

大跨连拱隧道上穿既有地铁隧道施工影响分析

肖惠^{1,3}, 曹学萧², 孙宗波², 付艳斌^{1,3}

(1. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 深圳市南山区建筑工程务署, 广东 深圳 518071;

3. 深圳大学 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要: 针对小净距条件下的大跨度双连拱隧道施工影响规律问题, 首先对施工技术难点进行分析, 并阐述应对措施, 其次, 选用ABAQUS软件对大跨度双连拱隧道小净距上穿既有地铁隧道进行数值模拟, 分析地表沉降规律、开挖对既有隧道结构变形影响及新建隧道衬砌结构变形规律, 结果表明: (1) 双连拱隧道开挖引起的地表沉降是由中导洞、左洞和右洞分别独立开挖引起的地表沉降的结果叠加, 开挖完成后, 地表最大沉降为5.6 mm; (2) 开挖引起的既有地铁隧道变形左线较右线大, 但均未超过规定值10 mm; (3) 新建隧道拱顶沉降大致可分为激增阶段、缓增阶段和稳定阶段, 其中, 拱顶沉降的激增阶段为施工的关键阶段, 风险也最高, 应提高监测频率。

关键词: 大跨度; 连拱隧道; 现场监测; 数值模拟

中图分类号: U45

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)05-0216-05

Analysis on Construction Influence of Long-span Multi-arch Tunnel through Existing Subway Tunnel

XIAO Hui^{1,3}, CAO Xuexiao², SUN Zongbo², FU Yanbin^{1,3}

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Construction and Public Works Department, Nanshan District, Shenzhen 518071, China; 3. Key Laboratory of Resilient Infrastructure for Coastal Cities, Department of Education, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: In view of the influence law of construction of long-span double-arch tunnel under the condition of small clear distance, the technical difficulties of construction are analyzed and the countermeasures are set forth. Then, ABAQUS software is used to numerically simulate the long-span double-arch tunnel through the existing subway tunnel in small clear distance. The surface settlement law, the influence of excavation on the existing tunnel structure deformation and the lining structure deformation law of the new tunnel are analyzed. The results show that: (1) The surface settlement caused by the excavation of the double-arch tunnel is the superposition of the surface settlement caused by the independent excavation of the middle guide tunnel, the left tunnel and the right tunnel. And the maximum surface settlement is 5.6 mm after the completion of excavation. (2) The existing subway tunnel deformation caused by excavation is larger on the left line than on the right line, but all do not exceed the specified value of 10 mm. (3) The vault settlement of new tunnel can be roughly divided into the surge stage, slow increase stage and stable stage, in which the surge stage of vault settlement is the key stage of construction with the highest risk. Therefore, the monitoring frequency should be improved.

Keywords: large span; multi-arch tunnel; field monitoring; numerical simulation

0 引言

随着我国经济的高速发展和城镇交通量的飞速增加,我国公路隧道建设的规模、数量达到新高。截至2020年底,中国已建成公路隧道21 316座,总长度达21 999.3 km,2016—2020年,中国公路隧道以每年

超过1 000座且长度超过1 200 km的速度急剧增长^[1]。在车流量大的路段及地质条件复杂的地区,普通分离式公路隧道难以满足设计要求,线路中多采用双连拱隧道方案。连拱隧道具有跨度大、空间利用率高、线形顺畅、引线占地面积少等优点^[2]。

连拱隧道因其高跨比小、结构受力复杂、施工工艺要求高,成为隧道工程领域的研究重点之一。学者们针对上述问题开展了一系列研究并取得了一定成果。季毛伟等^[3]通过现场监测和有限元软件分析

收稿日期: 2023-02-15

作者简介: 肖惠(1999—),男,硕士,学生,从事岩土工程研究工作。

了浅埋偏压连拱隧道施工过程中围岩稳定性和支护结构变化规律;白家设等^[4]对软弱地层浅埋大跨度双连拱隧道进行了现场监测及数值模拟,研究了在施工过程中支护结构的位移变化规律;金丰年等^[5]通过对双连拱隧道的开挖过程进行数值模拟,分析了双连拱隧道穿越破碎山体时的受力及变形情况。

