

盾构侧穿桥梁基础的施工影响分析及其控制研究*

徐前卫¹ 崔越榜¹ 王尉行¹ 龚振宇² 黄 杉² 路林海³ 邢慧堂³

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

3. 济南轨道交通集团公司, 250101, 济南//第一作者, 副教授)

摘 要 北京地铁 8 号线天桥站—永定门外站区间隧道施工过程中, 盾构需要于 K34+422.094~+534.308 处近距离侧穿永定门西桥, 穿越段地层以砂卵石地层为主。隧道在施工至 K34+506.308 里程时, 距永定门桥最近处仅 9.2 m, 施工对桥梁影响较大, 故有必要对盾构施工引发的桥梁结构安全进行评估。根据对盾构侧穿桥梁基础施工过程的动态模拟分析, 得出了盾构穿越施工导致地层和桥梁结构变形过大的结论。鉴于此, 提出了在靠近桥梁一侧的左线盾构隧道周围采取局部注浆的加固方案和对盾构掘进参数管理的控制措施。进一步的计算分析和现场实测结果表明, 按上述工程措施施工, 地层和桥梁结构变形均得到有效控制, 从而确保了本工程的顺利施工, 并为今后类似工程提供了借鉴和参考。

关键词 盾构隧道; 近接施工; 桥梁结构; 注浆加固

中图分类号 U25

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.05.006

Construction Influence Analysis and Control Measures of Shield Tunnel Side-crossing Adjacent Bridge Foundation

XU Qianwei, CUI Yuebang, WANG Weixing, GONG Zhenyu, HUANG Shan, LU Linhai, XING Huitang

Abstract During the construction of the interval tunnel from Tianqiao station to Yongdingmen Wai station of Beijing Metro Line 8, the shield machine has to cross the West Yongdingmen Bridge in close distance at the mileage from K34+422.094 to K34+534.308. The stratum at the crossing section is mainly sandy cobble soil. The minimum net distance between the bridge and the shield tunnel is only 9.2 m when the shield arrives at the mileage of K34+506.308, of which the construction has relatively large impact on the bridge structure. Therefore, it is necessary to evaluate the safety of the bridge structure caused by shield construction. According to the dynamic

simulation analysis of the construction process of shield machine side-crossing bridge foundation, conclusion is obtained that the deformation of the stratum and the bridge structure caused by shield tunnel side-crossing construction is too large. In view of this, a local grouting scheme to reinforce the soil around the left tunnel near the bridge and control measures for the management of shield tunneling parameters are proposed. Both calculation analysis and field monitoring results show that the deformation of the stratum and bridge structure can be effectively controlled if the above engineering measures are taken, thus smooth construction of this project is ensured, providing reference for similar projects in the future.

Key words shield tunnel; adjacent construction; bridge structure; grouting reinforcement

First-author's address Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China

随着我国公共交通系统快速发展,越来越多的地铁隧道建设在城市建筑密集区、人流密集区地面以下。地铁隧道不得不近距离穿越一些重要的建筑物,故在盾构施工过程中,必须确保周围构筑物的正常使用,不至于出现过度侧移或基础差异沉降^[1-4]。

针对盾构近距离穿越建筑物的问题,国内外学者以实际工程为依托,采取理论分析、数值模拟等手段计算和预测建筑物可能发生的沉降量,并设法将其控制在容许范围内,以确保相关工程的施工安全和正常使用^[5-11]。例如,王闯等^[12]基于实际工程,用数值模拟和理论解析的方法对相邻隧道不同开挖顺序引起的桩基扰动度进行了研究;徐前卫等^[13]综合运用理论分析和数值模拟的方法,提出了隧道穿越桥梁桩基的地基加固、桩基托换和洞内除

* 国家自然科学基金项目(41672360);住房和城乡建设部研究开发项目(k2019208);山东省住房和城乡建设厅研究开发项目(2018-k05-02、2019-k6-1)

桩方案,现场实测结果表明该方案可有效控制桥梁结构的变形;谢雄耀等^[14]发现盾构穿越火车站股道时采用桩筏基础加固能够满足沉降控制要求,通过对比仿真结果和监测数据,证明了数值模拟能够用于预测指导施工。

