

盾构隧道近接侧穿引起桥梁桩体的变形规律^{*}王治宇¹ 杨松松^{2,3} 禹鹏飞¹ 李 顺¹ 章定文^{2,3**}

(1. 中建八局轨道交通建设有限公司, 210046, 南京; 2. 东南大学交通学院, 211189, 南京;

3. 道路交通工程国家级实验教学示范中心(东南大学), 211189, 南京//第一作者, 工程师)

摘 要 目的: 当盾构隧道侧穿临近桥梁的桩体时, 会引起桩体发生一定的竖向变形和水平变形, 因此有必要对桥梁桩体的变形规律进行研究。方法: 建立数值计算模型, 并进行可靠性验证; 分析8根桩体的水平变形量及沉降量; 基于数值计算模型分析盾构隧道施工时, 各桩体 x 向水平变形量、 y 向水平变形量及沉降量; 分析盾构施工桩体 x 向水平变形量的影响因素; 对比分析盾构施工对各桩体实际沉降量的影响。结果及结论: 距离左线盾构隧道最近的1号桩的沉降量最大, 2号桩—8号桩的沉降量显著小于1号桩; 右线盾构隧道施工产生的扰动对距离右线盾构隧道较远的桩体影响较小; 盾构侧穿桥基对桩体水平 x 向的变形影响最为显著; 随着盾构隧道直径的增大, 桩体的最大水平变形逐渐增大; 随着隧道埋深的增加, 桩体的 x 向最大水平变形量先增大后逐渐减小。盾构侧穿过程会导致桩基产生较大的沉降, 贯通后, 土体负摩阻力将会消失, 进而使得桩体产生一定的回弹。

关键词 盾构隧道; 近接侧穿; 桥梁桩体

中图分类号 U455.3⁺9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.004

Law of Bridge Pile Deformation Induced by Shield Tunnel Side-passing in Proximity

WANG Zhiyu, YANG Songsong, YU Pengfei, LI Shun, ZHANG Dingwen

Abstract Objective: When a shield tunnel passes bridge piles on the side in proximity, vertical and horizontal deformation can be caused in the piles. Therefore, it is necessary to study the deformation law of bridge piles under such circumstances. Method: A numerical calculation model is established and validated for reliability. The horizontal deformation and settlement of eight piles are analyzed. Based on the numerical calculation model, the x -direction horizontal deformation, y -direction horizontal deformation, and settlement of each pile during shield tunneling are analyzed. The influencing factors of shield tunneling pile x -direction horizontal deformation is investigated.

The impact of shield tunneling on the actual settlement of each pile is compared and analyzed. Result & Conclusion: The No. 1 pile that is closest to left-line shield tunnel demonstrates the largest settlement, while the settlements of piles No. 2 to No. 8 are significantly smaller than that of pile No. 1. The disturbance caused by right-line shield tunneling had a minor impact on the piles farther away from the right-line shield tunnel. Shield tunnel side-passing bridge foundation has the most significant impact on pile horizontal x -direction deformation. As the shield tunnel diameter increases, the pile maximum horizontal deformation gradually increases. As the tunnel buried depth increases, the pile maximum x -direction horizontal deformation initially increases and then gradually decreases. The shield tunnel side-passing process will lead to evident settlement of pile foundation, and after passing through the soil, the negative skin friction would disappear, resulting in a certain amount of rebound in the piles.

Key words shield tunnel; side-passing in proximity; bridge pile

First-author's address China Construction Eighth Bureau Rail Transit Construction Co., Ltd., 210046, Nanjing, China

盾构施工导致的地层损失将会引起隧道周围土体产生运动, 当盾构隧道侧穿临近桥梁的桩体时, 会引起桩体发生一定的竖向变形和水平变形, 一般采用两阶段法计算盾构施工对桥梁桩体的影响。两阶段法以 Winkler 弹性地基梁和荷载传递法为基础, 第一阶段采用解析解计算隧道开挖引起的土体自由位移场, 并用三次曲线进行拟合; 第二阶段基于 Winkler 地基模型, 将盾构隧道施工引起的周围土体竖向位移转化为荷载施加在桩体上, 通过弹性地基梁叠加原理, 计算单桩由于盾构隧道施工引起的附加位移。文献[1]基于两阶段法研究盾构