此外,由于新建隧道上跨或下穿既有隧道会引起既有隧道围岩的应力重分布,既有隧道结构将产生不可忽视的附加变形,随着上穿或下穿净距的减小,对既有隧道结构的影响也将增大。武科等^[6]对比分析了3种地铁隧道常用的施工方案对既有地铁隧道结构和地层的影响;万飞等^[7]通过数值分析方法对比研究了新建隧道采用明挖法及暗挖法对既有隧道结构内力和位移的影响;Wang等^[8]以厦门海沧隧道为背景,采用数值模拟方法研究了超浅埋大跨度双连拱隧道开挖对邻近地下管线的影响;胡志平等^[9]基于地表沉降、开挖对既有隧道影响、新建隧道衬砌应力变化及变形等因素研究了黄土地区双连拱隧道受力机理及变形规律;王勇等^[10]对新建公路隧道小净距上跨既有隧道建立有限元模型,分析了既有隧道二次衬砌应力、变形的分布与变化规律。

虽然学者们在连拱隧道及隧道近接开挖对既有隧道产生的影响两方面均有研究,但对于小净距条件下的大跨度双连拱隧道施工影响的研究较少。本文依托望海路微波山隧道工程为背景,建立大跨度双连拱隧道小净距上穿既有地铁隧道数值模型,从地表沉降、开挖对既有隧道结构变形影响及新建隧道衬砌变形等方面展开研究,进一步探索双连拱隧道施工的影响规律,从而对类似工程提供有益借鉴。

1 工程概况

1.1 工程简介

微波山隧道位于繁华市区内(见图1),周边情况复杂,隧道穿越山体规模较小,顶部覆土较薄,不利于展线;微波山下方有运营地铁2号线区间,最近处约8 m(见图2),隧道开挖方式采取悬臂式掘进机进行开挖。

隧道左幅设计起点里程为ZK0+87.872,终点里程为ZK0+253.125,总长165.253 m;右幅设计起点里程为YK0+87.872,终点里程为YK0+254.813,总长166.941 m。左幅隧道小里程端部分位于R=692.05 m的圆曲线上,其余部分位于直线段;右幅隧道小里程端部分位于R=707.95 m的圆曲线上,其余部分位于

直线段。微波山隧道左、右幅纵坡均采用单向0.30%单向坡。



图1 微波山隧道位置

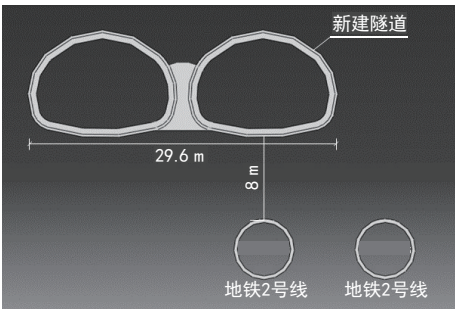


图2 微波山隧道与地铁2号线断面示意图

1.2 工程地质与水文情况

该工程场地勘察范围内岩土分层及特性如下:施工场地从上至下主要土质依次为人工填土(Q^m)、第四系全新统海陆交积(Q_4^{mc})、第四系全新统冲洪积层(Q_4^{al+pl})、第四系中更新统残积层(Q_2^{cl})及燕山晚期侵入岩(γ_5^3)。暗挖段主要以IV级围岩为主,微波山隧道地质纵断面见图3。

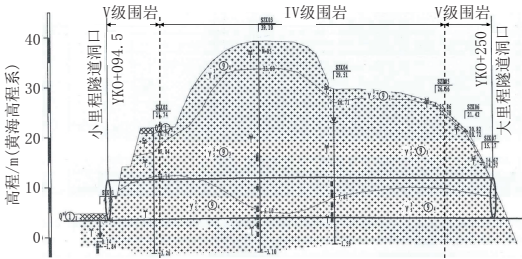


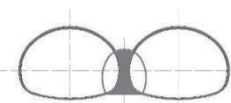
图3 地质断面图

该工程区域地下水主要分为第四系松散层中的上层滞水、孔隙水和基岩裂隙承压水三种类型。上层滞水主要赋存于人工填土中,水量小,主要靠大气降水补给,水位因季节、降雨情况而异;孔隙水主要赋存于第四系地层中,水量丰沛,透水性好,主要靠大气降水补给与海水侧向补给;基岩裂隙承压水主要赋存于强~中风化花岗岩裂隙带中,基岩裂隙分布不均。区域内地下水及地表水不发育。