尽管国内外众多学者开展了盾构近接既有构筑物施工影响的工程案例分析,但是各具体工程的情况存在较大差异,所采取的分析方法和工程应对措施亦不尽相同。本文以北京砂卵石地层中双线盾构近距离侧穿桥梁工程为例,通过数值模拟对盾构近距离侧穿桥梁基础的施工影响进行了分析,在此基础上提出了对洞周土体局部加固和加强盾构掘进参数管理的施工措施。现场实测结果表明,采用该方案施工后,地层变形和桥梁变形均得到了有效控制,相关成果亦可为今后类似工程提供借鉴和参考。

1 工程概况

天桥站—永定门外站区间采用盾构法施工,全长 1 637.37 m。区间隧道顶板覆土厚度 10.42 ~

27.32 m。盾构穿越地层以细砂、卵石和粉质黏土为主。区间隧道于 K34 + 422.094 ~ + 534.308 侧穿永定门主桥西桥。图 1 为桥梁结构与双线盾构的立面图。

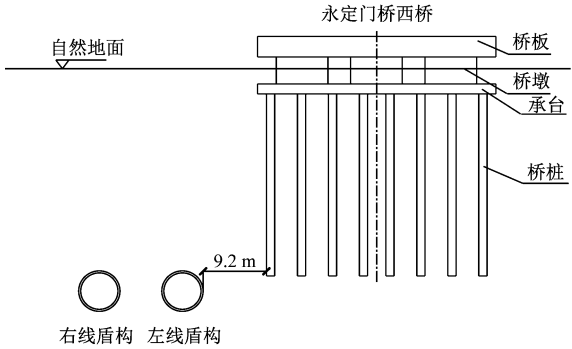


图 1 隧道线路与永定门桥空间位置关系图

隧道下穿区段埋深为 23.2 ~ 23.7 m。区间土层自上而下为:杂填土①层、粉土③₂层、粉质黏土③层、粉砂~细砂③₃层、粉质黏土④层、卵石⑤层。地层参数如表 1 所示,洞身所在地层主要为卵石⑤层。区间结构以上有潜水和潜水~承压水两层水,地下水距离隧道顶部约 5.4 m。

表 1 土层物理力学参数表

地层	土性	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa
①	杂填土	16.5	0.00	8.00	4.46	2.06
③ ₂	粉土	19.8	15.00	19.60	21.62	12.97
③	粉质黏土	19.5	23.25	8.64	20.93	6.46
③ ₃	粉砂~细砂	19.8	0.00	30.00	50.00	23.08
④	粉质黏土	19.5	23.25	8.64	35.14	10.85
⑤	卵石	20.2	0.00	40.00	75.00	56.25

在本工程中,双线盾构在砂卵石地层中侧穿永定门桥,桥桩距离盾构最近处仅 9.2 m。由于盾构在施工过程中不可避免地要对周围环境产生不利影响,如引起地层沉降过大、桥桩水平位移过大、桥面差异沉降较大等问题,故施工对桥梁的影响较大。国内关于盾构在砂卵石这种危险地层中近距离穿越桥梁的施工案例较少,且桥梁环境保护等级较高,故本文以盾构侧穿永定门主桥西桥为研究对象,借助有限元分析软件对盾构侧穿时桥梁结构的受力和变形问题进行分析。

2 盾构侧穿桥梁施工模拟

2.1 计算模型

图 2 给出了盾构侧穿桥梁基础的数值计算模型,土体水平边界长 150 m,竖向边界长 60 m,纵向

边界长 112 m,左、右线盾构隧道全长 117.6 m,模拟管片环号从 470 环到 568 环。桥梁结构长 77.4 m,宽 34.9 m,在计算模型中将其简化为由桥板、桥墩、承台和桥桩组成的空间结构。

