

盾构施工对历史保护建筑的影响及控制研究^{*}

黄 杉¹ 王尉行² 李谷阳¹ 李晓亮¹ 王海飞¹ 徐前卫² 孙梓粟²

(1. 中铁五局电务城通公司, 410205, 长沙; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 工程师)

摘 要 在北京地铁8号线天桥—永定门外区间隧道施工过程中, 盾构需要近距离地从历史保护建筑燕墩下方侧穿。借助数值分析软件对盾构侧穿燕墩的动态施工过程进行了模拟, 研究并分析了盾构施工对地层变形、燕墩结构受力及变形的影响, 在此基础上提出了相应的地层加固方案和盾构掘进控制措施。现场实测结果表明, 采取相关防治措施后, 燕墩结构及周边环境的变形得到了有效控制。

关键词 地铁隧道; 盾构施工; 历史保护建筑

中图分类号 TU433

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.08.025

Influence of Shield Construction on Historical Protection Building and Control Technology

HUANG Shan, WANG Weixing, LI Guyang, LI Xiaoliang, WANG Haifei, XU Qianwei, SUN Zili

Abstract During the construction of Tianqiao-Yongdingmen interval tunnel on Beijing metro Line 8, the shield machine needs to pass beneath the side of Yandun, a historical protection building. In order to study the stratum deformation, the structural stress and deformation of Yandun caused by the shield construction, the dynamic construction process of shield machine side passing beneath Yandun are simulated by means of numerical analysis software. On this basis, corresponding stratum reinforcement and the shield tunneling control measures are put forward. As revealed by the field monitoring results, after taking relevant prevention and treatment measures, the structural deformation of Yandun structure and the surrounding environment are effectively controlled.

Key words metro tunnel; shield construction; historical protection building

First-author's address China Railway Fifth Bureau Electric Chengtong Company, 410205, Changsha, China

0 引 言

随着城市轨道交通系统的快速发展, 越来越多

的盾构隧道不可避免地穿越或邻近已有建筑物。盾构施工会在地层中产生卸荷效应, 使周围土体产生变形, 当变形传递到建筑物下方时会引起地基变形。盾构隧道对邻近建筑物主要有三个方面的影响, 即沉降、倾斜以及开裂^[1]。国内外学者主要从理论分析、数值模拟和监测数据分析三个方面研究盾构施工对相邻建筑物的影响。例如, 文献[2]分析了实测隧道下穿建筑物变形规律, 提出了采用单线隧道已有的 Peck 修正公式叠加得到双线隧道的地基基础沉降规律。文献[3]将土体损失简化为扰动荷载, 对邻近建筑物的盾构施工引起的地面沉降进行了理论分析和数值模拟, 提出了盾构临近建筑物施工的控制措施。文献[4]结合工程实际, 基于建筑物与隧道中心的距离和建筑物不同基础类型两个因素, 用数值模拟的方法研究了隧道开挖对上覆建筑物基础变形的影响。

在北京地铁8号线天桥站—永定门外站区间隧道施工过程中, 盾构需要从重点保护文物燕墩下方穿过。燕墩属砖砌结构, 且年代较为久远, 盾构掘进势必对其结构安全造成影响。有鉴于此, 借助数值分析软件对盾构侧穿燕墩的施工过程进行模拟, 研究了盾构近接施工引起的地层变形及对燕墩的受力和变形的影响, 提出了地层加固方案和施工控制措施, 相关成果可为今后类似工程提供借鉴和参考。

1 工程概况

天桥站—永定门外站区间于 K34 + 802.400 处侧穿北京市保护文物建筑——燕墩。燕墩是一座砖台, 其上竖有清乾隆皇帝御制碑一座, 是北京著名碑刻之一。燕墩外形下宽上狭, 平面呈正方形, 台底各边长 14.8 m, 台面长 13.9 m, 台底至台面高约 8 m。燕墩位于区间西侧, 距离右线最小距离为

^{*} 国家自然科学基金项目(41672360)

