

盾构隧道近距离侧穿立交桥桩基的变形影响分析*

麻凤海 王 其 闫 盼

(大连大学建筑工程学院, 116622, 大连)

摘 要 [目的] 盾构掘进会引起附近桥梁基础发生位移变形, 降低桥梁基础承载能力, 为此结合某工程实例对盾构隧道近距离侧穿桥梁桩基的变形影响进行研究。[方法] 依托合肥地铁 5 号线盾构侧穿立交桥桩基工程, 建立三维数值模型, 分析盾构施工引起的桩基横向水平位移、纵向水平位移以及桩基沉降规律。[结果及结论] 研究结果表明, 桩底横向水平位移呈现“离开—靠近—离开”隧道的动态变化, 桩身横向水平位移近似“C”形扰曲曲线, 位移沿桩深呈先增大后减小的变化趋势, 极值位于桩深 9~10 m 处。桩底纵向(平行隧道轴向)水平位移表现为“双峰”形曲线, 盾构通过桩基后, 桩身发生与掘进方向相反的纵向位移, 在盾构通过桩基 12 m 后桩身纵向水平位移出现回弹变化, 表明盾构掘进对桩基的纵向变形影响一定程度上是可逆的。桩基沉降变化呈陡峭趋势, 同侧桩基距离隧道越近沉降越大, 且远侧隧道开挖会引起桩端二次沉降, 最大沉降值发生在 4 号桩基桩底处, 沉降值为 4.94 mm。

关键词 盾构隧道; 桥梁桩基; 近距离侧穿; 桩基位移

中图分类号 U455.43; TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.010

Deformation Effect Analysis of Shield Tunnel Closely Side-passing Viaduct Pile Foundation

MA Fenghai, WANG Qi, YAN Pan

(School of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, 116622, Dalian, China)

Abstract [Objective] Shield tunneling may cause displacement and deformation of the nearby viaduct foundation and reduce its bearing capacity. Therefore, the deformation effect caused by shield tunnel closely side-passing viaduct foundation is studied based on an actual project. [Method] Relying on the project of Hefei Metro Line 5 in which the shield tunnel passes the pile foundation of the viaduct on the side, a three-dimensional numerical model is established to analyze the horizontal displacement, the longitudinal displacement and the settlement pattern of the pile foundation caused by shield construction. [Result & Conclusion] The research results show that the horizontal displacement at the pile bottom presents dynamic

changes of leaving, approaching and leaving the tunnel. The horizontal displacement of the pile body is similar to a C shape flexure curve. The displacement increases first and then decreases along with the pile depths, and the extreme value is located at the pile depth of 9~10 m. The longitudinal displacement at the pile bottom (parallel to the tunnel axis) shows a bimodal curve. After the shield passing the pile foundation, the pile body undergoes longitudinal deformation in the opposite direction of the excavation. After the shield passing through the pile foundation for 12m and further, the horizontal displacement of the pile body in longitudinal direction rebounds, indicating that the influence of shield tunneling on the longitudinal deformation of the pile foundation is reversible to a certain extent. The settlement of the pile foundation presents a steep trend. The closer the pile foundation at the same side is to the tunnel, the greater the settlement. Moreover, the excavation of the far side tunnel will cause secondary settlement of the pile top. The maximum settlement occurs at the bottom of the No. 4 pile foundation, and the settlement value is 4.94 mm.

Key words shield tunnel; viaduct pile foundation; side-passing in close range; pile foundation displacement

随着我国城市化建设的快速发展, 城市地铁规模不断扩大, 为合理布局城市交通系统, 地铁线路通常布设在交通走廊下, 以致新建地铁隧道不可避免要下穿既有的桥梁结构。盾构掘进会引起地层应力重分布和地层位移, 导致桥梁基础位移变形, 从而降低了桥梁基础的承载能力。目前, 国内外诸多学者对盾构近接施工的影响进行了深入研究, 文献[1]基于离心试验和考虑土体小应变刚度特性, 研究 2 种典型工况下群桩基础变形; 文献[2]基于流固耦合理论建立三维数值分析模型, 研究盾构掘进引起桩基的水平、竖向位移; 文献[3]采用结构耦合弹簧力学计算原理和有限差分法对盾构近接侧穿桥梁桩基的位移、结构受力变化规律进行研究; 文献[4]提出了一种盾构隧道近接桩基工况下考虑