^{*} 国家自然科学基金资助项目(52078129)

^{**} 通信作者

隧道对桩体的沉降影响。文献[2]基于现场实测数据研究盾构隧道侧穿高铁桥桩施工过程中对群桩的影响,研究表明,基桩变形最不利位置位于盾构隧道底部以上部位。文献[3]采用数值模拟方法,研究盾构隧道下穿既有高铁桥墩对既有桩体的影响,研究表明,采用隔离桩可以有效减少盾构施工的影响。

目前,由盾构隧道施工引起的桩体沉降计算公式可以较为准确地计算出盾构施工对桩体变形的影响,但在盾构侧穿桩体后,桩体周围土体将会产生固结,施加在桩侧的负摩阻力逐渐消失,进而引起桥梁桩体出现一定的回弹。基于施工现场长期的桩体沉降监测结果,将盾构施工对桩体的影响分为两个阶段:第一阶段为盾构隧道施工对桩体沉降的影响;第二阶段为桩周土体固结,桩侧负摩阻力消散,桩端持力层回弹引起的桩体回弹阶段。本文建立了盾构侧穿桩体的数值计算模型,分析了8根桩体的水平变形量及沉降量,分析了盾构施工桩体x向水平变形量的影响因素,最后还对比分析了盾构施工对各桩体实际沉降量的影响。本文研究可为盾构隧道近距离侧穿桥梁桩体的水平变形及沉降控制提供理论参考。

1 工程概况

宁句城际轨道交通工程 DS6-TA02 杨东盾构区间北起东大街站,沿宁杭南路向南,下穿河滨北路,里程 K41+855.85 处下穿句容河,双线侧穿绕避句容河桥,沿着宁杭南路继续向南至东句区间盾构井。句容河南门桥的桥桩是直径为 1.5 m 的钻孔灌注桩,桩长为 34 m,桩体埋深为 27 m,相邻桩体间距为 4.20~5.45 m。盾构隧道左右线与 2 号桥墩桥桩之间的最短距离分别为 4.04 m、4.31 m。左线隧道埋深为 9.67 m,右线隧道埋深为 9.31 m。盾构隧道全断面位于中等风化粉砂质泥岩中,上部为强风化粉砂质泥岩、含碎石粉质黏土及淤泥质填土等,属于弱微透水层,地表水对本工程影响较小。句容河南门桥桥台群桩与隧道位置关系示意图如图 1 所示。每个桥台共有 8 根桩体,2 号桥台 8 根桩体按从左线到右线编号为 1~8。盾构区间土层地质条件与衬砌管片参数如表 1 所示。

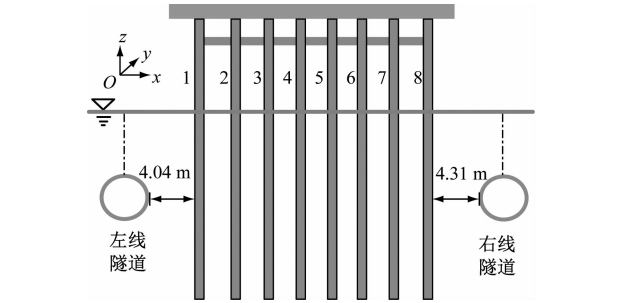


图 1 句容河南门桥桥台群桩与隧道位置关系示意图
Fig. 1 Position relation diagram of Jurong River South Gate Bridge abutment pile group and tunnel

表 1 盾构区间土层地质条件与衬砌管片参数
Tab. 1 Parameters of the shield interval soil layer stratigraphical conditions and lining segments

名称	密度/ (g/cm ³)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	土层厚 度/m
杂填土	1 677.62	6.23	0.30	4.7×10 ³	13.9	1.92
粉质黏土	1 697.36	10.02	0.28	1.56×10 ⁴	17.7	9.95
强风化粉砂质泥岩	2 317.62	15.60	0.25	1.56×10 ⁴	28.8	4.24
中风化粉砂质泥岩	2 460.00	22.50	0.23	3.02×10 ⁴	37.0	17.81
管片	2 700.00	34 500.00	0.18	—	—	—
桩体	2 500.00	25 000.00	0.20	—	—	—

