

DOI: 10.7672/sgjs2026080069

乌海黄河特大桥结构设计与施工*

任亮¹, 李恩良², 杜宝军², 宁灿程³, 马熙伦⁴, 黄清华⁵, 张金龙⁵, 杨西⁶

(1. 蒙冀铁路有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010000; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308;
3. 中国国家铁路集团有限公司, 北京 100010; 4. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021;
5. 中铁十局集团有限公司, 山东 济南 250010; 6. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222)

[摘要] 包银高速铁路乌海黄河特大桥严格遵循防洪评价及通航论证的批复要求, 主桥采用(80+80+310+80+80)m跨径布置的混合箱梁斜拉桥结构, 创新性地采用“双向大位移支座+纵横向阻尼器+柔性防震落梁”三位一体的综合支撑约束体系。桥塔采用具有良好抗震性能的花瓶形混凝土结构, 包头侧塔高114.5m, 银川侧塔高118m。全桥主梁总长632.4m, 采用钢-混凝土组合结构形式, 两端各121.2m采用混凝土箱梁以保证结构稳定性, 中部390m采用自重更小的钢箱梁, 其单箱五室宝石型截面配合半敞开后板型钢混结合段的设计, 有效优化了结构受力性能。全桥布置56对呈扇形分布的平行钢丝斜拉索, 其中塔端采用齿块锚和钢锚梁组合式锚固方案, 梁端则采用预埋式锚拉板锚固方案。分析计算结果表明, 该桥在结构刚度、强度、轨道平顺性及风-车-桥耦合动力响应等方面均完全符合规范要求。本项目的研究和设计在适应高烈度地震区的综合支撑约束体系、轻量化箱梁与钢混结合段构造、斜拉索锚固技术及钢箱梁施工工艺等方面取得了一系列创新性成果。

[关键词] 桥梁; 斜拉桥; 锚固; 悬臂拼装; 设计; 施工技术

[中图分类号] U448.27

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0069-05

Structure Design and Construction of Wuhai Yellow River Bridge

REN Liang¹, LI Enliang², DU Baojun², NING Cancheng³, MA Xilun⁴, HUANG Qinghua⁵,
ZHANG Jinlong⁵, YANG Xi⁶

(1. Meng Ji Railway Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010000, China; 2. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China; 3. China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100010, China; 4. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 5. China Railway No. 10 Engineering Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250010, China; 6. China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Wuhai Yellow River Bridge of Baotou-Yinchuan High-speed Railway strictly follows the approval requirements of flood control evaluation and navigation demonstration, the main bridge adopts the hybrid box girder cable-stayed bridge structure with span arrangement of (80+80+310+80+80) m, and innovatively adopts the “bi-directional large-displacement bearing + longitudinal and transversal dampers + flexible anti-vibration drop beams” trinity comprehensive support restraining system, which is the best choice to support and restrain the bridge. The bridge tower adopts vase-type concrete structure with good seismic performance, the height of the tower on the Baotou side is 114.5m, and the height of the tower on the Yinchuan side is 118m. The total length of the main girder is 632.4m, adopting the form of steel-concrete combination structure, the concrete box girder is used for 121.2m at each end to ensure the stability of the structure, and the steel box girder of lower weight is used for the middle part of the bridge of 390m, and the jewel-type cross section of the single box and five chambers is combined with the design of the back plate of the half-open chamber. The design of the steel-concrete combined section effectively optimizes the structural stress performance. The bridge is equipped with 56 pairs of fan-shaped

* 国家自然科学基金(52368025)

[作者简介] 任亮, 高级工程师, E-mail: 2236214440@qq.com

[收稿日期] 2025-07-06

parallel steel wire cable ties, of which the tower end adopts the combined anchoring scheme of tooth block anchor and steel anchor beam, and the girder end adopts the pre-buried anchor plate anchoring scheme. The analysis and calculation results show that the bridge fully meets the specification requirements in terms of structural stiffness, strength, track smoothness and wind-vehicle-bridge coupling dynamic response. Through the design and research of this project, a series of innovative results are achieved in the comprehensive support restraint system adapted to high intensity seismic zone, lightweight box girder and steel-concrete combined section structure, cable-stayed cable anchorage technology and steel box girder construction process.

