

文章编号: 1674—8247(2019)01—0091—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.01.019

北京地铁新机场线下穿京沪高速铁路特大桥 施工安全控制研究

武俊杰

(中铁二十三局集团第六工程有限公司, 重庆 400012)

摘要:本文依托北京地铁新机场线下穿京沪铁路特大桥工程,建立计算模型,分析了施工过程对既有铁路桥梁结构的影响及隧道结构自身的安全性、稳定性。研究表明:(1)采取防护措施后,隧道施工引起桥梁墩柱的竖向位移、差异沉降、水平位移最大值等变形值均在相关规范允许范围内;(2)通过采取管幕及中隔壁等有效防护措施,隧道初支结构的轴力、弯矩极值有所减小,提高了安全系数,能达到当地安全控制标准。研究成果可为地铁下穿既有运营铁路桥梁的隧道施工及防护方案提供一定的参考借鉴。

关键词:隧道; 高速铁路; 特大桥; 下穿施工; 近接桩基; 防护措施

中图分类号 U445.4 **文献标志码:** A

Study on Construction Safety Control of Beijing Metro's New Airport Line Underneath Passing Beijing-Shanghai High-speed Railway Grand Bridge

WU Junjie

(6th Engineering Co., Ltd., China Railway 23rd Bureau Group, Chongqing 400012, China)

Abstract: This paper takes Beijing Metro new airport line underneath passing Beijing-Shanghai railway bridge as an example, calculation model is built, the influence of construction on existing railway bridge structures and the safety and stability of tunnel structures are analyzed. The results show that the vertical displacement, differential settlement and maximum horizontal displacement caused by tunnel construction are all within the allowable range of relevant codes. By taking effective protective measures such as pipe curtain and median lamella, the extremum of axial force and bending moment of the initial support structure of the tunnel has been reduced, the safety factor has been improved, and the local safety control standard can be reached. The research results provide some references for the tunnel construction and protection schemes of Metro underneath passing the existing operating railway bridges.

Key words: tunnel; high-speed railway; grand bridge; underneath passing construction; close-spaced pile foundation; safeguard measure

随着我国城市建设的迅猛发展,城市轨道交通在给人们的出行带来便利的同时,其线路施工空间也面临极大挑战。在保证既有结构正常运营的同时,施工中如何有效采取防护措施成为近接隧道研究的关键。

近年来的主要研究有:对下穿车站工程的施工方案优选与安全性评估^[1-3],对近接桩基、墩柱等的影响分区研究^[4-6],下穿近接工程对既有结构的变形控制技术、现场监测沉降规律、力学影响规律研究^[7-8]等。

收稿日期:2018-11-02

作者简介:武俊杰(1981-),男,工程师。

基金项目:国家自然科学基金(51478277)

引文格式:武俊杰. 北京地铁新机场线下穿京沪高速铁路特大桥施工安全控制研究[J]. 高速铁路技术,2019,10(1):91-96.

WU Junjie. Study on Construction Safety Control of Beijing Metro's New Airport Line Underneath Passing Beijing-Shanghai High-speed Railway Grand Bridge [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(1): 91-96.

但对隧道暗挖下穿运营高速铁路大桥的施工安全研究较少,因此本文依托北京地铁新机场线下穿京沪铁路特大桥工程,对桥梁墩柱位移控制技术与隧道结构安全进行研究,以确保新建隧道地铁施工时既有铁路桥梁的安全运营及隧道施工的有序进行。

1 工程概况

1.1 工程地质

根据详勘资料,揭露地层最大深度为 55.0 m。根据收集资料、钻探资料及室内土工试验结果,按地层沉积年代、成因类型,将本区段工程场地勘探范围内的土层划分为人工堆积层、新近沉积层、第四纪全新世冲洪积层、第四纪晚更新世冲洪积层和新近纪沉积层 4 大类。

1.2 线路概况

北京新机场折返线区间左右线分别于 ZK 43 + 705 ~ ZK 43 + 736、YK 43 + 716 ~ YK 43 + 749 段下穿北京特大桥,既有京沪高铁里程为 K 3 + 924. 87 ~ K 3 + 990. 50,对应京沪高铁北京特大桥 12 号墩 ~ 14 号墩。新机场折返线与既有京沪高铁上下行交叉,左线中心线与京沪高铁上下行交叉里程为 K 3 + 974. 15,右线中心线与京沪高铁上下行交叉里程为 K 3 + 941. 09。其平面位置关系如图 1 所示。

