

Numerical Simulation Analysis of Shield Construction's Influence on Pile Foundation

Houjun Ai

China Railway Communications Investment Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

Abstract

Combined with Nanchang Metro Line 4 project, this paper simulates the buildings under the shield tunnel construction by using Plaxis 3D software, studies the influence of shield tunneling process on the settlement of pile foundation, and focuses on the influence of excavation sequence and excavation speed on the displacement of pile foundation by numerical simulation. The results show that the excavation speed has a great influence on the settlement of pile foundation. After the excavation surface passes through the pile foundation, the faster the excavation speed is, the smaller the settlement of pile foundation is. However, if the excavation speed continues to increase, the influence of excavation speed on pile foundation settlement will be significantly reduced. As the staggered construction of the double track tunnel has a secondary disturbance to the surrounding soil, the settlement of the pile foundation during the synchronous construction of the double track tunnel is significantly less than that during the step-by-step excavation of the double track tunnel, and the safety evaluation of the design scheme is carried out to provide a useful reference for the shield construction in Nanchang.

Keywords

shield construction's; existing pile foundation; Plaxis 3D; settlement; numerical simulation

盾构施工对下穿桩基影响的数值模拟分析

艾厚军

中铁交通投资集团有限公司, 中国 · 广西 南宁 530000

摘 要

论文结合中国南昌市地铁4号线工程, 利用Plaxis 3D软件对盾构隧道施工下穿建筑物进行模拟, 研究盾构掘进过程对桩基沉降的影响, 利用数值模拟重点分析了开挖顺序和开挖速度对桩基的位移情况影响。研究结果表明, 开挖速度对桩基沉降有较大影响, 在开挖面经过桩基后, 开挖速度越快, 桩基的沉降越小; 但如果开挖速度继续增大, 开挖速度对桩基沉降的影响下将显著减小。由于双线隧道错开施工时, 对周围土体有一个二次扰动的作用, 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并对设计方案进行安全评估, 为南昌地区盾构施工建设提供有益参考。

关键词

盾构; 既有桩基; Plaxis 3D; 沉降; 数值模拟

1 引言

随着城市框架不断发展, 地铁建设是缓解城市交通压力重要途径。在老城区的地铁施工环境复杂, 避免不了穿过既有建筑物, 施工难度大。在盾构施工过程中会扰动周围土体^[1], 从而改变原有土体的应力场, 影响到原建筑物的安全性, 在地铁盾构施工中如何保证原有建筑物正常使用安全, 减少盾构施工对周围环境的影响尤其重要。

地铁施工对临近建筑物的影响开展了广泛的研究, 当

前研究地铁盾构施工对周围建筑物的影响有研究方法主要有模型试验^[2]、理论分析^[3]和数值模拟。李新星等研究采用数值模拟方法研究加固条件下盾构施工对桩基变形的影响。徐长节等采用FLAC3D软件分析双线盾构隧道掘进引进的立交桥桩基沉降。刘喆等采用ANSYS软件分析盾构参数及支护条件对隧道侧穿既有高架桥群桩的变形影响, 但开挖顺序和掘进速度的影响的数值模拟分析还较少。然而, 在实际工程中, 盾构掘进速度对周围土体和既有建筑物有较大的影响。

论文采用Plaxis 3D有限元软件对南昌地铁4号线穿越新田景江公寓工程进行数值分析, 并研究盾构掘进过程对桩基沉降的影响, 以实际工程地质条件建立模型, 由此考虑开挖顺序和开挖速度对盾构侧穿桩基位移的影响。

【作者简介】艾厚军(1980-), 男, 满族, 中国黑龙江桦南人, 本科, 高级工程师, 从事轨道交通和市政工程研究。

2 工程概况

2.1 工程概况

南昌市轨道交通 4 号线一期工程土建施工 02 合同段五工区位于南昌市老城区西湖区内，五工区范围包含“两站三区间”，即桃苑站、坛子口站、桃苑站—绳金塔站区间、绳金塔站—坛子口站区间、坛子口站—丁公路南站区间（跨三号线绳金塔站），如图 1 所示。

