

综 述

海洋结构物小尺度桩柱的水动力系数研究与进展^{*}

刘贵杰, 王清扬, 田晓洁, 谢迎春

(中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 本文主要归纳了基于 Morison 方程求解小尺度桩柱的水动力系数方面的研究成果。分别从单桩柱和群桩两个方面对水动力系数的研究成果,包括纯波、波流混合、横向力、直立桩柱、倾斜桩柱、复杂结构桩柱、粗糙度等进行了阐述,给出了在波流条件下水动力系数的变化规律;归纳了当前水动力系数的求解方法;介绍了在水动力系数的物模实验、数值仿真以及实验数据处理方法上的研究进展,并提出了相关研究的建议。

关键词: 水动力系数;莫里森方程;小直径桩柱;群桩

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2020)01-136-09

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20170255

引用格式: 刘贵杰, 王清扬, 田晓洁, 等. 海洋结构物小尺度桩柱的水动力系数研究与进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 136-144.

LIU Gui-Jie, WANG Qing-Yang, TIAN Xiao-Jie, et al. Recent research and progress on hydrodynamic coefficients of marine structures with small scale pile[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(1): 136-144.

近几年来,随着国家对海洋开发的日益重视和投入加大,海洋工程事业蓬勃发展。越来越多的海上建筑物及工程装备喷涌而出,其中很大一部分是依靠桩柱结构伫立在水中支撑整个结构的重量。波流作用下桩柱结构所受的冲击载荷已引起学者们的广泛关注。目前海上结构物的桩柱所受的波流力的求解方法主要是莫里森方程^[1]和势流理论^[2],其中尤以莫里森方程求解小尺度构件的应用最为广泛。当构件直径 D 与波长 L 相比很小(即 $D/L < 0.2$)时,即为小尺度构件。莫里森方程是 1950 年代初由 Morison 提出的一个半经验公式,主要用来计算不稳定流动条件下黏性流体对直立圆柱的作用力,目前已经被学者们广泛用于计算海洋结构物的波流载荷。莫里森方程的建立基于几点基本假设^[3]:(a)水质点的速度和加速度必须根据某种波浪理论求出,并且假定波浪特征不受结构存在的影响;(b) C_D 和 C_M 两个参数必须根据已有经验或实验确定;(c)受力结构是刚性的;(d)仅适用于表面摩擦值较小的结构形式等。然而对于实际的应用工况,求解比较复杂且存在着较大的误差,一方面是求解方法本身有误差,另一方面是受力结构表面的粗糙度,与水质点方向正交的横向作用以及群桩中存在的干扰效应、遮

蔽效应都会对水动力系数的求解造成影响。对莫里森方程进行分析,桩柱所受波浪力由两部分组成:一部分是水体粘性影响而产生的拖曳力,另一部分是由于流体的惯性及桩柱的存在而产生的惯性力。因此,求解桩柱所受波浪力的关键是确定合适的拖曳力系数 C_D 和惯性力系数 C_M 。多年来,学者们通过大量的理论和实验研究,关于水动力系数的取值已经得到了一些规律性的结论,并且被编写进入了相应的规范和标准,为不同尺寸的桩柱结构物的计算提供经验值。直接使用经验值进行分析计算虽然简便易行,但计算结果偏于保守,不利于后续结构的优化设计、动力响应分析,以及对整体结构物的稳定性的分析。因此,确定莫里森方程中拖曳力系数和惯性力系数的取值具有重要的研究意义。

为了确定不同条件下莫里森方程中拖曳力系数和惯性力系数的取值,学者们开展了大量的研究,主要包括在不同流场条件、不同桩柱形状、不同桩位以及不同桩柱群的布置形式等条件下拖曳力系数及惯性力系数的变化规律。同时对于水动力系数的求解方法,学者们也做了很多不同的探讨。对于莫里森方程的求解,计算的关键在于如何确定计算的速度、加速度以及如

^{*} 基金项目:国家自然科学基金项目(51609223);青岛市应用基础研究计划项目(16-5-1-21-jch)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of China(51609223); the Qingdao City Applied Basic Research Project (16-5-1-21-jch)

收稿日期:2019-01-22; 修订日期:2019-02-12

作者简介:刘贵杰(1968-),男,博士,教授。E-mail: liuguijie@ouc.edu.cn

何选用拖曳力系数及惯性力系数。拖曳力系数 C_D 、惯性力系数 C_M 的影响因素众多, 比如桩柱形状(圆形、矩形), 在水中放置状态的不同(垂直、水平、倾斜), KC 数及 Re 的变化, 规则波和不规则波, 单独水流与波流共存等。因此水动力系数无法从理论上直接给出, 在过去的几十年里学者们从直立桩柱、倾斜桩柱、到复杂结构的桩柱以及群桩的水动力系数做了大量的实验研究, 从中获得 C_D 、 C_M 的变化规律(见图 1); 主要采用现场试验和模型实验两种实验方法。模型实验的难点在于如何在高雷诺数下进行实验, 多数学者为了得到高雷诺数环境而选择在 U 形管、大的水池中进行实验。现场测试也有很多困难, 现场环境的不确定性增加了数据分析的困难。随着仿真方法的日渐成熟, 数值仿真的方法也被引入分析桩柱的水动力系数。本文主要针对小尺度构件水动力问题的研究与进展进行综述。

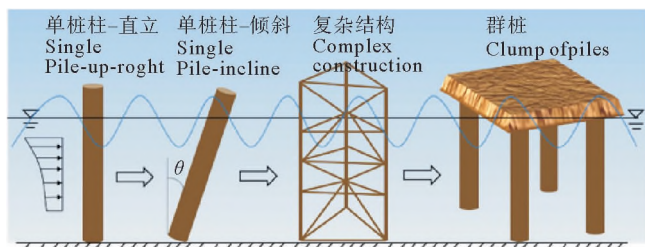


图 1 水动力系数研究进展图

Fig.1 Research Progress of Hydrodynamic Coefficient

1 单桩柱水动力系数研究

1.1 纯波纯流作用下水动力系数的研究

水动力系数的研究一般是从单根桩柱的所受波流力开始的。对于定常流的情况, 即纯流时的水动力系数, 由于流场简单, 并且对流动分离现象研究比较成熟, 因此数据分散性较小, 所得的结果差别不大。对于纯波的情况, Keulegan 和 Carpenter^[4] 是开展此方面研究的前驱, 通过实验分析了驻波作用于圆柱和圆球上的波浪力, 提出水动力系数与相应无量纲数之间的依赖关系, 即 KC 数, 为后面的研究工作奠定了基础。Sarpkaya^[5] 通过 U 型管振荡实验发现, 波流场的周期性对 C_D 和 C_M 值有明显影响。李玉成^[6]、俞聿修^[7] 等也对但桩柱在纯波流作用下, C_D 和 C_M 值的变化规律进行了深入研究。

