

# 盾构近距离下穿桥梁数值分析与监测

尚艳亮<sup>1,2</sup>, 师文君<sup>2</sup>, 杜守继<sup>1</sup>, 秦志超<sup>2</sup>, 韩同银<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240; 2. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043;  
3. 廊坊师范学院, 河北 廊坊 065000)

**摘要** 目的 分析盾构掘进施工对桥桩的影响, 评估盾构掘进对桩体位移、桩身轴力、弯矩等的影响程度. 方法 以石家庄轨道交通1号线下穿周汉河桥段为例, 采用三维数值模拟的方法建立双线盾构穿越桥梁桩基础模型, 对盾构掘进施工过程中所引起的桩基础的位移和内力进行分析, 以数值分析为基础制定合理的监测方案, 对盾构掘进穿越桥梁基础进行现场监测. 结果 盾构施工造成的桥桩应力变大, 1号桩最大应力为0.86 MPa, 2号桩最大应力为1.96 MPa 远小于设计值22.4 MPa; 左线盾构掘进完成后, 地表的最大沉降为5 mm, 右线盾构掘进完成后, 地表最大沉降为10.2 mm; 桥桩的最大水平位移为2.6 mm, 其中2号桥桩的沉降最大, 为9.35 mm; 下穿周汉河桥桩段路面最大下陷值为6.9 mm, 3处桥梁桩顶沉降分别为5.78 mm、5.51 mm和5.43 mm, 小于施工限值12 mm. 结论 数值模拟计算结果与现场实测数据的结果符合较好, 说明模拟计算时所建立的数值模型与相关物理力学计算参数的确定是合理可靠的.

**关键词** 地铁; 盾构施工; 下穿桥梁; 数值模拟; 现场监测

中图分类号 TU997; U45

文献标志码 A

## Numerical Analysis and Monitoring Research on Shield Passing through Bridge at Close Range

SHANG Yanliang<sup>1,2</sup>, SHI Wenjun<sup>2</sup>, DU Shouji<sup>1</sup>, QING Zhichao<sup>2</sup>, HAN Tongyin<sup>3</sup>

(1. Civil Engineering Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, 200240; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, China, 050043; 3. Langfang Normal University, Langfang, Hebei, 065000)

**Abstract:** The influence of shield tunneling on bridge piles is analyzed to evaluate the effect of shield tunneling on pile displacement, pile axial force and moment. Taking Shijiazhuang Rail Transit Line 1 at Zhouhan Bridge section as an example, a three-dimensional numerical simulation method is used to establish a double-shield tunneling through the bridge pile foundation model. The

收稿日期: 2017-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672259); 河北省科技计划项目(16215408D)

作者简介: 尚艳亮(1980—), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事岩土与地下工程研究.

displacement and internal forces of the pile foundation caused by shield tunneling are analyzed. Based on the numerical analysis, a reasonable monitoring scheme is established, and the on-site monitoring is carried out during the shield driving through the bridge foundation. The stress of bridge pile caused by shield construction becomes larger, the maximum stress of pile 1 is 0.86 MPa, and the maximum stress of pile 2 is 1.96 MPa, which is much smaller than the designed value of 22.4 MPa. After the completion of the left shield tunneling, the maximum settlement of the earth's surface is 5 mm. After the completion of the right shield tunneling, the maximum settlement of the earth's surface is 10.2 mm. The maximum horizontal displacement of bridge piles is 2.6 mm, and the bridge pile with the maximum settlement that is 9.35 mm is No. 2. The maximum subsidence of the pavement beneath the Zhouhan river bridge is 6.9 mm. The settlement of the top of three bridges is 5.78 mm, 5.51 mm and 5.43 mm, respectively, which are less than the construction limit of 12 mm. The result of numerical simulation is in good agreement with the field measured data, which shows that the numerical model established on simulation calculation and the parameters determination of related physical and mechanical calculation are reasonable and reliable.

**Key words:** subway; shield construction; under the bridge; numerical simulation; site monitoring

城市地铁对于加强城市功能的作用越来越重要<sup>[1-2]</sup>.盾构法在地铁施工中被广泛采用<sup>[3-7]</sup>,但伴随而来的是盾构开挖对地层的扰动,尤其在盾构下穿桥梁等重要建筑物时,施工的风险极大<sup>[8-10]</sup>.盾构机在下穿桥梁过程中,使得周围土体在地表产生隆起和沉降,改变了桥梁的支撑受力条件,降低了原有桥梁结构强度,直接影响桥梁安全.高文华、李晓冬等<sup>[11]</sup>基于沈阳地铁九号线区间下穿西江桥工程,分析了该工程的重要影响因素;李明华等<sup>[12]</sup>以南昌地铁中山西路站至子固路站区间段下穿抚河及横跨抚河的中山桥工程为背景,采用拆除既有桩基等障碍物,河道范围施作围堰排水,设置混凝土板抗浮,深层搅拌桩加固土体等综合措施,同时优选盾构机型及掘进模式,控制及调整掘进方向,适时注浆防护,使盾构机顺利穿越抚河;国内外还有很多学者<sup>[13-18]</sup>对于盾构机下穿桥梁的安全控制与检测也做了大量研究.目前数值模拟手段已经被证实可以应用于桥梁检测中;唐黎明<sup>[19]</sup>以宁波市轨道交通4号线金达路站-钱湖大道站区间下穿杭深线、北环线鄞县特大桥工程为例,利用Plaxis 3D有限元软件对盾构施工过程进行了数值模拟分析,对