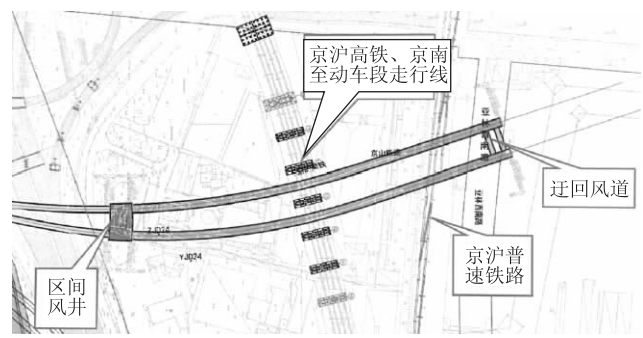


图 1 工程平面位置关系示意图

1.3 墩柱与隧道位置关系

京沪高速铁路为国家一级铁路,设计速度 350 km/h,采用无砟轨道,双线辅轨,地铁隧道下穿位置为柳村线路所站内道岔区,现状为 3 股道线(京沪铁路上下行、1 条安全线),路基南侧填方高约 1.5 m,北侧基本与地面齐平。京沪高速铁路北京特大桥与地铁隧道交叉部位对应特大桥 12 号 ~ 14 号墩柱结构,其中新建隧道与邻近墩柱位置关系示意图如图 2 所示。

1.4 隧道设计概况

北京新机场折返线一期工程下穿北京特大桥区间左右线均为马蹄形单洞单线暗挖断面,采用 CRD 法 + 深孔注浆开挖,开挖断面总宽 8.9 m,总高 9.09 m,下

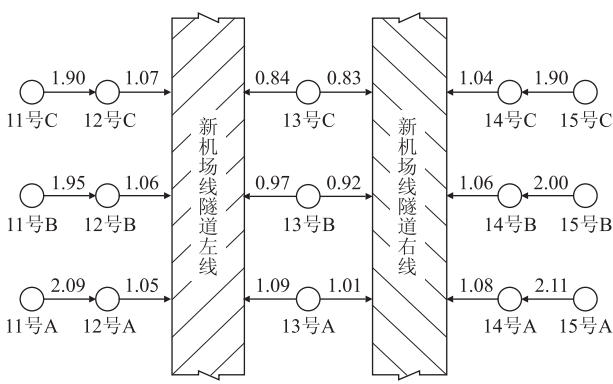


图 2 新建隧道与墩柱关系图

穿铁路位置覆土约 11 m。左右线隧道分别从相邻两跨桥梁下穿过,隧道与基础桩平面最小距离为 8.41 m,隧道底位于桩底以上约 7.8 m。隧道在穿越铁路桥梁施工前采用深孔注浆加固地层,减小开挖对桩基周边土体的扰动,施工时遇粉细砂层,对掌子面进行注浆加固,隧道采用 CRD 法施工,初衬厚度 30 cm、二衬厚度 45 cm。

1.5 下穿施工防护措施

地铁隧道左右线具体防护措施如表 1 所示,防护措施横断面如图 3 所示。

表 1 隧道防护措施表

| 线别 | 左线 | | | 右线 | | |
|------------|--|------|------|---------------------------|------|------|
| 桩间净距 /m | A | B | C | A | B | C |
| | 1.91 | 2.03 | 2.14 | 1.87 | 1.98 | 2.09 |
| 管幕防护 | 工程管幕施工拟采用螺旋导向欠土顶进工艺,钢管间设置锁扣加强钢管间连接,管幕施工过程利用管幕外侧注浆管进行补偿注浆,管幕打设完毕,管内采用水泥砂浆进行填充 | | | | | |
| | 顶部管幕防护,共 41 根,单根长 44.7 mm | | | 顶部管幕防护,共 41 根,单根长 45.0 mm | | |
| 中隔壁防护 | (1)防护设计采用排桩隔离的形式,减小隧道施工对京沪高铁桥墩桩基的影响,防护桩采用钢筋混凝土灌注桩,桩径 1.25 m,间距 1.5 m,桩顶设置 1.0 m 厚冠梁 (2)为减小变形及工后沉降对高铁桥墩的影响,排桩顶部设置 $\phi 609$ mm 钢管横撑,横撑间距 3.0 m,整个防护范围共设置 22 道 | | | | | |

