

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2021.12.013

城市轨道交通上跨铁路特大桥方案研究

吴 亮,王论文,赵胤儒
(长江勘测规划设计研究有限责任公司,湖北 武汉 430010)

摘 要: 武汉轨道交通 7 号线北延线工程上跨铁路桥需跨越多股铁路,受天河机场限高等因素影响,主桥设计为 (86+2×156+86)m 预应力连续梁桥。设计中通过增加梁高、调整预应力钢束布置减少梁体残余徐变变形,采用二次张拉竖向钢绞线预应力体系改善主梁腹板抗裂性能。为减小施工对既有铁路的干扰,采用转体施工方案,转体吨位达 15 000 t。邻近铁路的基坑采用隔离桩支护,基坑开挖和桥梁施工各阶段既有铁路路基附加沉降均满足规范要求。

关键词: 轨道交通;转体施工;附加沉降;残余变形;跨线桥;隔离桩

中图分类号: U442.5 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2021)12-0041-04

0 引 言

随着国家经济的发展和新型城镇化的快速推进,我国交通基础设施建设发展迅猛,新建线路与既有铁路立体交叉的情况越来越多。如何减少新线建设对既有铁路影响成为桥梁方案考虑的重点,也是设计方案能否获得铁路部门批准的关键。跨越既有铁路的桥梁方案主要分为两类,一是在交叉点附近布置桥墩以较小跨度跨越,梁部施工前在铁路影响范围内搭设防护棚架;二是采用大跨度桥梁跨越,采用顶推或转体施工工艺。随着铁路运营单位对既有线运营安全要求日益提高,目前主要采用大跨度桥梁转体方案。

公路和城市道路上跨既有铁路已有较多的工程案例和研究^[1-4],但城市轨道桥特别是大跨度桥上跨既有铁路的研究较少。本文以武汉轨道交通 7 号线北延线跨线桥为背景,研究跨越多股繁忙铁路干线的桥梁方案,供类似工程参考。

1 工程概况

武汉轨道交通 7 号线北延线(前川线)工程起于黄陂前川,止于 7 号线一期工程园博园北站。线路全长 36.2 km,设站 11 座(含预留站 1 座)。前川线在武汉北编组站七场以北 1 km 处上跨既有铁路区域。区域内目前存在既有铁路共 5 股道,分别是京广下

行货车线、麻武下行联络线、麻武上行联络线、京广上行货车线和武汉北上行环线。后续武汉北编组扩能改造规划在该区域增设 3 股道。此处铁路路基均为路堑形式,前川线在该段采用桥梁上跨既有铁路,桥位区铁路线路见图 1。主桥采用 (86+2×156+86)m 连续梁桥,其跨度为国内城市轨道交通同类型桥梁之最。采用转体施工方案,转体吨位达到 15 000 t,居国内城市轨道交通转体桥梁前列。

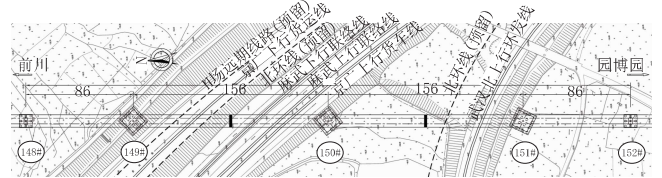


图 1 平面布置图(单位:m)

2 控制性因素与桥型选择

- 影响主桥方案的主要控制性因素如下:
- (1)为了绕避军事用地,前川线线路在前期已进行了充分论证,线路方案已经确定,无法进行调整。目前,前川线与京广上行货运线斜交角 42.1°。
 - (2)桥位区存在两处铁路区域。第一处区域既有铁路 4 股,规划铁路 2 股。该处铁路路堑边坡坡顶沿桥轴线方向距离 172 m,坡脚间距 123 m。第二处区域既有铁路 1 股,规划铁路 1 股。该处铁路路堑边坡坡顶沿桥轴线方向距离 56 m。两处铁路区域间坡顶平台沿桥轴线方向宽 92 m。
 - (3)桥位区地面高程约 50 m,铁路轨面高程为 40.79~48.30 m。由于本桥大桩号侧跨高速公路相关要求,本桥位处设计轨顶高程在 71.0~73.5 m。

收稿日期: 2021-03-08
作者简介: 吴亮(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事桥梁设计研究工作。