7.915 m,此处盾构线间距为 16.8 m,覆土 22.3 m。地铁线路与燕墩的空间位置关系如图 1 所示。

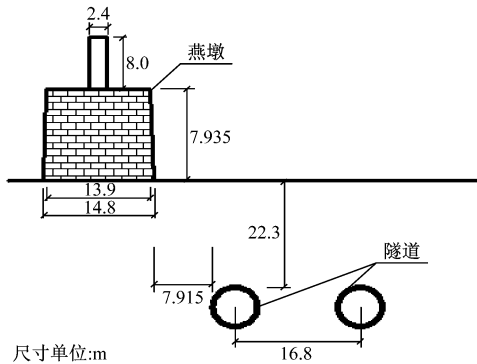


图 1 燕墩与隧道立面关系示意图

图 2 给出了盾构穿越施工区段的地质剖面。该处隧道埋深约为 22.3 m,地下水距离隧道顶部约为 3.94 m。

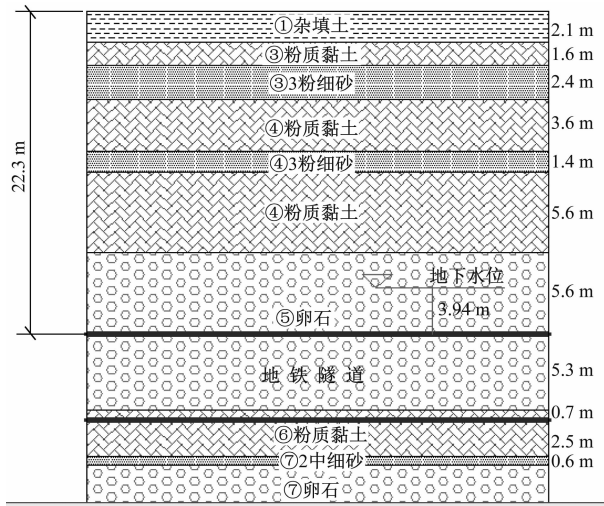


图 2 区间地质剖面示意图

2 盾构侧穿燕墩施工模拟

2.1 计算模型

图 3 给出了盾构侧穿燕墩的数值计算模型,土体横向边界长 68.0 m,竖向边界长 48.3 m,纵向边界长度 60.0 m,左、右线隧道模拟的是从 777 环到 827 环的衬砌结构。

为考虑地下水渗流与土体因开挖造成的应力状态改变之间的相互影响,采用流-固耦合分析模式进行计算。地基土、燕墩、管片和注浆层均采用实体单元模拟,地基土采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,燕墩、管片和注浆层采用各向同性弹性模型。土层、管片、注浆层及燕墩的计算参数如表 1 ~ 表 2 所示。

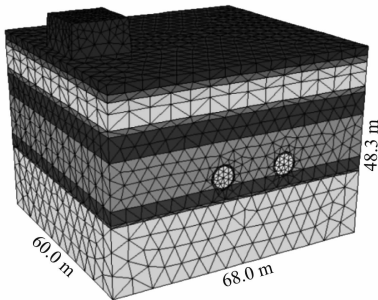


图 3 隧道侧穿燕墩计算模型图

表 1 土体物理力学参数

地层	重度/ (kN/m³)	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)	体积模 量/MPa	剪切模 量/MPa	孔隙 率	渗透系数 /(m/d)
①	1 650	0	8.00	4.46	2.06	0.73	2.30
③	1 570	23.25	8.64	4.57	2.11	0.72	0.23
③ ₃	1 629	0	30.00	36.67	16.92	0.65	69.00
④	1 600	21.67	11.92	7.83	3.61	0.82	0.23
④ ₃	2 000	0	30.00	18.94	9.76	0.62	0.71
⑤	1 670	0	40.00	39.58	18.27	0.50	1 400.00
⑥	1 497	22.50	8.80	9.92	4.58	0.81	0.23
⑦ ₂	1 647	0	30.00	27.08	12.50	0.60	81.00
⑦	1 694	0	45.00	39.58	18.27	0.45	2 300.00

表 2 弹性实体单元计算参数

类别	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	密度/(kg/m³)
管片	19 200	12 500	2 500
注浆层	333	154	1 900
燕墩墩台	1 720	1 740	1 600

