

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.204



桥梁水动力学 2020 年度研究进展

魏凯¹, 秦顺全^{1,2}, 赵文玉¹, 祝兵¹, 徐国际¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 中铁大桥勘测设计院有限公司, 武汉 430034)

摘要: 为了解桥梁水动力学研究发展动态, 在总结其研究内容、方法和成果的基础上, 更好开展后续研究, 从波流作用、基础局部冲刷、流固耦合、极端海洋环境多灾害作用等着手, 对 2020 年度发表的相关文献进行分类、总结和评述。综述发现, 桥梁水动力学的研究热点主要集中在极端波浪、水流作用及波流共同作用模型、桥墩局部冲刷影响因素及深度预测、地震作用下深水桥梁流固耦合、极端海洋环境多灾害作用等方面。通过梳理现有研究不足, 提出亟待开展的研究方向, 包括波流极端环境下的结构流固耦合、桥墩冲刷监测和防护、智能信息化的桥梁水动力灾害预见性及多灾害研究。

关键词: 跨海桥梁; 水动力学; 波流作用; 桥墩冲刷; 流固耦合; 多灾害作用

中图分类号: U442.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0031-12

State-of-the-art review of bridge hydrodynamics in 2020

WEI Kai, QIN Shunquan, ZHAO Wenyu, ZHU Bing, XU Guoji

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430034, P. R. China)

Abstract: To understand the development trend of the research of bridge hydrodynamics and on the basis of summarizing its research contents, methods and achievements, the follow-up research will be carried out better, this paper reviews the recent literatures published in 2020 from the aspects of wave current effect, local scour of foundation, fluid solid coupling, multi disaster effect of extreme marine environment, etc. It is found that the research hotspots of bridge hydrodynamics mainly focus on the models of an extreme wave, current action, and wave-current interaction, the influence factors and depth prediction of pier local scour, the fluid-structure coupling of the deep-water bridge under earthquake action, the combined effort of wind and wave disaster assessment and risk analysis of bridge in an extreme marine environment, response analysis and optimization design of long-span floating bridge structure. By combing the shortcomings of the existing research, the following urgent research directions are proposed: structural fluid-structure coupling in extreme wave and current environment, pier erosion monitoring and protection, intelligent and information-based bridge hydrodynamic disaster prediction, and multi disaster research.

Keywords: sea crossing bridge; hydrodynamics; wave current interaction; pier scour; fluid-structure interaction; multihazard action

随着“粤港澳大湾区”“长三角一体化”等区域协调发展战略稳步推进, 中国沿海地区和西部地区的陆路交通需求和经济发展需求不断增长, 中国桥梁的建设进入快速发展阶段。跨海桥梁和西部库区深水桥梁面临复杂多变的水动力环境, 不可避免地遭受波浪、流、冲刷等复杂的水动力作用, 同时, 桥梁结构-水之间的流固耦合效应、极端环境灾害和风

浪联合作用也显著影响着结构的动力响应。

在总结过去一年桥梁水动力方向研究新进展的基础上继续深入研究, 有必要对该方向的部分研究重点进行分析、总结和展望。在 Web of Science 和中国知网上搜索、整理了 2020 年度发表的有关“波流作用”“基础局部冲刷”“流固耦合”“极端海洋环境多灾害作用”等方面的中、英文期刊论文,

收稿日期: 2021-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(51978578); 宁波市科技创新 2025 重大专项(2019B10076)

作者简介: 魏凯(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事深水大跨桥梁研究, E-mail: kaiwei@swjtu.edu.cn.

并进行归纳、梳理和总结,以期为广大研究者开展工作提供些许参考和思路,并期待与广大同行共同促进桥梁水动力学方向的进一步发展。

1 跨海桥梁波、流作用

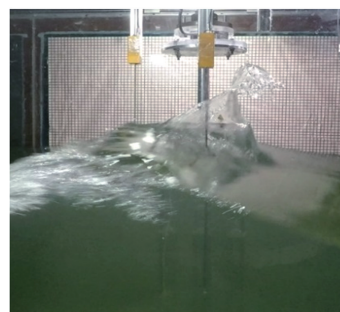
与陆地环境不同,海洋环境水深、浪高、流急,这也使得跨海桥梁遭受各种恶劣的自然环境作用,其中,波、流作用是造成桥梁损伤和破坏的关键因素。

1.1 极端波浪作用

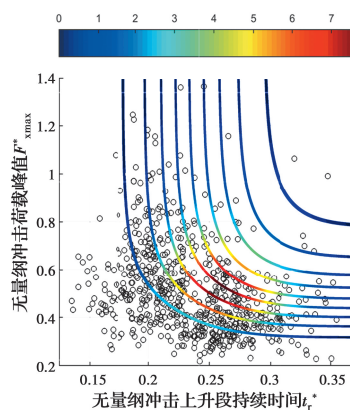
极端波浪对跨海桥梁的作用是近年来的研究热点之一。Huang 等^[1]基于势流理论,探究了淹没条件下沿海桥梁上部箱梁结构波浪荷载的解析计算方法。Matemu 等^[2]建立了单向耦合的绕射/受困气体模型,准确预测了波浪冲击作用下的桥梁波浪荷载。目前,对于极端波浪的定义尚不明确,不同研究采用的波浪条件存在较大差异。赵西增等^[3]利用能量聚焦方式模拟极端波浪,分析了不同淹没状态下桥梁上部结构受极端波浪作用时的波面、梁底压强及整体波浪力的变化,探究了桥梁上部结构发生损坏的可能原因。采用孤立波模拟极端波浪,Zhu 等^[4]研究了不同参数(水深,淹没深度、浪高等)对桥梁上部结构竖向和水平波浪力的影响;沈忠辉等^[5]研究了圆端形桥墩长宽比对桥墩周围波浪爬高、流速及桥墩波浪力的影响。为探明高桩承台波浪冲击荷载特性,Xu 等^[6]采用 Stokes 五阶波模拟极端波浪,研究了波高、承台净空和群桩对冲击荷载的影响,发现波高和承台净空对波浪冲击荷载有显著影响。魏凯等^[7]进一步研究了波浪冲击荷载的时变和随机特性,建立波浪冲击荷载时程模型,并给出冲击荷载峰值和冲击上升段持续时间的联合概率分布形式,如图 1 所示。

在极端海洋环境中,破碎波是影响海滨结构的重要原因之一,其荷载峰值可达到波高相同的非破碎波浪 5 倍以上^[8]。闫圣等^[9]提出了一种新的波能耗散模型来描述波浪恢复区的波浪运动。王红川等^[10]利用陡坡地形上的高阶抛物型缓坡方程建立了波浪传播和波浪破碎的数学模型。邓斌等^[11]发现波浪作用下直立结构物附近湍动能的分布与掺气水流特征参数呈一定的线性关系。Esandi 等^[12]通过水槽试验发现,崩破波高频直接激励墩柱以及高固有频率模式的共振和冲击激励会使其比同等幅值的非破碎波产生的力大得多。Frantzis 等^[13]利用浸入式边界与快速直接求解器的结合开发出高效的数值波浪水槽,并用崩破波进行了验证。

Ti 等^[14]测量并分析了 2015 年杜鹃台风期间一实际桥址的台风波谱,发现经验波浪谱与台风下的真实随机波浪谱有明显差异,并对比分析采用实测和经验波浪谱对跨海斜拉桥结构随机波浪动力响应的的影响。Huang 等^[15]分析了 2014—2016 年海坛海峡桥址区波浪现场实测数据,提出基于压缩感知算法的海洋波浪错误数据识别和重构方法,依据桥址区随机波浪谱双峰特性,提出了适用于海坛海峡桥址区的随机波浪谱,并指出所提出的随机波浪谱较现有波浪谱,在计算跨海桥梁结构受随机波浪力方面具有更高的准确性。



