

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.034



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



盾构施工对临近桩基影响的数值模拟及参数分析

李明睿¹, 陈国平², 范秀江², 徐平原², 丁士龙², 孙志浩¹, 徐长节^{1,3}

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058; 2. 浙江省大成建设集团有限公司, 杭州 310012;
3. 华东交通大学 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室; 江西省地下空间技术开发
工程研究中心, 南昌 330013)

摘要:采用数值模拟软件对盾构隧道施工近距离下穿桩基进行三维仿真模拟,研究双线盾构动态掘进时桩基位移的变化。数值模拟实现了盾构施工时的步步掘进,考虑了土仓压力、注浆压力、盾构与土体摩擦力等施工参数的影响;利用 PLAXIS 3D 的固结计算,考虑盾构机自重对土体的固结作用引起的地层沉降,并由此考虑开挖速度对桩基位移的影响。计算结果表明:隧道开挖将导致桩基发生沉降、侧移以及倾斜,桩基的整体位移以及倾斜都随盾构施工的进行不断增加。施工参数敏感性分析表明:增大开挖速度可以有效控制桩基位移,但当开挖速度增大至一定程度时,开挖速度对桩基的影响逐渐减小;双线隧道同步开挖时对桩基的影响比双线分别开挖时小。

关键词:盾构隧道;隧道施工;开挖速度;桩基位移

中图分类号:U455.43 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0045-08

Numerical study and parametric analysis of influence of tunnel excavation on adjacent pile foundation

LI Mingrui¹, CHEN Guoping², FAN Xiujiang², XU Pingyuan², DING Shilong²,
SUN Zhihao¹, XU Changjie^{1,3}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China;
2. Zhejiang Dacheng Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310012, P. R. China; 3. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering; Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China)

Abstract: To study the change of the pile foundation displacement during the dynamic excavation of the double-route shield tunnel, three-dimensional simulation of shield tunneling under-crossing pile foundation is performed with a finite element package, PLAXIS 3D. Numerical simulation realizes the step-by-step

收稿日期:2020-11-26

基金项目:国家杰出青年科学基金(51725802);国家自然科学基金(51878276);浙江省自然科学基金委员会-华东院联合基金(LHZ19E080001)

作者简介:李明睿(1996-),男,主要从事隧道工程研究,E-mail:21960450@zju.edu.cn.

徐长节(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:xucj@zju.edu.cn.

Received:2020-11-26

Foundation items: The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 51725802); National Natural Science Foundation of China (No. 51878276); Zhejiang Province Natural Science Fund Committee-East China Mutual Funds (No. LHZ19E080001)

Author brief: LI Mingrui (1996-), main research interest: tunnel engineering, E-mail: 21960450@zju.edu.cn.
XU Changjie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xucj@zju.edu.cn.

advancing during shield tunnel excavation by taking into account the influence of earth pressure in soil warehouse, grouting pressure, and friction between the shield and the soil. Apart from that, using consolidation calculation of PLAXIS 3D, the paper evaluate the ground settlement caused by consolidation of the shield's own weight on the soil, and further evaluated the impact of the excavation speed on the pile displacement. The calculation results show that the tunnel excavation will cause the settlement, lateral displacement and tilt of the pile foundation, and the overall displacement and tilt of the pile foundation can continue to increase with progress of the shield tunnel excavation. The sensitivity analysis of construction parameters reveals that: increasing the excavation speed can effectively control the displacement of the pile foundation, but when the excavation speed increases to a certain extent, the impact of the excavation speed on the pile foundation is significantly reduced; The effect of simultaneous excavation of the double-route tunnel on the pile foundation is less significant than that of the separated double-route excavation.

Keywords: shield tunnel; tunnel excavation; excavation speed; pile displacement

随着经济与社会的蓬勃发展,地铁越来越广泛地应用于城市建设中,而由于城市建筑物密集,盾构隧道施工将不可避免地近距离穿越临近地下建筑物,如桥梁桩基等。盾构施工穿越桥梁桩基时对周围土体的扰动将使土体发生位移,从而造成对桩基受力及变形的影响,严重时甚至导致桩基的破坏,或者桩端位移太大影响上部结构的正常使用。因此,对盾构施工近距离穿越桩基的影响研究具有重要的工程意义。

