

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021091023101997

文章编号:1674-599X(2023)05-0111-11

引用格式:彭俊,黄戡.叠线盾构掘进对既有建筑物桩基的位移分析[J].交通科学与工程,2023,39(5):111-121.

Citation: YANG Yiming, ZHOU Chengkun, CHEN Huan, PENG Jun, HUANG Kan. Displacement analysis of existing building pile foundation caused by excavation of stacked shield tunnel[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(5): 111-121.

叠线盾构掘进对既有建筑物桩基的位移分析

彭俊,黄戡

(长沙理工大学土木工程学院,湖南长沙410014)

摘要:为有效减少与深入分析叠线盾构隧道掘进对既有邻近建筑物桩基变形的影响,以广东省佛山市地铁3号线南海广场—叠滘区间叠线隧道穿越邻近建筑物桩基为工程背景,采用Midas GTS NX有限元软件,建立了不同桩长 h 与隧道半径 r 比值的三维有限元模型,分析叠线盾构隧道施工对既有邻近建筑物桩基的位移影响。通过对比现场监测数据与模型数据,得到在不同几何位置关系下,叠线隧道开挖对既有邻近建筑物桩基的影响规律。研究结果表明:当 $7 < h/r < 10$ 时,桩基水平和纵向位移量最小;当 $h/r < 7$ 时,桩基水平和纵向位移量最大。上、下叠线隧道在穿越既有建筑物桩基时,工程设计应尽可能将下方隧道轴线置于桩底标高线以上,避免隧道在桩底标高线以下开挖导致桩基出现的承载力损失。该研究结果可为类似叠线隧道工程设计提供参考。

关键词:叠线盾构隧道;建筑物桩基;数值模拟;位移分析

中图分类号:U45

文献标志码:A

Displacement analysis of existing building pile foundation caused by excavation of stacked shield tunnel

PENG Jun, HUANG Kan

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410014, China)

Abstract: In order to effectively reduce the impact of underground tunnel boring on existing building pile foundations, in-depth analysis of the impact of stacked-line shield tunnel boring caused by deformation of adjacent building pile foundations, Foshan Metro Line 3 Nanhai Plaza - stacked Kau interval stacked-line tunnel through the pile foundations of adjacent buildings as the background of the project, the use of Midas GTS NX finite element software, the establishment of a three-dimensional finite element model of the ratio of the length of different piles h to the radius of the tunnel r . The three-dimensional finite element model with different pile lengths h and tunnel radius r is used to analyse the displacement impact of the stacked-line shield tunnel construction on the pile foundations of the existing adjacent buildings. By comparing the on-site monitoring data with the model data, the impact of the stacked-line tunnel excavation on the pile foundations of existing neighbouring buildings is obtained under different geometric position relationships. The results of the study show that: when h/r is greater than 7 but less than 10, the total displacement of pile foundation is the smallest; when h/r is

收稿日期:2021-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078060);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4606);长沙理工大学“双一流”科学研究国际合作拓展项目(2018IC19);长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性项目(18ZDXK05)

作者简介:彭俊(1997—),男,长沙理工大学硕士生。E-mail:pengj1897@163.com

less than 7, the total displacement of pile foundation is the largest. When the upper and lower stacked-line tunnels cross the pile foundations of existing buildings, the engineering design should place the axes of the tunnels underneath above the pile base elevation line as far as possible, so as to avoid the loss of bearing capacity at the pile ends due to excavation of the tunnels below the pile base elevation line. The results of this study can provide a reference for the design of similar stacked-line tunnels.

Key words: overlapped tunnel; existing building pile; numerical analysis

随着中国的经济的快速发展与城市化进程的不断推进,越来越多的城市开始兴建地铁。地铁可以提供高效、快速、安全的城市交通方式,提高出行效率与城市交通的现代化水平。由于早期城市规划并未预先考虑地铁线路,且对既有邻近高层建筑物桩基进行改造的难度较大,所以,地铁线路的设计与施工均存在种种困难。叠线隧道不仅能减小地下空间的横向占用面积,可以在有限的地面上提高地铁系统的运行效率,且其施工主要是在地下进行的,对城市规划和景观设计的影响也较小^[1-3]。因此,叠线隧道工程在许多城市的地铁建设中得到了广泛应用,如:北京地铁2号线、4号线在宣武门站附近的区间段,深圳地铁蛇口线隧道在罗宝线隧道正下方的穿越地段及上海地铁11号线、4号线徐家汇站和体育场站之间的四轨交叠段^[4]。

地铁叠线隧道施工大多采用盾构施工法。在叠线隧道的掘进过程中,盾构施工可能会引起地表沉降和地层损失,还必然会对既有邻近建筑物桩基的稳定性造成影响,导致其发生变形和破坏,甚至可能威胁到既有邻近建筑物的结构安全,引发次生危害^[5-7]。

早在20世纪70年代,已经有众多学者对隧道盾构施工对桩基的影响进行了较深入的研究。在实验研究方面,JACOBSZ等^[8]在干砂中进行了隧道开挖施工对相邻单桩影响的离心模型试验,分析了由隧道开挖引起的地层损失对地表沉降剖面及离隧道不同距离处模型桩基沉降的影响。ONG等^[9]采用离心机试验,分析和研究了在黏土中进行盾构隧道开挖对相邻桩基的影响,发现桩基在黏土中的行为具有时间依赖性,主动剪切破坏楔中张拉裂缝的发展阻止了土压力在桩基上的充分传递,减小了遭到破坏后的诱导桩的弯矩和挠度。在理论分析方面,CHEN等^[10]使用两阶段分析法,深入探讨了隧道掘进对邻近桩基位移的影响,其首次提出的两阶段

