

文章编号: 1674—8247(2019)04—0017—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.04.004

转体施工钢—混混合连续梁桥的应用研究

张 军

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142)

摘 要:预应力钢混连续梁桥作为一种新型的结构型式,得到越来越广泛的应用,它将钢梁与混凝土梁连接成共同的受力整体,同时具有钢桥跨越能力大和混凝土连续梁桥刚度大的优点。文章以延崇高速上跨大秦铁路桥为研究背景,从如何选取转体混合梁的关键技术出发,针对混合梁结构受力复杂的特点,对结合段位置的选取、结构构造、局部计算进行研究分析。结果表明:(1)结合段结构设计合理,刚度过渡平稳;(2)转体施工可显著减小对既有铁路运营的影响,可在上跨铁路的桥梁中广泛应用;(3)转体系统作为施工阶段的主要受力构件,对上转盘及球铰进行有限元分析,证明转体系统在该结构下受力合理。

关键词:钢混结合段;转体;连续梁;空间有限元;结构设计

中图分类号:U442.5 文献标志码:A

Research on Application of Rotating Steel-concrete Composite Continuous Beam Bridge

ZHANG Jun

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China)

Abstract: As a new type of structure, the prestressed steel-concrete continuous beam bridge has been applied more and more widely. It connects the steel beam and the concrete beam as a whole, with advantages of large span capacity of the steel bridge and large stiffness of the concrete continuous beam bridge. Taking Yanqing-Chongli highway overpassing Dalian-Qinhuangdao railway as the background, based on the key technologies of how to choose the rotating steel-concrete beam, the location, structure and local calculation of the steel-concrete joint section are studied and analyzed in this paper in accordance with the complex force of the steel-concrete beam. The results show: (1) the structure design of the joint section is reasonable and the stiffness transition is smooth; (2) Since the construction of rotary body can significantly reduce the impact on the existing railway operation, it can be widely used in the bridge across the railway; (3) As the main stressed member in the construction stage, the rotary body system carries out finite element analysis on the rotary table and ball hinge. The results show that the structure design of the system is reasonable.

Key words: steel-concrete joint segment; rotating; continuous girder; finite element analysis; structural design

新建桥梁跨越既有铁路、公路时,因既有交通运输繁忙,常规结构及施工工艺无法满足跨越能力要求,需

对上跨铁路、公路的桥梁从结构形式、施工工艺及经济性等方面综合考虑。目前,钢—混组合梁越来越多地

收稿日期:2018-11-03

作者简介:张军(1973-),男,高级工程师。

引文格式:张军. 转体施工钢—混混合连续梁桥的应用研究[J]. 高速铁路技术,2019,10(4):17-22.

ZHANG Jun. Research on Application of Rotating Steel-concrete Composite Continuous Beam Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(4):17-22.

应用在桥梁结构中,高强轻质的钢材显著提高了桥梁的跨越能力,转体施工可最大限度地减小了施工对既有交通运输造成的影响,经济效益和社会效益均十分显著。本文以延崇高速上跨大秦铁路桥跨越大秦铁路和京新高速孔跨布置为(52+140+49) m的钢-混混合连续梁结构为例,分析总结钢-混混合梁的选用及设计要点。

1 结构总体构造

延崇高速上跨大秦铁路桥中跨跨越京新高速、P1匝道及大秦铁路,为满足公路及铁路限界需求,中跨跨径为140 m;大桩号侧边跨受互通匝道的影响,长度仅为49 m;因结构边中跨比较小,且中跨跨度大,因此在中跨选用混合梁结构形式;小桩号侧限制条件较少,为实现结构合理受力、避免负反力的出现,可适当增大跨度,故小桩号侧选取52 m。故桥梁的孔跨形式选取(52+140+49) m三跨连续梁。

