

地铁车站基坑下穿对既有桥梁变形的影响 及其控制措施研究

何晟亚¹ 刘一² 李恒一¹ 王志杰³

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 中国港湾工程有限责任公司, 100027, 北京;
3. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 工程师)

摘要 以深圳地铁12号线和平站基坑下穿穗莞深城际轨道某特大桥区段为例,探究不同的基坑降水形式和钢支撑体系布置对桥墩变形的影响,提出桥墩保护控制措施,并通过现场监测进行验证。结果表明:地连墙混凝土弹性模量的增大对桥墩变形的控制效果有限,通过增大混凝土弹性模量来控制桥墩变形是不经济的;基坑降水增大了桥墩的最大竖向位移,但减小了其最大水平位移;钢支撑道数的减少明显增大了桥墩变形,同时减少第2、第4道支撑,30#桥墩的最大水平位移增大56.91%,31#桥墩的最大水平位移增大36.53%;单独采用隔离桩或旋喷桩加固措施不能满足桥墩变形要求。现场监测和数值模拟结果表明,采用隔离桩和旋喷桩的加固措施是有效的。

关键词 地铁; 车站基坑; 桥梁变形; 控制措施

中图分类号 U445.7⁺¹

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.021

Research on Deformation Influence and Control Measures of Metro Station Foundation Pit Under-crossing Existing Bridge

HE Shengya, LIU Yi, LI Hengyi, WANG Zhijie

Abstract Taking Shenzhen Metro Line 12 Heping Station foundation pit under-crossing Guangzhou-Shenzhen Intercity Railway certain mega bridge section as an example, the influence of different foundation pit dewatering forms and steel support system layout on the deformation of bridge piers is explored. Protection and control measures for bridge piers are proposed and are verified with field monitoring data. Results show that; the increase of diaphragm wall concrete elastic modulus has limited control effect on the deformation of bridge pier, and it is uneconomical to control in this way. Foundation pit dewatering increases the vertical maximum displacement of the pier but decreases the horizontal maximum displacement. Reducing the number of steel supports significantly increases bridge pier deformation, while reducing the second and fourth supports increases the maximum horizontal displacement of

bridge pier No. 30 by 56.91% and pier No. 31 by 36.53%. Adopting reinforcement measures of isolated pile or rotary jet grouting pile alone doesn't guarantee the deformation requirements of bridge piers. Field monitoring and numerical simulation results show that the joint reinforcement measure of isolated pile and rotary jet grouting pile proposed by the project is effective.

Key words metro; station foundation pit; bridge pier reinforcement; control measure

First-author's address Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

随着地下空间的开发利用及城市轨道交通的发展,城市密集建筑区域出现了愈来愈多的地铁车站基坑,对周边近接建筑物的安全性产生重大影响^[1-2],而地铁车站基坑近接既有桥梁,在实际工程中较为常见^[3-4]。因此,研究地铁基坑开挖对桥梁的影响,以及桥墩保护控制措施对实际工程的设计和施工具有较大的指导意义。

文献[5]研究了基坑的开挖深度、支护刚度,以及基坑与既有桥梁的距离对桥梁桩基水平位移、竖向位移的影响规律。文献[6]采用岩土工程数值软件建立基坑支护与邻近桥桩的整体模型,研究了开挖深度和支护刚度对既有桥桩变形的影响规律。文献[7]研究了距基坑不同距离处的邻近轻轨高架桥桥桩的沉降位移变化。文献[4]分析了桥墩距基坑不同距离、不同支护结构刚度,以及不同地质条件下基坑开挖过程中邻近桥墩桩基的水平位移变形规律。文献[8-11]提出了相关控制措施以保证近接桥梁的安全性。

综上所述,目前的研究主要集中于基坑开挖深度、基坑与桥梁间的距离对桥梁的影响,对基坑的降水形式、钢支撑的体系布置研究较少。本文主要

通过数值模拟方法研究降水形式和钢支撑体系的布置等因素对桥墩变形的影响,并提出桥墩保护措施。现场监测和数值模拟结果表明本文的研究具有一定的可靠性,对于依托工程及类似工程的设计和施工具有一定的借鉴和指导意义。

