

富水含砂软土地层施工对邻近桥梁影响分析

汪小南^{1,2}, 李立岩³, 裴启涛²

(1.武汉市城市建设投资开发集团有限公司,湖北 武汉 430000; 2.武汉市政工程设计研究院有限责任公司,湖北 武汉 430023;
3.武汉市市政建设集团有限公司,湖北 武汉 430023)

摘 要: 针对深厚软土地层、高承压水等不利条件下的基坑开挖及顶管施工对邻近桥梁结构影响问题,以邻近武汉常青路高架桥梁某电力通道工程施工为背景,构建了三维数值分析模型,系统分析了基坑开挖及顶管施工对高架桥梁结构位移及受力的影响。研究表明:基坑开挖及顶管施工引起的桥梁结构最大水平向、竖向位移分别为1.31 mm、1.13 mm,桥梁结构最大轴力、桥桩弯矩分别为6 694.4 kN、263.3 kN·m,施工前后轴力累计变化率为-1.79%,弯矩累计变化率为1.35%,桥梁结构受力变化较小,均在规范限值以内,表明本工程设计方案是可行的、合理的。设计方案和研究成果可为邻近桥梁结构安全施工提供支撑。

关键词: 富水含砂; 基坑开挖; 顶管施工; 桥梁; 数值分析

中图分类号: TU992.24; U449.52

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)05-0263-04

0 引 言

高架桥作为城市建设中一种常见的交通运输设施,因具有结构独特、跨度大、承受车辆动荷载能力强、变形控制严格等优点,在解决交通拥堵方面发挥了巨大作用^[1-2]。然而,由于城市建设的需要,不可避免地会在高架桥梁周边进行地下工程建设。工程实践表明^[3-4],对邻近现状桥梁开挖施工,会产生土体卸荷效应,继而引起周边土体和桥梁基础发生变形。土体和桥梁结构的变形协调作用,使得桩身产生一定的附加弯矩和位移。当其强度和变形超过承载极限时,极易发生桥梁失稳或破坏。可见,依托实际工程,探讨工程施工对邻近桥梁结构的影响具有较高的工程应用价值。

迄今,众多学者从影响桥梁稳定的主控因素、桥梁结构变形与受力特征、施工工法及应对措施等方面进行了大量的研究。比较有代表性的如:万鹏^[5]、王翠等^[6]研究了基坑开挖深度、围护结构刚度、基坑与近接桥梁的位移对桥桩变形影响特征。杜志涛和李少友^[7]考虑了土体、桥台和支护结构之间的相互作用关系,研究了地连墙的成槽宽度对既有桥梁基础的影响规律,并给出了针对性的风险防控措施。王恒等^[8]以某水闸基坑工程开挖为例,深入研究了基坑开

挖对近接桥梁桩基的影响,并提出了相应的加固方案。何晟亚等^[9]基于下穿某特大桥梁的地铁深基坑工程施工案例,研究了基坑不同的降水井布置形式、内支撑设置方式对既有桥墩基础的影响规律,并给出了针对性的桥墩保护措施。此外,还有一些学者^[10-11]从顶管施工工艺出发,系统探讨了顶管顶进对既有桥梁附近土体变形及桥桩受力的影响,取得了丰硕的成果。

本工程地质条件较差,淤泥质软土较厚,承压水头较高,明挖基坑最大深度约18.9 m,明挖基坑、顶管与现状高架桥梁最小水平距离分别为6.9 m、3.3 m,工程施工对桥梁结构影响及安全危害极大。鉴于此,本文采用MIDAS GTS NX大型商业软件构建了三维有限元仿真分析模型,并利用修正的Mohr-Coulomb本构模型,系统分析了基坑及顶管施工对桥梁结构位移及受力的影响,并根据研究结果提出了施工安全的针对性控制措施。

1 工程概况

1.1 工程简介

武汉市常青路高架桥位于江汉区,全长约2.75 km,道路为双向6车道,设计时速为60 km/h。高架桥上部采用变截面的预应力混凝土连续箱梁结构,下部采用柱式墩结构,桥梁基础采用承台与灌注桩基础衔接。桥面分为两幅,桥面总宽52 m,桥跨为27~56 m,两幅桥面共设置2个承台,承台下设2根 $\phi 1800$ mm

收稿日期: 2023-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51609018)