2 数值计算模型及其验证

2.1 数值计算模型

采用数值模拟软件 FLAC3D 对盾构侧穿桥梁桩体进行模拟,模型尺寸应满足边界条件要求,盾构隧道开挖对周围土体的影响约为 3 倍的开挖直径。根据上述因素确定的模型尺寸为 80 m(长)×25 m(高),盾构开挖深度为 24 m(按 20 环长度计),模型共生成 56 432 个实体单元,61 537 个节点。桩身用实体单元进行模拟,并用接触面单元模拟桩-土间的关系;盾构管片用壳结构单元进行模拟;土体材料变形采用摩尔-库伦弹塑性本构模型;隧道开挖采用空单元来模拟。模型除顶部为自由边界外,其他边界均采用法向约束,注浆压力为 0.2 MPa。盾构侧穿桩体模型软件截图如图 2 所示。数值模拟的土层参数与实际工况保持一致,桩土接触面的基本力学参数为:法向刚度和切向刚度均为 2.9×10⁷ N/m;内摩擦角为 30°;黏聚力为 800 kPa。

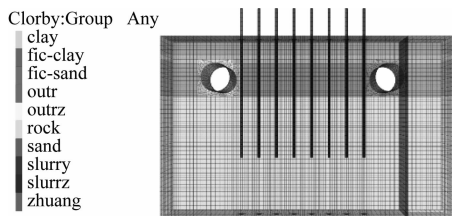


图2 盾构侧穿桩体模型软件截图

Fig. 2 Software screenshot of shield side-passing pile model

2.2 模型验证

盾构侧穿句容河南门桥现场实测及数值模拟的各桩体沉降对比如图3所示。由图3 a)可知,盾构侧穿桥桩过程中引起桩体的实测最终沉降量为7.0~11.0 mm,其中距离盾构隧道距离较近的1号桩与8号桩的沉降量均大于其余桩体。由图3 b)可知,由数值模拟获得的桩体最终沉降量为4.9~7.3 mm,其沉降特点也是距离隧道较近的1号桩与8号桩的沉降量最大。对比数值模拟结果与现场实测桩体沉降值可知,数值模拟结果与实测桩体沉降值吻合得较好,验证了所提数值计算模型的可靠性及准确性。下文将基于该数值计算模型进行盾构侧穿对桩体水平变形及沉降的影响因素研究。