1.2 波流联合作用下水动力系数的研究

波浪水流联合作用下桩柱受力与纯波情况下有明显差别, 波浪和水流共存时的流场往往是通过在振荡流体中移动圆柱, 或在定常流体中振动圆柱来模拟。对于定常流中的振荡圆柱, Sarpkaya 和 Storm^[8] 通过实验发现, 纯波结果和纯流结果并不适用于波流共存

的情况。一般来说, 波流共存时的拖曳力系数较纯波值要小, 而惯性力系数则在 KC 数 8~12 的范围内较纯波值要大。学者李玉成^[9] 也通过对小尺度桩柱在波流场联合作用下的实验发现了此规律, 任佐皋^[10] 提出了同向波流场中, 以波流场特征系数为参数的相对阻力系数的计算公式。Iwagaki^[11] 进行了波流共存情况下桩柱波流力的实验研究, 李玉成指出^[12], 适用于纯波、纯流及波流, 在规则波与不规则波条件下, 归一化的 C_D 、 C_M 和 KC 。王涛^[13] 基于分析物理机理, 通过对纯波时的水动力系数和纯流时的水动力系数加权平均, 得出波流共存时的水动力系数。下图为水动力系数与 KC 数的关系。

1.3 横向力对水动力系数的影响

圆柱桩柱除了在水流流动方向上受到拖曳力和惯性力外, 在垂直于流动方向上还会受到脉动横向力(即升力)。升力主要由于圆柱体尾流涡街形成时, 涡旋交替自柱体脱落而使柱体两侧压力产生脉动而造成的(见图 2)。桩柱除受到与波向平行的正向力作用外, 还存在着横向力。已有的研究表明, 波浪作用于桩柱上的横向力往往不容忽视, 横向力不仅使作用在桩柱上的合力比正向力明显增大, 而且其频率随 KC 数增大, 通常是波浪频率的 1~4 倍。

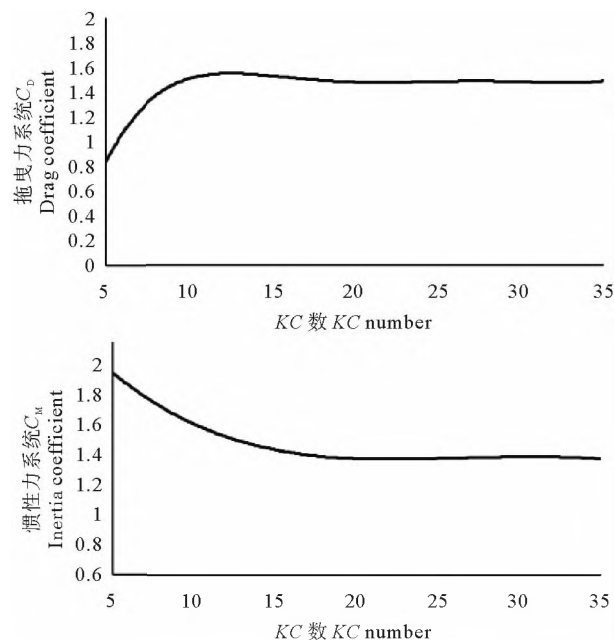


图 2 纯波场及波流共存场中 C_D 、 C_M 和 KC 数的关系

Fig.2 The relationship between C_D , C_M and KC in pure wave field and wave-current coexistence field

1970 年代以来, 不少中外学者对波浪与振动流作用下的横向力做了大量的研究工作。俞聿修、张宁川等^[14-17] 对规则波和不规则波下桩柱的横向力进行研究。规则波作用下的横向力对合力的大小和方位会产

生较大影响,不规则波作用下合力的最可能方位同正向力一致,但当 $KC=20\sim 28$ 时能出现明显大于正向力的合力(与正向力方位不同),最大值可达正向力的1.3倍。对于两桩、三桩横向力的研究,给出了升力系数随 L/D 和 KC 数的变化曲线和规律。李玉成等^[9]对小尺度圆柱上的波浪、水流力进行分析,考虑了横向力,分析了升力系数可忽略的条件以及在横向力不可忽略时对合力进行了系数修正。雷欣欣^[18]对五根桩柱的群桩展开研究,通过2个不同角度(0° 、 45°)的实验,对群桩涡场进行分析,发现横向力产生的原因是波峰段的涡旋强度明显大于波谷段的涡旋强度(见图3)。

