

海洋桥梁波流力作用与基础冲刷问题及对策研究

李永乐¹, 房忱¹, 裘放¹, 唐浩俊¹, 胡勇², 夏云峰³, 魏凯¹,
吴联活¹, 杨绍林¹, 向琪芪¹

(1. 西南交通大学桥梁工程系, 成都 610031; 2. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 武汉 430056;
3. 南京水利科学研究院, 南京 210029)

摘要: 随着海洋桥梁不断向深海延伸, 桥梁基础波流力作用与基础冲刷问题已成为威胁桥梁安全的主要因素。为了确保海洋桥梁设计的合理性以及建设运营的安全性, 本文系统地梳理了海洋桥梁在波流力作用与基础冲刷方面所面临的主要问题, 进而有针对性地提出了海洋桥梁需要在高精度预测方法、环境预报和预警系统、环境多因素耦合作用、冲刷数值模拟技术、波浪力计算方法等方向发展。研究表明, 波流力作用与基础冲刷研究是海洋桥梁安全的重要保障, 研究从宏观管理、行业应用、学术技术三个层面对当前问题提出了对策。

关键词: 海洋桥梁; 波流力; 基础冲刷

中图分类号: U443.22; U443.15 **文献标识码:** A

Wave Current Force Action and Foundation Scour of Marine Bridges

Li Yongle¹, Fang Chen¹, Qiu Fang¹, Tang Haojun¹, Hu Yong², Xia Yunfeng³, Wei Kai¹,
Wu Lianhuo¹, Yang Shaolin¹, Xiang Qiqi¹

(1. Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430056, China;
3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: With marine bridges extending to the deep sea, wave current force action and scouring on bridge foundations have become the main factors threatening bridge safety. To ensure the design rationality as well as construction and operation safety of bridges, this paper sorts out the major problems faced by marine bridges in terms of wave force action and foundation scour, and proposes that marine bridges should be developed in high-precision prediction method, environmental prediction and pre-warning systems, research on multi-factor coupling effect of environment, scour numerical simulation technology, and wave current force calculation method. Furthermore, countermeasures are proposed from the aspects of macroscopic management, industrial application, and academic technology.

Keywords: marine bridge; wave current force; foundation scour

收稿日期: 2019-04-20; 修回日期: 2019-05-10

通讯作者: 李永乐, 西南交通大学教授, 研究方向为大跨桥梁风致振动及车桥耦合振动; E-mail: lele@swjtu.edu.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

一、前言

随着“一带一路”倡议和“海洋强国”战略的提出,海洋桥梁的建设迎来了一个发展的高峰期,越来越多的桥梁建设在我国沿海的重要航道上。随着海洋桥梁不断向深海延伸,桥梁下部结构所遭受的波流荷载也愈加显著,波流已成为海洋桥梁的控制性荷载 [1],许多在建或已建成的海洋桥梁,如港珠澳大桥 [2]、平潭海峡大桥 [3]、东海大桥 [4]、乐清湾大桥 [5] 等都对其桥梁下部结构的波浪力进行了专题研究。不同于梁桥等小跨度桥梁,海洋桥梁多为斜拉桥、悬索桥等大跨度桥梁,其具有主跨跨度大、整体刚度小、结构变形大的特点,这使得海洋桥梁受波流力和基础冲刷的影响更加显著。因此,针对海洋桥梁的波流力作用与基础冲刷发展方向的研究已经迫在眉睫。

同时,我国沿海地区台风、热带气旋等极端天气频发。据不完全统计,仅 2011—2018 年,就有多达 59 次台风登陆我国,其中台风登陆我国次数最多的年份为 2018 年,达到 9 次;最少的年份为 2014 年,也有 5 次。台风天气往往会带来巨浪急流,甚至造成风暴潮等灾害性天气,给桥梁的建设和运营带来巨大的威胁。波流力作用和基础冲刷作用研究是海洋桥梁战略研究必不可少的一环,也是海洋桥梁合理建设和安全运营的重要保障。本研究深入剖析了海洋桥梁波流力作用与基础冲刷现存问题与挑战,进而指明了海洋桥梁在该领域的发展方向,最终提出了针对性的对策与建议,可为海洋桥梁波流力作用与基础冲刷研究提供重要的参考。