作者简介: 汪小南(1975—),男,硕士,高级工程师,主要从事项目施工管理工作。

钻孔灌注桩(端承桩),桩尖嵌入中等胶结砂岩(5-2a)层深度不小于4倍桩径。常青路东侧现状高架周边环境影像图见图1。



图1 常青路东侧现状高架周边环境影像

拟建武汉市常青一路电力通道工程位于江汉区,西起常青路,东至姑嫂树路,总长2.18 km,采用 $d2700\sim d3500$ 圆形断面,通道最大覆土13.5 m、埋深6~19 m。场地整体地势较平缓,勘察期间勘探孔口处地面标高约在19.81~22.80 m之间变化。场地周边环境较复杂,沿线存在现状道路、房屋、既有桥梁等。常青一路电力通道与常青路高架之间相对位置关系见图2。

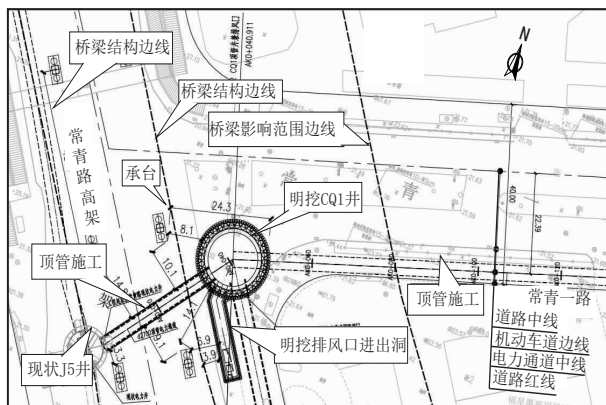


图2 常青一路电力通道与常青路高架之间的平面位置关系(单位:m)

拟建电力通道邻近现状常青路高架桥梁,采用明挖段和顶管方法施工。明挖段基坑深度4.9~18.9 m,与高架桥承台最近距离约6.9 m,顶管段施工深度约15~17 m,与高架桥承台最近距离约3.3 m。具体设计方案如下:

(1)明挖段CQ1顶管井基坑深度约18.9 m,采用 $\phi 1200@1400$ 灌注桩+4道内支撑进行支护,桩长30 m,支护桩外设置22 m长的连续双重管高压旋喷桩止水帷幕与桩间止水帷幕,基坑底部设置 $\phi 800\text{ mm}@550\text{ mm}$ 的双重管高压旋喷桩坑底加固,加固厚度约3.0 m,满堂布置。CQ1顶管井基坑围护

结构剖面见图3。

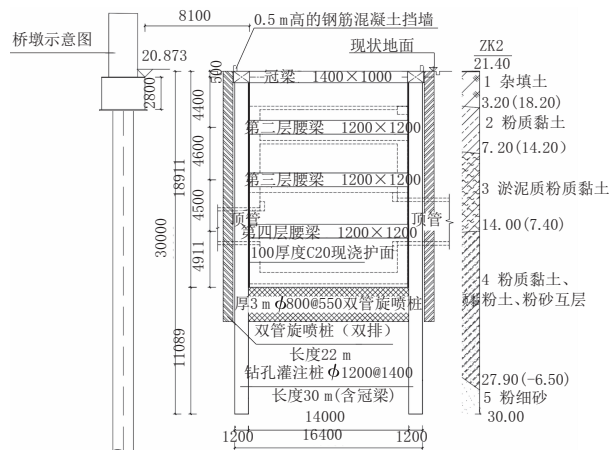


图3 CQ1顶管井基坑围护结构剖面(尺寸单位:mm)

(2)明挖段CQ1排风口进出洞段基坑深度约4.9~6.5 m,采用 $\phi 600@800$ 灌注桩+2道内支撑进行支护,桩长15 m,围护桩桩间及外侧设置双重管高压旋喷桩止水帷幕,桩底进入基坑底下1 m。CQ1排风口进出洞基坑围护结构剖面见图4。

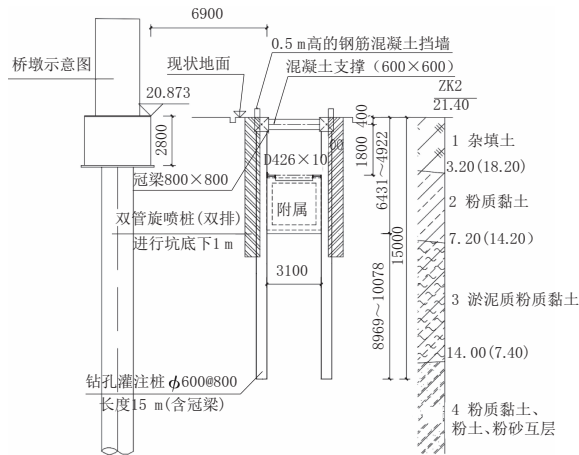


图4 CQ1排风口基坑围护结构剖面(尺寸单位:mm)