为增加中跨的跨越能力,降低主梁梁高,在中跨跨中采用60 m长的钢箱梁,其余部分梁体采用预应力混凝土箱梁。混凝土部分按照全预应力混凝土构件设计,采用变高梁,钢箱梁部分采用等高梁,钢混结合段长2.0 m,中跨合龙段为钢箱梁段。混凝土箱梁顶板厚30 cm,底板厚30~85 cm,边跨腹板厚75 cm,中跨腹板厚65~75 cm;钢箱梁梁高4.0 m,顶板、底板及腹板厚度均为16 mm,箱梁标准段横隔板与横肋板间隔布置,间距均为2 m。边跨现浇段长度为4 m,中跨合龙段长度为3.5 m;小桩号侧转体长度为48 m(边跨)+70.25 m(中跨),大桩号侧转体长度为45 m(边跨)+66.25 m(中跨)。通过增加边腹板厚度、边跨设置3 m后压重横梁、边跨梁端底板设置永久压重等措施减小转体施工过程中的不平衡弯矩,保证成桥状态边支座存在500 kN压力。

2 混合梁选用及关键设计要点

钢-混结合段需要实现混合梁的整体受力及变形协调,是混合梁桥的关键技术。混合梁中钢箱梁与混凝土梁的刚度差异较大,结合段作为混凝土梁与钢箱梁的连接部位,应选取合理的构造形式实现刚度的平稳过渡。钢-混结合段的构造形式主要分为有格室和无格室两种。

2.1 钢-混结合段位置选取

结合段作为混合梁结构的关键节点,其位置的选取决定着结构的安全性、耐久性及经济性。结合段一

般位于主梁弯矩和剪力均较小的位置,使结构具有较好的抗疲劳性及耐久性;因采用先支架现浇后转体的施工方案,且转体重量较大,需严格控制转体过程中的不平衡弯矩,不平衡弯矩也同样决定了钢混结合段位置的选取。

在方案设计阶段对钢箱梁的长度进行了比选,研究发现,当钢箱梁长度为60 m时,结合段所处位置的弯矩及剪力较小,且转体过程中的自重不平衡弯矩值较小。

2.2 钢-混结合段构造特点

本桥钢混结合段采用部分截面连接承压传剪式。主要依靠承压钢板以承压的方式传递梁的轴力。仅在钢梁侧由钢梁的顶板、底板、腹板形成双壁板,在双壁板内部设PBL剪力键,形成钢隔室,钢隔室内填充混凝土。竖向剪力由混凝土断面和连接于承压钢板的PBL剪力键传递。

顶板采用变高刚度过渡“T”型加劲板肋纵向加劲,由结合面至刚度过渡板终端,底板亦采用变高刚度过渡“T”型加劲板肋纵向加劲,实现刚度的平稳过渡。

结合面处承压板在混凝土箱梁侧立面布设圆柱头抗剪焊钉,抗剪焊钉规格采用 $\phi 22 \times 150$ mm。结合面往混凝土侧采用钢隔室钢混组合结构,钢隔室腹板上和腹板剪力板上开有60 mm圆孔并穿过直径20 mm的HRB400钢筋,与进入该圆孔的混凝土包裹在一起形成PBL剪力键。顶板和底板的钢隔室顶层均开设混凝土灌注孔,钢隔室内腔内均填充高性能自密实钢纤维混凝土。由于结构受力的需要,在钢混结合段设置了局部预应力索,预应力钢束在承压板上锚固,锚垫板与承压板磨光顶紧后焊接,如图1所示。

2.3 钢-混结合段受力分析

顺桥向选取箱梁钢混结合段位置21.7 m范围梁段作为计算对象^[1-2],计算采用ANSYS有限元软件建

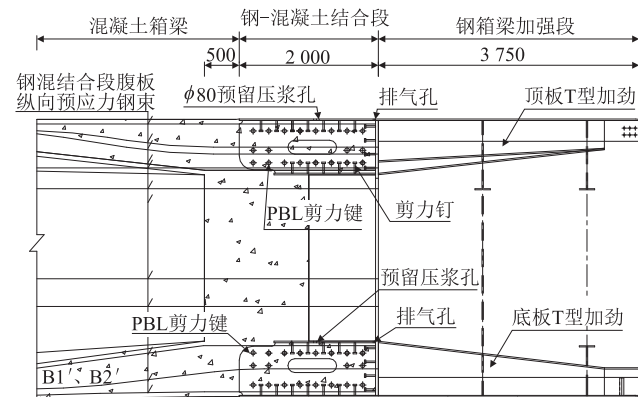


图1 钢混结合段立面示意图(mm)