二、海洋桥梁波流力作用与基础冲刷研究面临的问题与挑战

(一) 波浪实测数据不足

我国在海上布置相当数量的浮标,但浮标布置密度有限,当台风等极端气象发生时,以远海波浪推算桥址区波浪特性的传统方法精度有限,还需要更丰富、更直接的波浪数据来认识桥址区的波浪特性。同时,浮标归不同组织机构所有,浮标数据查询困难重重,各机构的数据公开程度严重不足,缺少浮标数据共享平台。在桥位处架设波浪仪可补充一定的波浪数据,但仪器容易受环境因素干扰,工

作不稳定,特别是在大风、大浪等恶劣的海洋环境期间,实测序列存在较多的缺失和错误数据。

(二) 桥址区波浪计算和预报精度低

现有对波高的推测研究多集中在风浪关系上,但对于近岸区域,在一般情况下波高的变化主要受地形控制,针对复杂地形区域近岸传播的实用方法研究较为少见。《港口与航道水文规范》[6] 中关于波浪近岸传播和变形是采用基于理想平行等深线下浅化系数和折射系数相乘的方式计算的,该方法在平缓海滩地形中得到广泛的应用,但在复杂岛礁地形下,该方法的计算精度无法满足工程需求。基于实测的波浪数据提出的经验公式,由于不同桥址区的地形不尽相同,经验公式的适用范围十分有限 [7]。基于试验得出波浪传播规律,尽管将适用范围扩大到某一类地形,但常常也是经过某种程度的简化,且受试验条件影响较大,仍不具有较大的普适性。而数值计算的方法,虽然可以提高精度,但付出的时间成本无法让人接受,而时间与精度又是呈反相关关系,减少时间就会降低精度。因此,对桥址区波浪的准确预测仍需要做更多的改进工作。

同时,海洋桥梁是一项庞大的条带状结构工程,桥梁上部结构及墩柱与波浪场的相互作用十分复杂。同时,基于桥梁在不同阶段的结构形式差别,施工和运营阶段的波浪场对桥梁的影响是有所变化的,但目前针对海洋桥梁施工运营的条式精密测量预报海浪平台尚未发现。另外,从桥梁设计、施工、运营的角度来看,更应关注桥址区的波浪场,以及不同墩柱之间的相互作用,因为这将决定桥梁结构上直接作用的力的大小。所以小尺度、短时波浪预报对现实有十分重要的指导意义,但目前的预报模式大多为大区域预报,预报精细化程度低,不能满足现实要求。

(三) 复杂海洋环境下桥址区波浪特性计算困难

复杂的海洋环境下桥址区波浪特性的研究不仅要考虑复杂的地形影响,还需要研究极端气候的作用。目前较为常用的分析方法是基于实测数据的数理统计方法,海港工程的规范中波要素设计重现期即是基于数理统计方法利用长期资料推算得到,但还未有针对海洋桥梁工程的设计标准,设计波要素及其重现期的确定方法尚不明确。数值模拟能够较

好地实现地形、波浪、风三个因素的耦合计算，但数值模拟的计算成本较高，若要保证较高的精度，时间成本将无法接受，为降低时间成本则必须降低计算精度，导致了数值解与实际值存在偏差。我国南海和东南沿海是台风多发区域，台风从生成到我国沿海登陆可能不足5天，从基本确定台风路径到台风登陆的时间更短，在如此短的时间内很难用数值方法及时模拟台风对桥梁结构安全的影响并采取保护措施。在试验方面，由于试验条件的限制，常常只能做常规风作用下的模拟，大风暴气候条件下的模拟还有难度，无法还原真实的复杂海洋环境。

