

文章编号: 1674—8247(2023)01—0076—05

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2023.01.014

灌河特大桥连续钢桁—柔性拱主桥建造技术

温贵生

(中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600)

摘 要:连盐铁路灌河特大桥主跨(120+228+120)m 连续钢桁—柔性拱,为全线跨径最大桥梁。灌河特大桥的主桥糅合拱桥与下承式桁梁桥的双重桥梁造型,整体线型平顺、外形优美、配比和谐、受力合理。本文综合考虑桥位地质、通航、地震及台风等复杂条件,全面探讨了钢桁梁—柔性拱桥设计及施工中的主要工艺,并对主桥下部基础与围堰施工、钢桁梁同步拼装、主桥不对称悬拼与合龙、抗台风措施、新型 TLMD 双调谐阻尼器和主墩消能阻尼防撞系统等制造及施工新技术和新工艺作了说明。研究成果可为同类工程的设计和施工提供经验和借鉴。

关键词:铁路桥梁;连续钢桁—柔性拱;建造技术;TLMD 双调谐阻尼器;消能阻尼防撞

中图分类号:U445.466

文献标识码:A

Construction Technology of Continuous Steel Truss-flexible Arch Main Bridge of Guanhe Super Major Bridge

WEN Guisheng

(China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: Guanhe Super Major Bridge of Lianyungang-Yancheng High-speed Railway has a continuous steel truss-flexible arch main span of (120+228+120) m, the largest span among the bridges of the whole line. The main bridge of Guanhe Super Major Bridge is the combination of an arch bridge and an underlying truss girder bridge, featuring by smooth overall alignment, appealing look, harmonious proportion, and reasonable stress. This paper comprehensively discussed the main technologies in the design and construction of steel truss girder-flexible arch bridge, and explained the new manufacturing and construction technologies such as the construction of the lower foundation and cofferdam of the main bridge, the synchronous assembly of steel truss girder, the asymmetrical suspension and closure of the main bridge, the anti-typhoon measures, the new TLMD double-tuned damper, and the energy dissipation damping anti-collision system of the main pier. The results can provide experience and reference for the design and construction of similar projects.

Key words: railway bridge; continuous steel truss-flexible arch; construction technology; TLMD double-tuned damper; energy dissipation damping and collision prevention

1 工程背景

灌河特大桥为连盐铁路的控制性工程,位于江苏

省北部唯一一条干流上没有建闸的天然潮汐河流灌河上,桥位处河面宽度约 380 m,水深约 8 m,潮汐高差 6 m。桥梁全长 10 397 m,桥梁孔跨布置受灌河Ⅲ级航

收稿日期:2022-07-16

作者简介:温贵生(1981-),男,高级工程师。

基金项目:中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目(15-C54)

引文格式:温贵生. 灌河特大桥连续钢桁—柔性拱主桥建造技术[J]. 高速铁路技术,2023,14(1):76-80.

WEN Guisheng. Construction Technology of Continuous Steel Truss-flexible Arch Main Bridge of Guanhe Super Major Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2023,14(1):76-80.

道及通行 3 000 t 级海轮通航净宽和净高控制,跨灌河采用(120+228+120)m 连续钢桁-柔性拱^[1-4],主桥长 470 m,总造价约 1.7 亿元。

主桥桥墩采用双线圆端形实体墩,墩高 15 m,主墩基础为 25-2.0 m 的钻孔摩擦桩,桩长 83.5 m。承台采用矩形,尺寸为 18.95 m×30.5 m×5 m。桥位处地表水侵蚀等级为 L3,在提高混凝土标号及保护层厚度的基础上,采用聚氨酯防水涂料对水中墩百年水位+2 m 范围进行防腐强化。

主梁采用 N 形桁式,桁高 15 m,桁宽 13.5 m,除中支点附近 6 个节间距为 13 m 外,其余节间长度均为 12 m;中墩设 15 m 高加劲弦;拱肋为圆曲线且矢高 69 m,矢跨 228 m,矢跨比 1/3.3,拱肋与主桁杆件在拱脚采用节点连接。桥面系采用混凝土道砟板及正交异性钢桥面组成的整体结构。

