

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.206



钢桥 2020 年度研究进展

郑凯锋¹,冯霄暘¹,衡俊霖^{2,3},张宇⁴,朱金¹,雷鸣¹,王亚伟⁵,胡博¹,
熊籽跃¹,唐继舜¹,李俊¹,叶华文¹,栗怀广¹

(1.西南交通大学 土木工程学院,成都 610036;2.深圳大学 土木与交通工程学院,广东 深圳 518000;
3.代尔夫特理工大学 土木工程与地球科学学院,荷兰 代尔夫特 2628 CN;4.中铁二院工程集团
有限责任公司,成都 610036;5.中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所,北京 100081)

摘要:为促进钢桥技术的发展,系统梳理了近年来国内外钢桥领域的研究热点与前沿。首先,回顾了中国大型钢桥 2020 年的重要建设成就与技术进步,然后分别对钢桥领域主要研究方向取得的最新进展进行系统总结,同时,对钢桥领域各方面做出的诸多具有开创性意义的工作进行详细介绍,以期对钢桥领域的工程应用与学术研究提供主要信息与借鉴。

关键词:钢桥;研究进展;钢桥建设成就;钢材材料;钢桥面;钢桥稳定;多灾害动力分析

中图分类号:U448.36 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0053-17

State-of-the-art review of steel bridges in 2020

ZHENG Kaifeng¹, FENG Xiaoyang¹, HENG Junlin^{2,3}, ZHANG Yu⁴, ZHU Jin¹, LEI Ming¹,
WANG Yawei⁵, HU Bo¹, XIONG Ziluo¹, TANG Jishun¹, LI Jun¹, YE Huawen¹, LI Huaiguang¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, P. R. China; 3. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft 2628 CN, The Netherlands; 4. China Railway Eryuan Engineering Group Co. LTD, Chengdu 610031, P. R. China; 5. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, P. R. China)

Abstract: In order to promote the development of steel bridge technology, research hot issues and frontiers in recent years in the field of steel bridges at home and abroad were systematically sorted out. Firstly, it reviews the recent construction achievements and technological progress of large-scale steel bridges in China in 2020. Then the latest progress made in the main research directions in the field of steel bridges are systematically summarized. At the same time, many pioneering work done in various aspects of the steel bridge are introduced in detail. It is expected to provide basic information and reference for engineering applications and academic research in the field of steel bridges.

Keywords: steel bridges; research progress; achievements in construction of steel bridges; steel; orthotropic steel deck; stability of steel bridges; dynamic analysis of multiple disasters

在去年撰写《2019 年度进展:钢桥部分进展》的基础上,文章主要回顾与总结 2020 年中国大型钢桥的建设成就与技术进步、钢桥的新型与特殊材料和结构形式研究进展、受腐蚀钢桥的性能下降及其加强研究进展、钢桥面研究进展、钢桥稳定研究进展和钢桥的多灾害动力分析研究进展等问题。

1 中国大型钢桥的建设成就与技术进步

1.1 世界最大跨度拱桥:平南三桥

2020 年 12 月建成通车的广西平南三桥为中承式钢管混凝土桁架拱桥,主拱跨度 560 m(拱跨桥面长 575 m);桥面全宽 36.5 m,设置双向 4 车道公路、2 条非机动车道和 2 条人行

收稿日期:2021-07-25

作者简介:郑凯锋(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事钢桥研究,E-mail:kfzheng@swjtu.cn.

道,公路设计行车速度为 60 km/h;全桥总用钢量 1.5 万 t,成为世界第一跨度拱桥^[1],如图 1 所示。

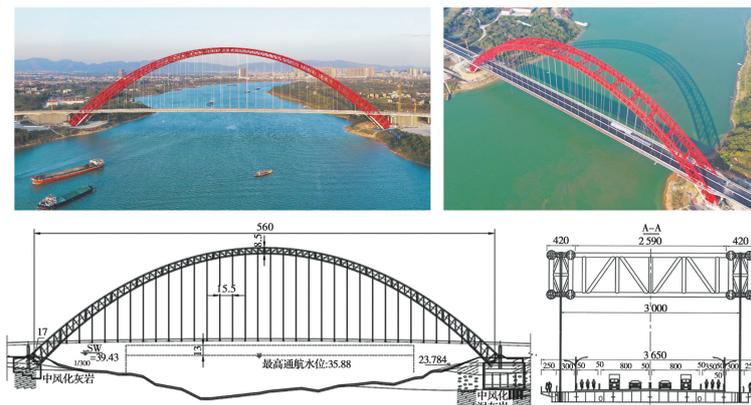


图 1 平南三桥^[1]

桥梁主拱为双侧四肢钢管混凝土 N 形桁架结构,矢跨比为 1:4,拱轴系数为 1.5,主拱中心距为 30.1 m;拱顶桁高 8.5 m;拱脚径向桁高 17.0 m;桁架节间 7.75 m,吊杆间距 15.5 m,桁架弦杆钢管直径 1 400 mm、厚度为 26、30、34 mm,腹杆直径 700 mm、厚度 14 mm;横撑直径 850 mm、厚度 18 mm;弦杆钢管采用高强抗层状撕裂钢材 Q420qD-25Z,其它钢管采用 Q345C 钢;弦管内填 C70 自密实无收缩复合膨胀混凝土;吊杆采用 37 Φ 15.2 环氧喷涂钢绞线整束挤压索,钢丝标准强度 1 960 MPa,防腐设计保护年限大于 30 年,免维修周期 15 年;中间 24 根吊杆间纵向水平连接单股 Φ 15.2 环氧喷涂钢绞线作为抗风索;主梁为主次纵横梁组成的格子梁,主横梁中心高度 2.2 m,次横梁中心高度 1.2 m,主横梁和主纵梁底板采用 Q420qD 钢,其它板采用 Q345C、Q235C 和 Q235B 钢等;车行道采用在 8 mm 钢底板(底模)与 PBL 连接件上的浇筑 C40 钢纤维混凝土 142 mm(承托处 240 mm),铺设 50 mm 的改性沥青混凝土;人行道为板式纵横肋的正交板,铺设 10 mm 的聚氨酯橡胶面层;桥梁南岸采用明挖扩大基础,北岸采用地下连续墙基础。桥梁在四级连续真空泵送 C70 自密实无收缩复合膨胀的管内高品质混凝土、圆形地连墙与卵石层注浆加固的新型拱座基础、300 t 大吨位缆索吊机及其 200 m 装配式塔架的 20 mm 精度自动精确控制、扣索一

次张拉等方面取得创新性技术成果。

2009 年建成重庆朝天门长江大桥(主跨 552 m)、2003 年上海卢浦大桥(主跨 550 m)、2013 年四川合江波司登大桥(钢管混凝土桁架拱桥,主跨 530 m)、2019 年湖北秭归长江大桥(主跨 519 m),中国囊括世界拱桥跨度的前 5 位;2020 年建成云南大理至瑞丽铁路怒江大桥(主跨 490 m)、2013 年建成南广铁路广东省肇庆西江大桥(主跨 450 m)、2016 年建成沪昆高铁贵州省晴隆北盘江大桥(主跨 445 m)、2019 年建成成都至贵阳高铁跨越黔西县的鸭池河大桥(主跨 436 m),中国囊括世界铁路拱桥跨度的前 4 位,成为世界拱桥大国与强国。

1.2 世界最大跨度公路与高铁两用悬索桥:五峰山长江大桥

2020 年 12 月,主跨 1 092 m 的江苏五峰山长江公路与高铁两用大桥开通两线铁路。该桥上层为双向 8 车道高速公路,设计行车速度 100 km/h,下层为 4 线铁路,其中 2 线为连锁高铁,设计行车速度 250 km/h,2 线预留,设计速度为 200 km/h,是中国首座公铁两用悬索桥,也是世界上铁路行车速度最高、运行荷载最重的公铁两用悬索桥^[2],如图 2 所示。桥梁综合测试中创造了 275 km/h 的世界铁路悬索桥最高速度纪录。

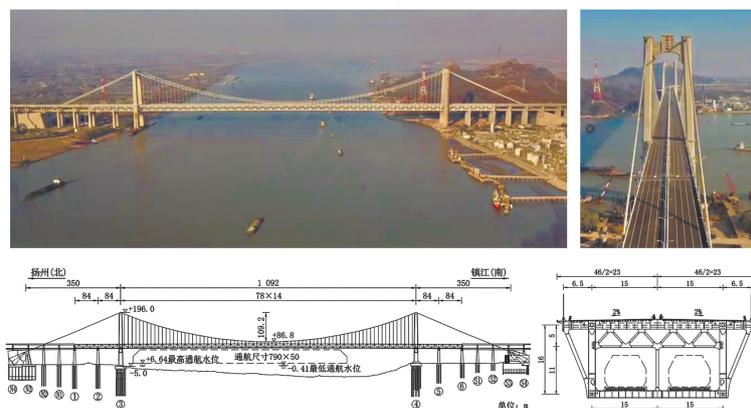


图 2 五峰山长江大桥^[2]

桥梁垂跨比为 1:10;北侧桥塔高 203 m,南侧桥塔高 191 m,塔柱圆形承台直径 40 m、厚 9.5 m,桩基直径 2.8 m。两根主缆直径约 1.3 m,采用锌铝合金镀层平行钢丝索股,每根主缆为 352 股,每股含 127 根直径 5.5 mm 的钢丝(主缆钢丝面积超过日本明石海峡大桥的面积),每索股长度约 1 932 m,重约 47.8 t;索股两端为热铸锚,锚杯内浇注锌铜合金;钢丝标准强度为 1 860 MPa;主缆采用 S 形缠丝、缠包带与除湿系统的防护体系。每处吊点设置 2 根吊索,单根吊索为 337 根直径 5 mm 的钢丝;钢丝标准强度为 1 770 MPa。双层桥面钢桁主梁采用三角形桁架;主梁连续跨度为(84+84+1 092+84+84) m,横断面为倒梯形,每道竖杆处设置吊杆、外侧斜撑(副桁)和三角形桁架式横联(兼顾增强上层横梁刚度的作用),横联中心与下层桥面之间设置吊杆(增强下层横梁刚度);桁高 16 m、两片主桁中心距 30 m、节间长(吊杆中心距) 14 m,主缆中心距 43 m;标准吊装节段长 28 m,最重节段 1 785 t;上、下层桥面均采用板桁结合的正交异性整体桥面,顶板与 U 肋采用双面焊全熔透焊接工艺;桁梁主要采用 Q370qE 钢材,下层铁路道砟槽面板采用轧制不锈钢复合板。采用重力式锚碇,北侧锚碇沉井长 100.7 m,宽 72.1 m,高 56 m,基底置于密实粉细砂层,南侧锚碇地连墙支护圆形扩大基础,内径 87 m,墙厚 1.5 m,最大埋深 40.5 m,基底持力层为微风化凝灰质砂岩。

1.3 世界最长公铁两用海峡大桥:平潭海峡大桥

平潭海峡公铁两用大桥是福州至平潭铁路、长乐至平潭高速公路的海峡公铁两用大桥,始于福州市长乐区松下镇,经人屿岛、长屿岛、小练岛、大练岛到达平潭岛,全长约 16.3 km,其中公铁合建桥梁总长约 9.2 km,含设计速度为 100 km/h 的双向 6 车道高速公路和设计速度为 200 km/h 的双线 I 级铁路,2020 年 10 月和 12 月,公路和铁路分别通车运行。该桥梁是中国第一座公路与铁路两用海峡大桥,也是世界最长的公路与铁路两用海峡大桥^[3],如图 3 所示。