法也是目前研究隧道对邻近桩基影响的基本方法。MU等^[11]提出了一种基于非对称荷载的求解桩基与层状土位移的两阶段方法,该法未考虑桩土系统之间垂直相互作用力的影响,能快速地简要计算桩基承台在层状土中受到隧道开挖影响而产生的水平位移,并能分析桩-土-承台三者之间的相互作用机理。KITIYODOM等^[12-13]基于Winkler弹性地基梁和Mindlin解,分析了隧道开挖对相邻群桩的影响,并总结出单桩、群桩和承台基础的变形和荷载分布规律。可文海等^[14-16]基于Loganathan公式和Winkler地基梁模型,研究了盾构开挖引起的邻近群桩的竖向位移,发现群桩的竖向位移与隧道埋深、地层损失比、桩基直径、土体弹性模量、桩基间距等均有密切联系。袁海平等^[17-18]采用有限差分法和桩-结构耦合弹簧的力学分析法,分析了盾构开挖对既有邻近建筑物桩基的受力及变形的影响,发现双盾构连续开挖对邻近桩基的受力性能影响具有叠加效应。在数值模拟方面,LEE等^[19]用数值分析法,建立三维弹塑性模型,并利用该模型研究了在弱风化岩体中隧道开挖对既有邻近建筑物单桩和群桩的影响,该研究发现:隧道的开挖降低了单桩与群桩的承载力,且群桩承载力的下降幅度特别大。朱逢斌等^[20]在研究盾构隧道开挖对邻近既有建筑物桩基的影响时,验证了数值模拟方法的可靠性。夏元友等^[21-27]分析了盾构隧道下穿一般路基时的群桩位移,发现土的加载与卸载是同时进行的,且其对位移的影响都是成对出现的。虽然国内外许多学者对盾构隧道施工的研究都已取得了较为丰硕的成果,但大部分研究仍是以单条盾构隧道为研究对象,较少考虑叠线盾构隧道开挖,且由于叠线隧道是在同一挖掘面上进行施工的,需要更精确的工程设计和施工。因此,研究叠线盾构隧道掘进对既有邻近建筑物桩基的位移影响是非常有必要的。

本研究依托于广东省佛山市的地铁3号线的中南海广场—叠滘区间段工程,采用Midas GTS NX有限元软件,建立不同桩长与隧道半径比值情况下的三维有限元模型,模拟与分析叠线盾构隧道施工对既有邻近建筑物桩基的位移影响,并将现场监测数据与该模型计算得到的桩基位移计算结果进行对比,验证该模型预测的准确性与合理性。本研究着重分析在不同桩长 h 与隧道半径 r 比值情况下桩基位移的变化规律,其可为类似叠线隧道下穿、侧穿既有邻近建筑物的工程的设计与施工提供参考。

1 工程背景

广东省佛山市地铁3号线南海广场—叠滘区间线从佛山市南海广场站出发,沿道路向北敷设,下穿人行天桥,再往西北方向下穿某建筑综合楼等多个建筑后,两隧道的位置由最开始的水平平行过渡为竖向平行,转变为叠线隧道,最终到达叠滘站。该区间线路为双线隧道,采用盾构施工方式。其中,左线盾构区间起始里程为ZDK54+018.305,终点里程为ZDK55+718.263,其中,短链里程长为16.409 m,左线总线长为1 683.549 m,右线盾构区间起始里程为YDK54+018.305,终点里程为YDK55+718.263,右线总线长为1 699.958 m。盾构隧道在较长范围内呈上、下交叠方式,左线隧道在下侧,右线隧道在上侧。区间隧道平面走向如图1所示。

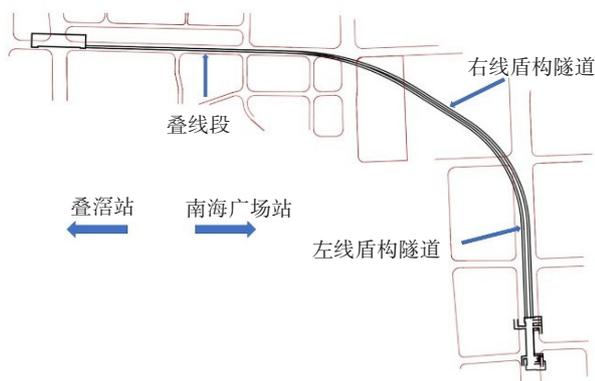


图1 工程平面

Fig. 1 Engineering floor plan

该区间盾构段采用了两台土压平衡盾构机依次在施工左、右线进行施工。具体的施工顺序是:

1) 先在区间段的左线隧道进行施工,从南海广

场站出发后,盾构沿东南向继续掘进,直至叠滘站;

2) 在工程进展至230环后,再对区间段的右线隧道展开施工。该区间盾构段的混凝土等级为C50,抗渗等级为P12,管片外径为8 m,内径为7.6 m。

2 数值分析法

2.1 三维模型参数

本研究采用Midas GTS NX有限元软件,模拟广东省佛山市地铁3号线的南海广场—叠滘区间叠线隧道的施工过程。由于该隧道的左、右线隧道从水平平行铺设逐渐过渡至上、下叠交的铺设方式,为简化实际工程施工情况,本次模拟采用最不利的工况^[17],即左、右线隧道竖直平行的空间关系来对其进行研究。该有限元数值模型是建立在三维地层—隧道—桩基的实体模型之上的,在此基础上,采用修正的Mohr-Coulomb本构模型模拟素填土、粉质黏土、全风化沉积碎屑岩,采用弹性模型模拟强风化泥质粉砂岩和中风化泥质粉砂岩。为简化计算,本研究假定各土层分布均衡,主要地层物理参数见表1。