1 工程概况

深圳地铁 12 号线(以下简为“12 号线”)是深圳市轨道交通线网近期建设规划中唯一一条自南向北串联深圳市南山中心区、宝安中心区、福永片区、大空港及会展片区的轨道交通骨干线,是支撑深圳市西部发展轴带建设,支撑前海自贸区、空港新城地区城市发展,缓解南山中心区、宝安中心区交通拥堵的普速线路。

12 号线和平站为东西走向,与穗莞深城际轨道(设计速度为 140 km/h)线路相互垂直。车站在穗莞深城际轨道某特大桥 30#—31#桥墩之间明挖下穿通过。和平站近接桥墩的水平位移,需满足 TB 10182—2017《公路与市政工程中穿高速铁路技术规程》中不大于 2 mm 的规定。和平站基坑和桥墩相对平面位置见图 1。

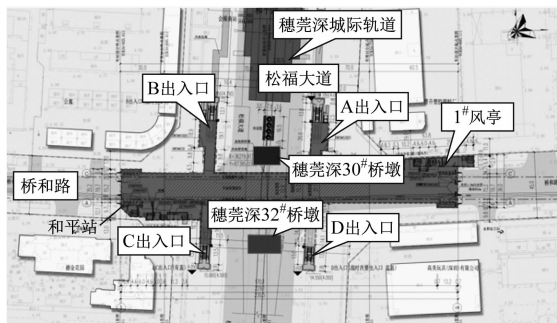


图 1 12 号线和平站基坑下穿某特大桥平面位置示意

Fig. 1 Planar diagram of Line 12 Heping Station foundation pit undercrossing mega bridge

2 和平站基坑下穿穗莞深城际轨道某特大桥数值模拟分析

2.1 计算模型

采用有限元软件 Midas GTS NX 对 12 号线和平站基坑下穿穗莞深城际轨道某特大桥区段进行三维建模(见图 2)。基坑边缘至四周边界的距离取 3.7 倍开挖深度,整个计算模型尺寸为 366 m × 150 m × 120 m。地层采用修正摩尔-库仑本构模型。对该模型四周节点施加法向位移约束,对其底部边界

施加竖向位移约束,对桥梁桩基及基坑立柱的转动自由度进行约束。

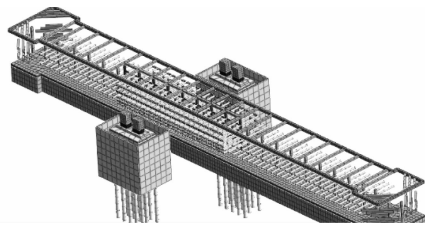


图 2 和平站基坑下穿穗莞深城际轨道某特大桥区段有限元模型

Fig. 2 Finite element model of Heping Station foundation pit undercrossing Guangzhou-Shenzhen Intercity Railway certain mega bridge section

2.2 计算参数

将桥梁上部荷载换算成均布荷载,并将其作用于桥梁桥墩上,即 30#桥墩和 31#桥墩顶部均布荷载强度分别为 138 kPa 和 134 kPa。将隔离桩按刚度等效原则等效为与其受力形式相近且具有一定厚度的地下连续墙^[12],计算如式(1):

$$D_0 = \sqrt[3]{\frac{3\pi D^4}{16L}} \quad (1)$$

式中:

D_0 ——地下连续墙的等效厚度, m;

L ——桩间距, m;

D ——桩径, m。

12 号线和平站基坑地层岩性及相关参数以距离桥梁较近的 MLZ3-SHP-73 勘探孔获取的岩样为准。地层及围护结构参数如表 1~2 所示。

3 和平站基坑开挖对某特大桥变形的影响

3.1 地连墙混凝土弹性模量对桥梁位移的影响

桥梁结构竖向和水平最大位移随地连墙混凝土弹性模量的变化曲线如图 3 所示。由图 3 可见:

1) 30#桥墩的最大竖向位移较 31#桥墩要大。

2) 30#墩台底部水平位移平均值大于 31#承台, 而其最大水平位移小于 31#墩台。

3) 当混凝土弹性模量由 25.5 GPa 增至 37.5 GPa 时, 30#桥墩的竖向位移由 1.044 mm 减小至 1.041 mm, 减幅为 0.29%; 31#桥墩的竖向位移由 0.608 mm 减小至 0.604 mm, 减幅为 0.66%。

