

我国海洋桥梁工程技术发展现状、挑战及对策研究

高宗余, 阮怀圣, 秦顺全, 马润平, 梅大鹏

(中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 武汉 430056)

摘要: 针对未来深水海洋桥梁工程建设需求, 本文分析了中国海洋桥梁工程技术取得的成就及存在的不足, 提出海洋桥梁工程面临的技术挑战主要为“强风浪、强腐蚀、超水深、超大跨”等四个方面, 应高度重视环境作用及其组合、结构耐久性、抗疲劳和全寿命设计等理论研究, 重点突破超大跨度桥式方案、超深水基础结构形式和快速施工新型结构形式等结构关键技术瓶颈。建议成立国家级海洋桥梁工程技术研究中心, 加强科技硬件力量投入及创新人才培养, 完善科技奖励机制。

关键词: 海洋桥梁工程; 设计理论; 结构形式; 重难点问题; 技术发展方向

中图分类号: U448.27; TU311.3 **文献标识码:** A

Technical Status, Challenges, and Solutions of Marine Bridge Engineering

Gao Zongyu, Ruan Huasheng, Qin Shunquan, Ma Runping, Mei Dapeng

(China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: In this paper, to better satisfy the future demands for deep-water marine bridge engineering, we analyzed the research status of marine bridge engineering in China, and proposed that strong wind wave, strong corrosion, super water depth, and super large span are the major technical challenges faced by the marine bridge engineering. High attention should be paid to theoretical research on environmental effects and their combinations, structure durability, fatigue resistance, and life-time design; and major efforts should be made to overcome key technical challenges such as super-long span bridge schemes, ultra-deep-water infrastructure forms, and new structural forms capable of rapid construction. We proposed to establish a national marine bridge engineering technology research center, strengthen the investment in science and technology hardware, cultivate innovative talents, and improve the science and technology reward mechanism.

Keywords: marine bridge engineering; design theory; structural form; key and difficult problems; technical development direction

一、海洋桥梁工程的技术发展现状

桥梁是交通基础设施的咽喉要道和关键节点, 海洋桥梁工程对推动国家海洋强国、交通强国战略、“一带一路”倡议发展以及促进经济社会进步具有

举足轻重的作用 [1,2]。在过去 20 年中, 中国的海洋桥梁工程建设取得了巨大的技术进步和成就, 建成了多座跨海长桥, 谱写了世界建桥史上一个又一个奇迹。目前, 我国桥梁工程不断从内陆向近海延伸, 东海大桥、杭州湾大桥、港珠澳大桥等跨海大

收稿日期: 2019-05-10; 修回日期: 2019-05-25

通讯作者: 高宗余, 中铁大桥勘测设计院集团有限公司教授级高级工程师, 全国工程勘察设计大师, 主要从事大跨度桥梁设计与研究工作;

E-mail: gaozy@brdi.com.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“海洋桥梁工程技术发展战略研究”(2016-XZ-13)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

桥相继建成，平潭海峡公铁大桥正在建设中，近海桥梁建造技术取得了举世瞩目的成就 [3]。随着国家海洋强国战略与“一带一路”倡议的不断推进，我国正规划研究琼州海峡、渤海湾和中国台湾海峡等跨海通道，“一带一路”沿线国家也在规划建设如巽达（印度尼西亚）、里海（俄罗斯至伊朗）等深水海洋桥梁。

（一）我国海洋桥梁工程技术成就

1. 大规模工厂化预制、运输吊装技术及相关装备研制得以发展

东海大桥和杭州湾大桥的非通航孔桥采用跨度 50~70 m 的预应力混凝土箱梁；港珠澳大桥非通航孔桥采用跨度 110 m 的钢箱梁桥或跨度 85 m 的钢-混凝土结合梁桥，墩身、承台预制拼装建造技术；平潭海峡大桥采用整孔全焊、整孔架设钢桁梁。其全部在陆地建设工厂整孔预制，采用整孔或大节段运输、架设安装技术。相应地，研制了载重吨位达 2500~3000 t 的运架一体的起重船“小天鹅”号和“天一”号、起吊重量 3600 t 大型浮吊，以及在已架桥上运输整孔预制梁的大型台车。