(4)天河机场与桥位区域直线距离约 8.7 km。桥梁区域位于航空障碍物限值面内,该处限高 90 m。为了尽量减小对铁路的影响,避免开挖铁路路堑边坡,将桥墩设置在铁路边坡以外,第一处铁路区域桥跨应大于 210 m。在该跨径范围内主要适用的桥型有连续刚构桥、矮塔斜拉桥和拱桥。由于桥墩高度仅 10 m 左右,显然连续刚构桥不合适。如果是矮塔斜拉桥,综合考虑第二处跨越需要,可采用(145+250+145)m 跨径布置,轨道交通桥桥塔高跨比一般为 1/8 ~ 1/10,则最小塔高 25 m,塔顶高程超过天河机场障碍物限制面。拱桥施工较复杂,对铁路运营影响很大,且只能采用中承式或下承式拱桥,拱圈顶部高程也超过 90 m,方案不可行。以上研究表明,将桥墩完全放置在铁路边坡以外无合适的实施方案,可考虑将桥墩设置在边坡上以减小桥梁跨度。

综合考虑桥位区各控制性条件、施工方法、工程投资、施工工期和合龙段位置等因素,经铁路局同意,主桥采用 $(86+2 \times 156+86)$ m 连续梁桥方案。为减小对既有铁路影响,主梁采用悬臂浇筑然后转体施工方法^[5-6]。转体前主梁边缘至邻近铁路中心最小距离 13.3 m,承台边缘至邻近铁路中心最小距离 12.8 m,跨中合龙段至邻近铁路中心最小距离 9.1 m,桥下铁路最小净空高度 19.7 m。因此,桥梁各部位的施工和运营阶段均不会侵入铁路的建筑界限以内,且距离铁路平面和立面上均有足够的安全空间。桥型立面布置见图 2。

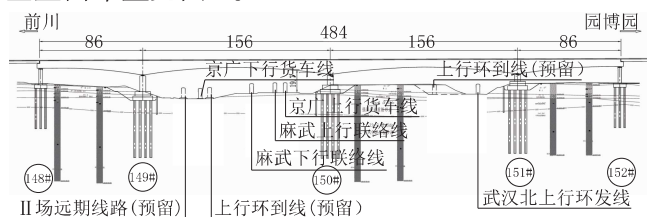


图 2 立面布置图(单位:m)

3 主梁结构设计

3.1 主梁构造

主梁采用变高度单箱单室预应力混凝土箱梁。中支点截面梁高 11.5 m (高跨比 1/13.57), 中跨跨中合龙段、边跨现浇段、边跨合龙段梁高 6.0 m (高跨比 1/26)。梁体下缘除中跨跨中 18 m 梁段、中墩 6 m 梁段、边跨端部 8 m 梁段为等高直线段外, 其余梁底下按 1.8 次抛物线变化。

箱梁顶宽 9.6 m,底宽 6 m,翼缘板端部厚 20 cm,翼缘板根部厚 80 cm。箱梁顶板厚 50 cm,次边跨边支点处局部加厚到 85 cm,中支点处局部加厚到

100 cm;中跨和次边跨腹板厚度为 50 ~ 110 cm,中支点处局部加厚至 135 cm,边跨腹板局部加厚至 70 cm。底板厚由中跨和次边跨直线段的 50 cm 按 1.8 次抛物线变化至 120 cm,中支点再加厚至 200 cm。梁部截面见图 3、图 4。

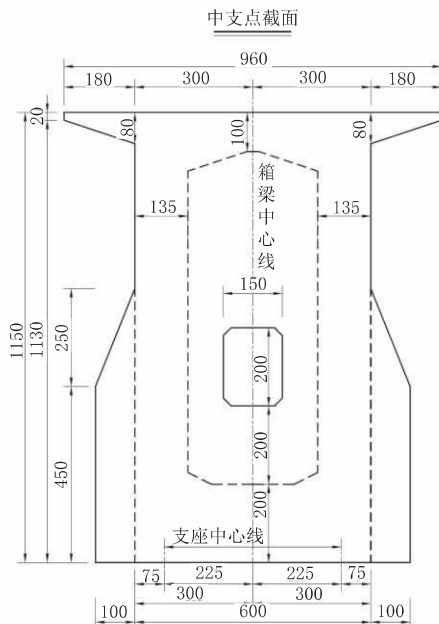


图 3 中支点截面图(单位:cm)