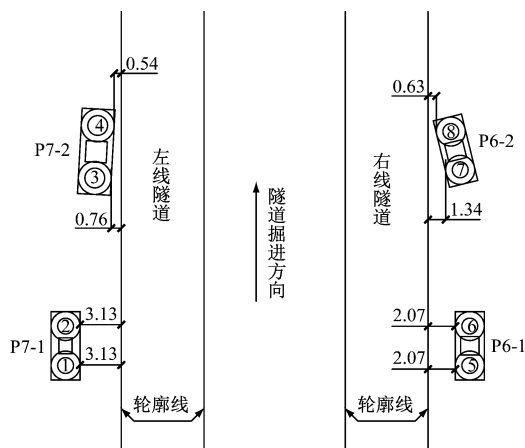
* 国家自然科学基金项目(51474045)

桩基剪切效应计算桩基水平位移的简化方法;文献[5-9]结合工程案例,采用数值分析的方法,针对盾构隧道近接穿越桥梁桩基的影响进行深入研究。

目前,研究盾构隧道超近距侧穿立交桥桩基的工程案例较少,且由于工程的复杂性和特殊性,现有研究并不能准确地反映盾构施工对立交桥桩基的影响。合肥地铁5号线盾构隧道近距离侧穿立交桥桩基工程,桥桩与隧道最小水平净距为0.54 m,桩底与隧道最小净距为1.23 m,桩基位于盾构施工的强烈影响范围内,故盾构施工风险极高。因此,开展盾构侧穿施工引起桩基的变形影响研究具有现实意义,可以保障盾构施工安全和立交桥结构稳定,也可为其他类似工程提供有益的借鉴和参考。

1 工程概况

合肥地铁5号线盾构隧道侧穿立交桥主桥桩基,地铁区间隧道覆土厚度约为18 m,隧道外径为6 m,隧道内径为5.4 m。主桥结构为混凝土连续梁,桥桩为人工挖孔扩底端承桩,3、4号桩基直径为1.5 m、扩底直径为2.5 m,其余桩基直径为1.2 m、扩底直径为2.2 m,桩基与隧道平面关系如图1所示。



注:尺寸单位为m;P7-1等为桥墩编号;数字①~⑧为桩基编号。

图1 桩基与隧道平面关系图

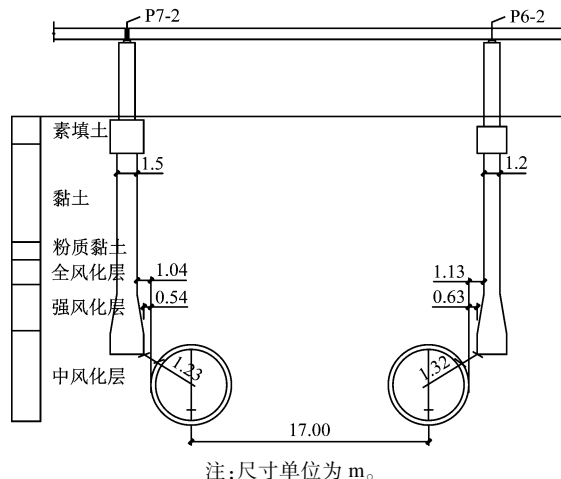
Fig. 1 Plane relationship between pile foundation and tunnel

盾构隧道左线从P7-1、P7-2桥墩右侧穿越,桩基与隧道最小水平净距为0.54 m;右线从P6-1、P6-2桥墩左侧穿越,桩基与隧道最小水平净距为0.63 m。桩基与隧道立面关系如图2所示。

2 盾构施工数值模拟

2.1 模型建立

采用Midas/GTS有限元软件建立三维数值模



注:尺寸单位为m。

图2 桩基与隧道立面关系图

Fig. 2 Elevation relationship between pile foundation and tunnel

型,模型的隧道开挖方向取100 m,垂直于开挖方向的水平方向取90 m,竖直方向取60 m,模型如图3所示。围岩采用Mohr-Coulomb弹塑性本构模型计算,桥梁结构、管片等材料采用弹性本构模型,土体、桥墩、承台、注浆层等采用3维实体单元模拟,盾壳和管片采用2维板单元模拟,桩基采用双截面1维梁单元模拟,桩基与围岩之间的接触采用桩界面单元和桩端单元模拟。模型顶部设为自由边界,模型前后左右及底部约束法向位移。