2. 桥梁长寿命耐久性技术得以推广

大规模推广采用高性能混凝土及其防裂技术，钢管桩牺牲阳极保护阴极技术及重防腐涂层技术，耐久性铸钢球形支座，东海大桥全桥采用混凝土桥面结构以避免钢桥面疲劳开裂，其主航道桥采用跨度 420 m 的钢箱结合梁斜拉桥。平潭海峡大桥钢桁梁的铁路桥面采用预制预应力混凝土槽形梁。

3. 海域施工 GPS 动态定位技术得以实现

跨海大桥建立了连续运行的 GPS 工程参考站系统，实现实时平面定位精度 3~5 cm，实时高程定位精度 5~10 cm 的精度要求，为海上钢管桩和钢护筒施工提供服务；同时建立大桥工程独立的施工坐标系，避免投影误差，确保施工放样准确。

4. 大范围风屏障技术得以采用

平潭海峡大桥在全桥范围内的铁路、公路桥面两侧，均采用了多孔形式金属障条的风屏障，公路桥面与铁路桥面的风屏障整体透风率分别为 50% 和 36.5%。

5. 快速高效维养技术得以运用

港珠澳大桥在主梁梁内和梁底设置电动检查

车，梁底设置快速检修通道，实现了可维可达、可修可更换的设计理念。

6. 大直径钢管桩、钻孔桩技术及装备研制取得进展

杭州湾大桥采用 $\phi 1.5$ m 和 $\phi 1.6$ m 的大直径钢管桩，桩长 71~89 m，施工采用当时国内最先进的多功能全旋转式起重打桩船，船体配备 S-280 双作用液压锤；平潭海峡大桥首次采用 $\phi 4.5$ m 一次成孔钻孔桩，研制了具有多瓣式组合钻头的 KTY5000 型钻机。

（二）我国海洋桥梁工程技术存在的不足

近 20 年来，我国的海洋桥梁工程建设取得了巨大进步，但应清醒地认识到，在桥梁工程技术方面，我国在 20 世纪 80 年代“学习追赶”和 20 世纪 90 年代“提高”两个时期中主要是学习和引进国外在第二次世界大战后建设高潮中所创造的新材料、新技术和新工艺，通过实践和应用取得进步，其中也包含一些局部的改进和创新，但原创性的科技成果仍然不多 [4]。

现行海洋桥梁工程部分设计、施工、维修与加固等桥梁规范落后于欧美桥梁标准，众多规范参考国外规范的现成成果，缺乏对国内外设计、施工等最新科技成果的借鉴，目前尚未有针对海洋桥梁工程的专门规范。我国虽然在建设规模和尺度上有所超越，但真正意义上的突破性技术成果不多，上升至工程理论的科学成果更是凤毛麟角。

二、海洋桥梁工程面临的技术挑战

随着国家海洋强国战略与“一带一路”倡议的不断推进，我国海洋桥梁建设发展的一个基本趋势就是从近海走向深水，进而产生新的需求与挑战。与近海桥梁相比，深水海洋桥梁工程的环境和建设需求特点主要表现为四个方面：①复杂严酷的环境作用，如强风、巨浪、急流、强震、海啸等，具有强度大、随机性强和耦合性显著的特点；②长期处在高温、高湿、盐害、冻融及海雾等强腐蚀自然环境下，结构性能退化更早、更快、更严重，结构耐久性问题突出；③最大水深将可能突破 100 m，面临的水文和地质条件更加复杂 [5]；④需满足公铁合建、全天候通车、高速铁路交通等多功能要求，

且跨度将突破 2000 m。海洋桥梁工程环境恶劣（水深、流急、浪大），环境荷载作用（强风、地震力、侵蚀、波浪力）与内陆桥梁差别大，现行桥梁工程设计理论及桥型结构难以满足海洋环境作用下桥梁工程的设计要求 [6]，建设海洋桥梁工程需要面对的技术挑战主要体现在五个方面。

（一）海洋桥梁工程作用及其组合尚无专门规范

海洋桥梁工程作用及其组合理论是工程设计的基础，是贯彻“安全、耐久、适用、经济和美观”设计原则的重要前提。目前，基于弹塑性力学的发展，桥梁工程设计理论已完成由容许应力法到极限状态法的转变。基于可靠度理论的极限状态法的应用，大大推动了桥梁工程设计由定值法、半概率法到近似概率法的发展。