Keywords: bridges; cable stayed bridges; anchorages; cantilever assembly; design; construction

1 工程概况

包银高速铁路是我国高速铁路网的关键构成部分,隶属于“八纵八横”主骨架。该线路以包头站为起点,横跨内蒙古多座重要城市(包括包头、巴彦淖尔、鄂尔多斯及乌海),最终抵达宁夏银川站,全程设计时速为250km。

作为全线重点控制性工程,乌海黄河特大桥的选址位于内蒙古乌海市与宁夏石嘴山市交界地带。该河段为弯曲的“S”形河道,两岸无护坡及导流设施,300年一遇的洪峰流量可达 $6\,520\text{m}^3/\text{s}$ 。河床整体较稳定,汛期主河槽宽约600m,铁路线与黄河主槽的交叉角度为 101° 。

此外,桥址两岸地形存在明显差异:包头一侧地势较高,而银川侧因泥沙淤积形成河汉与沙洲,两岸高差约为11m。具体桥梁平面布置如图1所示。

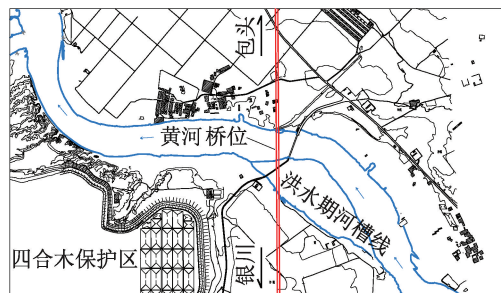


图1 桥梁平面布置

Fig.1 Plan layout of the bridge

桥址所在区域气候寒冷,常年平均气温 9.84°C ,极端气温记录显示,最高可达 41°C ,最低曾达 -28.9°C 。在地质条件方面,地层主要由第四系全新统人工填筑土层(Q_4^{ml})及冲积层(Q_4^{al})构成,包括粉土、粉质黏土、黏土及各类砂土(粉砂、细砂、中砂、粗砂、砾砂)和圆砾土(细圆砾土、粗圆砾土)。此外,上更新统冲洪积层($Q_3^{\text{al+pl}}$)主要由黏性土、砂类土及圆砾土组成。经检测,地下水位以上20m范围内地层在地震作用下无液化风险。该场地属II

类土,设计地震动峰值加速度为 $0.222g$,罕遇地震下则达 $0.446g$,地震动特征周期分别为 $0.5, 0.6\text{s}$ 。在水文条件方面,桥位处于规划IV级航道范围内,主汛期为7—9月,而凌汛则集中在11月至次年3月。综合考虑防洪评价、通航要求及桥型比选研究^[1-3],最终确定主桥采用 $(80+80+310+80+80)\text{m}$ 混合箱梁斜拉桥结构跨越黄河。

2 总体方案

乌海黄河特大桥主桥采用 $(80+80+310+80+80)\text{m}$ 半漂浮体系钢混混合箱梁斜拉桥,主梁全长 632.4m ,主梁两端各 121.2m 为混凝土箱梁,中间 390m 采用钢箱梁。采用花瓶形混凝土桥塔,P44,P45号桥塔含塔座全高分别为 $114.5, 118\text{m}$ 。全桥设置56对斜拉索,采用扇形布置。边墩、辅助墩采用圆端形实体桥墩,均采用钻孔桩基础。主桥立面布置如图2所示。

