

吕文龙, 王嘉豪. 地铁盾构隧道开挖对邻近立交桥桩基影响分析[J]. 华南地震, 2021, 41(4): 107-114. [LYU Wenlong, WANG Jiahao. Analysis of Influence of Metro Shield Tunnel Excavation on Pile Foundation of Adjacent Overpass [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(4): 107-114]

地铁盾构隧道开挖对邻近立交桥桩基影响分析

吕文龙¹, 王嘉豪²

(1. 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广州 510000; 2. 广州大学土木工程学院, 广州 510000)

摘要: 采用广州市轨道交通十三号线二期工程西彩区间盾构隧道项目资料, 使用三维有限元模拟的方法, 研究盾构隧道施工对立交桥桩基产生的影响。由于该区间盾构隧道下穿德尼立交桥, 需进行桩基托换, 从桩基托换及盾构掘进的设计、施工特点出发, 针对所提出的不利影响开展三维建模及数值计算。分析结果表明: 桩基托换和盾构开挖均对土体造成了一定程度的扰动, 引起的桩基竖向位移较大, 随着桩基托换和盾构开挖施工的进行, 结构位移变化呈现先逐步上涨, 后趋于稳定的趋势。根据数值计算结果的位移大小, 均在规范的安全控制值内, 不影响既有立交桥的结构和运营安全, 并进一步提出相应的施工建议。

关键词: 盾构隧道施工; 地铁隧道; 桩基础; 土体变形; 数值模拟; MIDAS

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)04-0107-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.04.15

Analysis of Influence of Metro Shield Tunnel Excavation on Pile Foundation of Adjacent Overpass

LYU Wenlong¹, WANG Jiahao²

(1. Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Based on the shield tunnel project of Xicai section of Guangzhou Rail Transit Line 13 phase II project, this paper studies the influence of shield tunnel construction on overpass pile foundation by using three-dimensional finite element simulation method. As the shield tunnel in this section undergoes the Deni overpass, pile foundation underpinning is needed. Based on the design and construction characteristics of pile foundation underpinning and shield tunneling, three-dimensional modeling and numerical calculation were carried out for the proposed adverse effects. The analysis results show that the pile foundation underpinning and shield excavation have caused a certain degree of disturbance to the soil, resulting in a large vertical displacement of the pile foundation. With the pile foundation underpinning and shield excavation, the structural displacement changes gradually increase at first, and then tend to be stable. According to the numerical calculation results, the displacement is within the safety control value of the specification, which does not affect the structure and operation safety of the

收稿日期: 2021-04-17

基金项目: 住房和城乡建设部科技计划资助项目(No.2017-k10-006)。

作者简介: 吕文龙(1984-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 一级注册结构工程师, 注册岩土工程师, 主要从事建筑地基基础方面的研究。

E-mail: midworm@163.com

existing overpass. The corresponding construction suggestions are put forward.

Keywords: Shield tunnel construction; Subway tunnel; Pile foundation; Soil deformation; Numerical simulation; MIDAS

0 引言

近些年,随着我国城市的不断发展,为缓解地面交通压力,地铁的快速修建成为大趋势。而地下隧道的开挖施工必然会对原有的建筑物产生扰动影响,特别是对建筑物的基础结构部分。因此需要一种扰动作用较小、开挖速度快的隧道施工方法,而盾构法恰好满足这些要求,成为目前地铁隧道开挖的主流方式之一,在国内外已经得到大量的推广和应用。