不同施工工况下桥梁墩顶的变形情况进行了研究,得到了高铁桥梁桥墩横桥向、顺桥向及垂向位移,并对该设计方案进行了技术分析和安全评估;赖金星等<sup>[20]</sup>为了提高盾构近距离穿越立交桥群桩基础施工中的安全性,采用有限元方法建立三维数值模型对盾构穿越群桩基础过程进行动态模拟,分析了群桩基础水平位移的变化规律以及地表受盾构影响的变形规律.笔者以石家庄轨道交通1号线下穿周汉河桥桩基础为例,采用FLAC3D三维有限差分软件模拟盾构下穿周汉河桥桥桩,研究盾构开挖对桥桩的影响.在数值模拟的基础上对盾构施工引起的桥桩沉降进行现场监测,并与数值模拟结果进行对比,根据实测数据分析盾构施工对桥桩的影响.

## 1 工程概况

石家庄轨道交通1号线下穿周汉河桥区间段位于行政中心站至园博园站区间.周汉河是正定县境内一条排泄泉水及沥水的主要河道,发源于正定县西北部的西汉、东汉、周家庄、曲阳桥一带,流域面积106.1 km<sup>2</sup>,河长35 km.盾构在K32+100~K32+150段下穿桥桩,桩埋深约20 m,桩底距隧道竖向

最小距离为 5.4 m, 横向最小距离为 1.5 m, 隧道中心平均埋深 28 m, 盾构开挖直径为 6.28 m, 管片外径 6 m, 内径 5.4 m, 厚 0.3 m, 每循环次开挖 1.2 m. 该地段河床的土层划分为人工堆积层 (Qml)、新近沉积层 (Q4al)、第四系全新统冲洪积层 (Q4al + pl)、第四系上更新统冲洪积层 (Q3al + pl).

## 2 数值模型的建立及计算结果分析

### 2.1 盾构下穿桥梁的三维数值模型的建立

盾构在 K32 + 100 ~ K32 + 150 段下穿桥桩, 桩埋深约 20 m, 桩底距隧道竖向最小距离为 5.4 m, 横向最小距离为 1.5 m, 隧道中心平均埋深 28 m, 盾构开挖直径为 6.28 m, 管片外径 6 m, 内径 5.4 m, 厚 0.3 m, 每次开挖 1.2 m, 三维模型沿隧道轴线长 42 m, 宽 70 m, 高 50 m. 先在 ANSYS 软件中建立整体模型, 然后导入 FLA3D 中进行计算. 其中网格划分的原则是距离盾构开挖部分比较近的地方网格划分较密, 距离盾构开挖部分较远的部分网格划分的较稀, 并且最好把网格划成四边形单元, 隧道下穿桥墩模型如图 1 所示.

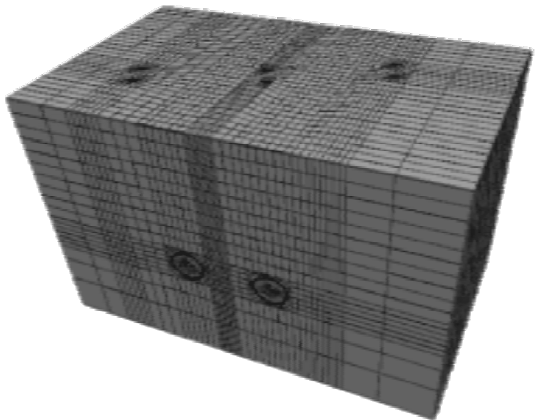


图1 隧道下穿桥墩模型

Fig.1 Model of tunnel crossing pier foundation structure

网格划分好后, 对平面模型进行拉伸. 在计算开挖的过程中, 以管片每环宽度 1.2 m 为一开挖步, 先全断面开挖, 然后加入注浆

层, 最后加衬砌, 直至盾构掘进完成. 盾构管片内径 5.4 m, 外径 6 m, 厚度为 0.3 m, 宽度 1.2 m, 注浆层外径 6.28 m, 内径 6 m, 厚度为 0.14 m.

图 2 为隧道和下穿桥桩的相对位置图. 模型共 54 844 个单元, 56 878 个节点, 82 个开挖步. 因桩基础上承受桥梁的荷载, 所以在其表面设置 700 kN 的集中荷载.



图2 盾构下穿时隧道结构和桥桩基础结构

Fig.2 Tunnel structure and bridge pile foundation under shield tunneling

### 2.2 计算结果分析

#### 2.2.1 桩基位移

根据建立的盾构隧道与桥桩的模型和计算结果, 分析盾构隧道侧穿周汉河桥桩基时桥梁桩基的变形和内力特征. 图 3 为盾构开挖结束后的竖向位移云图和开水平位移云图. 由图可以看出, 盾构掘进, 地表沉降, 形成沉降槽, 地表最大沉降为 10.2 mm, 地表横向最大水平位移为 3.7 mm.

