

【工程应用】

群桩施工对邻近地铁隧道群位移的影响

王其炎¹, 吴健^{1*}, 杨飞¹, 陈自海¹, 杨建辉²

(1. 浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 310051; 2. 浙江科技学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 采用工程实测并结合 ABAQUS 有限元模拟的方法, 对高速公路高架桥群桩基础施工引起的邻近既有地铁隧道群的水平和竖向位移规律开展了研究。表明群桩施工过程中, 隧道群在水平面上的总体位移趋势是远离桩基, 竖向位移趋势为沉降, 随着埋深增大, 水平位移量增大, 沉降量减小, 水平位移大于沉降量。桩基完成数量与当日位移量密切相关, 当日成桩数量少, 隧道位移量增长缓慢, 反之位移增长较快。各测点的水平位移和竖向位移较小, 大部分测点位移处于预警范围之内, 全部小于报警值, 说明全套管全回转钻机成孔群桩施工对隧道群扰动较小。

关键词: 群桩施工; 地铁隧道; 位移; 全套管施工

中图分类号: TU74

文献标志码: A

文章编号: 2096-7195(2021)05-0420-07

Influence of pile group construction on displacements of adjacent metro tunnels

WANG Qi-yan¹, WU Jian^{1*}, YANG Fei¹, CHEN Zi-hai¹, YANG Jian-hui²

(1. Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310051, Zhejiang, China;

2. Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: The horizontal and vertical displacements of adjacent existing metro tunnels caused by the construction of the pile group foundation of an expressway viaduct were analyzed with in-situ monitoring data and ABAQUS FEM numerical simulation method in this paper. The study shows that during the construction of pile groups, the tunnel generally shows a trend away from the pile foundation in the horizontal direction displacement while the vertical direction displacement is downward. The greater the buried depth of the tunnel group, the greater the horizontal displacement and the smaller the vertical displacement in which the horizontal displacement is larger than the vertical one. The increasing rate of displacement is closely related to the number of pile foundations constructed on one day. The displacements of the tunnel group would change gently if the number of constructed piles on that day is relatively small while the displacement changes would be more pronounced for increasing pile numbers. The horizontal and vertical displacements of each measuring point are small, and most of the measured displacements are less than the warning values which indicates full casing rotary drilling construction of piles has little disturbance to the tunnel group.

Key words: pile group construction; metro tunnel; displacement; full casing construction

0 引言

近年来, 邻近地铁隧道桥梁建设工程越来越多, 桥梁群桩施工引起地层位移, 进而对地铁隧道形成扰动, 引起隧道结构的位移和应力变化。对位移规律开展研究, 确保桩基工程顺利实施对隧道运营安全具有重要现实意义。

已有文献主要采用现场实测和数值分析方法对桩基施工时邻近地铁隧道位移规律开展研究。徐

云福等^[1]开展了单桩全套管旋挖施工对紧邻运营地铁隧道影响的试验研究, 监测了隧道和土体位移, 表明选择全套管成桩工艺可以有效减小对地铁隧道位移的影响。楼晓明等^[2-3]开展了高层建筑物桩基施工对邻近隧道位移和内力的影响研究。庄妍等^[4]采用现场实测的方法, 研究了全套管灌注桩施工时的土体位移发展过程, 表明盾构隧道处于安全工作状态。邓指军^[5]对位于地铁上部的桩基施工引起的隧道变形问题开展了研究, 表明邻近隧道的钢

收稿日期: 2021-08-04

作者简介: 王其炎 (1981—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事交通工程领域研究工作。E-mail: 32194168@qq.com。

*通信作者: 吴健 (1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地下空间及轨道交通领域研究工作。E-mail: wdswsj@163.com。