(a) 波浪冲击荷载试验



(b) 联合概率分布等值线

图 1 波浪冲击荷载时程联合概率模型

1.2 桥梁结构水流作用

水流作用下,不同形状的结构受力以及流场形态存在明显差异。杨万理等^[16]将圆柱模型竖向划分为多段,考虑自由液面、底部边界的影响,对比了各个分段阻力、升力特点及沿着水深的变化规律,如图 2 所示;Wu 等^[17]通过试验研究了不同长细比及雷诺数时方柱受力特性;魏凯等^[18]研究了地形、流速及吃水深度对圆端形沉井水动力和动水压强的影响;刘勇等^[19]则研究了不同参数对哑铃形围堰顺向和横向水流力的影响;陶善聪等^[20]采用本征正交分解对方柱绕流速度场进行模态分解,分析了各阶模态代表的流场特征,并通过分析速度梯度张量中的不变量,将方柱下游大致分为发展和成熟两个阶段。

1.3 波、流共同作用

波浪和海流作用时,群桩的受力和单桩有较大区别,各桩之间的相互影响不可忽略^[21]。这种影响不仅与相对桩距、桩基排列形式等结构因素有关,还与波高、流速等波浪和水流条件有关。对于大尺度结构而言,结构物的存在对波流场有着显著的影响,两者的相互作用更为复杂,波浪荷载的计算需要根据波、流相对强弱的不同,采用不同的方法进行考虑^[22]。随着计算机技术的发展,数值模拟方法以其独特的优越性,逐渐成为研究此类问题的主要手段之一。

为研究跨海桥梁施工期围堰波流荷载,康啊真等^[23]采用垂向多层坐标变换模型来模拟不规则的自由面,引入浸没边界法(IBM)来处理不规则结构物表面,建立了基于 LES 的三维波流与结构物相互作用的数值模型,如图 3 所示。研究不同长宽比(1.0、1.5、2.0)的矩形围堰与斜向波流(入射角)的

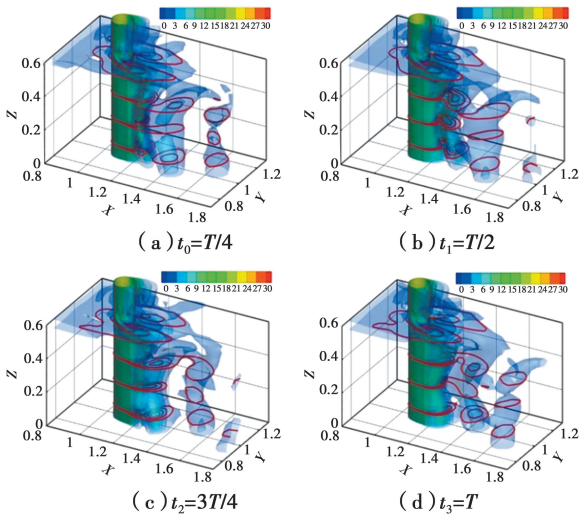


图 2 一个周期内三维涡流结构的发展与脱落过程^[16]

相互作用,并与纯波情况进行对比。对于新型哑铃型围堰,康啊真等^[23]采用实验和数值结合的方法,探究了波流入射角度、流速、静水波高和波周期对水动力系数的影响,并对结构周围的自由表面和三维涡量分布进行了分析。研究表明,水动力系数与入射水流方向的正弦值有较强的相关性。T型主梁及箱型主梁是跨海桥梁中常采用的两种主梁类型,Yang等^[24]通过数值模拟,基于主梁板件的局部受力分析,对这两种类型主梁的波浪力进行对比分析,探究了主梁截面形式对跨海桥梁波浪力的影响。Zhang等^[25]开展了1:30比尺的水槽试验,测试不同波高、流速、周期和淹没深度等条件对箱梁上部结构波浪力影响,并进一步分析箱梁在风暴潮引起的极端波流作用下的破坏形式。

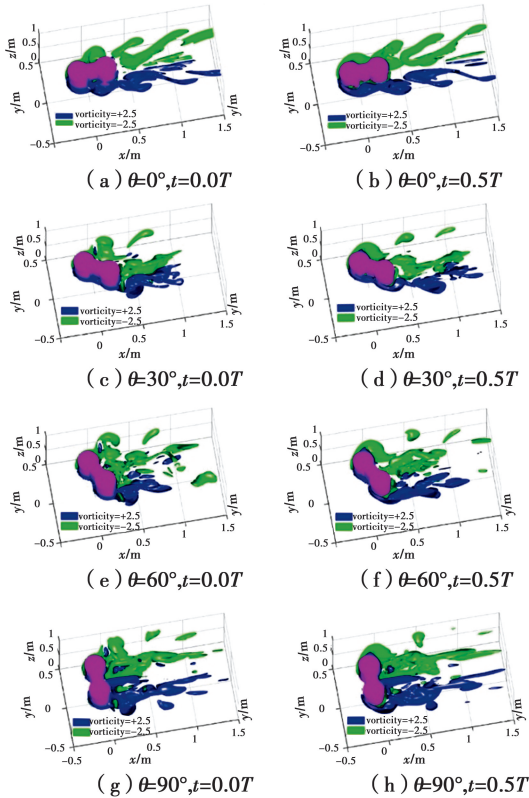


图 3 哑铃形圆柱体周围垂直涡等值面^[23]

1.4 波、流作用下跨海桥梁基础优化

过去一年,学者们围绕基础水动力几何外形、基础结构形式优化、新型基础开发等方面进行了相关实验以及数值研究。在深水环境中,结构的横、纵截面形状会影响流场的分布,从而改变波浪力、水动力在结构上引起的响应。对基础结构外形进行优化,能降低基础冲刷深度、减少基础响应等,从而提高基础的承载能力、降低工程造价。陈上有等^[26]基于波浪场中动水压强的空间分布特征,提出了消减跨海桥梁沉箱基础波浪荷载、优化沉箱基础外形的两种方法:一是优化基础横截面外形,调节基础横截面外轮廓不同位置波浪压力的相位差,如图 4 所示;二是优化基础竖截面外形,将基础下部的迎浪面设置为外伸斜面。Memar等^[27]开展了翅型、方型、管型和 H 型截面 4 种不同截面形式的实验研究,研究了不同截面形状桩侧阻力。Luan等^[28]提出了竖向简谐荷载作用下群桩动力响应的解析解,该解利用新的动力相互作用因子,考虑桩几何形状对竖向荷载群桩的桩顶阻抗的影响,并分析桩半径和桩间距对提出的动力作用因子和桩群阻抗的影响。

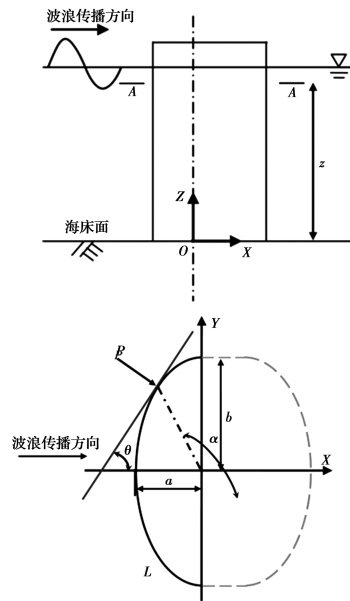


图 4 基础横截面轮廓外形示例^[26]

