

# 盾构隧道施工对邻近深基坑的影响分析

李 兵,嵇凤颖

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** **目的** 研究双线盾构施工过程中对邻近深基坑位移的影响,为相关隧道施工提供参考。**方法** 笔者结合某地铁区间双线隧道,使用 Midas GTS 岩土有限元分析软件建立模型,进而分析盾构施工对邻近深基坑围护结构的影响。**结果** 盾构施工完成后地下连续墙的水平位移增加了 5.48 mm;随着掘进压力的逐渐增大,地下连续墙的最大水平位移值也在不断增大;随着千斤顶推力的不断增加,地下连续墙的水平位移呈现出不断减小的变化趋势;随着注浆压力增大,地下连续墙的水平位移反而越小,但减小程度较小。**结论** 盾构施工对邻近基坑的围护结构产生的变形不可忽略,在施工设计及施工过程中应充分考虑并予以关注。

**关键词** 双线盾构;深基坑;数值模拟;影响因素

中图分类号 TU94;U451<sup>+</sup>.2

文献标志码 A

## Influence of Shield Tunneling on Adjacent Deep Foundation Pit

LI Bing,JI Fengying

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to study the influence of two line shield construction on the displacement of adjacent deep foundation pit, so as to provide reference for relevant tunnel construction. The author uses the Midas GTS rock and soil finite element analysis software to establish the model, and then analyzes the influence of the shield construction on the adjacent deep foundation pit enclosure structure. As a result, the horizontal displacement of the diaphragm wall increased by 5.48 mm after the shield construction was completed. With the gradual increase of the driving pressure, the maximum horizontal displacement value of the diaphragm wall was also increasing. With the continuous increase of the thrust of the jack, the horizontal displacement of the diaphragm wall showed a decreasing trend of change; with the grouting pressure. The horizontal displacement of underground diaphragm wall is smaller but smaller. The deformation caused by shield construction to adjacent retaining structures should not be neglected. It should be fully considered and paid attention in the process of construction design and construction.

收稿日期:2017-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51578347);辽宁省自然科学基金项目(201602611);沈阳建筑大学学科涵育计划项目(XKHYZ-06);沈阳市科技局项目(Z3318003)

作者简介:李兵(1974—),男,教授,博士,主要从事地下工程、结构抗震方面研究。

**Key words:**double track shield;deep foundation pit;numerical simulation;influence factor

目前,许多大中型城市都面临着严重的交通运输问题,地上运输空间已经无法满足人们的需求,地铁逐渐成为城市中的重要的交通运输方式<sup>[1]</sup>.我国许多大中城市都在积极地开发和利用城市地下空间,试图将地上运输的巨大压力分散到地下空间,从而缓解地上运输压力 and 环境污染问题对城市产生的不良影响<sup>[2-3]</sup>.随着地下空间的不断开发,地铁施工技术也在不断创新,近几年使用最为广泛的隧道施工方法就是盾构法.随着地铁建设不断地进行,地下的地铁线路越来越密集.地铁盾构施工虽然有很多优点,但是当面临交错的地下轨道线路和复杂的已建成的地下结构物时,要尤为注意盾构施工对邻近地下结构物的影响<sup>[4-6]</sup>.目前,国内外学者在盾构法施工引起周围土体变形方面上的研究颇丰,研究成果服务于如何保证在盾构施工时邻近基坑、建筑物基础、地下建筑结构等的安全与稳定,将施工产生的不利影响与危害控制到最小,保证周围的各种地下、地上的建筑的影响在安全容许内.因此,研究盾构施工对邻近结构物的变形影响成为备受国内外专家学者关注的主要问题<sup>[7-10]</sup>.笔者主要针对盾构推进过程中基坑围护结构的变形,即地下连续墙的变形程度及变化规律进行分析.找出不同盾构掘进压力、千斤顶推力及衬砌管片弹性模量对地下连续墙的不同影响程度及变化规律,为相关隧道工程施工提供参考.