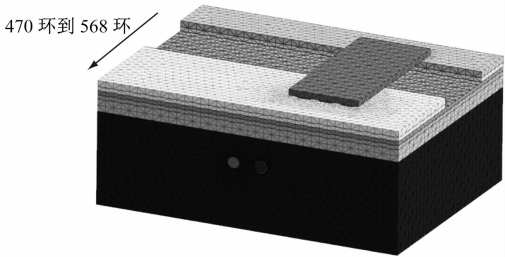


图 2 隧道侧穿桥梁计算模型图

计算模型中,地层、注浆层和桥梁上部结构采用实体单元模拟,其中,地层和注浆层采用修正摩尔库仑弹塑性模型,桥板、桥墩、承台采用各向同性

弹性模型。管片衬砌采用壳单元模拟,桥桩采用梁单元模拟,桥桩与土之间设置界面单元与桩端单元。桩土接触单元的剪切刚度模量是 48.47 MPa,法向刚度模量是 126 MPa。桩端单元承载力极限值是 220 kPa,弹簧刚度是 250 MPa。地层参数如表 1 所示,模型结构参数如表 2 所示。

表 2 结构单元力学参数

材料名称	重度/(kN/m ³)	泊松比	弹性模量/MPa
桥板	2 400	0.20	36 000
桥墩、承台	2 400	0.20	31 500
桥桩	2 300	0.20	30 000
管片	2 500	0.20	35 500
注浆层	2 200	0.25	400

开挖过程模拟参照实际施工情况来设置,先开挖靠近桥梁一侧的左线隧道,再开挖右线隧道。左、右线隧道每次开挖长度为 10 环即 12 m,土体开挖完毕后,施加垂直于开挖面的支护压力 175.5 kPa(与实际工程中设置的开挖面支护压力一致),激活管片单元,改变注浆层土体参数。以此循环开挖,左、右隧道各开挖 20 步,即从 470 环开挖到 568 环。

2.2 地层竖向变形分析

从图 3 中可以看出:地层最大沉降值为 26.16 mm,发生在盾构底部和地层靠近桥梁结构的位置处;最大隆起位移为 13.53 mm,发生在隧道顶部。因地层沉降变形过大,超过控制值 15 mm,容易引起地表塌陷、桥梁结构破坏等一系列的安全事故。

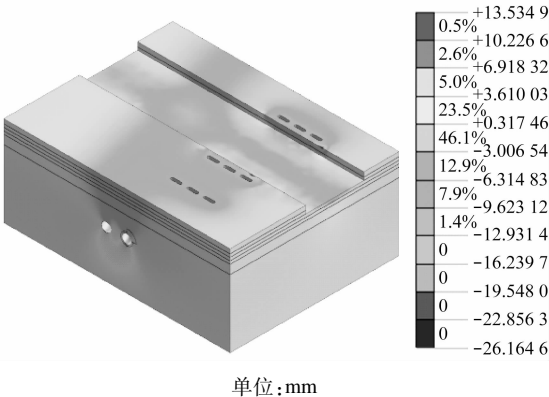


图 3 盾构施工完后地层竖向变形云图

2.3 桥梁结构竖向变形分析

左、右线盾构掘进完成后桥梁结构的最大竖向位移为最大沉降值 11.5 mm,发生在靠近左线盾构隧道的桥板中部;桥板最大差异沉降为 5.3 mm,承

台最大差异沉降为 2.2 mm。取靠近左线盾构一侧的桥梁纵向轴线位置处的桥面变形进行研究,得到盾构开挖时桥板竖向变形曲线,如图 4 所示。桥板的最大沉降值为 10.5 mm,出现在跨中位置处,随着盾构开挖,桥板的沉降值逐渐增大。由于左线盾构距离桥板较近,故开挖对其影响更大;右线盾构距离桥板较远,开挖时桥板沉降变形不明显。