学者们已经对这方面进行了广泛深入的研究。研究方法主要有模型试验法、理论分析法和数值模拟法。在试验研究方面,文献[1-3]通过离心模型试验分析了隧道埋深不同以及隧道与桩基水平距离变化对桩基的影响规律。Lee 等^[4]利用近距离摄影技术对桩-土-隧道模型进行了室内试验测试,研究了隧道开挖对桩基的影响,并提出了隧道开挖影响区。Meguid 等^[5]设计了一个小型试验装置,模拟隧道开挖以及衬砌安装过程,并分析了隧道施工过程对临近桩基的影响。理论分析方面主要运用两阶段分析法,即先计算隧道开挖引起的土体位移,再将土体位移作用于桩基上。Chen 等^[6]利用两阶段分析法分析了隧道几何条件、桩径、桩长等因素对桩基的影响;李早等^[7]在第 2 阶段中考虑群桩的遮拦效应,得到了隧道开挖引起的群桩位移;熊巨华等^[8]在第 2 阶段中的土体位移作用于桩基时考虑了桩-土界面的非线性特征;张治国等^[9]采用圆柱形孔收缩模型,在第 1 阶段计算了隧道开挖引起的周围土体弹塑性位移;冯国辉等^[10-11]基于 Kerr 地基模型应用两阶段分析法求解出隧道开挖引起的桩基位移,并与 Winkler、Pasternak 地基模型的计算结果进行比较。

在数值模拟方面,由于数值模拟分析方法可以很好地模拟盾构施工的三维动态变化过程,因此,数值模拟方法在盾构施工对临近桩基影响的研究上得到了广泛应用。方勇等^[12]利用 ANSYS 软件模拟盾构施工的步步掘进,并分析了盾构机顶进力及注浆压力参数对桩基的影响规律;李兵等^[13]通过有限元软件 MIDAS/GTS 对盾构侧穿高架桥桩基进行了模拟分析,主要考虑了掘进压力、千斤顶推力、注浆压力、衬砌弹性模量及盾构埋深等参数的影响;杨记芳^[14]采用“三阶段固结-胶结等代层”的方法模拟盾构前进时盾尾浆体材料参数随时间的变化。这些研究在模型中考虑了许多因素,比如地层条件、盾构施工参数的控制、隧道埋深及隧道与桩的位置关系等。但对于盾构掘进速度这一关键因素,却很少在数值模拟相关文献中提及。

林存刚等^[15]研究发现,盾构掘进速度对周围土体沉降的影响主要由盾构压重在其下卧土层中产生的附加应力的固结效应造成,当盾构掘进速度越慢,其产生的附加应力持续时间越长,从而导致地面沉降增大。基于上述研究,笔者利用 PLAXIS 3D 的固结计算,考虑盾构机自重对土体的固结作用引起的地层沉降,并由此考虑掘进速度对桩基位移的影响。

1 工程概况

以杭州地铁 16 号线临安广场站—农林大学站区间盾构工程为背景,对盾构隧道侧穿苕溪廊桥桩基(见图 1)进行数值模拟。该区间双线隧道间距为 14.5 m,隧道轴线埋深约为 22 m,右线隧道施工滞后左线隧道约半个月。盾构选型采用土压平衡盾构机,盾构机直径为 6.7 m,盾尾间隙为 35 mm,衬砌

厚度为 0.35 m。茗溪廊桥桩基与隧道结构最短距离约为 7.9 m,桥桩为钻孔灌注桩,直径为 1.2 m,桩长为 15 m。

区间盾构隧道上覆土层主要有素填土 1_2 、卵石 14_4 、全风化粉砂岩 22_{d1} 、强风化粉砂岩 22_{d2} ,盾构洞身主要穿越中风化粉砂岩 22_{d3} 。

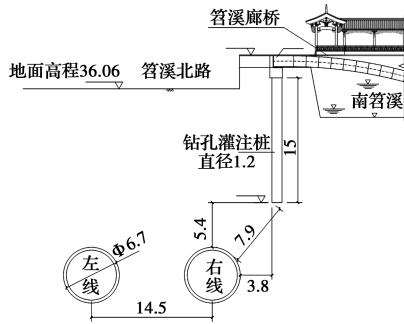


图 1 隧道与桩基位置关系 (单位:m)

Fig. 1 Relationship between the shield tunnel and pile foundation (unit:m)