主桥处于高烈度震区,在总结同类桥梁抗震措施的基础上^[4-7],经过多方案研究^[2],最终采用“双向大位移支座+纵横向阻尼器+柔性防落梁装置+冗余防撞挡块”新型综合抗震约束体系。该约束体系在所有支点的一侧设置纵向滑动支座,另一侧设置多向滑动支座;在梁底与主塔下横梁间设置纵、横向阻尼器,在主梁侧面与中塔柱间设置冗余防撞挡块;在辅助墩处设置纵向阻尼器;在边墩和辅助墩处设置横向柔性防落梁装置。在正常使用状态和多遇地震作用下,桥梁结构的竖向支撑和横向限位主要依靠纵向滑动支座和多向滑动支座实现。当遭遇 >1.5 倍多遇地震强度时,系统将启动特殊抗震机制:纵向滑动支座的横向剪力销会首先断裂,触发支座横向大位移功能。此时,纵向抗震通过阻尼器实现位移控制和能量耗散;横向抗震则通过主塔处设置的阻尼器完成相同功能,同时辅以防撞挡块防止梁塔碰撞。辅助墩和边墩位置采用柔性防落梁装置进行横向位移限制和能量消散。详细的抗震约束系统布置如图3所示。

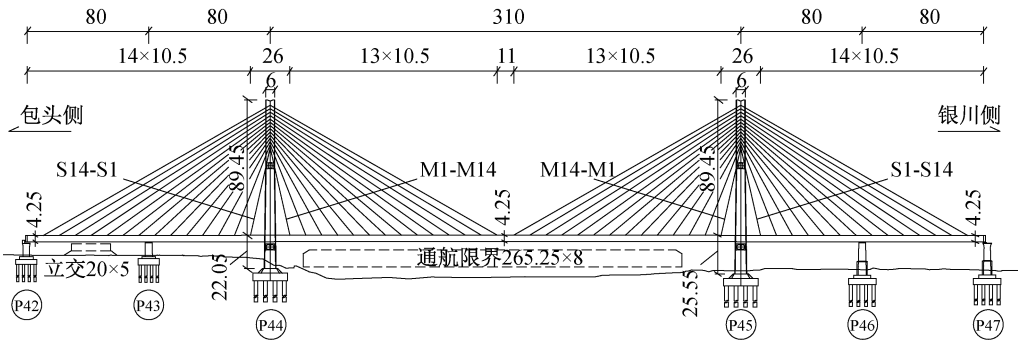


图2 主桥立面布置(单位:m)

Fig. 2 Elevation layout of main bridge (unit: m)

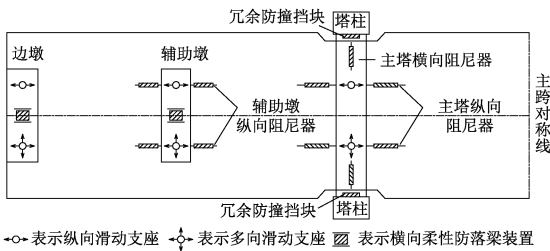


图3 1/2主桥抗震约束体系布置

Fig. 3 Layout of 1/2 main bridge seismic restraint system

3 结构设计

3.1 桥塔

桥塔采用花瓶形,桥面以上有效塔高为89.45m,上、中塔柱高分别为42.2、55.0m,包头、银川侧下塔柱高分别为14.3、17.8m,桥塔全高分别为114.5、118.0m,上塔柱横向中心距为14.0m,下横梁处塔柱轴线交点横距22.4m,在下塔柱迎水坡设置破冰棱。主塔采用C55混凝土,上、下横梁为预应力混凝土构件,塔柱为钢筋混凝土构件,下塔柱、下横梁为单箱双室截面,其他为单箱单室截面,主塔各构件内腔全部连通,均设有检修通道。主塔柱截面通过大尺度倒角、塔顶通过设置内倾角等方式提升美观度。桥址处于高烈度震区,主梁在主塔处采用钢箱梁,降低了桥塔荷载,上塔柱拉索锚固采用齿块锚和钢锚梁相结合的方式降低塔壁厚度约0.4m,进一步提高了桥塔的抗震性能。桥塔布置如图4所示。