图 4 为桥桩竖向位移云图, 可以看出 2 号桥桩沉降最大, 为 9.35 mm, 其他两个桥桩竖向位移较小, 为 3 mm; 2 号桥桩的水平位移小于 1 mm, 1 号桥桩的横向水平位移为 2.95 mm, 3 号桥桩的横向水平位移为 2.6 mm.

根据设置的监测点, 可以得到左线施工结束和双线都施工结束的地表沉降 (见图

5). 由图5可以看出,左线开挖后,地表沉降较小,最大沉降为4.52 mm,右线开挖结束

后,地表沉降明显增大,最大沉降为8.74 mm.

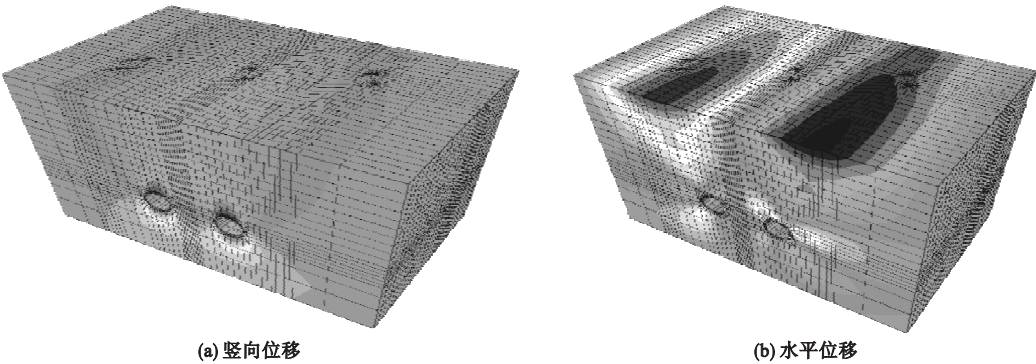


图3 地表位移图  
Fig. 3 Surface displacement map



图4 桩体位移图  
Fig. 4 Displacement of bridge pile

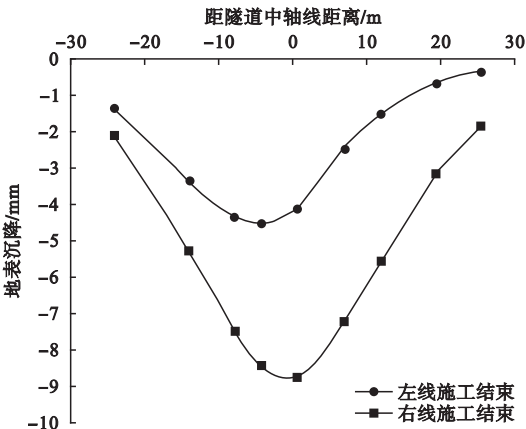


图5 隧道下穿区域地表位移图  
Fig. 5 Surface displacement map of tunnel under worn area

为研究盾构掘进对桥桩的影响,因此对1号桥桩和2号桥桩的内力和位移进行分析.选取掘进过程的5个阶段分别监测其内

力和位移,阶段1为左线盾构开挖初期,阶段2为左线盾构掘进一半,阶段3为左线盾构掘进完成,阶段4为右线盾构掘进一半,阶段5为右线盾构掘进结束.

2.2.2 1号桩的内力与位移

1号桥桩的5个阶段的内力结果如图6所示.由图6可以看出,在同一阶段桥桩的轴力与埋深成正比,随着盾构掘进施工的进行,桩身各个部位的轴力呈现逐渐增大的趋势,但增大的数值相对来说很小,所以在盾构掘进施工的过程中,对桩身轴力产生很小的影响.而桥桩的弯矩与轴力的变化规律不一样.随着盾构掘进施工的进行,其桩顶和桩底呈现逐渐减小的趋势,而桥桩中间则是随着掘进施工进行逐渐变大,在埋深12.5 m处弯矩最大,为20.2 kN·m.

