

# 地铁盾构下穿高层建筑基础的扰动变形影响与 实测研究<sup>\*</sup>

张   镔<sup>1</sup>  徐前卫<sup>2</sup>  孙庆文<sup>1</sup>  薛海儒<sup>3</sup>  来守玺<sup>3</sup>

(1. 济南轨道交通集团有限公司, 250014, 济南; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;  
3. 中铁十局集团第一工程有限公司, 250101, 济南)

**摘 要** [目的]城市轨道交通建设中遇到越来越多的盾构穿越或近接高层建筑施工的案例,而盾构法因其特殊的施工工艺不可避免对地层产生扰动,严重时可能会影响既有建筑的结构安全,因此需要对盾构穿越过程中隧道及高层建筑的受力特性进行深入研究。[方法]依托济南地铁 R2 号线生产路站—历黄路站区间隧道工程,采用三维有限元数值方法对双线盾构隧道非同步斜交下穿高层建筑群桩及筏板承台基础的施工过程进行了模拟,并结合现场监测数据分析了地层位移规律、建筑物沉降的变形特征,以及施工时盾构掘进参数的控制效果。[结果及结论]双线盾构隧道先后下穿建筑群桩时,先行隧道开挖引起的地面沉降量较大,后开挖隧道对地层产生的扰动相对较小;盾构通过建筑物正下方时的沉降量最大,随着盾构的远离,其沉降逐渐减少并趋于稳定。由于高层建筑属框架结构,故在临近隧道一侧建筑体区域地层发生了沉降,而在远离隧道的建筑体区域地层呈上浮趋势,但二者的差异沉降量仍在可控范围内。

**关键词** 地铁; 盾构隧道; 下穿群桩; 地层变形特征; 数值模拟

**中图分类号** U455.43

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.04.025

## Disturbance Deformation Influence and Field Measurement Study of Metro Shield Underpassing High Building Foundation

ZHANG Kun<sup>1</sup>, XU Qianwei<sup>2</sup>, SUN Qingwen<sup>1</sup>, XUE Hairu<sup>3</sup>, LAI Shouxi<sup>3</sup>

(1. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., 250014, Jinan, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 3. China Railway No.10 Engineering Group First Engineering Co., Ltd., 250101, Jinan, China)

**Abstract** [Objective] With an increasing number of cases involving metro shield tunneling through or in proximity to high buildings in urban rail transit projects, the shield tunneling

method inevitably causes disturbances to the ground due to its unique construction process. In several cases, it may impact the structural safety of existing buildings. Therefore, an in-depth study of the force characteristics on both the tunnel and high buildings during shield tunneling is necessary. [Method] Leveraging the tunnel construction project of Shengchan Road Sta. -Lihuang Road Sta. interval on Jinan Metro Line R2, a 3D finite element numerical method is employed to simulate the construction process of double-line shield tunnels asynchronous oblique angle under-passing a group of high buildings with pile and raft foundations. Combining with field-monitored data, the law of ground displacement, deformation characteristics of building settlements, and the control effectiveness of shield tunneling parameters during construction are analyzed. [Result & Conclusion] When the double-line shield tunnels successively pass beneath the building pile group, the land subsidence caused by leading tunnel excavation is relatively significant, while the disturbance to the ground from subsequent tunnel excavation is relatively small. The maximum subsidence occurs when the shield tunnel is directly beneath the building, and as the shield tunnel moves away, the subsidence gradually decreases and tends to stabilize. Due to the framed structure of the high buildings, partial subsidence occurs on the building area adjacent to the tunnel side, while the part far away from tunnel exhibits an upheaving trend. However, the differences in subsidence amount between the two scenarios remain within a manageable range.

**Key words** metro; shield tunnel; under-passing pile group; stratum deformation characteristics; numerical simulation

随着我国城市轨道交通建设进程的加快,采用盾构法修建地铁隧道面临的施工条件与工程环境越来越复杂。在下穿建筑群桩时,由于桩、基础承台及桩间土的相互作用,在盾构荷载和上部荷载的共同

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41672360)

作用下,盾构周围土体的应力、应变将产生较大变化,构筑物与地层的受力特性、变形特征规律复杂<sup>[1]</sup>。针对盾构隧道穿越既有建(构)筑物,国内外学者已完成了大量的研究工作<sup>[2-6]</sup>,但大部分研究重点关注的是盾构隧道下穿或侧穿建筑物桩基时的应力分布规律与变形位移特征,并通过对桩间土体作用规律的研究,实现对盾构隧道、建筑物的内力和变形的控制。