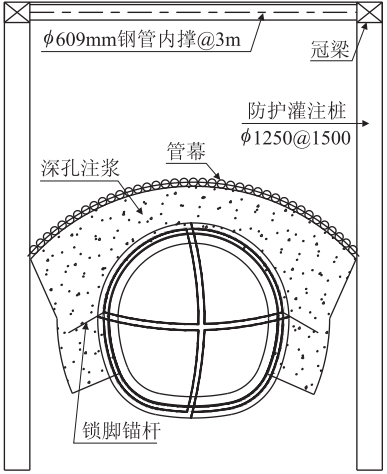


图 3 横断面加固示意图

2 研究情况

2.1 变形控制标准

铁路的安全评估一般从结构及附属设施变形、结构强度及稳定性等方面来考虑,且一般采用变形作为主要控制指标。根据铁路现状及周边设施,参考国内类似工程经验并结合理论计算分析,制定本工程变形控制指标及标准。

根据 TB 10621-2014《高速铁路设计规范》规定,墩台顶竖向位移限值 2 mm,单墩最大沉降不超过 20 mm 限值,桥梁结构相邻墩差异沉降不超过 5mm;根据 TB 10182-2017《公路与市政工程下穿高速铁路技术规程》规定,墩台顶纵向水平位移限值为2 mm,横向水平位移限值为 2 mm^[9-10]。

2.2 计算模型

模型以沿铁路桥方向为 X 轴;垂直铁路桥方向为 Y 轴;竖直方向为 Z 轴。为消除计算边界效应的影响,考虑施工过程中的空间效应,计算模型取其有效影响范围,即模型沿 X 方向取 200 m,沿 Y 方向取 90 m,土

层总深度 50 m。
模型建模思路为首先建立各土层、既有京沪高铁桥墩、承台、桩基,将上部结构荷载加在墩顶,以此作为初始阶段;然后建立防护桩、横撑、隧道、二次注浆土体等,并根据施工阶段激活或钝化相应单元及荷载,计算防护桩施工、隧道暗挖施工(采用 CRD 法)、二次注浆加固施工、隧道运营对既有铁路桥梁基础的影响。计算模型如图 4 所示。