(3)电力通道顶管施工深度约15~17 m,其中,AK0+000~AK0+040段顶管内径2.7 m,AK0+040~AK0+340段顶管内径为3.5 m。

(4)场地含水层埋深较浅、开挖较深,为防止基坑突涌,承压水控制采用管井降水,以降低承压水层的水位。管井开孔直径600 mm,井深约35 m。基坑布置降水井应将承压水标高降至基坑底部以下不少于1 m的位置。基坑土方开挖前,应及时实施降水井,先施工代表性的单井,并进行抽水试验,进一步复核工程场地的水文地质参数,确保抽排有效。CQ1顶管井降水井平面布置见图5。

1.2 工程地质及水文地质条件

根据勘察资料,地貌单元属长江冲积一级阶地、长江冲积二级阶地。场地内岩土层特征由上而下依

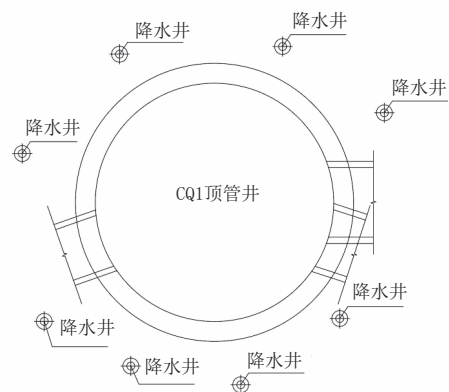


图 5 CQ1 顶管井降水井布置

次为:(1)杂填土(Q_4^{ml}), (2)粉质黏土(Q_4^{al+pl}), (3)淤泥质粉质黏土(Q_4^{al+pl}), (4)粉质黏土、粉土、粉砂互层(Q_4^{al+pl}), (5)粉细砂(Q_4^{al+pl})及(6)粉质黏土(Q_3^{al+pl})。

地下水类型分布包括上层滞水和孔隙承压水。上层滞水主要位于上部的人工填土中,水位埋深为 0.50~1.90 m。孔隙承压水主要位于下部(4)粉质黏土、粉土、粉砂互层和(5)粉细砂层中,水量较丰富;承压水水头标高约 20 m,年度变幅 1~3 m。

2 三维模型建立

2.1 模型的构建及计算参数

本模型计算范围为长约 150 m,宽约 130 m,土层计算深度为 70 m。土体采用理想弹塑性材料、修正 Mohr-Coulomb 本构模型、实体单元模拟。模型中包含常青高架桥和 CQ1 顶管井及顶管结构、基坑围护结构和内支撑结构。对冠梁和内支撑采用梁单元进行模拟,对顶管井结构、排风口附属结构、顶管管片结构采用板单元模拟,对高架桥桩基采用梁单元模拟,灌注桩基于刚度等效原理将其换算成一定厚度的板单元,本构模型均为弹性本构。模型中,共划分六面体单元 29 441 个,节点 56 719 个。有限元数值分析模型见图 6,明挖段、顶管与高架桥桩结构空间位置关系见图 7,岩土物理力学参数见表 1,结构力学参数见表 2。