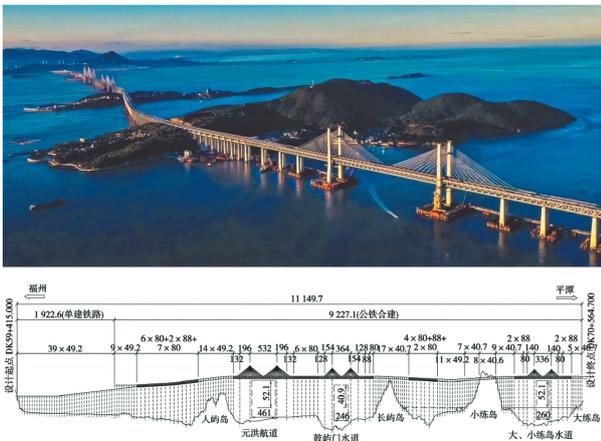


图 3 平潭海峡大桥^[3]

平潭海峡大桥的公铁合建桥梁以双层桥面钢桁架桥为主,包含:元洪航道桥为钢桁梁双层斜拉桥,桥跨布置为(132+196+532+196+132) m,共 1 188 m;鼓屿门航道桥

为钢桁梁双层斜拉桥,桥跨布置为(128+154+364+154+128) m,共 928 m;大小练岛航道桥为钢桁梁双层斜拉桥,桥跨布置为(80+140+336+140+80) m,共 776 m;26 孔 80 m、8 孔 88 m 双层组合桥面全焊钢桁梁桥;还有多孔 49 m、40 m 混凝土梁桥等。3 座斜拉桥主桁均采用 N 形桁架,横断面为倒梯形,桁高 13.5 m,上层桥面宽 35.6 m,下层桥面宽 15 m,除边跨无拉索区采用公路组合桥面外,其余均采用板桁结合的正交异性整体桥面。80 m 和 88 m 跨的双层组合桥面全焊钢桁梁为三角形桁架,横断面为倒梯形,桁高 13.5 m,桁间距 14 m,上层公路采用常规组合桥面,下层铁路采用预应力混凝土槽形板与钢横梁形成的组合桥面;采用在连接上层纵梁之前预压上弦杆的新方法,有效地减小桥面参与主桁共同作用。钢桁结构采用 3 600 t 大型海上浮吊整孔吊装和长段吊装架设,减少高空作业,缩短施工周期。桥梁的深水基础还首次采用 4.5 m 超大直径钻孔桩。桥位常年大风 6 级以上超过 300 天、7 级以上超过 200 天、8 级以上超过 100 天,施工环境恶劣,工程量巨大。

1.4 世界第一座 UHPC 顶板流线型组合箱梁两主跨斜拉桥:南京江心洲长江大桥

2020 年 12 月建成通车的江苏南京江心洲长江大桥(南京长江五桥)为 3 塔两主跨中央双索面组合梁斜拉桥,桥跨布置为(80+218+2×600+218+80) m,长度为 1 796 m。桥梁为双向 6 车道,设计速度为 100 km/h。3 桥塔均为纵向钻石形、内外钢壳内填混凝土组合结构,塔柱上、下部分合并,中间部分分离,中塔高 175.4 m,边塔高 167.7 m。钢壳由内外壁板、竖向加劲肋、水平加劲肋、连接角钢、剪力钉等组成,外壁板厚 14~20 mm,内壁板标准厚度 6 mm,上塔柱钢牛腿附着壁板厚 20 mm,采用 C50 补偿收缩混凝土。内外钢壳既参与受力,又发挥内填混凝土的模板与支架等作用。主梁采用流线型组合箱梁截面,顶板为 17 cm 和 20 cm 厚的粗骨料活性粉末超高性能混凝土(UHPC)板,斜腹板、底板和中间纵腹板等均为钢结构;标准梁段宽 35.6 m,中心梁高 3.6 m,标准吊装梁段长 14.6 m,重 407 t。这是世界上第一座 UHPC 顶板的流线型组合箱梁的两主跨斜拉桥^[4],如图 4 所示。

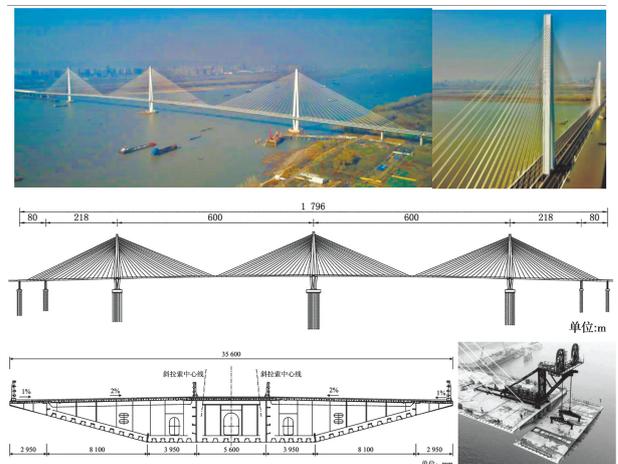


图 4 南京江心洲长江大桥^[4]

1.5 世界最大跨度的连续钢桁梁桥: 宁波三官堂大桥

2020 年 9 月建成通车的浙江宁波三官堂大桥为 (160+465+160) m 桥跨、双向 8 车道全焊连续钢桁架桥, 超过 1991 年建成的 400 m 跨度日本长崎生月大桥, 成为世界最大跨度的连续钢桁梁桥^[5], 如图 5 所示。桥梁采用两片主桁, 中心距 33.7 m, 采用正交异性钢桥面, 桥面全宽 45.9 m; 采用变高、N 形桁架, 跨中桁高 14.5 m、边墩处 15.0 m、中墩处 42.0 m, 标准节间 15.0 m; 桁架主体采用 Q420qE 钢, 钢桥面为 Q345qD 钢; 桥梁在中跨合龙后顶升边支座 800 mm, 以调整主桁和支座内力; 同时, 在梁端设置 4 根直径 65 mm 的高强拉杆, 以承担可能出现的支座负力和提高抗倾覆稳定性。



图 5 三官堂大桥^[5]

2 钢桥的新型与特殊材料和形式研究进展

2.1 形状记忆合金

近年来, Izadi 等^[6]研究了智能铁基形状记忆合金 (Fe-SMA) 在钢桥连接件中的应用。现有的铁路铆接钢桥纵横梁腹板间的双角钢连接因刚度不足, 容易出现疲劳开



图 7 国内外部分公路、铁路和人行不锈钢桥梁 (或部分构件)

2019 年, 堀澤英太郎等^[8]通过数值计算, 研究了两端均为不锈钢的钢构件的抗压和抗弯强度。计算表明, 不锈钢区段长度占比 30% 以下的工字梁抗弯强度不小于普通碳素钢梁的 95%。

裂, 常用加固技术不足以完全解决铆接部位的疲劳损伤问题。智能铁基形状记忆合金 (Fe-SMAs) 具有形状记忆效应, 可以相对容易地使钢梁连接件得到预加力。为此, Izadi 等^[6]专门设计了试验装置 (图 6), 对采用 SMA 加固的双角钢连接件分别进行了静力试验和两次高周疲劳试验, 结果表明, 用 Fe-SMA 板条加强的纵横梁腹板角钢连接的疲劳寿命显著提高。这是形状记忆合金材料在桥梁应用的有益尝试。

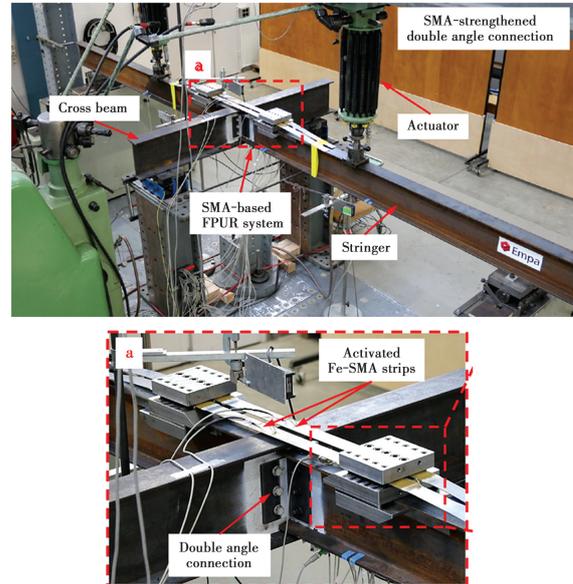


图 6 铁基形状记忆合金板条加强纵横梁腹板角钢连接的高周疲劳试验^[6]

2.2 不锈钢

不锈钢的突出特点是耐腐蚀性能较强, 结构更安全、耐久, 同时, 材料的回收效益更高。多年来, 部分发达国家已经尝试研发小型的不锈钢公路、铁路和人行 (构件) 桥梁 (如图 7 所示), 虽然其建造成本较高, 约为碳素钢的 4 倍, 但桥梁结构性能比传统耐候钢桥梁更好, 外表总体上美观, 后期维护成本相对较低。已有研究表明, 对于特定结构与功能桥梁的全寿命设计, 不锈钢桥梁具有一定的经济可比性^[7]。因此, 欧洲规范 3 (EN 1993-1-4) 有专门条款“关于不锈钢的补充规定”, 包含对不锈钢母材和螺栓连接与焊接等的要求, 美国 AISC 设计指南也有“结构不锈钢”的相关规定。

2019 年, Graciano 等^[9]研究了细长奥氏体不锈钢工字梁在局部荷载下的抗力, 对细长奥氏体不锈钢工字梁在局部荷载作用下的抗力进行综合评估, 通过试验数据与数值计算结果的对比表明, 当局部荷载长度与腹板高度比增大或腹板高

度增加时,细长奥氏体不锈钢板梁的极限抗力显著提高。

2020年,Zhang等^[10]为研究不锈钢螺栓与ASTM A1010钢桥主梁之间的电化腐蚀风险,分别采用ASTM A320 B8和A193 B6两种不锈钢螺栓进行了电化学腐蚀试验。结果表明,B6不锈钢在试验过程中出现严重的局部腐蚀,因此,不适合用于A1010钢材;另一方面,B8不锈钢螺栓连接A1010钢梁没有电化腐蚀风险。

2020年,Dissanayake等^[11]采用有限元软件ABAQUS对冷弯成型的不锈钢空心翼缘梁的剪切效应进行了详细数值模拟;在有限元模型验证的基础上,研究了不同截面高度、截面厚度等几何参数的影响以及不同等级不锈钢的影响;数值计算结果表明,矩形不锈钢空心翼缘梁的腹板中存在明显的对角应力场,而三角形空心翼缘梁的腹板中应力分布比较均匀。

2.3 高强度钢

高强度钢(HSS)通常指名义屈服强度在460 MPa以上的钢材。由于其强度更高,部分减少了结构的截面尺寸和自重,从而节省了材料,结构更轻,能更快地吊装和安装。

Le等^[12]对采用BISPLATE-80和BISPLATE-100高强度钢制作的8根焊接工形梁在纯弯曲和弯矩梯度条件下进行了试验研究,并用ABAQUS有限元软件对其进行相应的数值模拟分析,数值计算结果与试验结果吻合良好。在试验中,分别采用3根BISPLATE-80和5根BISPLATE-100工形梁进行横向弯扭和局部屈曲试验,得到其屈曲响应,包括弯扭屈曲和翼缘局部屈曲失效模式。试验和数值模拟结果表明,焊接高强度钢工形梁在中等长细比情况下的屈曲性能远高于EC3和AS4100规定的指标;另外,因为工形钢梁翼缘的压应力呈非线性分布,其弯扭屈曲与临界截面的屈服也有一定关系。