2 盾构施工数值模拟

2.1 三维模型建立

计算模型采用 PLAXIS 3D 软件模拟,为充分考虑隧道开挖对桩基的影响,并依据有限元的建模理论,计算模型沿隧道纵向(y 方向)取 70 m、沿隧道横向(x 方向)取 70 m、竖直方向(z 方向)取 36 m,模型如图 2 所示。模型底部施加固定约束,侧面施加竖向滑动约束。网格划分采用空间 4 节点单元,共划分 155 366 个单元、211 049 个节点。

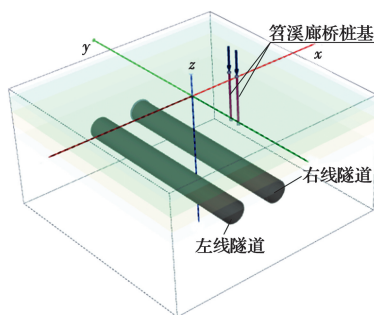


图 2 模型三维图

Fig. 2 Three-dimensional diagram of model

2.2 材料参数选取

盾构机、衬砌和盾尾浆体均采用三维实体单元模拟,桩基采用 PLAXIS 的 embedded 桩单元模拟,该单元可视为由梁单元和嵌入式的界面单元组成,各构件物理力学参数见表 1。

根据地质条件地层分为 5 层,对于前 4 层软土,

考虑到城市地铁隧道施工时的变形控制要求非常小,而较为先进的 HS-small 本构模型可以反映小应变特征,故前 4 层软土采用 HS-small 本构模型模拟;对于最后一层中风化粉砂岩,采用 PLAXIS 中霍克-布朗本构模型模拟,该本构模型结合了虎克定律所表述的弹性行为与霍克-布朗准则所表述的岩体非线性破坏特征。各岩土层物理力学参数见表 2。参数主要由工程资料获得,工程资料未给出的参数参考相关资料^[16]和相关文献^[17]进行取值。

表 1 各构件物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each component

构件	厚度 d/m	直径/m	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/kPa	泊松比 ν
盾构机	0.35		120	200×10^6	0
衬砌	0.35		27	31×10^6	0.3
初期浆体	0.035		17	1 000	0.2
短期硬化浆体	0.035		17	5 000	0.2
长期硬化浆体	0.035		17	300×10^3	0.2
桥桩		1.2	23	25×10^6	

表 2 各岩土层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil and rock layer

物理力学指标	天然重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	参考割线模量 E_{50}/kPa	参考切线模量 E_{ocd}/kPa	加卸载模量 E_{ur}/kPa	弹性模量 E/kPa
素填土	19.5	3.78×10^3	3.78×10^3	22.05×10^3	
卵石	20.7	20×10^3	20×10^3	80×10^3	
全风化粉砂岩	18.1	0.6×10^3	0.6×10^3	24×10^3	
强风化粉砂岩	20.3	15×10^3	15×10^3	60×10^3	
中风化粉砂岩	24.5				300×10^3
泊松比 ν	黏聚力 c'/kPa	内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	剪胀角 $\psi/(^{\circ})$	单轴抗压强度 σ_c/kPa	剪应变 $\gamma_{0.7}$
	3	15	0		0.2×10^{-3}
	2	35	0		0.2×10^{-3}
	36	16	0		0.2×10^{-3}
	23	25	0		0.2×10^{-3}
	0.25			19.6×10^3	
初始剪切模量 G_0/kPa	静止侧压力系数 k_0	幂指数 m	完整岩石参数 m_i	渗透系数 $K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	地质强度指数 GSI
88.2×10^3	0.5	0.8		8.75×10^{-5}	
400×10^3	0.35	0.5		1.75	
120×10^3	0.38	0.5		1.5×10^{-7}	
300×10^3	0.36	0.5		2.5×10^{-6}	
	0.3		9	7.5×10^{-6}	80

2.3 盾构施工模拟

数值模拟根据实际施工情况,先开挖左线再开挖右线,盾构施工模拟方法主要可以分为3个阶段。

第1阶段——盾构机初始位置,见图3(a),将盾构机所在位置处的土体冻结,并激活盾构机单元与土仓压力,土仓压力根据工程资料取值。

第2阶段——盾构机前进,见图3(b),本阶段实施步骤为:将盾构机前方即将开挖的土体冻结,并激活对应的盾构单元;将盾构机尾部单元冻结,并激活衬砌与浆体单元;激活注浆压力以及盾壳与土体间的摩擦力,前者根据工程资料取值,后者根据相关文献^[18]取一均布的摩擦力 p , $p=\mu\sigma_n$, μ 为盾壳与土体摩擦系数,黏土中取0.2~0.3,砂土中取0.3~0.4, σ_n 为盾构机受到的法向土压力,可近似取埋深处的垂直土压力。

