

地铁隧道近距离穿越既有桥梁桩基影响分析及对策研究

张春¹, 孙烨², 刘子健²

[1. 莫特麦克唐纳咨询(北京)有限公司, 北京市 100013; 2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100082]

摘要: 为了对盾构隧道近距离穿越桥桩基础的影响规律进行精细化研究,以北京地铁19号线支线盾构区间隧道近距离侧穿清河火车站专用Z1匝道桥工程为例,采取数值计算的研究方法,对双线盾构隧道穿越桩基桥梁的全过程进行模拟分析,重点分析施工过程中桥梁基础结构的变形规律,研究结果表明:(1)在盾构施工过程中,位于地铁盾构左右区间之内的桥梁桥桩和承台变形影响较大,建议穿越期间对其相应基础沉降、倾斜值采用实时监测方法进行监测;(2)如果桥梁桩基在施工图设计阶段提前采取了必要的专项设计加固措施,则穿越施工风险会相应降低。

关键词: 盾构隧道; 近距离穿越; 桩基桥梁; 变形影响分析

中图分类号: U455.7

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0214-06

Influence Analysis and Countermeasure Study of Subway Tunnel Crossing Existing Bridge Pile Foundation in Short Distance

ZHANG Chun¹, SUN Ye², LIU Zijian²

(1. Mott MacDonald Consulting (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. Beijing Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: In order to conduct a detailed study on the influence law of shield tunneling through bridge pile foundations in short distance, taking the Z1 ramp bridge project for the tunneling through Qinghe Railway Station in the short distance in the branch shield area of Beijing Metro Line 19 as an example, the research method of numerical calculation is used to simulate and analyze the whole process of double-line shield tunneling through the pile foundation bridges, and the focus is on analyzing the deformation law of the bridge foundation structure during the construction process. The study shows that during the shield construction process, the pile and base slab of the bridge located in the left and right sections of the subway shield have great influence on the deformation. It is recommended to use real-time monitoring methods to monitor the corresponding foundation settlement and inclination values during the tunneling period. And if the necessary special design reinforcement measures are taken for the bridge pile foundation in advance during the construction drawing design stage, the risk of this tunneling construction will be correspondingly reduced.

Keywords: shield tunnel; short-distance crossing; pile foundation bridge; deformation impact analysis

0 引言

近年来我国交通路网飞速扩展,许多地铁隧道正在城市中高楼林立、人流密集的区域下方建设,因此地铁隧道在建设过程中与一些重要的建构筑物的距离不可避免地越来越近,故在使用盾构法进行施工的过程中,必须采取措施确保周围建构筑物的安

全性,以防止因过度沉降影响正常使用。

国内外学者针对采用盾构工法近距离穿越建构筑物的问题,以实际工程为载体,运用数值模拟^[1-5]、理论分析^[6-12]、现场实测等方法计算建筑物可能发生的沉降量,并采取相应对策将变形值等指标控制在容许范围内,以保证项目的可靠性和安全性。

尽管针对盾构近距离穿越建构筑物的施工影响分析已有众多研究^[13-24],但是每个项目的实际施工情况存在较大差异,所采取的控制措施与计算方法亦不尽相同。本文以北京地铁19号线支线双线盾构近距穿越既有高架桥项目为实例,对盾构近距离

收稿日期: 2024-11-30

作者简介: 张春(1970—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁、土木工程结构、特种结构的设计及项目管理工作。

通信作者: 孙烨(1995—),女,硕士,工程师,从事工程结构设计工作。电子邮箱: 2532415819@qq.com

穿越现有高架桥工程进行数值模拟,计算结果可为同类工程借鉴参考,同时有针对性地提出相应的安全控制措施。

1 工程概况

北京地铁 19 号线支线盾构区区间从盾构始发井附近引出后,以 350 m 半径曲线向北敷设,依次下穿昌平线南延盾构区间、小营西路围挡、京张高铁车库出入口、老站房博物馆,侧穿京张高铁匝道桥、京张高铁垃圾楼,然后接入暗挖段,平面位置如图 1 所示,再经昌平线南延盾构区间、小营大街、昌平线南延盾构区间覆土 14.290~18.300 m,轨面深 19.400~23.410 m。