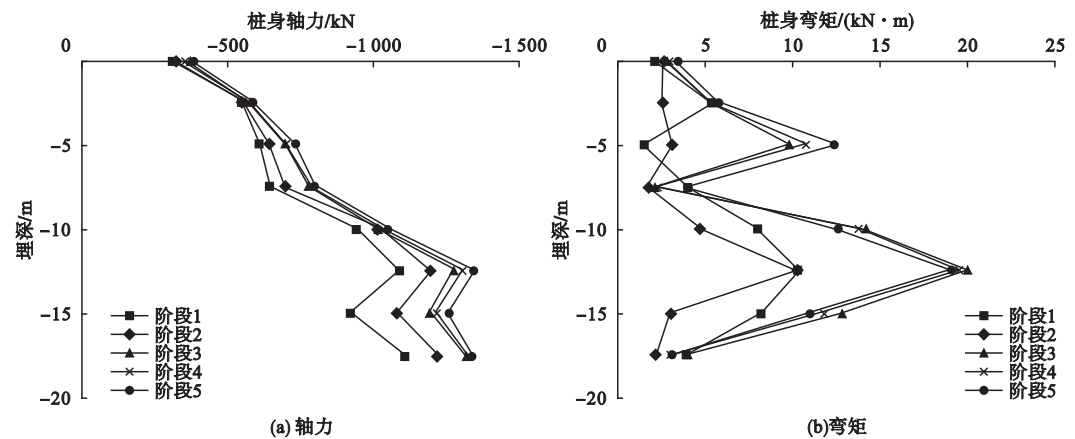


图6 1号桩内力图

Fig. 6 Internal force map of No. 1 pile

1号桥桩的5个阶段的位移结果如图7所示。由图7可以看出,1号桥桩的水平位移与其埋深成反比,埋深越大,位移越小;随着盾构掘进施工的进行,桥桩的水平位移成逐渐增大的趋势。左线盾构掘进结束后,桩顶水平位移为1.6 mm,右线盾构掘进结束后,桩顶水平位移为2.95 mm。桥桩的竖向位移与其埋深没有关系,桩顶到桩底的竖向位移变化很小,随着盾构掘进施工的进行,其变形逐渐增大,左线盾构掘进结束后,沉降值为

0.89 mm,右线盾构掘进结束后,沉降值为2.56 mm。当左线盾构掘进后,其造成的桩顶水平位移占桩顶总体水平位移的54.2%,右线盾构掘进后,其造成的桩顶水平位移占桩顶总体水平位移的45.8%,二者相比较,影响程度相同;当左线盾构掘进后,其造成的桩顶竖向位移占桩顶总体竖向位移的34.8%,右线盾构掘进后,其造成的桩顶竖向位移占桩顶总体竖向位移的65.2%,二者相比较,右线影响程度较大。

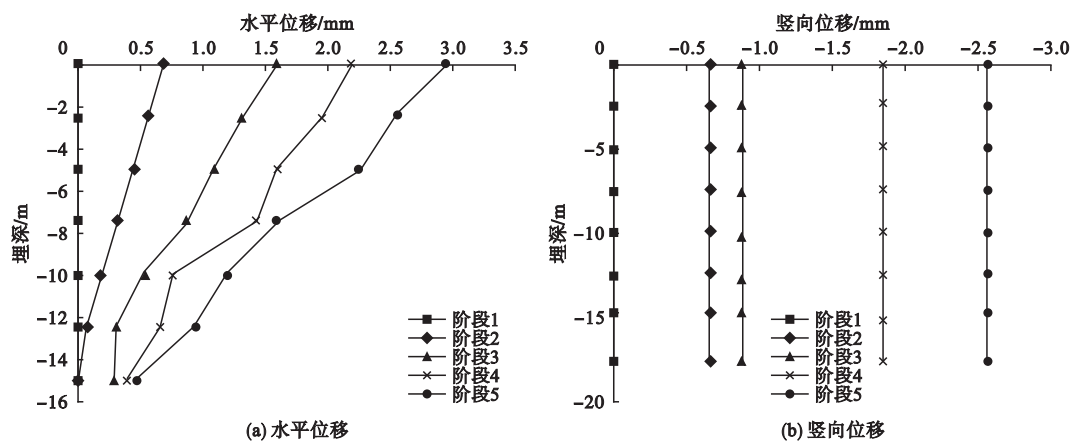


图7 1号桩位移变化图

Fig. 7 Displacement of the pile No. 1

根据相关资料,桥桩的直径为1.2 m,根据盾构掘进施工完成后其桥桩的弯矩和轴力,可以计算出桥桩的应力,计算结果如表1

所示。根据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010),C50钢筋混凝土轴心抗压强度设计值为22.4 MPa,由计算结果可以



看出,桥桩的应力远小于其抗压强度.

表 1 1 号桩处不同深度下各力学参数表  
Table 1 Mechanical parameters under different depths for the pile No. 1

深度/ m	弯矩/ (kN·m)	轴力/ kN	最大压应力/ MPa	最小压应力/ MPa
0	3.4	-378	-0.51	-0.49
-2.5	5.8	-586	-0.86	-0.76

2.2.3 2 号桥桩的内力与位移

2 号桥桩的 5 个阶段的内力结果如图 8

所示. 由图 8 可以看出,同一阶段桥桩的轴力与埋深成正比,随着盾构掘进施工的进行,桩身各个部位的轴力呈现逐渐减小的趋势,减小的数值相对来说比较大,所以在盾构掘进施工的过程中,对桩身轴力产生比较大的影响. 而桥桩的弯矩变化规律则不一样,随着盾构掘进施工的进行,呈现逐渐增大的趋势,而桥桩中间随着掘进施工进行变化比较大,在埋深 6 m 处弯矩最大,为 55.23 kN·m.