虽然目前关于盾构穿越既有建筑物桩基础的研究成果颇多,但对于双线盾构隧道非同步斜交下穿超高层建筑物筏板及群桩基础承台的研究尚不多见。本文依托济南地铁 R2 线某区间隧道工程,采用三有限元模型进行数值模拟,研究盾构穿越施工对上部建筑结构、地层的扰动规律及其受力、变形特征,并结合现场监测数据,对盾构掘进参数进行管控,以期实现安全施工,并为今后类似工程的设计与施工提供借鉴和参考。

1 工程概况及地质

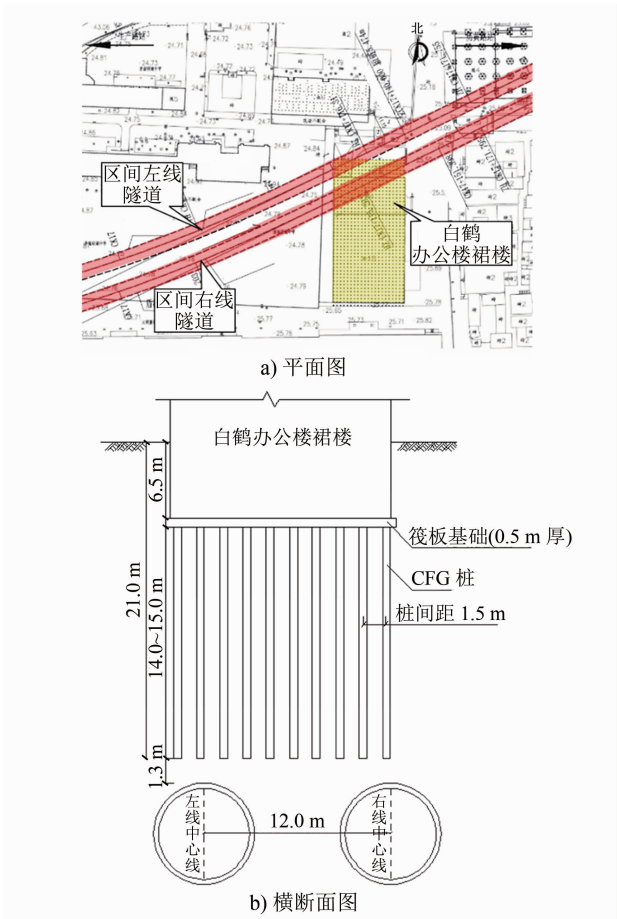
济南地铁 R2 线生产路站—历黄路站区间隧道全长 1 374.495 m,起讫里程为 SK16+258.911—SK17+633.278,左、右线采用 2 台土压平衡盾构机间隔施工,右线先于左线开挖 400 m。该盾构隧道内径为 5.8 m,衬砌管片厚度为 0.3 m,幅宽为 1.2 m,采用强度为 C50、抗渗等级为 P10 的钢筋混凝土。盾构隧道从位于该区间的白鹤集团办公楼(以下简称“白鹤办公楼”)下方穿越,该办公楼及裙楼分别高 18 层和 4 层,为框架剪力墙结构。楼房下部采用 CFG(水泥粉煤灰碎石)桩基础,基坑深度为 6.5 m,正方形布桩,桩间距为 1.5 m。地基处理深度为 14~15 m,采用筏板基础承台,筏板厚度为 0.5 m。盾构隧道在正下方以 64°角度穿越建筑群楼,区间隧道与桩基的最小竖向净距约为 1.3 m。该地铁盾构区间与白鹤办公楼的空间位置关系如图 1 所示。

根据地质勘察报告,白鹤办公楼地层桩基主要穿越粉质黏土层,盾构隧道主要穿越卵石层,基底主要以风化闪长岩为主。各地层物理力学参数如表 1 所示。

2 建立有限元模型

2.1 模型尺寸与边界条件

筏板基础承台埋深为 6.5 m,隧道埋深为 22.3 m,隧道以下计算深度取 5 倍洞径,所建的三维有限元模型如图 2 所示。模型的整体尺寸为 120 m(长)×



注:CFG 桩—水泥粉煤灰碎石桩。

图 1 地铁盾构区间与下穿高层建筑物间的空间位置关系  
Fig. 1 Spatial location relation diagram between the metro shield tunnel interval and the space for underpassing high buildings