4) 30#和 31#承台底部的水平位移平均值分别由 1.719 mm 和 1.662 mm 减小至 1.674 mm 和

表 1 和平站基坑土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of Heping Station foundation pit soil layer							
地层名称	重度/(kN/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦/(°)	渗透系数/(cm/s)	层厚/m
填块石	20.5	120	0.28	5.0	38.0		1.5
淤泥	16.2	10	0.42	12.5	4.5	1.157×10 ⁻⁶	3.0
粉质黏土	19.0	25	0.32	30.0	17.5	2.315×10 ⁻⁶	4.5
砂质黏土	18.5	30	0.30	30.0	24.5	1.157×10 ⁻⁴	14.0
全风化混合花岗岩	18.9	70	0.26	40.0	26.5	2.315×10 ⁻⁴	11.0
强风化混合花岗岩	22.5	300	0.28	150.0	36.0	4.051×10 ⁻³	7.0
中风化混合花岗岩	25.0	1 500	0.26	500.0	40.0	2.894×10 ⁻³	2.5
微风化混合花岗岩	26.5	12 000	0.22	2 000.0	42.5	5.787×10 ⁻⁵	76.5

表 2 12 号线和平站基坑围护结构参数

Tab.2 Parameters of Line 12 Heping Station foundation pit enclosure structure						
围护类型	材料	弹性模量/GPa	重度/(kN/m ³)	泊松比	截面尺寸	本构关系
混凝土支撑	C30 混凝土	30.0	23.0	0.2	800 mm(宽度)×1 000 mm(高度)	弹性
地连墙	C35 混凝土	31.5	23.0	0.2	厚 1 200 mm	弹性
钢支撑	钢材	210.0	78.5	0.3	φ 800 mm、厚 20 mm	弹性

1.628 mm,减幅分别为 3.32% 和 2.75%。

5)30[#]和 31[#]墩台的最大水平位移分别由 1.928 mm 和 1.956 mm 减小至 1.871 mm 和 1.906 mm,减幅分别为 2.96% 和 2.56%。

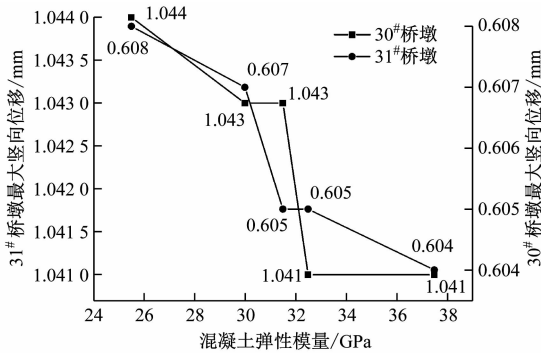
由此表明,随着地连墙混凝土弹性模量的增大,墩台的最大竖向位移、最大水平位移及承台底的水平位移平均值均表现为减小的趋势,即增大混凝土弹性模量有利于控制桥梁结构变形,但控制效果有限。

3.2 基坑降水形式对桥梁位移的影响

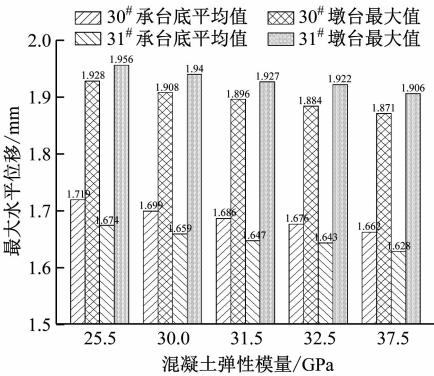
分别研究了分层降水、一次性降水等基坑降水形式下桥梁墩台最大水平位移,其模拟值及拟合曲线如图 4 所示。图 4 中,桥梁墩台最大水平位移随开挖深度的变化采用二次函数表示,拟合相关系数均大于 0.94,拟合效果较好;基坑降水增大了墩台的最大竖向位移,这是由降水引起地层沉降导致;分层降水在基坑开挖过程中的最大竖向位移小于一次性降水,但最终沉降值较一次性降水要大。