3.2 主梁

主梁采用钢混混合箱梁,全长632.4m,中间钢箱梁全长390m,两端混凝土梁长均为121.4m,中间设置钢混结合段,箱梁采用气动布局较好的宝石型单箱五室截面,标准梁高4.25m,中心梁高4.34m,钢箱梁顶面采用6cm厚UHPC铺装^[8-9],混凝土箱梁顶面采用6cm厚聚丙烯腈纤维混凝土铺装。箱梁内底板上设有钢格栅板检修通道。

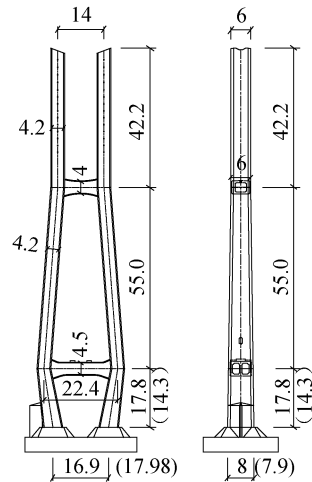


图4 桥塔布置(单位:m)

Fig. 4 Layout of bridge tower (unit: m)

钢箱梁采用Q370qE钢,共分为39个节段,含2个钢混结合段、8个支架拼装节段、28个悬臂拼装节段和1个合龙段,悬拼节段一般长10.5m。顶板厚16mm,采用U肋和板肋加劲,底板、腹板根据受力需要采用16~32mm多种厚度规格的钢板,节段间除顶板加劲肋采用栓接外,其他区域均采用焊接。

混凝土箱梁采用C55混凝土,为三向预应力结构。一般断面腹板、底板厚度均为40cm,顶板厚度为38.5cm,边箱梁风嘴板厚0.2m,在边支点、辅助墩支点处线性加厚。在斜拉索吊点处设置横隔板,以加强箱梁的整体性。混凝土梁分3段浇筑,长度为50.0、50.0、21.2m,边腹板在斜拉索吊点处加厚至0.7m以便预埋锚拉板。

在总结、吸收的基础上采用半敞开格室后板型钢混结合段^[10],提高了混凝土浇筑效率与质量。

主梁截面布置如图5所示,钢混结合段立面布置如图6所示。

3.3 拉索及锚固

斜拉索采用直径7mm、标准抗拉强度1770MPa平行钢丝拉索,采用PES(C)7-139,PES(C)7-151,

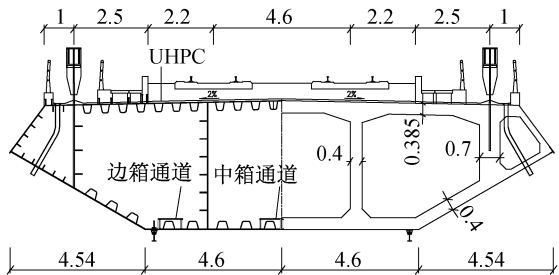


图5 主梁截面布置(单位:m)

Fig. 5 Layout of main girder section (unit: m)

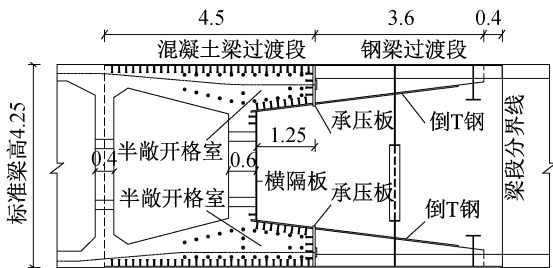


图6 钢混结合段立面布置(单位:m)

Fig. 6 Elevation layout of steel-concrete combined section (unit: m)