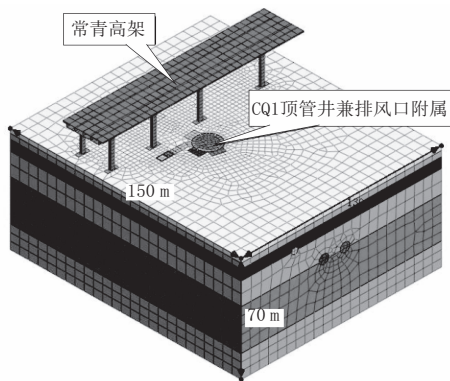


图 6 有限元数值分析模型

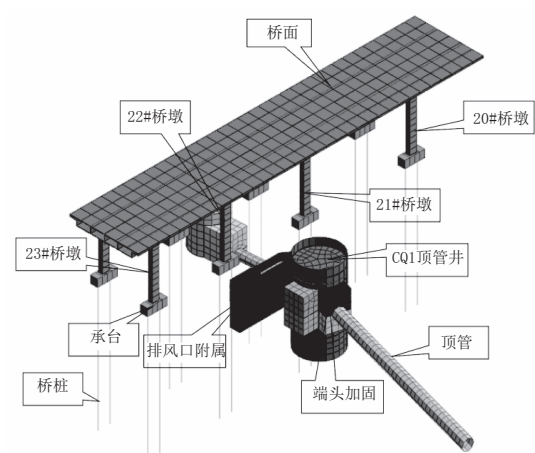


图 7 明挖段、顶管与高架桥桩结构相对位置

表 1 地层物理力学参数取值^[12]

岩土名称	容重 / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 / /kPa	内摩擦 角 / ($^{\circ}$)	压缩模 量 /MPa	渗透系数 / ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
(1)杂填土	17.5	10	8	3	5.0×10^{-3}
(2)粉质黏土	18.8	12	11	6	2.0×10^{-6}
(3)淤泥质粉质黏土	17.5	12	6	3.5	5.0×10^{-6}
(4)粉质黏土、 夹粉土、粉砂	18.5	13	15	7	1.0×10^{-4}
(5)粉细砂	19	0	33	15.5	2.2×10^{-2}
(6)弱胶结砂岩	23.5	35	24	43	2.0×10^{-6}

表 2 结构力学参数

结构名称	类型	截面尺寸或 厚度 /m	容重 / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	E / GPa	泊松 比
CQ1 灌注桩	板	0.94	25	30	0.2
CQ1 底板 / 侧墙 / 灌注桩	板	1.2/0.9/0.8	25	32.5	0.2
排风口灌注桩	板	0.46	25	30	0.2
排风口结构	板	0.3	25	32.5	0.2
顶管管片	板	0.32/0.27	25	34.5	0.2
CQ1 冠梁 / 腰梁	梁	1.4×1/1.2×1.2	25	30	0.2
排风口冠梁 / 混凝土支撑	梁	0.8×0.8/0.6×0.6	25	30	0.2
排风口腰梁	梁	2 工 45c	78.5	206	0.3
排风口钢支撑	梁	φ 426×10	78.5	206	0.3
桥桩	梁	1800	25	30	0.2

基于抗弯刚度等效原则,将钻孔灌注桩围护结构等效为地下连续墙厚度,如下:

$$\frac{1}{12}(D+t)h^3=\frac{1}{64}\pi D^4 \tag{1}$$

$$h=0.838D\sqrt[3]{1-\frac{t}{D+t}} \tag{2}$$

式中: D 为围护桩直径; t 为灌注桩间净距; h 为等效地连墙厚度。不同灌注桩参数的等效厚度见表 2。

在计算中,考虑了土层自重作用,桥墩采用实体模拟。此外,还考虑了承压水的影响,承压水头按最不利工况取,即水头标高 22 m。

2.2 计算分析工况

本次分析主要是分析明挖基坑及顶管施工对运营高架桥结构的影响以及明挖围护结构和管片的变形特征,根据周边环境和基坑施工步序,共划分 19 个施工工况,详见表 3。

表 3 基坑施工工况

序号	工况	描述
1	初始渗流状态	激活所有地层
2	初始应力状态	未开挖状态下地层应力状态
3	常青高架桥梁、J5 顶管井施工	激活结构单元,钝化土体
4	位移清零	
5	CQ1 顶管井围护结构施工	激活围护结构单元
6	端头及 CQ1 基底加固施工	激活端头加固及基底加固
7	第一次降水	模拟降水渗流及地层变形
8	CQ1 顶管井第一次开挖施工	激活相应支撑,钝化土体
9	第二次降水	模拟降水渗流及地层变形
10	CQ1 顶管井第二次开挖	激活相应支撑,钝化土体
11	第三次降水	模拟降水渗流及地层变形
12	CQ1 顶管井第三次开挖	激活支撑,钝化土体
13	第四次降水	模拟降水渗流及地层变形
14	CQ1 顶管井开挖至基底	激活支撑,钝化土体
15	CQ1 顶管井底板及侧墙施工	激活顶管井底板及侧墙结构
16	顶管施工	钝化顶管土体,施工顶管结构
17	CQ1 中板、顶板及基坑回填	激活顶管井中板、顶板及土体
18	排风口围护结构及基坑开挖	激活排风口支护、钝化土体
19	排风口结构施工,基坑回填	激活排风口结构和上部土体