表1 地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the formation

地层	厚度/ m	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松 比	$E_{50ref}/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	黏聚 力	内摩 擦角/ ($^{\circ}$)	弹性 模量/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)
素填土	3.15	18.8	0.43	5 573	8.0	12.0	
粉质黏土	2.65	19.5	0.31	6 237	20.0	11.2	
全风化沉 积碎屑岩	5.80	19.5	0.33	8 682	39.1	30.0	
强风化泥 质粉砂岩	11.40	23.0	0.30				116 927
中风化泥 质粉砂岩	37.00	25.1	0.30				147 792

在表1中, E_{50ref} 为三轴试验割线刚度。在该模型中,管片宽为2.0 m,厚为0.2 m,采用弹性实体单元模型进行模拟;盾壳、注浆层均采用二维板单元来模拟,结构材料参数见表2;模型中桩基采用实

体单元模拟;桩-土间采用节点耦合模拟。根据不同桩长的桩基结构与两隧道之间的空间关系保留部分富余空间,沿掌子面开挖方向,构建长为30 m,宽为20 m,高为60 m的长方体土体模型。假定约束地面层为自由面,约束模型土体底面位移,约束模型土体四周侧面的法向位移。左线与右线隧道之间的中心线距离为12 m,左线隧道埋深40 m,右线隧道埋深为28 m。

表2 结构材料参数

Table 2 Structural material parameters

名称	容重/(kN·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/(kN·m ⁻²)
盾壳	70	0.0	2.5×10 ⁸
管片	25	0.3	2.0×10 ⁷
注浆层	22	0.3	2.0×10 ⁵

2.2 工况

为简化既有建筑物桩基础与两线隧道之间的空间关系,设桩基的底面中点与两隧道中心线的水平间距为5 m。为比较和分析不同桩长 h 与隧道半径 r 比值情况下,桩基水平位移和竖向位移的变化规律,设置5种工况,分别讨论叠线盾构隧道施工对既有建筑桩的影响研究。5种工况的桩基桩长分别为22、28、34、40、46 m,具体参数见表3。

表3 5种模拟工况

Table 3 5 simulation conditions

工况	桩长/m	桩底与两隧道位置关系	h/r
1	22	右线隧道上侧	[0, 7)
2	28	与右线隧道轴线平行	7
3	34	右线隧道与左线隧道中间	(7, 10)
4	40	与左线隧道轴线平行	10
5	46	左线隧道下侧	(10, +∞)

在表3中, h 为桩基桩长, r 为隧道半径, h/r 即

为桩基桩长与半径的比值。这5种模拟工况的横剖面 and 建模示意分别如图2~6所示。

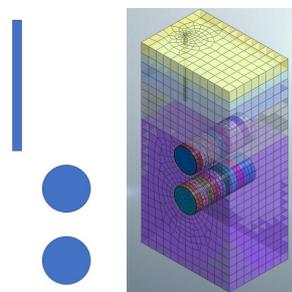


图2 工况1的横剖面示意及建模

Fig. 2 Cross-section and modeling of working condition 1

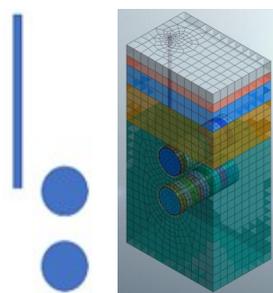


图3 工况2的横剖面示意及建模

Fig. 3 Cross-section and modeling of working condition 2

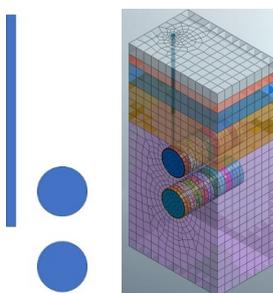


图4 工况3的横剖面示意及建模

Fig. 4 Cross-section and modeling of working condition 3

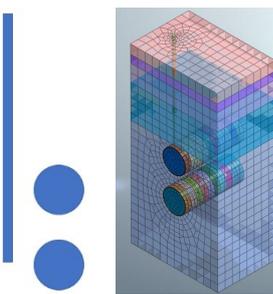


图5 工况4的横剖面示意及建模

Fig. 5 Cross-section and modeling of working condition 4

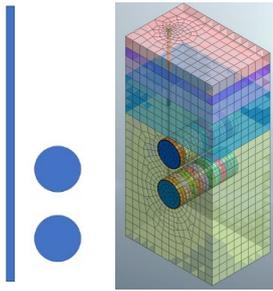


图6 工况5的横剖面示意及建模

Fig. 6 Cross-section and modeling of working condition 5

该模拟共分为34步进行,为更真实、有效地模拟盾构隧道开挖施工,根据广东省佛山市3号线实际施工的情况,盾构隧道采用先左线、后右线的施工顺序。即先施工左线隧道,这对应着有限元模拟的第1~17步施工步;待左线隧道盾壳尾端通过模型后,再按类似的步骤对右线隧道进行开挖,这对应着有限元模拟的第18~34步,直至开挖全部结束。

具体的施工步骤为:

步骤1:添加初始应力场;

步骤2:钝化第一环土体单元,朝掌子面法线方向激活掘进压力 F_1 ,并激活第一环盾构单元和盾壳的外压力 F_4 ;

步骤3:改变第一环管片层属性,激活千斤顶力 F_3 ,钝化第一环荷载 F_1 、 F_4 及盾壳单元;

步骤4:改变注浆层属性,激活注浆压力 F_2 ,钝化第3个施工阶段中千斤顶力 F_3 ;