采取一次性降水措施后,30[#]桥墩的最大水平位移由分层降水和无降水的 1.896 mm 和 2.017 mm 减少至 1.267 mm,31[#]桥墩的最大水平位移由分层降水和无降水的 1.927 mm 和 1.939 mm 减小至 1.310 mm;当不考虑降水时,30[#]桥墩的水平位移不满足小于 2mm 的要求,而 31[#]桥墩的水平位移亦接近临界值。因此,实际工程中应及时采取降水措施

以保证施工质量。



a) 桥墩的最大竖向位移



b) 承台和墩台的最大水平位移

图 3 桥梁位移随地连墙混凝土弹性模量变化曲线
Fig.3 Curve of bridge displacement changing with diaphragm wall concrete elastic modulus

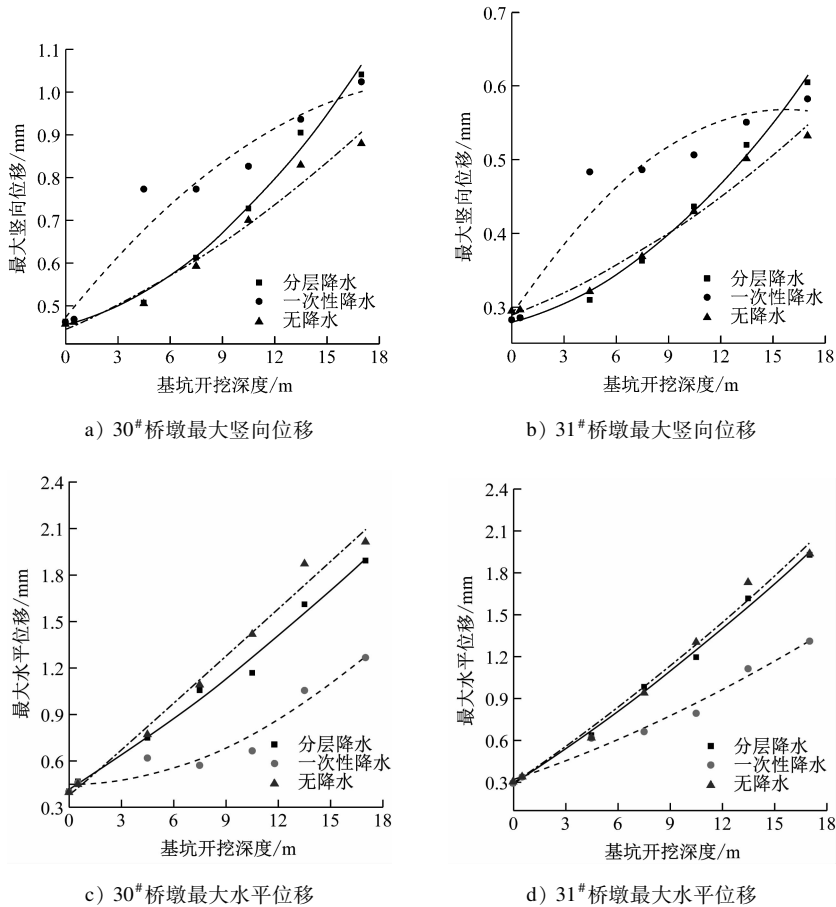


图4 不同降水形式下桥梁位移随基坑开挖深度变化曲线

Fig.4 Curve of bridge displacement changing with foundation pit excavation depth under different dewatering forms

3.3 钢支撑体系布置对桥梁位移的影响

和平站基坑共设置5道支撑。为探究钢支撑体系的布置对桥梁结构的影响,本文依次设置了4种工况进行研究,分别为:①工况1(设置5道支撑,其中第1道为混凝土支撑,其余4道为钢支撑);②工况2(去除第2道支撑);③工况3(去除第4道支

撑);④工况4(同时去除第2、第4道支撑)。各工况下桥墩变形如图5所示。由图5可见:

1) 钢支撑道数的减少,增大了31#桥墩的最大竖向位移,但减小了30#桥墩的最大竖向位移;第4道支撑较第2道支撑更有利于控制基坑竖向变形;工况4对于基坑竖向变形控制效果更加明显。

