

DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.240172

盾构近距离下穿桥梁数值模拟与监测分析

史锴然,代兴云,丁宇能,汤友生
(中国联合工程有限公司,浙江 杭州 310052)

摘要: 利用三维有限元数值模型,模拟计算盾构隧道穿桥引起的桥桩位移、内力和表面沉降,通过盾构隧道穿越桥梁基础的现场监测,将监测数据与数值计算结果进行对比分析,最终得出杭州机场轨道快线盾构下穿高速某枢纽桥梁桩基引起的桥桩位移、内力变化和地表沉降规律。数值模拟计算结果表明,盾构隧道开挖过程中对桩身的轴力影响较大;桥梁桩的弯矩也有类似的变化趋势;桥梁桩的水平位移随着埋深的增大而减小;不论是水平位移和竖向沉降,均是先开工的右线隧道对其影响较大;数值模拟计算结果与监测数据基本一致。桥桩沉降最大差值为0.9 mm,地表沉降最大差值为0.4 mm。沉降小于施工要求控制的12 mm。模拟计算中选取的参数与模型和实际情况吻合较好,对杭州地区类似工程具有一定的参考价值,施工前应有相应措施和预案保证地层稳定和建构筑物的安全。

关键词: 盾构;下穿桥梁;桥梁桩基;数值模拟;盾构监测

中图分类号: U445.43

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)03-0220-05

Numerical Simulation and Monitoring Analysis of Shield Tunneling through Bridge in Short Distance

SHI Kairan, DAI Xingyun, DING Yuneng, TANG Yousheng
(China United Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310052, China)

Abstract: A 3D finite element numerical model is used to simulate and calculate the displacement, internal force, and surface settlement of bridge piles caused by shield tunneling through the bridge. By the on-site monitoring of shield tunneling through bridge foundation, the monitoring data and the numerical calculation results are compared and analyzed. The displacement, internal force change and surface settlement law of bridge piles caused by the shield tunneling through a hub bridge pile foundation of Hangzhou Airport Rail Express are finally obtained. The numerical simulation calculation results indicate that the influence on the axial force of the pile body is significant during the excavation process of the shield tunnel. The bending moment of bridge piles shows a similar change trend. The horizontal displacement of bridge piles is reduced with the increase of burial depth. Both horizontal displacement and vertical settlement are greatly influenced by the right-side tunnel which is constructed first. The numerical simulation calculating results are basically consistent with the monitoring data. The maximum difference value of pile settlement is 0.9 mm, and the maximum different value of surface settlement is 0.4 mm. The settlement is less than 12 mm that is required to control in the construction. The parameters selected in the simulation calculation are in good agreement with the model and the actual situations, which has certain reference value for similar projects in the area of Hangzhou. Before construction, the corresponding measures and predetermined schemes should be taken to ensure the stability of strata and the safety of structures.

Keywords: shield; tunneling through; bridge pile foundations; numerical simulation; monitoring

0 引言

地铁建设是近年来的热点话题。随着地铁线路密度的提高,地铁建设必然会遇到盾构隧道近接建

构筑物的问题,盾构隧道施工必然会扰动周围土体,从而对附近的建筑物和构筑物产生不利影响。在严重的情况下,甚至可能破坏建筑物和结构的安全和稳定。

张海波等^[1]采用数值模拟的方法,对地铁近距离穿越立交桥桩基础的应力和变形进行了研究,得出了随着盾构施工的进行,桩基应力和形变不断变化,在盾构尾部通过桩基时达到最大值的结论。从

收稿日期: 2024-02-22

基金项目: 中国联合工程有限公司重点技术开发项目基金(2023ZD-01)