2.2 施工过程模拟

按照实际施工工况进行开挖模拟,即左线隧道先开挖 24 m,左、右线隧道随后一同开挖 36 m,右线隧道再开挖 24 m。左、右线隧道每次开挖长度为 5 环 6 m,隧道衬砌施作和注浆施工应滞后开挖面 6 m。开挖面支护压力按照太沙基松动土压力计算,隧道顶部侧压力为 140 kPa,中心处侧压力为 215 kPa,变化梯度为 25 kPa。

3 计算结果分析

3.1 地层竖向变形

左、右线盾构掘进完后的总体竖向位移如图 4 所示。最大沉降值约为 10.07 mm,发生在左线隧道 827 环拱顶和 777 环地表位置;最大隆起值约为 11.37 mm,发生在左线隧道 827 环拱底附近。

图 5 为数值模拟得到的盾构刀盘到达不同管片环位置时的地表竖向位移监测断面的变形曲线。该监测断面位于燕墩中心处的第 800 环管片位置。地表变形曲线有一个沉降峰值,最大沉降值为 5.91 mm,出现在刀盘距离燕墩 20 m 左右的位置。分析

盾构通过前后的地表竖向位移曲线可知,该断面处的地表竖向变形表现为随着盾构的接近而逐步发生沉降,而当盾构远离该监测断面后,则沉降值趋于稳定。

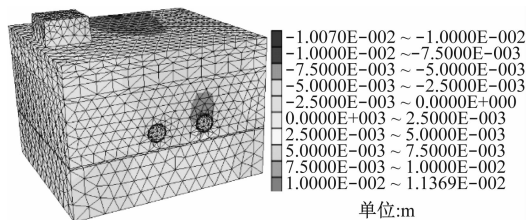


图4 左、右线盾构掘进完成后竖向位移云图

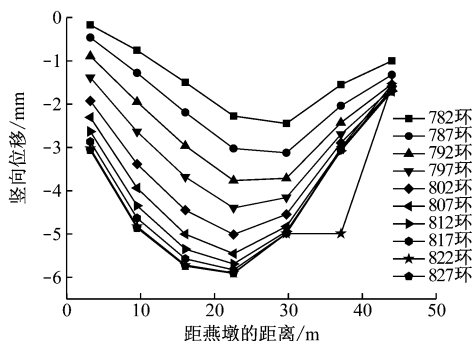


图5 数值模拟第800环监测断面处地表竖向位移曲线

3.2 孔隙水压力分析

图6为盾构通过后的土体孔隙水压力分布图。由于施工扰动引起开挖面附近土体膨胀,在开挖面附近形成负的超孔隙水压力,孔隙水向开挖面附近流动,后期由于超孔隙水压力的消散会使土体发生固结沉降,这可能会对地表的燕墩产生不利影响。

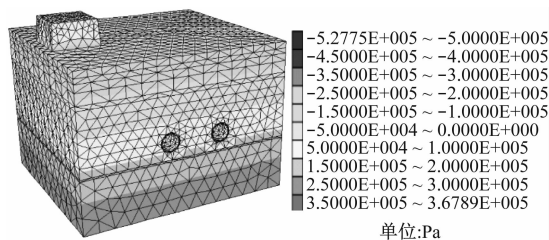


图6 左、右线隧道开挖完后的孔隙水压力

3.3 燕墩结构变形分析

图7是计算得到盾构开挖完成后的燕墩竖向位移云图,图8分别给出了燕墩各角点的变形曲线图。左线隧道开挖20环后,此时盾构并没有通过燕墩,燕墩整体有一个微小的隆起变形;左线隧道开挖50环后,燕墩除J-15-04角点所在区域外,均发生沉降变形,且距离盾构开挖区域最近的J-15-01附近区域沉降值最大为1.85 mm;左、右线隧道开挖完后,燕墩J-15-04附近区域发生微小的隆起变形,其余区域