套管旋转压入施工可导致盾构管片变形,采用跳桩施工以及布置泄压孔可减小对隧道的影响。丁智等^[6]依托试桩试验,研究了桩基施工过程及完工后地层沉降对邻近隧道的影 响规律。路平等^[7]采用有限元分析方法,对桩基施工引起的隧道内力和形变进行了研究,表明土体发生的竖向位移引起隧道整体沉降。代志萍^[8]采用有限元分析方法,研究了灌注桩施工过程对邻近隧道位移和内力的影响,表明钻孔过程影响较小,混凝土浇注过程对隧道影响较大。闫静雅等^[9-10]利用数值分析方法开展的研究表明,随着桩间距及桩隧净距的增大,桩基施工对隧道变形和内力的影响逐渐减小,在隧道轴线方向上的桩间距对隧道的影 响,要远大于在垂直方向的桩间距的影响。宋福贵等^[11]分析了钢套管桩不同的群桩施工顺序对邻近既有隧道的影 响,给出了优化的施工顺序。归浩杰等^[12]采用有限元分析方法研究了群桩基础施工工况对邻近隧道的影 响,表明群桩至隧道的距离对隧道竖向位移影 响较大。

总体上,目前的研究成果多集中在单桩施工对邻近隧道的影 响,而对群桩施工的影 响研究成果较少,特别是结合现场监测成果开展的研究更少,还没有形成规律性认识。杭州市一高架桥上跨地铁1号线和4号线,桥梁的群桩基础邻近地铁隧道,本文采用工程实测和 ABAQUS 三维有限元分析两种方法,对群桩施工引起的隧道群位移开展研究。

1 工程概况

1.1 工程地质概况

地层柱状图见图1。地层主要由杂填土、素填土、塘泥、暗塘土、砂质粉土、粉砂夹粉土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉砂、圆砾、中细砂、含圆砾粉质黏土、全风化泥质粉砂岩、强风化泥质粉砂岩和中风化泥质粉砂岩等组成,高架桥选择③₃层中风化泥质粉砂岩作为桩端持力层。地下水分为孔隙潜水、承压水和基岩裂隙水三种情况。孔隙潜水

主要赋存于浅部粉、砂性土层内,受沉积层理控制,透水性具有各向异性。承压水赋存于下部粉砂、圆砾层内,含水层总厚度为10~15 m,透水性良好,上覆黏性土层为相对隔水层。基岩裂隙水赋存于第四系土层下部的风化裂隙内,对本工程影 响不大。

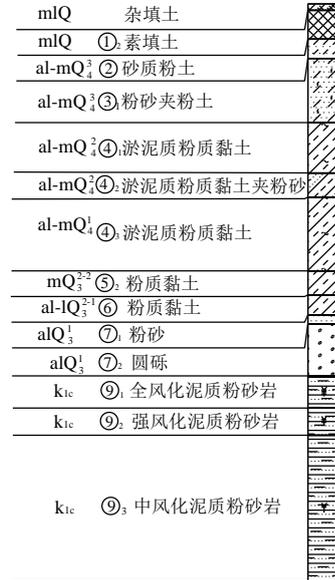


图1 地基柱状图

Fig. 1 Stratigraphic column of ground

1.2 群桩施工与地铁隧道位置关系

杭甬高速公路抬升工程主线高架桥第七联 23号、24号墩位于运营地铁1号线两侧,每个桩群由12根直径1.8 m单桩构成,桩长67.3~67.9 m,共计24根桩。群桩与地铁隧道的平面关系见图2。23号墩的群桩基础离1号线右线管片外缘的最小距离为13.22 m,24号墩群桩基础离1号线左线管片外缘的最小距离为12.43 m。为了降低桩基施工对隧道的扰动,采用全套管全回转钻机成孔,每根桩基施工顺序为压入钢套管、出土和灌注混凝土,24根桩基主要工序的施工组织见表1所示。