1 工程概况

沈阳地铁某区间为双线隧道,采用盾构法对其进行施工.工程推进采用泥水平衡盾构机,单线总长为 1 600 m.由于盾构施工长度较长,笔者只选取一段区间进行建模和分析.盾构开挖隧道区间为圆形隧道,隧道管片外径为 6.24 m,内径为 5.54 m,厚度为 0.35 m,管片环宽 1.5 m.每环管片由 6 个预

制钢筋混凝土管片块体组成,其中包含 3 个标准块,2 个邻接块和 1 个封顶块.盾构区间土质主要为粉质黏土和砂土,砂土类型主要包括细砂、圆砾和砾砂等.

2 计算模型的建立和分析

2.1 模型的建立

笔者使用三维有限元分析软件 Midas GTS 进行模拟分析.选取模型为 100 m × 100 m × 40 m 的长方体土体,土体根据地质条件分为 6 层,土体参数见表 1.在整体模型的中央位置模拟基坑,基坑外侧邻近处为长度为 30 m 的双线盾构施工.

表 1 土体参数

Table 1 Table of soil parameters

土层	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)
粉质黏土-1	3.5	0.35	11.4
细砂-2	11.0	0.35	23.5
圆砾-3	26.2	0.30	35.0
圆砾-4	32.2	0.30	36.4
砾砂-5	29.0	0.25	36.0
圆砾-6	34.0	0.30	37.5

计算整体模型沿 X 轴(盾构隧道轴线)方向取 100 m、沿 Y 轴(相同水平面内垂直于盾构隧道轴线)方向取 100 m、沿 Z 轴(垂直深度)方向取 40 m 为其施工影响范围.为合理模拟盾构机掘进过程,计算中忽略地下水和土体的固结及蠕变作用.模型中土体均为 3D 实体单元,采用修正莫尔—库伦模型进行建立,盾构隧道管片和基坑地下连续墙采用 2D 板单元模型模拟,基坑钢支撑及圈梁使用 1D 梁单元(即线单元)进行模拟,盾尾注浆使用边界条件来实现.模拟中模型自重及边界条件可分别使用软件中“自重”和“自动约束—考虑所有网格组”两个命令来实现,无需特别设置,自动以上表面为地表,合理限制其他方向位移.

2.2 盾构施工模型的计算

笔者采用有限元方法构建模型(见图1)。在建立模型后,根据实际施工过程来定义施工阶段的施工方法<sup>[11]</sup>。设定完成后即可运行分析过程,得到的结果即为盾构法的施工过程。根据工程实际情况,对于双线盾构施工采用左右不同时且单独施工的方法来进行。

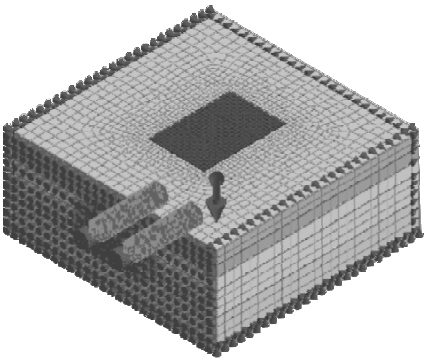


图1 整体模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the integral model

3 盾构施工对邻近深基坑围护结构的影响

3.1 围护结构水平位移对比分析

笔者主要研究盾构对地下连续墙变形产生的主要影响,故选用盾构接近地下连续墙一侧进行分析<sup>[12]</sup>。参照实际工程中现场实测数据,现提取围护桩的桩体测斜监测数据与模型中相同位置的模拟结果进行对比分析<sup>[13-14]</sup>,绘制地下连续墙水平位移曲线,对比监测数据与模拟结果,得到水平位移的变化特点。

笔者选取两个施工阶段曲线进行对比(见图2),一个是基坑开挖施工结束未进行盾构施工的水平位移曲线,一个是盾构施工结束后的水平位移曲线。从图中可以清楚地观察到在盾构施工完成后地下连续墙沿Y方向的水平位移变化情况。基坑开挖完成后桩体产生的最大倾斜位移为9.45 mm,盾构施工完成后产生的最大倾斜位移为15.63 mm;基坑开挖结束时,地下连续墙近