立模型进行分析计算。混凝土采用 SOLID65 单元模拟,钢板采用 SHELL63 单元,预应力钢束采用 LINK180 单元,剪力钉及 PBL 键采用 COMBINE39 单元模拟,忽略钢板和混凝土之间的粘结滑移,作为结构的安全储备,混凝土与钢板通过 PBL 剪力键和剪力钉连接受力^[3-4]。

钢材的屈服准则均采用 VonMises 准则,等效应力 SEQV 定义如下:

$$SEQV = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

其中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为材料三个方向的主应力。当 $SEQV \leq f_y$ 时,钢材处于弹性状态;当 $SEQV > f_y$ 时,钢材屈服。计算结果如表 1 所示。应力图示如图 2、图 3 所示。

表 1 钢混结合段钢板计算结果表

钢箱梁	屈服应力/MPa	最大 Von Mises 应力/MPa
顶板	270	108.0
底板	270	60.7
腹板	270	131.0
顶板 T 型加劲肋	275	47.7
顶板 U 型加劲肋	275	49.4
底板 T 型加劲肋	275	44.1
底板 U 型加劲肋	275	60.8
腹板加劲肋	275	27.2
承压板	260	247.1
上下钢格室钢板	270	75.4
腹钢格室钢板	270	34.5
上钢格室下底板	270	82.9
下钢格室上底板	270	78.6