桩基施工需保护的地铁设施为地铁1号线左线和右线、1号线出段线、4号线的出线段和入段线,共计5条地铁线路,见图3所示。

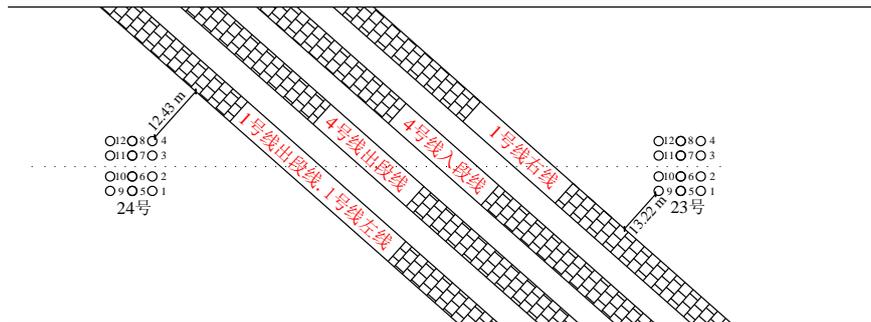


图2 桩基与地铁隧道位置关系示意图

Fig. 2 Schematic of position relationship between piles foundation and subway tunnels

表1 桩基各工序施工组织(注:表中A代表23号墩,B代表24号墩,后面数字为桩号)

Table 1 Pile foundation construction process arrangement

施工日期	主要工序	桩基数量	施工日期	主要工序	桩基数量
06-10	A11, B12 压管	2	06-30	A3 压管; B3 出土	2
06-11	A-11, B12 开挖	2	07-01	A1, B9 出土; B3 灌注	3
06-12	A2 压管	1	07-02	B5 压管; B9, A1 灌注; B8 出土	4
06-13	B7 压管	1	07-03	B8 灌注; A5, B5 出土	3
06-14	A11 灌注	1	07-04	A5 灌注; A3 出土	2
06-15	A2 出土	1	07-05	B5, A3 灌注; B11, A6 出土	4
06-16	A12 压管	1	07-06	B2 压管; B11 灌注	2
06-17	B12 灌注	1	07-07	A6 灌注; B2 出土	2
06-18	B7 出土	1	07-08	B2 灌注	1
06-19	A2 灌注	1	07-09	B6 压管	1
06-20	B7 灌注	1	07-10	A9 压管	1
06-21	A7 压管	1	07-11	B6 出土	1
06-22	A7 出土; B9, B3 压管	3	07-12	A4 压管; B6 灌注; A9 出土	3
06-23	B10, B8, A10 压管; A7 灌注; A12 出土	5	07-13	A9 灌注	1
06-24	B11, A8 压管; A12 灌注; A10 出土	4	07-14	A4 出土	1
06-25	B1 压管; A10 灌注; A8 出土	3	07-15	A4 灌注	1
06-26	A8 灌注; B1 出土	2	07-16	B4 压管	1
06-27	B1 灌注; A1, A6 压管; B10 出土	4	07-17	B4 出土	1
06-28	B10 灌注	1	07-18	B4 灌注	1
06-29	A5 压管	1	—	—	—

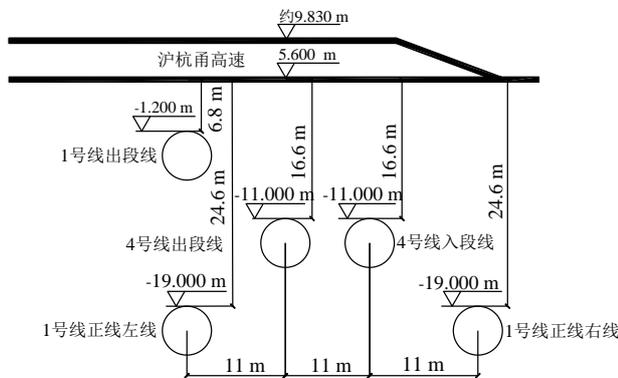


图3 地铁隧道剖面图

Fig. 3 Transverse section of subway tunnel

2 现场监测与数值模拟结果分析

2.1 监测点布置

在隧道中选择距群桩最近的断面布置测点,监测群桩施工过程中隧道水平位移和竖向位移。这些测点位于断面的侧壁,是监测断面上离群桩最近的位置。1号线的左线和出段线、4号线出段线选取离24号群桩最近的点,1号线右线和4号线入段线选取离23号群桩最近的点,观测断面位置见图4,