目前，海洋桥梁工程皆借鉴港口工程等行业规范来进行波浪力的计算，但与海洋桥梁工程离岸远、尺度大不同，港口工程的规模及结构尺度通常较小，地理位置均位于海岸。海洋环境作用的基本特点是强度大、变化幅度大、变化速度快，具有明显的随机性和强耦合性，例如台风出现时，往往伴有急流和大浪；地震发生时，往往伴有海啸等。确定远离海岸的桥梁工程所承受的波浪力、确定多场荷载耦合作用（风 - 浪 - 流耦合作用、地震 - 海啸作用等）的组合方式及其组合系数、将研究成果归纳提炼形成符合海洋桥梁特点的桥梁设计规范，以及探究波浪力与水深、结构尺度、气象条件、洋流状况的相关性，都需开展大量的理论及试验研究，且存在研究的依托工程样本较少的难题。

（二）海洋桥梁工程结构耐久性量化设计有待研究

结构耐久性是指结构抵抗大气影响、化学侵蚀和其他劣化过程而长期维持其性能的能力。海洋桥梁工程耐久性设计是工程设计中最为关注的课题之一，它不仅涉及工程长期安全、耐久的重大问题，还关系到资源、环境、国计民生等一系列重大经济与社会问题，因此结构耐久性问题的研究对于体现公共安全、节约资源和可持续发展等方面均具有重要的现实意义。

海洋桥梁工程主要建筑材料包括混凝土和钢材两大类，在海洋高盐、高湿、高温等环境条件作用下，海洋桥梁工程混凝土结构和钢结构耐久性受到严峻挑战。海洋混凝土结构因混凝土碳化、氯离子渗透、钢筋锈胀导致功能退化。钢结构和海洋高盐环境下的氯离子之间产生化学相互作用导致性质变化及功能损伤。目前，结构耐久性尚存在性能与寿命之间的关系不明确、基于性能的耐久性设计理念和量化设计方法尚未完全建立、不同行业技术标准的差异性较大等难题。需要重点突破混凝土结构损伤机理、抗力衰减与预测模型、损伤检测与评估方法、钢结构重防腐涂料与涂装工艺、基于腐蚀的健康监测和检测、防腐蚀全寿命设计、高性能耐腐蚀钢种等关键技术瓶颈。

（三）海洋桥梁工程结构疲劳的耦合作用问题有待探究

结构疲劳是在重复荷载（小于静载屈服强度）作用下由局部损伤最终导致的结构永久破坏。海洋桥梁工程的公路（或铁路）运输荷载转自远洋航运，荷载特征和内陆桥梁存在显著的差异性，不仅面临和内陆同样的运营车辆作用产生的疲劳作用，还会面临严酷的海洋风和洋流产生的长期疲劳作用，包括极值和常遇值的大循环次数作用。目前桥梁工程抗疲劳设计还存在疲劳作用类型及疲劳荷载谱研究等技术挑战，需要重点突破疲劳寿命评估方法、疲劳荷载谱、车辆与海洋环境耦合作用、疲劳与腐蚀相互作用等关键技术。

（四）海洋桥梁工程全寿命设计有待突破

和其他建筑工程一样，桥梁工程实现从规划设计、施工建造、运营管养、拆除或回收再利用的全寿命周期内总体性能（功能、成本、人文、环境等）最优的设计，即全寿命期设计，是近年才发展起来的，还很不完善。海洋桥梁工程更是如此，需要重点突破周期成本计算模型与标准、风险评估体系与实用方法等关键技术。