Le等^[13]提出了适用于焊接高强度钢薄壁工形钢梁的残余应力模型,用X射线法测得分别用BISPLATE-80和BISPLATE-100高强度钢制作的两个等截面工形钢梁和变截面工形钢梁的焊接残余应力大小和分布规律,用X射线法测量残余应力试验,如图8所示。结果表明,工形梁翼缘和腹板连接处的平均峰值残余拉应力约为实测屈服强度的70%或母材屈服强度的80%,残余压应力分布较均匀;同时,对于该类钢梁,翼缘和腹板的相互作用对其残余应力影响不大,可以忽略不计。

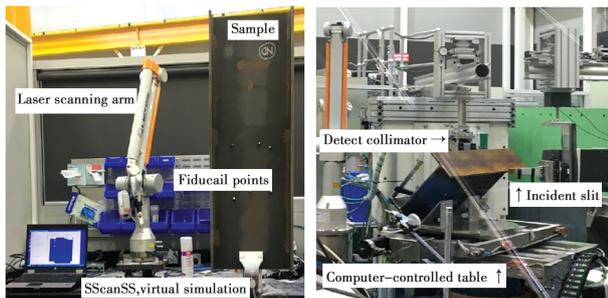


图8 X射线法测残余应力^[13]

Sun等^[14]采用试验和数值模拟,研究了6根S690级(名义屈服强度690 MPa)高强度钢焊接工形梁的面内抗弯性能和抗弯承载力。结果表明,对于欧洲、澳大利亚和美国的规范与标准,除美国的AISC宽厚比限制外,这种梁的长细比限制规定总体上适宜。

Yang等^[15]对Q690高强度钢焊接工形梁的抗弯性能和抗扭能力进行了试验研究(图9)和数值模拟,对16组不同宽厚比和跨度的工形梁分别进行了三点弯曲和四点弯曲破坏试验,同时建立了考虑初始几何缺陷和残余应力的有限元模型进行仿真分析,并与试验结果进行对比。结果表明,试件在三点弯矩作用下出现局部屈曲失效,而四点弯曲作用下则出现局部屈曲失效或整体屈曲与局部屈曲的共同失效;另外,参数分析表明,翼缘和腹板的宽厚比对梁的抗弯和抗扭能力有显著影响,高强度工形梁的承载力和延性都随着翼缘和腹板宽厚比的增大而降低,因此,建议设计高强度钢梁时应考虑翼缘与腹板宽厚比的作用。

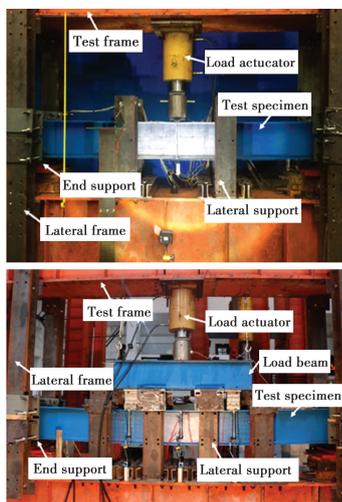


图9 高强度钢焊接工形梁三点弯矩和四点弯矩试验^[15]

Lyu等^[16]研究了考虑螺杆孔伸长量的螺栓连接件承载力,对分别采用Q550、Q690和Q890 3种高强度钢制作的27个单面搭接螺栓和36个双面对接螺栓试件进行了试验研究,并对螺栓孔变形极限和试件的荷载-变形曲线进行了对比,对荷载-变形曲线的两种过渡阶段进行承载力定义,并用Richards生长模型(RGM)和机器学习方法建立其公式,提出了一种基于行为的安全余度可调模型,并将现行规范与三阶段的承压过程进行比较,如图10所示。结果表明,按照CEN的设计可以有效地限制螺栓孔伸长,因为承载力位于承压过程的II阶段内;而对于AISC 360(AISC 2016)的标准,当端距为螺栓孔直径的1.66~2.59倍时,建议减小其设计承载力。

Guo等^[17]通过20个Q460D高强度钢螺栓连接接头的静力拉伸试验,研究了螺栓端距、边距、间距的影响。研究表明:当螺栓横向布置时,Q460D高强度钢试件的承载力和变形随螺栓间距的增大而增大;在达到结构标准值后,增加的边缘和端距对连接承载力的影响最小;当采用EC3^[18]标准时,

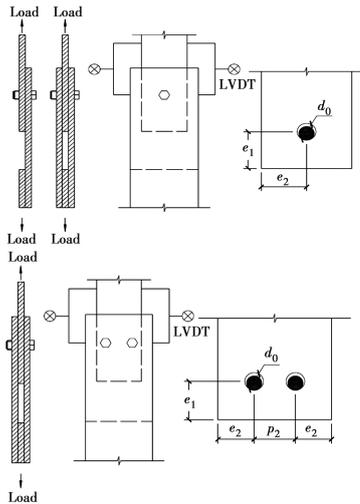


图 10 高强钢单面搭接螺栓和双面对接螺栓试件试验^[16]

理论计算值的冗余度较大。郭宏超等^[19]还进一步研究了 Q460D 和 Q690D 高强钢母材、有孔板和螺栓连接试件的疲劳性能问题。

2.4 高韧性钢

钢材生产技术的进步使现代桥梁钢的韧性得到提高;中国现行标准规定桥梁用结构钢的 CVN 冲击能量大多数为 120 J(早期标准为 47 J)。美国在 20 世纪 90 年代后期开展研究表明,高韧性钢在桥梁工程的应用有着巨大的潜力;随后开展了一系列的材料特性研究和大规模的试验研究;而最近的研究侧重于韧性水平需求的确定。

2020 年, Sherman 等^[20]为评估 CVN 冲击能量为 170 J 的高韧性钢的韧性,进行了缩尺的轴向试件断裂试验。试验分为两个部分,第一部分为在循环荷载下的疲劳开裂试验,当达到预期的裂纹长度时,试件将用于第二部分的断裂试验。结果表明,高韧性钢的使用使构件的断裂性能得以改善;另外,试验实测断裂韧性和有限元数值模拟结果对比表明,有限元结果实测值间的误差小于 15%,可以有效地应用于断裂预测。

2.5 耐候钢和高性能钢

耐候钢表面形成密实的保护锈蚀层,阻止腐蚀成分进入钢材内部,抑制了腐蚀,具有较强的耐腐蚀性能,在建造和长期使用中可以免除反复防腐涂装,有效降低维护成本。高性能钢指同时具备高强、可焊性好、耐候性好、延展性好和冲击韧性好的钢材。耐候钢在中国和其他国家桥梁中已经得到较多的工程应用^[21]。

2019 年, Su 等^[22]分别对桥梁耐候钢 Q345qDNH 的疲劳裂纹扩展门槛值和裂纹扩展速率进行了参数研究,采用 9 个母材和带有对接焊缝的 CT 试件(图 11)开展了疲劳试验。结果表明,疲劳裂纹扩展门槛值随应力比的增大而减小。同时, Q345qDNH 的疲劳裂纹扩展速率比普通桥梁钢 Q345qD 慢,根据 BS 7910 建议的通用参数说明, Q345qDNH 具有更好的抗疲劳性能。2020 年, Su 等^[23-24]分别开展了桥梁耐候钢 Q345qDNH 制成的未腐蚀和腐蚀的非承载焊接接头的疲

劳行为研究,同时也研究了 Q345qDNH 制成的焊接接头的疲劳行为,由此得到保证率为 95% 的 S-N 曲线,为桥梁耐候钢疲劳设计提供了参考。



图 11 桥梁耐候钢 Q345qDNH 的 CT 试件^[22]

2019 年, Zhang 等^[25]将电化学理论与断裂力学相结合,建立了耐候钢腐蚀疲劳耦合过程的理论模型。该模型将整个腐蚀疲劳过程划分为两个阶段:腐蚀疲劳裂纹萌生阶段和腐蚀疲劳裂纹扩展阶段(图 12)。在腐蚀疲劳的裂纹萌生阶段,坑蚀可以看作一类初始缺陷;当裂纹达到临界尺寸时,疲劳效应也对裂纹扩展产生显著影响,两种效应相互竞争,腐蚀疲劳过程的初始开裂速率较高;随后疲劳效应逐渐取代腐蚀成为主要因素,标志着进入腐蚀疲劳裂纹扩展阶段;此后,裂纹在循环荷载作用下不断扩展,直至最终破坏。另外,还研究了应力幅、应力比、腐蚀环境和平均日货车流量(ADTT)等关键 C-F 参数的影响。结果表明,应力幅和应力比对疲劳寿命均有显著影响。随着应力幅和应力比的增大,腐蚀疲劳寿命降低;坑蚀作为腐蚀环境的一项指标,只影响腐蚀疲劳裂纹的萌生寿命;此外,平均日货车流量对其裂纹扩展寿命影响显著,但对其萌生阶段的寿命影响有限。

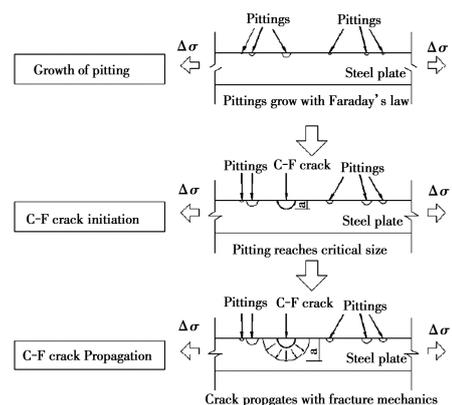


图 12 耐候钢腐蚀疲劳过程^[25]

刘新华等^[26]对通过加速腐蚀试验的高性能钢工形钢梁开展了抗弯性能试验研究。结果表明,锈蚀会显著降低整体工形钢梁的承载能力、延性和屈服强度,并且刚度与锈蚀率呈线性关系。

2020 年, Fan 等^[27]采用表面分析和电化学方法,研究了氯离子对改进的含镍耐候钢在热带海洋大气中耐蚀性能的

影响,采用扫描电子显微镜(SEM)对腐蚀形貌和表面形貌进行了分析,同时,通过能谱仪(EDS)和X射线衍射仪(XRD)分析了钢表面腐蚀产物的主要元素和物相组成。研究表明,内腐蚀致密膜中,Ni含量随溶液中NaCl浓度的变化呈指数函数关系, Cl^- 浓度越高,Ni含量越低。当 Cl^- 浓度增加到一定程度时,Ni含量将保持在一个稳定的值。对于高浓度 Cl^- 环境,Ni主要集中在膜内部, Cl^- 分布在整个膜中。

陶晓燕等^[28]研究了免涂装耐候高强度螺栓的表面处理工艺和连接性能,并开展了为期1年的抗滑移系数试验,以及无锈蚀和有锈蚀状态下的疲劳试验。研究表明,采用喷砂和钢丝刷相结合的工艺能够满足免涂装耐候钢桥的连接要求,同时,喷砂后的表面状态随着在大气中放置时间的增加而发生明显变化;在室外放置半年内,抗滑移系数较为稳定,随后延长室外放置时间,抗滑移系数显著下降。