第3阶段——此阶段计算方式由弹塑性计算变为固结计算,计算没有盾构前进的时间增量,以此模拟盾构机压重在土体中产生的附加应力的固结效应,此阶段激活盾构机自重。

3个阶段的施工步骤如此循环,直到隧道开挖完成。

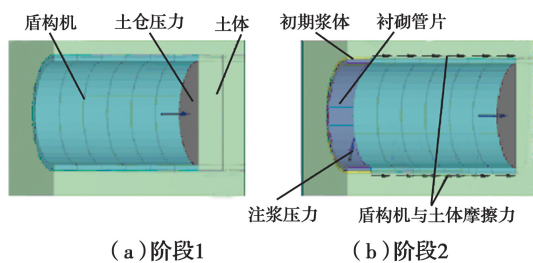


图3 盾构施工数值模拟

Fig. 3 Numerical simulation for shield tunnelling

3 数值计算结果分析

3.1 双线隧道全挖计算结果分析

盾构隧道的施工对周围土体的扰动将会引起周围土体发生位移,从而带动桩基发生位移,上部荷载的作用将会加剧这一位移。桩基发生的侧移以及沉降对上部结构有着非常大的影响,故对桩基水平侧移以及沉降的变化规律展开研究。

3.1.1 桩基水平侧移分析 图4所示为不同开挖步下桩基的 x 方向侧移曲线(负值表示朝隧道侧移动,正值表示反方向移动)。从图4可以看出,在左线盾构机未到达桩基时(开挖步1~9),桩基整体的位移趋势是远离隧道,并且桩基发生倾斜,桩底位移

比桩顶位移大,桩底位移在开挖面到达桩基时(开挖步9)达到最大值0.19 mm,此时桩顶位移为0.06 mm,而在左线盾构机经过桩基后(开挖步10~17),桩基整体向隧道侧移动,倾斜方向未发生改变,倾斜程度逐渐增大,在左线隧道开挖完成时倾斜最严重,此时桩底位移逐渐减小至0.02 mm,桩顶位移先减小至0再反方向逐渐增长至最大值-0.41 mm。当右线隧道开挖时(开挖步18~34),桩基位移变化规律与左线隧道开挖时相似。发生桩端向隧道侧倾斜的主要原因是:桩基 x 方向侧移主要由两部分组成,一部分是由于隧道开挖引起的土体损失使得周围土体向靠近隧道方向移动,从而造成桩基向隧道侧移动,另一部分是衬砌管片在围岩应力作用下发生挤压变形,即水平方向上管片向外变形,竖直方向上管片向内变形,同时,由于注浆压力的作用,隧道周围土体朝远离隧道侧移动,从而引起桩基向远离隧道方向移动,该部分位移主要表现在桩基下半侧,当两部分侧移叠加作用时将使桩顶向隧道侧倾斜。

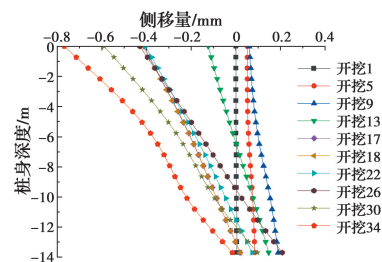


图4 不同开挖步下桩基的 x 方向侧移

Fig. 4 Side displacement of pile foundation in x direction at different excavation steps

盾构机前进时带动周围土体发生向前的移动,从而带动桩基向隧道开挖方向移动,且此位移主要体现在桩基下半侧。图5所示为不同开挖步下桩基的 y 方向侧移曲线,可以看出,随着开挖步的进行,桩基 y 方向侧移逐渐增大,桩基发生桩底向开挖方向的倾斜,且倾斜量逐渐增大,在右线隧道开挖完成时(开挖步34),桩端与桩底位移均达到最大值,此时桩端位移为-2.38 mm,桩底位移为-5.65 mm。

3.1.2 桩基沉降分析 桩端沉降随隧道开挖过程的动态变化如图6所示。可以看出,在开挖左线隧道时,开挖面到达桩基前(开挖步1~9),盾构掘进会造成桩基隆起,并在开挖面到达桩基(开挖步9)时桩顶隆起达到最大值0.70 mm,这是由于盾构机向前推进时对前方土体有挤推作用,从而使得桩基随土体发生向上的位移,开挖面经过桩基后(开挖步