测点见图5。采用徕卡TM50型测量机器人并组成自动测量系统观测位移。

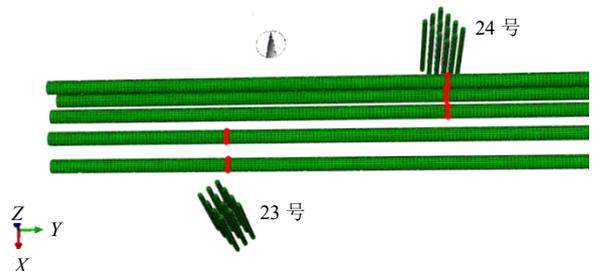


图4 位移测点所在断面的三维示意图

Fig. 4 3-D diagram of section of displacement measurement points

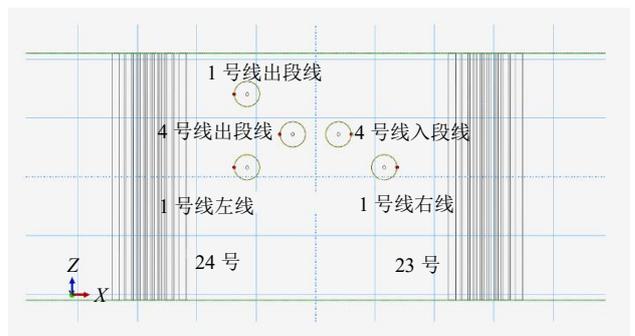


图5 位移测点剖面示意图

Fig. 5 Profile diagram of displacement measurement points

2.2 模型建立

模型土体选用 M-C 模型,为了将问题简化,根据地层构成情况,将相近地层合并,模型共设 7 个土层,其物理力学取值见表 2。灌注桩、钢套管、隧道管片选用线弹性模型,参数如表 3。模型沿隧道轴线方向 (Y 轴) 和垂直隧道方向 (X 轴) 取 250 m,地层深度 (Z 轴) 取 60 m。在模型左右两侧边界水平方向位移设置为零 ($U_x=0, U_y=0$),在模型底部边界设定竖向位移为零 ($U_z=0$),模型顶部表面设置为自由边界。

根据实际工程的钻孔灌注桩施工工序,在数值分析时将单桩施工分为压入钢套管、出土-泥浆护壁、混凝土灌注、混凝土硬化 4 个步骤。压入钢套管工序模拟时,将钢套管 X 和 Y 两个方向的位移设为零,即 $U_x=0, U_y=0$,并将下压深度值设为向下的位移;通过单元生死功能模拟出土工序,即将土体单元进行移除,出土的同时设置静水压力模拟泥浆护壁工序,泥浆的重度设为 12 kN/m^3 ;混凝土灌注过程等效为静水压力,灌注混凝土的重度设为 24 kN/m^3 ;通过单元生死功能模拟混凝土硬化,即将混凝土单元激活。

2.3 现场监测和数值模拟结果分析

数值分析模型上选取与现场相同的监测断面和观测点,对其位移进行分析,见图 4 和图 5 所示。为了便于分析,定义位移数据的正负,水平位移以靠近最近的桩基为正,反之为负,隧道上浮位移为正,沉降为负。考虑桩基施工时间较短 (37 d),淤泥质土层来不及固结,故在本次模拟分析中没有考虑流固耦合作用。