有关桥梁基础的形式,基础结构优化设计涉及的影响因素较多^[29],包括承台底高程、承台尺寸、桩长、桩径、桩数、桩倾斜率、桩壁厚等,各参数的确定对基础结构设计具有十分重要的意义。Xu等^[6]在跨海大桥群桩基础高桩承台极限波浪力的试验中,研究了设置不同间隙高度下的承台和带桩承台情况下的波浪力,给出关于间隙高度和波高的波浪力函数,为高桩承台基础的优化设计提供了科学依据。Wu等^[17]在 ANSYS 软件二次开发的基础上,建立了在地震、波浪、水流联合荷载作用下考虑流固耦合作用的数值计算模型,研究单桩、并排桩、串联桩、2×2、3×3 布置形式的跨海桥梁基础等不同桩基布置方式对群桩地震作用下桩基水动力的影响。Tu等^[30]开展了沉箱、四桩沉箱和八桩沉箱 3 种不同类型深水基础的模型试验,研究了不同激振力作用下沉箱的横向非

线性动力特性以及冲刷深度对基础动力响应的影响,研究表明,在沉箱基础下方加桩能显著降低基础的动力振幅,特别是在共振频率附近。Zhou 等^[31]通过 3 组不同形式的桩:一组 RC 桩、一组部分 SCC 桩(钢管包裹钢筋混凝土桩)和一组全嵌套钢管桩,开展了钢管对原钢筋混凝土桩性能影响的研究,提出了钢管最佳长径比的拟合公式,并讨论了最不利的长径比。Chen 等^[32]提出了结合单桩和宽浅桶新型复合基础,对其在静、动载荷作用下的性能进行了数值分析,图 5 给出复合基础的示意图,研究表明,在基础上加桶能有效抑制基础的转动和侧移,在波浪和潮流荷载作用下,复合基础的优越性显著。

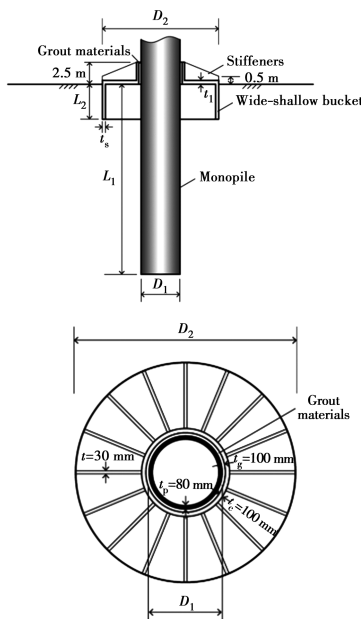


图 5 拟建复合基础示意图^[32]

2 桥梁基础局部冲刷

桥梁基础局部冲刷是由于水流被结构物阻挡,从而侵蚀并携走泥沙的自然现象。由于水流带走了基础周围的泥沙,导致桥梁基础侧向承载力降低,结构固有频率改变,从而直接或间接地威胁了结构的安全。局部冲刷过程包含水流、泥沙和结构物三者的相互作用,涉及水动力、泥沙输运等理论,作用机理较复杂。

2.1 局部冲刷预测

局部冲刷预测主要集中于局部冲刷影响因素和预测方法的研究。局部冲刷的影响因素主要包含结构外形、水利因素以及泥沙条件。明确各因素的影响程度是预测冲刷深度的必要条件。Abbas 等^[33]研究了双柱墩的倾斜角的变化对局部冲刷的影响,发现随着夹角的增大,冲刷深度不断减小。Khaledi 等^[34]对清水条件下群桩基础的冲刷坑的长宽进行了研究,发现冲刷坑的尺寸受到基础外形和承台高度的影响。Solati 等^[35]研究了时变流量对局部冲刷的影响,探究了流量到达峰值的持续时间长短对局部冲刷的影响以及流量下降过程中局部冲刷深度的变化。Bombar^[36]研究了圆柱桥墩在非定常、清水条件下的局部冲刷发展过程,发现冲刷开始时

间随水流稳定性的减小而减小,最终冲刷深度受水文变化的影响较小。Xiang 等^[37]研究了单向流和往返流对局部冲刷深度的影响,发现往返流条件下,冲刷深度发展速度与最大冲刷深度均小于单向流。Panici 等^[38]对河流碎屑与桥墩外形进行了研究,发现圆形碎屑和带分支木屑的堆积阻塞程度小于不带分支的木屑,墩形对木屑的堆积影响较小,如图 6 所示。Rahimi 等^[39]研究了并排桥墩和桥台在碎屑堆积下的冲刷,分析了桥墩与桥台的间距、碎屑的形状、厚度、位置、长度对冲刷的影响。Asadollahi 等^[40]对位于 180°急弯河道中不同位置处的群桩基础的冲刷进行了数值模拟,研究了不同位置的最大冲刷深度和最大淤积。Rasaei 等^[41]对 90°急弯河道的桥墩冲刷进行了研究,发现随着桥墩放置角度的增加,冲刷坑深度和冲刷体积增加。Sedighi 等^[42]研究了两种形式的双倾斜桥墩在 180°急弯河道中不同位置以及不同流速下的冲刷,发现 A 型桥墩最大冲刷深度随着角度增加而增大, V 型桥墩发生最大冲刷深度的位置随流速的不同而不同。Xiang 等^[43]研究了沉井下沉过程中沉井底面距河床的间隙对冲刷坑和流场的影响,探究了沉井下沉过程中冲刷深度与沉井下沉到位后的冲刷深度的关系。



图 6 河道树枝堆积^[38]

针对局部冲刷深度的预测,各学者基于试验和实测数据提出经验公式、修正已有的经验公式、探究机器学习算法对局部冲刷深度的预测效果。诸多学者对桥墩尺寸、形状、流速^[44]、泥沙条件^[45]、KC 数、相对流强度、承台高度、攻角^[46]以及泥沙供给量^[47]等进行了参数分析,提出了局部冲刷深度预测模型。Pandey 等^[48]引入冲刷因子,优化了非均匀砾石条件下的冲刷深度计算公式。Yang 等^[49]研究了承台位置和攻角对复杂桥墩局部冲刷的影响,对 Melville 和 Sheppard 的公式进行修正以适用于复杂桥墩冲刷。Ebrahimi 等^[50]研究了河道杂屑堆积对桥墩局部冲刷深度的影响,提出碎片因子,取代了冲刷计算式中的有效墩宽,冲刷深度计算精度得到了明显的提高。Adib 等^[51]对比了 4 种神经网络方法对群墩平衡冲刷深度的预测效果,发现多层感知器(multi layer perceptron)和径向基(radial basis function)神经网络对冲刷深度的预测结果较好。Bonakdari 等^[52]应用极限学习机的方法对冲刷深度进行了预测,并进行参数敏感性分析。Ghodsi 等^[53]采用数据分组处理方法(GMDH)对复杂群桩局部冲刷进行预测,对比了不同的传递函数对不同承台位置的适用性。Tien Bui 等^[54]应用错误率降低剪枝决策树的方法预测了冲刷深度,并与人工神经网络、支持向量机、M5P 模型树以及 HEC-18 进行了冲刷深度预测精度对比。

2.2 局部冲刷监控

局部冲刷的监测主要集中于监测方法和设备的研究。Boujia 等^[55]采用桥墩模态对冲刷深度进行监测,考虑了桥面的存在对模态的影响。Malekjafarian 等^[56]针对浅基础提出了基于桥墩模态变化的冲刷监控方法以及冲刷评价指标。Maroni 等^[57]介绍了应用电磁传感器的冲刷监测系统,实现了在极端洪水条件下的监测。Wan Mohtar 等^[58]采用图像技术进行了冲刷监测,实现局部冲刷连续监测。Wang 等^[59]采用时域反射仪对局部冲刷的监测,研究了不同波导配置对局部冲刷监测的敏感性,如图 7 所示。