盾构法隧道施工虽然相对于其他施工方法可以大幅度降低对地下各类桩基础的影响^[1],但是在城市建筑物密集区,地下桩基础繁多,仍不可避免地会在开挖过程中穿越既有建筑物的桩基础。因此,城市盾构法隧道施工中,隧道接近或穿越建筑物桩基础的工程情况需要进行深入研究。目前关于盾构隧道的施工一个较为热门的研究方向是城市盾构隧道濒临建筑物桩基础开挖施工时的桩基础稳定性分析,研究的主要手段为:数值模拟、模型试验、理论计算等,并且已经有许多可观的研究成果。李明睿^[2]等通过 PLAXIS 3D 进行了盾构隧道施工近距离下穿桩基进行三维仿真模拟,分析结果表明隧道开挖将导致桩基发生沉降、侧移以及倾斜,桩基的整体位移以及倾斜都随盾构施工的进行不断增加。魏焕卫^[3]等采用室内模型试验,研究了盾构开挖对邻近桩基的影响,隧道开挖导致的桩顶竖向位移和倾斜率均随隧道距离增加而变大,且桩长越短所受影响越明显。张大鹏^[4]等通过 MIDAS 进行数值模拟分析了隧道开挖对邻近桥梁桩基的位移、剪力和弯矩等的影响规律,结果表明隧道开挖对桩基的横向位移和纵向位移影响较小,桩基离盾构开挖面越远,受到的影响越小;隧道掘进过程中对桩体的轴力、剪力和弯矩影响较大。魏亚辉^[5]等通过 ABAQUS 数值模拟了黄土地区盾构开挖对邻近桩基影响规律,结论表明在盾构隧道邻近已有桩基础施工开挖的过程中,不同的开挖阶段对桩基础的影响也不同;付文生^[6]等研究了研究同一地层条件同一桩径的情况下,桩底与隧洞底持平及桩底与洞中心线持平时,盾构隧道超近距离穿越既有桩基时产生的影响,结

论表明盾构隧道在桩基的下方或邻近通过,由于盾构圆环间隙的存在,会造成桩两侧的土压力不平衡,在这种压力差的作用下,桩会水平位移、弯曲甚至强度破坏;梁志伟^[7]分析了“先下后上”和“先上后下”两种施工工序中,盾构穿越施工对既有隧道的影响,研究其变形、轴向力、轴向弯矩的变化规律,结论表明不同穿越顺序中既有隧道的沉降和内力变化趋势的是不同的,且最终受到扰动的程度也有所差异,且“先上后下”施工工序更优;李进军^[8]等基于上海虹桥综合交通枢纽工程分析了地铁盾构隧道穿越对西航站楼桩基础的影响,结论表明桩身刚度加强并采取三轴搅拌桩隔离的措施,可以有效减小隧道施工对桩基础附加受力及变形的影响。本文基于十三号线二期工程西场站—彩虹桥站盾构区间项目,采用数值模拟的方法,研究了在先进行桩基托换,再进行盾构开挖的复杂工况条件下,盾构掘进对桩基的位移影响规律。

1 工程概况

某项目为十三号线二期工程西场站—彩虹桥站盾构区间,在盾构掘进约 380 m 后开始下穿德坭立交桥多墩桩基,需要进行桩基托换。由于桩基两侧地面道路地面车流量较大,不具备地面托换的条件,所以本次桩基托换工程采用暗挖通道主动托换,桩基托换采用明挖竖井+横通道施工+托换桩、托换梁施工,其中桩基托换明挖竖井 1 个,暗挖横通道主导洞 1 个,支导洞 5 个,托换桩 10 根,托换梁 5 个。

德坭立交桥位于广州市荔湾区东风西路与广茂铁路交汇处,分为旧桥和新桥,其中旧桥于 1964 年建成通车,长 370 m,宽 12 m;新桥建于 1995 年,长 1309 m,宽 15 m,旧桥两侧各 8.5 m,设计中线在道路中线段 16 m,桥梁为单层预应力混凝土连续梁桥,各原桥桩桩长大致在 20~23 m 左右,隧道埋深约 13 m。图 1 为地铁与德坭立交桥的位置关系图;图 2 为桩基托换暗挖通道平剖图。