(1) 水平位移分析

将工程实测和有限元模型数据进行分析,得到水平位移的发展过程,见图 6。从图 6 可见,在桩基施工过程中,在水平方向上各条隧道发生移动,移动

方向总体是离开邻近的桩基,期间有离开和靠近的波动。1 号线左线、1 号和 4 号线出段线的水平位移方向是离开 24 号桩基,1 号线右线和 4 号线入段线的水平位移方向是离开 23 号桩基。6 月 22 日前,各测点的位移增长较缓慢,之后增长较快。这与桩基每日的施工数量有关,由表 1 可见,在 6 月 22 日之前每日只施工一根桩,之后每日成桩数量增多,导致对地层和地铁隧道的扰动程度加剧,于是出现了 6 月 22 日前位移增长较为缓慢,而后增长较快的现象。

由图 6 可见,有限元分析获得的水平位移数据与工程实测存在一定差异,但两者的发展规律基本相符。相比较可见,数值分析得到的水平位移随着施工进展增长较为平缓,而工程实测曲线波动幅度较大,这可能和项目工地的施工设备移位、社会车辆通行、出土和堆土情况有关。

由图 6 可见,工程实测和有限元分析数据都说明,隧道群埋深越大,水平位移越大。各测点的水平位移较小,大部分测点水平位移均处于预警范围之内 (2 mm),全部小于报警值 (4 mm)。

(2) 竖向位移分析

将工程实测和有限元分析数据进行分析,得到竖向位移的发展过程,见图 7。

由图 7 可见,各隧道测点竖向位移总体上都是沉降,期间存在上浮和下沉的波动,与水平位移相似,6 月 22 日之前竖向位移增长缓慢,之后增长较快。有限元分析获得的竖向位移数据与工程实测存在一定差异,但两者的发展规律基本相符,有限元分析获得竖向位移的变化幅度较小,曲线平缓,工程实测曲线波动幅度更大。从图 7 可见,工程实测和有限元分析数据都说明,隧道埋深越大,沉降越小。各测点的竖向位移较小,全部测点水平位移均处于预警范围 (3 mm) 之内。

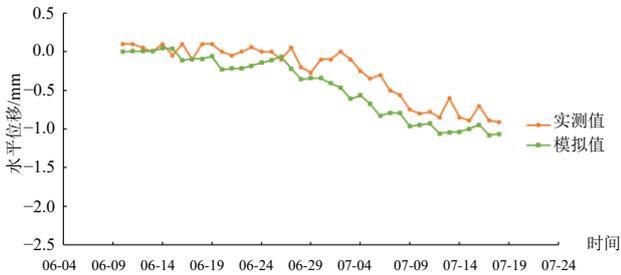
表 2 土体参数表
Table 2 Soil parameters

编号	名称	底层高程/ m	土层厚度/ m	天然重度/ (kN/m^3)	压缩模量/ MPa	泊松比	内摩擦角/ ($^\circ$)	黏聚力/ kPa
①	素填土	0.41	5.22	18.0	3.51	0.35	12.0	12.0
②	砂质粉土	-1.99	2.41	19.5	8.61	0.25	25.7	3.9
③	粉砂夹粉土	-13.29	11.32	19.4	13.61	0.25	28.4	3.1
④	淤泥质粉质黏土	-29.69	16.41	18.0	3.20	0.35	12.3	14.2
⑤	粉质黏土	-34.59	4.90	19.0	4.82	0.35	35.4	18.4
⑥	圆砾	-40.99	6.40	20.0	35.10	0.20	35.0	1.0
⑦	全风化泥质粉砂岩	-54.39	13.43	19.5	9.83	0.25	18.3	46.5