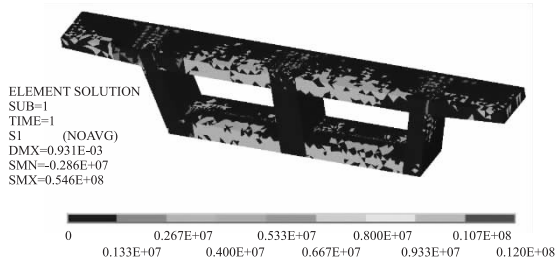


图 2 混凝土箱梁第一主应力图

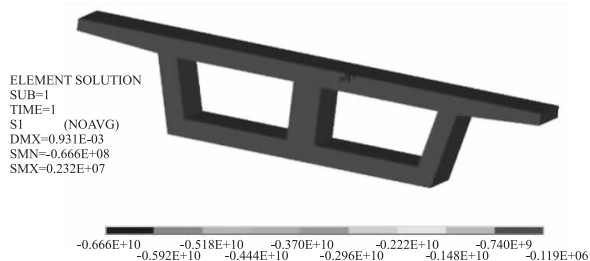


图 3 混凝土箱梁第三主应力图

混凝土箱梁顺桥向拉应力均普遍小于 1.2 MPa,混凝土箱梁横桥向压应力最大值为 11.9 MPa,剔除应力集中点外其余均在安全范围内。

PBL 剪力键的最大剪力为 51.57 kN,小于其抗剪承载力;剪力钉的最大剪力为 68.20 kN,小于其抗剪承载力。

2.4 钢-混结合段施工关键技术

钢-混结合段结构复杂、钢筋及预应力束较多、施工难度较大,是全桥施工的重点环节之一,施工工艺流程,如图 4 所示。

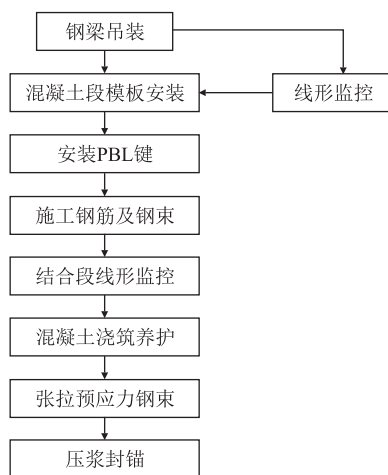


图 4 钢-混结合段施工流程图

钢-混结合段钢梁部分采用整体吊装到位,应对钢梁位置进行监测调整,确保钢梁线形准确到位,对支承结合段连接施工的临时支架,进行专门设计,支架的强度、刚度和稳定性应满足使用的要求,并充分考虑变形、地基的不均匀沉降和日照温差等因素对支架系统的不利影响^[5];由于钢混结合段 PBL 键较多且钢筋不能截断,应优先施工 PBL 键,然后进行模板安装和钢筋及预应力钢束的安装;应在一天当中温度较低且平稳的时段进行混凝土的浇筑^[6],应采用微膨胀低收缩混凝土,浇筑时分层布料,钢格室内的混凝土通过浇筑孔下料,相隔仓面混凝土高差控制在 30 cm 左右,使剪力键内混凝土气泡顺利排出,浇筑时应仔细振捣,避免振捣时对剪力键、预应力元件的损伤,确保该部分混凝土质量。浇筑完成后,必要时从预留压浆孔向各个钢格室内灌注水泥浆,填充混凝土与钢箱梁未紧密结合处。混凝土经养护达到足够的强度后方可进行预应力张拉。

2.5 转体系统设计

转体结构由转体下转盘、球铰、上转盘、转动牵引

系统组成^[7]。

下转盘作为支承转体结构全部重量的基础,转体完成后,与上转盘共同形成基础,下转盘为八边形结构,下转盘长 38.2 m,宽 21.2 m,高 5 m。转体球铰选用直径 5 200 mm,高度 903 mm 的钢球铰。上转盘为八边形构造,长 25.35 m,宽 17.1 m,高 4.0 m,布设纵、横、竖三向预应力筋,纵横向采用 18-7 ϕ 5 高强低松弛预应力钢绞线,竖向采用直径为 32 mm 的精轧螺纹钢。上转盘内预埋转体牵引索,每根索埋入转盘长度均大于 4.5 m,每对索的出口点对称于转盘中心,牵引索选取 25-7 ϕ 5 的钢绞线。平面关系如图 5 所示,转体系统立面如图 6 所示。

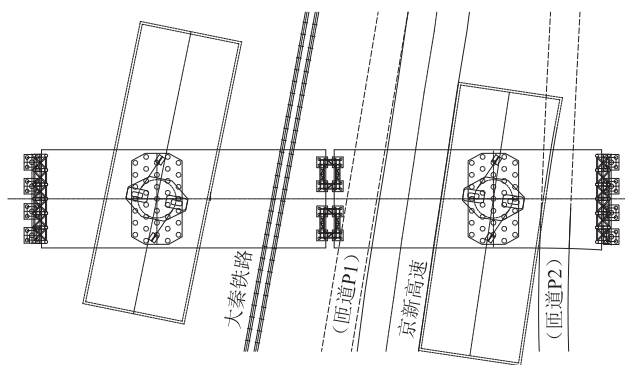


图5 平面关系示意图

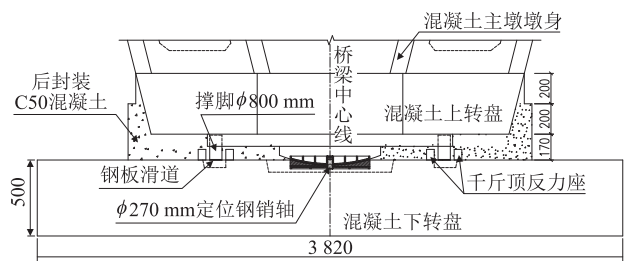


图6 转体系统立面示意图(mm)

2.6 转体系统受力分析

采用 ANSYS 对转体系统进行分析,按照设计球铰实际参数建立球铰节点接触模型:建立模型并划分网格→识别接触对→指定接触面和目标面→定义刚性目标面→定义柔体的接触面并生成单元→定义实常数和单元 KEYOPT 接触行为→刚性目标面运动控制→定义边界条件并施加荷载→定义求解选项并求解。混凝土采用 SOLID45 单元进行模拟,预应力钢束及精轧螺纹钢采用 link8 单元进行模拟,球铰上、下球铰体之间接触部位,下球铰作为目标面,运用到的单元型号是 Targe170^[8];上球铰被指定为接触面,其运用到的单元