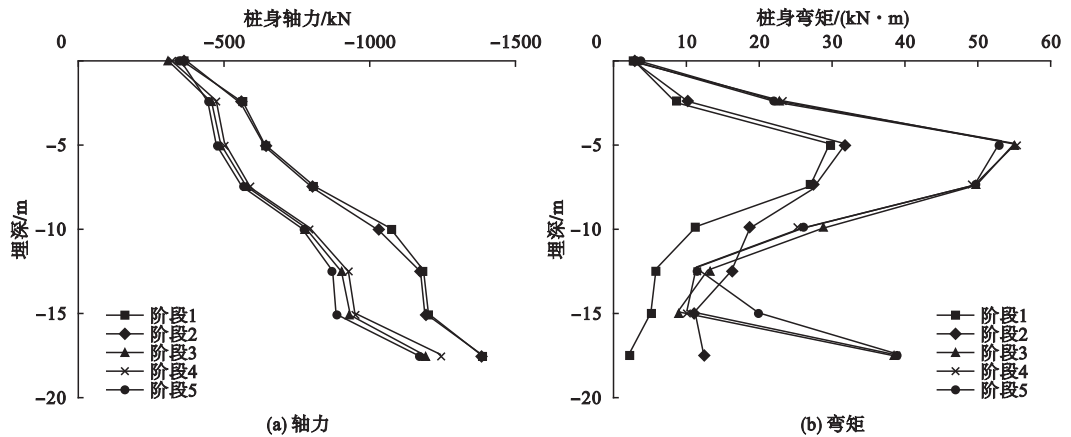


图 8 2 号桩内力图

Fig. 8 Internal force map of No. 2 pile

2 号桥桩的 5 个阶段的位移结果如图 9 所示. 2 号桥桩随着盾构掘进施工的进行,桥桩的水平位移先增大后减小,由图 9 能够看出,左线盾构掘进结束后,桩顶水平位移为 1.73 mm,右线盾构掘进结束后,桩顶水平位

移为 0.5 mm;桥桩的竖向位移与其埋深没有关系,随着盾构掘进施工的进行,其竖向位移逐渐增大,左线盾构掘进结束后,沉降值为 0.7 mm,右线盾构掘进结束后,沉降值为 9.3 mm.

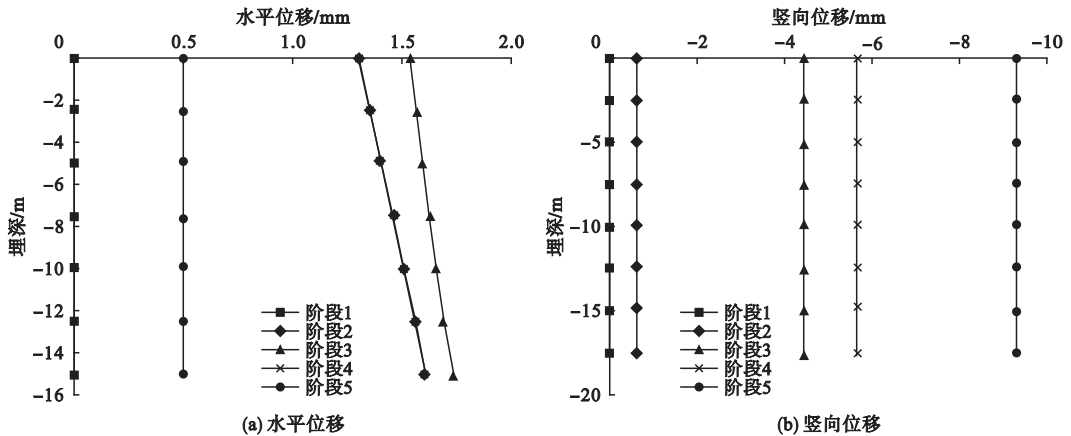


图 9 2 号桩位移变化图

Fig. 9 Displacement of the pile No. 2

根据盾构掘进施工完成后其桥桩的弯矩和轴力,可以计算出桥桩的应力,计算结果如表2所示. 根据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010), C50 钢筋混凝土轴心抗压强度设计值为 22.4 MPa,由计算结果可看出,桥桩应力远小于其抗压强度.

表2 2号桩处不同深度下各力学参数表

Table 2 Mechanical parameters under different depths for pile No. 2

深度/m	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	最大压应力/MPa	最小压应力/MPa
0	3.47	-348	-0.48	-0.46
-2.5	21.86	-446	-0.82	-0.37
-5.0	53.04	-476	-1.19	-0.09
-7.5	49.71	-563	-1.29	-0.34
-10.0	26.16	-769	-1.29	-0.75
-12.5	11.5	-872	-1.29	-1.06
-15.0	19.68	-885	-1.32	-1.14
-17.5	39.13	-1 167	-1.96	-1.20

2号桩顶竖向位移随盾构掘进距离的变化如图10所示. 由图10可知,盾构左线掘进和盾构右线掘进均使其发生了较大沉降,盾构左线掘进完成后,沉降达到6.18 mm,盾构右线掘进时,沉降量继续变大,沉降量为9.35 mm,小于规定限值12 mm.

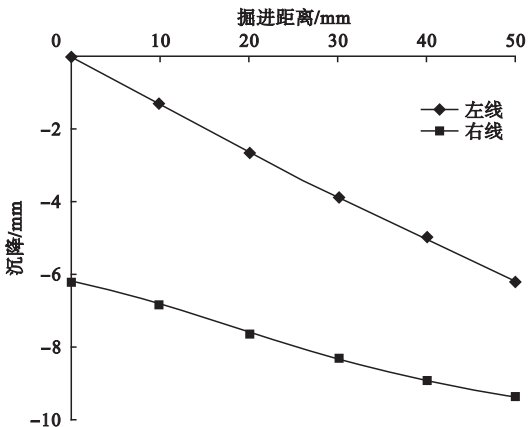


图10 桩顶竖向位移与盾构掘进距离关系图

Fig. 10 Relationship between vertical displacement of pile top and shield tunneling distance

### 3 盾构下穿桥梁施工变形监测及分析

#### 3.1 监测点布设

根据数值模拟分析结果并结合行政中心站至园博园站区间正洞施工情况设计现场变形监测点布置方案.