为保障灌河铁路桥和通航船舶的安全,主墩防撞采用可随灌河潮汐变化升降的阻尼消能防撞系统。拱桥吊杆减振采用可实现综合减振及运营阶段免维护功能的 TLMD 双调谐阻尼器。灌河特大桥主桥立面图如图 1 所示。

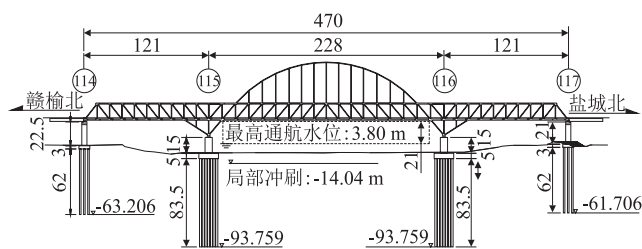


图1 灌河特大桥主桥立面图(m)

2 主桥结构设计及建造重难点

2.1 主桥设计重难点

灌河特大桥为设计速度 200 km/h、国铁 I 级、客货共线铁路双线桥,是国内台风区客货共线铁路中首次采用钢桁梁-柔性拱结构的桥梁。该桥梁体轻盈,梁部静载占比小,铁路活载相对占比大,钢桁梁、拱肋及吊杆对桥梁线性控制的影响较为复杂,对轨道的平顺性及安全性影响较大。

(1)项目所在地(盐城)为台风影响区,拱桥最长吊杆 39 m,长细比大、刚度和阻尼小,在风、地震等外界荷载作用下,容易产生较大的振动响应,对结构的安全性能和使用寿命造成较大影响。

为解决长吊杆风致振动难题,设计了八角形箱型吊杆^[5],研制了新型的 TLMD 双调谐阻尼器,通过特殊防翻转设计并考虑多个减振器频率参数的分布特

性有效控制吊杆的风振、涡振及驰振影响,实现减振器在钢梁制造阶段安装,控制施工阶段及运营阶段的风致吊杆振动;引入减振器振动状态监测系统,实现减振器工作状态的实时监测。

(2)针对复杂的钢梁空间结构、无条件设置临时墩的中跨、精度要求高的钢桁梁与柔性拱合龙等技术难题,设计了由边跨向跨中先梁后拱的实施方案。

(3)针对桥位处潮汐水位高差达 6 m、Ⅲ级航道且通行 3 000 t 海轮、航迹线密集、防撞要求高等通航特点,结合桥墩下部结构、桥墩自身的抗撞能力、水文条件、可能出现的通航船舶类型、碰撞速度等情况,设计并研制了由钢结构主体、消能箱、橡胶消能元件等组成的阻尼消能防撞系统。

(4)钢桁梁加劲腿及拱脚附近杆件设计为高强度 Q420 qE 钢板,节省了用钢量,降低了工程造价。桥面由正交异性^[6]钢桥面和混凝土道砟板共同构成,横向和竖向刚度大、抑振质量充足、轨道支承结构平顺。

2.2 主桥结构施工技术重难点

考虑灌河特大桥主桥结构设计重难点,综合桥位处地形地貌、地质、气象、水文、通航等条件,主桥基础、钢桁梁、柔性拱及阻尼消能防撞系统施工等需要解决技术重难点包括:

(1)115 号、116 号主墩位于Ⅲ级航道的深水区,施工所搭设的钢平台需考虑航道的影响;地质构造复杂,穿越淤泥土、淤泥质黏土、粉土、粉砂、老黏土及姜石等,软土覆盖层厚达 17 m,成桩质量尤为关键。

(2)主墩基础为满足防洪及通航要求设计为低桩承台,采用钢板桩围堰防护,围堰的渗水控制及封底混凝土施工制约了承台、墩身等后续大体积混凝土施工。

(3)钢桁梁柔性拱安装高度距水面达 80 m,施工监控量测制约成桥的线型和质量,钢桁梁悬臂安装及采用吊索塔架辅助合龙、柔性拱采用单侧不对称合龙方案,需要解决两次合龙精度、成桥线形和内力要求。