本工程起于桃苑站，桃苑站位于桃苑大街与桃苑中路交叉口，呈东西向布置，沿桃苑大街下方敷设。桃苑站—绳金塔站区间沿桃苑大街向东偏南穿行，与三号线在建绳金塔站明挖区间相接。绳金塔站—坛子口站区间向东穿行接入坛子口站。在原江西电机厂地块内（已拆除）设坛子口站，车站位于规划道路正下方，成东西向布置。坛子口站—丁公路

南站区间线路出坛子口站向东下穿井冈山大道高架桥及其匝道，进入铁路二村地块，之后过站前路接入丁公路南站。新田景江公寓与隧道之间的最短水平距离为 3.18m，垂直距离为 5.41m，桩基础为灌注桩，直径为 1.5m，桩长为 9m，如图 2 所示。

2.2 工程地质水文情况

桃苑站—绳金塔站区间地层主要为：人工填土①、粉质黏土②-1、淤泥质土②-2、细砂②-3、中砂②-4、粗砂②-5、砾砂②-6、强风化泥质粉砂岩⑤-1-2、中风化泥质粉砂岩⑤-1-3、中风化钙质泥岩⑤-4-2。盾构隧道洞身主要穿越地层为：淤泥质土②-2、细砂②-3、中砂②-4、粗砂②-5、砾砂②-6、强风化泥质粉砂岩⑤-1-2、中风化泥质粉砂岩⑤-1-3，参见表1。

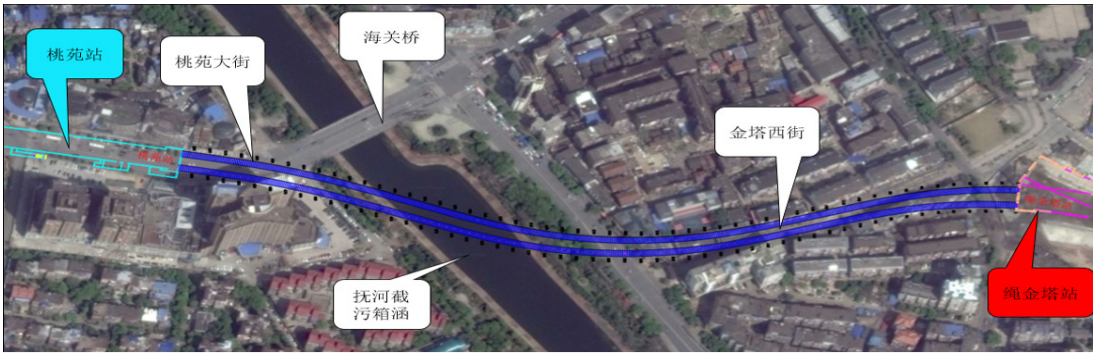


图 1 本工程线路平面示意图

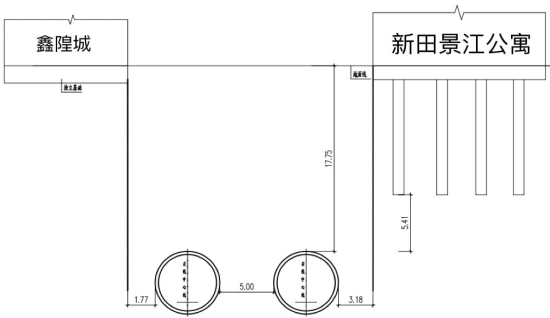


图 2 隧道与桩基位置关系

表 1 土层物理力学性质指标表

物理力学指标	天然重度 γ (kN/m ³)	参考割线模量 E_{50} (kPa)	参考切线模量 E_{oed} (kPa)	加卸载模量 E_{ur} (kPa)
杂填土	19.6	10×10^3	10×10^3	30×10^3
粉质黏土	19.7	30×10^3	30×10^3	90×10^3
细砂	18.7	15×10^3	15×10^3	75×10^3
强风化	20.3	35×10^3	35×10^3	105×10^3
中风化	23.6	100×10^3	100×10^3	300×10^3
泊松比 ν	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 ϕ (°)	剪胀角 Φ (°)	静止侧压力系数 K_0
0.2	10	12	0	0.74
0.2	27	9	0	0.5
0.2	2	28	0	0.74
0.2	40	25	0	0.43
0.2	350	32	0	0.5