图 1 19 号支线盾构侧穿清河火车站专用 Z1 匝道桥位置图

暗挖区间从盾构区间引出后,以半径 450 m 的曲线向北敷设,接入清河站。暗挖区间覆土 13.431~14.435 m,轨面埋深 19.041~20.045 m。

1.1 专项设计方案

(1)桥梁上部结构

Z1 匝道在地铁 19 号线支线范围内上部结构分为三联,其中 Z1-19~Z1-22 跨径布置为 (50.5+75+56) m,采用钢混组合梁,梁高 3 m,单个箱室宽 2.5 m;Z1-22~Z1-24 跨径布置为 (32+46.2) m,采用钢混组合梁,梁高 2.3 m,单个箱室宽 2.5 m;Z1-24~Z1-28 跨径布置为 4×30 m,采用现浇预应力混凝土箱梁,梁高 1.8 m,采用单箱双室断面,梁宽 10.1 m。

(2)桥梁下部结构

Z1 匝道下部结构均以 T 墩盖梁接四桩承台(六桩承台)为主,Z1-22 和 Z1-24 号轴受地铁昌南线和 19 号线支线和桥下辅路影响,采用门架式盖梁跨越地铁区间,Z1-25、Z1-26 中墩采用墩梁固结。现场照片如图 2 所示。



(a)匝道桥侧面



(b)匝道桥下部

图 2 Z1 匝道桥现场照片

由于 Z1 匝道距离地铁 19 号线支线距离较近,在设计阶段根据地铁设计单位提供的 19 号线支线设计资料布设墩位,并对相邻处桩基采用安全措施确保桩基安全。其中 Z1-19~Z1-25 桩基均采用永久钢护筒跟进+桩端后压浆方式,Z1-26~Z1-30 桩基采用桩端后压浆方式。

1.2 工程水文地质条件

Z1 匝道拟建桥梁场地主要为现状道路和空地,地形基本平坦。本工程涉及钻孔勘察期间实测的钻孔孔口处地面标高为 46.48~48.99 m。

按照场地钻探所揭露的地层条件,将勘探深度(最大孔深 60.00 m)范围内的地层分为两大类:人工堆积层与第四纪沉积层,第四纪沉积层主要有砂土、粉土与黏土交互层。

2 数值分析

采用数值计算方法对各施工阶段的变形规律进行分析,并将计算结果与 Z1 匝道桥变形控制值进行比较,从而判断盾构施工过程中的安全可靠。

2.1 穿越工程影响范围

根据北京市地方标准《穿越既有道路设施工程技术要求》(DB11/T 716—2019)中相关要求,清河火车站专用 Z1 匝道桥为高速公路附属匝道桥,重要性等级为 A 级。地铁 19 号线支线盾构区间距离桥梁桩基 1.0 倍盾构隧道直径范围内,接近关系属于接近。综上,本项目穿越工程风险等级为一级。

根据地铁 19 号线支线方案,本次盾构井、盾构和暗挖区间影响范围如图 3 和图 4 所示,其中 Z1-19~Z1-25 处于主要影响区,Z1-26 处于次要影响区。

2.2 模型假定

在建立数值模型的过程中,采用如下假定精简计算:

- (1)本研究采用地层结构模型,假定各地层分界面水平,土体为连续均匀介质;
- (2)假定地层是采取修正摩尔库伦本构关系建立的弹塑性体;
- (3)盾构管片和竖井壁都采用板单元,土、桥桩和承台都采用实体单元。