(4)灌河桥主墩采用阻尼消能防撞系统,灌河桥位处潮汐变化频繁,水位高差达 6 m,阻尼消能防撞系统如何安装、怎样控制安装精度和安全是现场面临的重大难题。

(5)拱桥吊杆为八角形封闭箱形结构,吊杆阻尼器的安装必须在吊杆拼接吊装前进行,如何安装阻尼器并确保其美观实用是现场需解决的难题。

3 主桥下部基础施工技术

3.1 下部基础施工总方案

考虑灌河航道、地理条件、工期条件及水域潮汐

作用影响,基础施工采用先施工钻孔桩后施工钢围堰的方法^[7],施工工序为:施工准备→搭设钢栈桥及钢平台→钢护筒就位→钻孔桩施工→拆除钢平台→钢板桩围堰逆作法施工→承台施工→墩柱施工→钢板桩围堰拆除。

3.2 桩基础施工

115号、116号主墩桩基为梅花形布置,钢平台以下钻孔深度达100 m,结合桩位处地质情况,采用焊接钢管和螺旋钢管两种形式的钢护筒,护筒长20 m、内径2.3 m、壁厚14 mm,通过履带吊与振动锤配合插打到位。

选择GPS25D型正循环钻机进行钻进成孔,施工时掺加膨润土的PHP优质泥浆确保桩基成孔质量;灌注时采用新型卡扣式导管接头,便于安拆,缩短拆除时间,保障了混凝土连续作业;成桩后经检测,主墩50根桩基全部为I类桩。

3.3 钢板桩围堰制造及施工

围堰采用单根长27 m拉森Ⅵ型钢板桩,共设4层围堰及内支撑,采用“逆作法”工艺。首先利用钢护筒焊接临时牛腿,采用4台吊车同时将围堰及内支撑焊接为整体依次下放到位,而后施打钢板桩。根据“插桩立桩、散桩纠偏、调桩合桩”等要领加以控制,施工中采用简易水刀法引孔、制作异形桩及角桩进行纠偏,在上下游设置挡水墙,有效控制了围堰变形及渗漏水,保障了围堰质量及施工安全。

3.4 围堰封底施工

使用高压气泵吸泥机进行水下吸泥,清理围堰内基底至封底砼底面,吸泥至设计标高后,利用高压水枪将封底砼高度范围内钢板桩及钢护筒冲净,以保证封底混凝土与钢板桩、钢护筒的粘结力。

围堰封底为2 m厚的C20混凝土,通过导管法水下灌注,导管使用前应进行水密性试验。导管下口应悬空15~20 cm进行固定,按每根导管作业半径4.0 m布置,与平台分布梁固定连接。

3.5 承台混凝土施工

115号、116号墩承台厚5 m,为大体积混凝土,施工时采用设置3层 $\phi 42$ mm的冷却管、混凝土配合比“双掺”工艺降低混凝土水化热和内外温差的措施,避免混凝土裂缝产生。

3.6 墩身施工

115号、116号墩墩身高15 m,墩身采用翻模法施工,分次4层浇筑至墩顶,依次拆除第二、第一层围堰及内支撑时,及时向基坑内注水,以保持内外水压平衡,最后拔除钢板桩完成基础施工。

4 钢桁梁及吊索塔架施工

4.1 钢桁梁拼装总方案

为解决钢梁结构复杂、跨中通航繁忙不能架设临时墩、连续钢桁梁和柔性拱合龙困难等技术难点,拟定从两岸至跨中,先主梁后拱肋的架设方案。施工工序为:原材料复验→钢梁工厂制造及试拼装→钢构件场内涂装→钢构件运输→搭设钢栈桥→搭设临时墩→安装吊机→钢桁梁架设→钢桁梁合龙→拼装吊杆→安装拱肋→安装上平联→柔性拱合龙→桥面系施工^[8-11]。