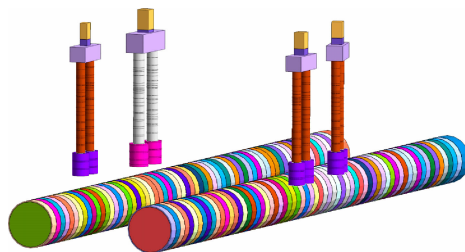


图3 数值计算模型

Fig. 3 Numerical calculation model

2.2 参数选取

依据地质勘探资料,该工程所在地层相应的物理力学参数见表1,桥梁、隧道结构参数见表2。根据地勘报告及相关工程经验,剪切刚度模量取为桥桩弹性模量80%,法向刚度模量取为剪切刚度模量10倍左右,接触单元参数见表3。桥梁上部结构采用等效荷载模拟,在桥墩顶部施加330 kPa的压力。盾构隧道开挖的模拟过程中,每一步开挖设为3 m,掘进压力为0.2 MPa,注浆压力为0.3 MPa,管片推力为0.1 MPa。

表 1 岩土物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil

岩土名称	天然重度/ (kN/m^3)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$
素填土	18.0	9	0.24	8.0	12
黏土	18.9	25	0.23	22.0	16
粉质黏土	18.8	23	0.23	23.5	15
全风化泥质砂岩	18.4	37	0.23	41.3	17
强风化泥质砂岩	20.5	80	0.21	80.5	22
中风化泥质砂岩	21.3	230	0.20	140.0	26

表 2 桥梁、隧道结构物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of bridge and tunnel structures

名称	重度/ (kN/m^3)	弹性模量/MPa	泊松比
桥墩	26	3 100	0.20
承台	26	3 100	0.20
桩基	26	3 100	0.20
管片	26	2 480	0.20
注浆层	24	300	0.21
盾壳	28	20 000	0.28

表 3 接触单元参数

Tab. 3 Contact unit parameters

名称	界面单元 厚度/m	最终剪力/ (kN/m^2)	剪切刚度模 量/ (kN/m^3)	法向刚度模 量/ (kN/m^3)
桩界面单元	1	210	2.48×10^4	2.48×10^5

3 数值模拟计算分析

盾构掘进会对桩基产生扰动,诱发桩基位移变形。以桥桩为基准,垂直于隧道轴线方向为横向(x 方向),盾构掘进方向为纵向(y 方向),桥桩轴向为竖向(z 方向)。现分析桩基横向位移、纵向位移以及桩基沉降,其中正、负号表示桩基位移的方向,由于桩底与隧道最小净距仅为 1.23 m,盾构施工对桩底产生较大扰动,本文增加桩底横向位移、纵向位移分析。

3.1 桩基横向水平位移

桩基位于隧道斜上方 45° 区域,桩底与隧道最小净距仅为 1.23 m,此处围岩受剪破坏最为严重,盾构掘进过程中会对桩底产生较大的扰动。桩底横向水平位移随着盾构的掘进呈现“离开—靠近—

离开”隧道的动态变化,同侧桩基的桩底横向水平位移规律一致,如图 4 所示。以 4 号桩基为例,左线盾构刀盘掘进至桩基前约 18 m 时,前方土体受侧向挤压发生位移,桩底产生离开隧道的横向水平位移;当刀盘掘进至 4 号桩基位置时,桩底横向水平位移最大,位移值为 -0.30 mm(负号表示离开隧道,正号表示靠近隧道)。盾构通过桩基后,隧道周围地层发生收敛变形,桩底发生靠近隧道的横向水平位移,盾构通过桩基 12 m 范围后,隧道支护结构阻碍桩底靠近隧道的横向水平位移,但桩身上部横向位移进一步增大,由于桥桩刚度较大,桥桩发生偏向隧道的倾斜,并在注浆压力作用下,桩底出现离开隧道的横向水平位移,且在右线隧道掘进过程中桩底离开隧道的横向水平位移持续增大。双线隧道侧穿施工完成后,同侧桩基的桩底横向水平位移表现为距离隧道越近位移越小,但对桩基的扰动程度越大。这是因为盾构通过桩基后,桩底横向水平位移出现回弹变化,且桩基与隧道间距越小位移回弹的幅度越大,对桩基的扰动也越大。