作者简介: 史锴然(1994—),男,硕士,工程师,从事隧道设计工作。

施工技术的角度,薛晖等^[2]通过数值模拟得到了黏性土层中盾构穿越摩擦桩的安全距离,并提出了盾构二次注浆、土仓压力控制等关键技术的重要性。王体广^[3]通过实测沉降值与时间的关系曲线,得出了盾构穿越桥梁时的沉降规律。黄新民^[4]和张明聚等^[5]采用数值模拟与监测数据结合的方法,分别验证了桥梁桩周注浆和隔离桩的加固措施,结果表明,加固措施能显著改善盾构隧道施工条件和桥梁桩基的沉降。尚艳亮等^[6]通过三维数值模拟建立了双线盾构穿越桥桩模型,分析了盾构施工过程中引起的桩基位移和内力,并根据数值分析结果制定了合理的监测方案。

以上研究表明盾构隧道对既有桩基有一定的影响,并总结出了一些规律。上述研究虽然在盾构隧道对邻近桩基的影响机理方面提供了一定的解释,但由于地下工程地质条件及结构形式的复杂性和多样性,以往模拟盾构隧道研究过于简化,现有成果并不能充分反映盾构隧道对邻近桩基的影响。

本文采用三维有限元模拟了盾构下穿高速某枢纽桥梁桩基的工况,并与现场监测结果进行对比分析,以期进一步完善盾构近接施工分析理论,并为类似施工情况下盾构隧道的设计和施工提供参考借鉴。

1 工程概况

机场轨道快线某区间穿越高速枢纽桥梁桩基,需穿越枢纽杭州绕城高速主线及匝道各一次,下穿主线及匝道位置为桥梁桩基结构。盾构为左、右线双洞形式,单洞直径为6.9 m,结构厚度0.4 m。区间右线先推进,左线后推进,左右线开挖面距离约40 m。

左右线盾构穿越杭州绕城高速主线(1号桥)处与高速公路交叉角度为83°。盾构在现状高速公路路面下覆土深度为14.04 m。左线盾构从22#~23#墩间穿越,盾构与两侧桥墩桩基边缘最小水平净距为3.07 m;右线盾构从23#~24#墩间穿越,盾构与两侧桥墩桩基边缘最小水平净距为3.07 m(见图1、图2)。

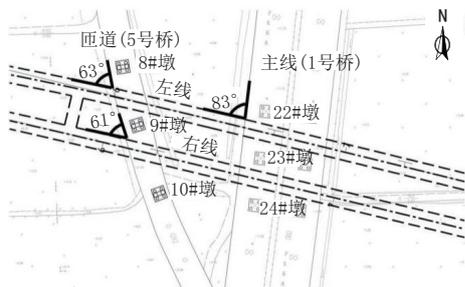


图1 盾构隧道与1号、5号桥梁桩基平面位置图

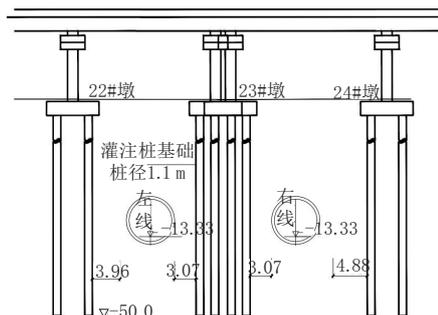


图2 盾构隧道与1号桥梁剖面图(单位:m)

左右线盾构穿越匝道(5号桥)处与高速公路交叉角度分别为63°、61°,盾构在现状高速公路路面下覆土深度为14.05 m。左线盾构从8#~9#墩间穿越,盾构与两侧桥墩桩基边缘最小水平净距为3.25 m;右线盾构从9#~10#墩间穿越,盾构与两侧桥墩桩基边缘最小水平净距4.29 m(见图1、图3)。

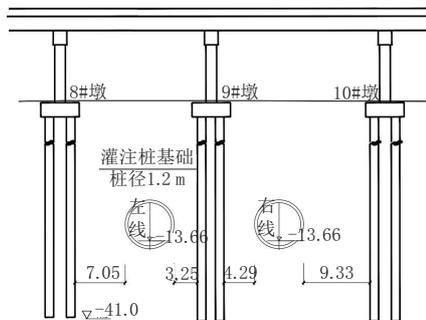


图3 盾构隧道与5号桥梁剖面图(单位:m)