步骤5:重复上述2~4步,直至右线隧道第15环的注浆施工完成,退出模拟。

2.3 盾构参数

当盾构机向前推进开挖时,千斤顶推力 F_3 将保持盾构机的稳定,以抵消驱动力和所需的支撑土压力。掌子面主掘进压力 F_1 由千斤顶推力和刀盘切割力的轴向分力组成。注浆压力 F_2 在掌子面的轴向和隧道圆周向方向上变化。通常情况下,灌浆压力将沿着盾构机远离灌浆源的方向减少,其将随着深度的增加而逐渐提高,且该灌浆压力也将沿着隧道圆周运动方向而增加。

构成隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)掌子面向力平衡总推力的分量的表达式为

$$F_1 = F_{cw} + F_f + F_b - F_2 \pm F_g \quad (1)$$

$$F_{cw} = F_b + F_{ce} + F_p + F_o \quad (2)$$

式中: F_{cw} 为刀盘切割力的轴向分力;

F_f 为盾壳的摩擦力;

F_b 为土对压力舱壁的压力;

F_g 为土对刀盘轴承的压力;

F_{ce} 为单元切割力的轴向分量;

F_p 为切割轮中心的土塞位移;

F_o 为盾构机自重。

假定隧道掘进第*i*环盾构掘进压力为 F_{1i} ,注浆压力为 F_{2i} ,千斤顶力为 F_{3i} ,盾壳外压为 F_{4i} ,其表达式分别为

$$F_{1i} = 180 + 18z \quad (3)$$

$$F_{2i} = 36 - 1.8y \quad (4)$$

$$F_{3i} = 360 \quad (5)$$

$$F_{4i} = 31\,250 - 15\,625y \quad (6)$$

式中: z 为受力点到隧道中心线的距离,规定其在隧道中心线以上为正,在隧道中心线以下为负;
 y 为受力点到隧道第一环掌子面的距离。

3 数值计算结果分析

3.1 桩的竖向位移

计算左、右线隧道施工全部完成后桩基的竖向位移,结果如图7所示。当 $h/r < 7$ (即工况1)时,桩基的最终竖向位移是-9.02 mm;当 $h/r = 7$ (即工况2)时,桩基的最终竖向位移是-7.18 mm;当 $7 < h/r < 10$ (即工况3)时,桩基的最终竖向位移是-4.84 mm;当 $h/r = 10$ (即工况4)时,桩基的最终竖向位移是-5.69 mm;当 $h/r > 10$ (即工况5)时,桩基的最终竖向位移是-5.03 mm。

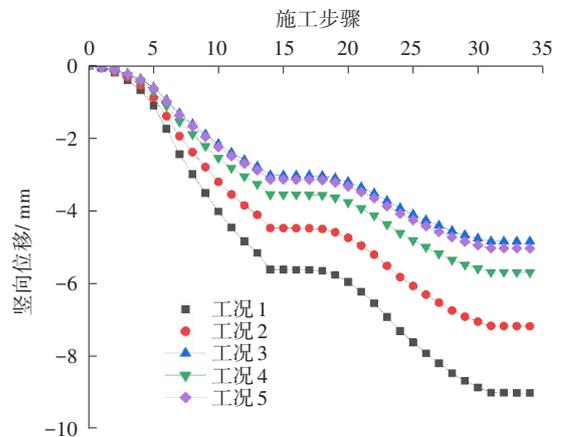


图7 桩基的竖向位移

Fig. 7 Vertical displacement of pile foundation

从图7可以看出,无论 h/r 为何数值,桩基的竖

向位移均随着底部隧道的开挖的逐步增长,之后,桩基竖向位移的增长随着盾构机沿掘进方向远离桩而逐步放缓,大约在第14个施工步时,这些桩基的竖向位移增长开始停滞,但从第20个施工步开始,这些桩基的竖向位移的增长又开始加速,直至开挖完成,桩基的竖向位移逐步达到稳定状态。当 $h/r < 7$ (即工况1)时,叠线隧道掘进对桩基的影响最大,此时桩基的竖向位移是所有工况中最大的。这是由于当 $h/r < 7$ 时,桩基周围土体的土体弹性模量比其他土体的弹性模量小,桩基承受了更多的土体荷载,隧道开挖造成的土体受扰动也更大,且当盾构开挖完成后,对土体的注浆硬化及土体固结沉降等会促使桩体进一步下沉。其桩基竖向位移变化如图8所示。

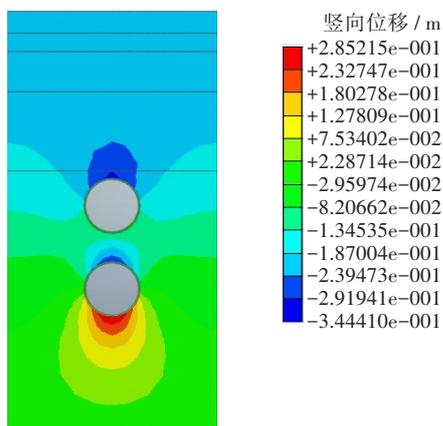


图8 工况1的土体竖向位移变化示意

Fig. 8 Vertical displacement of soil in condition 1

当 $7 < h/r < 10$ (即工况3)时,叠线隧道开挖对桩基竖向位移的影响最小,此时的桩基的最大竖向位移是所有工况中最小的,其桩基的竖向最大位移仅为 -4.84 mm,与 $h/r < 7$ (即工况1)时的桩基的最大竖向位移 -9.02 mm相比,该值减少了46.3%。产生这种现象的主要原因是:当盾构隧道开挖开始后,隧道中心线上部的土体发生了沉降,中心线下部的土体则向上隆起,这种土体间此长彼消的作用抵消了一部分位于两线隧道之中的桩基竖向位移^[18]。