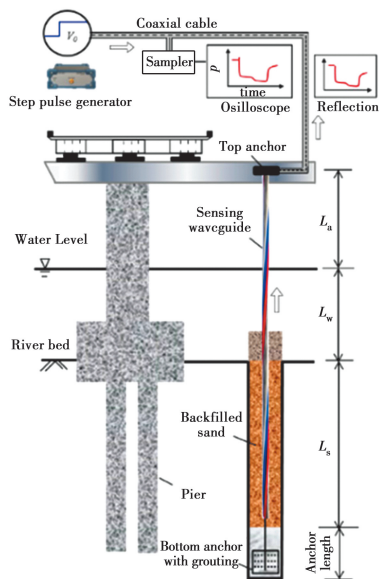


图 7 冲刷监测示意图^[59]

2.3 局部冲刷防护

局部冲刷的防护主要集中于防护形式与布置研究。Ferraro 等^[60]对桥墩护圈进行了研究,发现标准护圈和镶边护圈极大地减小了局部冲刷深度与冲刷体积。Pandey 等^[61]研究了护圈高度和直径对局部冲刷的防护效果,并提出了携带护圈桥墩冲刷深度计算式。Nazari-Sharabian 等^[62]研究了牺牲桩的数量及位置对局部冲刷的防护效果,并针对不同桩数提出了防冲刷的最优排布。

Vaghefi 等^[63]对 180°急弯河道中位于 90°位置处的桥墩进行了冲刷防护研究,发现在 70°外侧河岸安装丁坝可以减小 50% 的冲刷深度。Moghanloo 等^[64]研究了 180°弯曲河道中护圈高度和厚度对局部冲刷的影响,发现在 90°位置时,护圈高度为 0.4 倍墩宽、厚度为 0.06 或 0.12 倍墩宽,防冲刷效果最好,如图 8 所示。

2.4 考虑冲刷的桥梁多灾害研究

局部冲刷条件下多灾害研究主要集中于桥梁结构在局部冲刷条件下的地震性能分析。Zhu 等^[65]通过对冲刷条件下的单桩进行离心振动台试验,发现冲刷坑的存在降低了桩身的一阶固有频率,增加了桩身弯矩和桩顶横向位移。Liang 等^[66]对冲刷条件下的群桩基础进行了地震响应分析,发现随着冲刷深度的增加,桩端弯矩和承台加速度显著增大。He 等^[67]采用耐震时程法对冲刷条件下的桥梁抗震易损性进行

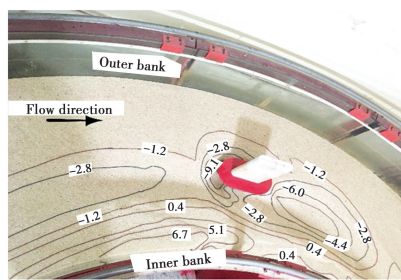


图 8 180°急弯冲刷试验^[64]

了分析,发现冲刷深度的增加会降低基础承载力,提高结构延性,如图 9 所示。He 等^[68]对冲刷条件下的群桩基础进行了抗震性能评估,发现柔性弹性模量分布塑性较模型对计算桥墩非线性变形更准确。Song 等^[69]研究了冲刷条件下桥梁的抗震性能,探究了上部结构和冲刷剖面对抗震性能的影响,发现最小冲刷深度足以改变设计时采用的极限抗震性能。

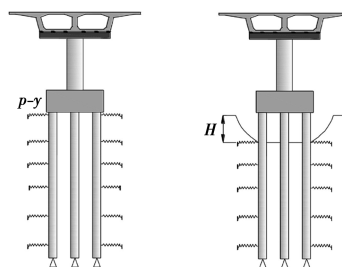


图 9 地震作用下冲刷简化模拟

上述研究表明,近年来桥梁科研人员对基础局部冲刷研究的热度高涨。2020 年对桥梁冲刷的研究论文将近百余篇,其中,多数文献集中于局部冲刷影响因素以及局部冲刷深度预测的研究,而局部冲刷监测、防护以及冲刷条件下的多灾害研究则相对较少。目前,对于局部冲刷的研究仍处于初级阶段,对局部冲刷预测、监测、防护以及多灾害耦合的研究仍具有重要的实际意义。同时,针对急弯冲刷、河道碎屑对冲刷的影响国内研究较为匮乏,对于除地震外的冲刷条件下的多灾害研究,国内外研究均较少,但其研究具有较高的实用价值,发展前景较为广阔。除上述研究外,桥梁局部冲刷的数值模拟手段研究,在不同泥沙、水流环境下,复杂结构物的局部冲刷机理研究尽管文献数量较少,但其研究意义重大,具有长远的发展前景。

3 深水桥梁流固耦合研究

深水桥梁流固耦合大致可分为:水体-结构相互作用的强耦合、简化为流体对结构产生附加质量和附加阻尼的弱耦合及深水桥梁地震响应分析^[70]。

3.1 深水桥梁流固耦合理论研究

一般强耦合需要建立流体、结构运动方程,然后根据浸入边界法 (IBM) 用数值方法求解 Navier-Stokes 方程。如图 10 所示, Greco 等^[71]基于任意拉格朗日-欧拉移动网格法,考虑桥梁变形和动壁条件,建立了流体和结构体系三维实体流固耦合模型,研究桥梁结构在极端洪水或海啸作用下的易损

性。弱耦合的方式简单,计算成本低,在工程中应用较广。Ma 等^[72]将动水压力的作用考虑为附着于结构上的移动水团,研究了波浪与桥墩流固耦合作用下非线性粘滞阻尼器参数的随机优化及其阻尼性能。赵密等^[73]针对矩形柱体在水中的振动问题,提出了一种代替水-结构动力相互作用的附加质量模型。Zhang 等^[74]提出了基于贝叶斯更新的矩形承台动水附加质量计算公式,并通过流固耦合数值模型和水槽实验验证了公式的准确性,如图 11 所示。郭婕等^[75]基于辐射理论推导了考虑结构变形的精确解,从频响函数的角度比较分析各水动力简化方法。研究发现,刚性柱法所得共振幅值更精确,基频近似法所得共振周期更精确,莫里森法误差受参数的影响显著。

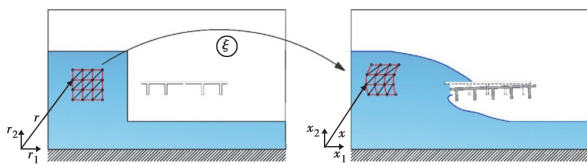
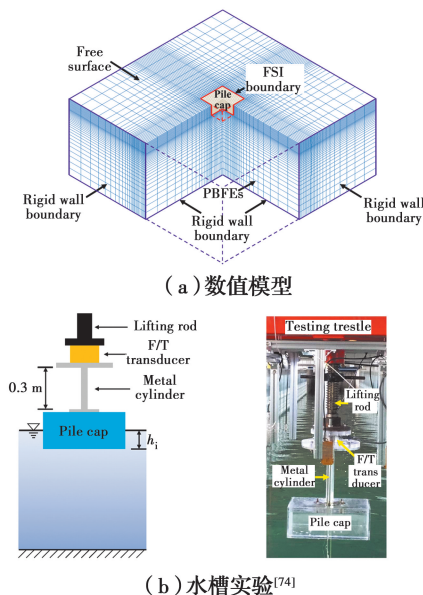


图 10 任意拉格朗日-欧拉移动网格设置^[71]



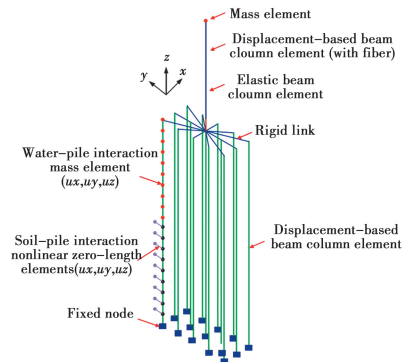
(b) 水槽实验^[74]