盾构穿越枢纽桥桩段地层由上至下依次为:杂填土、砂质粉土、粉砂、淤泥质黏土夹粉土、粉砂夹粉土、粉质黏土、圆砾。

2 计算模型

2.1 几何模型

有限元计算模型如图4所示。该模型计算范围:模型长宽高为135 m(沿隧道掘进方向)×120 m(横断面宽度)×70 m。

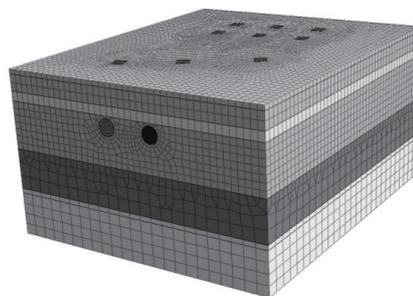


图4 数值分析模型

2.2 材料计算参数

计算中土体采用修正莫尔库伦模型,盾壳、管片采用弹性模型,详细土体参数见表1。

表1 土体参数

层号	土层名称	压缩模量/ MPa	重度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c /(kPa)	φ ($^{\circ}$)	泊松 比 ν
① ₁	杂填土	3.0	18.0	8.0	12.0	0.33
② ₄	砂质粉土	7.0	19.6	5.0	26.0	0.34
③ ₅	粉砂	15.0	19.9	5.0	31.0	0.26
⑥ ₁	淤泥质黏土 夹粉土	3.5	17.6	10.0	9.0	0.41
⑧ ₂₁	粉质黏土夹 粉砂	6.5	18.5	18.0	17.0	0.35
⑩ ₃	粉砂	15.0	19.4	5.0	31.0	0.23
⑫ ₄	圆砾	40.0	22.0	3.0	42.0	0.17

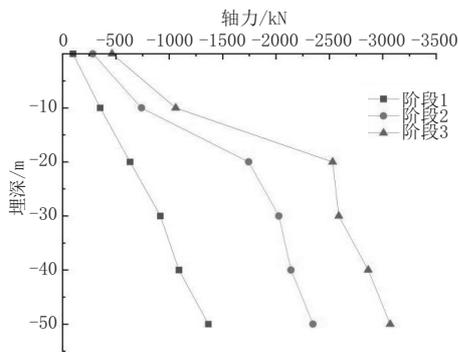
2.3 计算结果分析

选取9#和23#桥墩桩作为内力和位移分析对象。设定阶段1为盾构掘进的初始阶段,阶段2为右线盾构掘进的结束阶段,阶段3为左线盾构掘进的完成阶段。

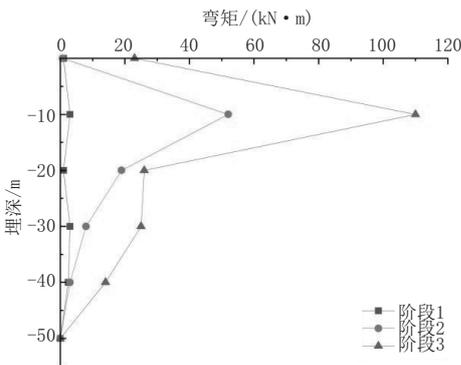
2.3.1 9#墩桥桩的内力与位移

9#墩桩基的内力变化如图5所示。总体而言,随着盾构掘进的进行,桥桩轴力和弯矩均呈现增大趋势。显然,右线盾构通过桥桩后,在盾构埋深10~20 m范围内,桥桩轴力明显增大,增大幅度为209%,弯矩变化幅度更为明显,达到了25倍。

