞周收敛、围岩内部位移以及支护间压力、二衬内力等多项监测工作，积累了大量监测数据，限于篇幅，本文仅选取部分监测结果加以分析和说明。

表6为出口段采用中隔壁法施工时，部分监测断面拱顶下沉和洞周收敛监测结果，图6为中间岩柱部位声波法测试结果随测试深度变化曲线^[10]。

表6 洞周边收敛及拱顶下沉量测结果

Table 6 Monitoring value of horizontal convergence and crown settlement

位置及隧道桩号		拱顶下沉	洞周收敛	稳定时间
		/mm	/mm	/d
左洞	K6+650	26.22	11.13	30
	K6+635	29.04	6.12	28
	K6+620	17.67	7.12	30
	K6+600	17.21	2.22	20
右洞	K6+650	17.21	2.40	26
	K6+635	17.01	4.79	25
	K6+620	17.11	2.76	23
	K6+600	15.51	2.03	22

从表6可以看出，现场监测变形值要大于数值模拟计算结果，但变形值均在规范允许的控制范围之内，且施工中及时跟进支护，各断面围岩变形在30d左右基本可达到稳定，表明隧道施工是安全的。

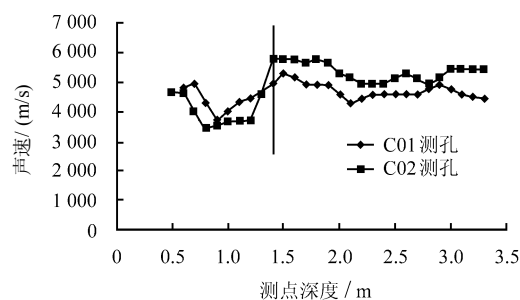


图6 中央岩测孔声波测试曲线

Fig.6 Curves of ultrasonic wave in the inter-space rock

从图6中也可以看出,由于隧道开挖及爆破震动的影响,孔口段围岩较破碎,波速较小,随深度增加,声波波速逐渐增大,在深度约为1.4 m处波速达到极大值,大于原岩波速,此处围岩由于注浆加固压密作用形成应力升高区。在深度约1.8 m处波速略有减小,但幅度不大,波速基本达到稳定,可以认为此处的围岩基本不受施工爆破影响,为原岩应力区,即表明该监测断面中间岩柱部位围岩松动范围为1.4 m,在系统锚杆和注浆加固控制范围之内中间岩柱是稳定的。

上述监测结果均说明采用中隔壁法施工是安全的。同时,在隧道施工过程中,基于监测结果及时调整跟进施工措施,围岩稳定得到了较好的控制,顺利安全的完成了出口段隧道施工,因此结合工程实际,在本工程隧道出口段改双侧壁法为中隔壁法施工是合理可行的。

6 结 语

通过对大断面小净距公路隧道施工方案进行有限元模拟,分析了3种施工方案的特点和适用性条件,考虑鹤上隧道实际工程特点,不管是从加快施工进度、节约费用,还是从施工力学出发,中隔壁法都具有较好的比较优势。

结合数值模拟优化分析,并基于隧道现场监控量测,鹤上隧道工程在出口段围岩质量稍好的情况下改双侧壁导坑法为中隔壁法,顺利完成了施工,对降低施工成本、加快施工进度均起到了较好的实际效果。作为国内罕见的3车道大断面小净距公路隧道施工的顺利完成,可为今后类似条件下小净距隧道设计和施工提供有益的参考和指导。

参 考 文 献

[1] 张顶立,王梦恕,高军,等.复杂围岩条件下大跨隧道修建技术研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(2): 290—296.
ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu, GAO Jun.

Construction technique of large-spanned tunnel under condition of complicated surrounding rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 290—296.

[2] 万明富.隧道围岩净距讨论与小净距隧道研究[J].公路,2000,(7): 55—58.
WAN Ming-fu. Study of net spacing of small spacing tunnel[J]. **Highway**, 2007, (7): 55—58.

[3] 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 Ba-zhou, CHEN Shao-hua, 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.

[4] 李云鹏,王芝银,韩常领,等.不同围岩类别小间距隧道施工过程模拟研究[J].岩土力学,2006,27(1): 11—16, 28.
LI Yun-peng, WANG Zhi-yin, HAN Chang-ling, et al. Simulating study of construction process of tunnels with small spacing for different classes of surrounding rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 11—16, 28.

[5] 秦峰,吴存兴.小净距隧道开挖方法浅论[J].现代隧道技术,2003,40(6): 39—43.
QIN Feng, WU Cun-xing. Discussion on the excavation methods for tunnels with small spacing[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2003, 40(6): 39—43.

[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.

[7] 朱合华,丁文其,李晓军.同济曙光岩土及地下工程设计与施工分析软件用户手册 GeoFBA2D®V3.0[M].上海:同济大学,2003.

[8] 李志勇,晏莉,阳军生.浅埋偏压连拱隧道中导洞坍方数值分析与处治[J].岩土力学,2007,28(1): 102—106.
LI Zhi-yong, YAN Li, YANG Jun-sheng. Numerical analysis and treatment of a collapsed middle drift for shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 102—106.

[9] 丁文其,王晓彤,李志刚,等.龙山浅埋大跨度连拱隧道施工方案优化分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(22): 4042—4047.
DING Wen-qi, WANG Xiao-xing, LI Zhi-gang, et al. Optimal analysis of construction schemes for shallow large span Longshan twin tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(22): 4042—4047.

[10] 福州国际机场高速公路有限公司.福州国际机场高速公路一期工程鹤上隧道施工监测报告[R].福州:福州国际机场高速公路有限公司,2005.