均发生沉降变形,且J-15-01附近区域沉降值最大为2.22 mm。

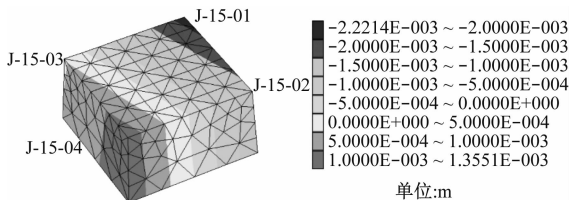


图7 左右线隧道开挖完成后燕墩竖向位移图

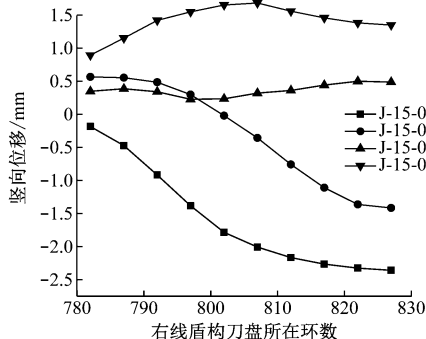


图8 燕墩各角点竖向位移图

3.4 燕墩结构应力分析

图9、图10是左、右线盾构开挖后燕墩的最大主应力和最小主应力云图,燕墩最大拉应力为0.139 MPa,最大压应力为0.461 MPa。最大主应力对应最大拉应力,最小主应力对应最大压应力,对于砖砌结构的燕墩来说,盾构施工引起的拉应力在其允许范围内。

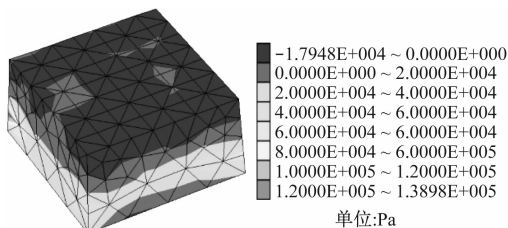


图9 燕墩最大主应力云图

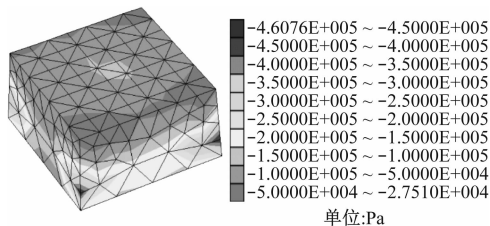


图10 燕墩最小主应力云图

4 施工控制措施及实测数据分析

4.1 盾构穿越燕墩的保护措施

1) 由于燕墩基座位于右线盾构施工的影响范

围内,故右线盾构施工时,除严格按照盾构施工工艺控制和监测外,采取加大同步注浆及二次注浆量、二次深孔加强注浆及在左线隧道采用加强型衬砌环的保护方案。同步注浆量不小于建筑空隙的220%,二次注浆量不小于同步注浆量的25%。盾构过燕墩的加强型衬砌环设置范围如图11所示。

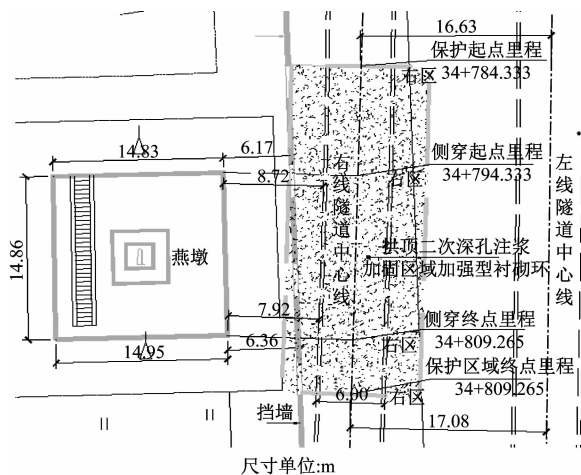


图11 盾构侧穿燕墩加强衬砌环设置平面图

2)如图12所示,二次深孔注浆即通过加强衬砌环管片(管片主筋由 $\phi 20$ mm增强至 $\phi 22$ mm)吊装孔及新增注浆孔打设钢花管进行管片壁后注浆,每环加强衬砌环管片的吊装孔及新增注浆孔共有16个,沿圆周均匀布置。