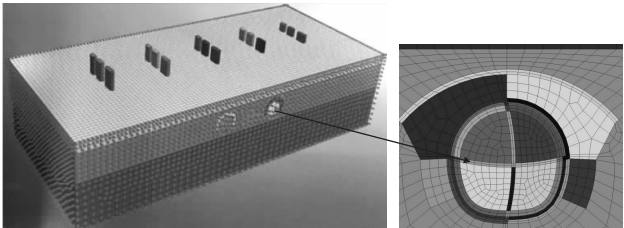


图4 计算模型

2.3 施工步骤

以实际施工顺序为准,计算模型模拟施工步骤如图 5 所示。

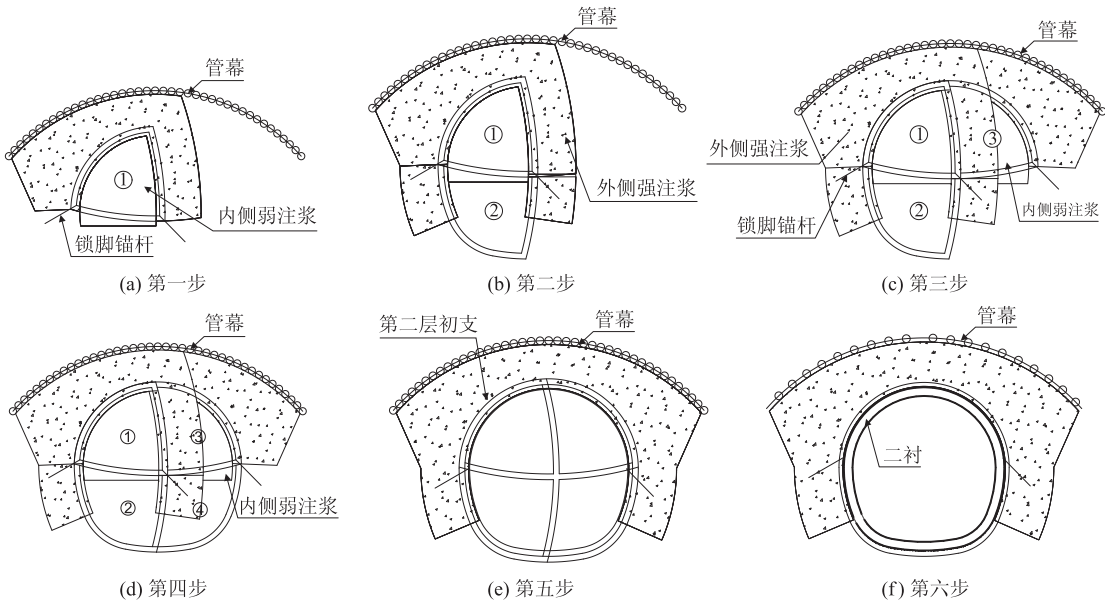


图5 施工步骤图

- (1) 第一步:施作左侧拱部深孔注浆加固地层。开挖拱顶上部洞室①,并施作初期支护。封闭成环及时进行初支背后注浆。
- (2) 第二步:施作洞室②左侧深孔注浆,上下台阶法开挖左侧下部洞室②,并施作初期支护。掌子面前后错开一定距离。
- (3) 第三步:施作右侧拱部深孔注浆加固地层。

- 上下台阶法开挖洞室③,并施作初期支护。
- (4) 第四步:施做洞室④右侧深孔注浆,上下台阶法开挖右侧下部洞室④,并施作初期支护。掌子面前后错开一定距离。
- (5) 第五步:凿除第一层格栅中隔壁间混凝土,穿过第二层初支格栅,铺设钢筋网,施工第二层初支。
- (6) 第六步:第二层初支达到强度,地表沉降监测

结果趋于稳定后分段拆除中隔板、中隔壁,敷设防水层,浇注二衬,完成隧道二衬结构。

2.4 计算参数

本文主要物理力学参数如表 2 所示。

表 2 计算参数

| 项目 | h /m | E /GPa | 泊松比 | C /kPa | φ /($^{\circ}$) | γ /(kN/m ³) |
|----------|-----------|-------------|------|-------------|------------------------------|-----------------------------------|
| ①素填土、杂填土 | 1.35 | 0.005 | 0.35 | 5 | 10 | 18 |
| ②粉土 | 0.9 | 0.023 | 0.26 | 27.9 | 23.9 | 18.9 |
| ②3 粉细砂 | 3.2 | 0.03 | 0.2 | 0 | 26 | 20 |
| ②5 卵石-圆砾 | 1.3 | 0.06 | 0.25 | 0 | 45 | 22 |
| ②3 粉细砂 | 5.0 | 0.03 | 0.2 | 0 | 26 | 20 |
| ⑤卵石 | 10.0 | 0.06 | 0.2 | 0 | 45 | 22 |
| ⑨卵石 3 | 27.75 | 0.09 | 0.2 | 0 | 45 | 22 |
| 注浆加固土 | 实际 | 0.09 | 0.2 | 60 | 35 | 22 |
| 初衬 C20 | 0.3 | 25.5 | 0.2 | - | - | 25 |
| 二衬 C40 | 0.45 | 32.5 | 0.2 | - | - | 25 |
| 管幕 | 0.42 | 30.0 | - | - | - | 25 |
| 防护灌注桩 | 1.0 | 30.0 | 0.2 | - | - | 25 |

注: h 、 E 、 c 、 φ 和 γ 分别代表材料厚度、弹性模量、粘聚力、内摩擦角和重度;调压站基础之间用接触面来模拟

3 研究结果分析

3.1 墩柱位移分析

(1) 竖向沉降

根据计算模型提取的各阶段铁路桥梁基础沉降数据,将每个基础对应的独立墩柱 A、B、C 号桥墩的沉降值与相应差异沉降极值汇于表 3。

表 3 墩台最大竖向变形值及差异沉降值(mm)

| 墩编号 | A | B | C | 纵向差异沉降极值 |
|----------|---------|---------|---------|----------|
| 11 号 | -9.665 | -9.663 | -9.659 | 0.004 |
| 12 号 | -9.947 | -9.979 | -9.985 | 0.032 |
| 13 号 | -10.705 | -10.763 | -10.750 | 0.058 |
| 14 号 | -10.849 | -10.882 | -10.878 | 0.033 |
| 15 号 | -9.663 | -9.664 | -9.658 | 0.006 |
| 横向差异沉降极值 | 1.186 | 1.218 | 1.220 | - |