图 11 矩形承台

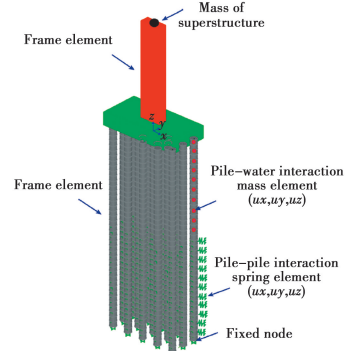
3.2 深水桥梁在地震作用下的流固耦合研究

目前,诸多学者在深水桥梁地震作用下的流固耦合研究领域做出突出贡献。Zhang 等^[76]采用 OpenSees 分析平台建立了考虑流体-桩-土相互作用的群桩基础三维有限元模型,对桥梁桩基进行地震易损性分析,研究发现,考虑桩-水-土相互作用时,近断层脉冲(PNF)比远场(FF)和无脉冲近场(NNF)诱发更大的地震响应,如图 12 所示。Pang 等^[77]采用耐震时程法研究了不同水深下库区桥梁的地震反应。在考虑桩-土相互作用、动水压力联合作用的影响下,吴文朋等^[78]基于 OpenSees 建立了深水连续刚构桥梁有限元模型,通过桥梁不同构件的概率需求模型和易损性曲线,分析和评估了深水桥梁的抗震性能。基于辐射和绕射波浪理论,Wang 等^[79-80]分别研究了圆柱和倾斜圆柱在地震和波浪的共同作

用下水-土-结构的相互作用,研究发现,波浪力会显著提高圆柱的动力响应,且随刚度比的增大和宽深比的减小而增大。马婧等^[81]以跨海桥梁为研究对象,探讨了动水压力对拉索减震支座减震体系下深水桥梁地震响应的影响。鉴于实验设备和场地的局限性,目前深水桥梁振动台实验较少。Yun 等^[82]通过振动台实验,研究了地震-波-流共同作用下全桥的动力响应,发现相较于无水条件,水中桥梁自振频率降低,动力放大系数增大,地震对动力放大系数影响较大,波和流对动水压力影响较大。



(a) OpenSees模型



(b) SAP2000模型^[76]

图 12 桥梁群桩基础模型

现今,机器学习在深水桥梁地震响应研究中发挥着重要作用。Zhao 等^[83]利用 OpenSees 分析平台建立了一系列实际桥墩的有限元模型,并结合最小二乘支持向量机(LS-SVM)算法和 JC 方法,提出了一种新的库区深水桥梁在近场地震动作用下的易损性评估方法。

4 跨海桥梁极端海洋环境多灾害作用

跨海桥梁易受风、浪、海啸、地震、风暴潮等多种极端灾害共同作用。多灾害的破坏性、群发性、不可预见性,给跨海桥梁的正常运行和安全带来极大的挑战。如何进行跨海桥梁灾害识别、评判多种极端灾害下跨海桥梁的失效概率,建立完备的灾害评估、风险分析框架对跨海桥梁的正常运营和灾害防御具有重要的意义。

4.1 桥梁风浪联合作用

对于大跨海桥梁,全桥不仅要承受风荷载的作用,其基础同时承受波浪荷载的作用。桥梁风致振动与波浪作用引起的上部结构振动可能导致一系列的问题。尤其是对于大

跨桥梁,风浪联合作用造成的结构响应更加明显。桥梁在风浪联合作用下的响应研究进展主要集中在机器学习的概率模型与极端风浪条件两个方面。

Xu 等^[84]提出了一种用增广数据更新代理模型的方法,该方法在更新周期内同时使用两个包含 kriging 和支持向量回归的代理模型来提出新的设计样本,可以大幅度提高工程实验的设计水平,如图 13 所示。Fang 等^[85-86]提出了基于机器学习的浪-风-桥概率评估模型。该模型采用支持向量回归和拉丁超立方体抽样的学习机来代替有限元计算,将模型参数化,简化为风、浪随机变量的响应面,并对大量样本进行概率模拟。研究发现,风荷载控制了梁的位移响应,而波浪荷载主导了地基的基础剪力反应。Lu 等^[87]采用基于机器学习的方法,对结构细节的随机疲劳损伤进行量化,以车辆的参数概率模型、风和波浪随机荷载为输入参数,预测了跨海桥梁的剩余疲劳寿命。

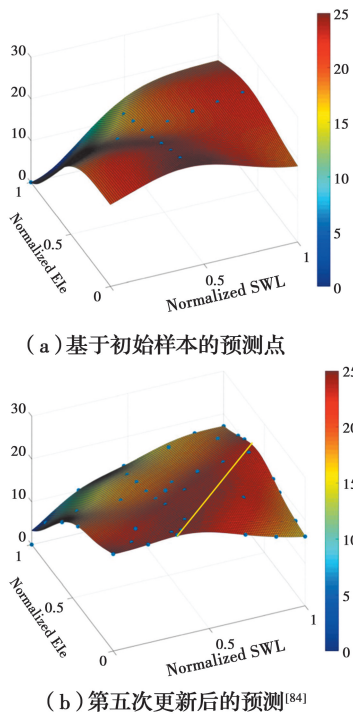


图 13 基于图中标记点的支持向量回归水平力拟合曲面

Weier 等^[88]以正在修建跨海大桥的平潭海峡为背景,利用 SWAN+ADCIRC 耦合数值模式模拟了台风引起的最大风速、最大波高及其时滞。在模拟数据的基础上,进行了风、浪、时滞三变量联合概率模型的建立,如图 14 所示。结果表明,在该实例位置,超过 50%的台风最大风滞后于最大波浪。台风引起的最大风速和波高往往同时出现。

4.2 多灾害作用下桥梁失效风险评估

极端灾害的破坏性和严重性,不仅取决于灾害本身,同时还与承灾体的脆弱性和暴露性密切相关。因此,极端灾害的预见性研究和承灾体的脆弱性研究一直是目前国内外自然灾害领域研究的重点和热点问题。侯一筠等^[89]综述了中国海洋动力灾害的研究进展,包括灾害性海浪、海冰、海啸的数值模拟和灾害风险研究。对于跨海桥梁常遇的台风,Fang

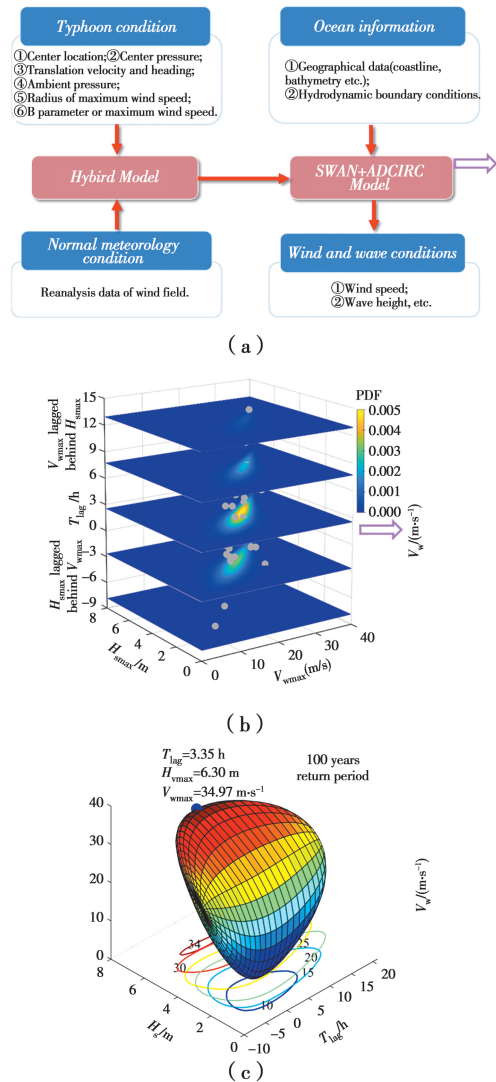


图 14 台风引起的最大风速、最大波高及其时滞的三维概率模型^[88]