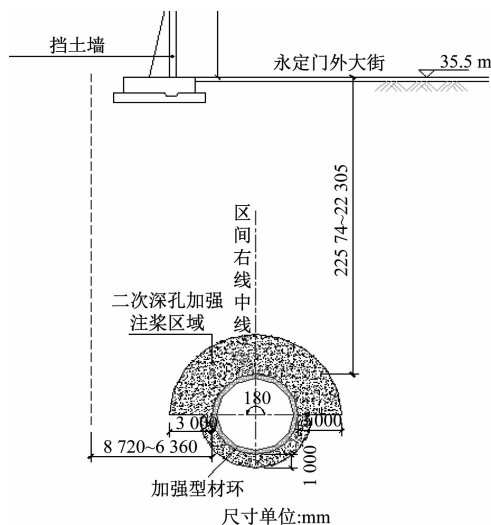


图12 盾构侧穿燕墩段二次深孔注浆断面示意图

二次深孔注浆工艺流程及注浆设备同二次补浆,浆液采用水泥-水玻璃双液浆,浆液配比同二次补浆浆液配比,注浆压力为0.5~0.8 MPa,注浆应控制在距离开挖面20 m左右。

4.2 盾构掘进参数管理

4.2.1 上部土仓压力

图13为789~815环推进时实测土仓上部土压力与理论计算值的比较。此段隧道平均埋深22.3 m,根据太沙基松动土压力公式可得土仓压力理论计算值为0.100~0.127 MPa。由图13可知,大部分实际土仓压力在理论计算值的范围内。

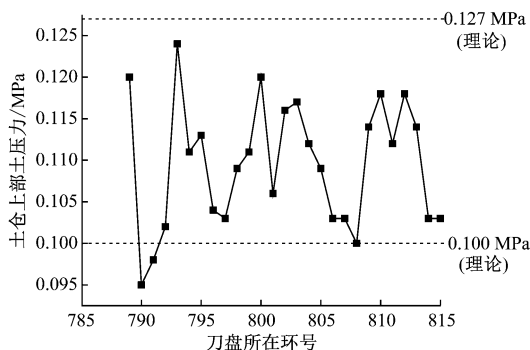


图13 土仓压力实测值与理论计算值

4.2.2 推力管理

对于土压平衡盾构来说,盾构千斤顶的推力就是推进过程中盾构遇到的全部阻力之和,盾构总推力理论计算值是20 794~29 706 kN。实测盾构总推力约为14 000~20 000 kN,比理论计算值小,因实际施工采取欠压推进模式,以免引起过大变形。

4.2.3 扭矩管理

根据理论计算公式可得刀盘扭矩值为2 326~5 815 kN·m,实测789~815环扭矩值在1 800~2 500 kN·m范围内,靠近经验估算值下限,比理论计算值略小。

4.2.4 盾构掘进参数管理

盾构实测的推进速度在60~70 mm/min间波动,螺旋输送机转速在5.5~6.5 r/min间波动,刀盘转速在0.9~0.94 r/min间波动。结合土仓压力实测值可以看出,此种盾构掘进参数组合基本能够保证盾构掘进面的压力与支护力相等,有效控制了地表的沉降变形。

4.3 实测地表变形分析

图14为实际施工中地表监测断面所反映的地表沉降变化曲线。与图5中数值计算结果相比可以发现,二者所反映的地表变形随盾构推进的变化规律基本一致,且最大沉降值均出现在距离燕墩20 m左右的位置。数值计算得出最大沉降量5.91 mm,略高于实测最大沉降量3.6 mm,这说明实际施工时实施的二次注浆有效控制了地表的沉降量。

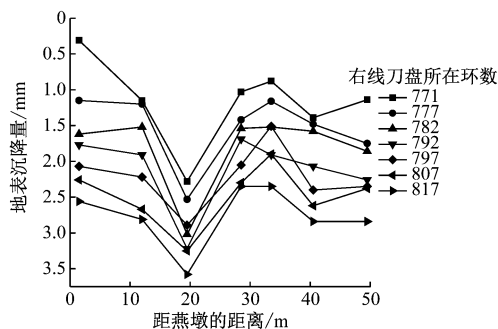


图14 实测第800环监测断面处地表变形历时曲线

4.4 实测燕墩变形分析

图15分别给出了实测得到燕墩各角点的沉降变形图。对比图8和图15可知,随着盾构推进,燕墩整体产生沉降变形,且沉降值小于2.5 mm,在控制范围内,这与数值模拟一致。但在实测结果中,J-