2.3 工程特点

桃苑站—绳金塔站区间设计概况参见表 2。

表 2 区间设计概况

区间名称 设计概况	桃苑站—绳金塔站区间
区间长度	左线长度 646.500m（长链 7.350m），右线长度 647.176m
最小曲线半径	325m
最大纵坡	28‰
最小纵坡	2‰
隧道拱顶埋深	11.5~19.2m
最小隧道间距	11.22m
风险等级	II 级
管片形式	“3 + 2 + 1”（3 块标准块、2 块邻接块和 1 块封顶块）型式、错缝拼装，弯曲螺栓连接，管片背后注浆填充
管片内 / 外径	5400mm/6000mm
管片材料	C50P10 钢筋砼
管片宽度 / 厚度	1200mm/300mm
端头加固方式	始发（钢套筒 + 垂直冷冻 3m）、接收（钢套筒 + 玻璃纤维筋）

3 盾构施工数值模拟分析

3.1 计算模型

利用 Plaxis 3D 进行分析计算，根据区间隧道，建立了三维数值计算模型。模型纵向长度 110m，横向长度 95m，竖向长度为 35m，隧道衬砌采用均质圆环，外径 6m，厚度为 0.3m。采用板单元模拟盾构机，采用刚度等效原则模拟衬砌隧道管线，采用面荷载模拟盾构掌子面施加土压力。

模型如图 3 所示，对模型底部固定约束，侧面施加水平约束。采用 4 节点网络单元，共划分 147533 个单元、239482 个节点。由于灌注桩数量较多，论文取距隧道最近的桩基作为研究。

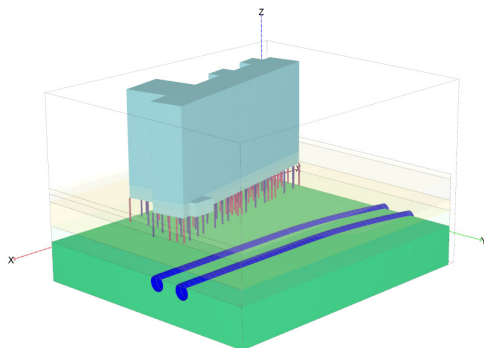


图 3 三维模型图

3.2 模型参数选择

盾构机、衬砌和浆体采用三维实体单元模拟，桩基采用 Embedded 桩单元模拟。地铁隧道施工应进行变形控制，土体本构模型选用小应变土体硬化模型，该模型可以有效模拟土体的剪切硬化和体积硬化过程，并考虑砂土剪胀性，服从 Mohr-Coulomb 强度准则。

盾构机刚度 $34.5 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ ，衬砌刚度 $200 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ ，桩基刚度 $30 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ 。盾构机掘进参数，注浆压力 300 kN/m^2 ，土仓压力 500 kN/m^2 ，千斤顶推力 896 kN/m^2 ，刀盘转速 1 r/min 。

3.3 盾构施工过程

根据施工情况，先开挖右线再开挖左线，盾构施工主要分为 5 个阶段。

第一阶段——盾构机准备掘进，将盾构机所在位置处的土体冻结，并激活相应的盾构机单元与掌子面压力。

第二阶段——盾构机前进，本阶段施工步骤为：将盾构机前方将要开挖的土体单元冻结并激活对应的盾构单元、负向界面及面收缩。

第三阶段——注浆阶段，冻结盾构单元并激活注浆段的注浆压力及千斤顶压力。

第四阶段——安装衬砌，模拟压力注浆后，安装隧道衬砌管片。激活代表右线隧道衬砌的类组，激活右线隧道周边界面。

第五阶段——设置开挖速度，此阶段模拟不同开挖速度的工况，由于每个施工步开挖 3 环，可将时间间隔分别设定为 0.6、0.375、0.3，以此模拟 5 环/d、8 环/d、10 环/d 的开挖速度。