接基坑一边的中线处沿Y方向水平位移最大值为9.5 mm,深度位置为-17 m;盾构施工完成后产生的最大水平位移为14.98 mm,深度位置为-22 m处。可知两阶段结果相差极小,差距为0.65 mm,小于1 mm。同时,两阶段中实测值和模拟值曲线的变化趋势也极为相似,可以证实模拟结果的真实性和有效性。

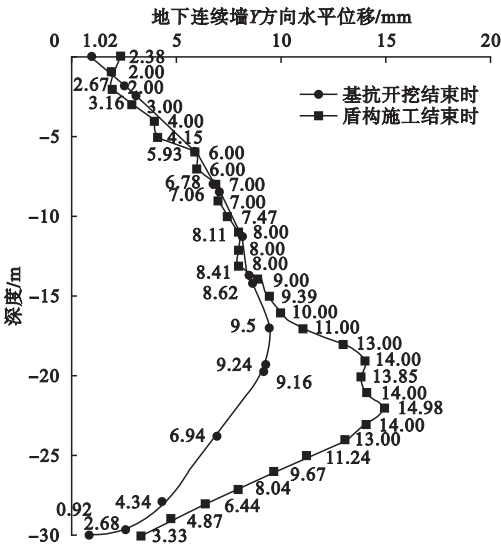


图2 地下连续墙短边中线位置水平位移曲线

Fig. 2 Horizontal displacement curve of the short side of the underground continuous wall

3.2 地下连续墙水平位移的变化历程

结合实际工程对盾构施工过程中引起的基坑围护结构进行模拟分析,得到基坑地下连续墙的水平位移变化情况,结果见图3。由图3可以看出,盾构施工过程中地下连续墙沿Y方向的水平位移有着较大的变化,最大水平位移增加了5.48 mm,最小水平位移增加了0.98 mm,同时可以看到深度0~15 m内水平位移变化极小,主要的影响范围在15~30 m。总结以上变化过程,本工程中盾构施工使地下连续墙的水平位移增加了5.48 mm(盾构结束产生变形量14.98 mm减基坑开挖结束变形量9.5 mm),约为基坑开挖过程产生总变形量(9.5 mm)的一半,占总体变形量(14.98 mm)的1/3。证明盾构施工对邻近

基坑的围护结构产生的变形不可忽略,在设计及施工过程中应充分考虑并予以关注. 基坑开挖施工完成后最大位移出现位置为 -17 m 处,随着盾构施工的进行,出现位移最大值的深度位置逐渐下降,最终下降至 -22 m,接近隧道中心埋深 -20.63 m 位置. 盾构过程中对地下连续墙的主要影响深度为 -16 ~ -25 m,在接近盾构隧道深度的位置,地下连续墙的水平位移有较大变化,均处于隧道中心埋深的上、下 5 m 范围内.

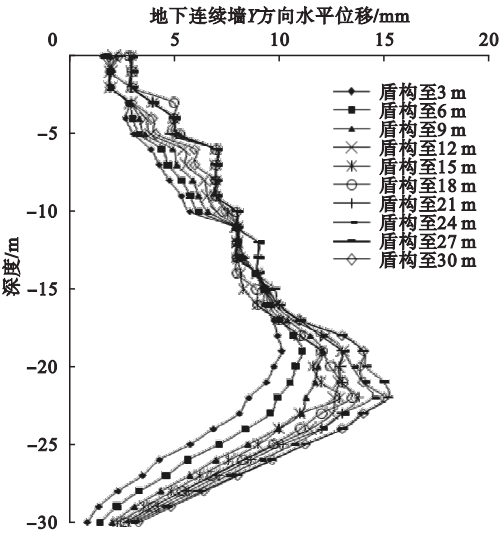


图 3 盾构施工阶段地下连续墙 Y 方向水平位移曲线

Fig. 3 Horizontal displacement curves of Y direction of underground continuous wall in shield construction