表 1 地层物理力学参数

地层名称	天然重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	固结快剪		弹性模 量/MPa	泊松 比
		黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)		
杂填土① <sub>1</sub>	18	8.0	13	0.63	3.40
粉质黏土⑦ <sub>1</sub>	19	28.0	17	0.40	6.20
粉质黏土⑩ <sub>1</sub>	20	30.0	20	0.36	5.40
黏土⑩ <sub>2</sub>	19	40.0	17	0.27	7.90
粉质黏土⑩ <sub>1</sub>	19	36.0	16	0.26	8.30
卵石⑩ <sub>4</sub>	23	0.1	35		8.75
闪长岩⑩ <sub>4</sub>	18	35.0	35	0.50	4.30

100 m(宽)×50 m(高),不设置高层建筑主体单元的重度,而采用施加等效荷载的方式。将模型的上边界(地面)设为自由面,其余边界采用轴向位移约束。右线隧道与建筑基础投影重叠部分的长度为 23.4 m。

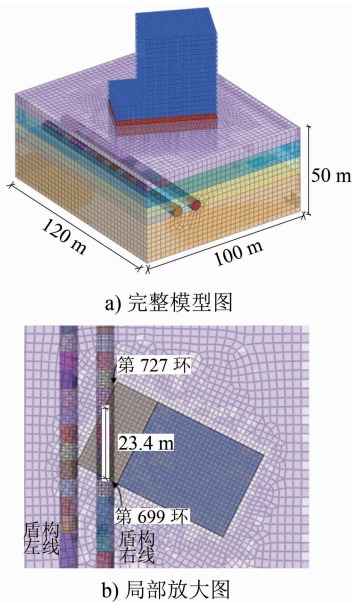


图 2 三维有限元模型

Fig. 2 Three-dimensional finite element model

2.2 设置模型参数及工况

各层土体的本构模型采用修正 Mohr-Coulomb 准则。该准则考虑了岩土体开挖引起的参数变化,因此更适合用以表述岩土材料的力学特性。建筑物筏板承台及楼板采用梁、板及实体单元,其结构单元的主要力学参数如表 2 所示。

表 2 各结构单元的主要力学参数

Tab. 2 Main mechanical parameters of each structural unit

结构类型	材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m <sup>3</sup> )
建筑物桩	C30 混凝土	30 000	0.2	2 500
建筑物梁、柱	C35 混凝土	31 500	0.2	2 500
建筑物楼板	C35 混凝土	31 500	0.2	2 500
盾构管片	C50 混凝土	33 500	0.2	2 500
盾构外壳	钢材	250 000	0.2	7 800

初始应力场分析完成后,模拟白鹤办公楼施工过程,之后进行地铁盾构隧道的开挖掘进模拟。模拟的施工过程与实际的施工过程一致,均为先开挖右线隧道、后开挖左线隧道,右线先于左线开挖 400 m。

3 模型计算结果分析

3.1 地层竖向位移

图 3 为右线开挖完成、左右线均开挖完成两个施工阶段下的地层竖向位移云图。由图 3 可知:①右线开挖完成后,地面沉降较大的区域位于盾构下

穿群桩处,最大位移量为 1.36 mm;右线隧道底部的地层发生上隆,最大隆起量为 3.16 mm。②左右线开挖完成后,在盾构左线的施工扰动下,地层变形进一步加大,最大沉降量为 1.38 mm;左线隧道底部地层发生上隆,最大隆起量为 3.22 mm。③地基受到 CFG 群桩加固的作用,因此地层的总沉降量较小。

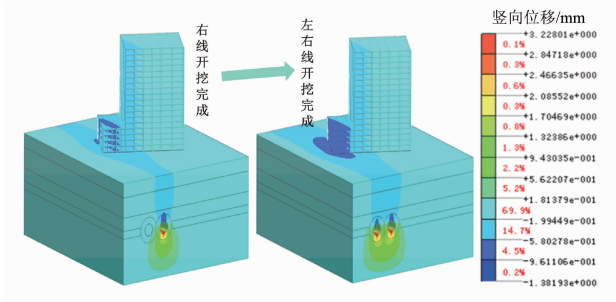


图 3 两个施工阶段下的地层竖向位移云图

Fig. 3 Nephogram of stratum vertical displacement at two construction phases

3.2 地层水平位移

图 4 为两个施工阶段下的地层水平位移云图。由图 4 可知:①右线开挖完成后,右线隧道左、右拱腰处发生水平方向收敛变形,最大水平位移量为 1.54 mm。②左、右线开挖完成后,最大水平位移位于左线隧道靠近地层边界的拱腰处;右线隧道在靠近左侧隧道处的水平位移量有所降低,另一侧拱腰水平变形量增大到 1.62 mm,这说明左线隧道平行既有右线隧道开挖,将引起右线隧道靠近左线隧道侧地层的水平变形释放,进而导致水平位移增大。