由于德坭立交桥 43#、44#、45#、48#、49#桥墩需在盾构掘进穿越前进行桩基托换,此过程会对桥墩产生扰动,出现结构位移,会进一步加剧

盾构掘进穿越时桥墩的风险，所以本文将重点分析再盾构侧穿之后其结构的位移。
43#、44#、45#、48#、49#桥墩及承台在桩基托换

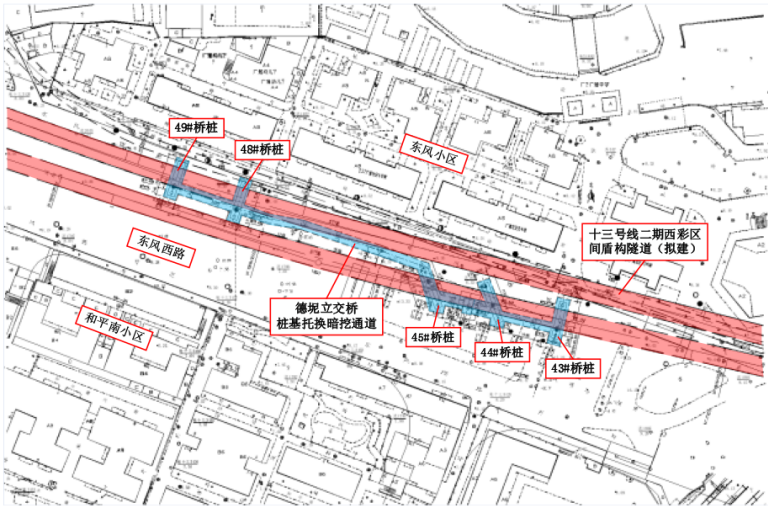


图1 地铁与德坭立交桥的位置关系图
Fig.1 Location diagram of metro and Deni overpass

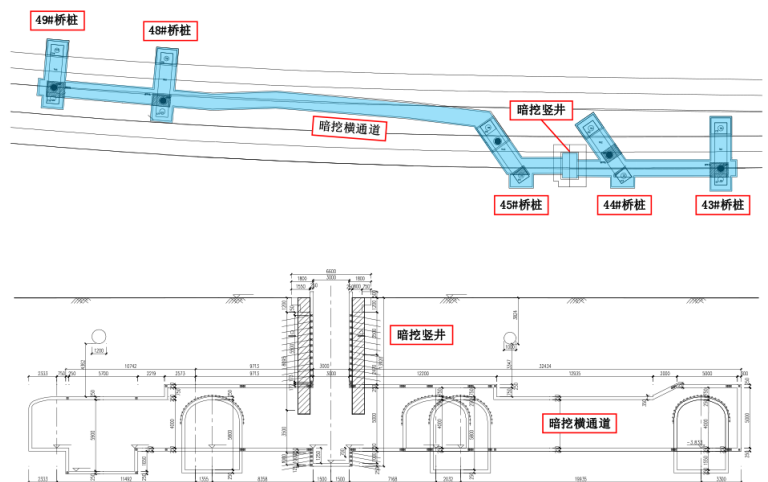


图2 桩基托换暗挖通道平剖图
Fig.2 Plane section of pile foundation underpinning tunnel

2 计算模型的建立

根据德坭立交桥和桥桩基托换暗挖通道结构的
空间立体关系以及工程施工特点，用 MIDAS
GTS建立三维有限元计算模型，并充分考虑本工程
的地层分布特点并合理选取计算参数、划分网格。

2.1 结构三维模型

三维有限元计算模型的边界条件为：模型底
部Z方向位移约束，模型前后面Y方向约束，模型
左右面X方向约束。三维有限元整体模型示意如图
3所示，内部结构结构模型示意图如图4所示。

2.2 材料参数的确定

模型中的地层主要根据德坭立交桥及桩基托
换暗挖通道相关结构附近的工程地质资料进行适
当简化，地层自上往下依次为素填土、残积土、
强风化泥质粉砂岩、中风化泥质粉砂岩、微风化
泥质粉砂岩。

德坭立交桥周边地层的力学性质对约束桩基
托换暗挖通道施工过程中德坭立交桥的受力和变
形起着关键作用，因此，进行三维模拟分析计算
时须充分考虑本工程的地层分布特点并合理选取
计算参数。采用“地层—结构”模型进行三维建
模分析。计算中不同的材料采用不同的本构模型，