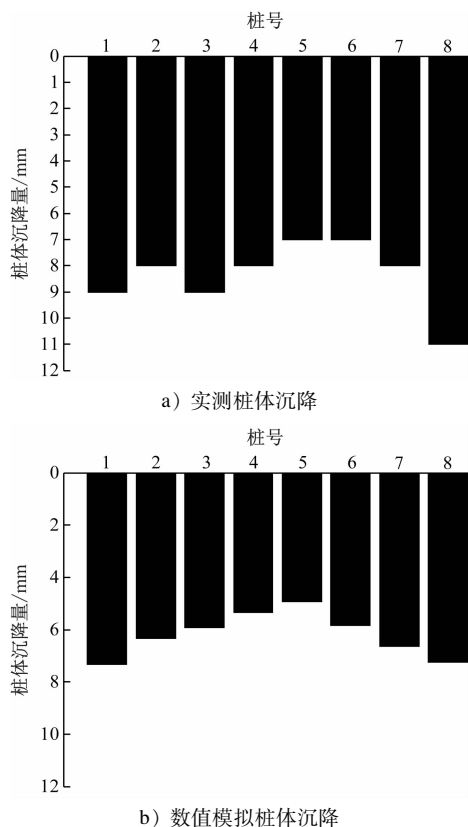


图3 现场实测及数值模拟的各桩体沉降对比

Fig. 3 Comparison of field-measured and numerical simulated pile settlements

3 基于数值模拟的桩体水平变形及沉降量分析

3.1 桩体沉降量

左右线盾构隧道施工时,不同桩体埋深下,各桩体的沉降量如图4所示。由图4 a)可知:距离左线盾构隧道最近的1号桩的沉降量最大,为3.3 mm;距离左线盾构隧道最远的8号桩的沉降量仅为1.6 mm;2号桩—8号桩的沉降量显著小于1号桩,这不仅是由于1号桩体距离左线盾构隧道最近,还因为1号桩产生了遮挡效应,减缓了盾构隧道对周围桩体产生的拖拽力。由图4 b)可知:在右线盾构贯通后,1号桩—8号桩的沉降量发生了相应的变化,紧邻右线盾构隧道的8号桩沉降量迅速增加,此时紧邻左线盾构隧道的1号桩的沉降量为3.6 mm,紧邻右线盾构隧道的8号桩的沉降量为3.2 mm。由此可以看出,右线盾构侧穿桩体时,其对距离较远的1号桩也产生了一定的沉降影响,1号桩在右线盾构隧道施工时桩端的沉降增量为0.3 mm,右线盾构隧道施工产生的扰动对距离右线盾构隧道较远的桩体影响较小。

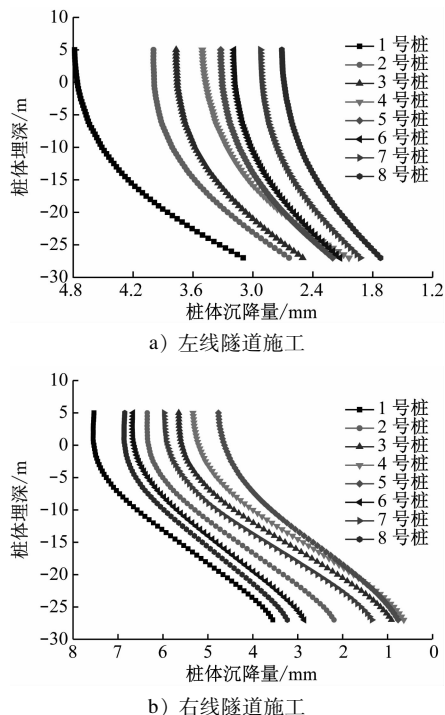


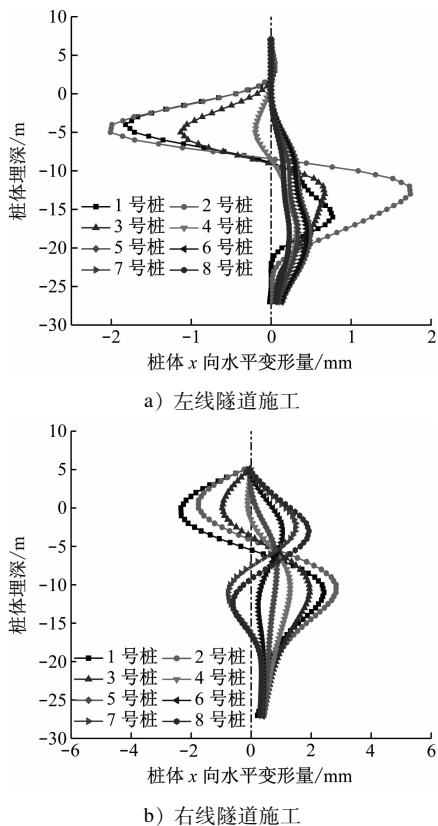
图4 不同桩体埋深下各桩体的沉降量

Fig. 4 Settlement amount of pile at different pile buried depths

3.2 桩体水平变形

左右线盾构隧道施工时,不同桩体埋深下,各

桩体的 x 向水平变形如图 5 所示。由图 5 可知:临近左线盾构隧道的 1 号桩—3 号桩的 x 向水平变形较大,在桩体入土深度 5 m 位置处的桩体 x 向水平变形达到最大,1 号桩的 x 向水平变形量仅为 2 mm,土体以上部分的桩体 x 向水平变形量接近于 0;右线盾构隧道侧穿后,临近右线盾构隧道的 6 号桩—8 号桩的 x 向水平变形量逐渐增加,在桩体入土深度 20 m 以下位置处,桩体的 x 向水平变形量基本趋于一致。



注: x 向水平变形以向左线隧道方向变形为负,以向右线隧道方向变形为正;余类同。

图 5 不同桩体埋深下各桩体的 x 向水平变形

Fig. 5 Horizontal deformation of pile groups in x -direction at different pile buried depths

盾构隧道施工时,不同桩体埋深下,各桩体的 y 向水平变形如图 6 所示。由图 6 可知,临近盾构隧道的 1 号桩和 8 号桩在 y 向的水平变形量明显大于其余桩体变形量,8 号桩的最大 y 向水平变形量为 1.0 mm,最大 y 向水平变形点与隧道中轴线埋深相同。