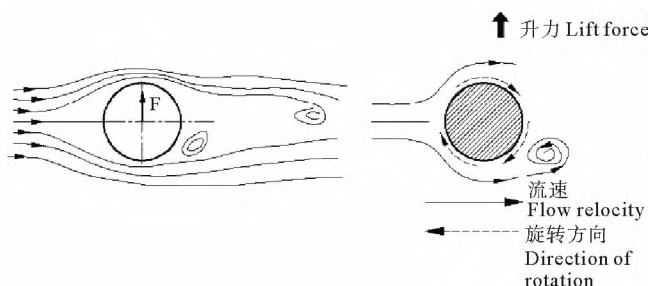


图3 漩涡脱落产生脉动升力的原理

Fig.3 Whirlpool shedding the principle of pulsating lift

1.4 桁架结构桩柱水动力系数的研究

实际海洋结构中杆件的布置型式,往往是各式各样的,垂直杆件只不过是倾斜杆件的特殊情况。李玉成等^[19]通过模型实验,研究不同埋深水平桩柱以及倾斜桩柱在波向垂直平面及水平面内倾角不同时的受力变化以及水动力系数随 KC 数的变化规律。Sundar等^[20]研究了不同倾斜角度的桩柱的水动力系数,建立了拖曳力系数、惯性力系数与 KC 数的函数关系式。对于很多海洋工程装备,它们并非是一个独立的圆柱。因为对于一个尺度较大的桩柱来说,在波流的作用下,结构所受到的波流力以及升力都比较大,因此,很多桩腿是以桁架的结构支撑海上工程装备的。对于桁架结构,由于弦杆、斜杆和支撑杆的布置错综复杂,桁架前面的杆件干扰和影响了波流的流动,会对后面的杆件产生干扰效应和遮蔽效应,所以对桁架所受的波流力的计算比较复杂。吴家鸣等^[21]对桁架式近海结构物整体波浪载荷进行分析,根据 Morison 方程逐一计算组成桁架式结构的每一杆件的波浪力,然后对这些单一杆件的波浪力进行叠加来得到结构物的整体波浪载荷。高畅^[22]以90 m升式平台测K型桁架式桩腿为原型,中国首次设计并进行了桁架腿局部模型实验,通过水池实验的方法得到桁架式桩腿整体结构的拖曳力系数和惯性力系数,为自升式平台波流载荷的计算提供了参考。Lee等^[23]采用模型实验、CFD模拟和规范计

算三种方法计算自升式平台桩腿的水动力系数。综上所述,尽管已经有一些学者对复杂结构的水动力系数进行了研究,如何合理利用垂直杆件上的水动力系数确定倾斜杆件上的受力情况,但目前尚无定论。

1.5 粗糙柱体水动力系数的研究

早在1977年,Sarpkaya^[24]发现,对于光滑圆柱体,横向力、拖曳力系数和惯性力系数依赖于 Re 和 KC 数;对于粗糙柱体,水动力系数几乎不依赖于 Re 数,仅依赖于 KC 数和粗糙度,并系统地给出了拖曳力系数、惯性力系数和横向力系数随 KC 数的变化规律。因此,桩柱表面的粗糙度程度对水动力载荷有很大影响,不能以光滑圆柱杆件的水动力系数直接计算。Huang^[25]通过水槽实验研究桩柱表面螺旋槽对所受水动力载荷的影响规律,研究发现,与光滑圆柱表面相比,螺旋槽的桩柱能减少10%~20%的水动力载荷。Fuss^[26]通过风洞实验研究不同表面粗糙度的桩柱的拖曳力,结果表明表面粗糙度不仅能减少桩柱的拖曳力载荷,还能够降低雷诺数。Kiu^[27]通过水槽实验研究粗糙度对桩柱水动力特性的影响,得出最大横向力和拖曳力都会随着表面粗糙度的增加而减小。Bo Zhou等^[28]也通过水池实验研究得出表面粗糙度会使阻力系数和升力系数的算术平均值显著减小,在雷诺数较大时这种影响更加显著;此外,采用PIV技术详细观察和测量了圆柱附近的水流场,发现粗糙圆柱条件下主要涡旋距离圆柱中心的距离和再流通区域减小,从而解释了在一定雷诺数范围下阻力系数和升力系数的算术平均值减小的原因。许多学者通过在桩柱表面设置大小不同的粗糙度来控制水动力载荷。桩柱结构物在海水中长期浸泡表面会出现各种附着物,例如海生物、铁锈等,这些附着物的增加大大改变了桩柱表面的光滑程度,会对桩柱的水动力载荷产生很大的影响,甚至会影响其振动效应和可靠性。但是,对于海生物附着对桩柱水动力载荷影响的研究知之甚少。

1.6 其它一些因素对水动力系数影响的研究

随着对水动力系数研究的不断深入,越来越多的影响因素被挖掘出来。对于相对水深 D/L 对水动力系数的影响,吴光林等^[29]通过定义正向水动力系数比 $K=C_D/C_M$,利用线性波理论进行推导,得出正向水动力系数比随水深增加而减小。对于圆柱杆在不同入水深度下对水动力系数影响的研究,Zhi-da Yuan等^[30]在低雷诺数和 KC 数范围内测量相对长度 h_T/D 不同的圆柱杆的受力,结果表明:拖曳力系数 C_D 随着相对长度 h_T/D 的减小而减小,而惯性力系数 C_M 则对长度的变化反应不敏感。对于不等直径多柱体绕流的研究,于定勇等^[31]利用Fluent软件建立直径不等的双圆柱并列模型,模拟了在水流作用下 G/D (G 为两管线表面

之间的距离, D 为主管线直径)、 d/D (d 为小直径管线的直径)对圆柱体的涡脱落形态、升阻力系数和斯特鲁哈数 St 的影响。波高和周期是波浪的两个基本参数,其中 KC 数、 Re 常作为波浪设计要素来描述水动力系数规律,姚晓洁^[32]通过将深水线性波浪理论带入 KC 数的公式,化简得到 $KC=\pi H/D$,是关于波高的参数,可能导致在深水状态下对波浪特性描述不准确。因此姚晓洁等通过重新定义波高参数 KH 和周期参数 KT ,并通过实验探讨了水平圆柱在波浪作用下 KH 、 KT 以及雷诺数 Re 对水动力系数 C_D 、 C_M 的影响。

2 群桩水动力系数研究

对于工程上的应用,桩柱往往都是以群桩的形式存在的,比如桥墩、高平承台、自升式平台等。由于多个桩柱的存在,造成各桩柱之间的受力存在一定的相位差和相互影响,群桩的受力特性与单桩柱的受力有很大区别。因此,作用于群桩的波浪力不能单纯的将单桩上的波流力简单相加,所以需要研究群桩的波浪力效应。群桩效应与相对桩距、群桩排列方式、桩的个数等几何因素有关。由于群桩周围的波动场是难以描述的涡动场,学者们普遍采用物理模型实验的方法研究群桩效应。

2.1 群桩效应的实验研究

以单独桩柱的波浪力为基础,通过实验测得不同桩径、桩距、排列方式以及不同波要素情况下,群桩中各组成桩的受力,得到组成桩正向波浪力与孤立桩正向波浪力之比,即群桩系数。俞聿修、张宁川^[33-35]通过实验系统研究了两桩,三桩并列、串列和四桩方阵在规则波和不规则波浪作用下,群桩系数与相对桩距、 KC 数、桩数和桩距的规律关系;杨正己等^[36-37]通过分析双桩横排、双桩纵排、四桩方阵的研究,得出了不同组合桩柱下的群桩系数变化规律;李玉成^[38]、高明道^[39]等也探讨了并列、串列双桩在波流共存情况下,群桩系数与相对桩距和 KC 数的关系。这些研究成果均已列入《海港水文规范》,可以直接为工程实际所用。