将模型中的土体视为弹塑性体，采用摩尔-库伦模型，采用实体单元模拟。暗挖通道支护结构、德坭立交桥等结构均采用各向同性弹性模型。各地层参数按照地勘报告给出的数据选取，具体材料参数取值如表1，模拟单元参数见表2。

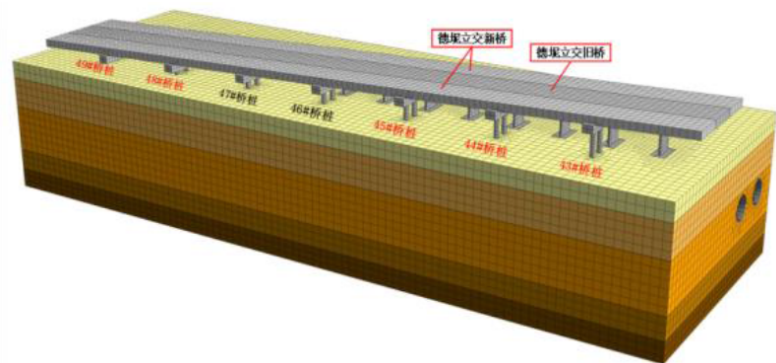


图3 三维有限元整体模型
Fig.3 Three dimensional finite element model

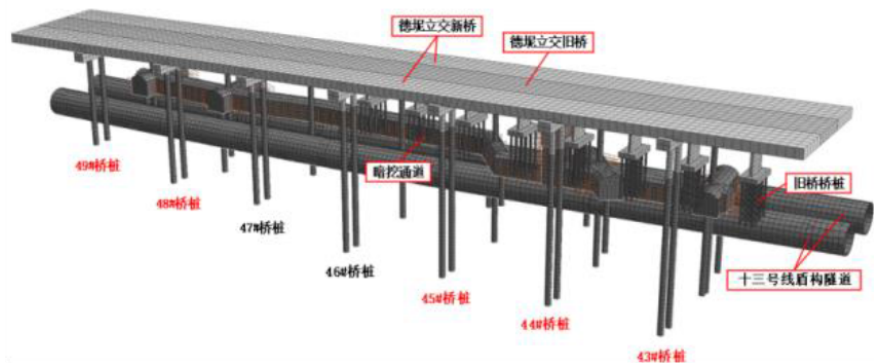


图4 立交桥及桩基和盾构隧道结构模型
Fig.4 Structural model of overpass ,pile foundation and shield tunnel

表1 三维数值模拟材料参数取值表
Table 1 Material parameters for 3D numerical simulation

材料	本构模型	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	粘聚力 $C/(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	弹性模量 $E/(\text{MPa})$	泊松比 μ
素填土	摩尔库伦	19	11	8	25	0.30
残积土	摩尔库伦	18	21	22	35	0.30
强风化泥质粉砂岩	摩尔库伦	20	31	28	50	0.25
中风化泥质粉砂岩	摩尔库伦	21	38	35	80	0.20
微风化泥质粉砂岩	摩尔库伦	21	45	39	100	0.20
C25混凝土	线弹性	25	—	—	28 000	0.25
C30混凝土	线弹性	25	—	—	30 000	0.20
C50混凝土	线弹性	25	—	—	34 500	0.20
钢材	线弹性	78	—	—	200 000	0.30

表2 三维数值模拟单元参数表
Table 2 Element parameters of 3D numerical simulation

单元名称	材料属性	单元属性	单元尺寸
素填土	素填土	三维实体单元	—
残积土	残积土	三维实体单元	—

(转下表)

(接表2)

单元名称	材料属性	单元属性	单元尺寸
强风化泥质粉砂岩	强风化泥质粉砂岩	三维实体单元	—
中风化泥质粉砂岩	中风化泥质粉砂岩	三维实体单元	—
微风化泥质粉砂岩	微风化泥质粉砂岩	三维实体单元	—
高架桩基础、承台等	C30混凝土	三维实体单元	—
托换梁、托换桩	C35混凝土	三维实体单元	—
暗挖通道喷混支护	C25混凝土	板单元	250 mm
锚杆	钢材	线单元	Φ22 mm
格栅钢架	钢材	线单元	150*150 mm