##### 3.1.1 洞内管片沉降监测点布设

每10环即每24 m设置1个监测断面,每个监测断面设4个测点;盾构始发、接收、联络通道附近、小半径曲线段、施工出现异常、管片结构开裂等地段设置断面;隧道下(侧)重要建(构)筑物、管线、等复杂地段设置断面.

##### 3.1.2 地表沉降或隆起监测点布设

测点:沿线路中心线纵向每10~30 m设置1个中线测点.

断面:盾构井附近,每50 m设1个断面;其余部分,每100 m设1个断面.

##### 3.1.3 侧穿桥桩监测点布设

图11为盾构隧道下穿周汉河桥桩区段测点平面布置图. 三者均为钻孔灌注桩上承接台结构,其中1号桥桩在盾构左线外侧,2号桥桩位于双线盾构中心,3号桥桩在盾构右线外侧. 在桥梁区段内沿隧道中心纵向布置测点,间隔3个管片长度. 横断面监测点每隔约20 m布置,每一横断面布置14个测点.

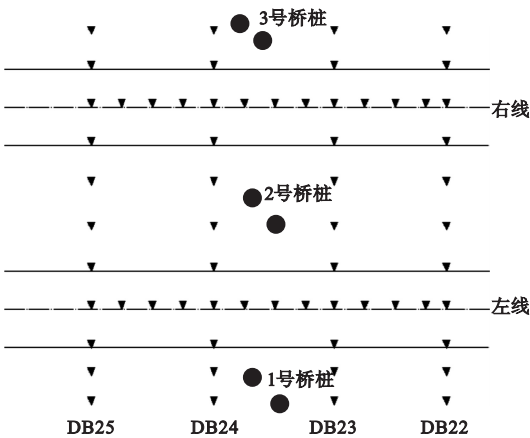


图11 隧道下穿桥桩监测平面布置图

Fig. 11 Plane layout of the bridge under the bridge

3.2 盾构下穿施工时变形监测数据分析

盾构掘进下穿桥桩在管片 581 ~ 653 环。掘进中对 1 号桩和 2 号桩进行现场监测,根据监测数据得出左右线盾构施工影响(见图 12、图 13)。

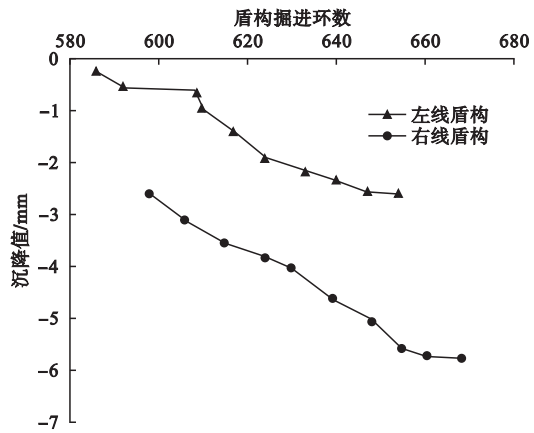


图 12 1 号桩沉降变化曲线

Fig. 12 Settlement curve of pile No. 1

由图 12 可知,1 号桥桩受左线和右线盾构掘进施工的共同影响,左线先进行盾构掘进施工,之后右线进行盾构掘进施工,所以在左线施工的过程中,1 号桩的沉降是从 0 mm 增加到 2.6 mm,在右线施工过程中,沉降从 2.6 mm 增加到 5.78 mm。当左线盾构掘进后,其造成的桩顶沉降占桩顶总沉降的 45%,右线盾构掘进后,其造成的桩顶沉降占桩顶总沉降的 55%,二者相比较影响程度相同。

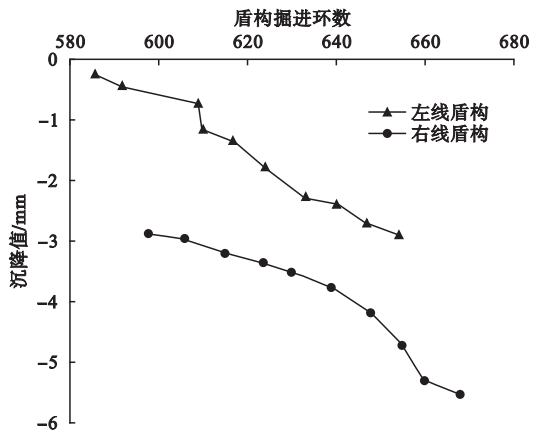


图 13 2 号桩沉降变化曲线

Fig. 13 Settlement curve of pile No. 2

由图 13 可以看出,2 号桥桩受左线和右

线盾构掘进施工的共同影响,左线先进行盾构掘进施工,之后右线进行盾构掘进施工,所以在左线施工的过程中,2 号桩的沉降是从 0 mm 增加到 2.89 mm,在右线施工过程中,沉降从 2.89 mm 增加到 5.51 mm。当左线盾构掘进后,其造成的桩顶沉降占桩顶总沉降的 52.5%,右线盾构掘进后,其造成的桩顶沉降占桩顶总沉降的 47.5%,二者相比较,影响程度相同。