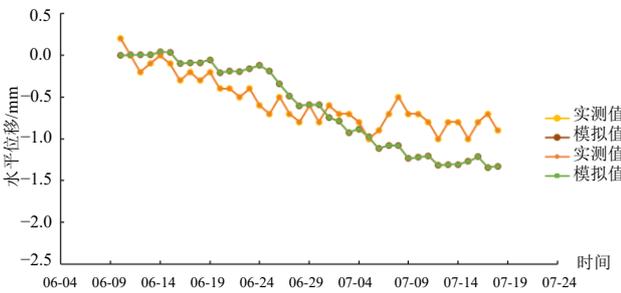
表3 线弹性材料参数表

Table 3 Parameters of linear elastic materials

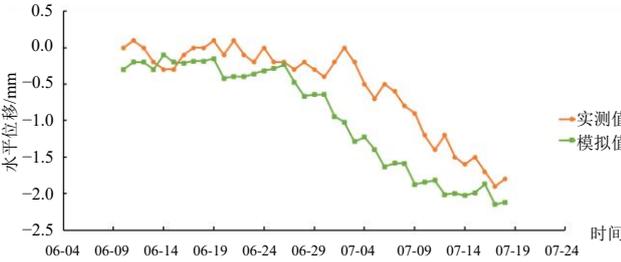
材料	密度/(g/cm ³)	弹性模量/10 ⁴ MPa	泊松比
混凝土	2.50	3.00	0.20
钢套管	7.85	20.60	0.27
管片	2.60	3.25	0.24



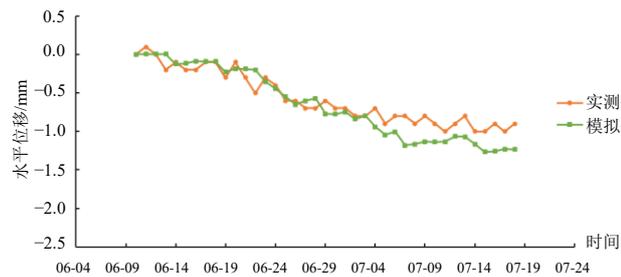
(a) 1号线出段线



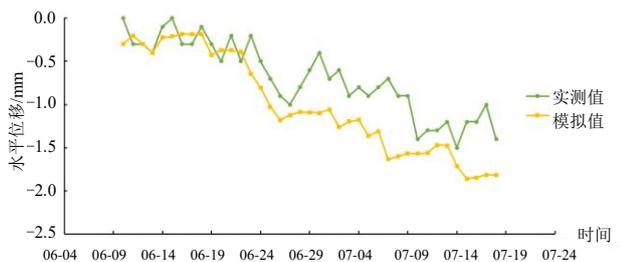
(b) 4号线出段线



(c) 1号线左线



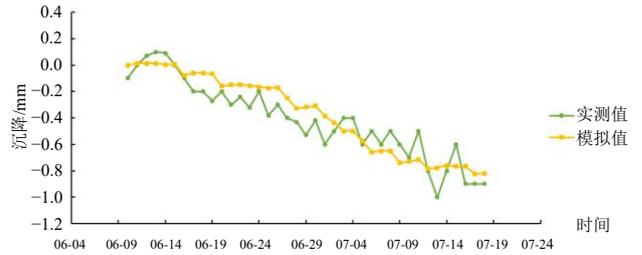
(d) 4号线入段线



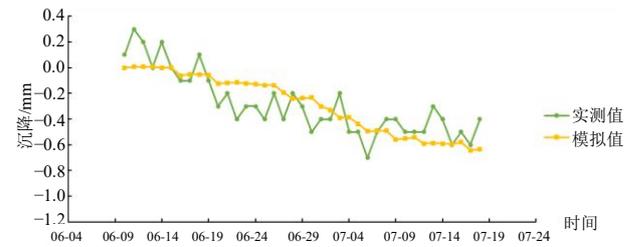
(e) 1号线右线

图6 各测点水平位移发展规律

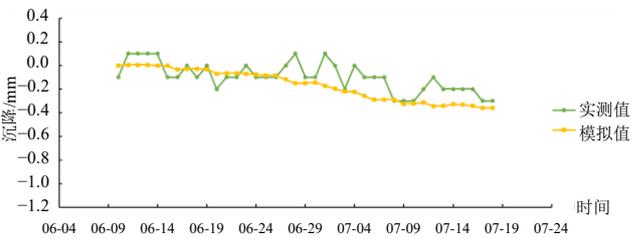
Fig. 6 Time-history curves of tunnel horizontal displacements