2.6 铝合金

铝合金具有重量轻、比强度高、耐腐蚀性能好等突出特点,并且还有利于材料的回收再利用,在部分特殊的桥梁中有一定的应用前景。世界上最早使用铝合金建造的桥梁为20世纪40年代美国的Smithfield桥,2006年中国首次应用铝合金建造了浙江省杭州市庆春路中河人行天桥。目前,国内外对铝合金桥梁的研究不多,诸多工作有待开展。

清水弘树等^[29]研究了对抗弯承载力有益的纵向加强铝合金梁的最优横截面和极限强度,研究的铝合金为经热处理的A6061-T6。通过有限元弹塑性有限位移分析,给出最优截面形状,并计算具有该截面形状的纵向加强铝合金梁板的极限承载力。

2.7 双热轧 T 型钢与钢板对接焊成形的高效工形钢梁

热轧工形梁具有便利的生产工艺和高效的使用性能,应用广泛,但是,由于轧制技术限制,其高度和翼缘宽度与厚度均受到限制,这种情况各国都普遍存在;而通常采用的焊接工形梁的翼缘板和腹板 T 形接头经常要求双面熔透焊,其制造成本相对较高。为此,2020年,郑凯锋团队联合辽宁紫竹集团研发出双热轧 T 型钢(即带肋热轧翼缘)与钢板对接焊成形的高效工形钢梁(如图13所示),即上下两个热轧 T 型钢与钢板采用两道对接接头的熔透焊接,把一般焊接钢梁的 T 形接头简化为对接接头,甚至可以采用单面焊双面成形的简化工艺。初步研究表明其性能良好,成本较低,在桥梁工程中有较好的应用前景。

3 受腐蚀钢桥的性能下降及其加强研究进展

钢材的腐蚀是钢桥需要面对的重大问题和挑战。桥梁因钢材腐蚀导致病害、性能下降甚至严重劣化;对其采用合理的补强措施是保证腐蚀后钢桥继续正常服役的重要措施。因此,受腐蚀钢桥的性能下降及其补强措施逐步成为近年来

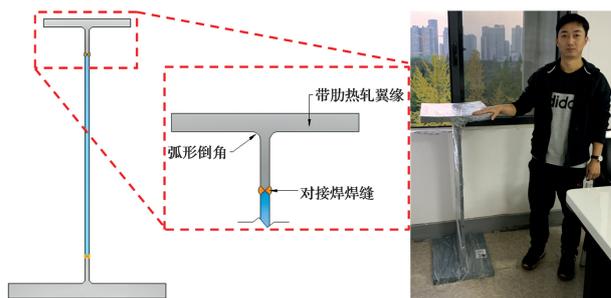


图 13 热轧带肋翼缘与钢板对接焊成形的工形梁

钢桥的研究热点之一。其中,已发表成果大多来源于日本学者的相关研究。

在桥梁各空间位置中,桥梁两侧端部的腐蚀问题相对普遍和突出。日和裕介等^[30]对已腐蚀钢桁梁桥端部采用冷涂装,用于进一步防腐处理,涂装材料加锌和铝,并在实际应用中验证了该方法的有效性。

井比亨等^[31]研究了采用螺栓连接钢板对钢桁梁桥端部腐蚀部位进行加固的方法,并通过有限元模拟进行了验证。结果表明,该方法能有效提高桥梁性能;同时,加固钢板的形状对加固效果影响较大。

森博啓等^[32]研究了钢梁腐蚀端部腐蚀加固方法,采用在端部焊接垫板加固,并结合弹塑性有限元分析和剪切试验进行了研究,研究分析表明,通过将垫板厚度调整为腐蚀厚度的1.5倍时能够保证与原结构具有相同的承载能力。中田祐利花等^[33]通过梁端部腐蚀厚度来评估桥梁剩余承载能力。研究中采用一座已经使用90年的铁路桥钢构件进行了腐蚀厚度的测试,结果表明,可以依此为基础用于评估桥梁剩余承载能力。

作为结合梁桥的关键传力构造,剪力钉的腐蚀严重影响结构静力性能和疲劳性能。北根安雄等^[34]研究了采用混合FRP形成的剪力钉群加固方法,补强结合梁端部因腐蚀导致截面的削弱,并开展了静力模型试验进行验证,为桥梁加固提供了有效方法。

Chen等^[35]对结合梁剪力钉开展了腐蚀后的静力和疲劳试验,分别进行承载能力、刚度和疲劳寿命的研究。结果表明,静力试验中主要出现局部屈曲,剪力钉腐蚀导致承载能力和刚度削弱,腐蚀效应使结合梁桥的疲劳寿命最高降低29.69%。

同时,腐蚀会导致钢材表面粗糙度的增加,由此导致局部应力集中和非均匀屈服,降低钢材延性。Gathimba等^[36]研究了腐蚀导致的表面粗糙对钢板延性的影响,通过非线性有限元对腐蚀19.5年后的钢管桩进行了分析。结果表明,钢材表面粗糙度的增加会导致应力集中和应变局部化,从而导致延性降低。近年来,日本工形钢板梁桥常采用免涂装耐候钢,多主梁钢板梁桥在使用过程时,一片主梁由于腐蚀性能下降或失效后,其余主梁将分担失效主梁的受力。

Fiolek 等^[37]通过开展腐蚀后热轧钢梁的静力弯曲试验研究其局部屈服,并与线性和非线性有限元模型计算结果进行对比。结果表明:当腐蚀厚度达到 46%~60%时,更容易在塑形区发生屈服;当腐蚀厚度达到 71%时,屈服倾向于在弹性区发生。

有村健太郎等^[38]通过有限元分析研究了多主梁桥在一片钢主梁因腐蚀失效后的受力行为变化。结果表明,没有实质性腐蚀的主梁能够较好分担失效主梁的卸载,即桥梁结构具有一定冗余度。

张振浩等^[39]研究得到疲劳强度和钢材强度的关系以及腐蚀引起的抗力衰减,采用均匀设计法的神经网络技术和非线性有限元方法对斜拉桥钢箱梁腐蚀下的疲劳可靠度变化进行了分析。结果表明,桥面板和 U 肋的腐蚀疲劳可靠性指标随时间增加而减小,其中,桥面板的可靠性指标降低更快,甚至无法满足 100 年的设计基准期。

Zhang 等^[25]总结了大量学者所开展的结构钢腐蚀疲劳试验结果,分析表明,腐蚀作用导致结构钢疲劳强度降低,坑蚀是导致疲劳失效的主要因素;同时还归纳和总结了开展腐

蚀疲劳试验的方法。

欧美等已经进入大规模老旧钢桥(螺栓连接或铆钉连接)维修和加固的年代。针对老旧钢桥的维修和加固,有效、便捷的方案是采用树脂注入式螺栓和单边(外侧)施工高强度螺栓。José 等^[40]对施加预紧力的标准螺栓和施加预紧力的树脂注入式螺栓连接节点进行了疲劳试验和比较研究,评估了单侧受剪和双侧受剪树脂注入式螺栓连接的疲劳性能,结果显示,树脂注入式螺栓连接的疲劳强度较常规螺栓连接低,但欧洲规范 EC 3^[18]对树脂注入式螺栓和标准螺栓连接提出的疲劳强度曲线大致相同,应得到足够的重视。单边高强度螺栓在一侧施工可以有效修复或加强封闭截面构件和连接钢管接头,Suzuki 等^[41]通过试验验证了单边高强螺栓摩擦接头的滑移系数、预紧力松弛和疲劳强度,并对疲劳试验后的拉伸强度进行了验证,结果表明,单边高强度螺栓预紧力松弛率约为 5%,经过喷丸或喷砂表面处理的单边高强度螺栓连接可以达到与标准高强度螺栓摩擦接头相当的力学性能。单边高强度螺栓摩擦接头在钢桁架拱桥抗震改造、钢桥面 U 肋加固和钢管墩柱加强中的应用如图 14 所示。



图 14 树脂注入式螺栓和单边高强度螺栓及其加固应用^[41]

4 钢桥面的研究进展

4.1 高性能球状石墨铸铁钢桥面

飛永浩伸等^[42-43]近年来研究了基于球状石墨铸铁的新型热铸钢桥面。球状石墨铸铁与碎片状石墨铸铁(普通铸铁)、片状石墨铸铁相比,材料性能更好,具有与普通结构钢相近的性能;同时,能将复杂形状板段一次整体铸造成型,省去复杂程序焊接,避免各种焊接缺陷;此外,根据实际受力要求对铸造桥面板进行高度、厚度和板件之间的倒角过渡等优

化,也缓解了交接部位的应力集中,使热铸钢桥面具有较高的疲劳特性。采用热铸试件取样进行了静力拉伸试验,结果表明:拉伸强度、断裂伸长率、硬度等机械性能总体上与普通结构钢材相近;开展的试验模型材料极限抗拉强度为 350 MPa,设计强度为 205 MPa。

单板段铸铁桥面足尺模型试验的试件尺寸为 1 250 mm × 2 500 mm,静力试验的轮载面积为 200 mm × 500 mm,如图 15 所示。当加载至 287 kN 时,出现局部塑性变形,当载荷达到 941 kN 时,仍未见局部开裂和整体断裂,由此说明铸

铁桥面具有较高的强度和塑性变形性能。多板段拼接铸铁桥面足尺模型试验采用两种尺寸规格的单板段:横向分别为 1 290 mm 和 1 690 mm,纵向均为 1 145 mm;采用 12 块铸铁桥面板段用高强度螺栓拼接成约 4 590 mm×4 690 mm 桥面,开展其疲劳试验;采用橡胶轮胎行走加载,荷载幅为 157 kN,加载次数为 200 万次。试验表明:车轮荷载所产生的最大应力低于 140 MPa,而铸铁桥面材料的设计强度为 205 MPa;最大挠度约为 3 mm,未出现塑性变形;采用磁粉探伤表明肋板下缘未发现疲劳裂纹。高性能铸铁钢桥面已应用到部分桥梁中。

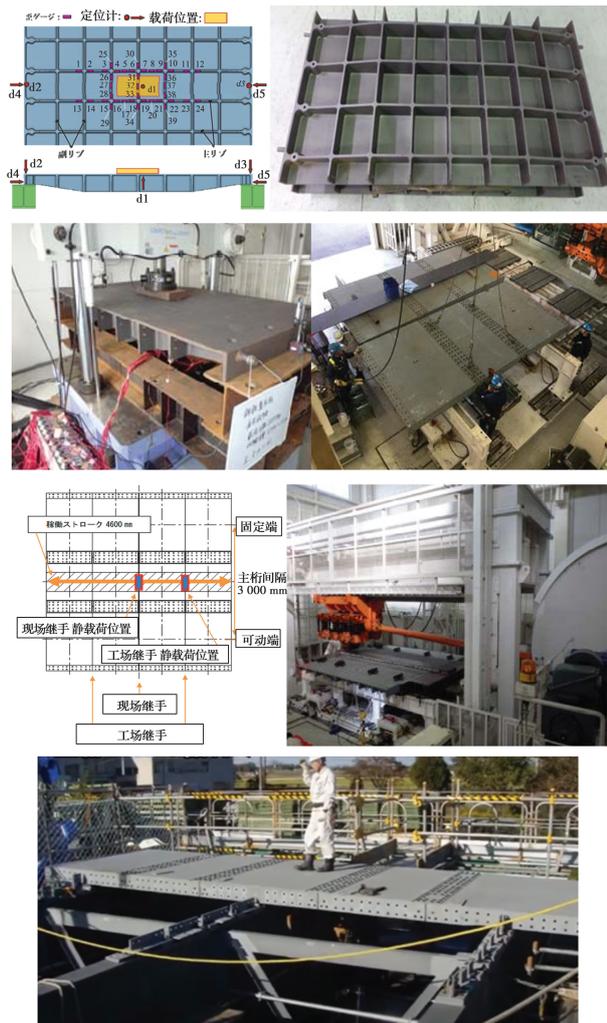


图 15 高性能铸铁钢桥面试验与使用^[42-43]