由表 3 可知,在施工过程中 11 号墩的沉降极值出现在 A 墩上,为 9.665 mm;12 号墩的沉降极值出现在 C 号墩上,为 9.985 mm;13 号~15 号墩的沉降极值均出现在 B 墩上,分别为 10.763 mm、10.882 mm、9.664 mm。由此可见,随桥墩与新建隧道距离的减小,桥墩的沉降值逐渐增大,桥墩沉降最大值为 10.882 mm,满足规范要求的单墩最大沉降不超过 20 mm 限值。横向水平差异沉降出现在 14 号 C 号墩与 15 号 C 号墩之间,最大差异沉降值为 1.220 mm,纵向水平差异沉降出现在 13 号 A 号墩与 13 号 B 号墩

之间,最大差异沉降值为 0.058 mm,均满足规范要求的桥梁结构相邻墩差异沉降不超过5 mm 限值。

(2) 水平位移

根据计算模型提取各阶段桥墩纵向水平变形数据,将每个基础对应的独立墩柱 A、B、C 号桥墩的纵向水平位移值如表 4 所示,横向水平位移值如表 5 所示。

表 4 墩台最大纵向水平位移值(mm)

| 墩编号 | A | B | C |
|------|--------|--------|--------|
| 11 号 | -0.303 | 0.300 | -0.299 |
| 12 号 | -1.544 | 1.338 | -1.398 |
| 13 号 | -0.081 | -0.044 | 0.014 |
| 14 号 | 1.391 | -1.464 | 1.292 |
| 15 号 | 0.303 | -0.300 | 0.295 |

注:纵向水平变形正值为变形指向隧道小里程,负值为变形指向隧道大里程

表 5 墩台最大横向水平位移值(mm)

| 墩编号 | A | B | C |
|------|--------|--------|--------|
| 11 号 | -0.074 | -0.073 | -0.065 |
| 12 号 | -0.616 | -0.479 | -0.463 |
| 13 号 | -1.014 | -0.912 | -0.771 |
| 14 号 | -0.532 | -0.554 | -0.410 |
| 15 号 | -0.074 | -0.069 | -0.071 |

注:纵向水平变形正值为变形指向桥梁小里程,负值为变形指向桥梁大里程

由表 3 与表 5 可知,14 号墩的纵向水平极值出现在 B 墩上,为 1.464 mm,其余均出现在 A 号墩上,分别为 -0.303 mm、-1.544 mm、-0.081 mm、0.303 mm,可见桥墩纵向水平位移随距新建隧道的距离的减小而增大,桥墩纵向水平位移极值为 -1.544 mm。14 号墩的横向水平极值出现在 B 墩上,为 -0.554 mm,其余均出现在 A 号墩上,分别为 -0.074 mm、-0.616 mm、-1.014 mm、0.074 mm,可见桥墩横向水平位移随距新建隧道的距离的减小而明显增大,桥墩纵向水平位移极值为 -1.014 mm。

3.2 隧道结构内力分析

(1) 轴力与弯矩

根据计算模型针对施工期间产生的附加力,计算新建机场线暗挖隧道第一层初支结构防护前后的轴力、弯矩,相应监测断面内力图如图 6、图 7 所示。

由图 6、图 7 可知,随着开挖的进行,先开挖步的初支结构内力普遍大于后开挖步的内力,且采取防护措施后隧道初支结构轴力与弯矩均明显下降,轴力极值均出现在仰拱处,分别为防护前 -190.42 kN、防护后 -165.46 kN;未采取防护措施时初支结构弯矩对值极值出现在拱顶位置,为 11.92 kN·m,防护后初支结

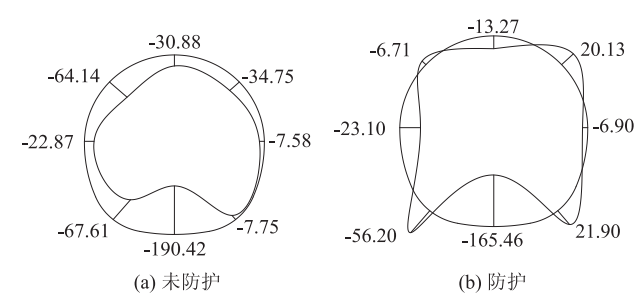


图 6 断面轴力图(kN)