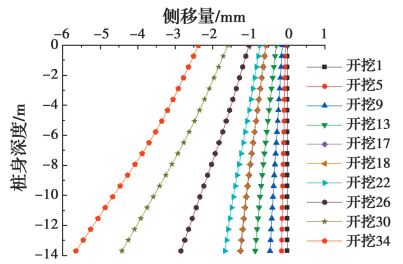


图 5 不同开挖步下桩基的 y 方向侧移

Fig. 5 Side displacement of pile foundation in y direction at different excavation steps

26~34), 盾构掘进会使桩基发生沉降, 在左线隧道开挖完成时桩端沉降值为 -1.19 mm, 开挖右线时桩基沉降变化规律与开挖左线类似, 且在开挖右线隧道完成时, 桩基沉降达到最大, 此时桩端沉降值为 -5.87 mm。桩基发生沉降的主要原因是盾尾空隙以及土体固结等因素造成的土体沉降带动桩基下沉。

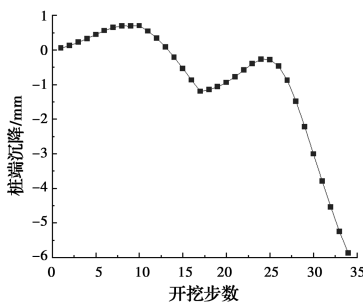


图 6 桩基沉降随隧道开挖的动态变化

Fig. 6 Dynamic changes of pile foundation settlement with tunnel excavation

3.2 参数影响分析

当注浆压力、盾尾空隙、土仓压力、掘进速度、衬砌管片弹性模量等施工参数改变时, 会对桩基位移产生显著影响, 由于注浆压力、土仓压力、衬砌管片的弹性模量等参数已有学者^[11-12]研究过, 笔者主要对开挖速度和开挖顺序对临近桩基位移的影响进行研究。

3.2.1 不同开挖速度对桩基位移的影响 图 7 所示为不同开挖速度下桩端沉降随盾构前进的动态变化曲线。从图 7 中可以看出, 开挖左线隧道时, 开挖面到达桩基前(开挖步 1~9)开挖速度对桩端沉降影响较小, 而当开挖面到达桩基后以及开挖右线隧道时, 开挖速度对桩端沉降的影响显著增大; 另外, 可以看出, 开挖速度越快, 桩端沉降越小, 这是由于开挖速度越快, 盾构机在土层中停留时间越短, 则固结作用的时间越短, 土体以及桩基沉降也随之减小,

但当开挖速度增至 8 环/d 后, 开挖速度对桩端沉降的影响逐渐减小。

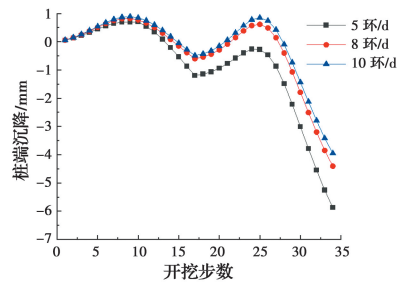


图 7 开挖速度对桩端沉降的影响

Fig. 7 Influence of excavation speed on pile tip settlement

图 8 所示为不同开挖速度下桩端 x 方向侧移随盾构前进的动态变化曲线。由图 8 可以看出, 与开挖速度对桩基沉降的影响规律相似, 开挖速度越快, 桩基 x 方向侧移越小, 但当开挖速度到达 8 环/d 后, 开挖速度对桩端 x 方向侧移的影响逐渐减小。

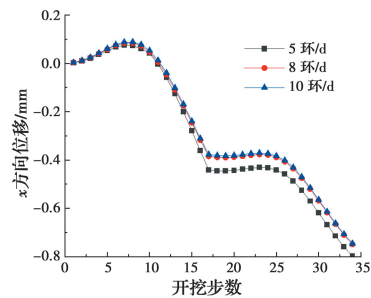


图 8 开挖速度对桩端 x 方向侧移的影响

Fig. 8 Influence of excavation speed on side displacement of pile tip in x direction

图 9 所示为不同开挖速度下桩端 y 方向侧移随盾构前进的动态变化曲线, 由图 9 可以看出, 在整个开挖过程, 开挖速度对桩端 y 方向侧移影响都较小, 这是由于桩基 y 方向侧移只与盾构机与土体的摩擦力以及土仓压力有关, 而与开挖速度无关。