上述五个阶段的施工步骤如此循环，直到隧道开挖完成。至此完成了右线隧道施工，左线隧道施工与右线相同。如图 4 所示。

4 数值计算结果分析

4.1 桩基竖向变形分析

图 5 所示为桩基及建筑物等沉降值随隧道开挖的动态变化。图 5 可知，在开挖右线隧道时，开挖面到达桩基前（步骤 1~9），盾构掘进会造成地表产生微小沉降，开挖面经过建筑物时（步骤 9~37），盾构掘进会使桩基发生较大沉降，此后隧道开挖将远离建筑物，沉降变化微小，在右线隧道开挖完成时地表沉降值为 -7.92 mm 。开挖左线时地表沉降变化规律与开挖右线相似。

由图 5 可以看出，当隧道开挖接近桩基时，桩基和建筑物会发生较大沉降，随着隧道开挖，开挖面远离桩基，桩基沉降的变化较小，当双线隧道开挖完成后，桩基沉降达到最大值为 -8.17 mm 。

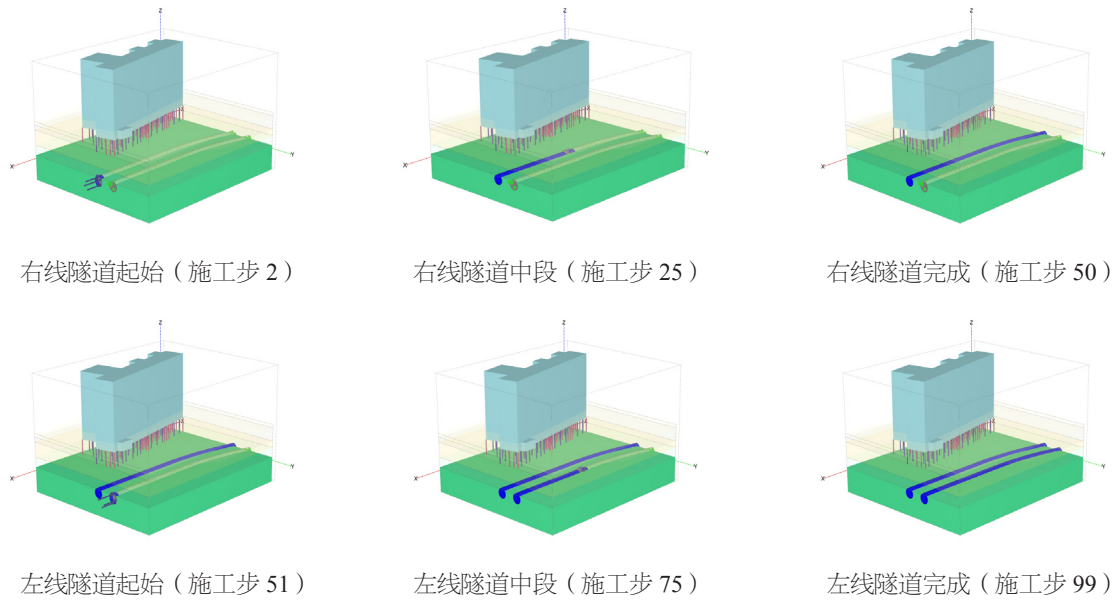


图 4 施工步示意图

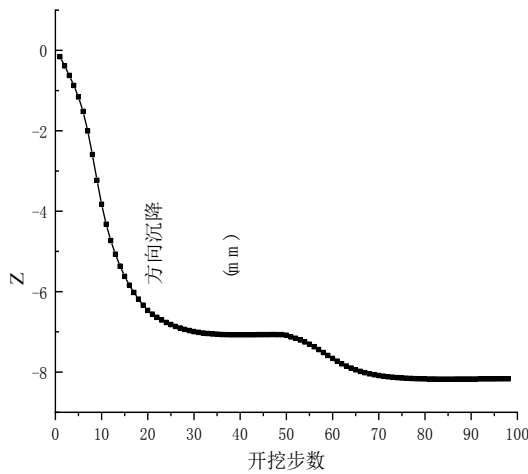


图 5 土层及桩基沉降随隧道开挖的动态变化

4.2 水平侧移分析

盾构机前进时带动土体向前移动，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底位置。图 6 所示为不同开挖步下桩基的 x 方向侧移曲线。可以看出，随着隧道施工，桩基 x 方向的位移逐渐增大，桩基发生桩底向开挖方向的倾斜，且倾斜量逐渐增大，在步骤 99 时达到最大值，桩底沉降值为 -5.62mm ，桩顶沉降值为 -2.47mm 。随后盾构机远离建筑物，桩基的沉降值有所减小。当左线施工时，桩基沉降的变化趋势与右线施工时类似。