（四）Morison 方程有待完善

Morison 方程中的阻力系数和惯性力系数依赖于 Re 数和 KC 数，两个参数对阻力系数的影响较对惯性力系数的影响要大，但确切的结果仍需进一步研究。Morison 方程中阻力与速度的平方成正比，但在用 Morison 方程计算波浪力的过程中，为了计算简便，一般需要对阻力项进行线性化处理，为了计算结果的精确，同时还应考虑二阶力的影响，因此处理的方法尚未有统一的理论。由于波浪荷载导致的海洋工程墩柱结构破坏的工程实例屡见不鲜 [8]，Morison 方程作为深水桥墩波浪力的主要计算方法，其准确性和可靠性是需深入解决的课题。

（五）复杂结构波浪力计算未有明确的方法

海洋桥梁的复杂性主要体现在三点：大、小尺度结构并存；群桩、群墩结构组合多样；断面结构不规则。海洋桥梁小尺度结构主要是指桥墩、桩基等结构，尤其是桥墩，其断面往往是非标准断面（带圆角的矩形、哑铃型等），而目前对于跨海桥梁的设计规范中并没有对该结构波浪荷载的计算提供明确的公式和方法，因此作为主要控制外力的波浪荷载，对于跨海大桥结构设计来说便成为一个受关注的问题。海洋桥梁大尺度结构主要是指承台、围堰等结构，规范仅能计算圆形断面和长宽比小于1.5的矩形断面，对于复杂的建筑断面尚无明确计算方法。在计算过程中也未考虑组合结构间的相互影响。另外，现有大尺度墩柱、小尺度桩柱的波浪力计算方法，是在对从海底延伸到水面的墩柱进行理论分析和数值计算的基础上得来的，将此应用到桩基、承台及墩身的波浪力计算，对波浪力计算结

果有何影响还需进行研究；桩基波浪力计算采用的 Morison 方程的基本假定是结构物的存在不影响波浪的传播，由于上部承台和桥墩的结构尺寸较大，将使得结构周围的波浪场发生变化，Morison 方程在桥梁桩基础计算中的适用性有待进一步论证。

（六）跨海桥梁波浪作用下的多因素耦合分析研究缺乏

由于地基的柔性和无限性，使得按刚性地基假定计算出来的结构动力特性和动力反应与将地基和结构作为一个整体计算出来的结果有所不同，因此有必要考虑海底-基础-结构多因素相互作用的影响。在多因素耦合体系中，非线性和非一致激励问题尤为重要。对于非线性问题，一般在计算波浪力时，并未考虑非线性因素的影响，包括波浪的非线性理论、波浪间的非线性相互作用以及二阶波浪力等，事实上，非线性因素在浅水区以及海洋工程结构物在生存状态下的动力计算中都是必须考虑的 [9]。同时由于跨海桥梁一般跨度比较大，在将波浪力作为随机激励输入时，将会涉及到行波效应、空间相干效应等非一致激励的问题，这些都是值得研究的内容。

（七）波流相互作用机理尚未明确

实际流速的大小和方向实时改变，波浪的要素也是瞬息变化，导致波流相互作用的形式纷繁复杂。尤其近岸浅水区域，波流共同作用现象非常明显。比如涨潮时，顺流进入河口将波浪冲平；落潮时，逆流进入河口的时候波浪变陡甚至破碎，给近海航行造成影响。此外，当波浪自外海向岸边传播时由于发生破碎生成的破波线与岸线之间会形成平行海岸的沿岸流，在破波带还可以形成一股向深海方向的窄带状流动，称为离岸流。常见的潮汐、径流、风生环流与波浪相互作用，孤立波与流以及界面波与流相互作用等都是波与流相互影响的典型形式。此外，波浪增减水、裂流等许多其他自然现象也都受波流相互作用影响。随着人类向海洋的探索，波流相互作用已成为复杂环境中开发海洋需要解决的关键问题之一，受到国内外科研人员的重视。