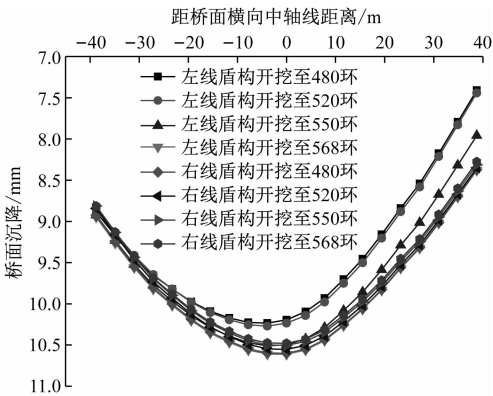


图 4 隧道开挖后桥面纵向轴线位置处变形曲线

2.4 桥墩测点竖向变形及桥桩水平变形分析

桥墩竖向位移最大值为 10.5 mm,发生在靠近盾构一侧桥墩的中部。1#桥墩距离盾构最近,为施工中最为关注的位置,故在其顶部布置测点。对左线盾构开挖时的竖向位移单独进行分析,如图 5 所示。沉降变形最大值是 8.7 mm,发生在最靠近左线盾构的测点 Z01 上。离盾构越近的测点沉降变形越大,且随着盾构的推进,各测点沉降值逐渐增大。测点沉降变形变化最快是发生在开挖左线盾构 520 ~ 560 环之际,即左线隧道穿越桥墩施工过程中。

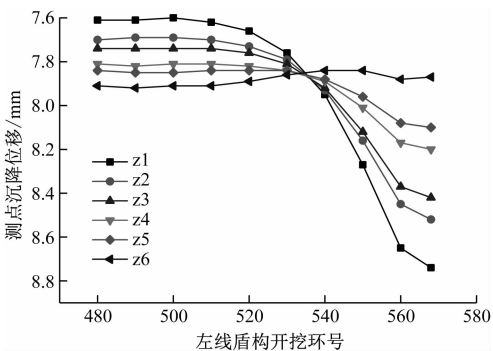


图 5 未加强注浆情况下 1#桥墩监测点竖向位移曲线

此外,盾构开挖完成后桥桩的最大水平位移为 4.57mm,此处桥桩距离盾构水平距离仅 9.2 m,故受盾构开挖影响大。

综上所述,如果不采取施工措施,一方面双线盾构侧穿桥梁将导致地层变形过大,进而引发地表塌陷、桥梁结构破坏等安全事故;另一方面,为进一步减小桥梁结构的竖向变形和桥桩的水平变形,故结合工程实际,需要对靠近桥梁结构的左线盾构采用加强注浆的方法进行辅助施工。

3 盾构加强注浆施工措施研究

鉴于左线隧道施工对桥梁结构影响较大,故考虑对左线盾构侧穿桥梁整个区域范围内的隧道周边土体进行加强注浆加固。图 6 给出了加强注浆范围示意图,除对隧道周围 1 m 范围内土体加固外,还对隧道上方迎向桩基的 3 m 范围内局部土体进行加固。双液浆由水玻璃稀释溶液和水泥浆体积比 1:1 组成,注浆压力 0.5~0.8 MPa。在有限元计算模型中,加强注浆区土体采用实体单元模拟,弹性模量 480 MPa,泊松比 0.23。

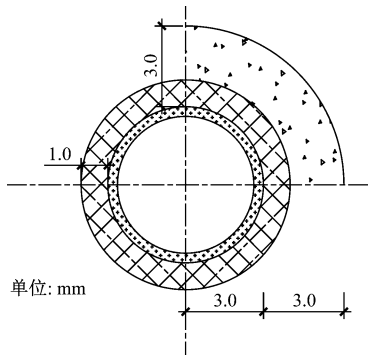


图 6 左线盾构周边加强注浆示意图

3.1 地层竖向变形分析

从图 7 中可以看出:地层最大沉降位移为 7.3 mm,发生在盾构底部和地层靠近桥梁结构的位置处;最大隆起位移为 3.6 mm,发生在盾构顶部;沉降变形和隆起变形均在安全范围内。

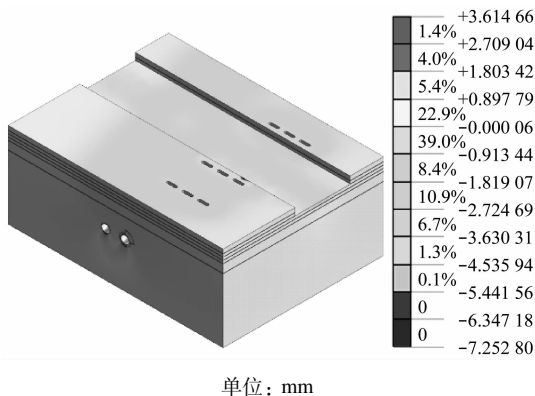


图 7 加强注浆工况下地层竖向变形云图

3.2 桥梁结构竖向变形分析

加强注浆工况下左、右线盾构掘进完成后桥梁结构的竖向位移最大值为 4.8 mm,发生在靠近左线盾构的桥板中部;桥板最大差异沉降为 2.3 mm,承台最大差异沉降为 1.7 mm。取靠近左线盾构一侧的桥板纵向轴线位置处的桥面变形进行研究,得到盾构开挖时桥板竖向变形曲线,如图 8 所示。图中可见,桥板的最大沉降值为 4.3 mm,出现在跨中位置处,但远低于未加固情况下的对应值。与图 4 进行对比可知,桥板竖向变形随盾构开挖的变化规律与盾构未加强注浆情况下的变化规律基本一致。