PES (C) 7-163, PES (C) 7-187, PES (C) 7-199, PES(C)7-211 共 6 种规格。塔上索间距 2.5m, 梁上索间距 10.5m。塔端 1~6 号拉索采用齿块锚, 7~14 号拉索采用钢锚梁进行锚固, 梁端采用锚拉板进行锚固, 钢梁段锚拉板由边腹板伸出桥面进行连接, 混凝土梁段边腹板局部加厚并预埋锚拉板^[11]。同时, 为防止斜拉索风雨振, 在部分斜拉索下端安装磁流变阻尼器。

钢锚梁和混凝土梁段预埋锚拉板技术的应用, 使得该桥上塔柱壁厚和主梁边腹板厚度与一般同跨度斜拉桥相比分别减小约 0.4、0.5m, 大幅度降低了主体结构自重, 提升了抗震性能。钢锚梁和锚拉板分别如图 7、8 所示。

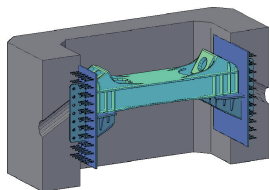


图7 钢锚梁立面

Fig. 7 Elevation of steel anchor beam

4 主桥施工过程及控制

4.1 施工过程

桥塔采用分段爬模法施工, 分段长度 3~6m, 上、下横梁同相邻的塔柱节段同步整体浇筑施工。中塔柱施工过程中采用临时横撑支承。

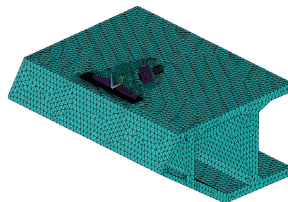


图8 混凝土梁段锚拉板

Fig. 8 Anchor tension plate at concrete girder section

主梁制造采用纵向分段、横向分块方案。桥址区黄河河道不具备浮运条件, 为方便公路运输, 提高施工效率, 每个钢箱梁节段横向划分为 5 个条块, 每个条块在工厂内加工完成, 运输至现场后再在胎架上从中间箱体至边箱体横向组焊成 1 个梁段, 如图 9 所示。同时, 为减少黄河行洪、行凌对施工的影响, 经研究混凝土箱梁采用分段支架现浇及钢箱梁段采用“梁端提梁、桥面运梁、旋转起重机组拼”的施工方

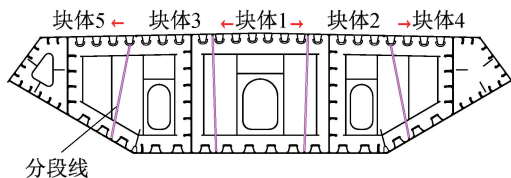


图9 钢箱梁节段分块

Fig. 9 Blocking of steel box girder segments

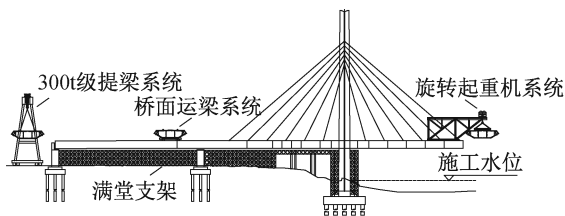


图10 桥半梁施工方案

Fig. 10 Construction scheme of bridge half girder

4.2 施工控制

采用 MIDAS Civil 建立空间有限元模型进行分析计算, 采用 BSAS 进行校核计算, 如图 11 所示。成桥状态下, 主梁跨中上拱 18.8cm, 辅助跨跨中下挠 0.3cm, 边跨跨中上拱 0.6cm, 44、45 号主塔塔顶向边跨侧偏移 4.4、4.7cm, 整体呈梁拱塔偏状态, 如图 12 所示。

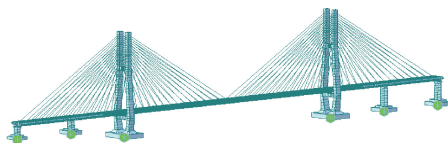


图11 桥梁有限元模型

Fig. 11 The finite element model of the bridge

在双线静活荷载作用下, 主梁梁端转角为

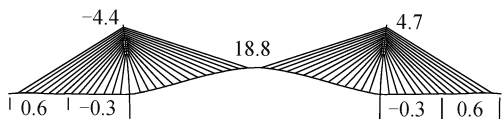


图 12 1/2 梁部施工方案(单位:cm)