目前工程中群桩基础的桩距和布桩方式的确定仍是以经验为主,并无完善、统一的设计原则。还有一些学者通过莫里森公式和实验测得的群桩波浪力来确定群桩中各组成桩的水动力系数与相应参数之间的相互关系。Chakrabarti^[40]在波浪水槽中测出了并行排列且桩心距从 4~10 倍桩径的两桩柱、三桩柱和五桩柱的波浪载荷,研究了群桩水动力系数与 KC 数及相对桩间距之间的关系;Haritos^[41]等研究了单桩柱、双桩柱串列、并列、斜列以及四桩柱内桩上的波浪载荷;Liu^[42]等以东海大桥的桩柱为模型,研究群桩和单个桩柱的波流载荷的大小、作用方向及相互关系。皇甫熹等^[43]

分析了不规则波与流共同作用下群桩的水动力特征,以单桩实验垂直桩柱的受力为基准,给出了群桩中各组成斜桩基群桩总体折减系数随 KC 数的变化,并研究了水深及水流的影响。雷欣鑫^[18]通过物理模型实验研究了规则波和不规则波作用下,五根桩柱结构的群桩效应。明确各个桩柱力的分配比例,以及各组成桩的受力情况。德国布伦瑞克工业大学的 Bonakdar 和 Oumeraci 等^[44-47]学者多年来一直从事桩柱群桩效应的研究工作。系统研究了单一桩柱和 14 组不同配置的多个桩柱、桩位、桩距、桩数之间的关系。研究得出,在并排桩柱中,群桩效应会随着桩距的增大而减小;中间桩柱所受波浪载荷的放大作用特别明显;多种群桩组合中单个桩柱的受力与桩距 KC 数关系;并且研究了在完整波和破碎波作用下,群桩效应对单个桩柱波浪载荷的影响。Hildebrandt 等^[48-49]采用水池实验研究了不同组合的桩柱中的横向力、正向力和涡旋遮蔽效应,以及相邻桩柱对波浪载荷的影响作用。

2.2 群桩效应的数值仿真研究

在过去的几十年里,对于群桩波浪力的研究,大多采用物理模型实验的方法。但是,物理模型实验需要具备实验场地、仪器设备等条件,造价昂贵,实验条件非常有限,造成群桩研究发展缓慢。近几年来,随着计算机模拟技术的迅速发展,群桩波浪力的数值模拟随之发展起来。杨晨、张婷^[50-51]都是基于流体动力学软件 Flow3D,建立了模拟波浪与建筑物相互作用的三维数值波浪水池,对波浪与小尺度桩柱、大尺度圆柱和透空式水平面板之间的相互作用以及对波浪流过纵向和横向排列的两个柱以及 2×2 的柱群的过程进行了数值模拟。黄雯等^[52]按照 CFD 理论采用 ANSYS Workbench 建立波浪水槽及高桩承台数值仿真模型,分析桩距、桩位的变化对各桩受力的影响。雷欣欣^[18]等利用 Fluent 软件,建立三维数值波浪水槽,模拟孤立桩与波浪相互作用以及群桩与波浪相互作用,并与实验结果对比以验证数值模型的有效性。Kang 等^[53]采用二维波流数值水槽,基于 N-S 方程模拟波流与桩柱相互作用的过程。通过数值仿真计算出来的水质点加速度与实验数据很好吻合证明数值仿真的正确性,并且基于模拟的波流数值计算得出桩柱的水动力系数。Ryu 等^[54]提出用多块网格技术有限体积方法研究并排双桩柱的水动力系数,计算了五种水流状态下的水动力系数。Kamath 等^[55]研究了单圆柱杆和纵向排列的群桩在不同入射波的陡度的条件下与波的相互作用。通过单圆柱杆的数值模拟与势论预测的力相比,发现在低入射波陡度下数值模拟的结果和预测结果相匹配,单高入射波陡度下则不同。Sun 等^[56]对一个孤波与单矩形杆和双矩形杆在自由面上的作用进行数值模拟,讨

论了波的非线性和液体动力与不同入射波振幅、单杆的尺度效应以及双杆的相对间距对波和波力的影响。Wang 和 Wu^[57]通过基于二阶和完全非线性理论的有限元法发展了一种计算方法,模拟了多结构的非线性波的相互作用。数值模拟表明,桩杆之间相互干扰的影响是非常显著的。近几年来,越来越多的学者采用数值仿真的方法研究群桩以及其他桩柱的水动力系数,而且提出的数值仿真模型均通过了实验数据进行验证了模型的有效性,因此将数值仿真方法推广使用变得行之有效。

综上,通过实验和仿真的方法,探究水动力系数的变化规律,总结如下:群桩系数 K_G 与相对桩距 l/D 、 KC 数、桩的数目和位置有关,具体为:双桩、三桩并列时, K_G 随 l/D 的减小而增大,随 KC 数的增大,先增后减,且 K_G 常大于 1。对于三桩的群桩系数 K_G ,大于双桩。对于串联,由于受到遮蔽效应的影响,情况比较复杂。 KC 数较小时,后桩所受波力大于前桩的, KC 数大时则相反,中桩受力最小。对于四柱方阵,不规则波的 C_D 、 C_M 在一个周期内的均值 $C_D(t)$ 、 $C_M(t)$ 与 KC 数的关系和规则波的 C_D 、 C_M 、 KC 曲线是一致的。

3 水动力系数求解方法

很多学者通过物模实验的方法研究莫里森方程中的水动力系数,受物模振动和水池环境等条件的干扰,由实验数据求解得到的水动力系数并不十分一致。求解水动力系数 C_D 、 C_M 值的方法很多,主要分为两大类,时域分析法和频域分析法。时域分析法假定水动力系数不随时间变化,利用实测的桩柱波流力的时间

过程线推求出水动力系数值,主要有瞬时值法和最小二乘法。频域分析法是依据实测桩柱波流力估计波流力的自谱或波流力与波面的互谱,再推求 C_D 、 C_M 值,主要有自谱法与互谱法。