等^[90]开发了先进的三维台风模型,绘制了中国沿海的台风风灾地图。未来,结合智能信息化的灾害预见性研究将是重要的方向。

针对桥梁作为主要承灾体的脆弱性研究,Pathiranage 等^[91]采用失效树分析方法对飓风影响下木质桥梁和混凝土桥梁的主要构件的失效概率进行了评估。Snaiki 等^[92]提出了一种评估气候变化下飓风、风暴潮对沿海桥梁危害风险的有效方法。Fiorillo 等^[93]结合国家桥梁数据库,利用概率风险方法,识别、评估和量化了桥梁的结构风险成分。Balomenos 等^[94]研究了不同空间、不同桥梁类别(混凝土梁,钢梁,平板,箱形梁)波浪荷载的变化,利用系统可靠性提出桥梁系统易损性评估框架,并给出飓风作用下近海桥梁的升起概率,如图 15 所示。Li 等^[95]提出基于 Copula 理论的脆弱性评估框架,以研究飓风作用下相关风暴参数对民用基础设施脆弱性的影响。Ishibashi 等^[96]针对地震和海啸灾害下的道路网络,建立了基于风险和应变能力的评估框架,绘制了海啸风险图,如图 16 所示,并通过风险和应变能力,讨论各种结构的改造优先级。

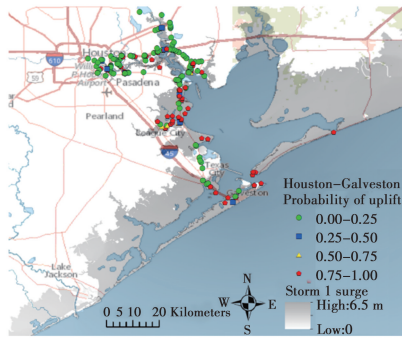


图 15 飓风作用下休斯顿-加尔维斯顿地区桥梁升起概率^[94]

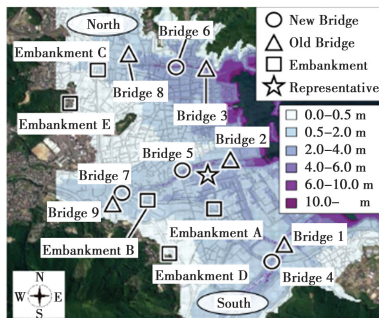


图 16 Owase 市估计海啸平均波高分布图和海啸危险曲线^[96]

Liu 等^[97]、Yang 等^[98]考虑温度升高、海平面升高、飓风频率和强度以及社会经济等因素,使用拉丁超立方体抽样和生命周期风险评估,将相关因素的整个空间分为可接受和不可接受的类别。然后,使用包含功能评分、场景发现和维度堆叠的高级分析工具确定桥梁脆弱性的驱动因素及产生不可接受风险的阈值。最后,建立基于交通网络的风险评估框架。Li 等^[99]提出了在多种独立自然灾害下对公路桥梁进行长期回弹和损失评估的综合框架;阐述了地震、飓风和洪水等极端事件对桥梁生命周期性能的影响。该框架可以在多种极端事件下实现基础设施系统的设计、维护和改造优化。Ram 等^[100]改进了基于指标的方法,以解决运输系统对气候变化的脆弱性评估问题。

近年来,中国修建了一大批长大跨度海洋桥梁,如杭州湾跨海大桥、中深通道、港珠澳大桥。以往低矮的中小跨度桥梁面临的自然灾害风险,与长大跨度桥梁截然不同。长大跨度桥梁损伤的后果是巨大的,同时在结构损伤风险中,还增加了运营、疏散救援等新的问题。然而,这方面的研究目前还比较匮乏。如何结合现场监测数据,提高海洋灾害预测精度;如何结合智能信息化平台,实现灾害智能预警;如何进行长大跨度桥梁灾害综合风险评估和脆弱性分析,是未来研究的重要方向。

5 总结与展望

通过对 2020 年度发表的中、英文文献进行分类和综述,发现过去一年桥梁水动力学的研究热点主要集中在极端波浪、水流作用以及波流共同作用模型、桥墩局部冲刷影响因素以

及深度预测、地震作用下的深水桥梁流固耦合、极端海洋环境多灾害作用等方面。

通过梳理现有研究的进展,提出如下亟待开展的研究方向,包括波流极端环境下等的结构流固耦合、桥墩冲刷监测和防护、智能信息化的桥梁水动力灾害预见性以及多灾害研究等。期待与相关学者共同努力,为桥梁水动力学发展做出积极的贡献。

致谢

重庆交通大学黄博博士、秦顺全院士团队研究生:袁放、沈忠辉、张枫、姜沫臣、杨雄欣、周聪、周远润、廖翔、殷雪霜、尚黛梦、钟茜参与了文献收集、整理和归纳工作,对他们的辛苦付出表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] HUANG B, REN Q Y, CUI X L, et al. Study of wave forces acting on the box-girder superstructure of coastal bridges in the submerged condition based on potential flow theory [J]. *Advances in Bridge Engineering*, 2020, 1(1): 1-20.
- [2] MATEMU C, CROWLEY R, RESIO D. Development of a one-way coupled diffraction/trapped air model for predicting wave loading on bridges under water wave attack [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2020, 97: 103067.
- [3] 赵西增, 童晨奕, 姚炎明. 极端波浪对跨海桥梁上部结构作用研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(12): 127-132.
- [4] ZHU D M, DONG Y. Experimental and 3D numerical investigation of solitary wave forces on coastal bridges [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 209: 107499.
- [5] 沈忠辉, 魏凯, 杨绍林. 孤立波作用下不同长宽比圆端形桥墩受力数值分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(6): 945-951.
- [6] XU B, WEI K, QIN S Q, et al. Experimental study of wave loads on elevated pile cap of pile group foundation for sea-crossing bridges [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106896.
- [7] 魏凯, 周聪, 徐博. 跨海桥梁高桩承台波浪冲击荷载概率模型[J]. *工程力学*, 2020, 37(6): 216-224.
- [8] 李炎保. 破碎波对桩柱的作用力及其流场的研究进展[J]. *水动力学研究与进展*, 1989, 4(2): 103-110.
- [9] 闫圣, 邹志利. 海岸波浪多次破碎波能耗散模型[J]. *海洋学报*, 2020, 42(9): 30-37.
- [10] 王红川, 刘华帅, 杨汜. 斜坡平台波浪破碎数值模拟[J]. *海洋工程*, 2020, 38(4): 54-60.
- [11] 邓斌, 王孟飞, 黄宗伟, 等. 波浪作用下直立结构物附近强湍动掺气流体运动的数值模拟[J]. *力学学报*, 2020, 52(2): 408-419.