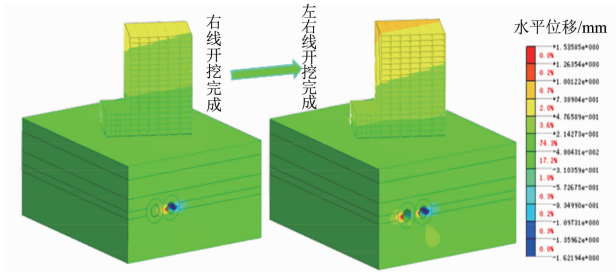


图 4 两个施工阶段下的地层水平位移云图

Fig. 4 Nephogram of stratum horizontal displacement at two construction phases

3.3 建筑物及差异性沉降

图 5 为左右线开挖完成后高层建筑物的竖向位移图。由图 5 可看出:①建筑物总体上呈现出部分下沉的趋势,其中盾构下穿群桩范围内对应的建筑物是沉降最主要的分布区域,而远离盾构隧道的建筑物出现了上浮。根据计算结果,建筑物最大沉降区域主要分布在裙楼(最大沉降量 0.78 mm),而最



大上浮区域分布在远离右线隧道一侧(最大隆起量为 0.02 mm),因此,隆起、沉降的差异变形量为 0.80 mm。找出竖向差异变形量前 2 名的变形点,这 2 个变形点的间距为 62.2 m,可计算得到建筑物的倾斜量(远小于 0.003),在变形值允许范围内。由此可见,地铁盾构隧道仅穿越群桩西北角很小范围,在引起近端土体沉降的同时,更易于引起远端土体的上浮,这主要是由于筏板刚度较大的缘故。

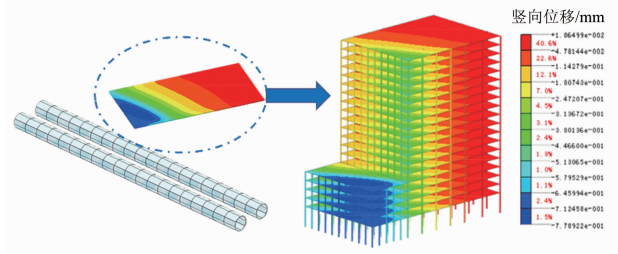


图 5 左右线开挖完成后高层建筑物竖向位移云图

Fig. 5 Nephogram of high building vertical displacement after left and right line excavation completion

### 3.4 隧道位移分析

图 6 为左右线开挖完成后地铁隧道的竖向位移和水平位移云图。由图 6 可知:①左线和右线的仰拱部位均发生了向上的位移,最大隆起发生在右线底部(最大隆起量为 3.22 mm);拱顶部位均发生了向下的位移,最大沉降发生在右线拱顶(最大沉降量为 1.34 mm)。②左线和右线的拱腰部位均发生水平方向的收敛,最大水平位移发生在右线靠近建筑裙楼的侧部(最大水平位移量为 1.62 mm)。

### 3.5 隧道应力分析

图 7 为地铁施工完成后左、右线隧道的最大主应力和最小主应力云图。由图 7 可知:双线盾构区间隧道最大拉压应力均位于穿越区,最大主应力(即最大拉应力)为 1.98 MPa,主要发生在双线隧道的仰拱部位;最小主应力(即最大压应力)为 9.12 MPa,主要发生在双线隧道靠近高层建筑物一侧的拱腰处。该应力计算结果满足混凝土强度等级要求,在结构安全范围内。

## 4 盾构掘进参数控制

图 8 为左右线盾构总推力曲线图。由图 8 可知:右线掘进总推力最大值为 17 607 kN,位于右线第 714 环,即高层建筑裙楼群桩的正下方;左线掘进总推力最大值为 13 939 kN,位于左线第 725 环,即左线驶离群桩 25 环处(盾构推进距离为 30.0 m)。