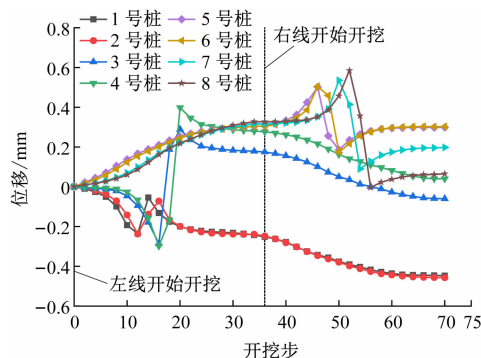


图 4 桩底横向水平位移曲线

Fig. 4 Horizontal displacement curve of the pile bottom

为研究盾构掘进过程中桩身横向水平位移变化规律,以 4 号、8 号桩基为例,绘制盾构掘进至桩基前 12 m、6 m、0 m 以及桩基后 6 m、12 m、18 m、24 m、30 m 8 个阶段桩身横向水平位移曲线,如图 5 所示。盾构掘进至桩基前 0 m 时,由于桩底受较大扰动,桩身下部发生横向变形;盾构通过桩基后,受开挖应力释放的影响,隧道上方土体向隧道中线发生位移,桩身横向水平位移快速增大,在盾构通过桩基 18 m 后桩身横向水平位移趋于稳定。由图 5 b) 可以观察到,8 号桩基在右线隧道开挖前桩身已经出现倾斜,说明远侧隧道开挖对桩基有一定的影响。

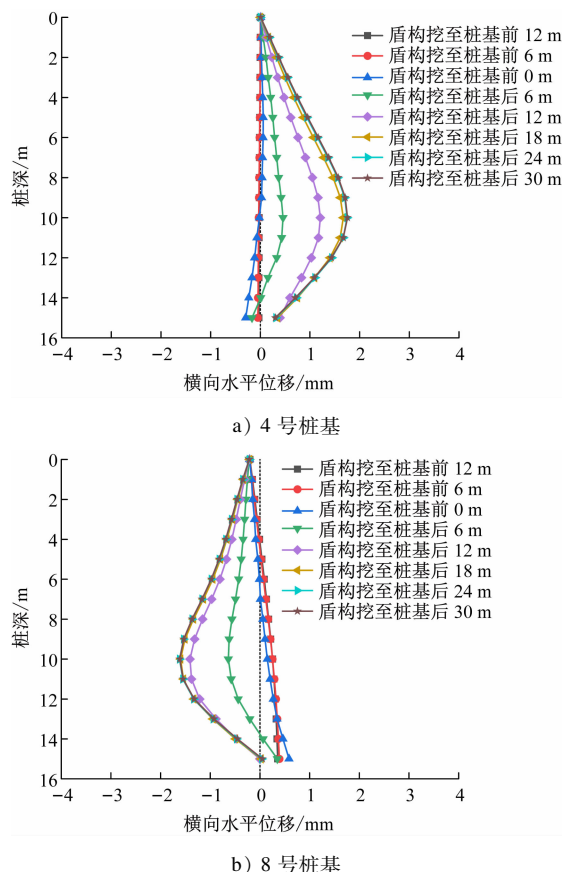


图5 桩身横向水平位移变化曲线

Fig. 5 Curve of lateral horizontal displacement change of the pile body

隧道侧穿施工完成后,桩身横向水平位移曲线如图6所示。由于土体位移沿桩身发生不均匀变化,桩身横向位移近似“C”形扰曲曲线,位移沿桩深呈先增大后减小的变化趋势,桩身横向水平位移极值位于桩深9~10 m处,同侧桩基距离隧道越近桩身横向水平位移越大。8号桩基产生的横向水平位

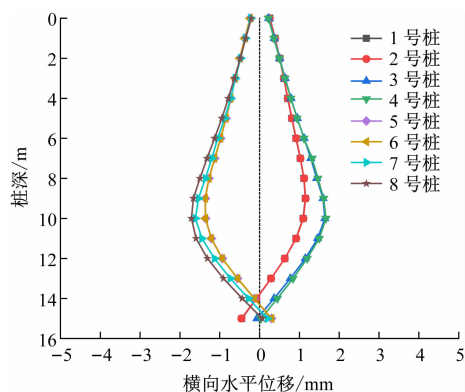


图6 隧道侧穿施工完成后桩身横向水平位移曲线

Fig. 6 Lateral horizontal displacement curve of the pile body after completion of the side-passing tunnelling