2.3 计算模型

根据专项设计方案,重点计算盾构隧道施工对于桥梁的影响。采用 MIDAS GTS/NX 整体建模,采用三维“地层-结构”模型,根据实际施工过程模拟进行简化计算。

数值分析采用有限元软件 MIDAS GTS/NX,其中盾构隧道管片外径 15.4 m,内径 14.1 m,厚度 0.65 m,等效管片环宽 2 m,材质为 C60 混凝土,管片采用板式单元模拟;土体、横撑和结构板采用实体单元模拟;抗拔桩和格构柱采用一维梁单元模拟。

板单元等效为各向同性的弹性材料,由于盾构管片接缝的存在,盾构管片刚度需作折减处理,此模拟折减系数为 0.85;土体使用修正-摩尔库伦结构模型。

模型以右下角为原点,向右横向为 X 轴方向,向里纵向为 Y 轴正方向,向左纵向为 Z 轴正方向,整个模型在 X - Y - Z 方向的尺寸分别为 350 m(长)、250 m(宽)、90 m(高),模型共划分了 609 566 个网格单元和 103 548 个节点。模型三维视图、网格透视及侧视图如图 3 至图 5 所示,隧道与桥梁的相对位置关系如图 6 所示。

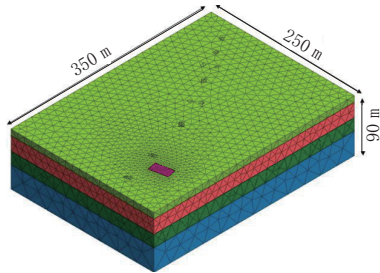


图3 模型三维视图

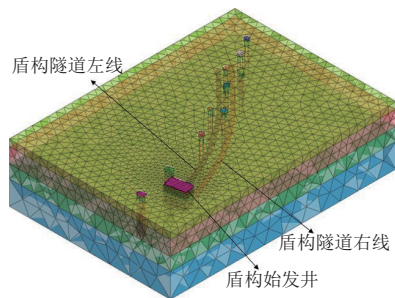


图4 模型三维透视图



图5 模型侧视图

2.4 参数设置

(1)地层参数

计算模型中所涉及的土层,由上至下依次为:杂填土及粉土、细中砂、粉质黏土、卵石圆砾。依据勘察报告,土层的相关参数如表 1 所列。

(2)边界条件

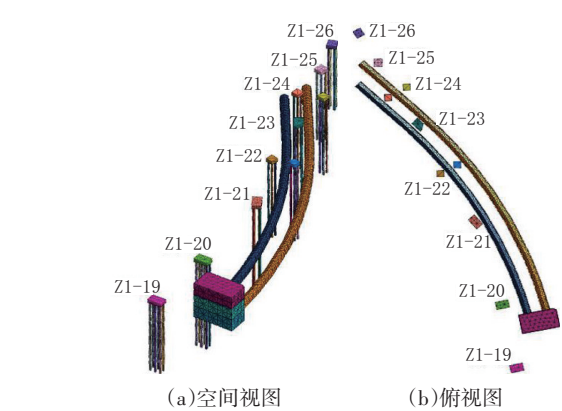


图6 相对位置的隧道与桥梁关系图

表1 土体物理力学指标

土层	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩模量/ MPa	内聚力/ kPa	摩擦角/ ($^{\circ}$)
杂填土及粉土	19	8.2	20	26.6
细中砂	20	35	0	32
粉质黏土	20	23.2	34	29.7
卵石圆砾	20	100	0	36

该模式主要包括两类边界条件:荷载边界和位移边界。荷载边界条件包括自重和来自桥梁上部结构的外在荷载;位移边界条件包括在模型的周围和底部设置位移边界,从而使模型的周围水平位移和底部垂直位移都受到限制。