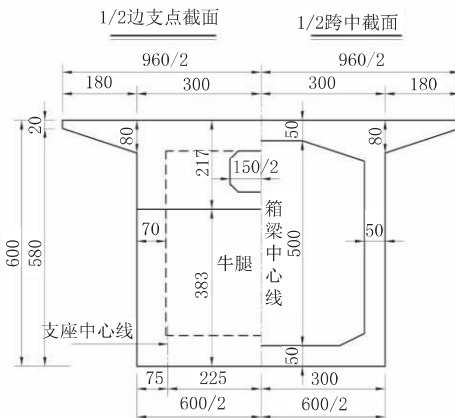


图 4 边支点、跨中截面图(单位:cm)

主梁 0 号块长 12 m,一般悬臂浇筑梁端为 3.0 m、3.5 m、4.0 m,合龙段长 2.0m,边跨现浇段(含牛腿)长 8.1 m。主梁采用 C55 混凝土。

连续梁共设 5 道横隔梁和 6 道横隔板。中支点处横隔梁厚 5.0 m, 边中支点处横隔梁厚 2.0 m。在悬臂浇筑 19# 节段设置 0.5 m 厚的横隔板。横隔梁、横隔板处均设有孔洞供检查人员通过。

纵向预应力采用标准强度为 $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$ 的 17、19- $\phi^*15.2$ 高强度低松弛钢绞线, 钢束均采用两端张拉, 预应力管道采用金属波纹管成孔。竖向预应力采用标准强度为 $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$ 的 3- $\phi^*15.2$ 高强度低松弛钢绞线, 钢束采用一端张拉, 张拉端位于箱

梁顶板处,采用二次张拉工艺。

3.2 主要荷载与计算参数

- (1)主梁采用 C55 混凝土,容重取 26 kN/m³。
- (2)二期恒载考虑线路设备重、接触轨、疏散平台、预制挡板、各种管线及其支承设备、声屏障、防水层、保护层等,本连续梁二期恒载为 101.1 kN/m。
- (3)混凝土收缩和徐变按《铁路桥涵混凝土结构设计规范》(TB 10092—2017)办理。
- (4)活载:A 型车 6 辆编组,预留 8A 条件。
- (5)桥墩不均匀沉降取 2 cm。
- (6)结构整体升降温按 ± 25℃ 计,箱梁顶板非线性升降温按 ± 10℃ 计
- (7)挂篮重按 1 000 kN 考虑。

3.3 主梁主要静力计算结果

采用桥梁博士 V4.2 进行施工阶段和运营阶段主梁静力分析。主梁平行于铁路方向悬臂现浇施工,待最大悬臂状态后转体施工,然后合龙边跨,再合龙中跨。主梁计算结果如下:

(1)运营阶段主梁强度和应力计算结果见表 1。

表 1 运营阶段主梁强度及应力计算结果

项目	主力	主力 + 附加力
强度安全系数	2.25	2.22
抗裂安全系数	1.51	1.36
上缘最大应力 /MPa	11.25	13.50
上缘最小应力 /MPa	4.30	1.94
下缘最大应力 /MPa	11.37	11.59
下缘最小应力 /MPa	2.69	1.59
最大剪应力 /MPa	2.91	2.92
最大主压应力 /MPa	14.89	15.23
最小主拉应力 /MPa	-1.56	-1.72

注:表中应力值以压应力为正,拉应力为负。

(2)梁体竖向挠度计算结果见表 2。

表 2 主梁竖向挠度计算结果

项目	挠度值 /mm	挠度限值 /mm
列车静活载	11.2	86.0
边跨 列车静活载 +0.5 倍温度	12.1	86.0
0.63 倍列车静活载 + 温度	8.9	86.0
列车静活载	-35.2	156.0
中跨 列车静活载 +0.5 倍温度	-38.4	156.0
0.63 倍列车静活载 + 温度	-28.5	156.0

注:表中挠度值以向上为正,向下为负。

(3)在列车静活载作用下,梁端单端转角为 0.41‰,小于 3‰ 规范限值。轨道铺设完成后,梁体中跨跨中 10 a 徐变上拱值为 6.1 mm,小于 20 mm 规范限值。

(4)经检算,由恒载(含预加力)和静活载引起的竖向挠度大于 15 mm,主梁应设置预拱度,其拱度曲线与恒载加 1/2 竖向静活载所产生的挠度曲线基本相同,但方向相反,按余弦曲线设置。本桥预拱度中跨反拱最大值 41.8 mm,边跨反拱值最大值 31.3 mm。