4 盾构施工对桩体 x 向水平变形的影响因素

由前文分析可知,盾构隧道侧穿桥基对 y 向水

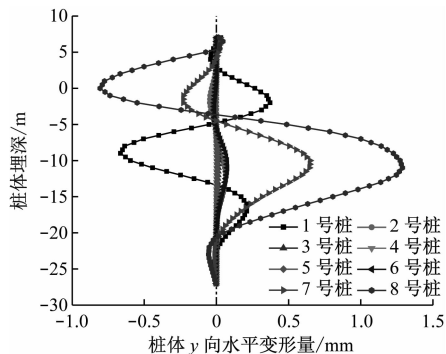


图 6 不同桩体埋深下各桩体的 y 向水平变形

Fig. 6 Horizontal deformation of pile groups in y -direction at different pile buried depths

平变形的影响较小。因此,下文将只分析盾构隧道开挖对桩体 x 向水平变形的影响。

以 1 号桩为例,研究不同盾构隧道直径下,不同桩体埋深对 1 号桩 x 向水平变形的影响,如图 7 所示。由图 7 可知,改变盾构隧道直径后,桩体的最大水平变形逐渐增大,且其最大水平位置点也逐渐上移。这是由于增大盾构直径后,其盾构施工的影响范围也相应有所增加,导致桩体的水平变形量相应增加。

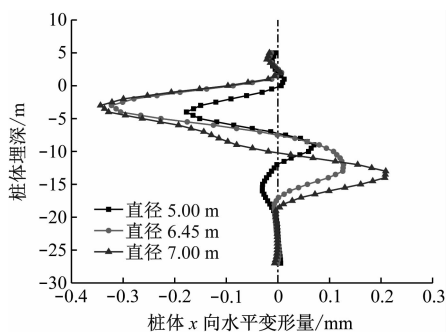
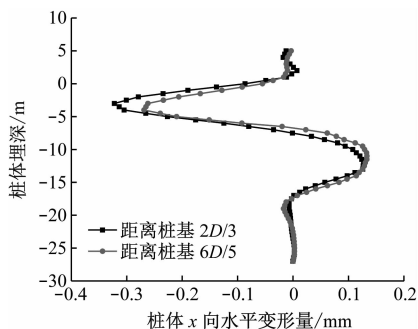


图 7 不同盾构隧道直径下不同桩体埋深对 1 号桩 x 向水平变形的影响

Fig. 7 Influence of different pile buried depths on No. 1 pile x -direction horizontal deformation under different shield tunnel diameter conditions

以 1 号桩为例,研究不同桩体与隧道间距条件下,不同桩体埋深对 1 号桩 x 向水平变形的影响,如图 8 所示。由图 8 可知,随着桩体与隧道间距的增加,桩体的水平变形量有所减少,但其最大水平位置点没有发生明显的改变,说明桩体与隧道间距对桩体最大水平位移点的影响不大。

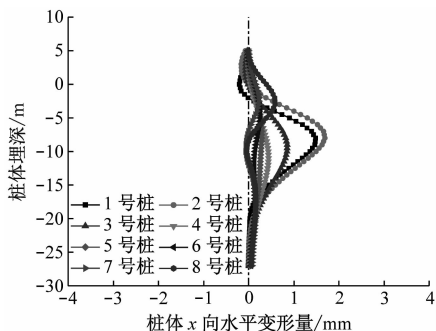


注: D 为盾构隧道直径。

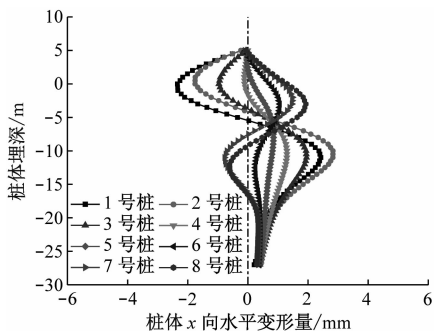
图8 不同桩体与隧道间距条件下不同桩体埋深对1号桩 x 向水平变形的影响

Fig. 8 Influence of different pile buried depths on No. 1 pile x -direction horizontal deformation under different pile and tunnel spacing conditions