1999 年, Wolfram 和 Naghipour^[58] 针对水动力系数预测准确性的问题,系统总结和对比了求解莫里森方程中水动力系数的各种方法,包括傅里叶变换法、最小二乘法、加权最小二乘法、均方差方法、矩量法、互谱密度法、最小二乘法拟合力谱法八种方法。并通过水动力实验对这八种方法进行了验证,得出加权最小二乘法在分析规则波单独作用的情况下偏差较小,求解水动力系数的效果最好。

3.1 Morison 方程水动力系数归一化方法

水动力系数中的 C_D 和 C_M 值都是与 KC 数和 Re 数相关的。在不同的波流条件下 C_D 、 C_M 值的分散性很大。康海贵、李玉成等^[12, 59]通过将不同波流情况下 KC 数归一化,即将 KC 数定义为在波流共同作用下水质点在一个波动中所行经的最大距离与桩径比的 π 倍, $KC = \pi S/D$ 。将纯波、波流共存、规则波与不规则波四种不同环境的影响下的 KC 数的计算公司的求解方法总结如表 1 所示。通过大量实验的对比分析得出水动力系数关于 KC 数的变化曲线,无论是纯波场还是波流共存场,无论是规则波还是不规则波,只要它们相应的 KC 数相同,则所对应的 C_D 或 C_M 值就基本相同。当利用时域线性过滤法计算桩柱上不规则波与流的共同作用力时,可以把该波列的每一个波视为规则波,按该波的 $(KC)_P$ 数选取相应的 C_D 、 C_M 值带入即可计算波流力的时间过程线。

表 1 不同波流条件下 KC 数的求解公式^[59]

Table 1 The solution formula of KC number under different wave flow conditions^[59]

波流分类 Wave-current type		KC 数 KC number	
纯波场 Pure wave field	规则波 Regular wave		$N_{KC} = U_m \cdot T/D$
	不规则波 Irregular waves		$N_{KC} = U_{1/3} \cdot T_P/D$
波流共存场 Combined wave and current flow	规则波 Regular wave	$U_0 \leq U_m$	$N_{KC} = 2\pi \int_{t^*}^{T/2} U_0 + U_m \cos \omega t dt/D$
		$U_0 \geq U_m$	$N_{KC} = \pi U_0 \cdot T_P/D$
	不规则波 Irregular waves	$U_0 \leq U_m$	$N_{KC} = 2\pi \int_{t^*}^{T_P/2} U_0 + U_{1/3} \cos \omega t dt/D$
		$U_0 \geq U_m$	$N_{KC} = \pi U_0 \cdot T_P/D$

注: U_0 为水流速度; U_m 为水面水质点的最大平均速度; T_P 为谱峰对应周期; $U_{1/3}$ 为 $T_{1/3}$ 所对应水面水质点最大水平速度, $U_{1/3} = \pi H_{1/3}/T_P th Kd$; $t^* = \cos^{-1}(-U_0/U_m)/\omega$ 。

Note: U_0 is flow velocity; U_m is the maximum average velocity of a water point; T_P is the periods of spectral peak; $U_{1/3}$ is the maximum horizontal velocity of the water surface water point about $T_{1/3}$, $U_{1/3} = \pi H_{1/3}/T_P th Kd$; $t^* = \cos^{-1}(-U_0/U_m)/\omega$ 。

3.2 基于纯波纯流场求解波流耦合场水动力系数的方法

王涛等^[13]基于分析物理机理,提出一种研究波流场中水动力系数的理论方法,即利用纯波和纯流的结果确定波流场中水动力系数的实用方法。考虑到波流场中的速度项为纯波向 U_o 和纯流向 U 之和,作者提出设想: C_D 和 C_M 这 2 个无量纲的数也由 2 部分组成,一部分为纯波的影响,一部分为纯流的影响。这样,考虑波流场中波和流分别所占的份额,对纯波值和纯流值加权平均就可得到波流共存场中的水动力系数如公式(1)和(2)所示。

$$C_D = \frac{C_{Dw}u_o + C_{Dc}U\alpha}{u_o + U\alpha} = \frac{C_{Dw}KC_w + C_{Dc}KC_c\alpha}{KC_w + KC_c\alpha} = \frac{C_{Dw} + C_{Dc}V_{T\alpha}}{1 + V_{T\alpha}} \quad (1)$$

$$C_M = \frac{C_{Mw}u_o + C_{Mc}U\alpha}{u_o + U\alpha} = \frac{C_{Mw}KC_w + C_{Mc}KC_c\alpha}{KC_w + KC_c\alpha} = \frac{C_{Mw} + C_{Mc}V_{T\alpha}}{1 + V_{T\alpha}} \quad (2)$$

式中: α 为加权系数,用以衡量流相对于波在波流场中确定水动力系数时影响的重要性; C_{Dw} 和 C_{Dc} 由 KC_w 和 Re_w 确定,下标 w 表示纯波量; C_{Mw} 和 C_{Mc} 由 Re_c 确定,下标 c 表示纯流量。

3.3 M5 模型树求解水动力系数的方法

迄今为止,没有一个完善的统计公式来预报这两个系数。实际上,在利用方程计算的同时,随着计算机辅助技术的发展,越来越多人工智能的方法被引入水动力系数求解中。2011 年, Bonakdar 和 Etemad-Shahidi^[60]采用 M5 模型树和非线性回归方法求解规则波中垂直桩柱上水动力系数,并且使用统计学指标一致性指数、相关系数、分散指数来评价回归方程。M5 模型树是一种比较智能的算法计算过程比较透明,不需要优化几何网络和内部参数,将复杂的问题离散为几个简单的问题,然后再来解决每个简单的问题;而传统的回归方法在整个数据设置中仅能拟合成一种方程。2015 年 Bonakdar 等^[61]又提出一种 M5 模型树与遗传算法混合式模型。利用两种算法的优点处理群桩波流载荷数据,推导群桩系数与 KC 数、群桩布置、相对桩距之间的函数关系。遗传算法可以建立输入和输出参数之间的非线性关系,尤其是对特别复杂的函数关系会有更好的近似关系。因此这种混合式数据处理方法,处理效率高,比传统的 M5 模型树方法有更高的准确性。

3.4 BP 神经网络求解水动力系数的方法

林海花等^[62]将人工神经网络技术应用于计算 Morison 方程中的水动力系数 C_D 、 C_M ,通过构造一层隐含层的 BP 神经网络,在 BP 网络中运用附加动量法和自适应学习速率进行改造,使得建立的网络模型的