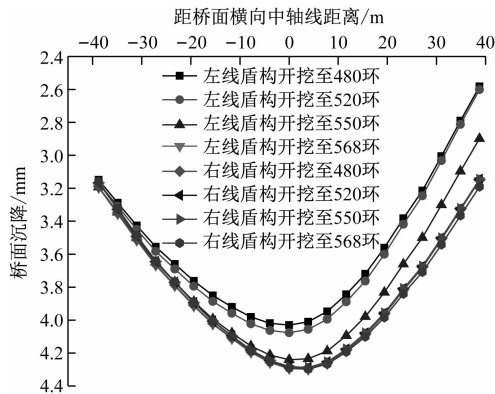


图 8 注浆工况下桥板变形曲线

综上所述,盾构施工中采用加强注浆的工法,可以有效减小桥梁结构的竖向变形和承台的不均匀沉降,减小幅度在 60% 左右,把桥梁结构的变形控制在安全范围内。

3.3 桥墩测点竖向变形及桥桩水平变形分析

加强注浆工况下盾构开挖完成后桥墩竖向位移最大值为 4.4 mm,发生在桥梁中部靠近盾构一侧的桥墩上,注浆加固的效果明显。桥墩测点在左线隧道开挖时的竖向位移如图 9 所示,加强注浆工况下沉降位移最大值是 3.4 mm,发生在最靠近盾构隧道的测点 z1 上。对比图 6 可知,桥墩测点竖向位移随盾构开挖的变化规律与盾构未加强注浆情况下的变化规律基本一致。

加强注浆工况下盾构开挖完成后桥桩的最大水平位移为 1.2 mm,位置为距离左线盾构最近的桥桩处。由于左线盾构采用加强注浆工法,使桥桩水平位移减少了 3.4 mm,作用明显。

4 盾构施工参数管理及监测数据分析

4.1 盾构掘进参数管理

此段隧道平均埋深 23.4 m,根据太沙基松动土

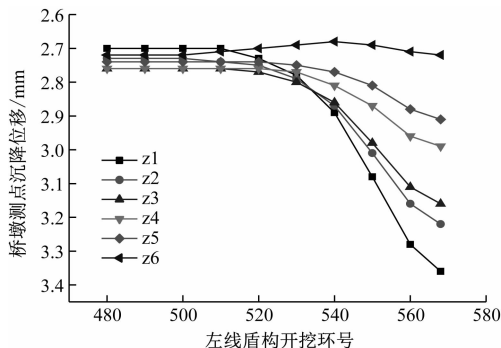


图9 加强注浆工况下桥墩监测点位移图

压力公式可得土仓压力计算值为 $0.13 \sim 0.167$ MPa,故左线盾构推 470 ~ 568 环时土仓压力可设定在 $0.12 \sim 0.19$ MPa 之间。在实际施工时,大部分实际土仓压力在理论计算值的范围内,如图 10 所示。

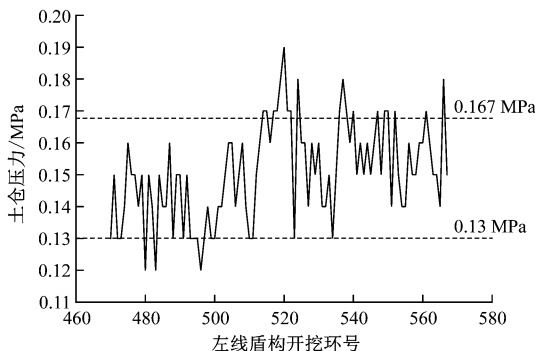


图10 土仓压力实测图

如图 11 所示,盾构实测推进速度在 $55 \sim 70$ mm/min 间波动,螺旋输送机转速在 $5.0 \sim 6.5$ r/min 间波动,刀盘转速在 $0.90 \sim 0.98$ r/min 间波动。结合图 10 可以看出,盾构推进速度和刀盘转速控制的进土速度和螺旋输送机转速控制的排土速度之间存在一个动态平衡,使得土仓压力和开挖面的支