移最大,位移值为-1.72 mm,这是由于左线隧道开挖对右侧桩基有一定影响,且左线隧道先开挖先支护,左侧桩基在支护结构阻碍下,受扰动量要小于右侧桩基。

3.2 桩基纵向水平位移

桩底纵向水平位移表现为“双峰”形曲线,如图7所示。近侧隧道开挖对桩底纵向扰动远大于另侧隧道开挖,位于同侧的桩基距离隧道越近位移峰值越大。分析4号桩基桩底纵向水平位移变化,左线盾构掘进未到达桩基位置,桩底纵向水平位移快速增大,当刀盘与桩基处于同一平面时,桩底纵向水平位移达到峰值,位移峰值为+0.73 mm(+号表示盾构掘进方向),盾构通过桩基后,桩底纵向水平位移发生回弹,位移呈对称快速减小。右线掘进过程中,桩底纵向水平位移与左线掘进引发的变化规律一致,由于右线距离4号桩基较远,位移峰值及变化速率均较小。对比桩底横向水平位移变化规律可以看出,盾构掘进对桩底纵向扰动相比横向扰动更为强烈且影响范围更大。

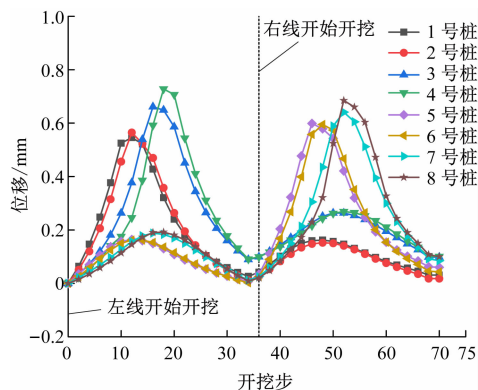


图7 桩底纵向水平位移曲线

Fig. 7 Longitudinal horizontal displacement curve of the pile bottom

绘制4号、8号桩基盾构掘进至桩基前18 m、12 m、6 m、0 m以及桩基后6 m、12 m、18 m、24 m、30 m、36 m 10个阶段桩身纵向水平位移曲线,如图8所示。盾构掘进至桩基前18~0 m范围,在掘进压力的正向挤压作用下桩身下部发生纵向水平位移;当盾构通过桩基后,桩身整体发生与掘进方向相反的纵向水平位移,盾构通过桩基12 m后桩身纵向水平位移出现回弹,桩身纵向水平位移逐渐减小。

双线隧道侧穿施工完成后,桩身纵向水平位移曲线如图9所示。从图9可以看出,桩身只是出现轻微的纵向变形,桩身基本恢复原状,结合桩底纵

向水平位移变化规律,说明盾构掘进对桩基的纵向变形影响一定程度上是可逆的。

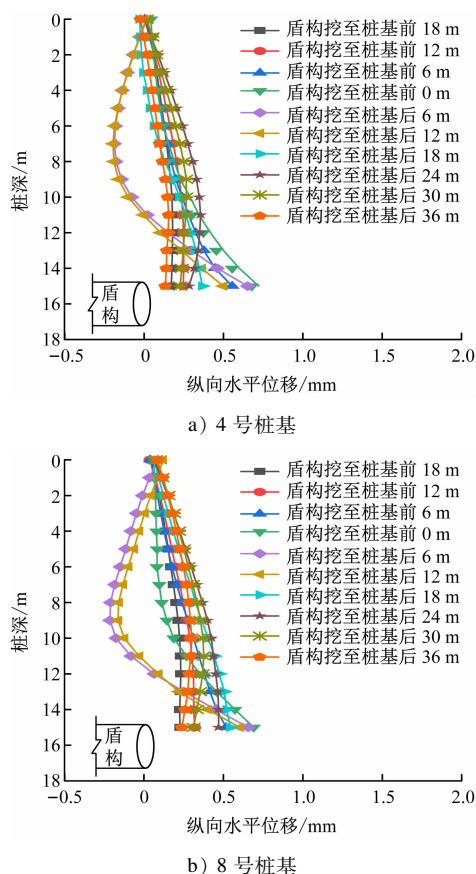


图 8 桩身纵向水平位移变化曲线

Fig. 8 Curve of longitudinal horizontal displacement variation of the pile body

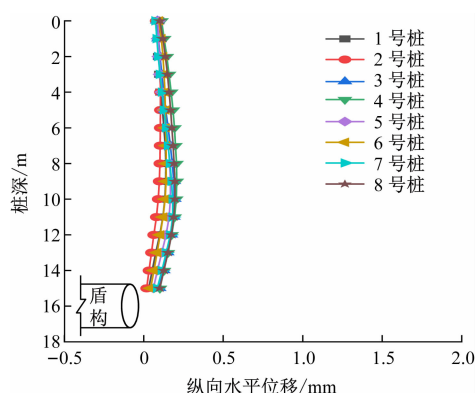


图 9 隧道侧穿施工完成后桩身纵向水平位移曲线

Fig. 9 Longitudinal horizontal displacement curve of the pile body after completion of the side-passing tunnelling