3.3 盾构掘进压力变化对连续墙位移影响

使用盾构施工方法进行隧道的开挖施工时,盾构的掘进压力至关重要. 掘进压力是盾构机对土体进行开挖的原始动力. 原模型仅对盾构掘进压力取值为 200 kPa 进行模拟,现在选取掘进压力分别为 300 kPa、400 kPa、500 kPa、600 kPa、700 kPa 进行数值模拟,分析不同掘进压力对基坑地下连续墙的变形影响. 不同掘进压力产生地下连续墙变形曲线如图 4 所示.

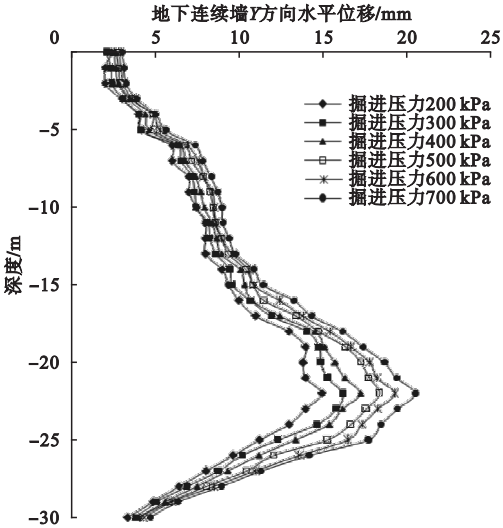


图 4 不同掘进压力产生地下连续墙变形曲线

Fig. 4 Deformation curves of underground continuous wall under different driving pressure

从图中可以看出,不同掘进压力引起的地下连续墙位移变化曲线的形态极为相似,但随着掘进压力的逐渐增大,地下连续墙的最大水平位移值也在不断增大. 根据实际工程中盾构隧道中心埋深为 20.63 m,隧道直径为 6.24 m,计算出 -17.51 ~ -23.75 m 深度范围(隧道中心埋深 20.63 m ± 隧道半径 3.12 m)为掘进压力的主要影响范围,与模拟值相接近. 因此在考虑盾构掘进压力参数时,对于隧道直径在 6 m 左右的盾构工程,应主要针对隧道中心埋深的上、下 5 m 深度范围进行重点关注.

3.4 盾构千斤顶推力对连续墙位移的影响

盾构施工中千斤顶推力也是较为重要的一部分,每阶段土体开挖完成后都要进行管片衬砌施工,在进行管片衬砌施工时要在管片距开挖面最近的侧面上施加一个与掘进方向反向的面压力,这个面压力就是千斤顶推力<sup>[15-16]</sup>. 原监测模型仅对盾构千斤顶推力取值为 100 kPa 进行监测,笔者选取千斤顶推力分别为 200 kPa、300 kPa、400 kPa、500 kPa 进行数值模拟,分析不同千斤顶推力对基坑地下连续墙的变形影响,结果见图 5.



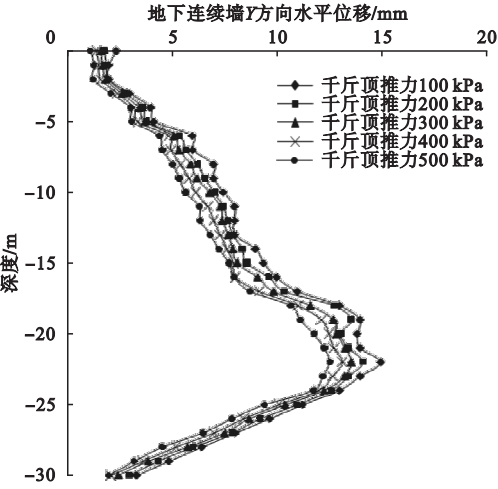


图5 不同千斤顶推力产生地下连续墙变形曲线

Fig. 5 Deformation curves of underground continuous wall with different jacking force