图 7 所示为不同开挖步下建筑物的倾斜量曲线，由图可以看出，隧道开挖会使建筑物发生倾斜，桩基整体向隧道侧移动，在右线隧道完成时倾斜最严重，倾斜值为 -0.17mm 。当左线开挖时，桩基位移变化规律与右线隧道开挖时相似，桩端向隧道方向倾斜，这是因为隧道施工引起的土体损失使得周围土体向靠近隧道一侧移动，导致桩基向隧道侧移动。

另外，衬砌管片在围岩应力作用下发生挤压变形，隧道周围土体远离隧道，使得桩底向远离隧道方向移动。当两部分侧移叠加时，将使桩顶向隧道侧倾斜。

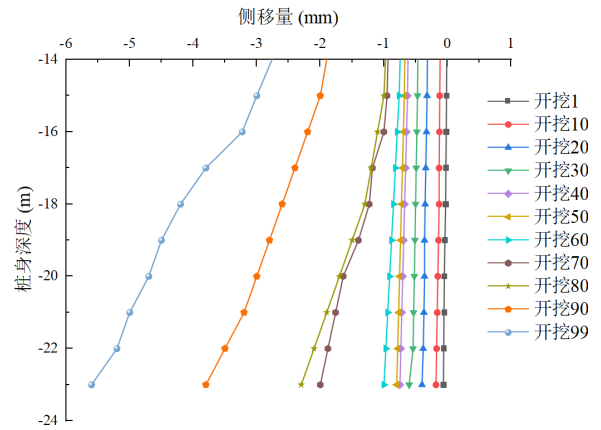


图 6 不同开挖步数下桩基的 x 方向位移

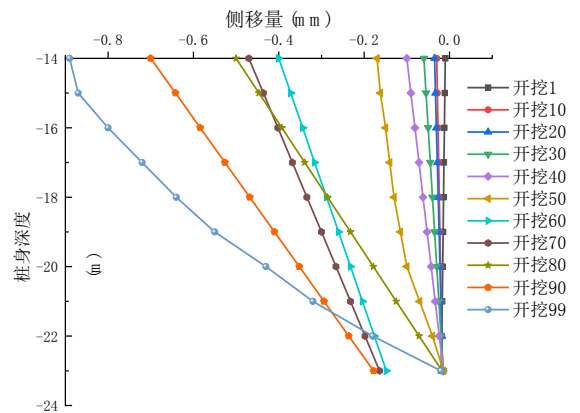


图 7 不同开挖步数下桩基 y 方向位移

4.3 参数影响分析

4.3.1 开挖速度的影响

图 8 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。从图中可以看出,开挖速度越快,桩端沉降越小,这是因为开挖速度越快,盾构机在土层中停留的时间越短,固结时间就越短,使得桩基沉降随之减小。但开挖速度增至 8 环/d 后,开挖速度对桩端沉降的影响逐渐减小。