（五）海洋桥梁工程适用桥式和结构面临新难题

海洋桥梁工程面临海水深度大、自然环境（大风、大浪、急流、高盐、高湿、高温等）严酷、与

大陆距离远等困难条件,施工难度更大、风险更高,因此,需要研究适应海洋环境的桥型方案和主要结构形式。

常用的大跨度桥型方案主要有斜拉桥、悬索桥、斜拉-悬吊协作体系桥,此外,建设海洋深水长桥,多塔长联缆索承重桥梁应是一种具有显著技术经济优势的桥型,它可以提供连续多个较大的跨度,方便通航,减小对海洋环境的影响。目前,世界上仅我国在长江上建成了三座大跨度三塔悬索桥,泰州大桥和马鞍山大桥的主跨均为 2×1080 m,鹦鹉洲大桥的两个主跨为 2×850 m。国内外还建成了多座多塔斜拉桥,最大跨度已超过600 m。多塔缆索承重桥梁应用于海洋还需进一步研究提高每一孔的跨度、扩展连续孔数,解决桥梁刚度和主缆抗滑移等技术难题,以及相应的高性能材料、防灾减灾、结构体系、施工控制和健康监测、全寿命管理维护等技术。

深水基础结构形式包括大直径桩与管柱、大型沉井、大型设置基础及大型水下施工装备等,快速施工的结构形式主要包括主梁大节段预制拼装结构、钢主塔预制吊装结构以及下部结构预制安装结构等。应重点突破新结构体系、高性能材料、深水地基处理、大型自动化施工及智能化检测装备等关键技术。

三、促进海洋桥梁工程技术发展的政策建议

(一) 加强海洋桥梁工程的科研投入

建立国家级海洋桥梁工程技术研究中心或技术创新基地,引领相关科研单位开展研究工作,对全行业的国家级、省部级重点实验室进行资源整合,形成若干特色研究领域,避免低水平重复研究,努力提高科技创新的水平、效率和效益。建议开展如下研究工作:①针对海洋桥梁全寿命规划、抗灾害设计、工业化建造和智能化管养开展系统研究;②设立国家海洋桥梁科技重大专项;③开展琼州海峡、中国台湾海峡等海洋桥梁工程技术研究,为海洋强国和交通强国战略、“一带一路”倡议提供技术储备;④改革我国海洋信息数据开放和观测机制,针对特定海域建立气象、海况和工程的联合观

测体系,搭建共享数据平台,为科学研究提供技术支撑。

(二) 完善海洋桥梁工程科研体制

政府和行业主管部门在项目审批等过程中,引导相关企业加大科技投入,采用新技术、新材料、新工艺,增强企业科技创新的主体地位;建立以企业为主体、市场为导向、产学研相结合的技术创新体系。

(三) 创新海洋桥梁工程技术人才培养与科技奖励机制

选择有一定基础的高校,开设相关特色专业,培养复合型人才,定期开展学术交流活动,促进海洋桥梁工程技术的可持续发展。采用单项重奖、科技股份、技术转让提成等多种方式,鼓励科技人员的技术创新与成果产业化,要用市场经济的机制建立奖励基金,对行业、企业技术进步做出突出贡献的人员进行奖励,并成为创新机制的重要组成部分。

参考文献

- [1] 刘中民. 世界海洋政治与中国海洋发展战略 [M]. 北京: 时事出版社, 2009.
Liu Z M. World marine politics and China's marine development strategy [M]. Beijing: Current Affairs Publishing House, 2009.
- [2] 张锋. 国家战略——建设“一带一路” [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2017.
Zhang F. National strategy—Building “the Belt and the Road” [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2017.
- [3] 马建, 孙守增, 杨琦, 等. 中国桥梁工程学术研究综述(2014) [J]. 中国公路学报, 2014 (5): 1-96.
Ma J, Sun S Z, Yang Q, et al. A summary of the academic research on bridge engineering in China (2014) [J]. Journal of Highway of China, 2014 (5): 1-96.
- [4] 项海帆, 肖汝诚, 徐利平. 桥梁概念设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Xiang H F, Xiao R C, Xu L P. Bridge conceptual design [M]. Beijing: People's Transportation Press, 2011.
- [5] 高宗余. 多塔缆索承重桥梁 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
Gao Z Y. Multi-tower cable-supported bridges [M]. Beijing: China Railway Press, 2016.
- [6] 陶慕轩, 聂建国, 樊健生, 等. 中国土木工程科技2035发展趋势与路径研究 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(1): 73-79.
Tao M X, Nie J G, Fan J S, et al. Research on the development trend and path of civil engineering technology 2035 in China [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(1): 73-79.