3.4 主梁设计特点

(1)合理设计减少梁体残余徐变变形

主梁截面长期处于偏心受压状态,必然出现徐变上拱或下挠,并随截面上下缘应力差值的增大而增加。设计中加大了跨中截面高度,以提高梁竖向刚度,改善梁下缘应力。同时,跨中设置 18 m 等截面段,在加大跨中梁高的同时,基本不增加工程量。在设计中合理布置顶底板预应力钢束,使梁体在铺轨后截面上下缘应力基本相等,从而使梁体跨中残余徐变变形大大减小^[7-8]。本桥主梁铺轨后中跨跨中截面上缘压应力为 6.95 MPa,截面下缘压应力为 8.15 MPa。

(2)采用二次张拉竖向钢绞线预应力体系改善腹板抗裂性能

箱梁腹板竖向预应力的设置主要是为了增强抗剪能力,抑制腹板开裂。竖向预应力一般均为短束,传统的精轧螺纹钢竖向预应力体系回缩大、预应力损失大,且存在易拉断、施工质量难以控制等问题,有效预应力难以保证。设计中采用二次张拉竖向钢绞线预应力体系,其回缩量小,有效预应力保证率高,大大改善了腹板抗裂性能。

4 转体系统

4.1 转体系统设计

转体系统主要由转动系统、牵引系统和平衡系统构成^[9-10]。转动系统由上转盘、下转盘和转动球铰构成。其中,转动球铰是转体系统的关键。牵引系统提供结构转动的能力,主要由牵引设备、助推千斤顶支座、牵引反力座构成。平衡系统主要由球铰、撑脚、助推千斤顶支座等构成,主要作用是确保转体结构的平稳和安全。转体系统立面图见图 5,转体系统平面图见图 6。

主墩基础均为 16 根 φ1.8 m 钻孔桩基础,阶梯式双层钢筋混凝土承台。上承台(上转盘)厚 2.7 m,下承台厚 3.5 m,上承台、下承台中间设 0.8 m 的平转空间。承台采用 C40 混凝土,转盘采用 C50 混凝土,封铰采用 C50 微膨胀混凝土。

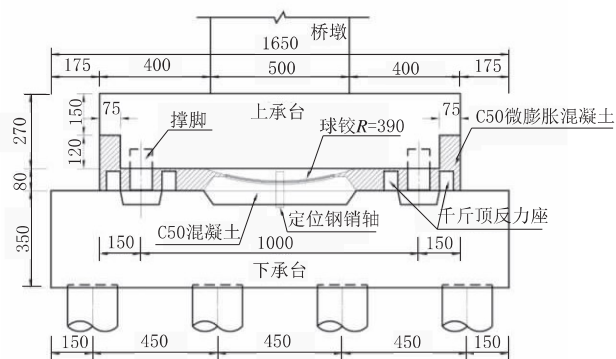


图5 转体系统立面图(单位:cm)

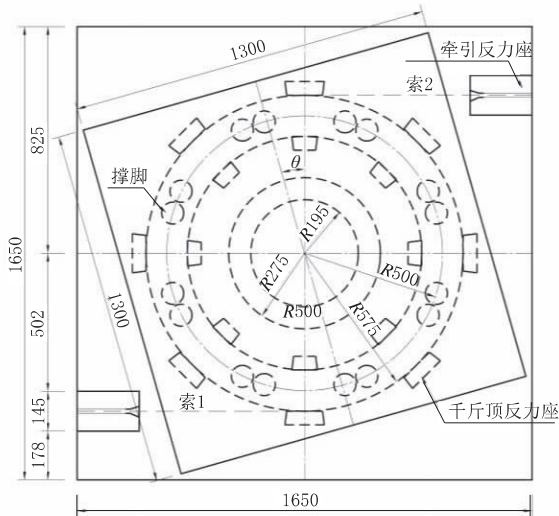


图6 转体系统平面图(单位:cm)