1.3 隧道开挖方案

该隧道为双连拱隧道,隧道按新奥法进行施工,洞身段开挖采用中导洞法进行开挖,即中导洞先行贯通,施工完成中隔墙,正洞开挖拉开一定距离,以

减少左右洞开挖所带来的相互影响,施工步序见表1。

表1 双连拱隧道开挖步序	
图例	说明
	开挖中导洞,并施作初期支护
	施作中隔墙
	开挖左洞,并施作初期支护
	待左洞开挖15 m时,开挖右洞
	左右洞贯通后,拆除中导洞临时侧壁
	施作正洞二衬

2 技术难点及应对措施

新建隧道与地铁2号线存在重叠,隧道底部距离地铁外边线最近约8 m,水平投影重叠距离0~13.8 m,重叠长度约118 m,隧道位于地铁安全保护区50 m范围内。难点解决对策如下。

(1)隧道开挖施工采取“机械掘进”(悬臂式掘进机)的方式进行,以降低对既有地铁2号线造成的影响。

(2)完善监控量测与超前地质预报方案。施工过程中,对隧道围岩变形量进行24 h不间断监控,出现大的沉降或沉降不收敛时,立即进行初支补强或二衬跟进,同时对既有地铁2号线进行稳定监测。

(3)减小单循环进尺,将离构筑物近区的单循环进尺降至1.0 m以下。

(4)编制隧道施工专项方案,经评审通过后严格执行,施工过程中严格按方案实施,保证施工期间既有地铁2号线结构安全。

(5)施工前提前与相关部门建立隧道施工期间沟通及联络机制,项目开始施工前提前告知相关部门安排专人至项目现场进行督导,对项目施工作业进行全过程监控。

(6)施工前做好风险评估,采取隧道施工全过程风险分析、风险评价及风险规避。同时,针对不同的工程风险点制定突发事件应急预案,对不可预见因素引起的事件有充分的准备,做好保障措施。

3 数值模型建立

基于工程设计和施工资料,选用ABAQUS有限元软件进行建模计算,采用二维平面应变模型对本工程最不利断面(见图2)进行模拟分析。隧道埋深约26 m,隧道围岩主要为中~微风化粗粒花岗岩,有限元模型的计算范围为:上部取自然平面,下部取至既有地铁2号线隧道下方29 m;选取断面的边界条件为:两侧施加水平方向约束,底部施加垂直及水平方向约束,地面自由。

选用摩尔-库伦屈服准则模拟围岩材料,材料各参数见表2;单元网格划分采用四节点平面应变积分单元CPE4R,网格划分见图4;模型中土体开挖与衬砌施作分别通过单元“杀死”和“重新激活”进行实现。

表2 模型材料各参数					
土层和结构名称	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa
Ⅳ级围岩	2 000~2 300	4	0.35	30	0.5
Ⅴ级围岩	1 700~2 000	1	0.45	28	0.03
初衬	2 300~2 500	28~31.7	0.15~0.2		
二衬	2 500	31~33.7	0.15~0.2		
中隔墙	2 500	30	0.2		

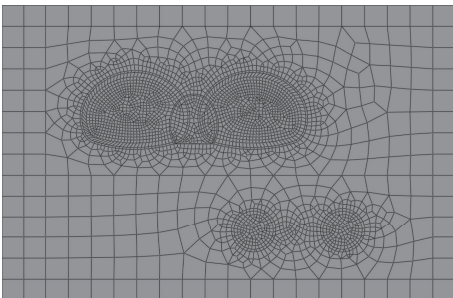


图4 模型网格划分图

计算分析工况应尽可能模拟双连拱隧道的施工过程,初期支护采用26 cm厚的C25喷射混凝土与钢架,二次衬砌采用60 cm厚的C35防水钢筋混凝土。具体分析步工况见表3。

4 计算结果分析

4.1 地表位移影响分析

为验证数值模拟结果的可靠性,对微波山双连拱隧道的地表位移数值计算结果与现场实测值进行

表 3 数值模拟工况

分析步	工况说明
0	初始阶段
1	开挖中导洞,并施作初期支护
2	施作中隔墙
3	开挖左洞,并施作初期支护
4	开挖右洞,并施作初期支护
5	左右洞贯通后,拆除中导洞临时侧壁
6	施作正洞二衬

对比分析,见图 5。通过对典型断面处数值模拟结果与现场实测数据结果的分析可知,数值结果与监测结果的变化趋势基本一致,可见数值分析方法能够反映实际工程的开挖规律,证实了该方法的合理性。