4.2 波纹夹芯板钢桥面

Nilsson 等^[44-46]对波纹夹芯板钢桥面进行了一系列的研究。该钢桥面采用波形夹心板结构,顶板厚 8 mm,底板厚 5 mm,波纹夹芯板厚 6 mm,采用激光焊接工艺连接成整体,如图 16 所示。其研究关注了与制造相关的接头几何性质变化对疲劳性能的影响、波形板与顶板之间的焊缝区域应力状态等。研究表明:焊接使连接波形板和顶底板接头的几何特性(包括焊缝宽度、焊缝不对中、波形板与板间的间隙等)发生变化;焊缝附近的应力总体上没有显著增加,桥面具有较好的疲劳性能,同样具有较好的经济性。

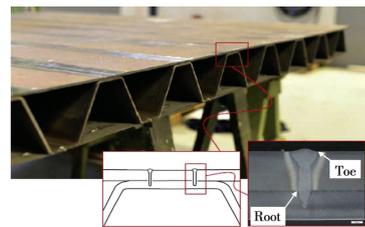


图 16 波纹夹芯板钢桥面及其疲劳试验^[44-46]

4.3 优化横肋开孔与焊接的钢桥面

传统的横肋与 U 肋连接焊缝构造细节在车辆荷载作用下经常出现疲劳开裂,主要有横肋开孔、横肋与 U 肋腹板连接焊缝,主要成因是横肋面内刚度远大于 U 肋腹板面外刚度、开孔的下部空孔形状与尺寸不合理和焊接质量不良等。近 20 年来,美国、日本和中国等均开展了不少研究工作。日本在对近畿地区(含京都府、大阪府、滋贺县、奈良县、三重县、和歌山县、兵库县等)桥梁进行多年系统检查并开展系列研究的基础上,2019 年汇总了相关成果^[47],如图 17 所示,提出在传统横肋开孔(让纵肋连续通过)和留出纵肋下端部分空孔(俗称“苹果孔”,避免 U 肋下缘附近与横肋焊接)的基础上,研究 3 种改进措施:1) 蝴蝶型:有限连接 U 肋下缘,减小 U 肋水平变形;2) U 肋腹板内侧加肋型:在 U 肋腹板内侧增加加劲肋,以提高 U 肋腹板的面外刚度;3) 转移应力型:改变下部空孔形状,将焊缝下端部和附近空孔部位的高应力区域转移到空孔两侧上方,将可能出现的焊缝(下端部)疲劳转变为横肋母材空孔边缘疲劳,而后的疲劳强度明显高于前者。2018 年,日本関西大学齐藤史朗等^[48]对蝴蝶型构造措施开展了进一步的优化试验研究,足尺节段试验研究表明:在 260 kN 荷载幅作用下加载 210 万次均未发现疲劳裂纹;优化后的构造细节使得 U 肋焊缝的高应力转移到横肋母材空孔边缘。日本阪神高速道路公司田畑晶子等^[49]对转移应力型构造措施进行了详细的参数化有限元分析,得到了优化后的带有短肋的横肋开孔形式。通过有限元分析表明,带有短肋的横肋开孔形式可以将端部 U 肋焊趾处的最大主应力降低 75%。此外,相关足尺节段的静力与疲劳试验研究^[50]表明:在 140 kN 荷载幅作用下,该孔型可以将 U 肋焊趾处的最大主应力降低 78%;当传统孔型加载至 100 万次时,U 肋焊趾发现 69.0 mm 的疲劳裂纹,其中母材部分长 19.0 mm,而改良后的构造在加载至 400 万次时仍未发现疲劳裂纹。2019 年日本桥梁建设协会针对改良后的孔型进行了相应的切割与焊接试验^[47]。

图 17 横肋开孔及其改良措施^[47]

张清华等^[51-54]基于钢桥面板疲劳问题的最新研究进展,指出钢桥面板的疲劳问题属于包含多个疲劳开裂模式的结构体系疲劳问题,并提出了钢桥面板结构体系的疲劳抗力评估方法。由上述特性所决定,提高正交异性钢桥面板疲劳抗力的有效途径在于研发高疲劳抗力的纵肋与顶板新型双面焊构造细节、纵肋与横隔板新型交叉构造细节,并引入两类构造细节,发展具有高疲劳抗力特性的钢桥面板。通过模型对高疲劳抗力钢桥面板结构的疲劳开裂模式、构造细节和结构体系的实际疲劳抗力,以及结构体系疲劳抗力评估方法的相关关键问题进行了试验和理论研究,如图 18 所示。研究表明,高疲劳抗力钢桥面板结构体系主导的疲劳开裂模式疲劳累积损伤度大幅降低,说明高疲劳抗力钢桥面板的疲劳性能显著优于传统钢桥面板。

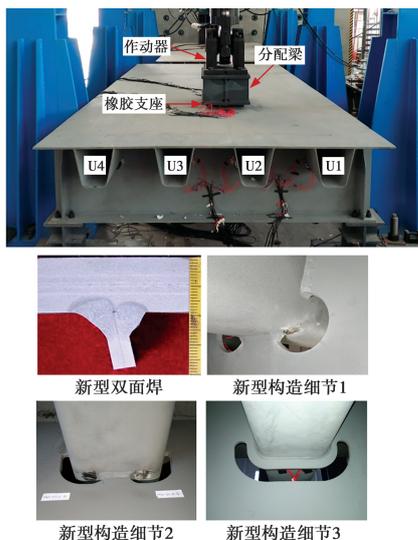


图 18 高疲劳抗力钢桥面板试验研究

朱爱珠等^[55]针对 U 肋内侧增设内隔板的构造形式,开展了正交异性钢桥面板足尺模型的静力与疲劳试验,研究了

内隔板对正交异性钢桥面连接细节的力学性能和疲劳强度的改善。试验表明,内隔板对 U 肋与横肋开孔根部连接位置的应力集中改善明显。

笔者开展了 2 组共 12 个退火与未退火、设置与未设置内隔板钢桥面的足尺模型疲劳试验,如图 19 所示,研究表明,退火和设置内隔板对 U 肋与横肋连接焊缝的疲劳性能有较大提高。

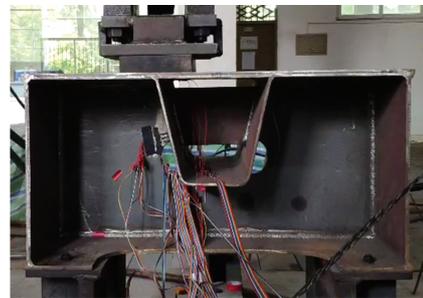


图 19 退火处理和设置内隔板的钢桥面疲劳试验

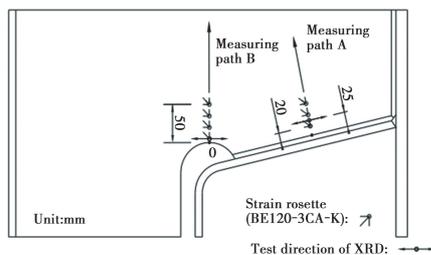
4.4 钢桥面焊接与切割残余应力的测试与影响

Wang 等^[56]采用盲孔法对 2 件不同尺寸的足尺 3U 肋钢桥面模型进行了残余应力测试,模型尺寸分别为 2 400 mm×3 500 mm、1 800 mm×3 500 mm。试验研究发现:平行 U 肋方向的残余应力略大于钢的屈服强度,且在焊缝附近应力梯度较大,远离焊缝区域的以压应力的形式出现;随着 U 肋厚度的增加,其最大残余拉应力减小,最大压应力增大;顶板最大残余拉应力先减小、后增大,且随着 U 肋厚度的增加,最大残余拉应力增大,增大比例逐渐减小。

Cui 等^[57]采用超声法对足尺单 U 肋双面焊钢桥面模型进行了残余应力测试,提出与常规焊接接头相比,由于焊接工艺的不同,双面焊接接头会受到不同的焊接残余应力和发生残余应力松弛现象;提出了一种新的分析循环荷载作用下顶板与 U 肋焊接接头极限承载力的方法。利用超声法测量了

U肋与顶板焊接接头的初始残余应力,结果显示,垂直焊缝方向的残余应力约为 150 MPa;利用热力耦合有限元模型进行模拟,用试验数据对计算模型进行了验证;并将其用于残余应力松弛现象分析,研究了循环应力幅值和应力比对残余应力松弛的影响。研究表明,残余应力在第 1 个周期迅速下降,随后下降趋势变缓,直到约 5 个周期后稳定下来。残余应力松弛量的大小随着应力幅和应力比的增大而增大,在应力幅为 300 MPa,应力比为 $-2/3, 0$ 和 $1/2$ 时,残余应力松弛比分别为 40%、50%和 60%。

Xiong 等^[58]采用热-弹塑性有限元方法,对钢桥面弧形开口区域切割热加工所产生的切割残余应力进行了研究,提出了一种系统计算 U肋与横肋接头热切割与焊接残余应力场的方法:先建立切割热源的温度场,对切割温度场进行预测,再建立膜片与肋焊接接头的弹塑性热力学数值模型,预测该接头在火焰切割和焊接过程中的残余应力演变规律。将模拟的熔接区温度云图和接头残余应力分布与实验结果进行了对比验证,结果吻合较好。最后,采用数值模型对热加工速度(如切割速度和焊接速度)以及 U肋与横肋焊接接头残余应力分布的影响进行了参数分析,结果表明:提高切割速度和降低焊接速度可以减小弧形开口部位的残余应力大小,并减小开口附近的高应力区范围。采用射线法与盲孔法对 U肋与横肋连接焊缝与弧形开口的残余应力进行了测试和验证,如图 20 所示:在焊缝附近(实测第一个点距焊缝 20 mm),垂直焊缝方向的残余应力接近于 0,平行焊缝方向的残余应力约为 110 MPa;在弧形开口部位(实测第一个点距边缘 5 mm),垂直边缘方向的残余应力约为 75 MPa,切向的残余应力约为 325 MPa。



(a)



(b) (c)

图 20 残余应力测试^[58]

4.5 轻型钢桥面与混凝土的组合桥面

钢桥面与钢筋混凝土(或超高性能混凝土)通过焊钉等形成组合桥面已有不少研究与应用。组合桥面除了自重大、施工程序多之外,强度、刚度和疲劳性能等均非常高,特别是

钢桥面的疲劳应力幅通常能够降低到母材或者连接细节的持久极限以下,理论上不会疲劳失效。因为组合桥面中的钢桥面受力较小,所以,近年来有将钢桥面轻型化的趋势。钢桥面轻型化体现为采用较薄的顶板、较小的纵肋和较大的纵肋间距与横肋间距。2020 年,贺欣怡等^[59]研究了 6 mm 顶板与 750 mm 大间距球扁钢纵肋和 120 mm C60 混凝土的组合桥面、6 mm 顶板与 360 mm 顶宽 U形纵肋(高度 200 mm、厚度 6 mm、净间距 360 mm)和 100 mm C60 混凝土的组合桥面及其纵肋的高强螺栓连接强度和疲劳性能等,如图 21 所示,取得了多项有价值的结论。