3 计算结果分析

3.1 数值结果

本次数值分析分为包括初始应力状态分析、盾构井开挖及支护、盾构隧道开挖及支护等主要施工阶段。

(1)盾构井开挖支护完成后

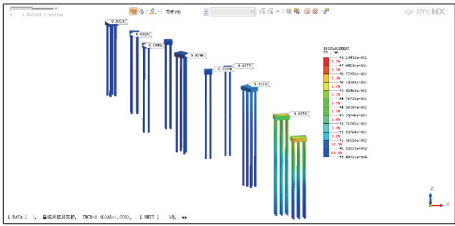
由于 Z1-19 及 Z1-20 距离盾构井相对较近,最大竖向位移为 0.4 mm,最大水平向位移为 1.4 mm,均发生在 Z1-20 桥桩上。其他离盾构井较远处的桥桩位移几乎为零。盾构井开挖支护完成后,桥桩和承台的水平位置和垂直位置的移云图如图 7 所示。

(2)单线盾构隧道开挖及支护完成后

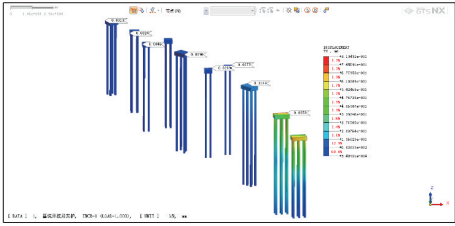
桥桩基础与承台沉降云图如图 8 所示,可以看到盾构下穿过程中桥梁桩基承台会发生不同方向的位移,其中水平向最大位移为 0.7 mm;最大竖向位移发生在编号为 Z1-24 靠近左线的承台上,其沉降值为 0.6 mm。

(3)双线盾构隧道开挖及支护完成后

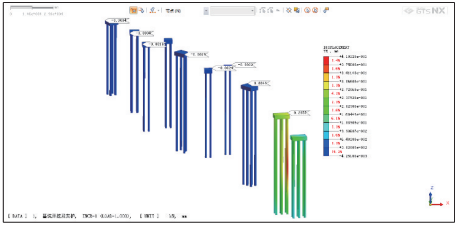
桥桩基础与承台沉降云图如图 9 所示,可以看到盾构下穿过程中桥梁桩基承台会发生不同方向的位