9#墩桩基的位移变化如图6所示。总体而言,随



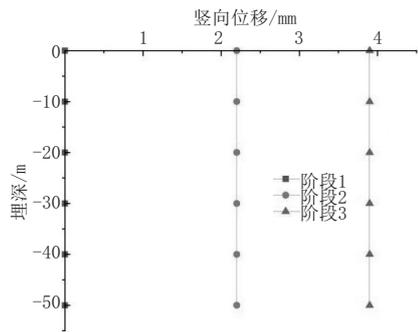
(a)9#墩桥桩轴力



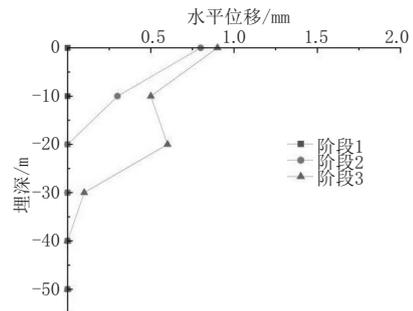
(b)9#墩桥桩弯矩

图5 9#墩桥桩内力结果

着盾构掘进的进行,桥桩的竖向和水平位移逐渐增大。可以看到,竖向位移与桥桩的埋深没有关系,而是随着左右线盾构掘进的通过,沉降变大,左线通过后,竖向位移最终达到3.9 mm。而水平位移则与埋深有较大关联,位于地表的桩基顶面达到了位移最大值0.9 mm,并且随着盾构的掘进,各部位的水平位移增大。另外,可以发现先掘进的右线隧道对于最终的位移结果有更大的影响,竖向位移达到了最终位移的56%,水平位移达到了最终位移的89%。



(a)9#墩桥桩竖向位移



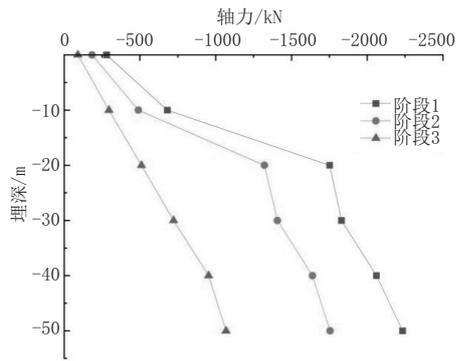
(b)9#墩桥桩水平位移

图6 9#墩桥桩位移结果

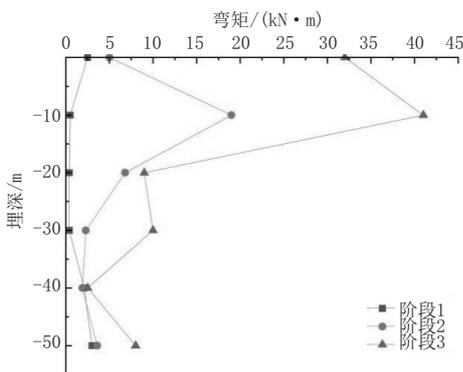
2.3.2 23#墩桥桩的内力与位移

23#墩桩基的内力变化如图7所示。总体而言,随着盾构掘进的进行,桥桩轴力和弯矩均呈现增大趋势。与9#墩桩基趋势相同,右线盾构通过桥桩后,在盾构埋深10~20 m范围内,桥桩轴力明显增大,增大幅度为156%,弯矩变化幅度更为明显,达到了约19倍。

23#墩桩基的位移变化如图8所示。可以看到,竖向位移与桥桩的埋深没有关系;而是随着左右线盾构掘进的通过,其沉降变大,左线通过后,竖向位移最终达到2.4 mm。而水平位移则与埋深有较大关联,位于地表的桩基顶面在右线盾构通过后达到了位移最大值0.7 mm,之后又因为左线的施工,位移减小至0.2 mm,这可能是位于桩基两侧的隧道施工使得桩基在不同阶段向不同方向产