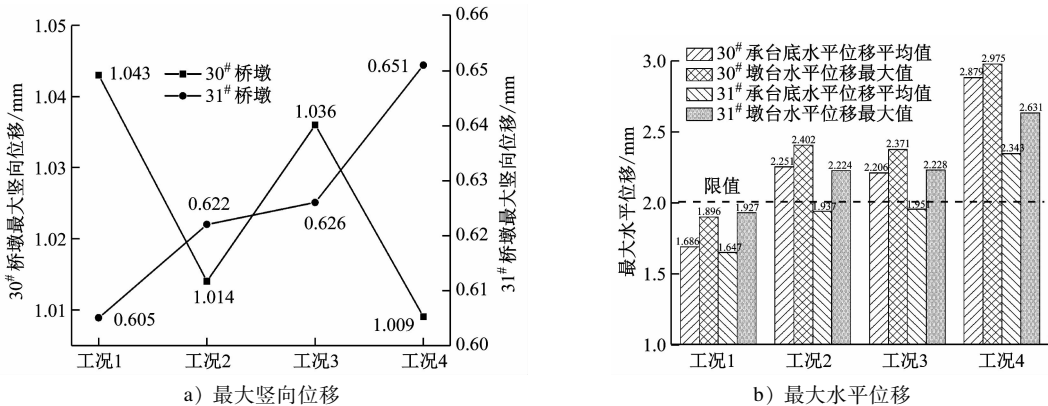


图5 不同钢支撑体系布置下桥梁的最大位移

Fig.5 Maximum bridge displacement under different steel support system arrangements

2)对于水平位移,钢支撑道数的减少使得桥梁结构变形超限。第2、第4道支撑的去除对基坑水平位移的影响相当,同时去除2道支撑加剧了桥墩变形。对于30[#]桥墩,第2、第4道支撑的去除使得墩台最大水平位移由1.896 mm增加至2.975 mm,增幅为56.91%;而对于31[#]桥墩,墩台最大水平位移则由1.927 mm增至2.631 mm,增幅为36.53%。由此表明,钢支撑对于桥墩变形控制效果显著,应保证钢支撑体系的支撑效果。

4 某特大桥桥墩变形控制措施

4.1 桥墩变形数值模拟分析

本文研究4种工况下某特大桥的桥墩变形:工况1(未采用加固措施),工况2(仅采用隔离桩),工况3(仅采用旋喷桩),工况4(同时采用隔离桩及旋喷桩)。各工况下的地连墙和桥墩变形如图6所示。由图6可见:

1)工况2~4的计算结果相当,表明桥墩加固措施对于控制地连墙变形效果显著。因此,在地连墙变形控制方面,无需采取多种桥墩加固措施。

2)对于30[#]桥墩,工况3和工况4能满足施工要求。相对于无加固措施,工况3中,桥墩最大水平位移由2.104 mm减小至1.720 mm,减幅为18.25%;桥墩最大竖向位移由0.849 mm减小至0.645 mm,减幅为24.03%。工况4中,桥墩最大水平位移由2.104 mm减小至1.940 mm,减幅为7.79%;桥墩最大竖向位移由0.849 mm减小至0.389 mm,减幅为54.18%。

3)对于31[#]桥墩,工况2和工况4能满足施工要求。工况2中,桥墩最大水平位移由2.580 mm减小至1.729 mm,减幅为32.98%;桥墩最大竖向位移由0.861 mm减小至0.315 mm,减幅为63.41%。工况4中,桥墩最大水平位移由2.580 mm减小至1.484 mm,减幅为42.48%;桥墩最大竖向位移由0.861 mm减小至0.272 mm,减幅为68.41%。综上所述,同时采用隔离桩和旋喷桩才能保证桥墩的变形控制要求。

4.2 桥墩变形现场监测与数值模拟对比分析

对桥梁的沉降、倾斜及桥墩水平位移等项目进行了现场监控量测。选取30[#]桥墩的JGS3、JGS6、JGC14-5、JGC14-6测点及31[#]桥墩的JGS9、JGS10、JGC14-9、JGC14-10测点进行监测。桥墩测点平面布置如图7所示。依托工程采用隔离桩及旋喷桩的