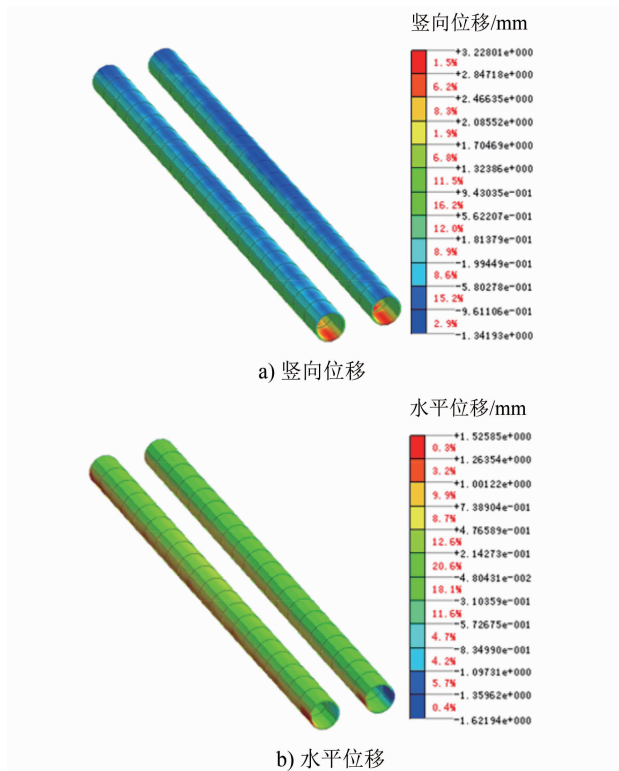


图 6 左右线开挖完成后地铁隧道的竖向位移和水平位移云图

Fig. 6 Nephogram of metro tunnel vertical and horizontal displacement after left and right line excavation completion

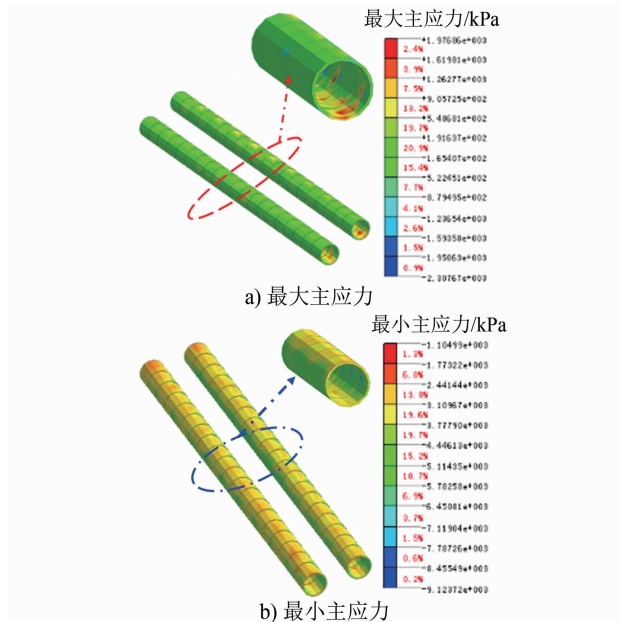


图 7 施工完成后左、右线隧道的最大和最小主应力云图  
Fig. 7 Nephogram of maximum and minimum principal stress of left and right line tunnels after construction completion

相对而言,右线(先行开挖线路)比左线(后行开挖线路)的掘进总推力要大,其主要原因是由于右线隧道所处位置地层较为坚硬,且穿越区域基本位于高层建筑的下方,其上覆荷载较大。

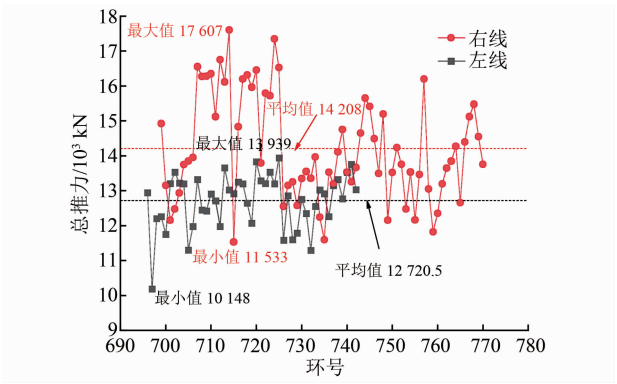


图 8 左右线盾构总推力曲线图

Fig. 8 Diagram of left and right line shield total thrust curves

图 9 为左右线盾构刀盘扭矩曲线图。由图 9 可知:与左线盾构相比,右线盾构的刀盘扭矩更大;右线刀盘扭矩最大值为 4 211 kNm,位于右线第 713 环,这与右线最大掘进推力所在位置基本吻合,反映出该处土层条件变化较大;该处土层位于群桩基础以下,地层加固效应明显,相比其他区域较为坚硬,盾构掘进时的推力与刀盘扭矩均较大。左线掘进总推力最大值为 3 203 kNm,位于左线第 732 环,即左线驶离群桩 32 环处(盾构推进距离为 38.4 m)。