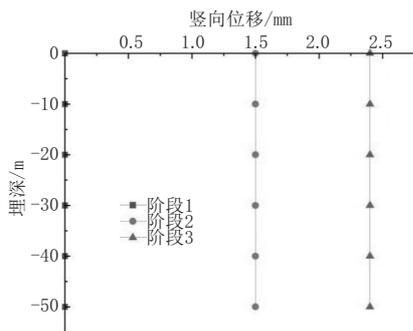
(a)23#墩桥桩轴力



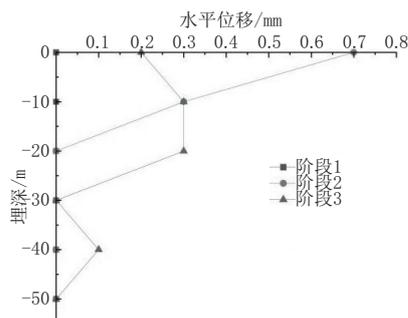
(b)23#墩桥桩弯矩

图7 23#墩桥桩内力结果

生位移的结果。另外,可以发现先掘进的右线隧道对于最终的位移结果有更大的影响,竖向位移达到了最终位移的62.5%,水平位移达到了最终位移的350%。



(a)23#墩桥桩竖向位移



(b)23#墩桥桩水平位移

图8 23#墩桥桩位移结果

3 盾构下穿桥梁施工变形监测及分析

3.1 监测点布设

3.1.1 地表监测点布设

沿隧道掘进方向每7.5 m设置1个中心测点。每30 m设1个断面。

3.1.2 侧穿桥桩监测点布设

选取的监测断面如图9所示,其中24#墩桥桩在盾构右线外侧,23#墩桥桩位于左右线盾构之间。

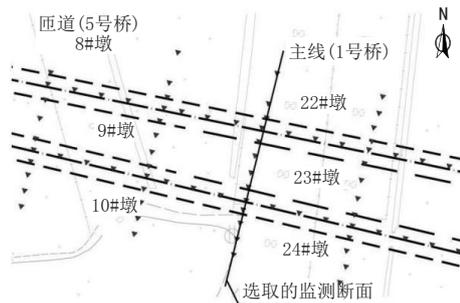


图9 监测点平面布设

3.2 盾构下穿施工时变形监测数据分析

如图10所示,根据记录的监测数据可得,随着盾构的掘进,桥梁桩基沉降均为增大的趋势。10月26日为盾构左线穿越监测断面的日期。其中23#墩桥桩于10月26日前累计达到了1.7 mm的沉降,而在左线通过后,最终沉降达到了3.3 mm。24#墩桥桩于10月26日前累计达到了1.2 mm的沉降,而在左线通过后,最终沉降达到了1.6 mm。先掘进的右线对于两个墩桥桩沉降的影响分别达到了52%、75%。