型号是 Conta173,如图 7 所示。

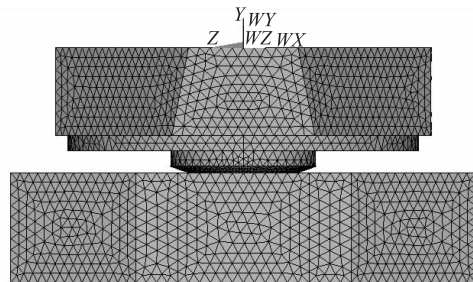


图7 转体系统有限元模型图

结构转体施工过程为平衡转体。模型采用非线性分析,未考虑材料非线性及结构的几何非线性,仅考虑接触非线性分析。应力图示如图 8~图 10 所示。

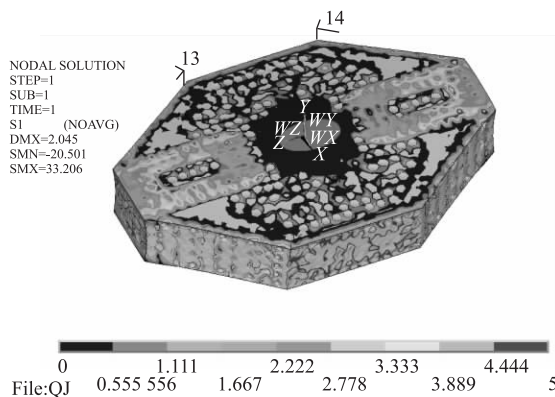


图8 上转盘主拉应力图

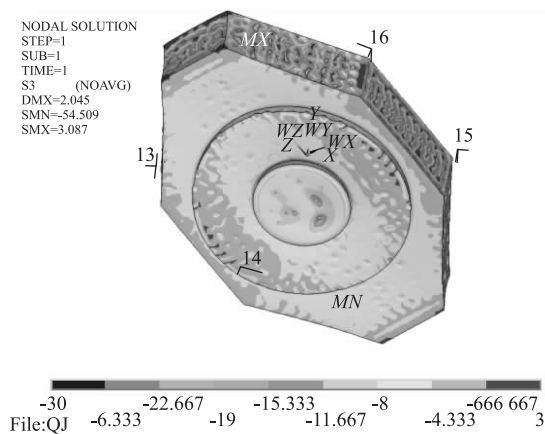


图9 上转盘主压应力图

剔除预应力锚固处所引起的应力集中,上转盘拉应力小于 1.6 Pa,压应力小于 11.7 Pa,球铰处压应力小于 16.2 Pa。可知拉压应力均小于材料的容许值。

2.7 转体施工控制要点

(1)转体前上转盘与承台之间采取有效措施进行临时锁定。临时锁定结构从整个安装受力到拆除,工

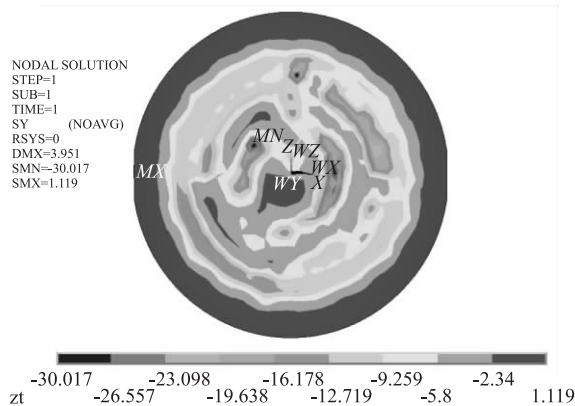


图10 球铰压应力图

作持续时间较长,需保证持续受压状态下锁定结构保持较小的变形,需要等载与超载压力试验,确定临时锁定结构的承压能力,确保临时锁定结构满足耐久、严密、低应变的要求。

(2)由于主梁结构不对称,转体球铰两侧在恒载作用下存在不平衡弯矩,为保证转体施工的顺利进行,在转体之前需要进行结构称重试验,测试转体部分的不平衡力矩,偏心距、摩擦力矩及摩擦系数等参数^[9-10],根据测试结果进行临时配重,转体不平衡距小于5 cm方能进行转体施工,以确保施工安全。应在平转环道处设置称重反力架,布置称重千斤顶及传感器,称重千斤顶应前后左右对称布置,称重反力架应能满足局部应力的要求。整幅结构设计不平衡弯矩为 $3 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}$,应在边跨进行配重。