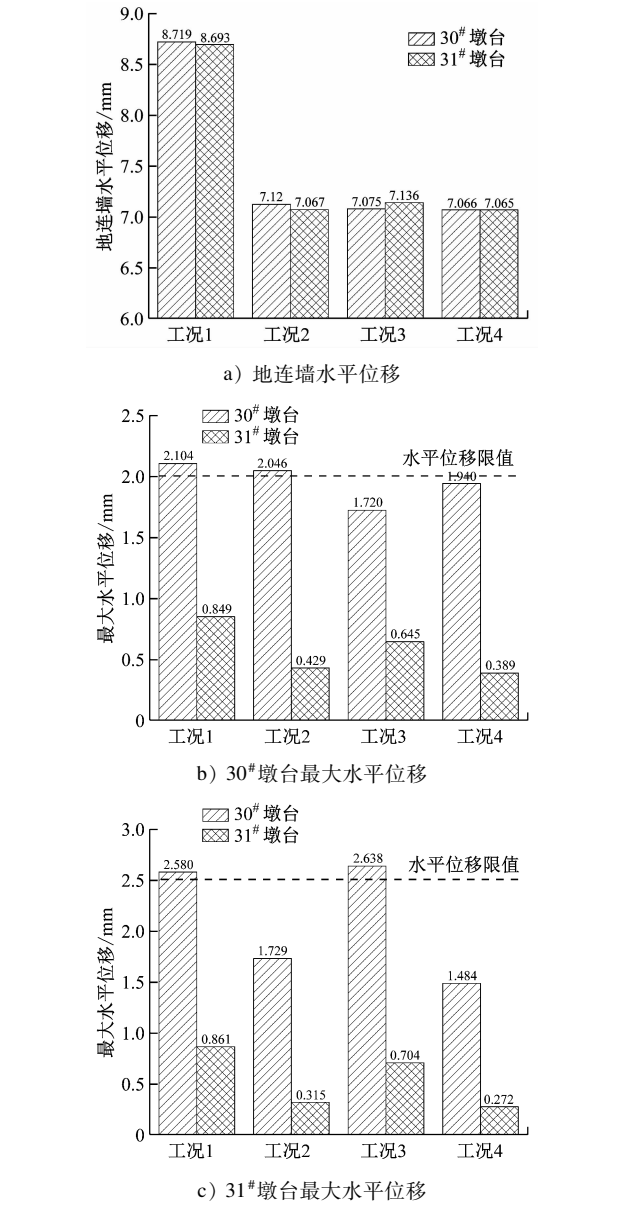


图6 不同加固工况下地连墙和桥梁的最大水平位移
Fig. 6 Maximum diaphragm wall and bridge displacement under different reinforcement schemes

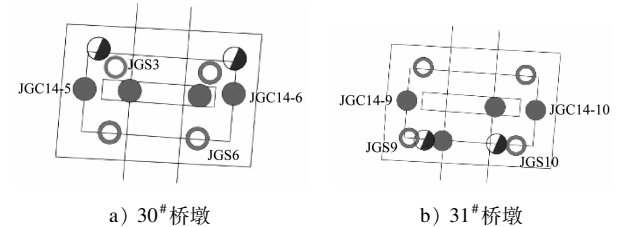
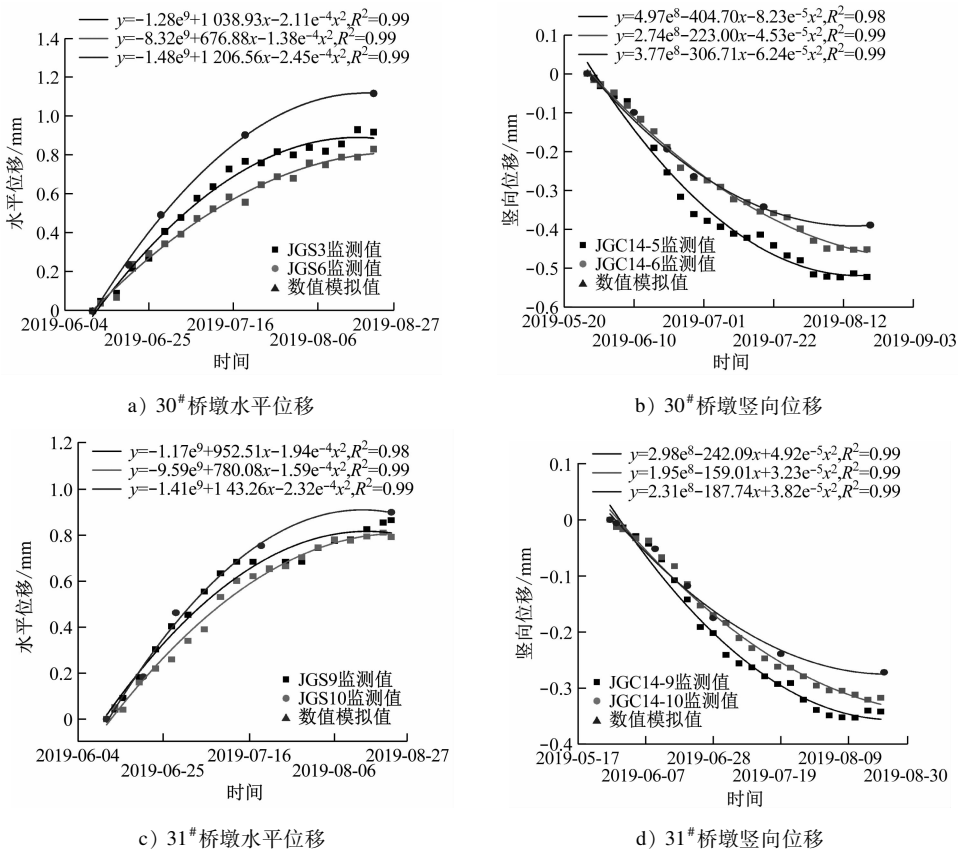