4.2 钢梁预拼装与节段架设

钢梁试拼采用平面辗转法,试拼不少于5个节间,以核实施工图纸的合理性、检验制造工艺是否合理、工艺装备是否精密。

钢梁安装顺序:下弦杆→斜腹杆→直腹杆→上弦杆→钢桥面板块→桥门架(横联)→上平联。

4.3 高栓施拧与桥面板制造

高强度螺栓施拧采用扭矩法施工和紧扣法进行检验。高强度螺栓的拧紧主要分为初旋和终旋。初拧值取为终拧值的一半,初拧完成后各螺栓通过敲击法检验,终拧通过扭矩法检验。

桥面板在工厂制作单元件,现场采用N+1连续匹配制作方案。胎架设计按照不少于5个吊装段布置,组装顺序按照安装顺序进行。

4.4 钢桁梁及柔性拱合龙

连续钢桁梁由两台全回转架梁吊机悬臂架设114号、117号边墩至115号、116号中墩,合龙位置设于跨中。为了保证桥梁顺利合龙,计算分析成桥后各阶段的内力及变形量,并采取相应措施。针对连续钢桁梁大悬挑状态合龙的技术难点,考虑到跨航道施工和跨中不能架设临时墩的情况,将两个吊索塔架布置于两个主墩之上,以协助连续钢桁梁进行合龙,连续钢桁梁架设合龙如图2所示。

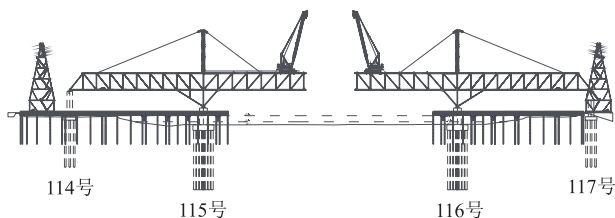


图2 连续钢桁梁架设合龙图

以架完的钢桁梁为运梁通道,采用1台全回转架梁吊机将柔性拱钢桁梁由115号墩架设到116号墩,

并于 116 号墩以上拱脚进行合龙。针对柔性拱合龙的技术难点,采用边墩起顶设备落梁和合龙口千斤顶等设施对合龙口进行精度调整,完成拱肋合龙,柔性拱合龙示意图如图 3 所示。

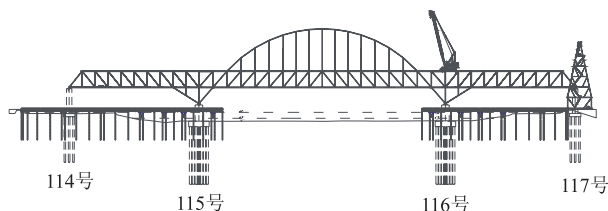


图 3 柔性拱合龙示意图

4.5 抗台风措施

钢桁梁架设可能受台风影响,是重大危险源,本工程采取抗风措施为:

(1) 统筹工期和工序,同步实施主墩平台与栈桥,加快下部施工速度,采用“先梁后拱”的架设方法,在台风期以前或避开台风期完成钢桁梁的合龙。

(2) 对施工阶段的风致振动响应分析,在主桁下弦节点设后锚固系统与桥墩固定,保证钢桁梁悬臂施工阶段整体抗倾覆稳定性。增设纵、横向缆风绳提高吊杆的气动稳定性,增强拱肋的抗风稳定性;吊杆架设前安装减震器,提高其涡激性能。

(3) 对钢梁架设所需梁架吊机、塔架等设备支架、托架等辅助措施按抗台风工况设计,确保其强度、刚度及稳定性;在台风来临之前,将所有设备及装置按相关要求临时锚固。

5 桥梁防撞系统制造及施工

5.1 桥梁防撞系统施工总体方案

灌河桥主墩防撞采用阻尼消能防撞系统,由钢结构主体、消能箱、橡胶消能元件等组成,采用工厂制造,轮船浮运至桥位,现场拼装,精确定位后栓接而成。防撞系统平面布置如图 4 所示。

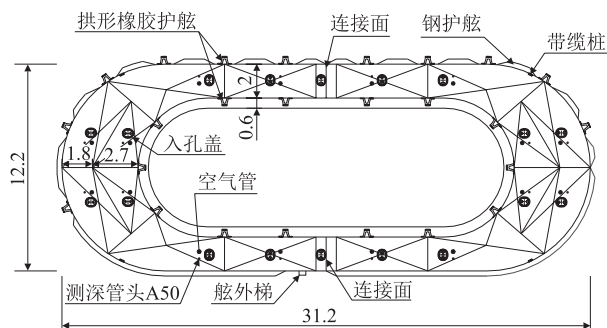


图 4 防撞系统平面布置图(m)