2.3 施工工况的模拟

根据项目实际情况，施工工况共有两大步骤，首先进行桩基托换，托换完成后再进行盾构隧道的开挖。由于在桩基托换施工过程中，也会对立交桥体结构产生一定的扰动，再进行盾构开挖会进一步加剧立交桥体结构的位移，因此，为具体分析两大工况对结构产生的影响，将数值分析也分为两大步骤，桩基托换工况具体步骤如表3所示，在桩基托换完成的基础上，进行位移清零，再来模拟盾构开挖工况，盾构开挖工况具体步骤如表4所示。

表3 桩基托换施工的施工过程
Table 3 Construction process of pile foundation underpinning construction

施工工况	主要施工内容
工况1	初始地应力
工况2	竖井旋喷桩与锁口圈梁施作
工况3	竖井开挖1
工况4	竖井开挖2
工况5	东西向主要暗挖通道开挖1
工况6	东西向主要暗挖通道开挖2
工况7	东西向主要暗挖通道开挖3
工况8	东西向主要暗挖通道开挖4
工况9	东西向主要暗挖通道开挖5
工况10	原桩桩基托换通道开挖（同时施作）
工况11	施作托换桩（同时施作）
工况12	施作托换梁（同时施作）
工况13	原桩截除（同时截除）
工况14	暗挖通道回填土1
工况15	暗挖通道回填土2
工况16	暗挖通道回填土3
工况17	竖井回填土1
工况18	竖井回填土2

表4 地铁区间盾构掘进的三维动态施工过程
Table 4 Three dimensional dynamic construction process of metro shield tunneling

施工工况	主要施工内容
工况1	位移清零（桩基托换完毕）
工况2	盾构掘进施工1
工况3	盾构掘进施工2
工况4	盾构掘进施工3
工况5	盾构掘进施工4
工况6	盾构掘进施工5
工况7	盾构掘进施工6
工况8	盾构掘进施工7
工况9	盾构掘进施工8
工况10	盾构掘进施工9
工况11	盾构掘进施工10
工况12	盾构掘进施工11
工况13	盾构掘进施工12
工况14	盾构掘进施工13
工况15	盾构掘进施工14
工况16	盾构掘进施工15
工况17	盾构掘进施工16
工况18	盾构掘进施工17
工况19	盾构掘进施工18
工况20	盾构掘进施工19

3 计算结果及分析

从MIDAS中提取第一个施工过程，即桩基托换过程的计算结果。图5为桩基托换施工完成后德坭立交桥桩基础的总位移云图。图6为桩基托换施工过程中德坭立交桥桩基础结构总位移变化趋势折线图，其中横坐标为施工工况(对照施工工况表3)，纵坐标为位移大小。

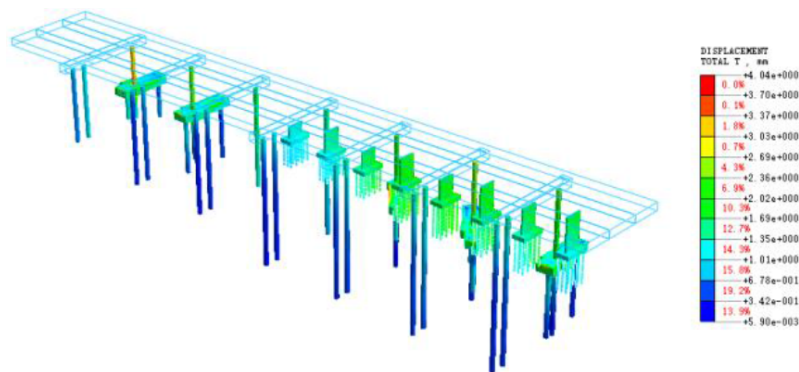


图5 桩基托换施工过程中德坭立交桥桩基础结构的总位移(单位:mm)

Fig.5 Total displacement of pile foundation structure of Deni interchange during pile foundation underpinning construction (unit:mm)