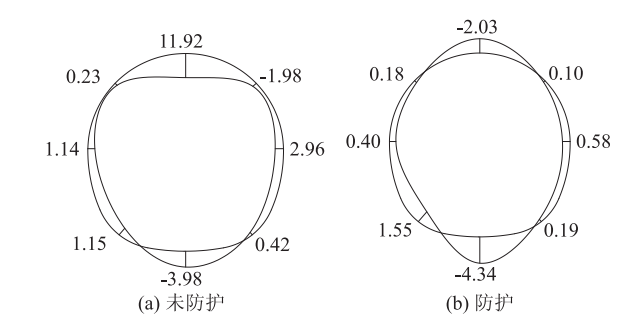


图 7 断面弯矩图(kN·m)

构弯矩绝对值极值出现在仰拱位置,为 4.34 kN·m。

(2)安全系数

根据初支结构内力数据,处理计算所得结构相应最小安全系数,如图 8 所示。提取各监测点最小安全系数如表 6 所示。

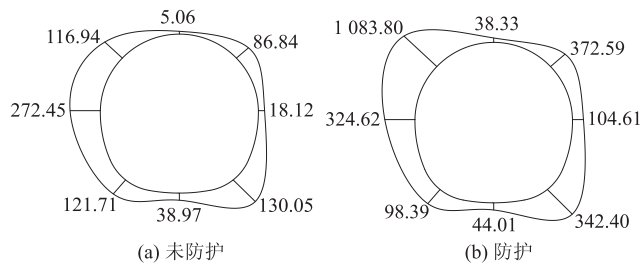


图 8 断面安全系数图

表 6 最小安全系数表

| 位置 | 未防护 | 防护 | 增大百分比/% |
|-----|--------|----------|---------|
| 拱顶 | 5.06 | 38.33 | 657.51 |
| 右拱肩 | 86.84 | 372.59 | 329.4 |
| 右边墙 | 18.12 | 104.61 | 477.32 |
| 右拱脚 | 130.05 | 342.40 | 163.28 |
| 仰拱 | 38.97 | 44.01 | 12.93 |
| 左拱脚 | 121.71 | 98.39 | -19.16 |
| 左边墙 | 272.45 | 324.62 | 19.15 |
| 左拱肩 | 116.94 | 1 083.80 | 826.8 |

由图 8 与表 6 可知,采取防护措施后安全系数明

显提高,断面安全系数最小值均出现在拱顶位置,分别为防护前 5.06,防护后 38.33。左拱肩位置安全系数提高效果最为显著,相对未防护提高了 826.8%。采取防护措施后使得施工满足当地安全控制标准。

4 结论

采取防护措施不仅有效控制了既有特大桥墩柱的变形,且显著提高了隧道结构的安全稳定性:

(1)桥墩柱的位移值随其与新建隧道距离的减小而增大,13 号 B 号墩的沉降值最大,为 70.882 mm;最大差异沉降出现在 14 号 C 号墩与 15 号 C 号墩之间,为 1.220 mm;12 号 A 号墩的纵向水平位移值最大,为 -1.544 mm;13 号 A 号墩的横向水平位移值最大,为 -1.014 mm,变形值均在规范允许范围内。

(2)隧道结构仰拱处轴力最大,为 -190.42 kN·m,采取防护措施后,最大轴力减小为 165.46 kN;采取防护措施后,弯矩绝对值极值由 11.92 kN·m 减小为 4.34 kN·m;最小安全系数由防护前的 5.06 增大到防护后的 38.33,左拱肩处提高最为显著,相对未防护提高了 826.8%。

(3)由位移及内力可知,通过采取管幕防护和中隔壁防护措施,才使得施工满足当地安全控制标准。

参考文献:

[1] 郭宏博, 李少友. 新建地铁车站大断面密贴暗挖下穿既有地铁车站施工方案[J]. 施工技术, 2018, 47(S1): 576-580.
GUO Hongbo, LI Shaoyou. Construction Scheme of New Transfer Metro Station Large Section[J]. Construction Technology, 2018, 47(S1): 576-580.

[2] 李吉林. 地铁盾构下穿高速铁路桥梁结构安全性评估研究[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(1): 61-65.
LI Jilin. Study on Safety Assessment of Subway Shield Tunneling High-speed Railway Bridge Structure[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(1): 61-65.

[3] 李克钢, 马琳, 曹勇, 等. 在建车站下穿既有车站开挖过程仿真及监测对比分析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(4): 1339-1344.
LI Kegang, MA Lin, CAO Yong, et al. Comparative Simulation and Measurement of the Excavation Process of the Subway Construction beneath the Currently Existing Subway Stations[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(4): 1339-1344.