（八）海啸波与桥梁相互作用研究不完善

国内对海啸的研究较晚，目前国内对海啸的研

究主要集中在海啸成因、海啸传播的数值模拟、海啸的预警和监测、海啸的危险性及海啸危险区域划分、海啸与结构的相互作用 [10]。其中, 海啸与结构的相互作用研究得更少一些, 研究对象主要集中在海啸对房屋结构的破坏作用。国外已经制定部分针对逃生结构的指南, 正在逐渐纳入规范。但是还没有针对桥梁海啸力的指南。这些指南或者规范中关于海啸作用力的条文, 主要是跟住宅建筑或者海岸工程相关, 目前还不够完善, 如在美国海啸垂直疏散结构设计指南——FEMA P-646 (2012) 中提供的海啸力估算表达式, 没有考虑到在海啸波快速推进过程中随时间变化的浮力, 以及在地基土壤中逐渐变化的孔隙水压力。国内没有海啸力计算指南, 相关规范中也没有包含海啸力计算条目。在国内近海工程中, 目前只有核电站会考虑海啸作用力, 进行海啸力作用验算, 其余基础设施都未考虑海啸作用力。

(九) 海洋桥梁基础冲刷机理复杂

海洋环境考虑通航要求, 主跨跨度大, 上部结构自重大, 桥梁基础更加复杂和庞大, 水深更深, 海床地质条件更为复杂和多变, 这都是影响基础冲刷的重要因素; 海洋深水基础由恶劣的气象、水文所产生的环境荷载力要比内河深水基础大得多, 因而在设计和施工中, 由飓风、巨浪和大潮所产生的基础冲刷更加严重, 是设计和施工必须考虑的关键问题。海洋深水基础所面对的水流流向要比内河复杂得多, 内河水流方向较为固定, 而海洋环境中的水流方向较为随机, 同时还需要考虑全球洋流运动等因素的影响, 会大幅增加海洋环境桥梁基础冲刷深度的预测难度。由于水流和波浪所引起的冲刷是两种完全不同的类型, 冲刷机理、冲刷形态、冲刷过程都存在较大的区别。因此, 这不得不引起对海洋桥梁基础冲刷问题研究的高度重视。为了减小在海洋桥梁基础施工过程中因冲刷而造成不安全和经济损失问题, 开展海洋桥梁基础冲刷研究就显得尤为重要。

(十) 海洋桥梁基础冲刷数值和试验技术尚不完善

有许多研究者对局部冲刷, 包括桥墩、群桩、沉井等局部冲刷进行了大量的试验和研究, 获得的

结果也能与经验公式或半经验半理论公式计算结果相吻合, 也能为实际工程提供科学依据, 但是试验结果往往只能作为参考, 其与工程的实际结果的差距仍然很大, 并且有关的试验参数的选择、测量的精度、缩尺效应以及试验方式的改进仍然是冲刷试验进一步发展的内容 [11]。与试验方法相比, 数值模型方法有如下优点: ①能够以原型大小进行模拟, 避免缩尺效应; ②数值模型能够精确布置, 尤其是在复杂条件下, 完成试验方法所不能满足的条件; ③能够从不同视角对冲刷机理行为提供详细和全面的观察; ④操作环境简单, 不需要专门的试验场地和过多的实验人员。虽然目前已经开展了众多局部冲刷的数值模拟研究, 但是局部冲刷的机理, 尤其是海洋环境下的桥梁基础冲刷机理, 还有待进一步的研究, 动床冲刷和三维两相模拟的研究还有待加强。

三、海洋桥梁波流力作用与基础冲刷研究的发展方向

(一) 研究面向海洋桥梁工程沿线波浪特性的高精度预报方法

我国海洋预报研究起步较晚, 但发展迅速, 在预报、预警方法和质量上都取得了长足进步。然而, 面向普通公众的业务化海浪预报远达不到海洋桥梁建设对预报的需求, 故主要研究方向在: ①提高业务化海浪预报的空间分辨率, 准确预报特大海洋桥梁主要施工控制点的波高; ②需要考虑海浪复杂的近岸传播过程, 海洋桥梁常常需要连接、跨越岛屿, 桥址区地处复杂岛礁区, 在复杂的岛礁地形影响下, 海浪在传播过程中会发生一系列复杂多变的物理过程; ③一般的业务化海浪预报空间尺度过大, 针对性低, 需要搭建在超级计算机集群上, 系统十分复杂, 需要进一步提高计算效率。在海洋浮标布放上, 需向多站位、高密度、立体化方向发展, 增加浮标数量和提高数据开放程度。