图 14 为地表沉降曲线,地表沉降受左线和右线盾构掘进施工的影响,在左线掘进施工结束后,地表最大沉降为 2.2 mm,右线盾构掘进施工结束后,地表最大沉降为 6.9 mm,远小于满足施工要求限值 12 mm。

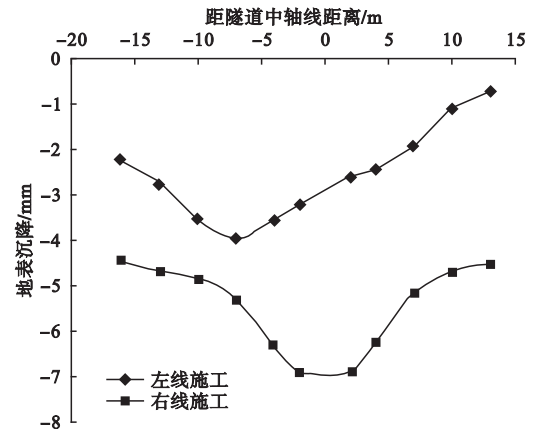


图 14 地表沉降曲线图

Fig. 14 Settlement curve of the surface

3.3 现场检测结果与数值模拟结果对比

为验证数值模拟的准确性,将其计算结果与现场监测结果进行对比分析(见表 3)。由表 3 可以得出,二者较为接近,最大相差 3.79 mm。

表 3 各测点实测值与数值模拟值对比

Table 3 Comparison of measured and numerical values of each measuring point

测点	位移监测值/mm	位移模拟值/mm
1 号桩	-5.78	-2.56
2 号桩	-5.51	-9.30
3 号桩	-5.43	-2.76

统计下穿周汉河桥区段地表沉降值,得到桥桩段地表沉降比较图(见图 15)。



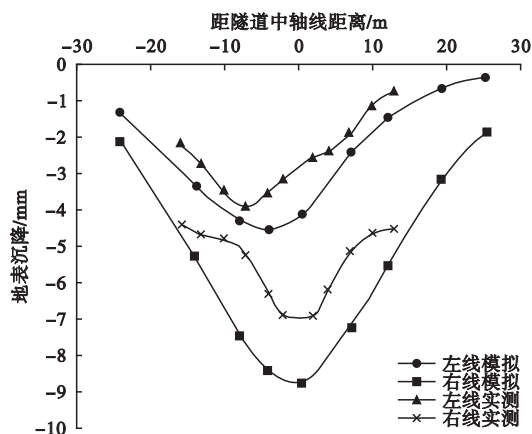


图 15 桥桩段地表沉降比较图

Fig. 15 Comparison of surface subsidence of pile piles in side

由图 15 可以得到,左线施工结束后地表沉降实测值为 3.92 mm,数值模拟值为 4.52 mm;双线隧道施工完成后,地表沉降实测值为 6.9 mm,数值模拟值为 8.74 mm. 两种工况情况下,现场实测结果和软件计算结果误差均在工程可接受范围内,效果得到验证.

## 4 结 论

(1)盾构下穿周汉河桥墩情况下,盾构施工造成的桩身最大压应力为 1.96 MPa,应力小于桩身混凝土的强度. 左线盾构掘进完成后,地表的最大沉降为 5 mm,右线盾构掘进完成后,地表最大沉降为 10.2 mm.

(2)盾构掘进施工造成的桥桩最大水平位移为 2.6 mm,而桥桩由于其位置不同,各个桩之间的竖向位移不同,2 号桥桩的沉降最大为 9.35 mm.

(3)下穿周汉河桥桩段路面最大下陷值为 6.9 mm,3 处桥梁桩顶沉降分别为 5.78 mm、5.51 mm 和 5.43 mm,小于规范与施工要求值. 现场实际观测所得结果与有限差分计算结果相比较,偏差小于 3.79 mm.

(4)数值模拟计算结果与现场实测数据的结果符合较好,说明模拟计算时所建立的数值模型与相关物理力学计算参数的确定是合理可靠的. 其中模型的建立与参数的选取

是基于石家庄无水砂层地区的现场试验进行的,对于类似工程有一定的参考价值.

## 参考文献

- [1] 滕丽娜. 地铁空间的导向性研究[D]. 北京:中央美术学院,2007.  
(TENG Lina. Study on the orientation of subway space [D]. Beijing: Central Academy of Fine Arts, 2007.)
- [2] 曹小曙,林强. 世界城市地铁发展历程与规律[J]. 地理学报,2008,63(12):1257-1267.  
(CAO Xiaoshu, LIN Qiang. The development process and law of the world city subway [J]. Journal of acta geography sinica, 2008, 63(12):1257-1267.)
- [3] 杜彬. 地铁车站浅埋暗挖法施工对邻近桩基的影响及控制措施[D]. 北京:北京交通大学,2007.  
(DU Bin. Regulations and control measures of pile foundation near subway station by excavation for shallow tunnels [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.)
- [4] 王利民,董曦. 地铁站主体暗挖段下穿城市主干道桥梁综合施工技术[J]. 建筑技术,2012,43(10):903-906.  
(WANG Limin, DONG Xi. General construction technique for underground-excavated segment of subway station passing through urban artery bridge [J]. Architecture technology, 2012, 43(10):903-906.)
- [5] 梁韵,谭忠盛,李健,等. 地铁下穿既有线和扩大基础桥梁施工方案研究[J]. 现代隧道技术,2011,48(1):117-122.  
(LIANG Yun, TAN Zhongsheng, LI Jian, et al. Study on the construction scheme of subway under existing lines and expansion of basic bridges [J]. Modern tunnel technology, 2011, 48(1):117-122.)
- [6] 彭坤,陶连金,高玉春,等. 盾构隧道下穿桥梁引起桩基变位的数值分析[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(3):485-489.  
(PENG Kun, TAO Lianjin, Gao Yuchun, et al. Numerical analysis of pile foundation displacement caused by a shield tunnel under a bridge [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2012, 8(3):485-489.)
- [7] 黄希,陈行,晏启祥,等. 地铁隧道下穿桥梁桩基托换力学行为与参数研究[J]. 施工技术,2017,46(11):67-70.  
(HUANG Xi, CHEN Xing, YAN Qixiang, et al. Numerical analysis of bridge pile deform-