3.3 桩基沉降

盾构掘进会对周围地层产生扰动,诱发桩基发生沉降,双线隧道侧穿施工完成后,桩端最终沉降

值见表 4。由表 4 可知,位于同一侧的桩基距离隧道越近沉降越大,最大沉降发生在 4 号桩基桩底,沉降值为 4.94 mm。对比桩基横向位移、纵向位移,盾构施工对桩基沉降影响较大,桩基沉降要远大于桩基横向位移和纵向位移。距离隧道较近的 3、4、8 号桩基,桩顶沉降小于桩底沉降,桩体存在较少的拉伸变形;相反,1、2、5、6、7 号桩基,桩顶沉降大于桩底,桩体发生轻微压缩变形。

表 4 桩端最终沉降值

Tab. 4 Final settlement value of the pile end

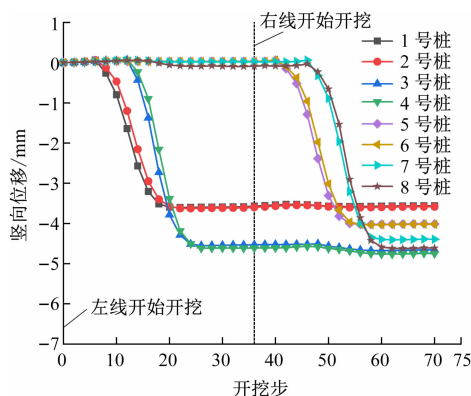
桥墩	桩基编号	桩与隧道水平净距/m	桩顶沉降值/mm	桩底沉降值/mm	桩顶、桩底位移差/mm
P7-1	1	3.13	3.56	3.15	-0.41
	2	3.13	3.58	3.18	-0.40
P7-2	3	0.76	4.66	4.80	+0.14
	4	0.54	4.75	4.94	+0.19
P6-1	5	2.07	4.01	3.80	-0.21
	6	2.07	4.02	3.83	-0.19
P6-2	7	1.34	4.39	4.30	-0.09
	8	0.63	4.61	4.79	+0.18

盾构掘进过程中,桩端沉降变化曲线如图 10 所示。盾构掘进至桩基前约 12 m 时,桩基发生轻微隆起;在盾构通过桩基后,桩基沉降急剧增大,沉降变化呈陡峭变化趋势;在盾构通过桩基约 30 m 后桩基沉降变化趋于稳定。由图 10 a) 可知,距离隧道较近的 3、4、8 号桩基,远端隧道掘进通过桩基后,桩顶发生二次沉降,这是由于在隧道施工影响范围内,桩基距离隧道较远时,隧道施工主要影响桩基的上部,对桩基下部的影响相对较小,远端隧道开挖,桩顶会出现二次沉降。

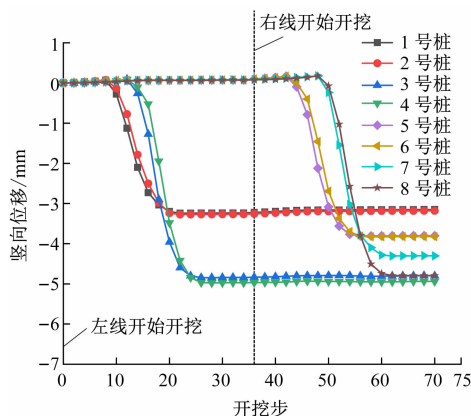
4 桥墩位移监测分析

为确保立交桥结构稳定和运营安全,盾构掘进过程中需对桥梁结构进行位移监测,现场可以根据监测数据优化盾构施工工艺和调整掘进参数。由于现场条件限制,只能对桥墩进行沉降监测,在主桥的 P6-1、P6-2、P7-1、P7-2 桥墩布设不少于 2 个沉降监测点,监测频率为 1 次/d,连续监测 47 d。左线盾构隧道开始掘进前对桥墩初始标高进行测量,盾构开挖至桩基前约 5D (D 为隧洞外直径) 开始对桥墩沉降进行监测。