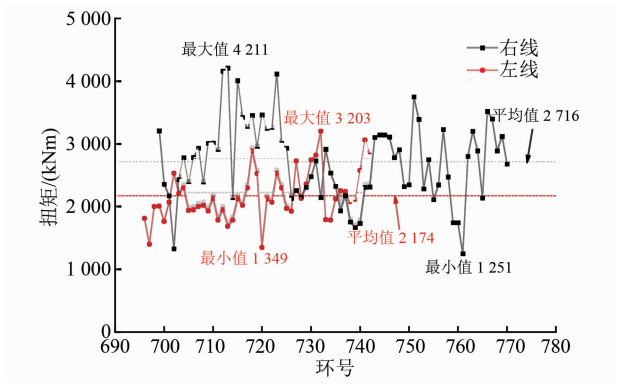


图 9 左右线盾构刀盘扭矩曲线图

Fig. 9 Diagram of left and right line shield cutterhead torque curves

图 10 为左右线盾构的掘进速度曲线图。由图 10 可知:右线隧道的掘进速度相对较快,最大掘进速度为 70.00 mm/min,平均掘进速度为 57.20 mm/min;左线盾构的最大掘进速度为 65.00 mm/min,平均掘进速度为 44.90 mm/min。相对于左线隧道而言,右线盾构将更大的作用力施加于地

层之上,其刀盘扭矩随之增大,因此局部范围内的地层变形得到有效控制,右线掘进速度相对左线更快。

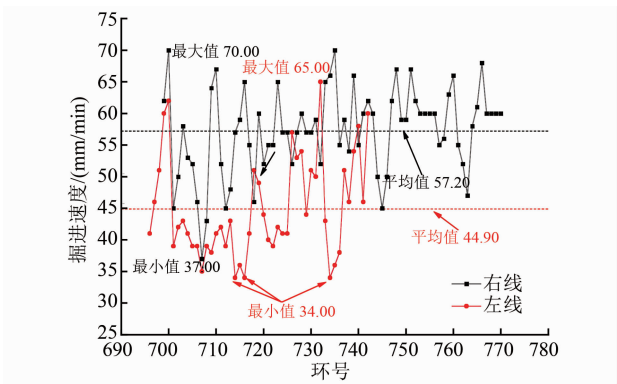


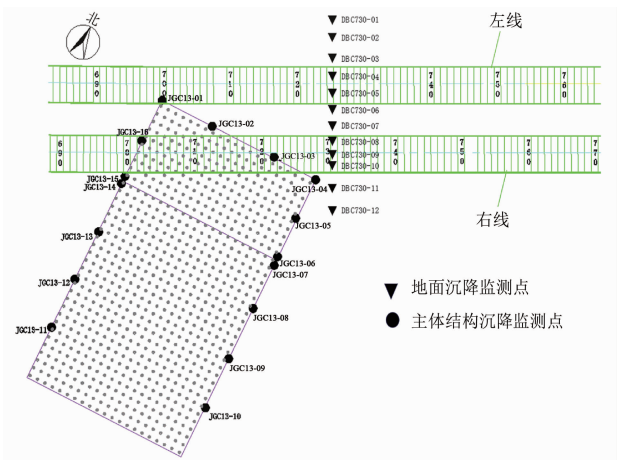
图 10 左右线盾构掘进速度曲线图

Fig. 10 Diagram of left and right line shield excavation speed curves

5 监测数据分析

5.1 监测点布置情况

分析开挖接近白鹤办公楼裙楼至盾构通过后 0 m 范围内的地面沉降、建筑物沉降及倾斜变形。上述施工监测范围对应右线盾构区间的第 699 环—第 770 环,以及左线盾构区间的第 696 环—第 742 环,各沉降监测点布置如图 11 所示。



注:左右线盾构区间内的数字为环号。

图 11 地面与高层建筑物的沉降监测点平面布置

Fig. 11 Planar layout of settlement monitoring points for ground surface and high buildings

5.2 监测结果分析

图 12 为右线盾构第 731 环处横向监测断面随右线掘进的地面沉降分布曲线。由图 12 可知:当右线盾构掘进至第 713 环(即群桩正下方)时,监测断面处实测的地面最大沉降量为 1.88 mm;当右线盾构掘进至 727 环(即盾构离开群桩)时,监测断面处

的沉降逐渐加大,其实测的最大地面沉降量为 2.61 mm;当右线盾构掘进至 770 环(即距离群桩 50 m)时,监测断面处的沉降逐渐累积,其实测的最大地面沉降量为 4.14 mm。整个施工过程,该监测断面处实测的地面最大沉降量均控制在 10 mm 的允许范围内。