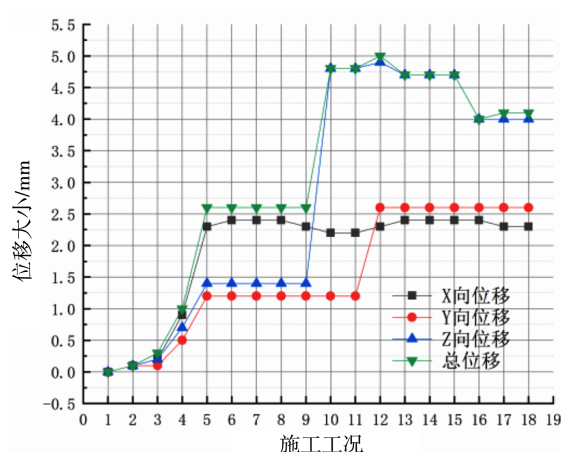


图6 桩基托换施工过程中德坭立交桥桩基础结构位移折线图

Fig.6 Broken line diagram of pile foundation structure displacement of DENI interchange during foundation underpinning construction

德坭立交桥桩基托换施工过程中对德坭立交桥桩基础结构影响的三维模拟分析位移结果表明:①德坭立交桥桩基托换施工过程中诱发德坭立交桥桩基础结构的最大水平 X 位移为2.3 mm,水平 Y 位移为2.6 mm,最大竖向位移为4.9 mm,最大总位移为5.0 mm;②在工况10处,竖向位移变化出现骤变,原因是为了方便模拟,这里的施工工况为原桩桩基托换通道开挖的施工一步到位,同时施作,导致位移

变化较大,但后续工况总体趋势还是趋于稳定。

从MIDAS中提取第二个施工过程,即盾构隧道掘进过程的计算结果。图7为盾构隧道掘进完成后德坭立交桥桩基础的总位移云图。图8为盾构隧道掘进过程中德坭立交桥桩基础结构位移变化趋势折线图,图9为德坭立交桥各桥桩桩基础结构位移折线图,其中横坐标为施工工况(对照施工工况表4),纵坐标为位移大小。

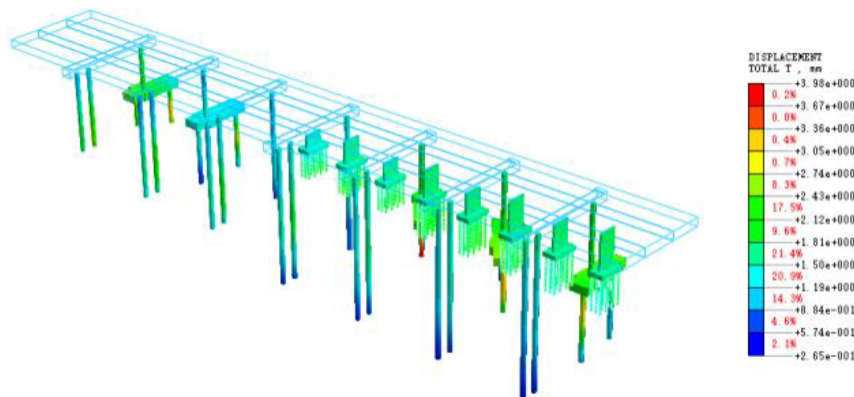


图7 盾构隧道掘进过程中德坭立交桥桩基础结构的总位移(单位:mm)

Fig.7 Total displacement of pile foundation structure of Deni overpass during shield tunneling (unit:mm)