[4] 崔光耀, 王明年, 路军富, 等. 客运专线机场路隧道下穿高架桥近接桩基施工位移控制技术[J]. 中国铁道科学, 2011, 19(3): 68-73.
CUI Guangyao, WANG Mingnian, LU Junfu, et al. Adjacent Pile Foundation Construction Displacement Control Technology of

- Passenger Dedicated Line Jichang Road Tunnel Crossing under Viaducts [J]. China Railway Science, 2011, 19(3): 68-73.
- [5] 胡锡鹏, 刘拴铤, 马思伟, 等. 隧道施工对临近桩基影响的数值分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(8): 125-128.
- HU Xipeng, LIU Shuanding, MA Siwei, et al. Numerical Analysis of Tunnel Construction Influence on the Adjacent Pile Foundation [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(8): 125-128.
- [6] 王明年, 张晓军, 苟明中, 等. 盾构隧道掘进全过程三维模拟方法及重叠段近接分区研究[J]. 岩土力学, 2012, 34(1): 273-279.
- WANG Mingnian, ZHANG Xiaojun, GOU Mingzhong, et al. Method of Three-dimensional Simulation for Shield Tunneling Process and Study of Adjacent Partition of Overlapped Segment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 34(1): 273-279.
- [7] 李明. 暗挖地铁隧道下穿既有桥梁的大承台托换技术研究[J]. 铁道建筑, 2015, 55(5): 83-85.
- LI Ming. Underpinning Technology of Underpinning Subway Tunnel Underneath Existing Bridges [J]. Railway Engineering, 2015, 55(5): 83-85.
- [8] 李旺旺, 韦宏鹄. 北京昌平线二期地铁盾构侧穿桥梁沉降监测分析[J]. 隧道建设, 2015, 35(2): 139-143.
- LI Wangwang, WEI Honghu. Analysis on Settlement of Bridge Caused by Side Crossing of Shield: Case Study on Shield Tunneling of Phase 2 of Changping Line of Beijing Metro [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(2): 139-143.
- [9] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
- TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].
- [10] TB 10182-2017 公路与市政工程下穿高速铁路技术规程[S].
- TB 10182-2017 Technical Specification for Highway and Municipal Engineering under Crossing High Speed Railway[S].
- (编辑: 苏玲梅)

.....

(上接第82页)

- [3] 欧阳杰. 空铁联运: 首都第二机场交通布局发展思路[J]. 综合运输, 2009, 24(5): 21-25.
- OU Yangjie. Air-railway Intermodal Transport: Thoughts on the Development of Traffic Layout of the Second Capital Airport [J]. China Transportation Review, 2009, 24(5): 21-25.
- [4] 郭伟, 郭建祥. 上海虹桥综合交通枢纽总体规划[J]. 上海建设科技, 2009, 30(3): 1-6.
- GUO Wei, GUO Jianxiang. General Plan and Design of Shanghai Hongqiao Integrated Transport Hub [J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2009, 30(3): 1-6.
- [5] 中铁二院工程集团有限责任公司. 新建海南西环铁路工程初步设计总说明[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2013.
- China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. General Specifications of Preliminary Design of New Hainan West Ring Railway[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2013.
- [6] 林伟. 环岛高速铁路与城市建设的思考[J]. 城市建设理论研究, 2012, 2(10): 1-6.
- LIN Wei. Thoughts on High-speed Railway around the Island and Urban Construction [J]. Urban Construction Theory Research, 2012, 2(10): 1-6.
- [7] 杨利. 海南西环铁路三亚凤凰机场站线方案研究[J]. 高速铁路技术, 2013, 5(1): 78-82.
- YANG Li. Study on Route Selection for Sanya Fenghuang Airport Station of Hainan West Ring Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2013, 5(1): 78-82.
- [8] 朱颖. 铁路选线理念的创新与实践[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(6): 1-5.
- ZHU Ying. Innovation and Practice on Railway Location Concept [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(6): 1-5.
- [9] 薛宪政. 松花江公铁两用桥主桥方案设计[J]. 铁道勘察, 2013, 39(6): 79-82.
- XUE Xianzheng. Project Design of Main Bridge in Songhuajiang Combined Highway and Railway Bridge [J]. Railway Investigation and Surveying, 2013, 39(6): 79-82.
- (编辑: 车晓娟 张红英)