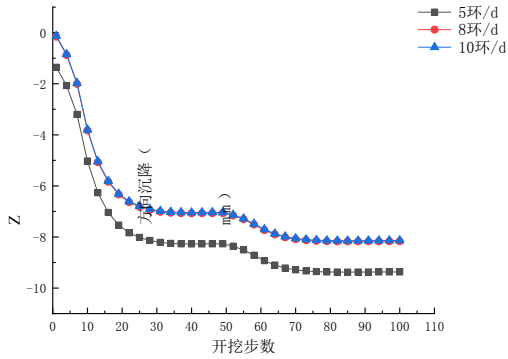


图 8 开挖速度对桩端沉降的影响

图 9 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。由图可以看出,随着隧道施工,桩基 x 方向的位移逐渐增大,桩基发生桩底向开挖方向的倾斜,且倾斜量逐渐增大,随后盾构机远离建筑物,桩基的沉降值有所减小在整个开挖过程中,开挖速度对桩端在 x 方向的侧移影响较小。这是因为桩基 x 方向侧移只与盾构机与土压力有关,而与开挖速度无关。

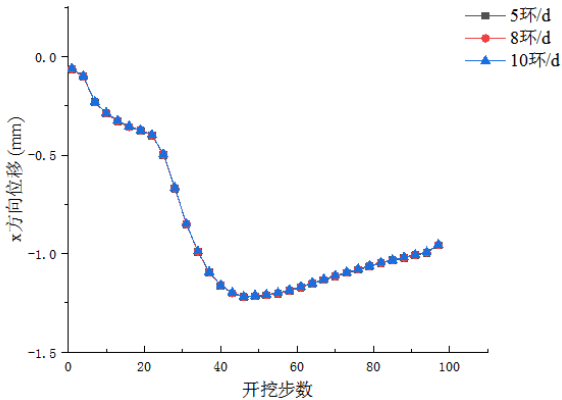


图 9 开挖速度对桩端 x 方向侧移的影响

图 10 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。由图可以看出,隧道开挖会使建筑物发生倾斜,桩基整体向隧道侧移动,桩端 y 方向的侧移与开挖速度对桩基沉降的影响规律相似:即开挖速度越快, y 方向侧移越小,但开挖速度增至 8 环/d 后,开挖速度对桩端沉降的影响逐渐减小。

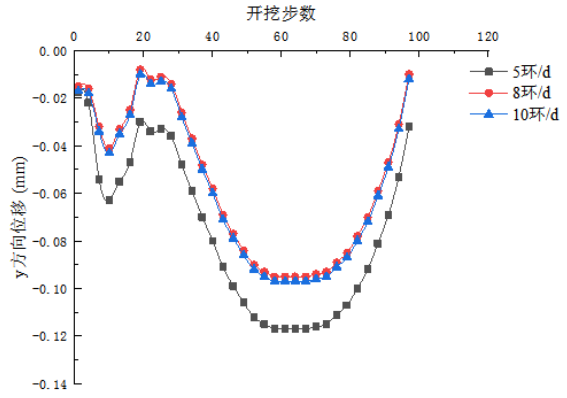


图 10 开挖速度对桩端 y 方向侧移的影响

4.3.2 不同开挖顺序对桩基的影响

为研究不同开挖顺序对桩基位移的影响,建立先开挖右线再开挖左线隧道、先开挖左线后开挖右线隧道、双线隧道同步开挖 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,先左后右下的桩端沉降较先右后左增大了 0.3%,双线开挖与先右后左相比减小了 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用。

表 3 不同开挖速度下的桩端累积沉降值

开挖顺序	累积沉降值 /mm
先右后左	-6.977
先左后右	-6.980
同步开挖	-6.628

不同开挖顺序下的桩身 x、y 方向侧移分别如图 11、图 12 所示。从图 11 可以看出,开挖顺序的改变对桩基 x 方向侧移的影响较小,这是由于桩基 x 方向位移只与盾构机与土体摩擦力以及土仓压力有关,而与开挖顺序无关。从图 12 中可以看出, y 方向侧移规律与桩基沉降类似,同步开挖下桩基水平位移明显小于先右后左、先左后右的位移。