2.3 控制标准

根据城市相关桥梁设计规范及邻近高架桥新建工程环境监测规范,同时结合武汉市既有工程邻近高架桥施工变形控制标准和保护要求,考虑到前期已发生部分变形,同时为后期变形保留一定变形富余,常青路高架桥梁的竖向和水平向位移值均按 5 mm 控制。

3 计算结果分析

3.1 桥梁结构位移计算分析

图 8 给出了不同施工工况下的桥梁结构最大位移计算结果,图 9 给出了排风口结构施工及基坑回填工况下的桥梁结构变形云图。由图可知,随着基坑开挖、支撑施加及顶管的逐步实施,基坑土体出现应力释放现象,导致变形方向指向基坑内侧,桥梁结构

靠近基坑及顶管侧的土体变形总体变大,但局部出现一定的波动现象。主要变形特征如下:

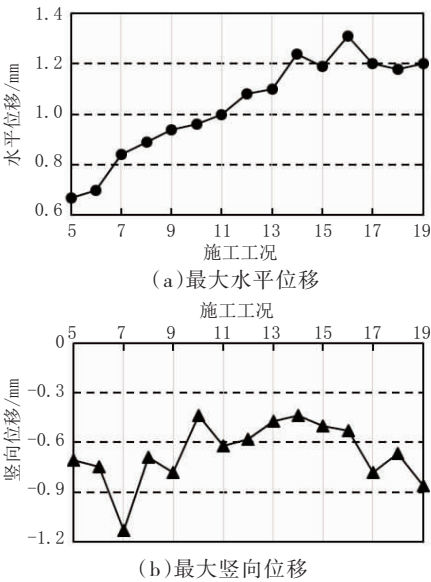


图 8 不同施工工序下桥梁结构变形特征

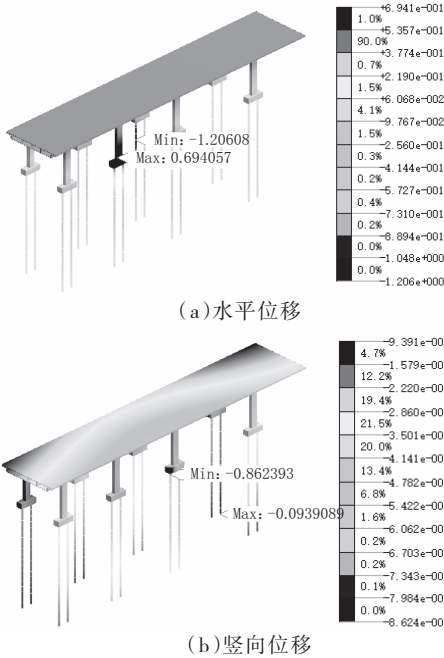


图 9 排风口施工及回填工况下的桥梁结构变形(单位:mm)

(1)桥梁结构水平位移。当 CQ1 顶管井围护结构实施(工况 5)至 CQ1 顶管井开挖至基底(工况 14)时,水平位移均逐渐增大至 1.24 mm。继续施工 CQ1 顶管井结构底板及侧墙(工况 15),水平位移减小至 1.19 mm。这主要是由于电力通道结构侧壁施工及底板支撑作用,导致桥梁结构变形收敛。当施工电力通道顶管(工况 16)时,桥梁结构水平变形增至 1.31 mm。然而,在施工 CQ1 其余结构、排风口结构及基坑回填(工况 17~ 工况 19)时,最大水平位移逐渐减小至 1.20 mm。这主要是由于电力通道结构回填压实作用,导致桥梁结构的变形进一步收敛。