- ation caused by shield tunnel construction underneath[J]. Construction technology, 2017, 46(11): 67-70.)
- [8] 梅文胜, 陈雪丰, 周小波, 等. 盾构下穿既有隧道实时监测及其风险控制研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(8): 923-927. (MEI Wensheng, CHEN Xuefeng, ZHOU Xiaobo, et al. Research on real-time monitoring of shield tunneling and its risk control[J]. Journal of geomatics and information science of Wuhan university, 2011, 36(8): 923-927.)
- [9] 张浩, 沈圣, 尚艳亮, 等. 盾构下穿既有建筑物沉降缝二维变形监测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(6): 1146-1155. (ZHANG Hao, SHEN Sheng, SHANG Yanliang, et al. Two-dimensional deformation monitoring of settlement joints of existing buildings under shield tunneling [J]. Journal of applied basic and engineering sciences, 2015, 23(6): 1146-1155.)
- [10] 李彪. 盾构隧道施工对地层及邻近桥梁桩基的影响研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013. (LI Biao. Research on influence of shield tunnel construction impact on the strata and adjacent bridge pile [D]. Changsha: Central South University, 2013.)
- [11] 高文华, 李晓冬, 程康, 等. 沈阳地铁盾构隧道下穿桥梁影响因素及施工方法[J]. 城市住宅, 2017, 24(2): 97-100. (GAO Wenhua, LI Xiaodong, CHENG Kang, et al. Influence factors and construction methods of shield tunneling in Shenyang Metro[J]. Residential building, 2017, 24(2): 97-100.)
- [12] 李明华, 张娟. 盾构下穿桥梁及河流关键技术方案[J]. 铁道建筑, 2015(7): 54-57. (LI Minghua, ZHANG Juan. Key technical scheme for shield tunneling through bridges and rivers[J]. Railway engineering, 2015(7): 54-57.)
- [13] 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]. 北京交通大学学报, 2014, 38(1): 13-19. (GUO Yuhai, LI Xinggao. Safety control technology of large diameter shield passing through beijing airport rapid rail viaduct [J]. Journal of Beijing jiaotong university, 2014, 38(1): 13-19.)
- [14] 刘可玉. 富水砂层盾构下穿浅基础桥梁变形规律与控制技术[J]. 施工技术, 2015, 44(增刊2): 356-360. (LIU Keyu. Deformation rules and control technology of watered sandy stratum when the shield jacking the foundation bridge[J]. Construction technology, 2015, 44(S2): 356-360.)
- [15] 沙原亭. 地铁盾构下穿河流及桥梁桩基施工与监测技术[J]. 铁道建筑技术, 2015, (10): 16-18. (SHA Yuanling. Construction and monitoring technology of subway shield machine underpassing the river and bridge pile foundation [J]. Railway construction technology, 2015(10): 16-18.)
- [16] 吕宝伟. 超临界桥桩基施工对既有隧道影响数值与实测分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(3): 103-107. (Lü Baowei. Monitoring and numerical analysis of the impact of supercritical bridge pile foundation on existing tunnel [J]. Railway standard design, 2017, 61(3): 103-107.)
- [17] POHL H, BEUTEL R G. Kinzelbachilla ellenbergeri-a new ancestral species, genus and family of Strepsiptera(Insecta) [J]. Systematic entomology, 2016, 41(1): 287-297.
- [18] SZAFRAN J, KAMINSKI M. Bridges for pedestrians with random parameters using the stochastic finite elements analysis[J]. International journal of applied mechanics and engineering, 2017, 22(1): 175-197.
- [19] 唐黎明. 地铁盾构近距离下穿多座高铁桥梁影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(2): 45-53. (TANG Liming. Analysis of the effect of subway shield crossing high-speed railway bridges at high distance [J]. East China jiaotong university, 2017, 34(2): 45-53.)
- [20] 赖金星, 刘厚全, 汪珂, 等. 盾构近接立交桥梁基础安全影响三维数值分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(3): 29-35. (LAI Jinxing, LIU Houquan, WANG Ke, et al. Three-dimensional numerical analysis on safety influence of shield tunneling construction on the foundation of adjacent overpass [J]. Process of safety science and technology for production safety, 2017, 13(3): 29-35.)