图7 桥墩测点平面布置示意图
Fig. 7 Layout of bridge pier measuring points

加固措施,将现场监测值与本文数值模拟值进行对比,如图8所示。



注: x 为时间; y 为水平位移; R 为拟合函数的相关系数。

图8 桥墩位移监测值与模拟值随时间变化对比曲线

Fig. 8 Time history curve of bridge pier displacement monitoring and simulation values comparison

由图8可见,桥墩的水平位移及竖向位移随监测时间的变化规律可采用二次函数拟合表征,拟合相关系数均大于0.98。和平站基坑开挖70 d后,桥梁的变形能基本保持稳定,30#桥墩的JGS3、JGS6测点的最终水平位移分别为0.918 mm和0.830 mm,JGC14-5、JGC14-6测点的最终竖向位移分别为0.522 mm和0.451 mm;31#桥墩的JGS9、JGS10测点的最终水平位移分别为0.862 mm和0.789 mm,JGC14-9、JGC14-10测点的最终竖向位移分别为0.342 mm和0.317 mm。由此表明,现场采取的桥墩加固措施能有效控制桥墩变形,这与已有研究结论相一致^[13]。但桥墩变形监测值与模拟值存在一定的差异性,考虑为计算模型的简化等因素造成。

5 结论

1) 增大地连墙混凝土的弹性模量有利于控制桥墩变形但控制效果有限。当弹性模量由25.5 GPa增至37.5 GPa时,30#桥墩最大竖向位移和最

大水平位移的减幅分别为0.29%、2.96%,31#桥墩最大竖向位移和最大水平位移的减幅分别为0.66%、2.56%。

2) 考虑到基坑降水增大了墩台的竖向位移,但减小了其水平位移,为保证桥墩的水平位移控制要求,实际施工中需及时采取降水措施。

3) 和平站基坑“同时去除第2、第4道支撑”的钢支撑体系布置形式能有效控制桥墩变形。

4) 数值模拟和监测数据表明,和平站基坑的桥墩保护控制措施能有效保证桥墩变形的控制要求,在基坑开挖70 d后桥墩变形趋于稳定。

参考文献

- [1] 吴义阳. 苏州地铁深基坑开挖对周边建筑物影响评价及分区研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
WU Yiyang. Research on environment impact and influential partition by excavation in Suzhou metro pit engineering [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [2] 岳云鹏, 刘晓玉, 张龙云, 等. 基坑分块开挖对下卧盾构隧道的变形影响分析[J]. 铁道标准设计, 2020(9): 113.