(2)桥梁结构竖向位移。与水平位移相比,竖向位移相对复杂,主要表现在基坑降水及开挖卸荷回弹作用对其影响较大。当CQ1顶管井围护结构实施(工况5)、端头及CQ1基底加固施工(工况6)时,竖向位移逐渐增大至0.75 mm。当进行第一次基坑降水时(工况7),竖向位移急剧增加至1.13 mm。这主要是由于基坑降水引起地层水位下降,土体有效应力增加,土中孔隙被压缩变小,继而造成竖向变形增大现象。当CQ1顶管井第一次开挖施工(工况8)完成后,竖向位移减小至0.69 mm。这主要是由于土体开挖卸荷,坑底回弹作用明显,导致桥梁结构出现一定的上浮现象。这与文献[9]的结论基本一致。类似地,当CQ1顶管井第二次降水(工况9)、第三次降水(工况11)施工时,竖向位移分别增加至0.78 mm、0.62 mm。当CQ1顶管井第二次降水(工况13)时,坑底水位距离地表较深,降水对桥梁附加竖向位移影响不大。继续开挖CQ1顶管井至基底(工况14)时,竖向位移逐渐减低至0.44 mm。然而,在施工CQ1其余结构、排风口结构及基坑回填(工况15~工况19)时,除了在排风口结构开挖(工况18)导致桥梁结构出现上浮外,桥梁竖向位移以下沉为主,最大变形增至0.86 mm。

综上,本项目明挖基坑及顶管施工对桥梁结构的最大水平位移值约1.31 mm,最大竖向位移为1.13 mm,均小于暂定的5 mm标准,基坑设计方案满足安全要求。

3.2 桥梁结构受力计算分析

图10给出了排风口结构施工及基坑回填工况下的高架桥梁结构轴力及弯矩。随着基坑施工、顶管顶进的实施,基坑降水和施工卸荷作用对土体造成扰动,使得应力重新分布,桥梁结构内力发生改变,总体上呈现“轴力减小、弯矩增加”的特征,但变化数值较小。具体而言:工程施工前,桥梁桩基最大轴力为6 816.3 kN,最大弯矩设计值为259.8 kN·m;施工完成后,桥梁桩基最大轴力降至6 694.4 kN,最大弯矩设计值增至263.3 kN·m;施工前后轴力累计变化率为-1.79%,弯矩累计变化率为1.35%,受力变化较小,均满足结构保护要求。

4 结 语

(1)本工程场地沿线环境复杂,淤泥质软土较厚,基坑深度大(最大深度约18.9 m),承压水水位较高,地质条件较差,地貌单元属长江冲积一级阶地、长江

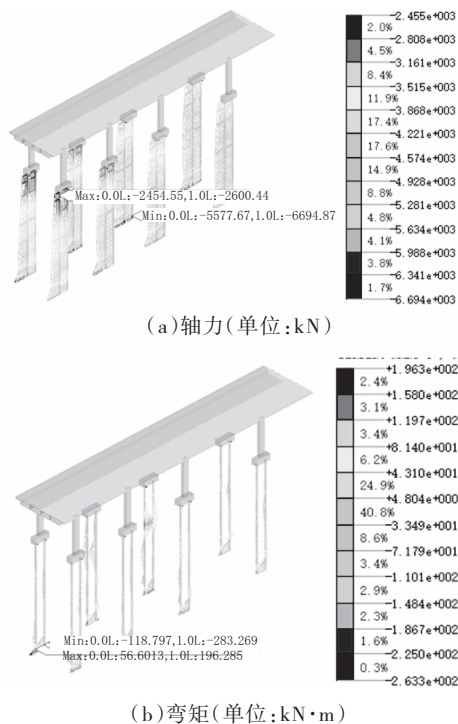


图10 排风口主体结构施工及基坑回填工况下桥梁结构受力
冲积二级阶地。综合采用“围护桩+内支撑+坑底加固+降水”及“顶管顶进”的联合施工方式,有效控制了工程施工对既有桥梁的不利影响。

(2)数值分析表明:明挖基坑及顶管施工引起桥梁结构最大水平、竖向位移分别为1.31 mm、1.13 mm,桥梁结构最大轴力及弯矩分别为6 694.4 kN、263.3 kN·m,施工前后轴力累计变化率为-1.79%,弯矩累计变化率为1.35%,均在规范限值内,即在正常施工条件下,工程实施对常青路高架桥梁正常运营影响有限,设计方案可行。

(3)鉴于本项目距离桥梁较近、场地存在深厚的承压水层,基坑设计综合采用降水+封底止水技术。建议施工前加强降水井成井质量控制,并进行降水试验,抽水含砂量应满足设计要求。同时,对高压旋喷桩进行试桩,确定合理水灰比、施工工艺、钻进速度等各项施工参数,确保封底质量和止水效果。基坑施工期间,应加强对基坑、顶管自身及桥梁结构实时监测。一旦桥梁结构变形速率超过规定值,应及时启动抢险预案,采用动态化设计与信息化施工,确保桥梁结构的稳定与运营安全。