(二) 发展面向工程应用的风浪环境要素联合概率模型

用概率方法或可靠度方法进行海洋工程结构设计已在国内外受到广泛应用, 但仍然存在一定的局

限,如对于波高、周期的概率分布,一般根据样本数据选用一个拟合最好的模型,然后根据模型计算重现期,但模型是建立在独立和同分布的基础上的,而测得的数据是具有相关性的,所以传统的多变量分布函数的概率分析受到很大限制,需要探究新型的概率分布函数来对实际进行模拟。相关方面还有很多,如实测资料的缺乏、设计波要素的不确定性等。因此需要开展风浪环境要素联合概率分布模型的研究工作,建立海洋桥梁结构风浪环境荷载组合方法,完善海洋桥梁工程设计技术标准和风险评价机制。

(三) 建立海洋桥梁环境预报系统和预警系统

桥梁工程的施工和运营是个长期的过程,尤其是桥梁施工期间需要稳定的海洋环境,研究桥址区波浪特性,明确桥址区波浪对桥梁结构的作用,对海洋桥梁施工和运营安全具有重大意义,是海洋桥梁工程所面临和亟待解决的问题。当极端气候来临时,以灾害能量等级、结构整体稳定性、行车稳定性、构件级别失效等单方面或多方面的预警标准尚不明确,海洋桥梁的管理尚缺乏完善的风险评价机制。研究面向海洋桥梁工程沿线波浪特性的高精度预报方法,搭建重大海洋通道实时海洋环境预报和预警系统,对海上桥梁发展有重要的意义。

(四) 改进完善小尺度、短时波浪预报的数值模拟技术

在桥梁的施工运营阶段,桥梁附近的波浪特性也在不断变化,大区域的波浪特性无法真实代表每一结构处的波浪特性,同时,小尺度、短时的波浪预报将对桥梁的施工安全和应急措施起到关键作用,所以对小尺度、短时波浪预报的研究很有必要。

(五) 深化群桩效应对波浪场的影响

当前对群桩效应的研究,最多研究到了四桩阵列的情况,而跨海大桥的桩基,有着多种多样的排列形式,甚至还有斜桩,对于这些复杂却源于实际工程的群桩效应下的群桩系数,目前研究非常欠缺。而在考虑结合承台、桥墩的群桩-承台-桥墩整体结构对波流场产生的影响下,还没有研究波流力对跨海桥梁的各结构的影响情况。因此,有必要深入研究海洋桥梁的群桩效应,明确群桩相互作用机理。

(六) 研究大、小尺度结构波浪力的时域、频域计算方法

波浪力的动力响应可以从时域与频域中得到,时域可以解决任何非线性问题,但对待长时间历程时,其计算效率相当低,而频域只限于解决线性结构的动力问题,所以当前要结合深水大跨桥梁特点,提出适用于海洋桥梁结构波浪力的时域、频域计算方法,提高波浪力计算的精度和效率;完善 Morison 方程,考虑非线性项的影响及相邻结构之间的相互影响;开展桥梁组合结构专题研究,明确各构件之间的相关性。

(七) 开展大型海洋桥梁动力响应、多因素耦合作用研究

对于处在较深海域的结构物来说,结构有较大的柔性(近岸跨海桥梁所处的海域不是很深,但由于桥墩的基础尺寸较小,同样具有较大的柔性),对于波浪动荷载比较敏感,动力响应也比较显著,结构的动力分析必不可少。研究波浪荷载的行波效应、空间相干效应、流固耦合作用等非一致激励的问题以及结构-桩-土动力相互作用、流固相互作用、波浪理论、波浪方向等因素的影响,对大型海洋桥梁具有非常重要的意义。