球铰由上球铰、下球铰、球铰间四氟乙烯板、固定上下球铰的钢销、下球铰钢骨架组成。设计竖向承载力 150 000 kN,为中心承重转体,球体半径 8 m,球面投影直径 3.9m。上转盘沿直径 10 m 的圆周上设置 8 对撑脚,每对撑脚为 $\phi 800 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ 的双钢管柱,撑脚内灌注 C50 微膨胀混凝土。在撑脚的下方设有环形滑道,滑道宽度 90 cm,转体前在滑道面铺装 5 mm 厚不锈钢板和 5 mm 厚聚四氟乙烯板,安装撑脚时确保撑脚与下滑道的间隙为 15 mm。

4.2 转体施工

主梁平行于铁路方向挂篮悬臂浇筑,浇筑完成 20# 节段、张拉预应力后形成最大悬臂状态。砂箱在转体前拆除,使上部荷载集中于球铰之上,形成转动体系。为了保证转体过程中体系平稳转动,要求预先调整体系的质量分布,使其质量处于平衡状态。为此,将对转体梁横向不平衡力矩测试、转体梁纵向不平衡力矩测试、摩阻系数测试、转体姿态分析、转体梁平衡配重。到达设计位置、精确测量并临时限位后,锁定转体球铰,浇筑封铰混凝土、封固转盘。

149#、150# 及 151# 墩处 T 构转体角度分别为

顺时针旋转 43.9° 、 41.0° 及 66.6° 。转体角速度取 0.01 rad/min ,悬臂端最大线速度不超过 1.5 m/min ,单个 T 构转体用时约 120 min。

5 减小对既有铁路影响措施

(1)桥墩承台基坑采用隔离桩和放坡锚喷支护方式^[11]。基坑邻近铁路一侧采用隔离桩进行支护,隔离桩采用 $\phi 1\ 000 \text{ mm} @ 1\ 200 \text{ mm}$ 钻孔灌注桩,桩底嵌入中风化泥质粉砂岩中 1.0 m 以上。基坑其余部位采用放坡锚喷支护,其中 149# 桥墩承台基坑深 10.9 m,根据地质情况按不同坡比分两级开挖,两级边坡间设置 2.0 m 宽马道平台。150#、151# 号桥墩承台基坑深度分别 7.3 m、5.5 m,采用一级放坡。各级边坡均采用喷锚防护,锚杆采用全长黏结水泥砂浆锚杆,间距 $2.0 \times 2.0 \text{ m}$ 。在坡顶距坡口不小于 5 m 处设置截水沟,以降低水流对边坡的冲刷。经计算,基坑开挖和桥梁施工各阶段既有铁路路基附加沉降均满足规范要求。

(2)为最大限度地减少中跨合龙段施工对既有铁路运营的影响,149#、150# 号墩间跨中合龙段设置外模钢结构,并在合龙吊篮下方设置二次兜底措施,防止跨中合龙施工时材料和设备掉入铁路中。

(3)桩基施工过程中钻机设置地锚防止倾覆影响铁路运营。

(4)在铁路上方一定区域设置 2 m 高防抛网,避免坠物影响铁路运营。

(5)连续梁排水采用桥面排水方式,防止外挂排水管漏水或老化脱落影响铁路运营。在主墩位置主梁设置挡水块和竖向排水管,将桥面排水引入铁路边沟内。

6 结 语

(1)受桥位区地形地貌、既有铁路布置和天河机场限高等因素影响,武汉轨道交通前川线上跨京广上行货运线区域采用 $(86+2 \times 156+86) \text{ m}$ 连续梁桥方案,其跨度为国内城市轨道交通同类型桥梁之最。经计算分析,满足规范要求。

(2)采用转体施工方法,减小施工过程中对既有铁路运营的干扰。转体吨位达到 15 000 t,居国内城市轨道交通转体桥梁前列。

(3)桥墩承台基坑采用隔离桩和放坡锚喷支护方式。经计算,基坑开挖和桥梁施工各阶段既有铁路路基附加沉降均满足规范要求。

(下转第 74 页)