Fig. 12 Construction program for 1/2 girder section(unit:cm)

0.113%,主跨跨中竖向挠跨比为 1/731。主跨跨中徐变挠度为 40.2mm。运营工况下结构检算结果为:①主塔截面最大压应力为 21.1MPa,钢筋最大拉应力为 137.7MPa,最大裂缝宽度为 0.15mm;②混凝土箱梁截面最大压应力为 18.3MPa,截面强度、抗裂安全系数分别为 2.01,1.22;③钢箱梁第一体系截面拉应力为 118MPa,顶板 U 肋最大控制疲劳应力幅为 43.2MPa;④斜拉索边索最大索力为 5162kN,最小安全系数为 2.59,最大疲劳应力幅为 129.8MPa。其均满足规范要求。

同时,对主桥开展了轨道平顺性分析^[13-15],采用 60m 弦长按中点弦测法计算时,轨道不平顺值最大为 7.77mm,轨向最大偏差为 4.43mm,小于规范控制值 10mm 的要求。对主桥开展风-车-桥耦合动力仿真分析,结果表明,高速列车以时速 250km 通过桥梁时,列车的各项动力响应指标均在容许值以内,列车乘坐舒适性达到“良好”以上。

5 结语

乌海黄河特大桥主桥地处高烈度震区,受黄河桥位、凌汛、防洪等因素限制,采用(80+80+310+80+80)m 混合梁斜拉桥方案,结合设计研究取得了多项创新成果。

1)采用“双向大位移支座+纵横向阻尼器+柔性防震落梁”的综合抗震体系,选择黏滞阻尼器适宜的耗能时刻,解决了国内首座高烈度震区铁路斜拉桥的抗震难题。

2)边跨采用轻量化混凝土箱梁截面、混合箱梁和半敞开隔室后板型钢混结合段并将结合段设置在次边跨跨中,解决了高速铁路 80m 大边跨斜拉桥的刚度控制难题和高烈度震区主塔横向受力难题,并降低了钢混结合段施工难度。

3)斜拉索梁端采用预埋式锚拉板、塔端采用钢锚梁的锚固方案,方便了斜拉索检修,且有效降低了主梁边腹板和上塔柱壁厚,减小了结构自重,提升了主桥抗震性能。

4)在黄河上首次采用宽体箱梁节段横向分块施工和“梁端提梁、梁上运梁、旋转起重机悬拼”的钢梁悬拼施工方案,减少了黄河行洪度凌对施工的

影响,缩短了工期。

参考文献:

- [1] 孙宗磊,李恩良.包银高铁乌海黄河桥主桥方案研究[J].中国铁道科学,2022,43(1):75-84.
SUN Z L,LI E L. Study on main bridge scheme of Wuhai Yellow River Bridge of Baotou-Yinchuan High-speed Railway[J]. China railway science,2022,43(1):75-84.
- [2] 李恩良.高烈度震区高速铁路斜拉桥关键技术研究[J].铁道工程学报,2020,37(10):60-65.
LI E L. Research on the key technologies of high-speed railway cable-stayed bridge in high-intensity earthquake zone[J]. Journal of railway engineering society,2020,37(10):60-65.
- [3] 孙宗磊,陈良江,杨少军,等.铁路桥梁现代化设计和高质量发展的思考[J].铁路工程技术与经济,2024,39(5):1-5,21.
SUN Z L,CHEN L J,YANG S J,et al. Thoughts on modern design and high-quality development of railway bridges[J]. Railway engineering technology and economy,2024,39(5):1-5,21.
- [4] 徐艳,嵇冬冰,王瑞龙.H型斜拉桥塔塔横桥向结构抗震设计与分析[J].土木建筑与环境工程,2014(6):1-7.
XU Y,JI D B,WANG R L. Transverse seismic design and analysis of an H type bridge tower cable stayed bridge[J]. Journal of civil, architectural & environment engineering,2014(6):1-7.
- [5] 陈永祚.桥梁工程液体黏滞阻尼器设计与施工[M].北京:中国铁道出版社,2012.
CHEN Y Q. Design and construction of liquid viscous damper for bridge engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House,2012.
- [6] 杨喜文.宁波甬江铁路斜拉桥的地震位移控制[J].结构工程师,2011,27(6):78-83.
YANG X W. Seismic displacements control for Yongjiang River Railway Cable-stayed Bridges located in Ningbo[J]. Structural engineers,2011,27(6):78-83.
- [7] 苗润池,李龙安,屈爱平.基于地震作用的大跨度混合梁斜拉桥钢混结合点位置优化分析[J].世界桥梁,2017,45(5):76-80.
MIAO R C,LI L A,QU A P. Optimization of steel-concrete joint location of long-span hybrid cable-stayed bridge based on seismic action[J]. World bridges,2017,45(5):76-80.
- [8] 李锋,孔文艺,罗健,等.超高性能混凝土(UHPC)的配制及应用探究[J].混凝土与水泥制品,2019(7):26-29.
LI F,KONG W Y,LUO J,et al. Discussion on preparation and application of ultra high performance concrete(UHPC)[J]. China concrete and cement products,2019(7):26-29.
- [9] 魏林.超高性能混凝土在沪通长江大桥上的应用[J].铁道工程学报,2019,36(5):85-89.
WEI L. Application of ultra-high performance concrete in Shanghai-Nantong Yangtze River Bridge[J]. Journal of railway engineering society,2019,36(5):85-89.
- [10] 苏伟,杜宝军,李恩良,等.一种半敞开格室后板型钢混结合段:CN213086571U[P].2021-04-30.

- [7] 于新,刘云,吴建涛. 混凝土箱梁桥沥青混凝土铺装层温度应力分析[J]. 北京交通大学学报,2011,35(4):99-102,106.
YU X, LIU Y, WU J T. Thermal stress analysis of asphalt concrete pavement on concrete box girder bridge [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(4): 99-102, 106.
- [8] 苏子元. 寒区钢桥面浇注式沥青混凝土低温指标及铺装技术研究[D]. 西安:长安大学,2018.
SU Z Y. Study on steel bridge deck gussasphalt low-temperature index and pavement technology in cold regions [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [9] FAN X Y, LUO R. Experimental study on crack resistance of typical steel-bridge-deck paving materials [J]. Construction and building materials, 2021, 277: 1223-15.
- [10] 逯彦秋,陈宜言,孙占琦. 改善钢桥面铺装层高温作用的有效措施[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(7):115-119.
LU Y Q, CHEN Y Y, SUN Z Q. Effective measures to lower the temperature for steel bridge deck pavement [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(7): 115-119.
- [11] 张利东,曹健,张羽彤,等. 季冻区中小跨径钢桥面铺装的力学响应[J]. 筑路机械与施工机械化,2020,37(6):38-43.
ZHANG L D, CAO J, ZHANG Y T, et al. Mechanical responses of steel deck pavement on small-medium span bridges in seasonally frozen area [J]. Road machinery & construction mechanization, 2020, 37(6): 38-43.
- [12] FAN L, YANG W P, ZHOU D, et al. Temperature distribution and mechanical response of orthotropic steel bridge deck during paving of gussasphalt pavement [J]. International journal of steel structures, 2021, 21(1): 315-328.
- [13] LI H B, SHENG Y P, WANG Q. Study on thermal stresses the extreme temperature in bridge deck pavements using FEM analysis [J]. Advanced materials research, 2012: 1718-1721.
- [14] 钱振东,罗剑,敬森森. 沥青混凝土钢桥面铺装方案受力分析[J]. 中国公路学报,2005,18(2):61-64.
QIAN Z D, LUO J, JING M M. Mechanical analysis of asphalt concrete paving projects on steel bridge deck [J]. China journal of highway and transport, 2005, 18(2): 61-64.
- [15] 钱航. 温度-荷载耦合作用下大跨径悬索桥桥面铺装力学分析[D]. 南京:东南大学,2017.
QIAN H. Research on mechanical properties of long span suspension bridge deck surfacing subjected to coupling of temperature and load [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [16] 姚通. 基于 ABAQUS 的张承高速公路沥青路面永久变形影响因素分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2020.
YAO T. Analysis on influencing factors of permanent deformation of asphalt pavement of Zhangcheng Expressway based on ABAQUS [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.
- [17] 陈志林. 湿热地区新型钢桥面板复合铺装结构温度场及车辙分析[D]. 长沙:长沙理工大学,2021.
CHEN Z L. Temperature field and rutting analysis of composite pavement structure on new type steel bridge deck in hot and humid area [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2021.
- [18] 马涛,廖公云,黄晓明. Abaqus 有限元软件在道路工程中的应用[M]. 3版. 南京:东南大学出版社,2021.
MA T, LIAO G Y, HUANG X M. Application of Abaqus finite element software in road engineering [M]. 3rd ed. Nanjing: Southeast University Press, 2021.
- [19] 徐靖涵,郑木莲. 桥面铺装有限元模拟与应用研究进展[J/OL]. 工程力学: 1-25 [2024-04-06].
XU J H, ZHENG M L. Research progress of finite element simulation and application of deck pavement [J/OL]. Engineering mechanics: 1-25 [2024-04-06].
- [20] 严作人. 层状路面体系的温度场分析[J]. 同济大学学报, 1984(3): 76-85.
YAN Z R. Temperature field analysis of layered pavement system [J]. Journal of Tongji University, 1984(3): 76-85.