当 $h/r = 7$ (即工况2)时,桩基的最大竖向位移较 $h/r < 7$ (即工况1)时的桩基的最大竖向位移减少了20.4%;当 $h/r = 10$ (即工况4)时,桩基的最大竖向位移较 $h/r < 7$ (即工况1)时的桩基的最大竖向位移减少了36.9%;当 h/r 大于10(即工况5)时,桩基的最大竖向位移较 $h/r < 7$ (即工况1)时的桩基的最大竖向位移

减少了44.2%。在这3种工况下,桩基的最大竖向位移下降非常显著,这是由于这3种工况均采用了长桩,而长桩能充分发挥其下部桩身的侧摩阻力,减少了桩基的竖向位移。一般来说,盾构隧道开挖引起的长桩桩基的竖向位移小于短桩桩基的竖向位移^[19]。

3.2 桩基的水平位移

计算左、右线隧道施工全部完成后桩基的水平位移,结果如图9所示。当 $h/r < 7$ (即工况1)时,桩基的最终水平位移为2.46 mm,当 $h/r = 10$ (即工况2)时,桩基的最终水平位移为3.45 mm,当 $7 < h/r < 10$ (即工况3)时,桩基的最终水平位移为3.87 mm,当 $h/r = 10$ (即工况4)时,桩基的最终水平位移为3.61 mm,当 $h/r > 10$ (即工况5)时,桩基的最终水平位移为3.66 mm。

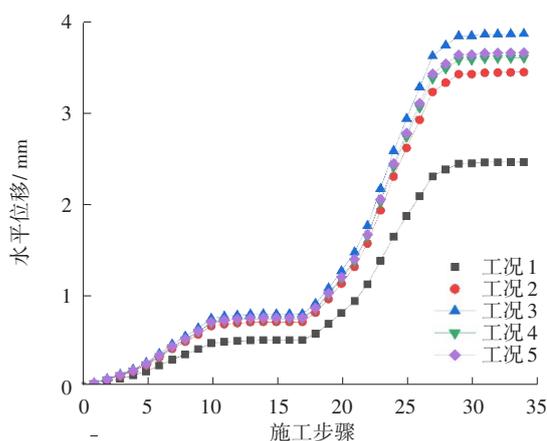


图9 桩基水平位移

Fig. 9 Horizontal displacement of pile foundation

从图9可以看出,桩基的水平位移随底部隧道的掘进的进行而不断增大,直至掘进完成,桩基的水平位移达到稳定状态。其中,当 $7 < h/r < 10$ (即工况3)时,叠线隧道对桩基的水平位移的影响最大。这是因为盾构隧道开挖会造成周围土体向隧道中心产生挤压,而叠线隧道中两条隧道中心线的中点位置受隧道叠交效应的扰动最大^[20]。

从图9还可以看出,当 $h/r < 7$ (即工况1)时,叠线隧道开挖对桩基水平位移的影响最小,此时的桩基水平位移比 $7 < h/r < 10$ (即工况3)时的桩基水平最大位移3.87 mm减少了36.4%。这是因为离隧道中心线距离越远,土体受盾构隧道开挖影响越小^[21]。当 $h/r < 7$ (即工况1)时,土体不仅离隧道中心线较远,且其埋深比 $h/r > 10$ (即工况5)时的埋深更小。当 $h/r = 7$

(即工况2)时,桩体平行于右侧隧道的中心线,当 $h/r=10$ 时(即工况4)时,桩体平行于左侧隧道中心线。但是比较这两种情况下的桩体埋深可知,当 $h/r=7$ (即工况2)时的桩基的埋深比当 $h/r=10$ (即工况4)时的桩基的埋深更小,所以当 $h/r=7$ (即工况2)时的桩基水平位移小于当 $h/r=10$ (即工况4)时的桩基水平位移。 $h/r=7$ (即工况2)时的桩体的水平位移比 $7<h/r<10$ (即工况3)时的桩基水平位移减小了10.8%;当 $h/r=10$ (即工况4)时的桩基的水平位移 $7<h/r<10$ (即工况3)时的桩基水平位移减小了6.7%; $h/r>10$ (即工况5)时的桩基的水平位移 $7<h/r<10$ (即工况3)时的桩基水平位移减小了5.4%

这5个工况的桩都设定在隧道的左侧(即 y 轴负方向),故桩的水平位移都为正值,如图10左侧上方深色区域所示。当模拟桩都位于隧道的右侧(即 y 轴正方向)时,桩的水平位移都为负值,如图10中右侧上方深色区域所示。

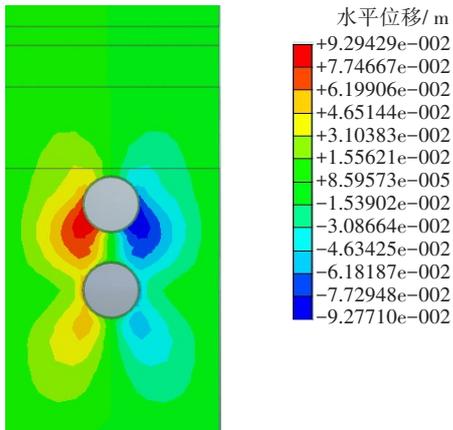


图10 土体水平位移变化示意

Fig. 10 Horizontal displacement of soil

4 工程监测值对比

由于桩基的竖向和水平位移对于地面建筑物的安全稳定性有着较大的影响,故通过对地面既有建筑物进行实时监测,并绘制桩基位移变化曲线来分析和研究叠线盾构隧道开挖对其既有邻近建筑物桩基的具体影响。在广东省佛山市地铁3号线南海广场—叠滘区间线叠线隧道开挖工程中,当盾构开挖施工穿越建筑物桩群时,为保证邻近既有建筑物的安全,已做好了监控量测工作,将监测得到的