(a)X向位移云图

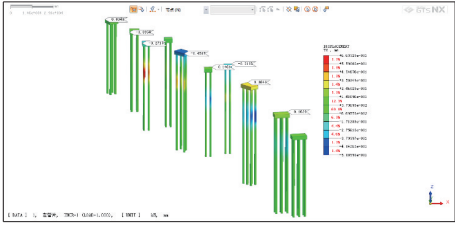


(b)Y向位移云图

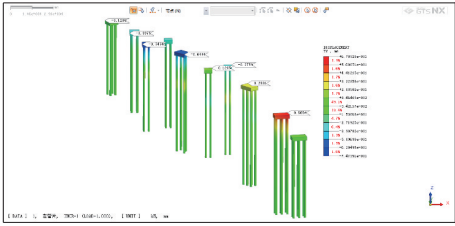


(c)Z向位移云图

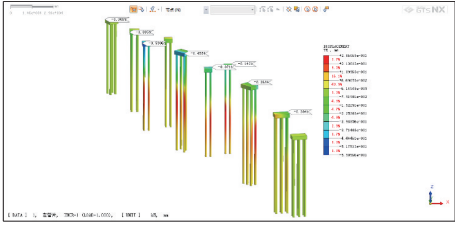
图7 桥桩和承台完成构井开挖支护后沉降云图



(a)X向位移云图



(b)Y向位移云图

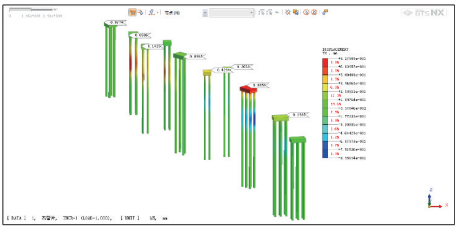


(c)Z向位移云图

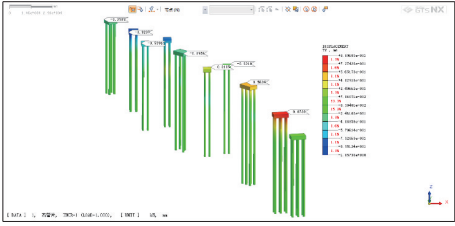
图8 大桥桩及承台沉降云图完成后单线盾构隧道开挖支护

移,其中水平向最大位移为 1.05 mm;最大竖向位移发生在编号为 Z1-22 靠近右线隧道的承台上,其沉

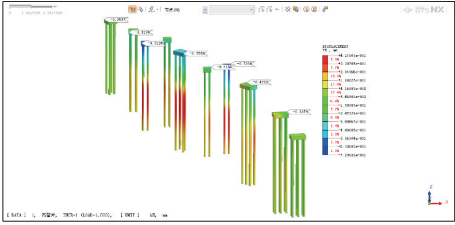
降值为 0.73 mm。



(a)X向位移云图



(b)Y向位移云图



(c)Z向位移云图

图9 桥桩和承台在完成双线盾构隧道开挖支护后

综上可得,在 19 号支线盾构隧道侧穿 Z1 匝道桥过程中,Z1-19、Z1-20、Z1-21、Z1-25、Z1-26 轴(位于盾构区间单侧)的桥桩及承台最大沉降为 0.42 mm,小于容许值 10 mm。Z1-22、Z1-23、Z1-24 轴(位于盾构左右区间之间)在地铁第一次侧穿时,最大沉降值为 0.59 mm,小于容许值 5 mm,第二次侧穿时,最大沉降值为 0.73 mm,小于容许值 10 mm。

3.2 控制值指标

匝道桥 Z1-19~Z1-22、Z1-22~Z1-24、Z1-24~Z1-28 各联桥应满足的桥梁控制技术指标。

(1) Z1-19、Z1-20、Z1-21、Z1-25、Z1-26 轴(位于盾构区间单侧)控制技术指标:桥体沉降容许值一般都是 10 mm;桥梁纵向各墩不均匀沉降容许值为 5 mm;墩柱倾斜控制值为 1/1 000。

(2) Z1-22、Z1-23、Z1-24 轴(位于盾构左右区间之间)控制技术指标:地铁第一次侧穿时,桥梁整体均匀沉降容许值为 5 mm,第二次侧穿时,桥梁整体均匀沉降容许值为 10 mm;地铁第一次侧穿时,桥梁纵向各墩不均匀沉降容许值为 2.5 mm,第二次侧穿时,桥梁纵向各墩不均匀沉降容许值为 5 mm;地铁第一次侧穿时,Z1-22#、Z1-24# 门架盖梁横向各墩不

均匀沉降允许值为 1.5 mm,第二次侧穿时,Z1-22#、Z1-24#门架盖梁横向各墩不均匀沉降允许值为 3 mm,地铁第一次侧穿时,墩柱倾斜控制值 1/2 000,第二次侧穿时,墩柱倾斜控制值为 1/1 000。

4 结 语

4.1 施工监测要点

(1)Z1-22、Z1-23、Z1-24 轴桥梁基础均位于地铁盾构左右区间之内,施工风险较大,须在穿越期间对 Z1-19~Z1-22 和 Z1-22~Z1-24 两联桥相应基础沉降、倾斜值采用实时监测方法进行监测。