(八) 开展波浪相互作用及波浪冲击作用机理研究

波流相互作用是非常复杂的非线性问题,其流动机理和特征至今还没有被完全探明,对其开展试验研究所消耗的人力、物力、财力极大,且难以开展不同工况下的大规模、系统化研究,而解析方法也基本局限于均匀流和剪切流等特殊水流流速剖面条件。然而,随着人类向海洋的探索,波流相互作用已成为复杂环境中海洋开发所面临的关键问题之一,受到国内外科研人员的重视。

波浪冲击过程和作用机理非常复杂,涉及波浪的强非线性、瞬时效应、流体黏性、湍流特性、水气掺混等因素,现有的研究成果对波浪冲击建筑物作用机理的分析还不是十分清晰,因此,至今这一问题仍是海岸工程领域尚待解决的困难课题之一。目前,大部分学者对冲击问题的研究还是采用半经验半理论的方法,先基于理论研究给出冲击压力的计算公式,然后再通过物理模型试验确定主要参数。已有的计算公式也主要是在规则波条件下得到的,

虽然各种公式相对于自己的试验资料都有较好的一致性，但是由于海上结构物的复杂性，使得各个公式都有一定的局限性，亟待研究适用于海洋桥梁的波浪冲击方法和理论。

（九）开展海啸波 - 桥梁相互作用机理研究

目前国内外已修建的桥梁，都未进行抗海啸设计，国内外桥梁工程规范也没有关于抗海啸设计的条文。根本原因是海啸威胁认识不够，对海啸作用力本质、桥梁破坏机理没有研究透彻。需要通过数值模拟或试验分析稳定气候条件下的海啸与结构的相互作用机理。同时国内亟需编制海啸力计算指南或规范。海啸计算指南或规范，需要吸收借鉴众多较为成熟的研究成果，并将其梳理总结，是海啸研究成果的集中体现，此工作具有非常重要的应用价值。

（十）开展海洋桥梁冲刷机理和局部冲刷模拟技术研究

桥梁基础冲刷将成为海洋桥梁设计和建设必须考虑的关键问题。由于海洋环境下的桥梁基础冲刷机理研究还十分匮乏，冲刷机理还不够透彻，因此海洋环境下的桥梁基础冲刷计算公式较少，并且没有纯理论推导公式，都是经验公式或半经验半理论公式，因此需要开展对海洋桥梁基础冲刷机理的研究，提高对海洋桥梁基础冲刷流场特性、泥沙运动的认识，编制海洋环境下桥梁基础冲刷规范。另外为了解决工程实际问题，通常会进行冲刷物理试验模型来为实际工程提供科学依据和参考。针对不同的目的，需要建立不同的桥梁基础冲刷试验模型进行测试。但冲刷试验在缩尺效应、施工期冲刷以及实际工程地形地貌试验模型等方面仍存在不足。针对海洋环境的复杂性和多变性，需要开展海洋桥梁基础冲刷与其他因素耦合作用的研究，深化复杂海洋动力环境下桥梁基础局部冲刷试验模拟技术、水下探测方法和防冲刷措施的研究，为实际施工提供保证和依据。