不同桩长的5个工况的邻近既有建筑物水平及竖向位移数据,与本研究的有限元数值模型的计算结果进行比较,结果分别如图11~15所示。

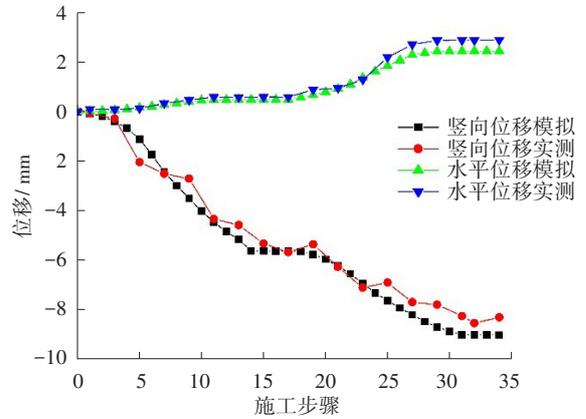


图11 工况1模拟与监测对比

Fig. 11 Comparison of simulation and monitoring of condition 1

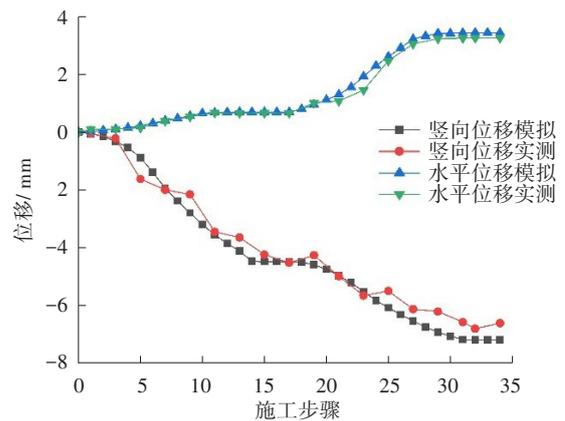


图12 工况2模拟与监测对比

Fig. 12 Comparison of simulation and monitoring of condition 2

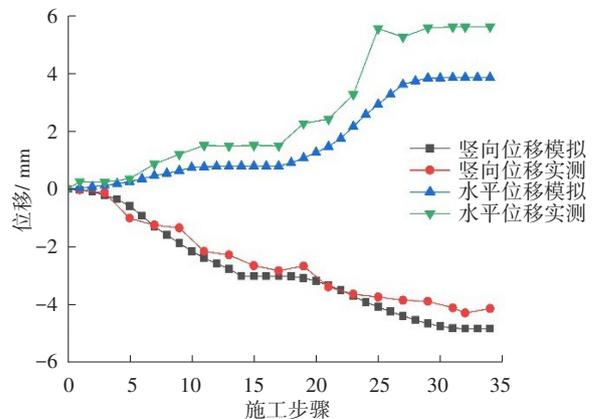


图13 工况3模拟与监测对比

Fig. 13 Comparison of simulation and monitoring of condition 2

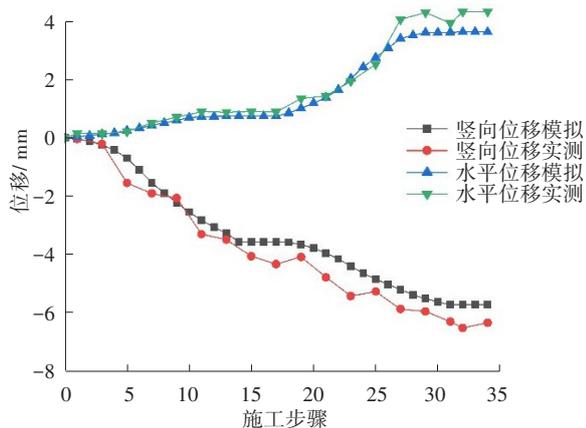


图14 工况4模拟与监测对比

Fig. 14 Comparison of simulation and monitoring of condition 4

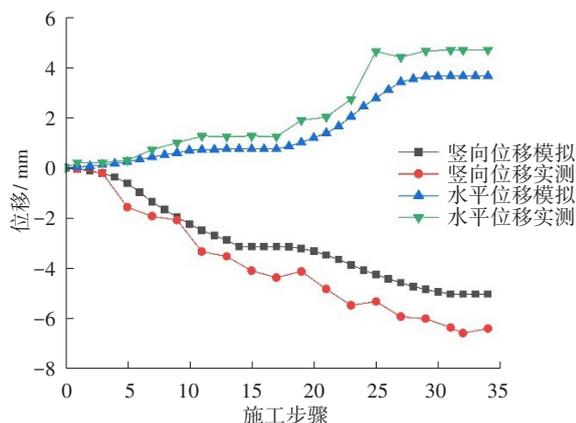


图15 工况5模拟与监测对比

Fig. 15 Comparison of simulation and monitoring of condition 5

从图11~15中可以看出,本次模拟结果与实际监测数据误差基本吻合。其中,当 $7 < h/r < 10$ (即工况3)时,水平位移模拟结果与实际监测结果相差较大,两者差值的绝对值达到了1.75 mm,相对误差约为25%,但该相对误差仍满足《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)与《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911—2013)这两个规范中的要求。其余4个工况的相对误差约为7%~16%。具体情况如下:

1) 当 $h/r < 7$ (即工况1)时,模拟的竖向位移比实际竖向位移大0.72 mm,高出约8.7%,模拟水平位移比实际水平位移大0.44 mm,高出15.2%;

2) 当 $h/r = 7$ (即工况2)时,模拟竖向位移比实际竖向位移大0.57 mm,高出8.6%,模拟水平位移比实

际水平位移大0.18 mm,高出5.5%;

3) 当 $7 < h/r < 10$ (即工况3)时,模拟竖向位移比实际竖向位移大0.69 mm,高出16.6%,模拟水平位移比实际水平位移小1.76 mm,降低25.3%;

4) 当 $h/r = 10$ (即工况4)时,模拟竖向位移比实际竖向位移小0.61 mm,降低了9.7%,模拟水平位移比实际水平位移小0.69 mm,降低16.1%;

5) 当 $h/r > 10$ (即工况5)时,模拟竖向位移比实际竖向位移减少了1.37 mm,高出约21.4%,模拟水平位移比实际水平位移小1.76 mm,降低了22.0%。

从图7、图9与图11~15的对比中还可发现,既有建筑物桩基的实测水平位移和实测竖向位移变化趋势比本研究有限元模型得到的结果略小。随着盾构隧道掌子面的推进,邻近既有建筑物桩基的水平和竖向位移都是逐步增大,且在管片拼装、灌浆等施工工序结束后,两者均趋于稳定^[28-29]。实际监测结果表明,当 $7 < h/r < 10$ (即工况3)时,桩基竖向位移最小,水平位移最大;当 $h/r < 7$ (即工况1)时,桩基竖向位移最大,水平位移最小,与数值模拟结果一致。这些均表明该有限元模型能准确、有效地预测叠线盾构隧道对既有建筑物桩基础的水平位移与竖向位移的影响。

5 结论

本研究以广东省佛山市地铁3号线的南海广场—叠滘区间工程为背景,采用Midas GTS NX有限元软件,建立该区间段叠线隧道开挖过程的三维有限元模型,分析在不同桩长 h 与不同隧道半径 r 比值情况下,叠线盾构隧道施工对既有邻近建筑物桩基的位移影响,得出结论:

1) 既有邻近建筑物桩基的竖向位移和水平位移数值模拟计算结果与实际桩基位移监测数据的相对误差较小,该模型预测结果准确、可靠,对类似叠线隧道工程的安全监测具有指导意义;

2) 桩基的竖向位移随桩端埋深的增大而减小。盾构开挖引起的地层损失使隧道轴线上方土体产生沉降,隧道轴线以下土体在开挖卸荷作用下产生回弹,这两者共同作用使得位于叠线隧道之间的桩顶竖向位移最小,该最小值为-4.84 mm。

3) 桩基的水平位移随桩基埋深的增大而增大。在上、下叠线隧道的中心连线的中点位置附近,桩

基受隧道开挖的叠交扰动效应最大,因此桩基位于上、下叠线隧道之间的桩顶水平位移也最大,该最大值为2.46 mm。

综上所述,在实际的叠线隧道开挖过程中,上、下叠线隧道在穿越既有邻近建筑物桩基时,应尽可能将下方隧道轴线设计于桩基标高线以上,避免隧道在桩底标高线以下开挖导致桩端出现承载力损失。当发现预测模型的桩基位移过大时,可提前采用袖阀管注浆对土体进行加固,防止桩基产生过大位移,影响既有邻近建筑物的安全。

参考文献 (References):

- [1] 周文浩. 新建叠线隧道下穿既有隧道的变形规律和施工参数影响分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2022. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2022.000108.
ZHOU Wenhao. Study on the deformation and construction optimization of new overlapping tunnel undercrossing existing tunnel [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [2] 娄平, 李特. 地铁叠线隧道盾构掘进对地表沉降影响研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(9): 66-71.
LOU Ping, LI Te. Research on the influence of shield tunneling on the ground settlement in overlapping metro tunnels [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(9): 66-71.
- [3] 沈俊. 复杂环境下叠线隧道开挖对地表沉降和管线影响研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2020.000134.
SHEN Jun. Study on the influence of stacked tunnel excavation on the surface in complex environment [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020.
- [4] HU Y, LEI H Y, ZHENG G, et al. Assessing the deformation response of double-track overlapped tunnels using numerical simulation and field monitoring [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(2): 436-447. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.07.003.
- [5] ZENG B, HUANG D. Soil deformation induced by Double-O-Tube shield tunneling with rolling based on stochastic medium theory [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 60: 165-177. DOI: 10.1016/j.tust.2016.09.001.
- [6] HAN K H, ZHANG C P, ZHANG D L. Upper-bound solutions for the face stability of a shield tunnel in multilayered cohesive - frictional soils [J]. Computers and Geotechnics, 2016, 79: 1-9. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.05.018.
- [7] 王会新. 城市地铁TBM双线隧道地层沉降分析及控制对策[J]. 铁道建筑技术, 2022(4): 146-150.
WANG Huixin. Analysis and control countermeasures of ground settlement for urban subway TBM double-track tunnel [J]. Railway Construction Technology, 2022(4): 146-150.
- [8] JACOBSZ S W, STANDING J R, MAIR R J, et al. Centrifuge modelling of tunnelling near driven piles [J]. Soils and Foundations, 2004, 44(1): 49-56. DOI: 10.3208/sandf.44.49.
- [9] ONG C W. Centrifuge model study of tunnel-soil-pile interaction in soft clay [D]. Singapore: National University of Singapore. 2009: 21-28.
- [10] 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. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(1999)125:3(207).
- [11] MU L L, HUANG M S, FINNO R J. Tunnelling effects on lateral behavior of pile rafts in layered soil [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 192-201. DOI: 10.1016/j.tust.2011.10.010.
- [12] KITTIYODOM P, MATSUMOTO T, KAWAGUCHI K. A simplified analysis method for piled raft foundations subjected to ground movements induced by tunnelling [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2005, 29(15): 1485-1507. DOI: 10.1002/nag.469.
- [13] 龚嘉玮, 王正中, 江浩源, 等. 基于广义Winkler弹性地基梁理论的梯形渠道冻胀力学模型[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5): 1593-1605. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0140.
GONG Jiawei, WANG Zhengzhong, JIANG Haoyuan, et al. Mechanical model of frost heaving force in trapezoidal canal based on generalized Winkler elastic foundation beam theory [J]. Journal of Glaciology and