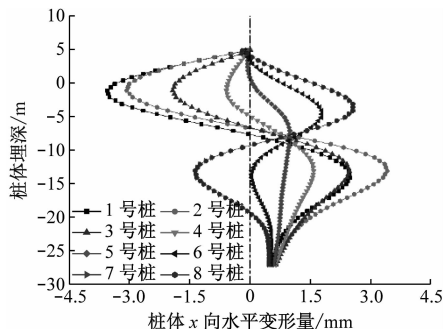
为了分析盾构隧道开挖对桩体 x 向水平变形的影响,研究不同隧道埋深条件下桩体的变形特征。数值模拟参数与施工现场的实际参数保持一致。取 $D=6.48$ m,单桩轴线与隧道中心线之间的距离为 3 m,地层损失比为 1.67%,桩长为 34 m,桩体埋深为 27 m,桩径为 1.5 m。当隧道埋深为 $1.0D$ 、 $1.5D$ 、 $2.0D$ 、 $2.5D$ 和 $3.0D$ 时,各桩体的 x 向水平变形如图9所示。由图9可知,随着隧道埋深的增加,桩体的 x 向最大水平变形量先增大后逐渐减小。



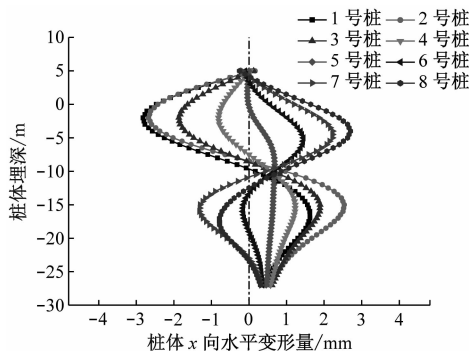
a) 埋深为 $1.0D$, 双线盾构贯通



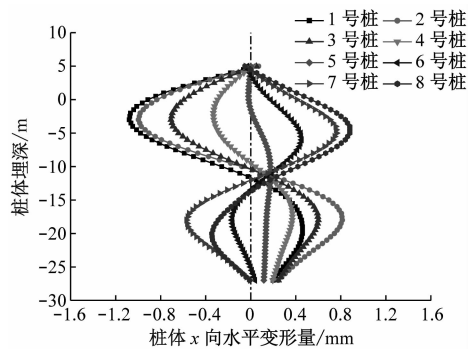
b) 埋深为 $1.5D$, 双线盾构贯通



c) 埋深为 $2.0D$, 双线盾构贯通



d) 埋深为 $2.5D$, 双线盾构贯通



e) 埋深为 $3.0D$, 双线盾构贯通

图9 不同隧道埋深条件下不同桩体埋深对各桩体的 x 向水平变形的影响

Fig. 9 Influence of different pile buried depths on pile x -direction horizontal deformation under different tunnel buried depth conditions

5 盾构施工对桩体实际沉降量的影响

盾构推进速度约为 5 ~ 8 环/d,不同监测时间下,各桩体实际沉降量对比如图10所示。由图10可知:①左线隧道盾构过程中,1号桩—8号桩的沉降量逐渐增大;盾构掌子面通过桥桩后,所有桩体的累计沉降量达到最大值,靠近左线盾构隧道的1号桩沉降量为 7.0 mm,距离左线盾构隧道最远的8号桩沉降量为 5.5 mm;盾构通过桥桩后,8根桥桩均出现了回弹现象;在盾构贯通桩体的 7 ~ 8 d 后,

桩体的回弹趋于稳定;左线盾构通过后,1 号桩的回弹量为 3.5 mm,其余桩体的回弹量约为 3.0 mm,左线盾构时桩体的回弹速率约为 0.375 mm/d。②右线隧道盾构过程中,临近隧道的桩体开始产生沉降;在盾构隧道侧穿桥台过程中,所有桩体的沉降量均达到最大值,1 号桩体沉降量从 4.0 mm 逐渐增加到 13.0 mm;盾构通过桥桩后,所有桩体的沉降量稳定在 5.0 ~ 10.0 mm;在右线盾构通过桥桩的 7 ~ 8 d 后,桩体的回弹量约为 2.5 ~ 5.0 mm;右线盾构时,桩体的回弹速率约为 0.310 ~ 0.630 mm/d。