参考文献:

- [1] 濮黎明,肖朝昀,朱浩杰,等.深基坑开挖对基坑内外桥台基础的变形影响分析[J].华侨大学学报(自然科学版),2023,44(5):582-590.
- [2] 虞春龙.围堰明挖基坑对邻近隧道及桥梁的影响分析[J].城市道桥与防洪,2018(9):226-229.
- [3] 王明年,崔光耀,喻波.广州地铁西村站近接高架桥桩基影响分区及

(下转第278页)

尽量做到统一,且便于预制件制作;对结构模块进行了分解,分解后能满足运输、吊装的要求,组装后又能满足结构受力要求;采用湿拼做法,降低了对构件制作的精度要求,增强了模板的通用性。

在建造成本问题上,案例工程利用工厂优异的生产环境,优化改造结构形式,在保证各种隧道功能及质量的前提下,节省材料,降低材料成本;通过结构形式选择、模块划分等,降低了预制件运输、吊装成本;将来通过大规模的应用,还可摊销研发、机械设备费用。

6 结 语

案例工程采用新型装配式隧道施工技术,通过对隧道结构单元的模块化、标准化设计,实现工厂一体化生产,现场高效拼装,是一种绿色、环保、节能、高效的施工方式。案例工程成功实现市政隧道全装配技术,与传统的现浇隧道相比,工期减少45~50%,现场工人减少70~80%,造价也基本与其持

平,能够有效缓解施工期交通拥堵、环境污染问题。这种做法可复制、可推广,通用性强,为装配式市政隧道设计提供一定参考价值。

参考文献:

- [1] 姚怡文,蒋理华,范益群.地下空间结构预制拼装技术综述[J].城市道桥与防洪,2012(9):286-292.
- [2] 傅重龙.城市地下道路明挖预制拼装工艺研究与实践[J].工程建设及设计,2019(12):130-132.
- [3] 刘斌彬,李旭升,胡苏.成都市一环磨子桥隧道工程工业化预制拼装设计[J].城市道桥与防洪,2019(2):212-215.
- [4] 奚成.成都市磨子桥装配式隧道分块拼装技术研究[J].隧道/地下工程,2019(12):81-85.
- [5] 郭太军,刘国强,詹素虹,等.一种钢筋混凝土预制构件拼接结构:CN202221297325.7[P].2022-10-28.
- [6] 杨秀仁.明挖预制装配式隧道结构拼装设计方法及关键技术[J].都市轨道交通,2023,36(2):2-13.
- [7] GB 55030—2022,建筑与市政工程防水通用规范[S].
- [8] 豫建科协评字[2022]第007号,三组份改性高分子密封材料防水技术研究[Z].

~~~~~  
(上接第267页)

- 应用研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1396-1404.
- [4] 矣涛,杨伟,鲍宇文,等.成都市凯德商用天府项目基坑开挖对桥梁桩基的影响研究[J].路基工程,2012(3):84-87,92.
  - [5] 万鹏.宁波软土地区深基坑开挖对既有高架桥桩基的影响研究[D].广州:广州大学,2019.
  - [6] 王翠,闫澍旺,张启斌.深基坑开挖对邻近桥桩的影响机制及控制措施研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1):2994-3000.
  - [7] 杜志涛,李少友.紧邻既有桥梁深基坑支护方案研究[J].市政技术,2020,38(4):254-257.
  - [8] 王恒,陈福全,林海.基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响与加固分析

- [J].地下空间与工程学报,2015,11(5):1257-1265.
- [9] 何晟亚,刘一,李恒一,等.地铁站基坑下穿对既有桥梁变形的影响及其控制措施研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(6):105-111.
  - [10] 刘顺青,王旭畅,王文博,等.顶管施工对既有桥梁影响的三维数值分析[J].科学技术与工程,2022,22(26):11559-11566.
  - [11] 徐涛,王凯.顶管工程施工对邻近轨道交通高架结构的变形影响分析[J].现代隧道技术,2021,58(增刊2):66-72.
  - [12] 湖北省电力勘测设计院有限公司.一流城市电网建设——江汉区电力通道一期岩土工程勘察报告(详细勘察阶段)[R].武汉:湖北省电力勘测设计院有限公司,2022.