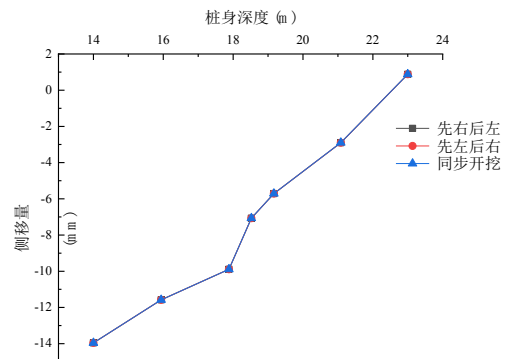


图 11 不同开挖顺序下的桩身 x 方向侧移

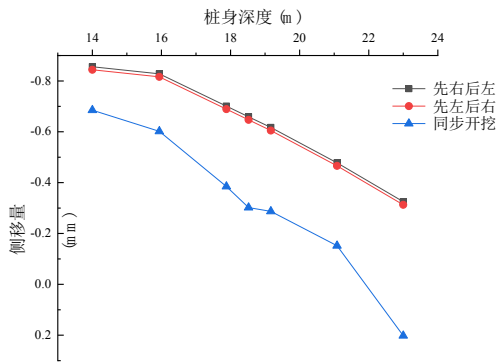


图 12 不同开挖顺序下的桩身 y 方向侧移

5 地表沉降控制措施

①施工前,对区间沿线的建构筑物进行调查,并形成调查报告。尤其建筑物桩基础的详细桩位及桩底标高,确认建筑桩基是否侵入盾构区间影响施工。

②请有相关资质的专业机构对施工影像范围内的建筑物进行外观鉴定,划定保护范围,必要时,要对建筑物进行结构鉴定。

③对盾构司机等盾构施工关键岗位的人员就建筑物进行详细的交底,明确每一栋建筑物所在的管片编号,使之心中有数。

④加强隧道施工管理,根据不同的地层,选择合理的掘进参数,防止对地层扰动过大,造成建筑物沉陷、开裂甚至倒塌。

⑤控制好盾构姿态,确保盾尾间隙均匀。

⑥加强监控量测,根据量测结果反馈,动态控制掘进施工参数。

⑦必要时对建筑物采取加固措施。

⑧预埋袖阀管,跟踪注浆。

⑨加强盾构同步注浆,保证同步注浆和盾构掘进速度相匹配。盾构穿越后,通过二次注浆补偿因地层损失引起的沉降。

6 结论

南昌市地铁 4 号线桃苑站—绳金塔站盾构工程进行 Plaxis 3D 数值模拟,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,主要得出以下结论:

①在开挖右线隧道时,开挖面到达桩基前,盾构掘进会造成地表产生微小沉降,开挖面经过建筑物时,盾构掘进会使桩基发生较大沉降,此后隧道开挖将远离建筑物,沉降变化微小,开挖左线时地表沉降变化规律与开挖右线相似,且在左线隧道完成时,地表沉降达到最大。

②由于隧道施工引起的土体损失使得周围土体向靠近隧道一侧移动,导致桩基向隧道侧移动。另外,衬砌管片在围岩应力作用下发生挤压变形,隧道周围土体远离隧道,使得桩底向远离隧道方向移动。当两部分侧移叠加时将使桩顶向隧道侧倾斜。因此,隧道开挖会使建筑物发生倾斜,桩基整体向隧道侧移动,在右线隧道完成时倾斜最严重;当左线开挖时,桩基位移变化规律与右线隧道开挖时相似桩端向隧道方向倾斜。

③在一定程度上,在开挖面经过桩基后,开挖速度越快,桩基的沉降越小,但如果开挖速度继续增大,开挖速度对桩基沉降的影响将显著减小。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由于双线隧道错开施工时,对周围土体有一个二次扰动的作用,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。因此,如果施工条件允许,优先采用双线同时开挖。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 冯国辉,窦炳珏,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.