收敛性大为改善,减少了训练次数和训练时间。结果表明,计算方法可以用于计算不同雷诺数 Re 、 KC 数以及粗糙度 k 下 Morison 方程的水动力系数。以雷诺数 Re 、 KC 数和表面粗糙度系数三个参数为准则,选取相关性较好的实验结果,利用 BP 神经网络进行分析处理,从而得到满足工程精度要求的不同情况下的水动力系数 C_D 、 C_M 值。

3.5 基于频谱特征的载荷反演求解水动力系数的方法

李少华^[63]基于频谱特征的载荷反演方法,根据频域内已知谱的特征构造对频率 ω 的矩的方法来进行载荷谱的识别,已知某一位置处波面高度的时程数据和水深,可求得相应的 U_n 和 U_n' ,通过测出与波面高度数据在同一时间周期内合适的两个方向的位移响应(假定为 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$,可以通过牛顿迭代得到),将 U_n 和 U_n' 带入波面方程,按有限元方法等效成节点载荷 $F(C_D, C_M, t)$,将它们进行傅里叶变换得到公式(3),最后求解式(3)可得水动力系数 C_D 、 C_M 。

$$\begin{cases} u_1(\omega)\overline{u_1(\omega)} = a_1(\omega)C_D^2 + b_1(\omega)C_DC_M + c_1(\omega)C_M^2 \\ u_2(\omega)\overline{u_2(\omega)} = a_2(\omega)C_D^2 + b_2(\omega)C_DC_M + c_2(\omega)C_M^2 \end{cases} \quad (3)$$

4 总结展望

通过以上的分析结果可以看出,小尺度桩柱的水动力系数研究已经从简单、光滑、直立桩柱结构逐渐发展为复杂桩柱结构动水力系数的研究,构建的模型也越来越接近真实情况,使得求解的水动力系数更加满足实际工况。

(1)目前水动力系数的研究已经不局限于理论推导和物模实验两种方法,通过软件仿真加载波、流载荷也可以完成桩柱的水动力系数分析,这对大型构件的水动力系数分析有很好的参考价值。

(2)关于圆柱桩柱的其他影响因素,比如不同的缩尺比、入水深度等对水动力系数的影响,目前的研究较小,仍需实验理论的分析验证。

(3)目前的水动力系数求解方法里面,仅是针对莫里森方程中的拖曳力系数和惯性力系数,并没有有涉及修正莫里森方程的方法。

参考文献:

- [1] 王树青,梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛:中国海洋大学出版社,2013.
Wang S Q, Liang B C. Wave Mechanics for Ocean Engineering [M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2013.
- [2] 戴遗山,段文洋. 船舶在波浪中运动的势流理论[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
Dai Y S, Duan W Y. Potential Flow Theory of Ship Motions in Waves [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.

- [3] 张玲, 王爱群. 关于小直径垂直桩柱结构的波浪力研究[J]. 海洋湖沼通报, 2004(3): 90-98.
Zhang L, Wang A Q. A summary of wave forces on vertical cylinders of small diameters[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2004(3): 90-98.
- [4] Keylegan G H, Carpenter L H. Forces on cylinder and plates in an oscillating fluid[J]. Journal of Research, 1958, 60: 423-440.
- [5] Sarpkaya T. Forces on cylinders and spheres in a sinusoidally oscillating fluid[J]. Journal of Applied Mechanics, 1975, 42: 32-37.
- [6] 李玉成, 张福然. 作用于垂直桩柱上的波浪水动力[J]. 海洋学报, 1986, 8(6): 751-761.
Li Y C, Zhang F R. Wave force acting on a vertical pile[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1986, 8(6): 751-761.
- [7] 俞聿修, 张宁川. 不规则波作用于垂直桩柱上的正向力[J]. 海洋学报, 1988, 10(5): 609-617.
Yu Y X, Zhang N C. The positive force of irregular waves acting on a vertical pile[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1988, 10(5): 609-617.
- [8] Sarpkaya T., Storm M. In-line force on a cylinder translating in oscillatory flow, Applied Ocean Research, 1985, 7(4): 188-196.
- [9] 李玉成, 王凤龙, 康海贵. 作用于小尺度圆柱上的波浪、水动力[J]. 海洋工程, 1993, 11(3): 46-59.
Li Y C, Wang F L, Kang H G. Wave-current forces on slender circular cylinders[J]. The Ocean engineering, 1993, 11(3): 46-59.
- [10] 任佐皋. 波-流场中孤立桩柱上作用力系数的研究[J]. 海洋学报, 1985, 7(4): 503-512.
Ren Z G. Study on the force coefficient of isolated pile in wave-current field[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1985, 7(4): 503-512.
- [11] Iwagaki Y, Asano T. Hydrodynamic forces on a circular cylinder placed in wave-current co-existing fields[J]. Memoirs of the Faculty of Engineering, 1983, 45(1): 11-23.
- [12] 李玉成. Morison 方程水动力系数归一化的探讨[J]. 水动力学研究与进展, 1998, 13(3): 329-337.
Li Y C. Aspect of the normalization of hydrodynamic coefficients in Morison equation[J]. Journal of Hydrodynamics, 1998, 13(3): 329-337.
- [13] 王涛, 李家春, 呼和敖德, 黄振华. 波流相互作用对水动力系数的影响[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 1995, 10(5): 551-554.
Li T, Li J C, Huhe Aode, Huang Z H. Effect of wave-current interaction on hydrodynamic coefficients[J]. Journal of Hydrodynamics, 1995, 10(5): 551-554.
- [14] 俞聿修. 波浪作用于垂直桩柱上的横向力[J]. 海洋学报, 1989, 11(2): 248-251.
Yu Y X. Transverse force of waves acting on a vertical pile[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1989, 11(2): 248-251.
- [15] 宫成, 俞聿修. 波浪作用在桩柱上的横向力[J]. 大连理工大学学报, 1990, 30(2): 138-144.
Gong C, Yu Y X. Transverse force on circular pile in waves[J]. Journal of Dalian University of University of Technology, 1990, 30(2): 138-144.
- [16] 俞聿修, 张宁川. 不规则波作用于双桩桩列上的横向力[J]. 海洋学报, 1991, 13(2): 254-261.
Yu Y X, Zhang N C. Transverse forces of irregular waves acting on a double pile row[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1991, 13(2): 254-261.
- [17] 张宁川, 俞聿修. 随机波浪作用于三桩桩列上的横向力的水动力特征及群桩效应[J]. 水动力学研究与进展, 1996, 11(2): 385-393.
Zhang N C, Yu Y X. The hydrodynamic characteristics and pile grouping effect of transverse forces on an array of three-piles in random waves[J]. Journal of Hydrodynamics, 1996, 11(2): 385-393.
- [18] 雷欣欣. 群桩在波浪作用下的水动力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Lei X X. Research on Hydrodynamic Performance of Pile Array Under Wave Action[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [19] 李玉成, 康海贵, 费勤浩. 规则波作用下倾斜桩柱的受力研究[J]. 水动力学研究与进展, 1992, 7(1): 85-100.
Li Y C, Kang H G, Fei Q H. Wave forces on inclined cylinder in regular waves[J]. Journal of Hydrodynamics, 1992, 7(1): 85-100.
- [20] Sundar V, Vengatesan V, Anandkumart G, et al. Hydrodynamic coefficients for inclined cylinders[J]. Ocean Engineering, 1998, 25: 277-294.
- [21] 吴家鸣, 郁苗, 朱良生. 桁架式近海结构物整体波浪荷载分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(11): 1-6.
Wu J M, Yu M, Zhu L S. Analysis of integral wave load acting on truss type offshore structure[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2009, 37(11): 1-6.
- [22] 高畅. 自升式平台桁架腿波流荷载分析与试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
Gao C. Analysis and Experimental Study of Wave-Current Loads on Jack-up Truss-Type Leg[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [23] Lee Sing-Kwan, Yan Deguang, Zhang Baili, et al. Jack-Up leg hydrodynamic load prediction-a comparative study of industry practice with CFD and model test results[C]. //International Offshore and Polar Engineering Conference. Osaka: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2009: 541-548.
- [24] Sarpkaya T. In-Line and Transverse Forces on Cylinder Near a Wall in Oscillatory Flow at High Reynolds Numbers[C]. Houston, Texas: OTC, 1976.
- [25] Huang S, Clelland D, Day S, et al. Drag Reduction of Deepwater Risers by the Use of Helical Grooves[C]. San Diego, California: International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering, 2007.
- [26] Fuss FK. The effect of surface skewness on the super/postcritical coefficient of drag of roughened cylinders[J]. Procedia Engineering, 2011, 13: 284-289.
- [27] Kiu K Y, Stappenbelt B, Thiagarajan K P. Effects of uniform surface roughness on vortex-induced vibration of towed vertical cylinders[J]. Journal of Sound and Vibration 2011, 330: 4753-4763.
- [28] Bo Zhou, Xikun Wang, Wie Min Gho, Soon Keat Tan. Force and flow characteristics of a circular cylinder with uniform surface roughness at subcritical Reynolds numbers[J]. Applied Ocean Research, 2015, 49: 20-26.
- [29] 吴光林, 严谨, 陈志明, 等. Morison 方程正向水动力系数比的初步探讨[J]. 中国水运, 2008, 5: 159-160.
Wu G L, Yan J, Chen Z M, etc. Preliminary study on forward