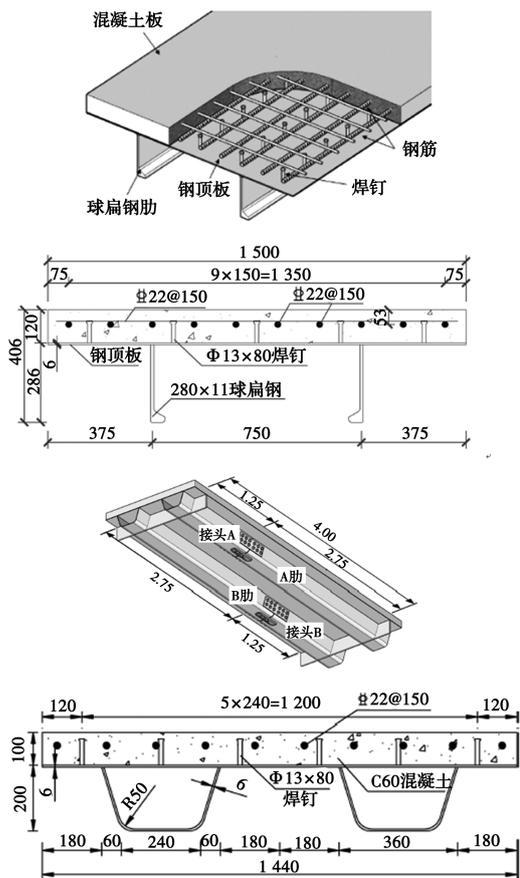


图 21 轻型钢桥面与混凝土的组合桥面^[59]

Liu 等^[60-64]提出了新型大纵肋正交异性钢-高性能混凝土组合桥面板结构,并对其疲劳失效机理展开了系统的试验与理论研究,如图 22 所示,完成了工程用水泥基复合材料(ECC)和超高性能混凝土(UHPC)2类结构层条件下结构体系的优化设计、关键传力构件的静力和疲劳性能、结构体系的疲劳失效机理等理论分析和试验研究工作。研究成果主要包括:建立了高性能混凝土中短栓钉抗剪承载力的计算方法;推导了基于截面应力法的钢-高性能混凝土组合板初裂荷载计算方法;提出了适用于高性能混凝土中短栓钉的疲劳劣化理论模型;建立了短栓钉多裂纹扩展数值模拟方法;探明了大纵肋正交异性钢-高性能混凝土组合桥面板在不同体系下的疲劳失效模式;初步建立了可考虑钢-混组合效应劣化的疲劳分析方法。

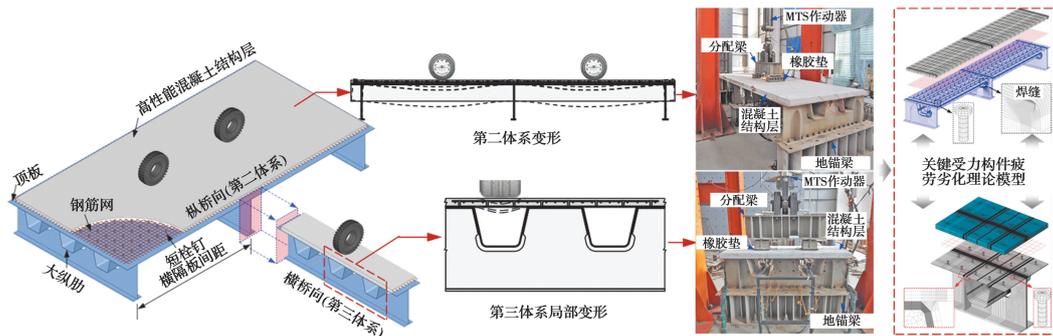


图 22 新型大纵肋正交异性钢—高性能混凝土组合桥面板试验与理论研究^[60-64]

5 钢桥稳定研究进展

钢桥采用高强钢材和新型材料使其结构和构件轻型化,但钢桥的稳定问题也更加突出,甚至成为设计控制因素。高强度结构钢相对于普通结构钢强度大幅度提升,而弹性屈服强度几乎一致,现有规范的宽厚比限值是否能适合高强钢构件、承载能力极限状态验算是否应计入屈曲后承载力等问题尚待充分研究。

5.1 钢桥构件整体稳定

楚得等^[65]分析了美国、日本、欧洲、中国 4 种钢桥规范中构件的稳定设计方法,针对 4 种规范下的稳定折减系数曲线进行了对比,并结合 H 形截面杆件展开计算。结果表明:欧洲和中国规范的整体稳定折减曲线比较接近;日本和中国规范的局部稳定折减系数最小;由于欧洲和美国规范利用了板的屈曲后强度所以折减系数较大。总体看来,中国规范的整体稳定设计最为保守。赵人达等^[66]基于能量法和有效模量法,推导了考虑徐变和屈曲前变形的 3 种边界条件下的钢管混凝土柱长期稳定临界力计算公式,研究了该类柱徐变稳定临界力与核心混凝土强度的影响规律,结果表明:长期作用下钢管混凝土的稳定临界力与徐变有关,混凝土强度越高,徐变的影响效果越小。林德慧等^[67]研究了采用粗壯截面工字钢的部分填充钢—混凝土组合(PEC)柱构件在轴压和压弯作用下的整体稳定性,并根据有限元计算结果选定了原用于纯钢构件的轴压稳定系数,提出了针对轴压和压弯 PEC 柱的整体稳定设计用公式。Lanc 等^[68]基于更新的拉格朗日公式,提出了一种能够用于分析薄壁开口截面复合层梁型结构的非线性整体屈曲分析的数值梁模型,通过对基准示例的研究,验证了该模型的可靠性。

5.2 钢桥构件局部稳定与局部-整体耦合稳定

施刚等^[69-70]通过试验和数值模拟研究了高强钢焊接等边箱型截面短柱的轴心受压局部稳定性问题,研究发现:钢板厚度、长宽比和残余压应力值对 460 MPa 高强度钢材等边箱形截面轴心受压构件的局部屈曲极限承载力影响较小;局部屈服极限应力按 GB 50017-2003、AISC 360-10 和 Eurocode 3 计算的结果都较试验实测值偏大。顾理想^[71]通过试验、仿真和理论相结合,分析研究了 460、550、690、880、960 MPa 5 种不同强度工字型截面高强钢轴压构件的局部屈曲承载力,提出了该类构件屈曲强度的建议设计方法。Shi 等^[72]结

合试验和有限元分析,研究了由普通钢和高强钢制成的工字型截面轴心受压柱的整体失稳和局部屈曲的相关性,结果表明:该类构件的破坏模式由整体失稳和局部屈曲耦合作用导致,局部屈曲首先出现在翼缘板上,水平位移的增大最终导致出现整体失稳;同时,构件极限承载能力按 Eurocode 3 估算较试验实测值偏保守,按 ANSI/AISC 360-16 估算则较为可靠,但是略微偏大。舒贛平等^[73]对 Q550 高强钢焊接箱型截面轴心受压构件进行了局部稳定和整体稳定试验研究,提出了 Q550 高强钢焊接箱型截面残余应力分布的简化模型,结果表明:高强钢构件残余应力的分布模式与普通钢构件类似,但其残余拉应力峰值远低于材料的屈服强度;该文的残余应力分布简化模型与实测结果的一致性较好。

虽然残余应力和几何初始缺陷对高强钢构件的极限承载力影响不大,但是这两个因素会影响局部屈曲的形态,Bai 等^[74]的研究结果表明,后屈曲阶段对这两个因素高度敏感。因此,在通过有限元模型进行高强钢构件稳定问题的精细化模拟时,应当充分计入残余应力、几何初始缺陷和荷载偏心等因素的影响,以确保得到更为可靠的结果。班慧勇^[75]通过试验研究提出了热轧等边角钢、焊接工字型和箱型截面的残余应力分布模式,通过有限元计算和试验对比研究了几何初始缺陷、残余应力和钢材力学性能对高强钢轴压杆件的整体稳定性影响,并提出了新的柱子曲线和修正系数计算公式。中国《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[76]指出,构件的整体几何初弯曲可以假设为正弦半波,而半波幅值可根据相应柱子曲线类别选取综合缺陷代表值。施刚等^[70-72]把构件局部几何初始缺陷模态假设为一阶局部屈曲模态,同时,将实测最大初缺陷作为幅值引入有限元模型,从而实现更为可靠的稳定预测。但该方法较繁琐,且需要以实测值作为基础,不利于推广应用。

5.3 缆索承重式组合体系桥梁稳定性

缆索承重式组合体系桥梁存在高度的非线性,结构稳定问题相对突出。自锚式悬索桥主梁受到轴向压力,其静力稳定问题比较突出,王春江等^[77]以重庆鹅公岩轨道专用桥为背景,采用有限元软件 Abaqus 建立全桥多尺度有限元模型,研究了该桥的整体稳定、局部稳定问题及其相互作用,结果表明:全桥静力稳定极限状态由钢箱梁的整体稳定控制;中腹板是钢箱梁局部稳定的控制部件。黄侨等^[78]以在建的南京仙新路长江大桥为背景,运用有限元软件 Abaqus 建立全桥

多尺度模型和独塔实体模型,分析对比了线性稳定系数、双重非线性荷载系数、线性失稳模态以及最终破坏形态,结果表明:双重非线性稳定安全系数更低,计算特大跨径地锚式悬索桥的稳定性必须考虑非线性;全桥多尺度模型的线性稳定系数略大于独塔模型,非线性荷载系数反之,全桥多尺度模型所得到的结果更具参考价值。

5.4 拱桥稳定性

作为以受压为主的结构,拱桥的稳定问题不可忽视。董锐等^[79]以合江三桥为背景,采用数值计算和理论分析相结合的方式对其受力性能和稳定性进行了对比分析,通过正交试验和方差分析对 L 形横撑在大跨度钢管混凝土桁式拱桥稳定的显著性进行了评估。结果表明:L 形横撑与常用的 K 形、X 形和米字形横撑相比,其对主拱的内力、竖向变形和稳定性影响均较小,对主拱水平变形具有一定影响。施洲等^[80]以洪奇沥水道特大桥为背景,采用有限元软件 ANSYS 建立全桥有限元模型,分析了该下承式钢桁架柔性拱桥施工阶段和运营阶段的稳定性,结果表明:施工阶段结构的稳定性较高,运营阶段恒载对稳定性影响最大,其次为活载;材料非线性对桥梁的稳定性影响显著,温度变化的影响较小;该桥构件的失稳依次为钢桁架部分杆件、拱肋和纵横梁。丁敏等^[81]提出了圆拱结构平面外分岔失稳和极值点失稳的分析方法,并将基于该法计算的 4 种圆拱结构的平面外分岔失稳临界荷载系数和失稳模态与文献模型进行了对比分析。结果表明,采用该方法计算的两端铰支圆拱平面外分岔失稳临界荷载系数与文献模型结果相同,而且可以得到工程中常用的跨中单铰拱及两铰拱的平面外分岔失稳临界荷载。

6 钢桥的多灾害动力分析研究进展

由于大跨钢结构桥梁具有主跨跨度大、阻尼和刚度小等特点,使得细长大跨钢结构桥梁在运营阶段对风、波浪、冲刷、温度和车辆等荷载都极为敏感^[82-86]。研究表明,在使用寿命期间,运营荷载对桥梁的长期持续作用可能会引起钢结构桥梁的劣化,使得结构的截面被削弱、刚度和强度降低、稳定性和疲劳性能变差,导致钢桥结构的损坏或者桥上行驶车辆的安全性和舒适性问题^[87-91]。除日常运营荷载外,由于所处的自然环境比较恶劣,这些大跨钢结构桥梁同时还可能面临着地震、台风、爆炸和船撞等极端荷载作用的威胁。这些长期持续荷载和突然极端荷载作用将直接影响到桥梁结构和桥上行驶车辆的安全性。