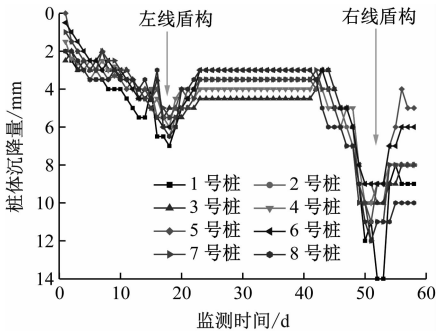
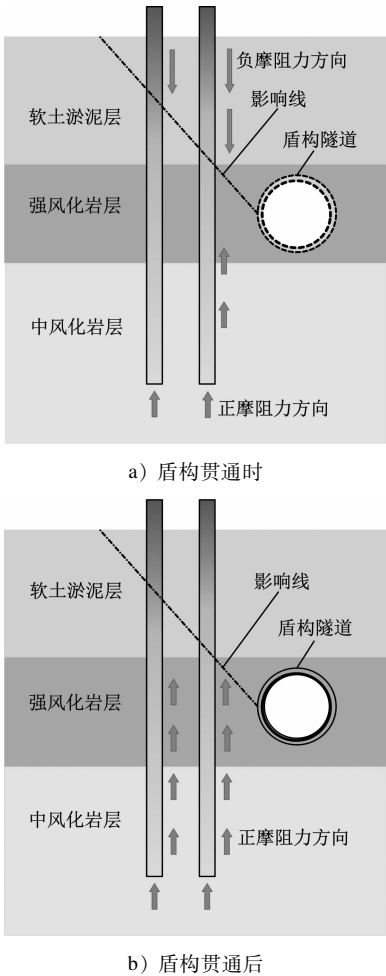


图 10 不同监测时间下各桩体实际沉降量对比
Fig. 10 Comparison of pile actual settlement amount at different monitoring time periods

对比左右线盾构侧穿桥基的桩体回弹速率可以发现:临近右线隧道的 7 号桩和 8 号桩的回弹速率显著大于左线隧道;左线盾构贯通过程中,桥梁桩体的沉降量相对较小,且其桩体回弹量也明显小于右线隧道侧穿后的桩体回弹量。这主要是由于盾构贯通过程中,掌子面附近的土体受到较大的扰动,掌子面附近土体逐渐向刀盘附近移动,导致掌子面附近土体对桩基础产生了负摩阻力。

盾构贯通过程中,桩体的受力示意图如图 11 所示。盾构影响线以上的土体产生了向下的移动趋势,引起桩体周围土体产生较大的负摩阻力。由于该群桩属于端承摩擦桩体,在桩体荷载增大后,施加在桩尖持力层的荷载也逐渐增大,引起桩端持力层中风化泥岩的变形量逐渐增加。在盾构掌子面通过桥桩后,桩体周围土体逐渐稳定,盾尾间隙土体移动对桩体的影响也逐渐减小,桩体周围土体逐渐固结,这个过程对于桩体来说是一个显著的加载再逐级卸载的过程,施加在桩端的地基反力大于桩体的荷载,桩端持力层在逐级卸荷过程中发生回弹(见图 11 b))。左线盾构贯穿过程中,桩体的回弹量为 1.8 ~ 3.0 mm;右线盾构贯穿过程中,桩体的回

弹量为 2.5 ~ 5.0 mm,这说明重复施工扰动会增加群桩的沉降量。



注:影响线之上桩体受到的是负摩阻力,影响线之下桩体受到的是正摩阻力。

图 11 盾构贯通过程桩体受力示意图
Fig. 11 Diagram of pile stress during shield penetration process

6 结语

本文研究了盾构隧道侧穿桩基础对桥梁群桩桩基础的水平变形与沉降影响,提出了盾构侧穿桥桩对桩体的水平变形影响规律及计算方法,对比分析了盾构施工对各桩体实际沉降量的影响。同时,根据长期的桥桩沉降监测结果可以发现,盾构隧道侧穿会引起端承摩擦桩发生显著的回弹现象。在盾构远离桩体后,桩体周围土体逐渐发生固结,导致施加在桩侧的负摩阻力逐渐消失,这是导致桩体出现回弹现象的主要原因。