(上接第 73 页)

- SU W, DU B J, LI E L, et al. A semi-open compartment rear panel steel-concrete composite section: CN213086571U [P]. 2021-04-30.
- [11] 苏伟,杜宝军,李恩良,等. 一种混凝土箱梁斜拉桥锚拉板预埋结构:CN213925814U [P]. 2021-08-10.
SU W, DU B J, LI E L, et al. A pre embedded structure for anchor plates in concrete box girder cable-stayed bridges: CN213925814U [P]. 2021-08-10.
- [12] 李鹏程,陈平. 360 度旋转式大型悬臂提梁机的设计及应用[J]. 安徽建筑,2014,21(3):105-108.
LI P C, CHEN P. Design and application of large cantilever rubber-tired gantry crane with 360 degree [J]. Anhui architecture, 2014, 21(3): 105-108.
- [13] 李的平,文望青,严爱国,等. 大跨度斜拉桥上铺设无砟轨道工程实践[J]. 铁道工程学报,2020,37(10):78-82.
LI D P, WEN W Q, YAN A G, et al. Engineering practice of laying ballastless track on long span cable-stayed bridge [J]. Journal of railway engineering society, 2020, 37(10): 78-82.
- [14] 朱志辉,闫铭铭,李晓光,等. 大跨度斜拉桥—无砟轨道结构变形适应性研究[J]. 中国铁道科学,2019,40(2):16-24.
ZHU Z H, YAN M M, LI X G, et al. Deformation adaptability of long-span cable-stayed bridge and ballastless track structure [J]. China railway science, 2019, 40(2): 16-24.
- [15] 李秋义,张晓江,韦合导. 商合杭高铁裕溪河特大桥铺设无砟轨道关键技术研究[J]. 中国铁路,2020(6):44-51.
LI Q Y, ZHANG X J, WEI H D. Research on the key technology of laying ballastless track on Yuxi River Super Long Bridge of Shangqiu-Hefei-Hangzhou High Speed Railway [J]. China railway, 2020(6): 44-51.