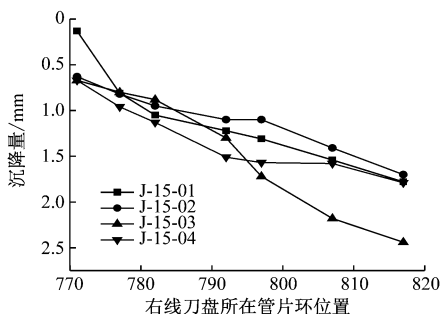


图15 施工监测燕墩各角点沉降变形图

(上接第112页)

3.2.2 基于《地铁设计规范》的站台宽度计算

计算结果为:侧站台宽度(不含柱宽) $b=3.38$ m,侧站台宽度(含柱宽) $b=4.23$ m $<b_{sj}$,站台宽度 $B=13.76$ m $<B_{sj}$ 。

因此,《地铁设计规范》计算得出的侧站台宽度和站台宽度分别小于实际值,而本文3.2.1节计算方法中的两种站台利用情况计算得出的侧站台宽度和站台宽度都分别大于实际值。而实际情况是该站早高峰站台拥挤,所以本文推导的计算方法比《地铁设计规范》站台宽度计算公式更合理。

4 结语

通过大量实地观测,提出了基于候车乘客单排队列密度的城市轨道交通站台宽度计算的新方法。并以两个已运营城市轨道交通车站为对象进行案例研究。结果表明,本文所提出的城市轨道交通站台宽度计算方法比我国现行《地铁设计规范》的站台宽度计算公式更合理。研究结论可为进一步完

15-04并未产生隆起变形,这是由于盾构采取欠压推进所致。

5 结语

结合北京地铁8号线侧穿燕墩的工程实例,通过数值分析软件对盾构施工过程进行动态模拟,结合现场监测数据和盾构掘进参数,得到以下结论:

1)地表竖向变形整体表现为随着盾构推进而逐步发生沉降,盾构远离监测断面后,沉降值趋于稳定。

2)随着盾构推进,燕墩整体产生沉降变形,且沉降值小于2.5 mm,在控制范围内。

3)采取合理的盾构掘进参数和二次深孔注浆工艺能够有效减少盾构开挖对上方建筑的影响。

参考文献

- [1] 刘严联.城市轨道交通隧道下穿建筑物施工方法优化研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [2] 衡朝阳,滕延京,孙曦源,等.地铁隧道下穿单体多层建筑物评价方法[J].岩土工程学报,2015,37(增刊2):148.
- [3] 丁智.盾构隧道施工与邻近建筑物相互影响研究[D].杭州:浙江大学,2007.
- [4] 董燕,王安立,张刚,等.隧道施工对上覆建筑物基础变形的影响[J].地下空间与工程学报,2014,10(1):144.

(收稿日期:2018-01-30)

善我国城市轨道交通站台宽度计算方法提供理论支撑和参考。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [2] 停車場線路配線研究會.新停車場線路配線ハンドブック[M].東京:吉井書店,1995.
- [3] 汪晓蓉,于波.控制地铁车站规模的体会[J].现代隧道技术,2008(3):22.
- [4] 崔之鉴.论地铁车站站台规模[J].西南交通大学学报,1993(3):76.
- [5] 沈景炎.乘客动态分布与站台宽度的研究[J].城市轨道交通研究,2001(1):21.
- [6] 沈景炎.车站站台乘降区宽度的简易计算[J].都市快轨交通,2008(5):9.
- [7] 王子甲,陈峰,李小红.地铁车站站台宽度计算方法改进及仿真评价[J].交通运输系统工程与信息,2012,12(5):168.
- [8] 李颖,毛保华.同台换乘站台宽度计算方法研究[J].交通运输系统工程与信息,2016,16(3):148.

(收稿日期:2018-03-23)