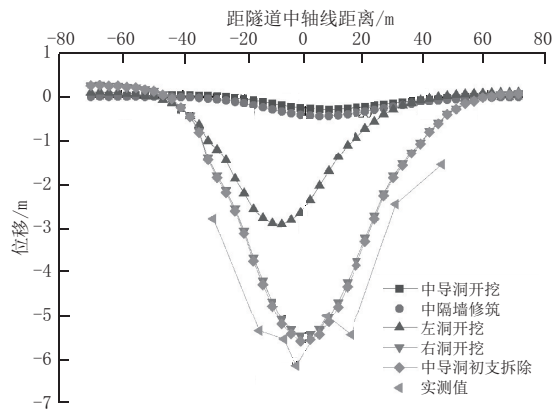


图 5 地表沉降变化曲线

对该断面地表沉降变化曲线规律分析可以发现,随着开挖步骤的进行,地表沉降逐渐增大。连拱隧道中导洞开挖完成后,地表沉降变形较小,最大沉降点在连拱隧道中轴线偏右约 4.5 m 位置处,最大沉降为 0.27 mm;连拱隧道左洞开挖完成后,地表沉降变形显著增大,最大沉降点向连拱隧道左线中心线偏移,最大沉降为 2.9 mm;随着连拱隧道右洞开挖完成,土体沉降区域增加,沉降量继续增大,最大沉降点向连拱隧道中轴线偏移,最大沉降为 5.4 mm。

通过以上分析,可以发现双连拱隧道开挖引起的地表沉降是由中导洞、左洞和右洞分别独立开挖引起的地表沉降的结果叠加。施工完成时,地表最大沉降为 5.6 mm,实测最大沉降为 6.1 mm,均小于规范^[11]规定允许值的 30 mm。

4.2 既有地铁隧道结构位移分析

在双连拱隧道施工过程中,以双线既有地铁隧道为研究对象,对其结构变形情况进行监控量测,既有隧道位移曲线见图 6。

可以发现,在上穿期间,既有隧道的位移变化显

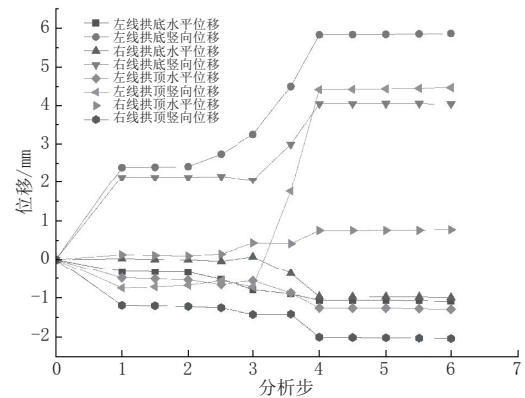


图 6 既有地铁隧道位移图

著,左线隧道位移较右线隧道位移更大;中导洞开挖完成后,既有隧道的变形处于初稳阶段,左线和右线拱顶水平、竖向位移分别为-0.49、-0.75 mm和0.13、-1.20 mm,左线和右线拱底水平、竖向位移分别为-0.32、2.40 mm和0.03、2.14 mm;随着主线右洞隧道的开挖,既有隧道变形速率增加,直至二衬施作完成后达到稳定,此时左线和右线拱顶水平、竖向位移分别为-1.29、4.47 mm和0.76、-2.04 mm,左线和右线拱底水平、竖向位移分别为-1.08、5.87 mm和-0.99、4.05 mm,说明在当前施工方案下,双连拱隧道开挖引起的既有地铁隧道变形未超过规定^[12]的允许值 10 mm。

造成左线拱顶产生隆起与右线拱顶产生沉降的结果,主要是因为新建隧道与既有隧道位置关系,左线隧道断面全部位于新建隧道右洞下方,处于新建隧道断面范围内,而右线隧道位于新建隧道断面范围以外。

4.3 新建隧道拱顶位移分析

新建隧道监测断面测点布设见图 7,对拱顶位移展开分析。

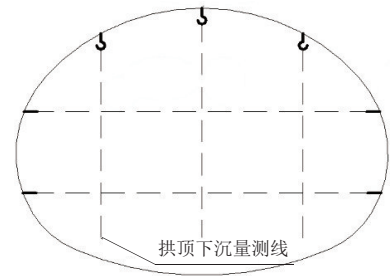


图 7 新建隧道测点布设示意图

左右洞拱顶沉降曲线见图 8。由图 8 可知,数值结果与实测结果的变化趋势一致,拱顶沉降大致分为 3 个阶段:激增阶段、缓增阶段、稳定阶段。在左、右洞开挖且初衬施作完毕后,左、右拱顶下沉量急剧增加;随着右洞开挖,左洞拱顶沉降量开始缓慢增