- hydrodynamic coefficient ratio of Morison equation[J]. *China Water Transport*, 2008, 5: 159-160.
- [30] Yuan Zhi-da, Huang Zhen-hua. An experimental study of inertia and drag coefficients for a truncated circular cylinder in regular waves[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2010, 22(5): 311-328.
- [31] 于定勇, 崔肖娜, 唐鹏. 并列双圆柱绕流的水动力特性研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学报)*, 2015, 45(5): 107-113.
- Yu D Y, Cui X N, Tang P. Hydrodynamic characteristics of viscous flow past two side-by-side cylinders[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(5): 107-113.
- [32] 姚晓杰, 桂富坤, 孟昂, 陈天华. 波浪要素对水平圆柱杆件水动力系数影响研究[J]. *海洋工程*, 2016, 34(1): 80-87.
- Yao X J, Gui F K, Meng A, Chen T H. Experimental study on hydro-coefficients of horizontal cylinder structure in waves[J]. *The Ocean Engineering*, 2016, 34(1): 80-87.
- [33] 俞聿修, 张宁川. 双桩桩列上的不规则波浪力[J]. *大连工学院学报*, 1988, 27(1): 103-112.
- Yu Y X, Zhang N C. Irregular wave forces on array of bi-pile[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1988, 27(1): 103-112.
- [34] 俞聿修, 张宁川. 三桩桩列上的不规则波浪力[J]. *港口工程*, 1989(3): 1-7.
- Yu Y X, Zhang N C. Irregular wave forces on three piles[J]. *Port Engineering*, 1989(3): 1-7.
- [35] 张宁川, 俞聿修. 不规则波作用下的群桩效应[J]. *海洋通报*, 1993, 12(3): 95-101.
- Yu Y X, Zhang N C. Group pile effects under irregular wave action[J]. *Marine Science Bulletin*, 1993, 12(3): 95-101.
- [36] 杨正己, 左其华, 苏伟东. 作用于群桩上的波浪力[J]. *南京水利科学研究院水利水运科学研究*, 1992(3): 231-243.
- Yang Z J, Zuo Q H, Su W D. Wave forces on multi piles[J]. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 1992(3): 231-243.
- [37] 杨正己, 左其华. 不规则波波群对桩力的影响[J]. *海洋工程*, 1993, 11(2): 41-50.
- Yang Z J, Zuo Q H. Influence of irregular wave group on pile force[J]. *The Ocean Engineering*, 1993, 11(2): 41-50.
- [38] 李玉成, 王凤龙, 王洪荣. 作用于并列双桩桩列上的波流[J]. *海洋学报*, 1992, 14(2): 106-121.
- Li Y C, Wang F L, Wang H R. Wave force acting on a row of parallel double piles[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(2): 106-121.
- [39] 高明道, 韩丽华, 孙绍述. 规则波作用下群桩波浪力的实验研究[J]. *大连工学院学报*, 1987, 26(1): 137-140.
- Gao M D, Han L H, Sun S S. Experimental research for wave force of group piles under the action of regular waves[J]. *Journal of Dalian Institute of Technology*, 1987, 26(1): 137-140.
- [40] Ghakrabarti S. K. Wave forces on vertical array of tubes[J]. *Civil Engineering in the Ocean IV*, 1979: 241-259.
- [41] Haritos N. Modelling the inertial force dominant response of compliant offshore structures in 3-Dimensional wave environments[J]. *Environment International*, 1995, 21(5): 637-645.
- [42] Liu Shu-xue, Li Yu-cheng, Li Guang-wei. Wave current forces on the pile group of base foundation for the east sea bridge[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 19(6): 661-670.
- [43] 皇甫熹, 兰雅梅, 薛雷平, 等. 群桩上不规则波流试验研究[J]. *世界桥梁*, 2004(增刊): 32-36.
- Huang P X, Lan Y M, Xue L P, et al. Experimental study on irregular wave force on pile group[J]. *World Bridge*, 2004(Supplement): 32-36.
- [44] Bonakdar L. Pile Group effect on the wave loading of a slender pile[D]. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2014.
- [45] Bonakdar L, Oumeraci H. Interaction of waves and pile group-supported offshore structures: A large scale model study[C]. // *Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*. Rhodes, Greece: [s. n.], 2012: 812-818.
- [46] Bonakdar L, Oumeraci H. Small and large scale experimental investigations of wave loads on a slender pile within closely spaced neighbouring piles[C]. // *Proceeding of the 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE)*. San Francisco, USA: [s. n.], 2014.
- [47] Bonakdar Lisham, Hocine Oumeraci. Pile group effect on the wave loading of a slender pile: A small-scale model study[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 449-461.
- [48] Hildebrandt A, Sparboom U, Oumeraci H. Wave forces on groups of slender cylinders in comparison to an isolated cylinder due to non-breaking waves[C]. // *Proceeding of the 31st International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, ASCE. Hamburg, Germany: [s. n.], 2008.
- [49] Sparboom U, Hildebrandt A, Oumeraci H. Group interaction effects of slender cylinders under wave attack[C]. // *Proceeding of the 30th International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, ASCE. San Diego, USA: [s. n.], 2006.
- [50] 杨晨, 刘长根, 陶建华. 用三维雷诺时变雷诺方程模型模拟小尺度组合桩柱上的波浪力[J]. *水动力学研究与进展*, 2006, 21(6): 781-788.
- Yang C, Liu C G, Tao J H. Numerical simulation of wave forces on small-diameter cylinders using three-dimension unsteady Reynolds equation model[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2006, 21(6): 781-788.
- [51] 张婷. 波浪的三维数值模拟及其应用[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- Zhang T. Three-Dimensional Numerical Simulation of Wave and Its Application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [52] 黄雯, 冯谊武, 张海龙. 波浪作用下的群桩受力及优化布置[J]. *桥梁建设*, 2016, 46(3): 51-56.
- Huang W, Feng Y W, Zhang H L. Mechanical properties and optimal arrangement of group piles acted by wave forces[J]. *Bridge Construction*, 2016, 46(3): 51-56.
- [53] Kang A Z, Lin P Z, Lee Y J, et al. Numerical simulation of wave interaction with vertical circular cylinders of different submergences using immersed boundary method[J]. *Computers & Fluids*, 2015, 106: 41-53.
- [54] Ryu S, Lee S B, Lee B H, et al. Estimation of hydrodynamic coefficients for flow around cylinders in side-by-side arrangement with variation in separation gap[J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(9-10): 672-680.
- [55] Arun Kamath, Mayilvahanan Alagan Chella, et al. CFD investigations of wave interaction with a pair of large tandem cylinders[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 105: 738-748.