四、海洋桥梁波流力作用与基础冲刷研究的对策建议

海洋桥梁工程的波流力作用与基础冲刷研究是海洋桥梁发展战略的重要环节，是海洋桥梁建设

和运营期间的安全保障。基于此，本研究从三个层面提出了发展波流力作用与基础冲刷研究的政策建议。

（一）宏观管理层面的对策建议

（1）加强拟建重大海洋通道的监测点布置，整合各机构的监测数据，搭建数据平台，通过特定途径开放共享实时数据和历史数据，为工程设计和科学研究单位提供全面的原始资料。

（2）设立海洋桥梁研究重大专项，建立海洋桥梁技术发展研究平台，开展波流力作用与基础冲刷的研究工作，完善海洋桥梁工程设计技术标准和风险评价机制。

（二）行业应用层面的对策建议

（1）海洋预报增加海洋桥梁工程线路专项预报，提高预报精度，实时预报海况，为海洋桥梁工程的建设和运营提供灾害预警服务。

（2）开展波浪近岸传播、风 - 浪 - 流耦合机理、波流防护措施、风浪环境要素联合概率模型等方面的研究工作，完善桥梁设计规范。

（3）制定桥梁抗海啸和防御海啸的设计标准，为工程设计提供支撑。

（4）开展对海洋桥梁基础冲刷机理的研究，提高对海洋桥梁基础冲刷流场特性、泥沙运动的分析方法，建议编制海洋环境下桥梁基础冲刷规范。

（三）学术技术层面的对策建议

（1）提出适用于海洋桥梁大、小尺度结构波浪力的时域、频域计算方法，提高波浪力计算的精度和效率。

（2）开展海洋桥梁下部结构专题研究，明确各构件之间的相关性，开展大型海洋桥梁动力响应、动力可靠性、行车安全性研究。

（3）开展系统海啸波 - 桥梁相互作用试验，探明海啸波作用机理，为数值模拟和理论分析提供参考对照。

（4）针对海洋环境的复杂性和多变性，开展海洋桥梁基础冲刷与其他因素耦合作用的研究。

（5）深化复杂海洋动力环境下桥梁基础局部冲刷试验模拟技术、水下探测方法和防冲刷措施的研究，为实际施工提供保证和依据。

参考文献

- [1] 杨进先, 胡勇. 跨海大桥桥渡设计关键技术探讨 [J]. 桥梁建设, 2010, 40(5): 60–63.
Yang J X, Hu Y. Discussion on key technology of bridge crossing design of cross sea bridge [J]. Bridge Construction, 2010, 40(5): 60–63.
- [2] 吴启和, 牛照, 田唯, 等. 港珠澳大桥埋置承台与桩波流作用动力响应分析与试验研究 [J]. 中外公路, 2014, 34(1): 121–124.
Wu Q H, Niu Z, Tian W, et al. Dynamic response analysis and experimental study on the wave flow effect between the embedded pile caps and the pile on HongKong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2014, 34(1): 121–124.
- [3] 房忱, 李永乐, 秦顺全, 等. 中、美、英规范关于跨海桥梁桩基波浪力的对比 [J]. 桥梁建设, 2016, 46(6): 94–99.
Fang C, Li Y L, Qin S Q, et al. Comparison of wave forces of pile foundations for sea-crossing bridges provided in Chinese, American and British codes [J]. Bridge Construction, 2016, 46(6): 94–99.
- [4] Liu S, Li Y, Li G. Wave current forces on the pile group of base foundation for the East Sea Bridge, China [J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. B.), 2007, 19(6): 661–670.
- [5] 周卫滨, 徐祖恩, 于雪晖. 乐清湾大桥桥梁基础波浪力计算研究 [J]. 公路交通技术, 2015, 17(4): 80–86.
Zhou W B, Xu Z E, Yu X H. Research on calculation of wave forces of Yueqing Bay Bridge foundation [J]. Technology of Highway and Transport, 2015, 17(4): 80–86.
- [6] 中交第一航务工程勘探设计院有限公司. JTS 145-2015 港口与航道水文规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. JTS 145-2015 code of hydrology for harbour and waterway [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [7] Ti Z L, Zhang M J, Wu L H, et al. Estimation of the significant wave height in the nearshore using prediction equations based on the response surface method [J]. Ocean Engineering, 2018, 153(1): 143–153.
- [8] Padgett J, DesRoches R, Nielson B, et al. Bridge damage and repair costs from Hurricane Katrina [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(1): 6–14.
- [9] Zhu J, Zhang W. Numerical simulation of wind and wave fields for coastal slender bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 22(3): 4–10.
- [10] Azadbakht M, Yim S C. Simulation and estimation of tsunami loads on bridge superstructures [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2014, 141(2): 3–8.
- [11] Xiong W, Cai C S, Kong X. Instrumentation design for bridge scour monitoring using fiber Bragg grating sensors [J]. Applied Optics, 2012, 51(5): 547–557.