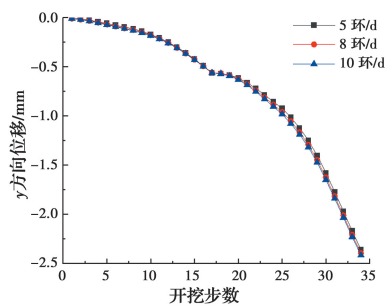


图 9 开挖速度对桩端 y 方向侧移的影响

Fig. 9 Influence of excavation speed on side displacement of pile tip in y direction

3.2.2 不同开挖顺序对桩基位移的影响 为研究不同开挖顺序对桩基位移的影响,建立先开挖左线再开挖右线隧道(工况 1)、先开挖右线后开挖左线隧道(工况 2)、双线隧道同步开挖(工况 3)3 种不同开挖顺序的数值模型,并比较 3 种工况下桩基的沉降与水平侧移。

不同开挖顺序下的桩端沉降如表 3 所示,工况 2 下的桩端沉降较工况 1 增大了 0.3%,工况 3 与工况 1 相比减小了 7.2%。双线隧道同步施工时桩基的沉降明显小于双线隧道分步开挖时的情况,原因在于双线隧道错开施工时,对周围土体有一个二次扰动的作

表 3 不同开挖速度下的桩端累积沉降值
Table 3 Cumulative settlement value of pile tip under different excavation speed

开挖顺序	累积沉降值/mm	累积沉降变化量/%
先左后右	-5.52	0
先右后左	-5.54	0.3
同步开挖	-5.12	-7.2

不同开挖顺序下的桩身 x 、 y 方向侧移分别如图 10、图 11 所示。从图 10 可以看出,与桩基沉降类似,工况 3 下桩基水平位移明显小于工况 1、工况 2 下的位移;从图 11 可以看出,开挖顺序的改变对桩基 y 方向侧移的影响较小,这是由于桩基 y 方向位移只与盾构机与土体的摩擦力以及土仓压力有关,而与开挖顺序无关。

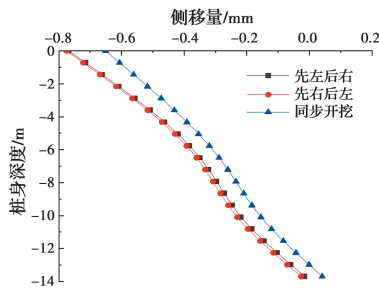


图 10 不同开挖次序下的桩身 x 方向侧移
Fig. 10 Horizontal displacement in x direction of piles under different excavation sequences

4 工程效果验证

由于条件限制,现场监测只能测得地表沉降数据,无法获取桩基位移数据,考虑到土体移动是导致桩基发生位移的直接原因,因此,对地表的沉降值验证与对桩基位移的验证在效果上应一致,故主要分析地表沉降的实测数据。

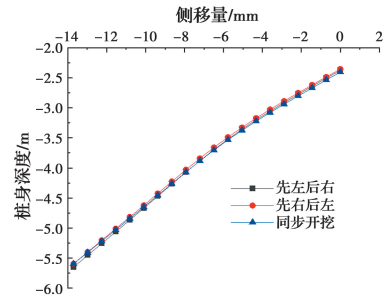


图 11 不同开挖顺序下的桩身 y 方向侧移
Fig. 11 Horizontal movement of pile in y direction under different excavation sequence

左右线隧道均从临安广场站出发,经过茗溪廊桥桩基,最后从风井出洞,分别沿隧道纵向在隧道轴线位置处选取若干监测点、沿隧道横向在桩基附近选取若干监测点,进行实测数据分析。各监测点布置如图 12 所示。

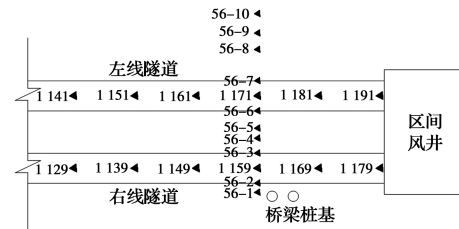


图 12 地表沉降监测点布置

Fig. 12 Layout of ground settlement monitoring points

图 13 为盾构机掘进进度曲线,由图 13 可以看出,两线盾构在靠近区间风井时,掘进速度变缓,左线盾构掘进 1 181 至 1 191 环耗时 5 d,平均每天开挖 2 环,而掘进 1 141 至 1 181 环时平均每天掘进 5 环;右线盾构掘进 1 169 至 1 179 环耗时 4 d,平均每天 2.5 环,而掘进 1 129 至 1 169 环时平均每天掘进 5 环。