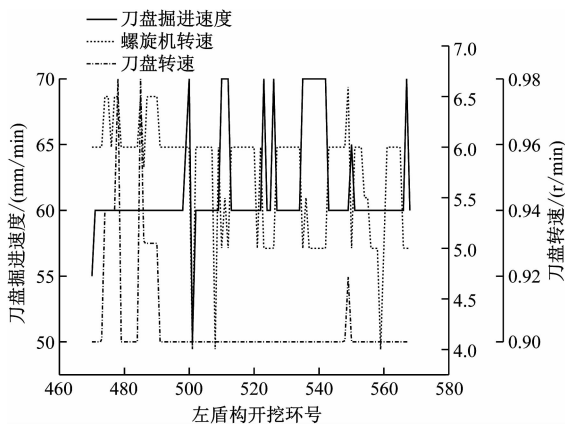


图11 盾构掘进参数实测图

护压力达到一个平衡值,有效控制了地表的沉降变形。

4.2 桥墩测点变形分析

图 12 给出了实测桥墩各测点沉降变形图。随着盾构推进,桥墩整体产生沉降变形,且变形最大值为 3.5 mm,发生在最靠近左线盾构的 z1 测点处。离左线盾构距离越近,受盾构开挖影响越大,测点沉降变形越大。对比图 9 可知,实测结果与数值模拟结果基本一致。

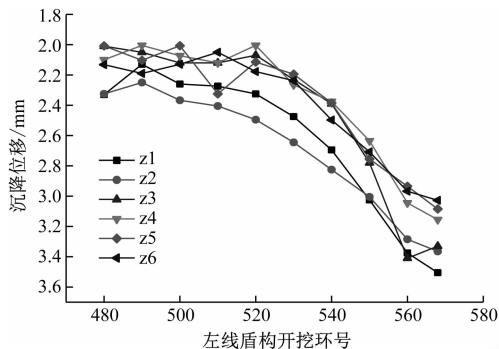


图12 左线盾构开挖时桥墩测点竖向位移实测值

5 结语

本文结合北京地铁 8 号线盾构侧穿桥梁的工程实例,通过数值分析软件对盾构施工过程进行动态模拟,参考现场监测数据和盾构掘进参数讨论了左线盾构加强注浆措施的影响,得到以下结论:

1) 盾构施工引起开挖影响范围内地层沉降变形,进而引发桥梁结构的沉降变形。桥梁结构距离盾构越近的点沉降变形越大,如果不采取适当的施工措施,容易引发安全事故。

2) 通过对盾构周围土体局部加强注浆,能够有效减小施工对地层和桥梁结构竖向变形的影响,减小幅度在 60% 左右。

3) 采取合理的盾构掘进参数管理,能够使盾构机土仓进土和排土达到一个动态平衡,可有效减小桥梁结构的变形过大。

4) 数值模拟和施工监测规律相似,证明了本文所提方案的合理性,并可指导工程施工服务。

参考文献

- [1] 沈建文,刘力. 盾构隧道施工对临近桥桩影响数值及现场监测研究[J]. 岩土力学,2015(增刊2):709.

(下转第 36 页)

5.2.4 轨道板的精调及固定

全站仪设站定向,轨道板调节器的安装及精调,测量位移百分表的安装,封边模板与扣压支架(反力架)的安装,防上浮支架(反力架)的设计及计算。

5.2.5 自密实混凝土灌注

自密实混凝土灌注准备及检查,自密实混凝土拌制及运输,自密实混凝土灌注工装设备的拆除及自密实混凝土养护。随着预制轨道板的应用推广,推动了配套施工装备的逐步更新,出现了轮胎式铺板机等新型设备。