通过数值模拟计算,桥墩横向、纵向水平位移



a) 桩顶沉降变化曲线



b) 桩底沉降变化曲线

图 10 桩端沉降变化曲线

Fig. 10 Settlement change curve of the pile end

均较小,盾构隧道侧穿施工完成后,P7-2 桥墩出现最大横向水平位移,但位移值仅为 $+0.71 \text{ mm}$ 。对比分析 P7-2 桥墩沉降监测数据与模拟计算值,如图 11 所示。由沉降模拟计算值可知,由于桥梁结构竖向刚度较大,桥墩沉降变化规律与桩基一致。左线盾构掘进侧向通过桥墩后,桥墩沉降呈陡峭趋势增大,盾构侧向通过桥墩 30 m 范围后沉降变化趋于稳定,且在右线盾构掘进过程中出现二次沉降。分析桥墩沉降监测数据可知,左线盾构侧向通过 P7-2 桥墩后,桥墩发生沉降,在第 8 d 沉降监测值迅速增大,现场及时对盾尾空隙进行二次补偿注浆,注浆压力提高到 0.4 MPa ,注浆效果非常明显,桥墩沉降出现明显回升,并逐渐保持稳定。右线盾构侧向通过 P7-2 桥墩后,桥墩出现轻微二次沉降,与数值模拟的沉降变化规律相符。对比监测值和数值模拟计算值,监测值普遍要小于模拟计算值,这是由于有限元软件在计算过程中采用较为保守的计算方式,以及对桥梁上部荷载简化时取了较大值有关。但数值模拟计算值与监测数据变化趋势基本一致,

从而验证了有限元软件数值模拟的可靠性。

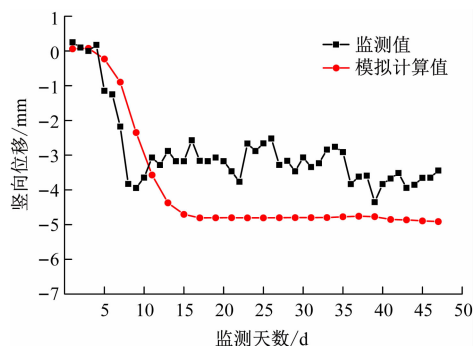


图 11 桥墩沉降的监测值与模拟计算值对比

Fig. 11 Comparison of the monitored and simulated values of viaduct pier settlement

5 结语

1) 盾构掘进时会对桩底产生较大扰动,桩底横向位移呈现“离开—靠近—离开”隧道的回弹变化,纵向位移表现为“双峰”形曲线。实际工程中,应严格控制盾构机姿态及土仓压力,保证盾构机平稳侧穿桩基以减小对桩底的扰动。

2) 桩身横向水平位移近似“C”形曲线,位移沿桩身先增大后减小;位于同侧的桩基距离隧道越近桩身横向水平位移越大,桩身横向水平位移极值发生在桩深 9 ~ 10 m 处,8 号桩基产生最大横向水平位移,其位移值为 -1.72 mm 。

3) 盾构通过桩基后,桩身发生反方向的纵向水平位移,在盾构侧向通过桩基 12 m 后桩身位移出现明显回弹变化,桩身纵向变形逐渐恢复原状,结合桩底纵向水平位移变化规律,说明盾构掘进对桩基的纵向变形影响在一定程度上是可逆的。

4) 盾构施工会引起桩基发生沉降,且远侧隧道开挖会引起桩顶出现二次沉降。同侧的桩基距离隧道越近桩端沉降越大,4 号桩基桩底沉降最大,沉降值为 4.94 mm 。监测数据表明,二次补偿注浆后桥墩会发生隆起。实际工程中应对桩基有针对性地加固防护,重点监测桥墩的沉降变化,及时对管片后空隙进行二次补偿注浆。