施工工序为:原材料复验→单元板工厂试生产→焊接工艺评审→胎架试拼装→防撞系统涂装→防撞系统浮运→现场拼装→防撞系统合龙→浮态调平。

5.2 防撞系统加工制造

阻尼消能防撞系统尺寸为 $31.2 \times 12.2 \times 3.8$ m, 舱室厚 2.0~4.5 m; 该系统共 18 道舱壁, 16 个水密舱, 2 个非水密舱; 水密舱室上部为空心, 无填充物, 为调整防撞系统浮态, 水密舱下部内装载压载水; 每舱设人孔盖及直梯, 舷外设置 1 套舷外梯。阻尼消能防撞系统采用 Q235-B 级钢和 SA400H \times 3 000L 拱形橡胶护舷, 部件钢结构都是由工厂焊接而成。桥位处潮汐频繁, 环境作用等级为 T3、L3 及 D3, 钢结构外表面防腐采用高分子 FRP 复合材料, 内表面采用钢桥涂装体系第二套进行防腐, 正常使用寿命长达 20 年。

5.3 防撞系统安装

阻尼消能防撞系统在桥位下游 15 km 处船厂内制造, 通过气囊下水方式拉入灌河中, 采用拖轮傍拖方式由拖轮绑定浮运至主墩墩位处。防撞系统抵达桥位后, 停留于非通航孔侧。两套防撞系统同时到位后, 利用灌河的潮汐规律, 选择平潮和高潮时段, 采用 3 艘船舶用于消能阻尼防撞系统的转运、固定防撞设施及警戒和救援进行安装。将 2 个 U 形段在主桥桥墩周围系驳后, 采用工作船通过顶推→导杆拉紧→葫芦调平→节段合龙→注水调平→安装完毕的流程安装到位。

主墩安装防撞系统后, 船舶撞击力降低了 20% 以上, 船首破损长度可降低 50% 以上, 可保证铁路桥墩不受撞击, 确保铁路的安全运营。

6 TLMD 双调谐阻尼器的制造及施工

6.1 总体方案

TLMD 双调谐阻尼器利用阻尼液内质量块的移动来达到将振动能量由受控结构转移到阻尼器而耗散掉的作用, 能够有效地抑制桥梁和建筑结构等结构振动。TLMD 双调谐阻尼器主要构件为弹簧、质量块、阻尼器及阻尼液, 采用工厂制造, 汽运至桥位, 精确定位后栓接而成。

6.2 双调谐阻尼器加工制造

TLMD 双调谐阻尼器结构尺寸为 $380 \times 200 \times 330$ mm, 由质量块、弹簧、磁钢、纯铜板、支架及低粘度阻尼油组成。钢构件均采用 Q235 钢材, 由工厂焊接而成。阻尼器内外表面采用钢桥涂装体系第二套防腐, 颜色与主桥一致, 正常使用寿命长达 20 年。

6.3 双调谐阻尼器安装

TLMD 阻尼器利用吊杆横隔板的人孔进行安装, 每根吊杆上部人孔内部横隔板上安装顺桥向阻尼器, 下部人孔内部横隔板上安装横桥向阻尼器, 顺、横桥向阻尼器对称安装。除 A14G14 及 A14' G14' 吊杆纵、横向设置 2 台阻尼器外, 其余吊杆纵、横向均设置 4 台阻尼器, 全桥共设阻尼器 160 台。阻尼器安装位置如图 5 所示。



图 5 阻尼器安装位置图

通过对安装 TLMD 阻尼器后的吊杆进行人工激励, 吊杆阻尼比均在 2% 以上, TLMD 阻尼器对抑振涡激振动控制效果明显。

7 结束语

连盐铁路灌河特大桥主桥于 2013 年 12 月开工建设, 2018 年 12 月通车运营, 历时 5 年顺利完成建设。结合桥位地质、通航和台风等复杂条件, 全面探讨了钢桁梁-柔性拱桥设计及施工中的主要方法和工艺, 明确了主桥下部基础与围堰的施工方法、钢桁梁拼装同步进行施工方法、主桥不对称悬拼钢梁、跨中合龙及抗台风措施, 主墩消能阻尼防撞系统等施工工艺和新方法。在施工中采用钢板桩与围堰同步进行、主桥与钢结构对称悬拼、跨中合龙的施工新技术、新工艺, 效果较好。实践表明, 该特大桥的综合建造技术是先进、可靠、经济、合理的, 可为同类工程的设计和施工提供经验和借鉴。