(2)设置沉降监测点应能保证实现沉降监控的要求。

a. 监测沉降值。在墩柱上、承台上设立监测点,随时观测主桥竖向位移值及不均匀竖向位移值。

b. 监控墩柱倾斜值。在承台顶部或墩柱两侧布设监测点,通过两侧点位沉降差观测角度值。

c. 上、下部结构及附属结构(支座、抗震设施、伸缩缝装置及桥面系等)外观监测。

(3)监测值按严重程度由小到大分为表 2 中的三级,相应需采取的施工措施列举如下。

表 2 监测预警值

管理等级	控制指标 (U 为实测值,为 U_0 控制值)	管理措施
Ⅲ	$U < 0.6U_0$	正常施工
Ⅱ	$0.8U_0 > U \geq \text{预警值}(0.6U_0)$	发出预警并及时报告、继续加强监测
Ⅰ	$U \geq \text{警戒值}(0.8U_0)$	发出警报、立即通知施工单位停止施工、并及时报送运营单位建设单位,并加强监控。

4.2 工程控制措施及建议

根据现有地铁区间设计方案,进行了 19 号线支线盾构区间侧穿清河火车站专用 Z1 匝道桥项目的安全性影响评价,得到以下结论与建议。

(1)清河火车站专用 Z1 匝道桥为高速公路附属匝道桥,重要性等级为 A 级。地铁 19 号线支线盾构区间距离桥梁桩基 1.0 倍盾构隧道直径范围内,接近关系属于接近。该项目穿越工程风险等级为一级。

(2)清河火车站 Z1 匝道桥在设计过程中,根据前期地铁设计单位提供资料,已考虑地铁区间相关影响。在临近地铁区间范围内,对桥梁下部结构采取了加强基础刚度、增加桩长提高桩基承载力等措施,同时在 Z1-17~Z1-25 轴采用设置永久桩基钢护筒的保护方案。本次计算分析对匝道桥影响范围内

地铁专项设计方案进行复核,地铁实施线位与原配合方案基本一致。

(3)Z1-22、Z1-23、Z1-24 轴桥梁基础位于地铁盾构左右区间之间,地铁盾构双侧穿越桥梁基础。其中 Z1-23 轴距离盾构右区间最小净距 1.25 m,且该轴桥梁下部结构为 T 墩盖梁,Z1-23 轴仅设置一个 4 桩承台基础,穿越施工风险较大。为确保桥梁桩基安全,应严格控制地铁施工精度,并采取加强措施,防止局部塌陷等事故的发生。

(4)Z1-20、Z1-21、Z1-25、Z1-26 轴桥梁基础均位于地铁盾构区间单侧,与桥梁桩基距离较近,距离桥梁桩基净距最小 1.35 m,存在一定的穿越施工风险,在施工过程中需对地铁施工精度进行严格控制,以确保桥梁桩基的安全。

(5)Z1-19、Z1-20 轴桥梁基础位于地铁新建盾构井基坑影响范围内,地铁盾构区间穿越过程中仍需按照本次计算评估提出的监控要求进行监控,确保桥梁结构安全。

(6)Z1-22、Z1-23、Z1-24 轴桥梁基础均位于地铁盾构左右区间之内,施工风险较大,建议穿越期间对 Z1-19~Z1-22 和 Z1-22~Z1-24 两联桥相应基础沉降、倾斜值采用实时监测方法进行监测。

(7)施工过程中应有满足要求切实有效的施工组织设计方案,并制定紧急情况处理预案。须建立第三方监控系统,由具备资质的第三方监控单位实施监测。

参考文献:

- [1] 梁玉.北京某大直径盾构下穿既有地铁桥梁影响研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [2] 张文正.北京地铁 14 号线大直径盾构隧道下穿机场线桥桩结构变形及其控制研究[D].北京:京交通大学,2012.
- [3] 张博阳.盾构施工对既有桥梁桩基影响及控制措施研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2019.
- [4] 沈建文,刘力.盾构隧道施工对临近桥桩影响数值及现场监测研究[J].岩土力学,2015,36(增刊2):709-714.
- [5] 潘苗,江玉生.大直径泥水盾构近距离穿越桥桩影响分析[J].市政技术,2015,33(6):64-67.
- [6] 郭玉海,李兴高.大直径盾构下穿北京机场快轨高架桥梁的安全控制技术[J].北京交通大学报,2014,38(1):13-19.
- [7] 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.
- [8] 王占生,王全华,袁大军.盾构连续切削穿越大直径桥桩施工安全技术[J].都市快轨交通,2013,26(3):97-101.
- [9] 艾国平,陈刚,刘维正,等.地铁盾构隧道穿越既有桥桩及排水渠的施工影响与对策[J].现代交通技术,2021,18(2):68-74.