- YUE Yunpeng, LIU Xiaoyu, ZHANG Longyun, et al. Study on the influence of partitioned excavation of foundation pit on the deformation of subterranean shield tunnel [J]. Railway Standard Design, 2020(9):113.
- [3] 陈璟斌. 不同深基坑开挖条件对邻近桩基受力性能影响研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.
- CHEN Jingbin. A study on the influence of different excavation conditions of deep foundation pit on mechanical behavior of surrounding pile foundation [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019.
- [4] 袁钊. 深基坑开挖对邻近高速铁路桥墩变形影响分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.
- YUAN Qian. Analysis of the influence of deep foundation pit excavation on the deformation of adjacent high speed railway pier [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016.
- [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, 2018.
- WAN Peng. Research on the influence of deep foundation pit excavation on existing viaduct pile foundation in Ningbo soft soil area [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018.
- [6] 袁正辉. 深基坑开挖对近邻桥桩的影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- YUAN Zhenghui. Study on the influence of deep foundation pit excavation on adjacent bridge piles [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [7] 谭新飞, 韩爱民. 深基坑开挖对邻近高架桥基础的影响研究[J]. 江苏建筑, 2014(4):78.
- TAN Xinfei, HAN Aimin. Influence research of deep excavation on adjacent viaduct foundation [J]. Jiangsu Architecture, 2014(4):78.
- [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(5):1257.
- WANG Heng, CHEN Fuquan, LIN Hai. Behaviors and strengthening of bridge piles subjected to excavation-induced soil movement [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015(5):1257.
- [9] 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(增刊1):2994.
- WANG Cui, YAN Shuwang, ZHANG Qibin. Study of influence of deep pit excavation on adjacent bridge foundation piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010(S1):2994.
- [10] 李龙剑, 杨宏伟, 李政林, 等. 基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011(增刊2):1697.
- LI Longjian, YANG Hongwei, LI Zhenglin, et al. Numerical analysis of the influence of unsupported excavation on adjacent viaduct foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011(S2):1697.
- [11] 丁勇春, 王建华. 深基坑施工对高架基础的变形影响及控制研究[J]. 土木工程学报, 2012(7):155.
- DING Yongchun, WANG Jianhua. Influence of deep excavation on deformation of elevated bridge foundations and countermeasures [J]. China Civil Engineering Journal, 2012(7):155.
- [12] 张坚, 甘露, 王修领, 等. 地铁车站施工近接既有桥梁桩基础变形及地表沉降规律分析[J]. 公路交通科技, 2018(8):94.
- ZHANG Jian, GAN Lu, WANG Xiuling, et al. Analysis on deformation and ground settlement of existing bridge pile foundation close to subway station construction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018(8):94.
- [13] 王世清, 林森斌. 某深基坑工程邻近桥梁桩基施工影响分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2013(增刊2):94.
- WANG Shiqing, LIN Senbin. Influence analysis of adjacent bridge pile foundation construction of a deep foundation pit project [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2013(S2):94.

(收稿日期:2020-12-05)

(上接第104页)

参考文献

- [1] 日本中央复建工程咨询株式会社. 轨道交通拥挤对策、车站改造技术交流报告[R]. 东京: 日本中央复建工程咨询株式会社, 2018.
- Chuo Fukken Consultants Co., Ltd. Report on rail transit crowded situation countermeasures and station reconstruction technology [R]. Tokyo: Chuo Fukken Consultants Co., Ltd., 2018.
- [2] 北京市发展和改革委员会. 北京市发展改革委关于轨道交通13号线扩能提升工程项目可行性研究报告的批复: 京发改(审)[2021]231号[S]. 北京: 北京市发展和改革委员会, 2021.
- Beijing Municipal Commission of Development and Reform. Response of Beijing Municipal Commission of Development and Reform on rail transit line 13 capacity expansion engineering project feasibility research report: JFG (Revision) [2021] No. 231[S]. Beijing: Beijing Municipal Commission of Development and Reform, 2021.
- [3] 杨兴山. 地铁大规模改造工程技术风险分析与控制[J]. 都市快轨交通, 2005(5):5.
- YANG Xingshan. Risk analysis and control of metro large scale reconstruction engineering technology [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2005(5):5.
- [4] 郑金龙. 从“TOD”走向“TOR”轨道交通引导城市更新[J]. 福建建筑, 2017(6):15.
- ZHENG Jinlong. From “TOD” to “TOR” rail transit oriented urban renewal [J]. Fujian Architecture & Construction, 2017(6):15.

(收稿日期:2020-11-06)