- Geocryology, 2022, 44(5): 1593-1605. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0140.
- [14] 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): 2353-2360. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.08.029.
- 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): 2353-2360. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.08.029.
- [15] 张继超, 曾垂刚, 崔乐健, 等. 基于 Loganathan & Poulos、Clough 修正公式的浅埋超大直径盾构隧道地面沉降预测[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊1): 274-280.
- ZHANG Jichao, ZENG Chuigang, CUI Lejian, et al. Ground settlement prediction of shallow-buried super-large-diameter shield tunnel based on loganathan & poulos and Clough modified formulas [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(sup 1): 274-280.
- [16] 管凌霄. 盾构隧道斜下穿开挖对既有管道影响的理论研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021. DOI: 10.27147/d.cnki.ghdju.2021.000403. GUAN Lingxiao. Theoretical study on the effect of existing pipeline caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.
- [17] 袁海平, 王斌, 朱大勇, 等. 盾构近距离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): 1457-1464. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.07.018.
- 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): 1457-1464. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.07.018.
- [18] 单恒年, 李家华, 陈勇康. 基于 MIDAS 的抗滑桩三维数值模拟及优化[J]. 水运工程, 2019(9): 259-264, 272. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20190904.030.
- SHAN Hengnian, LI Jiahua, CHEN Yongkang. Three-dimensional numerical simulation and optimization of anti-slide pile based on MIDAS [J]. Port & Waterway Engineering, 2019(9): 259-264, 272. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20190904.030.
- [19] LEE C J, BOLTON M D, AL-TABBAA A. Numerical modelling of group effects on the distribution of dragloads in pile foundations [J]. Géotechnique, 2002, 52(5): 325-335. DOI: 10.1680/geot.52.5.325.38704
- [20] 朱逢斌, 杨平, ONG C W. 盾构隧道开挖对邻近桩基影响数值分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 298-302. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2008.02.025.
- ZHU Fengbin, YANG Ping, ONG C W. Numerical analysis on influence of shield tunnel excavation to neighboring piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 298-302. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2008.02.025.
- [21] 夏元友, 张亮亮, 王克金. 地铁盾构穿越建筑物施工位移的数值分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1411-1414, 1418. DOI: 10.16285/j.rsm.2008.05.018.
- XIA Yuanyou, ZHANG Liangliang, WANG Kejin. Numerical analysis of construction displacements during structure-approaching of metro shield tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1411-1414, 1418. DOI: 10.16285/j.rsm.2008.05.018.
- [22] 沈建文, 刘力. 盾构隧道施工对邻近桥桩影响数值及现场监测研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊2): 709-714. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S2.101.
- SHEN Jianwen, LIU Li. Numerical analysis and field monitoring for studying effects of shield tunnelling on nearby piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(sup 2): 709-714. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S2.101.
- [23] 刘树佳, 张孟喜, 吴惠明, 等. 新建盾构隧道上穿对既有隧道的变形影响分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 399-405. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.s1.054.
- LIU Shujia, ZHANG Mengxi, WU Huiming, et al. Deformation effect on existing tunnels overlapped by new tunnel in lower-region [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(sup 1): 399-405. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.s1.054.
- [24] 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): 983-993. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.03.029.
- 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): 983-993. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.03.029.
- [25] 王丽, 郑刚. 盾构法开挖隧道对桩基础影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 704-712. DOI: 10.16285/j.rsm.2011.s1.098.
WANG Li, ZHENG Gang. Finite element analysis of effects of shield driven tunneling on pile foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(sup 1): 704-712. DOI: 10.16285/j.rsm.2011.s1.098.
- [26] 黄茂松, 张陈蓉, 李早. 开挖条件下非均质地基中被动群桩水平反应分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1017-1023.
HUANG Maosong, ZHANG Chenrong, LI Zao. Lateral response of passive pile groups due to excavation-induced soil movement in stratified soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 1017-1023.
- [27] 王雨, 陈文化, 王锦华. 隧道开挖引起邻近单桩水平反应分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 819-826, 841. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.03.026.
WANG Yu, CHEN Wenhua, WANG Jinhua. Lateral response of adjacent single pile due to tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 819-826, 841. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.03.026.
- [28] 付宏渊. 基于灵敏度分析的地基沉降反演参数优化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2006, 3(2): 24-28. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2006.02.005.
FU Hongyuan. Optimizing back-analysis parameters for settlement prediction based on sensitivity analysis [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2006, 3(2): 24-28. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2006.02.005.
- [29] 王春国. 新建隧道下穿对既有隧道稳定性影响研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 62-66. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.010.
WANG Chunguo. Influence of underpass of new tunnel on stability of existing tunnel [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 62-66. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.010.

(责任编辑:李脉;校对:欧兆虎;英文编辑:曾程)