(3)严格控制启动和制动,必须利用千斤顶反力座启动,发现有偏转应及时纠偏,启动牵引应注意缓慢加载,并及时观测转体结构状态,确保启动时结构安全。

2.8 合龙段施工

合龙段钢箱梁需拼装完成后整体运至设计合龙段位置,故在大桩号侧临时墩设临时支撑,在主梁顶面搭设轨道(轨道应在箱梁腹板宽度范围布设,同时轨道不应偏离腹板宽度中线10 cm),利用桥面吊机吊装合龙段钢箱梁并将其运输到合龙段位置,合龙段精确就位后,同步焊接合龙段两侧焊缝。钢箱梁合龙段吊装重量较轻,吊装过程中可保证梁体结构安全可靠,减小施工难度。钢箱梁合龙段还具有精度高、施工工期短的优点。

3 结论

针对上跨铁路桥梁跨越铁路部分跨度大,边跨受

限跨度小的情况,可考虑采用钢-混凝土混合梁的形式,本文对转体钢-混凝土混合梁连续梁桥在跨铁路桥梁中的应用,从结构形式、施工工艺等方面展开研究,得出了以下结论。

(1)边跨采用混凝土梁,增加了边跨的重量和刚度,起到了压重的作用,使边跨支点不出现拉应力;中跨跨中采用钢箱梁,既提高了桥梁的跨越能力,又显著减轻中跨重量;钢混结合段既需要处在结构内力较小的区域内,又要减小转体施工过程中不平衡自重,对不同位置的结合段进行对比,最终确定钢梁长度,结合段所处位置结构内力较小,且转体过程中的不平衡弯矩值较小。

(2)钢混结合段采用有格室后承压板式结构,构造合理,传力及刚度过渡平顺,结构安全可靠。钢混结合段的应力值均小于材料的容许值,承压板锚下位置处存在应力集中现象,在模型中为模拟锚垫板及锚下承压钢筋,工程实际中应力集中现象会显著减轻。

(3)转体施工显著减小了对既有铁路正常运营的影响;上转盘及球铰作为转体系统的主要受力构件,在转体过程中拉压应力均小于材料的容许值。进行转体前应对结构进行称重及临时配重,使结构的转体不平衡距小于5 cm,确保转体施工的顺利进行。

(4)合龙段钢梁需从大桩号侧主梁运至合龙段位置,采用钢箱梁可显著减小结构重量,减小施工难度。

参考文献:

- [1] 陈小玲. 预应力钢混连续梁桥钢混结合段局部应力分析[J]. 交通标准化, 2012, 37(5): 86-90.
CHEN Xiaoling. Analysis on Local Stress of Linked Part of Steel-prestressed Concrete Composite Continuous Beam Bridge [J]. Communications Standardization, 2012, 37(5): 86-90.
- [2] 耿波, 王芳, 宋军, 等. 青衣江大桥钢混结合段局部应力分析[J]. 公路交通技术, 2011, 27(6): 49-53.
GENG Bo, WANG Fang, SONG Jun, et al. Analysis for Local Stress at Steel-concrete Composite Segments of Qingyi River Bridge [J]. Technology of Highway and Transport, 2011, 27(6): 49-53.
- [3] 王军文, 倪章军, 李建中, 等. 石板坡长江大桥钢混结合段局部应力分析[J]. 公路交通科技, 2007, 23(8): 99-102.
WANG Junwen, NI Zhangjun, LI Jianzhong, et al. Analysis on Local Stress of Steel-concrete Beam Linked Part of Shibpano Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 23(8): 99-102.
- [4] 曹永睿, 李艳花. 斜拉桥主塔钢混结合段受力分析研究[J]. 市政技术, 2013, 41(4): 47-50.
CAO Yongrui, LI Yanhua. Study on Force Analysis of Steel-concrete