从图中可以看出,随着千斤顶推力的不断增加,盾构邻近基坑的地下连续墙的水平位移呈现出不断减小的变化趋势,但千斤顶推力每增加100 kPa,地下连续墙位移变化很小.掘进压力为200 kPa、300 kPa、400 kPa、500 kPa时,地下连续墙水平位移最大变化值分别为14.98 m、16.25 m、17.31 m、18.47 m;而千斤顶推力为200 kPa、300 kPa、400 kPa、500 kPa时,地下连续墙水平位移最大变化值分别为14.11 m、13.58 m、13.12 m、12.54 m,相比之下千斤顶推力对地下连续墙的影响程度较掘进压力的影响程度更小.与掘进压力类似,千斤顶力的主要影响范围在-16~-25 m,设计及施工时要对这一区间进行重点关注.

3.5 注浆压力变化对连续墙位移的影响

同步注浆在盾构工法中有着填补施工空隙、维持盾构隧道与周围土体平衡状态的重要作用<sup>[17]</sup>.因此,注浆压力是影响注浆效果的主要因素,对注浆压力这一盾构力学参数进行模拟分析也是极为重要的.原模型中根据实际工程情况,注浆压力取值为150 kPa,笔者选取注浆压力分别为300 kPa、350 kPa、450 kPa、550 kPa进行模拟分析,结果见图6.

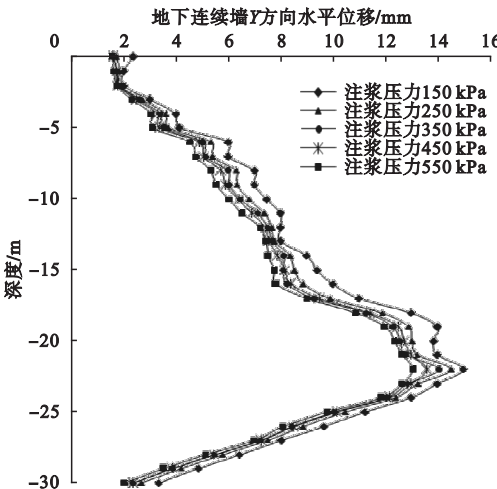


图6 不同注浆压力产生地下连续墙变形曲线

Fig. 6 The deformation curves of underground continuous wall with different grouting pressure

由图6可以看出,注浆压力分别为150 kPa、300 kPa、350 kPa、450 kPa、550 kPa时,地下连续墙水平位移的最大值分别为14.98 mm、14.53 mm、14.07 mm、13.58 mm、13.05 mm.因此可以推断注浆压力越大,地下连续墙的水平位移反而越小,但减小程度较小.究其原因可能是由于注浆压力越大,隧道与土体处于相对稳定的状态,对邻近基坑的地下连续墙的变形量影响较小.但由于注浆材料一般选取弹性模量较小的材料进行盾尾同步注浆,材料的弹性模量与土体的更为接近,因此增大注浆压力可能在较小程度上降低地下连续墙的水平位移.

4 结 论

(1)盾构施工完成后地下连续墙的水平位移增加了5.48 mm,约为基坑开挖过程产生变形量的一半,证明盾构施工对邻近基坑的围护结构产生的变形不可忽略,在设计及施工过程中应充分考虑并予以关注.

(2)随着掘进压力的逐渐增大,地下连续墙的最大水平位移值也在不断增大;随着千斤顶推力的不断增加,盾构邻近基坑的地

下连续墙的水平位移呈现出不断减小的变化趋势,千斤顶力的主要影响范围在 $-16 \sim -25$  m,约为盾构隧道中心埋深位置的上、下5 m深度范围,设计及施工时要对这一区间进行重点关注。

(3)随着注浆压力增大,地下连续墙的水平位移反而越小,但减小程度较小。究其原因可能是由于注浆压力越大,隧道与土体处于相对稳定的状态,对邻近基坑的地下连续墙的变形量影响越小。