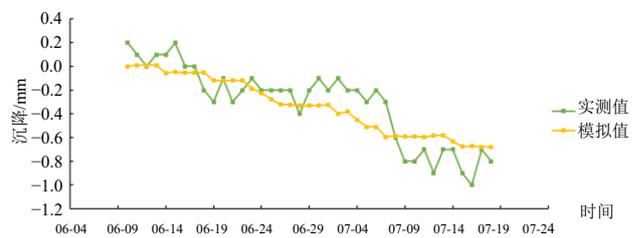
(a) 1号线出段线



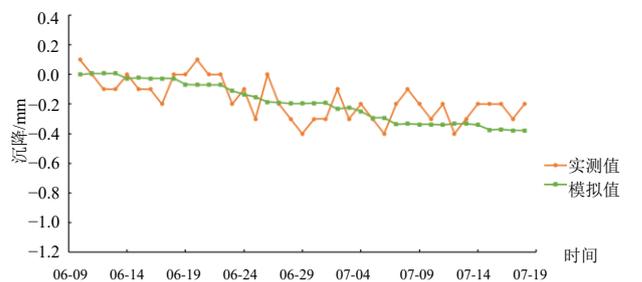
(b) 4号线出段线



(c) 1号线左线



(d) 4号线入段线



(e) 1号线右线

图7 各测点竖向位移发展规律

Fig. 7 Time-history curves of tunnel vertical displacements

图6和图7中实测的隧道水平位移和竖向位移存在波动(回弹)现象,这与群桩施工期间每天施工流程有关。由表1可见,施工内容包括压管、出土、灌注混凝土等,每个工序对隧道位移存在影响,不同工序的影响也存在耦合作用,导致隧道的