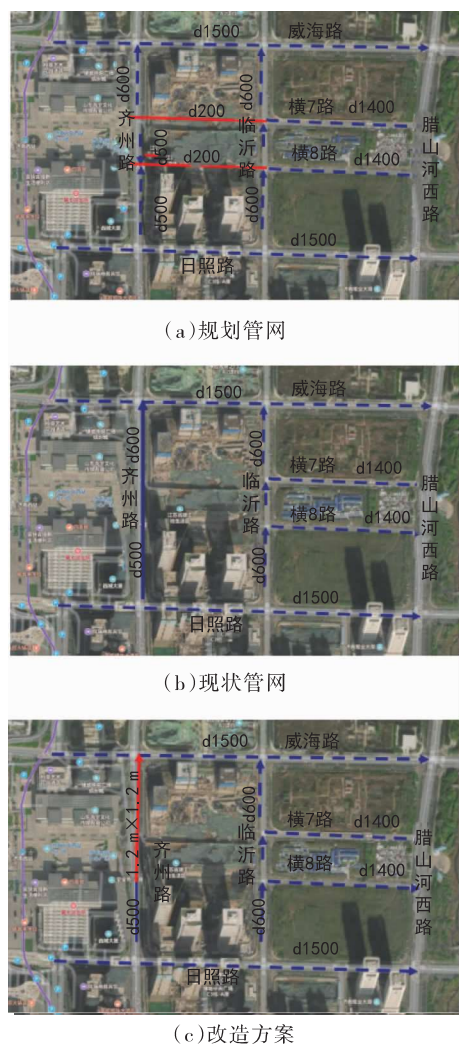


图8 东广场区域规划、现状、改造管网示意图

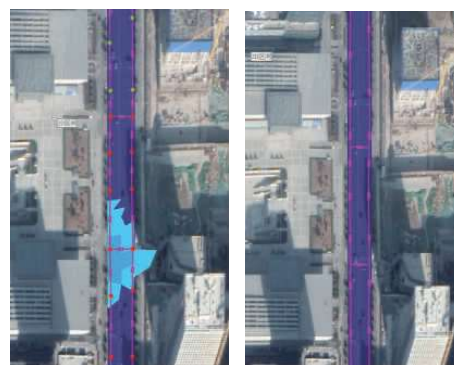


图9 东广场区域改造前、改造后积水情况对比

(4)通过对沿齐州路东侧敷设 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 雨水管渠的改造方案进行模拟验证,结果表明该方案能较好的解决东广场区域的内涝积水问题。

参考文献:

- [1] 王诗婧.全过程内涝防治体系对缓解城市内涝的效果分析[J].环境工程,2020,38(4):108-113.
- [2] 王滢,周小伟.Info Works ICM 在山地丘陵城市内涝治理中的应用[J].中国给水排水,2018,34(19):118-123.
- [3] 肖友淦.基于SWMM的年径流总量控制率计算探讨[J].给水排水,2019,55(7):64-69.
- [4] 李碧琦.不同空间尺度下深圳市城市暴雨内涝灾害风险评估[D].广东广州:华南理工大学,2020.
- [5] 田鹏飞.基于情景的上海城区暴雨内涝模拟及对道路和地铁的影响分析[D].上海:上海师范大学,2018.
- [6] Qianqian Zhou.A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts[J].Water, 2014,6(4).

~~~~~  
(上接第44页)

## 参考文献:

- [1] 史梯.武汉二环线上跨铁路立交桥总体设计[J].世界桥梁,2015,43(1):7-10,47.
- [2] 刘润舟.(70+125+70)m跨铁路转体连续梁桥设计[J].铁道标准设计,2013(12):67-70.
- [3] 井江永.(50+85+50)m跨铁路连续梁不对称转体设计研究[J].铁道标准设计,2018,62(9):67-71.
- [4] 董琴亮.跨既有铁路线大跨连续梁桥转体施工与控制技术[J].中外公路,2014,34(4):143-147.
- [5] 高庚元.武汉市姑嫂树路跨铁路立交桥高位转体施工技术[J].铁道建筑,2017(6):44-48.
- [6] 董国亮.京石客运专线滹沱河特大桥跨京广铁路连续梁桥转体施工技术[J].铁道标准设计,2011(7):69-73,77.
- [7] 何义斌.大跨度无砟轨道连续梁桥后期徐变变形研究[J].铁道学报,2008(4):120-124.
- [8] 周东卫.高速铁路混凝土桥梁徐变变形计算分析及控制措施研究[J].铁道标准设计,2013,57(6):65-67,72.
- [9] 涂杨志.跨武广特大桥转体连续梁设计[J].铁道工程学报,2012,29(11):43-48.
- [10] 尚海涛.平转法转体在铁路桥梁施工中的应用研究[J].铁道工程学报,2013,30(1):29-34,84.
- [11] 翟杰群,贾坚,谢小林.隔离桩在深基坑开挖保护相邻建筑中的应用[J].地下空间与工程学报,2010,6(1):162-166.