6 结语

本文系统、全面地介绍了上海轨道交通预制轨道板的总体设计方案、主要计算指标、室内试验、轨道板制造工艺及施工工艺,得出以下结论:①在地铁 A 型车辆荷载作用下,预制轨道板系统的钢轨位移、轨道板位移和应力各项指标均在合理范围内。②预制轨道板双凹槽+橡胶垫层结构满足混凝土受力及结构构造要求,轨道板裂缝检算合格。③预制轨道板双轴静载试验、单轴静载试验、螺栓抗拔力试验及疲劳试验结论显示,轨道板位移和应力各项指标均在合理范围内。④预制轨道板的制造工艺、施工工艺成熟可靠。⑤预制轨道板的应用将显

著提高轨道施工质量,改善施工条件,给城市轨道交通带来巨大的促进作用。通过铺设高精度轨道,可减小轨道的养护维修工作量和延长轨道的使用寿命,具有较为明显的社会效益和经济效益。

参考文献

- [1] 李中华. CRTS I 型与 CRTS II 型板式无砟轨道结构特点分析[J]. 华东交通大学学报, 2010(1): 22.
- [2] 王成晓. CRTS III 型板式无砟轨道力学特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [3] 李俊玺. 上海市轨道交通 12 号线轨道新技术的设计与应用[J]. 铁道标准设计, 2017(4): 5.
- [4] 尤瑞林, 范佳, 王继军, 等. 高速铁路无砟道岔用道岔板设计研究[J]. 铁道建筑, 2011(7): 131.
- [5] 国家铁路局. 铁路轨道设计规范: TB 10082—2005[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [7] 孙立. 客运专线桥上双块式无砟轨道抗剪凸台设计计算研究[J]. 铁道建筑技术, 2009(8): 1.
- [8] 李保友, 姜恒昌, 张光明, 等. CRTS III 型普通钢筋混凝土轨道板预制浇筑水化热分析[J]. 高速铁路技术, 2019(6): 35.
- [9] 曹德志. 板式轨道在地铁中的应用研究[J]. 都市快轨交通, 2018(1): 109.
- [10] 尹金铭. 城市轨道交通工程预制板式道床施工技术[J]. 上海建设科技, 2016(4): 27.

(收稿日期: 2020-10-01)

(上接第 30 页)

- [2] LI B, JI F. Analysis of the influence of shield construction on the surrounding ground surface settlement [C] // International Conference on Engineering Management. Advances in Economics, Business and Management Research. 2016: 80.
- [3] 郑熹光, 何平, 张安琪, 等. 地铁施工对邻近桥梁桩基础内力影响分析[J]. 现代隧道技术, 2015(3): 110.
- [4] 张恒, 陈寿根, 邓稀肥. 盾构法施工对地表及桥梁桩基的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011(3): 552.
- [5] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846.
- [6] 彭坤, 陶连金, 高玉春, 等. 盾构隧道下穿桥梁引起桩基变位的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012(3): 485.
- [7] 马文辉, 彭华, 杨成永. 盾构近距下穿既有地铁盾构隧道施工参数控制[J]. 西南交通大学学报, 2018(1): 119.

- [8] 李军, 雷明锋, 林大涌. 城市地铁盾构隧道下穿运营铁路施工控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2018(2): 174.
- [9] 王乐明. 高铁大直径盾构隧道下穿快轨路基结构的影响分析及控制技术研究[J]. 铁道标准设计, 2018(9): 109.
- [10] 周松, 荣建, 陈立生, 等. 大直径泥水盾构下穿机场的施工控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(4): 806.
- [11] 徐泽民, 韩庆华, 郑刚, 等. 地铁隧道下穿历史风貌建筑影响的实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2013(2): 364.
- [12] 王闯, 彭祖昭, 荷超, 等. 盾构近接下穿群桩基础施工影响分区研究[J]. 土木工程学报, 2017(增刊2): 174.
- [13] 徐前卫, 朱合华, 马险峰, 等. 地铁盾构隧道穿越桥梁下方群桩基础的托换与除桩技术研究[J]. 岩土工程学报, 2012(7): 1217.
- [14] 谢耀耀, 王强, 刘欢, 等. 富水圆砾地层盾构下穿火车站股道沉降控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(A02): 3960.

(收稿日期: 2019-05-31)