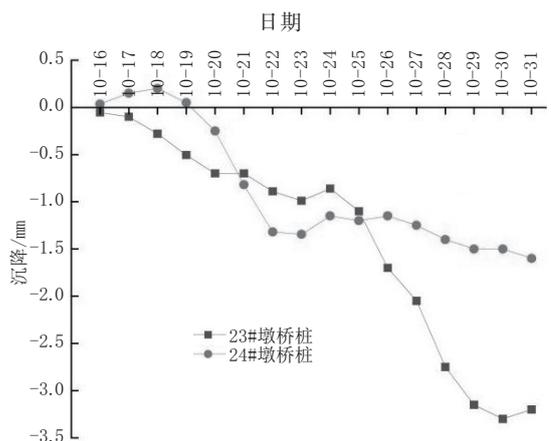


图10 桥桩沉降监测

由图11可以看出,断面的沉降呈现V形沙漏状,且最大值偏向右线隧道。在右线掘进通过后,地表最大沉降为3.0 mm,左线掘进通过后,地表最大沉降为4.3 mm。

3.3 监测结果与数值模拟结果对比

为了检验数值计算的可靠性,将桥墩处数值模

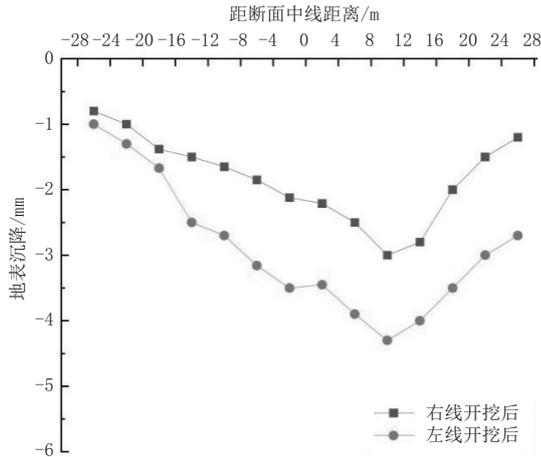


图11 地表沉降监测

拟计算结果与现场监测结果进行对比。由表2可以得出,二者结果相符,最大相差仅0.9 mm。

表2 监测值与模拟值对比 单位:mm

测点	位移监测值	位移模拟值
9#墩	4.3	3.9
23#墩	3.3	2.4
24#墩	1.6	1.9

另外,将选取的监测断面的地表监测沉降值和数值模拟值对比,得到该断面地表沉降比较图(见图12)。

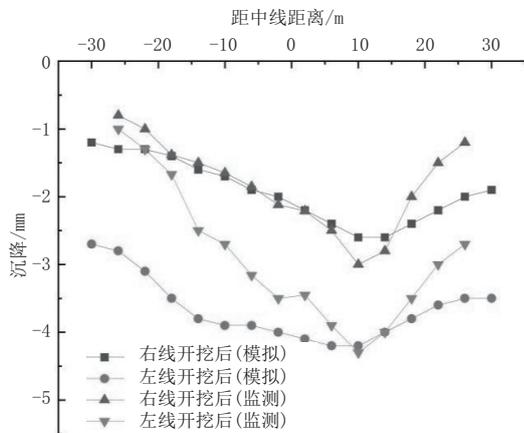


图12 沉降对比图

由图12对比分析,右线施工结束后地表沉降实际测量值为3.0 mm,数值模拟值为2.6 mm;左线施工结束后,地表沉降实际测量值为4.3 mm,数值模拟值为4.2 mm。现场实际测量结果和数值模拟计算结果

之间的差值在可接受范围内,且沉降曲线趋势相符,数值分析与监测结果符合度较好。

4 结 语

目前,该区间地铁盾构已顺利通过枢纽桥桩,施工期间高速公路的运行未受到影响,后续桥桩沉降基本稳定。根据模拟计算和实际监测数据,对本次近距离通过枢纽桥梁桩基的地铁盾构隧道进行数值模拟分析和监测结果总结如下。

(1)盾构下穿桥桩情况下,数值模拟右线盾构掘进完成后,地表的最大沉降为2.6 mm,左线盾构掘进完成后,地表最大沉降4.2 mm。

(2)下穿桥桩区段选取的监测断面地面最大沉降实测值为4.3 mm,桥梁桩顶沉降分别为1.6 mm和3.3 mm,均小于规范与施工要求。与有限元计算结果相比,偏差小于0.4 mm。

(3)不论是水平位移和竖向沉降,均是先开工的右线隧道对其影响较大,说明初次的地下施工对地层和建构筑物的扰动较大,施工前应有相应措施和预案保证地层稳定和建构筑物的安全。

(4)经数值计算和实际测量数据比对,说明选取的参数与建立的模型,能够较为准确地反应现场盾构施工的实际情况,是可以为实际情况起一定指导意义,可以为该地区附近其他类似工程所参考的。

参考文献:

- [1] 张海波,刘国楠,高俊合.盾构近距离掘进对桥梁桩基的影响分析[J].铁道建筑,2007(8):37-40.
- [2] 薛晖,付兵先.地铁盾构区间下穿广深高速公路立交桥施工技术[J].铁道建筑,2013(2):35-37.
- [3] 王体广.盾构区间近距离下穿铁路桥梁影响分析[J].城市轨道交通研究,2016,19(3):104-108.
- [4] 黄新民.盾构隧道下穿既有桥桩工程的保护方案研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(3):557-561,636.
- [5] 张明聚,王妍,贾大鹏,等.盾构下穿高速铁路高架桥沉降变形控制技术[J].施工技术,2015,44(4):68-72.
- [6] 尚艳亮,师文君,杜守继,等.盾构近距离下穿桥梁数值模拟分析与监测[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(2):247-256.