近年来,已有不少学者对桥梁结构的多灾害问题展开了研究。Zhao 等^[92]通过小波变换的方法得到桥梁主梁的时变挠度,研究了大跨度钢桁架铁路拱桥在温度和列车耦合作用下的时变挠度行为及其实时预警。以南京大胜关长江大桥为例进行研究,分析了主梁挠度和温度的检测数据,结果表明,与列车引起的主梁挠度相比,温度引起的主梁变形对列车作用下主梁挠度的影响较小,增幅不超过 3%。对大跨径铁路桥梁主梁挠度进行实时预警,可以发现小于 10 s 的主梁挠度异常变化,这可能由于桥梁轨道不平顺性的劣化或桥梁

构件的损坏引起。基于多体动力学分析软件 SIMPACK,勾红叶等^[93]研究了温度作用引起高速铁路桥钢轨的附加变形对列车运行安全性的影响,研究同样显示温度作用会降低列车的运行安全性。

基于应力分析方法,Han 等^[94]提出了适用于大跨度钢桁架悬索桥在随机车辆荷载和风荷载联合作用下的疲劳可靠性评估分析框架。以矮寨大桥为例,利用建立的计算分析框架得到了在随机车辆荷载和风荷载作用下桥梁关键部位的动应力响应。通过考虑风荷载、交通量增长和车辆轴重增长的影响,对该桥的疲劳可靠性进行了评估。结果表明,风荷载和车辆荷载对桥梁的疲劳可靠性都有一定的影响,主桁架四分之一跨径处的上下弦杆对风荷载和车辆荷载都较敏感,应予以重视。Camara 等^[83]提出了一种风-车-桥耦合作用的分析框架,该框架将路面粗糙度模拟为可以考虑桥梁接缝的三维随机表面,而不是传统的一维路面轮廓。基于提出的分析框架对一座大跨钢混叠合箱梁斜拉桥进行了动力分析,结果表明,路面粗糙度和风荷载显著降低了车辆驾驶的稳定性。基于改进的元胞自动机车流模型,Xiong 等^[95]研究了大跨桥梁在随机车流和风荷载作用下的动力响应。研究发现,车辆惯性力会显著影响车辆的动力响应;桥梁动力响应的变化程度与车流密度和构件刚度情况密切相关。

刘高等^[96]建立车-桥-风浪流耦合动力系统,研究了风浪流耦合作用对大跨公铁两用斜拉桥-列车系统动力响应的影响。研究显示,与单独的风作用相比,风浪流耦合作用会增大桥梁结构的振动响应并降低桥上行驶车辆的安全性。随后,根据国际结构安全性联合委员会(Joint Committee on Structural Safety, JCSS)提出的组合概率模型,房忱等^[97]研究了不同风浪流荷载组合下的一座大跨钢桁架梁斜拉桥的动力响应,研究显示,主梁跨中的横向位移主要受风荷载的控制,而塔梁结合处的动力响应主要受波浪荷载的控制,在实际工程应用中需要合理地考虑风浪流的荷载组合。

基于热点应力法和有效名义应力法, Ma 等^[98]通过多尺度有限元模型获得了正交异性钢桥面板在基础冲刷和车辆荷载共同作用下焊缝处的应力历史,并对焊接接头的疲劳寿命进行了评估。研究结果表明,桥面板裂纹和腹板裂纹引起的焊接接头疲劳寿命均随着冲刷深度的增加而减小,同时以纵向拉应力和横向拉应力为主的裂纹更容易萌生。

乔宏等^[99]基于粘弹性边界理论和有限元方法,研究了场地局部地形条件对车-桥系统振动响应的影响。研究表明,在考虑桥梁局部地形条件后,桥梁结构和车辆的动力响应均发生了较大的变化。在地震纵波作用下,山峰地形使得桥梁结构的动力响应变小而车辆的动力响应变大,河谷地形使得桥梁结构和车辆的动力响应均变大;在地震横波作用下,无论是山峰地形还是河谷地形,桥梁结构和车辆的动力响应均变小。针对深水大跨桥梁,Wang 等^[100]建立了可以考虑运营风、浪、车辆荷载和极端地震联合作用的地震-风-浪-车-桥耦合振动分析框架。以苏通大桥为例,对大跨桥梁-车辆耦合系统展开了研究,结果表明,在地震和运营荷载的联合作

用下,地震作用成为影响车-桥系统动力响应的控制因素,此外车辆荷载的出现增大了主梁的竖向振动而抑制了其横向振动,而风浪荷载的出现抑制了主梁的竖向振动而增大了其横向振动。

通过上述研究可以看出,由于大跨钢结构桥梁的使用寿命长和所处环境恶劣等特点,在结构服役期间可能会面临不同灾害的威胁,日常环境荷载的长期持续作用和突然的极端荷载作用将直接影响桥梁结构的安全性和耐久性。因此,基于工程结构的全寿命周期设计理念,合理地评估大跨钢结构桥梁在多灾害作用下的动力性能,建立桥梁结构在多灾害作用下的耦合振动模型具有重要意义。

(致谢:感谢郑皆连、徐恭义、王应良、张清华、孙秀贵、陈力波、罗天和张锐等专家同行对本文征求意见稿提出的宝贵修改和补充意见。)

参考文献:

- [1] 杜海龙, 秦大燕, 罗小斌, 等. 超大跨径拱桥施工控制[J]. 公路, 2019, 64(6): 120-125.
- [2] 唐贺强, 徐恭义, 刘汉顺. 五峰山长江大桥主桥总体设计[J]. 桥梁建设, 2020, 50(6): 1-7.
- [3] 梅新咏, 徐伟, 段雪炜, 等. 平潭海峡公铁两用大桥总体设计[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(Sup1): 18-23.
- [4] 华晓焯. 南京长江第五大桥科技成果转化实践研究[J]. 科技经济市场, 2018(12): 1-3.
- [5] 孙洪斌, 陈涛. 宁波三官堂大桥施工控制关键技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(5): 119-124.
- [6] IZADI M, MOTAVALLI M, GHAFORI E. Iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) for fatigue strengthening of cracked steel bridge connections [J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116800.
- [7] KERE K J, HUANG Q D. Life-cycle cost comparison of corrosion management strategies for steel bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(4): 04019007.
- [8] 堀澤英太郎, 宮壽靖大. 部材両端をステンレス鋼とした鋼製部材の圧縮および曲げ強度評価法[J]. 構造工学論文集 A, 2019, 65A: 1-14.
- [9] GRACIANO C, LOAIZA N, CASANOVA E. Resistance of slender austenitic stainless steel I-girders subjected to patch loading [J]. Structures, 2019, 20: 924-934.
- [10] ZHANG J Y, EBRAHIMI N. Corrosion risk of using stainless steel bolts for A1010 steel bridge girders [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(2): 06020001.
- [11] DISSANAYAKE D M M P, ZHOU C, POOLOGANATHAN K, et al. Numerical simulation and design of stainless steel hollow flange beams under shear [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 176: 106414.
- [12] LE T, BRADFORD M A, LIU X P, et al. Buckling of welded high-strength steel I-beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 168: 105938.
- [13] LE T, PARADOWSKA A, BRADFORD M A, et al. Residual stresses in welded high-strength steel I-Beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 167: 105849.
- [14] SUN Y, HE A, LIANG Y T, et al. In-plane bending behaviour and capacities of S690 high strength steel welded I-section beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162: 105741.
- [15] YANG B, DONG M H, HAN Q, et al. Flexural behavior and rotation capacity of welded I-beams made from 690-MPa high-strength steel [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(2): 04020320.
- [16] LYU Y F, LI G Q, WANG Y B. Behavior-based resistance model for bearing-type connection in high-strength steels [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(7): 04020109.
- [17] GUO H C, XIAO F, LIU Y H, et al. Experimental and numerical study on the mechanical behavior of Q460D high-strength steel bolted connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 151: 108-121.
- [18] European Committee for Standardization. BS EN 1993 Eurocode 3: Design of steel structures [S]. CEN Brussels, 2005.
- [19] 郭宏超, 皇垚华, 刘云贺, 等. Q460D 高强度钢及其螺栓连接疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(8): 165-172.
- [20] SHERMAN R J, COLLINS W N, CONNOR R J. Large-scale flexure fracture experiments on high-toughness steel [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(7): 04019062.
- [21] 郑凯锋, 张宇, 衡俊霖, 等. 高强度耐候钢及其在桥梁中的应用与前景[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(3): 1-10.
- [22] SU H, WANG J, DU J S. Fatigue behavior of uncorroded non-load-carrying bridge weathering steel Q345qDNH fillet welded joints [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 164: 105789.
- [23] SU H, WANG J, DU J S. Fatigue behavior of corroded non-load-carrying bridge weathering steel Q345qDNH fillet welded joints [J]. Structures, 2020, 26: 859-869.
- [24] SU H, WANG J, DU J S. Fatigue behavior of