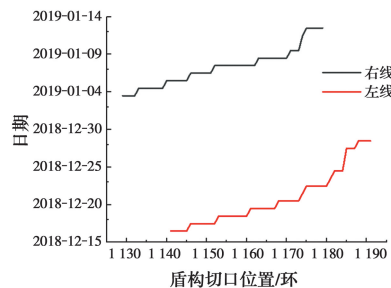


图 13 盾构机掘进进度曲线

Fig. 13 Advance-time curves of shield machines

图 14 为地表纵向监测点最终沉降,在掘进速度较慢的 1 181 至 1 191 环间的地表沉降明显大于 1 141 至 1 181 环间的地表沉降值,而 1 191 环位置处地表沉降值变小,原因是盾构出洞时需对周围土

体进行加固,从而导致该处地表沉降减小。以上分析验证了数值模拟研究的结论:掘进速度变慢时,会导致土体沉降增大,从而导致桩基沉降增大。

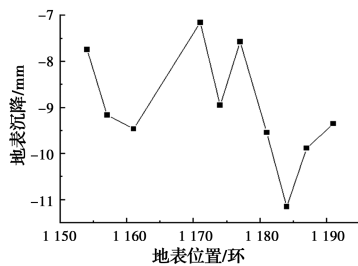


图 14 地表最终沉降沿隧道轴线变化曲线

Fig. 14 Curve of final surface settlement along the tunnel axis

图 15 为地表横向监测点在 2019 年 1 月 8 日 18:00 至 2019 年 1 月 9 日 6:00 时间段内的地表沉降,并与相同位置处的数值计算结果进行对比(地表位置的零值代表双线隧道中间位置)。从图 15 中可以看出,计算值与监测值变化规律比较吻合,地表最大沉降变化值相差不大,进一步证明了数值模拟的合理性。计算结果与监测值有所偏差,主要的原因是实际地层复杂,模型无法完全按照实际模拟,比如实际的地层是各向异性的,而模型中土层是竖直方向分层,水平方向均质的。

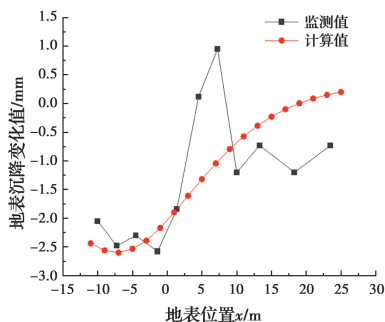


图 15 地表沉降计算值与监测值比较

Fig. 15 Comparison of calculated and monitored values of surface settlement

5 结论

对杭州地铁 16 号线某临近桩基段盾构工程进行数值模拟,考虑了盾尾注浆、土仓压力、盾构与土体的摩擦力等因素,并在每步开挖后,增加固结计算步,模拟盾构机自重产生的附加应力因固结效应造成的地层沉降,在此基础上研究了开挖速度、双线隧道开挖次序对临近桩基位移的影响,得到以下结论:

1) 在开挖面到达桩基前,桩基处于隆起状态,随着开挖继续进行,桩基逐渐沉降,在隧道开挖完成时,沉降达到最大值。

2) 盾构施工会使桩基产生水平侧移,在纵断面上,盾构机推进时带动周围土体向前移动,从而使得桩基产生朝开挖方向的水平侧移,并呈现桩基下半部分向前的倾斜,桩基的总体侧移及倾斜随开挖步不断增大,并在开挖完成时达到最大;在横断面上,隧道开挖造成的地层损失、围岩压力导致的隧道衬砌变形以及注浆压力将会导致桩基上半部分向隧道侧移动,下半部分向反方向移动,即桩基发生了倾斜,该倾斜随开挖的进行不断增加,在开挖完成后达到最大。

3) 在开挖面经过桩基后,加快开挖速度能有效减小桩基位移,但当开挖速度加快到一定程度时,继续增大开挖速度对桩基位移的影响将显著减小。且过快的开挖速度容易引起地表下沉和隆起,因此,盾构穿越临近桩基时,需严格控制开挖速度。