参考文献

- [1] 许原骑,单治钢,甘鹏路,等. 地铁并行隧道掘进对近接群桩基础的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 1): 2935.
XU Yuanqi, SHAN Zhigang, GAN Penglu, et al. Study on the influence of parallel tunnel excavation on adjacent pile groups[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40 (S1): 2935.
- [2] 黄戡, 孙逸玮, 杨伟军, 等. 基于渗流应力耦合的盾构隧道开挖对邻近桥梁桩基的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 983.
HUANG Kan, SUN Yiwei, YANG Weijun, et al. Influence of shield tunneling on pile foundation of adjacent bridge using fluid-soil coupling theory[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3): 983.
- [3] 袁海平, 王斌, 朱大勇, 等. 盾构近距侧穿高架桥桩的施工力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1457.
YUAN Haiping, WANG Bin, ZHU Dayong, et al. Mechanical behaviours of a shield tunnel adjacent to existing viaduct pile foundations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1457.
- [4] 程康, 俞帆, 梁荣柱, 等. 考虑桩基剪切效应的盾构开挖对邻近桩基水平向变形分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊2): 178.
CHENG Kang, YU Fan, LIANG Rongzhu, et al. Analysis of horizontal deformation of adjacent pile foundation by shield excavation considering shear effect of pile foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 178.
- [5] 郭一斌, 张立明, 郑刚, 等. 盾构施工对大型立交桥超长桩工作性状的影响[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2941.
GUO Yibin, ZHANG Liming, ZHENG Gang, et al. Influence of shield tunneling on working performance of large interchange's super-long piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2941.
- [6] 漆伟强, 匡亚洲, 杨志勇, 等. 砂卵石地层盾构近距离侧穿匝道桥桩变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊2): 679.
QI Weiqiang, KUANG Yazhou, YANG Zhiyong, et al. Study on deformation of bridge pile in sandy pebble stratum with shield passing through ramp at close range[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S2): 679.
- [7] 郑宏利, 胡继波. 盾构隧道侧穿施工对既有立交桥结构体系的影响机制分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 473.
ZHENG Hongli, HU Jibo. Mechanism analysis of influence of shield tunnel side-crossing construction on existing overpass structure system[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 473.
- [8] 李明睿, 陈国平, 范秀江, 等. 盾构施工对临近桩基影响的数值模拟及参数分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(1): 45.
LI Mingrui, CHEN Guoping, FAN Xiujiang, et al. Numerical study and parametric analysis of influence of tunnel excavation on adjacent pile foundation[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(1): 45.
- [9] 周鑫, 杨建辉, 刘涛. 盾构法施工对近距离侧穿桥梁桩基的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(2): 586.
ZHOU Xin, YANG Jianhui, LIU Tao. Analysis on the influence of shield construction on lateral and closely cross bridge pile foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(2): 586.
- 收稿日期:2022-05-22 修回日期:2022-11-02 出版日期:2024-09-10
Received:2022-05-22 Revised:2022-11-02 Published:2024-09-10
- 第一作者:麻凤海,教授,xkb@vip.163.com
通信作者:王其,助理工程师,120321382@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 57 页)

- [2] 赵鹏, 赵玉海. 浅论站台门绝缘及与钢轨等电位的安全措施[J]. 科技资讯, 2019, 17(33): 76.
ZHAO Peng, ZHAO Yuhai. Discussion on safety measures of screen door insulation and equipotential with rail[J]. Science & Technology Information, 2019, 17(33): 76.
- [3] 吴卫海, 陈金伟. 地铁车站站台门放电现象分析和防护[J]. 机电工程技术, 2017, 46(7): 165.
WU Weihai, CHEN Jinwei. Analysis and protection of spark discharge of platform screen door in metro station[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2017, 46(7): 165.
- [4] 梁绍昌. 地铁站台站台门在线绝缘监测装置的研制[J]. 科技风, 2018(18): 13.
LIANG Shaochang. Development of on-line insulation monitoring device for subway platform screen door[J]. Technology Wind, 2018(18): 13.
- [5] 裴文龙. 城市轨道交通钢轨电位与杂散电流综合抑制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
PEI Wenlong. Research on rail potential and stray current comprehensive suppression for urban rail transit[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [6] 宋奇吼, 杨飏, 童岩峰, 等. 南京地铁 1 号线轨电位异常的抑制方法[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 114.
SONG Qihou, YANG Yang, TONG Yanfeng, et al. Research on the control of abnormal rail potential for Nanjing Metro Line 1[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(4): 114.
- 收稿日期:2023-03-08 修回日期:2023-04-10 出版日期:2024-09-10
Received:2023-03-08 Revised:2023-04-10 Published:2024-09-10
- 通信作者:张明锐,教授,zmr@tongji.edu.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license