[10] 林湘,陈相宇,韦锦呈.盾构近接施工对桥桩沉降影响分析及保护措施[J].岩土工程技术,2024,38(4):391-397.

[11] 解学磊.盾构隧道近距离穿越既有桩基的扰动影响及变形控制研究[D].济南:山东建筑大学,2024.

[12] 毕迎千.盾构隧道侧下穿桥梁桩基的影响与安全控制措施研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2024.

[13] 王治宇,杨松松,禹鹏飞,等.盾构隧道近接侧穿引起桥梁桩体的变形规律[J].城市轨道交通研究,2023,26(9):21-26,32.

[14] 梅健,杜展展.盾构侧穿对桥桩承载力影响的模拟研究[J].建筑技术开发,2022,49(17):132-135.

[15] 徐硕,朱永全,徐强,等.近距侧穿高铁桥桩盾构施工影响规律及加固措施[J].科学技术与工程,2021,21(31):13545-13551.

[16] 徐前卫,崔越榜,王尉行,等.盾构侧穿桥梁基础的施工影响分析及其控制研究[J].城市轨道交通研究,2021,24(5):26-30,36.

[17] 董宇.盾构近距离穿越桩基础的影响分析及施工技术措施研究[J].黑龙江交通科技,2021,44(3):130-132.

[18] 吴飞翔.盾构隧道超近距侧穿桥梁桩基的影响分析及应对措施[D].武汉:武汉理工大学,2021.

[19] 张邦通,王步翔,曹亚鹏.盾构隧道反复近接侧穿诱发高架桥桩及地层的变形分析[J].大连交通大学学报,2019,40(4):98-103.

[20] 王永军,温法庆,甘晓丽,等.盾构近距离侧穿桥桩的方案优化与沉降控制技术[J].施工技术,2019,48(增刊1):775-778.

[21] 张博阳.盾构施工对既有桥梁桩基影响及控制措施研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2019.

[22] 杨博.地铁盾构隧道近接施工对既有桥梁桩基力学行为的影响分析[D].重庆:重庆交通大学,2018.

[23] 祝勇.盾构近距离侧穿桥桩数值模拟与施工控制技术研究[J].铁道建筑技术,2018(4):33-36,52.

[24] 陈江,陈思明,傅金阳,等.盾构侧穿邻近桥桩施工影响及加固措施研究[J].公路交通科技,2016,33(7):97-102.

(上接第 204 页)

程等数据,完成了桁架制造和预拼装。通过对临时支架沉降的及时控制,有效解决了钢桁架吊装过程中的沉降问题,确保了整桥安装线形。

该工艺适用于西洪大桥的桥梁特点和施工环境特点,确保了桥下河道通航要求,施工工艺安全可靠,在安全、质量、经济等方面都取得了良好效益,可为今后类似钢桁架桥主梁施工方案比选提供参考依据。

参考文献:

[1] 龚迎春.大跨度钢桁架桥分段分节拼装与整体顶推技术研究[J].中国市政工程,2020(6):97-101.

[2] 周广庆.试论大跨度钢桁架桥整体顶推施工方法的应用[J].科技创新导报,2013(6):27-31.

[3] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.西洪大桥及接线工程(环镇北路—北环快速路)施工Ⅱ标段施工图设计图集[R].上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2016.

[4] 宏润建设集团股份有限公司.西洪大桥及接线工程(环镇北路—北环快速路)施工Ⅱ标段主桥主塔竖转安装施工专项方案[R].上海:宏润建设集团股份有限公司,2020.