4) 双线隧道同步开挖时,对临近桩基的影响比双线隧道分步施工时小,因此,施工条件允许的情况下可以考虑双线隧道同步施工。

参考文献:

- [1] MARSHALL A M. Tunnelling in sand and its effect on pipelines and piles [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2009
- [2] LOGANATHAN N, POULOS H G, STEWART D P. Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformations [J]. Géotechnique, 2000, 50 (3): 283-294.
- [3] 马少坤, 陈欣, 吕虎, 等. 不同埋置位置隧道对群桩影响的离心模型试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 67-73.
MA S K, CHEN X, LU H, et al. Centrifuge modelling test of effects of tunnelling with different depths on pile group [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 67-73. (in Chinese)
- [4] LEE Y J, BASSETT R H. Influence zones for 2D pile-soil-tunnelling interaction based on model test and numerical analysis [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(3): 325-342.
- [5] MEGUID M A, MATTAR J. Investigation of tunnel-soil-pile interaction in cohesive soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(7): 973-979.
- [6] CHEN L T, POULOS H G, LOGANATHAN N. Pile responses caused by tunneling [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(3): 207-215.
- [7] 李早, 黄茂松. 隧道开挖对群桩竖向位移和内力影响

- 分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 398-402.
- LI Z, HUANG M S. Analysis of settlement and internal forces of group pile due to tunneling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 398-402. (in Chinese)
- [8] 熊巨华, 王远, 刘侃, 等. 隧道开挖对邻近单桩竖向受力特性影响[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 475-482.
- XIONG J H, WANG Y, LIU K, et al. Effects of tunneling on vertical bearing behaviors of adjacent single pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 475-482. (in Chinese)
- [9] 张治国, 徐晨, 宫剑飞. 隧道开挖对邻近桩基变形及承载能力影响的弹塑性解答[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 208-222.
- ZHANG Z G, XU C, GONG J F. An elasto-plastic solution of pile deflection and pile load capacity due to adjacent tunneling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 208-222. (in Chinese)
- [10] 冯国辉, 窦炳珺, 张高锋, 等. 隧道开挖引起水平向位移被动桩的简化计算方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 10-18.
- FENG G H, DOU B J, ZHANG G F, et al. Simplified calculation method for lateral displacement of passive pile caused by tunneling [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 10-18. (in Chinese)
- [11] 冯国辉, 周逊泉, 何庆亮, 等. 隔离桩对盾构掘进引起邻近高铁桩基水平位移的影响分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 28-35.
- FENG G H, ZHOU X Q, HE Q L, et al. Analysis on the influence of isolation pile on horizontal displacement of adjacent pile under high-speed railway caused by shield driving [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 28-35. (in Chinese)
- [12] 方勇, 何川. 地铁盾构隧道施工对近接桩基的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(1): 42-47.
- FANG Y, HE C. Study on the influence of metro shield tunneling on close-by pile foundation [J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(1): 42-47. (in Chinese)
- [13] 李兵, 于景春. 盾构施工对临近桥梁的影响分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(6): 2332-2338.
- LI B, YU J C. Influence analysis of shield tunneling on adjacent bridge [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2017, 42(6): 2332-2338. (in Chinese)
- [14] 杨记芳. 壁后注浆和地表变形的盾构施工数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(2): 310-315.
- YANG J F. Numerical simulation on grouting and surface deformation in shield construction [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2018, 37(2): 310-315. (in Chinese)
- [15] 林存刚, 吴世明, 张忠苗, 等. 盾构掘进速度及非正常停机对地面沉降的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2472-2482.
- LIN C G, WU S M, ZHANG Z M, et al. Influences of shield advance rate and abnormal machine halt on tunnelling-induced ground surface settlements [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2472-2482. (in Chinese)
- [16] 刘志祥, 张海清. PLAXIS 高级应用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- LIU Z X, ZHANG H Q. advanced application tutorial of PLAXIS [M]. Beijing: China Machine Press, 2015. (in Chinese)
- [17] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1766-1774.
- WANG W D, WANG H R, XU Z H. Study of parameters of HS-Small model used in numerical analysis of excavations in Shanghai area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1766-1774. (in Chinese)
- [18] 魏纲, 张世民, 齐静静, 等. 盾构隧道施工引起的地面变形计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(Sup1): 3317-3323.
- WEI G, ZHANG S M, QI J J, et al. Study on calculation method of ground deformation induced by shield tunnel construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup1): 3317-3323. (in Chinese)

(编辑 胡玲)