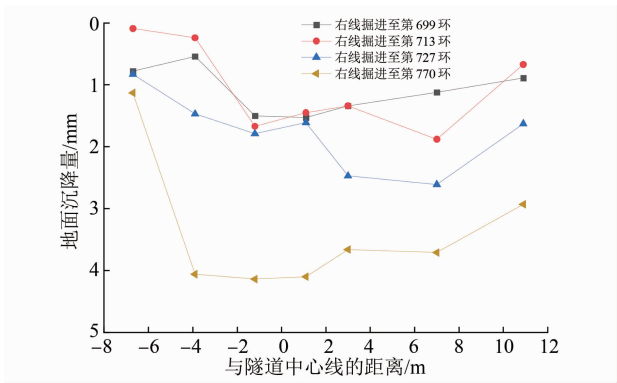


图 12 右线盾构第 731 环处监测断面随右线掘进的地面沉降分布曲线

Fig. 12 Land subsidence distribution curve of monitoring section at ring 731 of the right line shield with the right line excavation

图 13 为左右线盾构隧道下穿白鹤办公楼施工的实测地面沉降曲线。由图 13 可看出:右线隧道在穿越群桩时导致地面沉降增加,其最大地面沉降出现在 DBC730-09 处(最大沉降量为 4.14 mm);由于受右线先行隧道施工的影响,左线隧道掘进引起的地面沉降量虽相对较大,但变化相对平缓,尤其在盾尾脱出后 50 m 范围内,其地面沉降幅度更小。

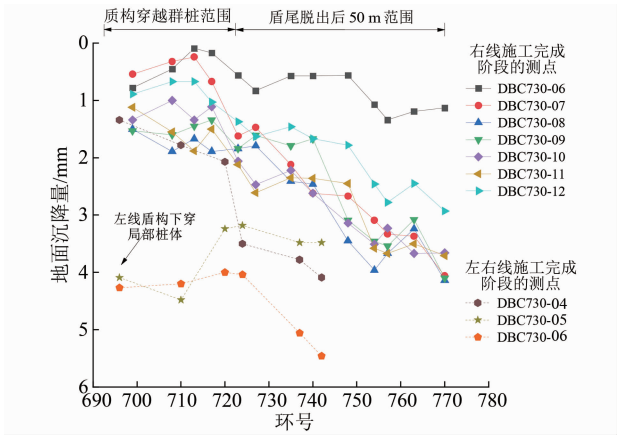


图 13 左右线盾构隧道下穿高层建筑施工的实测地面沉降曲线

Fig. 13 Field-measured land subsidence curve of the left and right tunnel under-passing high building construction

图 14 为左右线盾构隧道下穿白鹤办公楼施工

时实测的高层建筑沉降曲线。由图 14 可看出:①右线隧道在正下方穿越群桩时,下穿的高层建筑(白鹤办公楼)表现为总体下沉趋势,并在盾尾脱出后趋于稳定;②在盾构完成穿越群桩后,高层建筑东侧离开隧道方向的 3 个测点(JGC13-06、JGC13-07、JGC13-10)呈局部回弹趋势,产生这种差异变形的原因是由于高层建筑所在地层受盾构施工扰动的影响程度不同、建筑物刚度相对较大所致;③左线隧道穿越施工时,高层建筑所在地的扰动影响较小,可以认为高层建筑物的沉降变化基本稳定。

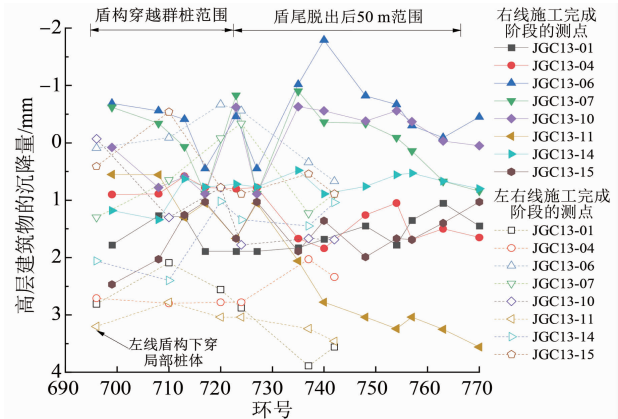


图 14 左右线盾构隧道下穿高层建筑施工时实测的高层建筑沉降曲线

Fig. 14 Field-measured high building settlement curve of left and right shield tunnel under-passing high building construction