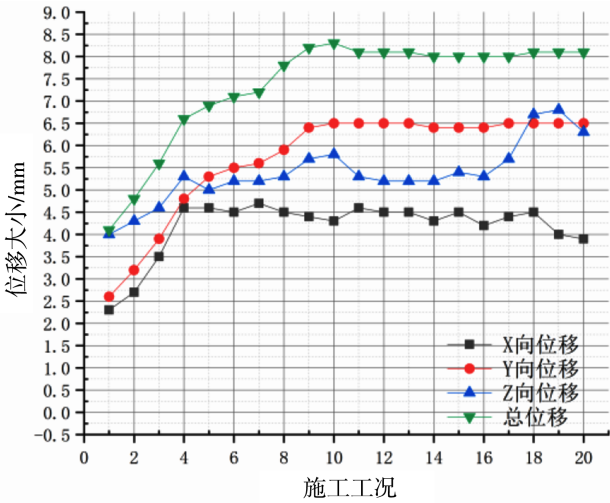


图8 盾构隧道掘进过程中德坭立交桥桩基础结构位移变化趋势折线图

Fig.8 Broken line diagram of displacement change trend of pile foundation structure of Deni overpass during shield tunneling

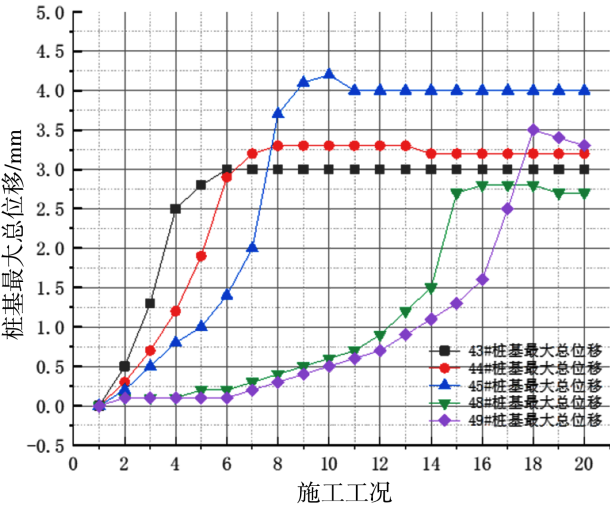


图9 盾构隧道掘进过程中德坭立交桥各桥桩桩基础结构位移折线图

Fig.9 Broken line diagram of pile foundation structure displacement of Deni overpass during shield tunneling

由盾构隧道掘进过程对德坭立交桥桩结构影响的三维模拟分析位移结果表明：①盾构隧道掘进过程诱发德坭立交桥桩基础结构的最大水平X位移为2.3 mm，水平Y位移为3.9 mm，最大竖向位移为2.8 mm，最大总位移为4.2 mm；②45#桥墩结构因盾构掘进施工诱发的位移最大，最大总位移为4.2 mm，相邻桥墩差异沉降均不大于2 mm；③桩基托换后盾构掘进穿越过程中累计诱发德坭立交桥桩基础结构的最大水平X位移为4.6 mm，水平Y位移为6.5 mm，最大竖向位移为6.8 mm，最大总位移为8.3 mm。

根据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363-2019)^[9]、《公路桥涵养护规范》(JTG H11-2004)^[10]及《城市桥梁养护技术规范》(CJJ 99-2003)^[11]，高架桥结构安全控制值按表5规定采用。由以上分析可知，各项安全控制指标满足表5要求。

表5 高架桥结构安全控制值	
Table 5 Safety control value of viaduct structure	
安全控制指标	控制值
桥桩横向差异沉降	<2 mm
相邻桥墩差异沉降	<2 mm
桥桩最大沉降量	<20 mm

4 设计与施工建议

结合广州市德坭立交桥的岩土工程地质条件、桩基托换及盾构隧道结构设计施工特点、德坭立交桥结构特点分析，为确保德坭立交桥桩基托换及区间盾构隧道掘进过程中立交桥结构的安全，不影响立交桥的正常运营，提出以下建议：

(1)鉴于地层计算参数取值的合理与否对预测分析德坭立交桥桩基础结构的位移发展及评估结

构安全至关重要,建议项目建设过程结合所开展的结构位移监测数据和盾构掘进施工相关监测数据,必要时开展地层计算参数的反演计算,为进一步预测分析德坭立交桥桩基础的位移发展及其的结构安全奠定基础。