- [56] Sun J L, Wang C Z, Wu G X, et al. Fully nonlinear simulations of interaction between solitary waves and structures based on the finite element method[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 202-215.
- [57] Wang C Z, Wu G X. Simulation of interactions between nonlinear waves and multi of an array of cylinders[J]. *Journal of Hydrodynamics(Ser. B)*, 2006, 18(3): 127-133.
- [58] Wolfram J, Naghipour M. On the estimation of Morison force coefficients and their predictive accuracy for very rough circular cylinders[J]. *Applied Ocean Research*, 1999, 20(6): 311-328.
- [59] 康海贵, 李玉成, 王洪荣. 垂直桩柱正向波流力的计算及水动力系数 C_D 、 C_M 分析方法的探讨[J]. *水动力学研究与进展*, 1990, 5(3): 93-95.
- Kang H G, Li Y C, Wang H R. Method for the calculation of in-line forces on a vertical circular cylinder and the analysis of hydrodynamic coefficients C_D 、 C_M in wave current co-existing field[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1990, 5(3): 93-95.
- [60] Bonakda, Etemad-Shahidi. Predicting wave run-up on rubble-mound structures using M5 model tree[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(1): 111-118.
- [61] Bonakdar L, Oumeraci H, Etemad-Shahidi A. Wave load formulae for prediction of wave-induced forces on a slender pile within pile groups[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 102: 49-68.
- [62] 林海花, 王言英. 一个确定 Morison 方程水动力系数的 BP 神经网络方法[J]. *中国海洋平台*, 2005, 20(6): 18-23.
- Lin H H, Wang Y Y. A bp neural network method of confirming the Morison equations hydrodynamic coefficients[J]. *China Off-shore Platform*, 2005, 20(6): 18-23.
- [63] 李少华. 海洋平台水动力系数反演方法及实验研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2010.
- Li S H. Identification Method and Experimental Analyses of Hydrodynamic Coefficients for Ocean Platform[D]. Hunan: Hunan University, 2010.

Recent Research and Progress on Hydrodynamic Coefficients of Marine Structures with Small Scale Pile

LIU Gui-Jie, WANG Qing-Yang, TIAN Xiao-Jie, XIE Ying-Chun

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The paper sum up many achievements in the computation of hydrodynamic coefficient on small diameter cylinders using the Morison Equation. The achievements on the the experimental studies, numerical simulation and hydrodynamic coefficient determination method are summarized with discussion about the single cylinder and pile group. The effect of the current, current and wave, transverse force, vertical cylinder, incline cylinder, and roughness on hydrodynamic coefficient is elaborated. what's more, the variation law of hydrodynamic coefficient under wave current condition is given. The method of solving the current hydrodynamic coefficients is summarized. Further work on the hydrodynamic coefficient of complex marine structures and other affecting factors is needed to develop efficient approaches.

Key words: hydrodynamic coefficient; Morison Equation; small scale pile; pile group

责任编辑 高 蓓