- [12] ESANDI J M, BULDAKOV E, SIMONS R, et al. An experimental study on wave forces on a vertical cylinder due to spilling breaking and near-breaking wave groups [J]. *Coastal Engineering*, 2020, 162: 103778.
- [13] FRANTZIS C, GRIGORIADIS D G E, DIMAS A A. An efficient Navier-Stokes based numerical wave tank using fast Poisson solvers and the immersed boundary method [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 196: 106832.
- [14] TI Z L, WEI K, LI Y L, et al. Effect of wave spectral variability on stochastic response of a long-span bridge subjected to random waves during tropical cyclones [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(1): 04019118.
- [15] HUANG B, REN Q Y, CUI X L, et al. Wave characteristics and spectrum for Pingtan Strait Bridge location [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 219: 108367.
- [16] 杨万理, 吴承伟, 朱权龙, 等. 桥梁墩柱三维绕流特性精细化研究[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(1): 134-143.
- [17] WU A J, YANG W L. Numerical study of pile group effect on the hydrodynamic force on a pile of sea-crossing bridges during earthquakes [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 199: 106999.
- [18] 魏凯, 杨雄欣, 刘强, 等. 大型桥梁沉井下沉过程中的水动力数值模拟[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(11): 62-67.
- [19] 刘勇, 祝兵, 张程然, 等. 哑铃形咬合桩围堰水动力作用试验研究[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(10): 72-76.
- [20] 陶善聪, 郝克理, 周毅. 单方柱绕流的直接数值模拟[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(2): 445-452.
- [21] ANDRZEJ S, RYSZARD S. Wave-induced stresses and pore pressures near a mudline [J]. *Oceanologia*, 2008, 50(4): 539-555.
- [22] 胡勇, 雷丽萍, 杨进先. 跨海桥梁基础波浪(流)力计算问题探讨[J]. *水道港口*, 2012, 33(2): 101-105.
- [23] 康啊真, 殷瑞涛, 祝兵, 等. 基于 LES 的跨海桥梁施工期围堰波流数值模拟[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(3): 537-544, 589.
- [24] YANG Z Y, HUANG B, ZHU B, et al. Comparative study of tsunami-like wave-induced forces on medium-scale models of box girder and T-girder bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2021, 26(2): 04020125.
- [25] ZHANG J W, ZHU B, KANG A Z, et al. Experimental and numerical investigation of wave-current forces on coastal bridge superstructures with box girders [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(7): 1438-1453.
- [26] 陈上有, 刘高, 刘天成. 消减波浪荷载的桥梁沉箱基础外形设计研究[J]. *公路*, 2020, 65(3): 80-86.
- [27] MEMAR M, ZOMORODIAN S M A, VAKILI A H. Effect of pile cross-section shape on pile group behaviour under lateral loading in sand [J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2020, 20(5): 308-319.
- [28] LUAN L B, DENG X, DENG W T, et al. Influence of pile geometry on responses of end-bearing pile groups subjected to vertical dynamic loads [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2020, 20(4): 2050050.
- [29] 李振作, 田伟辉, 胡永柱. 海上风电机组多桩承台基础结构与参数优化分析[J]. *水力发电*, 2015, 41(1): 78-81, 98.
- [30] TU W B, HUANG M S, GU X Q, et al. Experimental and analytical investigations on nonlinear dynamic response of caisson-pile foundations under horizontal excitation [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 208: 107431.
- [31] ZHOU W W, GAO R X, ZHU H P, et al. Behavior of steel casing composite piles under lateral loading and parameter optimization [J]. *Engineering Structures*, 2020, 220: 110991.
- [32] CHEN D, GAO P, HUANG S S, et al. Static and dynamic loading behavior of a hybrid foundation for offshore wind turbines [J]. *Marine Structures*, 2020, 71: 102727.
- [33] ABBAS F M, NAEEM U A, GHANI U, et al. Experimental study of inclined bridge pier scouring [J]. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 2020, 39(4): 859-870.
- [34] KHALEDI V, AMINI A, BAHRAMI J. Physical simulation of scour width and length variation around complex piers under clear water condition [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(9): 1107-1114.
- [35] SOLATI S, VAGHEFI M, BEHROOZI A M. Effect of duration and pattern of hydrographs on scour around pier in sharp bend under incipient motion and live bed conditions [J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2021, 19(1): 51-65.
- [36] BOMBAR G. Scour evolution around bridge piers under hydrographs with high unsteadiness [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2020, 44(1): 325-337.
- [37] XIANG Q Q, WEI K, QIU F, et al. Experimental study of local scour around caissons under unidirectional

- and tidal currents [J]. *Water*, 2020, 12(3): 640.
- [38] PANICI D, DE ALMEIDA G A M. Influence of pier geometry and debris characteristics on wood debris accumulations at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 146(6): 04020041.
- [39] RAHIMI E, QADERI K, RAHIMPOUR M, et al. Scour at side by side pier and abutment with debris accumulation [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(4): 459-470.
- [40] ASADOLLAHI M, VAGHEFI M, AKBARI M. Effect of the position of perpendicular pier groups in a sharp bend on flow and scour patterns: Numerical simulation [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42(8): 1-15.
- [41] RASAEI M, NAZARI S, ESLAMIAN S. Experimental investigation of local scouring around the bridge piers located at a 90° convergent river bend [J]. *Sādhanā*, 2020, 45(1): 1-15.
- [42] SEDIGHI F, VAGHEFI M, AHMADI G. The effect of inclined pair piers on bed topography: Clear water, incipient motion and live bed [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2021, 45(3): 1871-1890.
- [43] XIANG Q Q, WEI K, LI Y D, et al. Experimental and numerical investigation of local scour for suspended square caisson under steady flow [J]. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(9): 2682-2693.
- [44] DAS V K, CHAUDHURI S, BARMAN K, et al. Pier scours in fine-grained non-cohesive sediment and downstream siltation, an experimental approach [J]. *Physical Geography*, 2020: 1-18.
- [45] LEE S O, ABID I, HONG S H. Effect of complex shape of pier foundation exposure on time development of scour [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2021, 21(1): 103-127.
- [46] YANG Y F, MELVILLE B W, MACKY G H, et al. Experimental study on local scour at complex bridge pier under combined waves and current [J]. *Coastal Engineering*, 2020, 160: 103730.
- [47] LINK O, GARCÍA M, PIZARRO A, et al. Local scour and sediment deposition at bridge piers during floods [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 146(3): 04020003.
- [48] PANDEY M, OLIVETO G, PU J H, et al. Pier scour prediction in non-uniform gravel beds [J]. *Water*, 2020, 12(6): 1696.
- [49] YANG Y F, MELVILLE B W, MACKY G H, et al. Temporal evolution of clear-water local scour at aligned and skewed complex bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 146(4): 04020026.
- [50] EBRAHIMI M, DJORDJEVIĆ S, PANICI D, et al. A method for evaluating local scour depth at bridge piers due to debris accumulation [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering*, 2020, 173(2): 86-99.
- [51] ADIB A, TABATABAEE S H, KHADEMALRASOUL A, et al. Recognizing of the best different artificial intelligence method for determination of local scour depth around group piers in equilibrium time [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(19): 1-11.
- [52] BONAKDARI H, MORADI F, EBTEHAJ I, et al. A non-tuned machine learning technique for abutment scour depth in clear water condition [J]. *Water*, 2020, 12(1): 301.
- [53] GHODSI H, KHANJANI M J. Application of improved GMDH models to predict local scour depth at complex bridge piers [J]. *Civil Engineering Journal*, 2020, 6(1): 69-84.
- [54] TIEN BUI D, SHIRZADI A, AMINI A, et al. A hybrid intelligence approach to enhance the prediction accuracy of local scour depth at complex bridge piers [J]. *Sustainability*, 2020, 12(3): 1063.
- [55] BOUJIA N, SCHMIDT F, CHEVALIER C, et al. Using rocking frequencies of bridge piers for scour monitoring [J]. *Structural Engineering International*, 2021, 31(2): 286-294.
- [56] MALEKJAFARIAN A, KIM C W, O'BRIEN E J, et al. Experimental demonstration of a mode shape-based scour-monitoring method for multispan bridges with shallow foundations [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(8): 04020050.
- [57] MARONI A, TUBALDI E, FERGUSON N, et al. Electromagnetic sensors for underwater scour monitoring [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(15): 4096.
- [58] WAN MOHTAR W H M, MUAD A M, PORHEMMAT M, et al. Measuring scour level based on spatial and temporal image analyses [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2021, 28(1): e2645.
- [59] WANG K, LIN C P, JHENG W H. A new TDR-based sensing cable for improving performance of bridge scour monitoring [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(22): 6665.
- [60] FERRARO D, FENOCCHI A, GAUDIO R. Hydrodynamics of a bordered collar as a countermeasure