(2)德坭立交桥距今已有二十多年历史,结构现状以及是否已出现损伤对结构安全至关重要,建议在德坭立交桥桩基进行托换前,针对受影响范围的德坭立交桥的桩基础结构完整性开展调查及分析,避免桩基托换及盾构掘进的过程中对立交桥造成的不利影响,梳理问题部位并进行针对性的补强加固与重点监测,通过监测数据变化趋势进行预警报警或参考《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911-2013)^[12]中监测项目控制值和预警。

(3)建议桩基托换过程千斤顶顶力应分级加载,并同时加强对桥梁、托换梁的变形监测,将顶升力控制在允许范围内,发现问题应及时停止施工并对顶升参数进行修正。

(4)进行推进速度控制。盾构机应均速慢速推进,穿越德坭立交桥桩基础结构过程中,盾构推进速度宜控制在(20~30)mm/min,并根据检测数据适当调整速度,尽量减少盾构对土体的扰动,以控制地层变形,降低对德坭立交桥结构的影响。

(5)在桩基托换及盾构施工过程中,若德坭立交桥监测数据发生异常时,立即停止开挖,分析原因,若地下水位下降或地面沉降值超过警戒值,应立即采取加强支撑、压浆加固措施保证基坑稳定,防止坍塌事故发生,必要时采取回填措施确保基坑的稳定。

(6)由于在桩基托换过程已产生位移,建议加强对已进行桩基托换的43#、44#、45#、48#、49#桥墩及承台的位移监测布点及监测频率,尤其在盾构掘进过程中,重点关注45#桥墩结构位移,实时监控。监测后应及时对各种监测数据进行整理分析,判断其稳定性,并及时反馈到施工中去指导施工。

5 结语

综合分析广州市德坭立交桥周边场地工程地质资料,结合暗挖通道、桩基托换及地铁盾构设计、

施工特点,以及紧邻受影响的德坭立交桥桩基础结构特点分析,依据所开展的系列三维数值模拟计算结果及其分析,得到的具体结论如下:

(1)德坭立交桥桩基托换施工过程诱发德坭立交桥桩基础结构的最大总位移为5.0 mm,满足根据相关规范确定的变形指标。

(2)盾构隧道掘进过程诱发德坭立交桥桩基础结构的最大总位移为4.2 mm,满足根据相关规范确定的变形指标。

(3)桩基托换后盾构掘进穿越过程中累计诱发德坭立交桥桩基础结构的最大总位移为8.3 mm,满足根据相关规范确定的变形指标。

参考文献

- [1] 何川,封坤.盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J].西南交通大学学报,2015(1):97-109.
- [2] 李明睿,陈国平,范秀江,等.盾构施工对临近桩基影响的数值模拟及参数分析[J/OL].土木与环境工程学报(中英文). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.tu.20210325.0931.002.html>.
- [3] 魏焕卫,奎耀,罗威,等.盾构开挖对邻近桩基影响的试验研究[J].山东建筑大学学报,2021(1):10-16.
- [4] 张大鹏.盾构隧道施工对邻近立交桥桩基位移及应力影响分析[J].路基工程,2021(1):188-191.
- [5] 魏亚辉,王亚琼.基于修正剑桥本构模型的盾构隧道开挖对邻近桩基影响分析[J].公路交通科技,2020(37):97-103.
- [6] 付文生,夏斌,罗冬梅.盾构隧道近距离穿越对桩基影响的对比研究[J].地下空间与工程学报,2009(1):133-138.
- [7] 梁志伟.盾构穿越施工对既有隧道影响的数值模拟与分析[D].广州:广东工业大学,2017.
- [8] 李进军,王卫东,黄茂松,等.地铁盾构隧道穿越对建筑物桩基础的影响分析[J].岩土工程学报,2010(32):166-170.
- [9] 中华人民共和国交通运输部.公路桥涵地基与基础设计规范:JTG 3363-2019[S].北京:人民交通出版社,2019.
- [10] 中华人民共和国交通部.公路桥涵养护规范:JTG H11-2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [11] 中华人民共和国建设部.城市桥梁养护技术规范:CJJ 99-2003[S].北京:人民交通出版社,2003.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911-2013[S].北京:人民交通出版社,2013.