位移过程极为复杂,出现了图6和图7中的位移波动现象。

3 结 论

(1) 工程实测及有限元分析都表明,隧道群的水平移动趋势表现为离开邻近的桩基,埋深越大的隧道,水平位移越大。

(2) 竖向位移总体表现为下沉,隧道群埋深越大,竖向位移越小。各地铁隧道水平位移均大于沉降沉降。

(3) 水平和竖向位移增长量与当日桩基完成数量密切相关,完成数量少,隧道位移增长缓慢,数量多则位移增长较快。

(4) 各测点的水平位移和竖向位移均较小,测点位移处于预警范围之内,全部小于报警值,说明全套管全回转钻机成孔群桩施工对隧道扰动较小。

参考文献

- [1] 徐云福,王立峰. 近邻桩基施工对城市地铁隧道的影响分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 577-582.
XU Yun-fu, WANG Li-feng. Analysis of effects on city metro tunnel due to adjacent pile foundation construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 577-582.
- [2] 楼晓明,金志靖. 钻孔灌注桩基础对紧邻地铁隧道产生竖向附加应力和变形的计算分析[J]. 岩土力学, 1996, 17(3): 48-53.
LOU Xiao-ming, JIN Zhi-jing. Analysis of the influence of bored pile foundation on adjacent metro tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(3): 48-53.
- [3] 楼晓明,刘建航. 高层建筑桩基础对邻近隧道影响的监测与分析[J]. 同济大学学报, 2003, 31(9): 1014-1017.
LOU Xiao-ming, LIU Jian-hang. Monitoring and analysis of influence of pile foundation under high-rise buildings on adjacent tunnel[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(9): 1014-1017.
- [4] 庄妍,牟凡,崔晓艳,等. 全套管灌注桩在临近地铁隧道的暗桥桩基工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S2): 41-45.
ZHUANG Yan, MU Fan, CUI Xiao-yan, et al. Application of benoto pile in concealed bridge piled project near subway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S2): 41-45.
- [5] 邓指军. 钢套筒压入对邻近地铁隧道的影响分析[J]. 施工技术, 2011, 40(13): 77-79.
DENG Zhi-jun. Analysis on Influence of steel sleeve indentation on adjacent metro tunnel[J]. Construction Technology, 2011, 40(13): 77-79.
- [6] 丁智,王永安,虞兴福,等. 近距离桥桩施工对地铁隧道影响监测分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 173-179, 186.
DING Zhi, WANG Yong-an, YU Xing-fu, et al. Monitoring and analysis of the impact of adjacent bridge pile construction on subway tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(1): 173-179, 186.
- [7] 路平,郑刚. 立交桥桩基础施工及运营期对既有隧道影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 923-927.
LU Ping, ZHENG Gang. Influence of construction and operation of pile foundation of overpass on existing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 923-927.
- [8] 代志萍. 钻孔灌注桩施工对邻近地铁隧道的影响分析[J]. 路基工程, 2015(2): 114-116.
DAI Zhi-ping. The analysis of the influence about pile construction on adjacent existing tunnel[J]. Subgrade Engineering, 2015(2): 114-116.
- [9] 闫静雅,张子新,黄宏伟. 桩基础荷载对邻近已有隧道影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2508-2514.
YAN Jing-ya, ZHANG Zi-xin, HUANG Hong-wei. Finite element analysis of influence of pile group loading on existing neighboring tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2508-2514.
- [10] 闫静雅. 桩基础全寿命期对邻近已有隧道的影响研究[D]. 上海: 同济大学, 2000.
YAN Jing-ya. The influence of pile foundation in lifecycle on adjacent existing tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2000.
- [11] 宋福贵,王炳龙,黄大维,等. 钢管管灌注群桩施工顺序对多隧道的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2330-2336.
SONG Fu-gui, WANG Bing-long, HUANG Da-wei, et al. Influence of construction sequence of cast-in-place group

- piles with steel sleeve on tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2330-2336.
- [12] 归浩杰, 张增峰, 饶平平. 超长密集群桩对邻近隧道影响的数值分析[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(2): 43-47.

- GUI Hao-jie, ZHANG Zeng-feng, RAO Ping-ping. Numerical analysis of the effects of ultradeep and compact group piles on adjacent tunnels[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2012, 28(2): 43-47.

【简 讯】

第四届建筑信息技术与环境智能国际研讨会 (AITAI 2021)

会议介绍:

第四届建筑信息技术与环境智能国际研讨会 (AITAI 2021) 将于 2021 年 12 月 17—19 日在中国合肥召开。本次会议旨在研究建筑信息技术与环境智能, 为来自国内外高等院校、科学研究所、企事业单位的专家学者们提供一个分享最新研究成果、扩大专业网络、探讨科技前沿的国际学术交流平台。

主讲嘉宾:

Prof. Antonio Caggiano

论文出版及检索:

会议所有的投稿都必须经过 2-3 位组委会专家审稿, 经过严格的审稿之后, 所有被收录的论文将发表在会议论文集, 并提交 EI Compendex, Scopus 检索, 目前 EI 检索稳定。

参会方式 (无投稿):

报名系统:

<https://www.ais.cn/attendees/toSignUp/3M2UFQ>

(1) 报告者: 如果你只想参加会议并作报告,

不出版论文, 只需要提交摘要, 经过评审后, 将告知结果。注册成功的报告, 将列入会议日程。(注: 报告的摘要不提交出版)

(2) 听众: 注册成功的听众可以参加会议的所有分会, 每篇录用的稿件可享一位作者免费参会。

注册费用:

(1) 第一篇稿件: 3000 元/篇 (4 页)

(2) 超出 4 页 (第 5 页起算): 300 元/页

(3) 无投稿参会: 报告者 1200 元/人; 听众 1000 元/人

(注: 团队投稿优惠, 欢迎咨询会务组)

联系我们:

会议官网: <http://is-aitai.org>

会议邮箱: ISAITAI@126.com

官方公众号: GSRA 学术会议

会议秘书: GSRA 会务组黄老师

咨询 QQ: 2777454525

咨询电话: 15820210118 (微信同号)