参考文献:

- [1] 温贵生. 连盐铁路桥梁设计[J]. 铁道建筑技术, 2014(6): 5-9.
WEN Guisheng. Railway Bridge Design for Lianyungang-Yancheng Railway [J]. Railway Construction Technology, 2014(6): 5-9.
- [2] 苏国明. 连盐铁路灌河特大桥钢桁柔性拱设计[J]. 高速铁路技术, 2014(6): 71-74.
SU Guoming. Steel Truss Flexible Arch Design of Guanhe Super Major Bridge on Lianyan Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2014(6): 71-74.
- [3] 中铁第五勘察设计院集团有限公司. 连盐铁路灌河特大桥 (120+228+120)m 连续钢桁-柔性拱关键技术研究研究报告

[R]. 北京: 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 2019.

China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd. Research Report on Key Technology Research of Continuous Steel Truss-Flexible Arch of Lianyan Railway Guanhe Extra Large Bridge (120+228+120)m [R]. Beijing: China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 2019.

- [4] 陈良江, 周勇政. 我国高速铁路桥梁技术的发展与实践[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 27-32.
CHEN Liangjiang, ZHOU Yongzheng. Development and Practice of High-speed Railway Bridge Technology in China [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 27-32.
- [5] 康伟. 银西高铁银川机场黄河特大桥主桥总体设计[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(3): 65-70.
KANG Wei. Overall Design of Main Bridge of Yinchuan Airport Yellow River Bridge on Yinchuan-Xi'an High-speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(3): 65-70.
- [6] 张杰. 厦深铁路榕江桥主桥设计及优化[J]. 铁道建筑, 2011(2): 29-32.
ZHANG Jie. Design and Optimum for Main Bridge of Rongjiang River Bridge on Xiamen-Shenzhen Railway [J]. Railway Engineering, 2011(2): 29-32.
- [7] 刘峰. 郁江双线特大桥钢桁梁斜拉主桥建造技术[J]. 高速铁路技术, 2014(8): 93-98.
LIU Feng. Technical Review of Construction of Main Cable-stayed Bridge with Steel Truss Girder of Yujiang River Double-line Super Major Bridge [J]. High Speed Railway Technology, 2014(8): 93-98.
- [8] 章耀林. 银川机场黄河桥钢桁梁柔性拱施工关键技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(8): 103-106.
ZHANG Yaolin. Key Technologies for Construction of Rigid Truss Flexible Arch of the Yinchuan Airport Yellow River Bridge [J]. Railway Construction Technology, 2020(8): 103-106.
- [9] 李佳莉, 张谢东, 刘英荣, 等. 灌河特大桥平行弦合龙控制技术[J]. 铁道建筑, 2017(9): 64-67.
LI Jiali, ZHANG Xiedong, LIU Yingqi, et al. Control Technique in Closure of Parallel Chords for Guanhe River Super-large Bridge [J]. Railway Engineering, 2017(9): 64-67.
- [10] 封仁博, 洪钊, 崔太雷. 连盐铁路灌河特大桥主桥钢桁梁柔性拱施工关键技术[J]. 铁道建筑, 2017(08): 42-44.
FENG Renbo, HONG Zhao, CUI Tailei. Key Construction Techniques of Main Span Steel Truss Girder Flexible Arch of Guanhe Super-long Bridge on Lianyungang-Yancheng Railway [J]. Railway Engineering, 2017(08): 42-44.
- [11] 蔺鹏臻, 刘应龙, 何志刚. 高速铁路连续钢桁柔性拱桥的施工线形控制[J]. 铁道工程学报, 2019(11): 45-50, 73.
LIN Pengzhen, LIU Yinglong, HE Zhigang. Construction Alignment Control of Continuous Steel Truss Girder and Flexible Arch Bridge of High-Speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019(11): 45-50, 73.