- Composite Segment in the Main Tower of Cable-stayed Bridge [J]. Municipal Engineering Technology, 2013, 41(4): 47-50.
- [5] 任世朋,朱元元,闫明赛,等. 铁路混合梁钢混结合段钢箱梁关键施工技术[J]. 铁道标准设计,2015,59(6):79-83.
- REN Shipeng, ZHU Yuanyuan, YAN Mingsai, et al. Key Construction Technology for Steel-box Girder of Steel-concrete Joint Section of Railway Hybrid Girder [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(6): 79-83.
- [6] 王俊如,秦晓锋,郑罡,等. 钢-混凝土混合连续刚构桥主跨钢混接头施工技术简介[J]. 公路交通技术,2013,29(2):65-70.
- WANG Junru, QIN Xiaofeng, ZHENG Gang, et al. Introduction to Construction Techniques for Reinforced Concrete Joints of Main Span in Steel-concrete Continuous Steel Structure Bridges [J]. Technology of Highway and Transport, 2013, 29(2): 65-70.
- [7] 王东. 海青铁路跨胶济客运专线(40+64+40)m连续梁转体施工设计[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(5): 81-85.
- WANG Dong. Design for Swing-method Construction of (40 + 64 + 40) m Continuous Girder of Haitian-Qingdao Railway across Existing Qingdao-Jinan Railway Passenger Dedicated Line [J]. Railway Standard Design, 2014, 58(5): 81-85.
- [8] 左敏,江克斌. 转体桥平转球铰转体过程应力计算方法研究[J]. 铁道标准设计,2015,59(12):36-39.
- ZUO Min, JIANG Kebin. Research on the Stress Calculation of Ball Joint of Swivel Bridge during Rotation [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(12): 36-39.
- [9] 高荣峰. 上跨高速铁路2×100m T构转体桥施工技术[J]. 施工技术,2017,60(S1):963-966.
- GAO Rongfeng. Construction Technology of 2 × 100m T Constitutive Swivel Bridge across the High-speed Railway [J]. Construction Technology, 2017, 60(S1): 963-966.
- [10] 晏敬东,陈强. 150MN高墩转体T构施工控制技术[J]. 桥梁建设,2012,42(1):102-107.
- YAN Jingdong, CHEN Qiang. Construction Control Techniques for Rotary Erection of a 150MN High-rise Pier T-frame [J]. Bridge Construction, 2012, 42(1): 102-107.

(编辑:苏玲梅 白雪)

(上接第5页)

- [6] 林辰辉. 我国高铁枢纽站区开发的影响因素研究[J]. 国际城市规划,2011,26(6):72-77.
- LIN Chenhui. Research of Impact Factors of High-speed Railways Hub Area Development in China [J]. Urban Planning International, 2011, 26(6): 72-77.
- [7] 殷铭,汤晋,段进. 站点地区开发与城市空间的协同发展[J]. 国际城市规划,2013,28(3):70-77.
- YIN Ming, TANG Jin, DUAN Jin. The Synergy of High-speed Railway Station Areas and Urban Space Development [J]. Urban Planning International, 2013, 28(3): 70-77.
- [8] Steven E, Polzin P. E. Transportation/Land-use Relationship: Public Transport's Impact on Land Use [J]. Journal of Urban Planning and Development, 1999, 125(4): 135-151.
- [9] 王兰,顾浩. 京沪高铁站点选址与其所在城市发展解析[J]. 中国科技论文,2015,10(7):777-783.
- WANG Lan, GU Hao. Location Selection of Train Stations of Beijing-shanghai High-speed Railway Line and Analysis on Urban Development [J]. China Science Paper, 2015, 10(7): 777-783.
- [10] Andre Sorensen. Land Readjustment and Metropolitan Growth: An Examination of Suburban Land Development and Urban Sprawl in the Tokyo Metropolitan Area [J]. Progress in Planning, 2000, 53: 217-330.
- [11] 张志强,许学强. 火车客运站综合流通空间规划探索-以广州市铁路新客站地区规划为例[J]. 人文地理,2007,22(6):37-41.
- ZHANG Zhiqiang, XU Xueqiang. A Research into the Integrated Multifunction Circulation Space-A Case Study of New Railway Passenger Station in Guangzhou [J]. Human Geography, 2007, 22(6): 37-41.

(编辑:车晓娟 白雪)