长,此时左洞拱顶沉降量为5.3 mm,约为左洞拱顶最终沉降量的75%;施作二衬前,左、右洞拱顶的沉降分别为6.8 mm和6.1 mm,约为拱顶最终沉降量的97%;二衬施作完毕后,左、右洞拱顶沉降最终稳定在7 mm和6.3 mm。拱顶沉降的激增阶段为施工的关键阶段,风险也最高,在工程中若能预判三个阶段的划分点,针对不同阶段采取不同级别的监测和预警,可为工程安全施工提供保障。

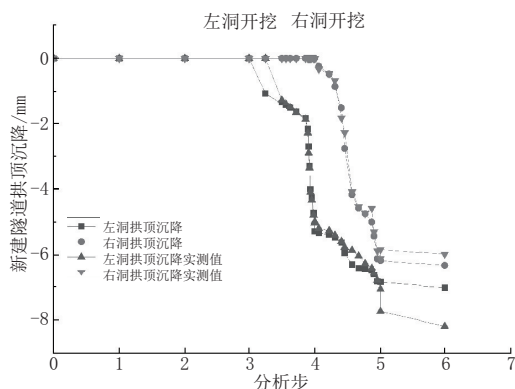


图8 新建隧道拱顶沉降图

5 结 语

本文依托微波山双连拱隧道工程,首先分析了施工技术难点并阐述了应对措施;其次,基于ABAQUS软件对大跨度双连拱隧道小净距上穿既有地铁隧道进行数值模拟,分析了地表沉降规律、既有地铁隧道变形规律及新建隧道拱顶沉降规律。

(1)双连拱隧道开挖引起的地表沉降是由中导洞、左洞和右洞分别独立开挖引起的地表沉降的结果叠加;开挖完成后,地表最大沉降为5.6 mm,小于

规定允许值的30 mm。

(2)开挖引起的既有地铁隧道变形左线较右线大,但均未超过规定值10 mm。

(3)新建隧道拱顶沉降大致可分为激增阶段、缓增阶段和稳定阶段;其中,拱顶沉降的激增阶段为施工的关键阶段,风险也最高,应提高监测频率。

参考文献:

- [1]《中国公路学报》编辑部.中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J].中国公路学报,2022,35(4):1-40.
- [2]王军,夏才初,朱合华,等.不对称连拱隧道现场监测与分析研究[J].岩石力学与工程学报,2004(2):267-271.
- [3]季毛伟,吴顺川,高永涛,等.双连拱隧道施工监测及数值模拟研究[J].岩土力学,2011,32(12):3787-3795.
- [4]白家设,赵绍鹏,齐兵,等.软弱地层浅埋大跨双连拱隧道支护结构变形研究[J].土木工程学报,2017,50(增刊2):45-50.
- [5]金丰年,王波,蒋美蓉.双连拱隧道穿越破碎山体围岩稳定性数值分析[J].岩土力学,2008,29(增刊1):227-231.
- [6]武科,崔帅帅,张前进,等.新建隧道下穿既有运营地铁施工的力学机理[J].江苏大学学报(自然科学版),2018,39(5):596-603.
- [7]万飞,谭忠盛,陈岩.新建隧道近距离上跨既有有线施工方案研究[J].北京交通大学学报,2013,37(1):40-45.
- [8]Wang J, Cao A, Wu Z, et al. Numerical Simulation on the Response of Adjacent Underground Pipelines to Super Shallow Buried Large Span Double-Arch Tunnel Excavation[J]. Appl. Sci, 2022(12): 621.
- [9]胡志平,马甲宽,邓红涛,等.双连拱地铁隧道施工关键技术及力学行为模拟[J].铁道工程学报,2020,37(3):95-100.
- [10]王勇,王国欣,李金会,等.新建公路隧道小净距上跨施工对既有地铁隧道影响分析——以重庆红岩村隧道上跨既有轨道环线隧道工程为例[J].隧道建设(中英文),2020,40(增刊1):160-168.
- [11]JTG D70/2—2014,公路隧道设计规范[S].
- [12]地铁运营安全保护区和建设规划控制区工程管理办法(2018年版)[Z].2018.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