- uncorroded butt welded joints made of bridge weathering steel [J]. Structures, 2020, 24: 377-385.
- [25] ZHANG Y, ZHENG K F, HENG J L, et al. Corrosion-fatigue evaluation of uncoated weathering steel bridges [J]. Applied Sciences, 2019, 9 (17): 3461.
- [26] 刘新华, 张建仁. 锈蚀对 Q550E 高性能钢梁抗弯承载力影响的试验研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 184-191, 201.
- [27] FAN Y M, LIU W, SUN Z T, et al. Effect of chloride ion on corrosion resistance of Ni-advanced weathering steel in simulated tropical marine atmosphere [J]. Construction and Building Materials, 2021, 266: 120937.
- [28] 陶晓燕, 史志强, 韩继跃, 等. 耐候钢桥的高强度螺栓连接试验研究[J]. 钢结构, 2018, 33(1): 105-108.
- [29] 清水弘樹, 大倉一郎. 面内曲げを受ける縦補剛されたアルミニウム合金板の最適断面形状と耐荷力[J]. 構造工学論文集 A, 2019, 65A: 15-25.
- [30] 日和裕介, 下里哲弘, 加藤祐介, など. 腐食した鋼桁端部への Cold Spray 防食技術に関する実証[J]. 構造工学論文集 A, 2020, 66: 388-399.
- [31] 井比亨, 北根安雄, 三ツ木幸子. 腐食した鋼桁端部に対する当て板補修の性能回復機構に関する研究[J]. 構造工学論文集 A, 2019, 65A: 466-478.
- [32] 森博啓, 廣畑幹人. 鋼桁端の腐食減厚部に対する当て板溶接補修の適用性に関する基礎的検討[J]. 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), 2020, 76(1): 15-28.
- [33] 中田祐利花, 野上邦栄, 石川貫人, など. 腐食の生じた鉄道リベット桁橋桁端部の圧縮耐荷力評価に関する実験的および解析的検討[J]. 構造工学論文集 A, 2019, 65A: 452-465.
- [34] 北根安雄, 上山裕太, 寺口大輝, など. 食した鋼桁端部に対する引抜成形 FRP アングル部材による補修方法の検討[J]. 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), 2019, 75(5): 27-35.
- [35] CHEN J, ZHANG H P, YU Q Q. Static and fatigue behavior of steel-concrete composite beams with corroded studs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 156: 18-27.
- [36] GATHIMBA N, KITANE Y. Numerical investigation on the effect of surface roughness on the ductility of steel plates corroded in marine environments subjected to tensile loading [J]. Journal of Structural Engineering, A, 2019, 65A: 63-75.
- [37] FIOLEK P, JAKUBOWSKI J. Local buckling of highly corroded hot-rolled box-section beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 157: 359-370.
- [38] 有村健太郎, 廣澤直人, 舟山 耕平, など. 支間部に腐食劣化の生じた鋼 I 桁橋の耐荷性能評価に関する解析的検討[J]. 構造工学論文集 A, 2019, 65A: 441-451.
- [39] 张振浩, 陈济功, 朱迅. 基于神经网络的斜拉桥钢箱梁局部连接细节腐蚀疲劳可靠度研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12): 186-196.
- [40] JOSÉ ANTÓNIO FONSECA DE OLIVEIRA CORREIA, PEDROSA B A S, RAPOSO P C, et al. Fatigue strength evaluation of resin-injected bolted connections using statistical analysis [J]. Engineering, 2017, 3(6): 795-805.
- [41] SUZUKI H, KAWABE Y, et al. The 6th International Symposium on Steel Structures[C]. Seoul: November 3-5, 2011.
- [42] 飛永浩伸, 村山稔, 佐伯英一郎, など. 球状黒鉛鑄鉄の道路橋床版への適用に関する基礎的研究[J]. 鋼構造論文集, 2017, 24(95): 13-95.
- [43] 飛永浩伸, 山口栄輝, 村山稔. 球状黒鉛鑄鉄を用いた道路橋床版の塑性変形性能に関する考察[J]. 鋼構造論文集 A, 2018, 64A: 109-119.
- [44] NILSSON P, AL-EMRANI M, ATASHIPOUR S R. Fatigue-strength assessment of laser welds in corrugated core steel sandwich panels [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 164: 105797.
- [45] NILSSON P, HEDEGÅRD J, AL-EMRANI M, et al. The impact of production-dependent geometric properties on fatigue-relevant stresses in laser-welded corrugated core steel sandwich panels [J]. Welding in the World, 2019, 63(6): 1801-1818.
- [46] NILSSON P, AL-EMRANI M, ATASHIPOUR S R. Transverse shear stiffness of corrugated core steel sandwich panels with dual weld lines [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 117: 98-112.
- [47] 日本橋梁建設協会. 鋼床版構造の耐久性向上に関する共同研究: 鋼床版デッキプレート-垂直補剛材溶接部を対象とした耐久性向上に関する検討[R]. 日本: 土木研究所, 2019.
- [48] 齊藤史朗, 山内昭弘, 坂野昌弘. 大型 U リブ鋼床版縦リブ横リブ交差部の疲労耐久性の検討[C]. 土木学会第 73 回年次学術講演会, 2018.
- [49] 田畑晶子, 杉山裕樹. U リブ鋼床版の疲労耐久性向上のための構造改良[J]. 阪神高速道路株式会社技報, 2013, 26: L0934B1-8.
- [50] 杉山裕樹, 田畑晶子, 春日井俊博, など. 鋼床版の U リブ-横リブ交差部における下側スリット部の疲労耐久性向上構造の検討[J]. 土木学会論文集 A1, 2014, 70(1): 18-30.

- [51] 张清华, 李俊, 郭亚文, 等. 正交异性钢桥面板结构体系的疲劳破坏模式和抗力评估[J]. 土木工程学报, 2019, 52(1): 71-81.
- [52] LI J, ZHANG Q H, BAO Y, et al. An equivalent structural stress-based fatigue evaluation framework for rib-to-deck welded joints in orthotropic steel deck [J]. *Engineering Structures*, 2019, 196: 109304.
- [53] 张清华, 李俊, 袁道云, 等. 深圳至中山跨江通道钢桥面板结构疲劳试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(11): 102-115.
- [54] 张清华, 袁道云, 王宝州, 等. 纵肋与顶板新型双面焊接构造细节疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 79-91.
- [55] 朱爱珠, 李牧, 田杨, 等. 设内隔板正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验[J]. 钢结构, 2017, 32(1): 45-50.
- [56] WANG F, LYU Z D, ZHAO Z, et al. Experimental and numerical study on welding residual stress of U-rib stiffened plates [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 175: 106362.
- [57] CUI C, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Residual stress relaxation at innovative both-side welded rib-to-deck joints under cyclic loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 156: 9-17.
- [58] XIONG Y M, LI C X, CHEN Z Y, et al. The evolution of residual stress in rib-diaphragm joints of orthotropic steel decks subjected to thermal cutting and welding [J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, 13(17): 3804.
- [59] 贺欣怡, 吴冲, 曾明辉, 等. 组合桥面板 U 肋螺栓接头疲劳受力性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 990-997.
- [60] LIU Y M, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Fatigue behavior of orthotropic composite deck integrating steel and engineered cementitious composite [J]. *Engineering Structures*, 2020, 220: 111017.
- [61] LIU Y M, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Static and fatigue push-out tests of short headed shear studs embedded in Engineered Cementitious Composites (ECC) [J]. *Engineering Structures*, 2019, 182: 29-38.
- [62] LIU Y M, ZHANG Q H, MENG W N, et al. Transverse fatigue behaviour of steel-UHPC composite deck with large-size U-ribs [J]. *Engineering Structures*, 2019, 180: 388-399.
- [63] 刘益铭. 大纵肋正交异性钢-高性能混凝土组合桥面板疲劳失效机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [64] 卜一之, 刘欣益, 张清华. 基于截面应力法的钢-UHPC 组合板初裂荷载计算方法研究[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 209-217.
- [65] 楚得, 郑凯锋, 衡俊霖. 美日欧中规范钢桥压杆稳定性计算对比研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(4): 84-90.
- [66] 赵人达, 吴德宝, 王永宝, 等. 钢管混凝土柱徐变稳定性分析[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(3): 468-474.
- [67] 林德慧, 陈以一. 部分填充钢-混凝土组合柱整体稳定性分析[J]. 工程力学, 2019, 36(Sup1): 71-77, 85.
- [68] LANC D, TURKALJ G, PESIC I. Global buckling analysis model for thin-walled composite laminated beam type structures [J]. *Composite Structures*, 2014, 111: 371-380.
- [69] 施刚, 林错错, 王元清, 等. 高强度钢材箱形截面轴心受压短柱局部稳定试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(1): 18-25, 36.
- [70] 施刚, 林错错, 周文静, 等. 460 MPa 高强度钢箱形截面轴压柱局部稳定有限元分析和设计方法研究[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 128-136.
- [71] 顾理想. 高强度钢工字形截面轴心受压构件局部屈曲承载力研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019.
- [72] SHI G, ZHANG Z Q, ZHOU L, et al. Experimental and numerical investigation on Local-Overall interactive buckling behavior of welded I-Section steel columns [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 151: 106763.
- [73] 舒赣平, 石志响, 李宗京, 等. Q550 高强度钢焊接箱形截面轴压构件局部稳定和相关稳定试验研究[J]. 钢结构, 2016, 31(2): 10-17.
- [74] BAI L, WADEE M A. Slenderness effects in thin-walled I-section struts susceptible to local-global mode interaction [J]. *Engineering Structures*, 2016, 124: 128-141.
- [75] 班慧勇. 高强度钢材轴心受压构件整体稳定性与设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [76] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国国家标准: 钢结构设计标准 GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [77] 王春江, 戴建国, 臧瑜, 等. 自锚式钢箱梁悬索桥静力稳定性分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(2): 47-51.
- [78] 黄侨, 单彧诗, 宋晓东, 等. 特大跨径地锚式悬索桥静力稳定性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(6): 140-148.
- [79] 董锐, 陈亚钊, 郑穆然, 等. 带 L 形横撑的大跨 CFST 桁式拱桥稳定性分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 89-99, 128.
- [80] 施洲, 张勇, 张育智, 等. 大跨度铁路下承式钢桁梁柔性拱桥稳定性研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(4): 52-58.
- [81] 丁敏, 王佳佳, 蒋秀根, 等. 圆拱结构平面外稳定分析

- 方法[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(1): 37-46.
- [82] CAI C S, CHEN S R. Framework of vehicle-bridge-wind dynamic analysis [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(7/8): 579-607.
- [83] CAMARA A, KAVRAKOV I, NGUYEN K, et al. Complete framework of wind-vehicle-bridge interaction with random road surfaces [J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 458: 197-217.
- [84] ZHANG M J, YU J S, ZHANG J Y, et al. Study on the wind-field characteristics over a bridge site due to the shielding effects of mountains in a deep gorge via numerical simulation [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(14): 3055-3065.
- [85] FANG C, LI Y L, WEI K, et al. Vehicle-bridge coupling dynamic response of sea-crossing railway bridge under correlated wind and wave conditions [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(4): 893-906.
- [86] TI Z L, ZHANG M J, LI Y L, et al. Numerical study on the stochastic response of a long-span sea-crossing bridge subjected to extreme nonlinear wave loads [J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109287.
- [87] OLMOS J M, ASTIZ M Á. Non-linear vehicle-bridge-wind interaction model for running safety assessment of high-speed trains over a high-pier viaduct [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 419: 63-89.
- [88] ZHU J, ZHANG W. Numerical simulation of wind and wave fields for coastal slender bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(3): 04016125.
- [89] ZHU J, ZHANG W, WU M X. Coupled dynamic analysis of the vehicle-bridge-wind-wave system [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(8): 04018054.
- [90] ZHU J, ZHANG W, WU M X. Evaluation of ride comfort and driving safety for moving vehicles on slender coastal bridges [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2018, 140(5): 051012.
- [91] ZHU J, ZHANG W, ZHENG K F, et al. Seismic design of a long-span cable-stayed bridge with fluid viscous dampers [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2016, 21(1): 04015006.
- [92] ZHAO H W, DING Y L, NAGARAJAIAH S, et al. Behavior analysis and early warning of girder deflections of a steel-truss arch railway bridge under the effects of temperature and trains: Case study [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(1): 05018013.
- [93] 勾红叶, 杨睿. 温度梯度作用下高速铁路桥上行车安全性研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(3): 47-52.
- [94] HAN Y, LI K, CAI C S, et al. Fatigue reliability assessment of long-span steel-truss suspension bridges under the combined action of random traffic and wind loads [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(3): 04020003.
- [95] XIONG Z L, ZHU J, ZHENG K F, et al. Framework of wind-traffic-bridge coupled analysis considering realistic traffic behavior and vehicle inertia force [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 205: 104322.
- [96] 刘高, 陈上有, 王昆鹏, 等. 跨海公铁两用桥梁车-桥-风浪流耦合振动研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(4): 72-87.
- [97] 房忱, 李永乐, 向活跃, 等. 风、浪、流荷载组合对跨海桥梁动力响应的影响[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 908-914, 922.
- [98] MA X L, ZHANG W. Fatigue life of weldment details of existing orthotropic steel bridge considering the scour effects [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(10): 04020078.
- [99] 乔宏, 夏禾, 杜宪亭. 地震动斜入射对车桥系统地震响应的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(9): 1629-1635.
- [100] WANG Y W, ZHU J, ZHENG K F, et al. Dynamic simulation of sea-crossing bridge under combined service and extreme seismic loads [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020(2): 1-18.

(编辑 邓云)