图 15 为右线施工完成、左右线施工完成两个施工阶段下高层建筑的差异沉降曲线。

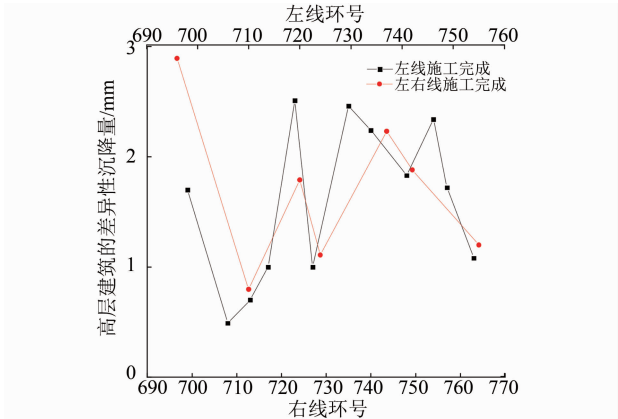


图 15 两个施工阶段下高层建筑的差异沉降曲线

Fig. 15 Differential settlement curve of high buildings at two construction phases

由图 15 可知:右线隧道施工完成后,高层建筑的差异沉降量为 2.51 mm,左线隧道施工后高层建筑的差异沉降量为 2.88 mm,二者均



在5 mm的安全允许范围内,这说明盾构参数控制效果良好。总体而言,实际施工监测得到的盾构下穿群桩引起建筑沉降规律与模拟计算得到的地面沉降规律一致,实测结果略大于数值模拟计算结果,这是由于实际施工并非连续性施工,由此引起地层变形的时空效应,使得地层损失作用较大,进而导致实测的地面沉降较大,但实测值仍在工程合理控制范围之内。

## 6 结语

本文基于济南地铁R2线工程案例,通过三维有限元数值模拟与现场监测相结合的方法,进行双线盾构隧道线非同步斜交下穿建高层建筑群桩的施工影响研究,得到结论如下:

1) 双线盾构隧道先后下穿建筑群桩时,两个隧道所引起地层变形存在差异,先开挖隧道引起的地面沉降量较大,其值在地层总沉降量中占比也较大。

2) 在地铁盾构隧道穿越高层建筑的施工过程中,高层建筑整体呈沉降趋势,位于隧道正上方的建筑体区域的地层沉降量最大。随着盾构的逐渐远离,高层建筑物的沉降量逐步趋于稳定。

3) 根据数值模拟和现场监测的结果,由于高层建筑为框架结构,临近隧道的建筑体区域地层发生沉降的同时,远离隧道的建筑体区域地层呈现上浮趋势,但二者的差异沉降量在施工允许范围内。

4) 在该隧道施工过程中,通过控制总推力、刀盘扭矩、掘进速度、同步注浆量及注浆压力量等施工参数,盾构最终安全、顺利地穿越了高层建筑物桩-筏基础。

## 参考文献

[1] 周济民. 盾构区间隧道下穿高架桥桩基群施工技术与环境影响预测[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 165.

ZHOU Jimin. Construction technology and environmental impact prediction for a shield tunnel under a viaduct pile foundation group [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(1): 165.

[2] 龚学权, 唐聪, 陶炳权. 砂卵石地层盾构下穿浅基民房片区变形控制技术[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(8): 91.

GONG Xuequan, TANG Cong, TAO Bingquan. Deformation control technology of metro shield tunnel crossing under shallow foundation residential area in sand pebbles layer [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(8): 91.

[3] 王哲, 吴淑伟, 姚王晶, 等. 盾构穿越既有桥梁桩基磨桩技术的研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 117.

WANG Zhe, WU Shuwei, YAO Wangjing, et al. Grinding pile technology of shield tunnels crossing pile foundation of existing bridges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 117.

[4] 朱剑锋, 洪义, 严佳佳, 等. 波浪循环荷载作用下盾构穿越海堤过程中下卧软土的弱化响应研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(12): 111.

ZHU Jianfeng, HONG Yi, YAN Jiajia, et al. Cyclic degradation of soft clay subjected to repeated wave loading and stress relief during tunnel driving through a seawall[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(12): 111.

[5] 赖金星, 刘厚全, 汪珂, 等. 盾构近接立交桥基础安全影响三维数值分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(3): 29.

LAI Jinxing, LIU Houquan, WANG Ke, et al. Three-dimensional numerical analysis on safety influence of shield tunneling construction on the foundation of adjacent overpass[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(3): 29.

[6] 钟宇健, 徐硕硕, 陆钰铨, 等. 盾构近接塔式高层建筑物变形及其受力特性数值分析[J]. 公路, 2019, 64(3): 297.

ZHONG Yujian, XU Shuoshuo, LU Yuquan, et al. Numerical analysis of deformation and stress characteristics of shield adjacent tall tower buildings[J]. Highway, 2019, 64(3): 297.

· 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-12-30 出版日期:2024-04-10  
Received:2022-09-29 Revised:2022-12-30 Published:2024-04-10

· 通信作者:张锐,高级工程师,279625702@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728