- against pier scouring [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2020, 476(2242): 20200393.
- [61] PANDEY M, AZAMATHULLA H M, CHAUDHURI S, et al. Reduction of time-dependent scour around piers using collars [J]. Ocean Engineering, 2020, 213: 107692.
- [62] NAZARI-SHARABIAN M, NAZARI-SHARABIAN A, KARAKOUZIAN M, et al. Sacrificial piles as scour countermeasures in riverbridges A numerical study using FLOW-3D [J]. Civil Engineering Journal, 2020, 6(6): 1091-1103.
- [63] VAGHEFI M, SOLATI S, ABDI CHOOPLOU C. The effect of upstream T-shaped spur dike on reducing the amount of scouring around downstream bridge pier located at a 180° sharp bend [J]. International Journal of River Basin Management, 2021, 19(3): 307-318.
- [64] MOGHANLOO M, VAGHEFI M, GHODSIAN M. Experimental study on the effect of thickness and level of the collar on the scour pattern in 180° sharp bend with bridge pier [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2020: 1-19.
- [65] ZHU B, WU X F, WANG Y B, et al. Centrifuge modeling for seismic response of fixed-end model piles considering local scour [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2020, 146(6): 04020041.
- [66] LIANG F Y, LIANG X, ZHANG H, et al. Seismic response from centrifuge model tests of a scoured bridge with a pile-group foundation [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(8): 04020054.
- [67] HE H F, WEI K, ZHANG J R, et al. Application of endurance time method to seismic fragility evaluation of highway bridges considering scour effect [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 136: 106243.
- [68] HE L G, HUNG H H, CHUANG C Y, et al. Seismic assessments for scoured bridges with pile foundations [J]. Engineering Structures, 2020, 211: 110454.
- [69] SONG S T, HU T F, CHIOU D J. Influence of riverbed scour on the performance of bridges subjected to lateral seismic loads [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2020: 1-32.
- [70] 王志华, 曹伟, 陈国兴. 考虑流固强耦合效应的深水桥墩地震反应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(5): 517-523.
- [71] GRECO F, LONETTI P, NEVONE BLASI P. Vulnerability analysis of bridge superstructures under extreme fluid actions [J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 93: 102843.
- [72] MA A C, TAN P, WANG S L, et al. Stochastic optimization of continuous beam bridge viscous damper considering the fluid-solid coupling effect and its damping performance [J]. International Journal of Heat and Technology, 2020, 38(1): 37-44.
- [73] 赵密, 王丽晓, 黄义铭, 等. 矩形柱体地震动水压力的附加质量简化模型[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(2): 174-180.
- [74] ZHANG J R, WEI K, QIN S Q. Bayesian updating model for structural vibration-induced hydrodynamic added mass of rectangular pile cap submerged in water [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2020, 146(9): 04020096.
- [75] 郭婕, 赵密, 王丕光, 等. 动水力简化计算方法对圆形桥墩传递函数的影响[J]. 工程力学, 2020, 37(2): 50-61.
- [76] ZHANG C, WU C W, WANG P G. Seismic fragility analysis of bridge group pile foundations considering fluid-pile-soil interaction [J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 1-17.
- [77] PANG Y T, CAI L, HE W, et al. Seismic assessment of deep water bridges in reservoir considering hydrodynamic effects using endurance time analysis [J]. Ocean Engineering, 2020, 198: 106846.
- [78] 吴文朋, 梁鹏, 龙士国, 等. 考虑 PSI 的深水高墩大跨桥梁地震易损性分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(19): 210-217.
- [79] WANG P G, CHANG Y F, ZHAO M, et al. Earthquake and wave analysis of circular cylinder considering water-structure-soil interaction [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1-18.
- [80] WANG P G, WANG X J, ZHAO M, et al. A numerical model for earthquake-induced hydrodynamic forces and wave forces on inclined circular cylinder [J]. Ocean Engineering, 2020, 207: 107382.
- [81] 马婧, 党新志, 贺金海, 等. 考虑动水压力的拉索减震支座深水桥梁地震响应分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 326-332.
- [82] YUN G J, LIU C G. Shaking table tests on a deep-water high-pier whole bridge under joint earthquake, wave and current action [J]. Applied Ocean Research, 2020, 103: 102329.
- [83] ZHAO J G, JIA H Y, ZHAN Y L, et al. Combination of LS-SVM algorithm and JC method for fragility analysis of deep-water high piers subjected to near-field

- ground motions [J]. Structures, 2020, 24: 282-295.
- [84] XU G J, KAREEM A, SHEN L. Surrogate modeling with sequential updating: Applications to bridge deck-wave and bridge deck-wind interactions [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2020, 34(4): 04020023.
- [85] FANG C, TANG H J, LI Y L. Stochastic response assessment of cross-sea bridges under correlated wind and waves via machine learning [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(6): 04020025.
- [86] FANG C, TANG H J, LI Y L, et al. Stochastic response of a cable-stayed bridge under non-stationary winds and waves using different surrogate models [J]. Ocean Engineering, 2020, 199: 106967.
- [87] LU Q, ZHU J, ZHANG W. Quantification of fatigue damage for structural details in slender coastal bridges using machine learning-based methods [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(7): 04020033.
- [88] WEI K, SHEN Z H, TI Z L, et al. Trivariate joint probability model of typhoon-induced wind, wave and their time lag based on the numerical simulation of historical typhoons [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35(2): 325-344.
- [89] 侯一筠, 尹宝树, 管长龙, 等. 我国海洋动力灾害研究进展与展望[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(4): 759-767.
- [90] FANG G S, ZHAO L, CAO S Y, et al. Estimation of tropical cyclone wind hazards in coastal regions of China [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2020, 20(6): 1617-1637.
- [91] PATHIRANAGE T, LOKUGE W. Vulnerability assessment of bridges subjected to extreme cyclonic events [J]. Natural Hazards, 2020, 102(1): 401-417.
- [92] SNAIKI R, WU T, WHITTAKER A S, et al. Hurricane wind and storm surge effects on coastal bridges under a changing climate [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(6): 23-32.
- [93] FIORILLO G, NASSIF H. Development of a risk assessment module for bridge management systems in new jersey [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(9): 324-337.
- [94] BALOMENOS G P, KAMESHWAR S, PADGETT J E. Parameterized fragility models for multi-bridge classes subjected to hurricane loads [J]. Engineering Structures, 2020, 208: 110213.
- [95] LI Y H, DONG Y, ZHU D M. Copula-based vulnerability analysis of civil infrastructure subjected to hurricanes [J]. Frontiers in Built Environment, 2020, 6: 571911.
- [96] ISHIBASHI H, AKIYAMA M, FRANGOPOL D M, et al. Framework for estimating the risk and resilience of road networks with bridges and embankments under both seismic and tsunami hazards [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2021, 17(4): 494-514.
- [97] LIU L, YANG D Y, FRANGOPOL D M. Network-level risk-based framework for optimal bridge adaptation management considering scour and climate change [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2020, 26(1): 04019037.
- [98] YANG D Y, FRANGOPOL D M. Risk-based vulnerability analysis of deteriorating coastal bridges under hurricanes considering deep uncertainty of climatic and socioeconomic changes [J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2020, 6(3): 04020032.
- [99] LI Y H, DONG Y, FRANGOPOL D M, et al. Long-term resilience and loss assessment of highway bridges under multiple natural hazards [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(4): 626-641.
- [100] BARANKIN R A, KIRSHEN P, WATSON C, et al. Hierarchical approach for assessing the vulnerability of roads and bridges to flooding in Massachusetts [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2020, 26(3): 04020028.

(编辑 邓云)