(下转第 32 页)

4 结语

本文立足于广州地铁新一轮线网建设,研究了永临结合的装配式车站方案,并对其构件拼装模式和梁型比选方面进行了研究。主要获得以下几个结论:

1) 永临结合方案通过将临时围护结构的地连墙和支撑兼做永久使用的车站侧墙和横梁的方式,不但节省了施工工期,还避免了临时构件的浪费。

2) 采用铰接模式连接顶板、中板与侧墙,这对于施工速度及施工精确度有较大的提升,同时还能降低施工难度。通过加强连接节点和加大构件尺寸可以满足构件的结构安全要求,整体造价的增幅处于可接受范围。

3) 对于顶板而言,由于其受力较大,适合采用密铺同规格横梁的拼装模式;对于中板而言,可将预制板纵向搭接在横梁上,以便于对楼板灵活开孔。对于大跨度的装配式地铁车站,中板梁内力较大,也可采用密铺横向预制板或密铺同规格横梁的拼装模式。

4) 对预制横纵梁构件采用不同梁型(预制普通混凝土梁、预制型钢混凝土梁、钢-混组合梁和预应力箱梁)进行了适用性分析和经济性比选。当横向跨度较小时,预制普通混凝土梁具有适应性广、工艺简单的优势。随着横向跨度的增大,采用预应力箱梁能有效控制构件的造价、自重及尺寸。

5) 永临结合方案在工程造价上的优势较为明显,但在实际应用中也存在一定的问题,如地连墙接缝防水及耐久性问题、支撑与楼板的空间协调性问题、开挖阶段与永久使用阶段的不同受力模式问题、装配式构件的拼装模式和连接方式问题。对于

上述几个问题的研究及其解决方法是今后永临结合装配式地铁车站研究及应用的关键。

参考文献

- [1] 杨秀仁. 明挖地铁站预制装配结构理论与实践[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
YANG Xiuren. Theory and application of prefabricated open-cut metro station structure[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
 - [2] 杨勇. “预制+现浇”叠合拱壳工艺在地铁车站中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(3): 203.
YANG Yong. Application of 'prefabrication + cast-in-situ' superposition arch shell technology in metro station construction[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(3): 203.
 - [3] 郭泽, 吴春冬, 蒋小锐. 采用型钢混凝土组合结构的新型地铁装配式车站结构研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(17): 119.
WU Ze, WU Chundong, JIANG Xiaorui. Study on new subway assembled station structure with steel reinforced concrete composite structure[J]. Engineering and Technological Research, 2021, 6(17): 119.
 - [4] 张建芳. 城市轨道交通装配式车站混凝土结构造价影响因素及投资分析[J]. 铁路工程技术与经济, 2021, 36(1): 25.
ZHANG Jianfang. Cost factors and investment analysis about the prefabricated concrete structure of station for urban rail transit projects[J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2021, 36(1): 25.
 - [5] 裴行凯, 麦家儿, 何冠鸿, 等. 装配式地铁车站二次结构构件连接节点性能研究[J]. 广东土木与建筑, 2019, 26(11): 101.
PEI Xingkai, MAI Jiaer, HE Guanhong, et al. Research on performance of connection nodes of secondary structural members in prefabricated metro stations[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2019, 26(11): 101.
- (收稿日期:2022-08-01)
-
- (上接第 26 页)
- ## 参考文献
- [1] 可文海, 管凌霄, 薛齐, 等. 盾构隧道开挖引起的邻近群桩竖向位移研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(8): 2353.
KE Wenhai, GUAN Lingxiao, XUE Qi, et al. Study on vertical displacement of adjacent pile group caused by shield tunnelling[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(8): 2353.
 - [2] 赵晓勇. 地铁盾构隧道侧穿高铁桥群桩设置隔离桩影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(5): 116.
ZHAO Xiaoyong. Influence analysis of setting separation piles for metro shield tunnel side-crossing high-speed railway bridge pile groups[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(5): 116.
 - [3] 周智. 地铁盾构隧道下穿既有高铁桥数值模拟及实测施工影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 140.
ZHOU Zhi. Numerical simulation and field measured construction influence analysis of metro shield tunnel under-passing existing high-speed railway bridge[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(5): 140.
- (收稿日期:2021-04-09)