## 参考文献

- [1] 何连昇,何春茂,张俊. 基坑开挖对下卧盾构隧道的影响风险分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(1):62-70.  
(HE Liansheng, HE Chunmao, ZHANG Jun. Risk analysis for effects of pit excavation on the existing shield tunnel[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(1):62-70.)
- [2] 董张艳. 城市地下交通空间的合理利用研究[D]. 西安:西安科技大学,2013.  
(DONG Zhangyan. Study on the rational utilization of urban underground traffic space [D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2013.)
- [3] DUAN Baofu, LI Lei. Analysis of surveillance for deep foundation pit of subway station[J]. Applied mechanics and materials, 2012, 170/173:1625-1628.
- [4] 胡玉东. 盾构隧道近接地下连续墙施工影响试验研究[D]. 苏州:苏州科技学院,2014.  
(HU Yudong. Experimental study on construction of diaphragm wall adjacent to shield tunnel [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology,2014.)
- [5] ZHANG Huazhi, Yi Fangfeng. Study on the deformation characteristics of supporting system of deep foundation pit in subway station construction [J]. Advanced materials research, 2011,1269(243):546-551.
- [6] LI Rui, QIAO Yi, LIU Yongjie. The technique of deep foundation pit and pile foundation construction[J]. Applied mechanics and materials, 2012,204/208:308-311.
- [7] SHEN Hui, BI Jinfeng, LUO Xianqi. Impact assessment of common supported excavation double foundation pits on the adjacent tunnel [J]. Applied mechanics and materials, 2012, 1800(170):1524-1527.
- [8] 胡军. 软弱地层深基坑开挖地下连续墙变形分析[J]. 现代城市轨道交通,2015(3):47-49.  
(HU Jun. Analysis of underground continuous wall deformation in soft soil deep foundation pit excavation [J]. Modern urban rail transit, 2015(3):47-49.)
- [9] HUANG Lei, DUAN Shaowei, ZHU Kaimeng, et al. Study on deformation monitoring of subway station deep foundation construction[J]. Applied mechanics and materials, 2016, 847:425-430.
- [10] ZHOU Guangzhu, WEI Xu, YU Chen. Analysis of earth pressure on gridding concrete retaining wall in the excavation of deep foundation pit in soft soil area[J]. Applied mechanics and materials, 2011,52/54:2181-2186.
- [11] 李涛,刘波. 双线盾构顺序下穿铁路箱涵的实例研究[J]. 太原理工大学学报,2013,3:373-377.  
(LI Tao, LIU Bo. Case study on the twin shield tunneling sequence construction under crossing the railway box culvert [J]. Journal of Taiyuan university of technology, 2013, 3:373-377.)
- [12] ZHU Changzhi, ZHENG Xinglian. Three-dimensional numerical analysis of excavation and support of deep foundation pit [J]. Advanced materials research, 2012, 1615(446):1922-1926.
- [13] ZHANG Ruimei, CAO Jing, SONG Zhigang. Construction monitoring and post analysis of a deep foundation pit[J]. Advanced materials research, 2012,482/484:52-57.
- [14] 王国才,马达君,杨阳,等. 软土地层中地铁盾构施工引起地表沉降的三维有限元分析[J]. 岩土工程学报,2011,33(增刊1):273-277.  
(WANG Guocai, MA Dajun, YANG Yang, et al. Three dimensional finite element analysis of ground settlement induced by subway shield construction in soft soil [J]. Journal of geotechnical engineering, 2011,33(S1):273-277.)
- [15] ZHENG Yi. Numerical simulation on a deep-foundation pit of Shenzhen holiday plaza project [J]. Advanced materials research, 2014, 937:433-437.
- [16] 庄旭. 葫芦形基坑地下连续墙施工监测与数值分析[D]. 长沙:长沙理工大学,2015.  
(ZHUANG Xu. Construction monitoring and numerical analysis of underground continuous wall of gourd foundation pit [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2015.)
- [17] ZHU Changzhi, ZHENG Xinglian. Three-dimensional numerical analysis of excavation and support of deep foundation pit [J]. Advanced materials research, 2012,446/449(2):1922-1926.