

文章编号:1005-9865(2022)04-0011-07

港珠澳大桥岛桥结合跨箱梁波浪力试验研究

刘清君¹, 李岩汀^{1,2}, 李国红^{3,4}, 王登婷¹, 琚烈红¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350; 3. 港珠澳大桥管理局, 广东 珠海 519060; 4. 广东港珠澳大桥材料腐蚀与工程安全国家野外科学观测研究站, 广东 珠海 519060)

摘 要:通过三维物理模型系列试验,对港珠澳大桥工程西人工岛、岛桥结合跨进行模拟。试验测量了不同波浪入射角度、波高、波周期以及梁底净高等影响因子下的岛桥结合跨箱梁所受的浮托力和水平力,分析了受力随波陡、相对梁底作用高度以及波浪入射角度的变化规律。研究表明,在一定条件下箱梁浮托力和水平力,随波陡的增大而减小,随梁底相对作用高度的增加而增大,波浪入射方向的影响主要表现为与箱梁沿波浪传播方向的有效长度相关。由于岛桥结合跨的特殊性,改进的Douglass公式并不适用于岛桥结合跨箱梁受力的计算。通过主要影响因子的量纲分析,建立针对岛桥结合跨箱梁浮托力和水平力的计算公式。研究成果可为今后同类工程以及数值模拟提供借鉴与参考。

关键词:港珠澳大桥;岛桥结合跨;浮托力;水平力

中图分类号:TV139.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2022.04.002

Experimental study on wave force of box girder at the junction of artificial island and bridge span of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

LIU Qingjun¹, LI Yanting^{1,2}, LI Guohong^{3,4}, WANG Dengting¹, JU Liehong¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Authority, Zhuhai 519060, China; 4. National Observation and Research Station of Material Corrosion and Structural Safety of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge in Guangdong Province, Zhuhai 519060, China)

Abstract: The west artificial island and the bridge span of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge project were simulated through a series of 3D physical model tests. The buoyancy force and horizontal force of the bridge under different wave incidence angles, wave heights, wave periods and net heights of deck bottom were measured, and the variation law of the force with wave steepness, relative deck bottom action height and wave incidence angle was analyzed. The results show that under certain conditions, the uplift and horizontal wave forces of box girder decrease with the increase of wave steepness, and increase with the increase of the relative action height of deck bottom. The effect of wave incidence direction is mainly related to the effective length of box girder along the wave propagation direction. The improved Douglass formula is not applicable to the calculation of the stress of the box girder combined with island bridge due to the particularity of the bridge. Based on the dimensional analysis of the main influencing factors, the formulas for calculating the uplift and horizontal wave forces of the bridge are established. The research results of this paper can provide references for similar projects and numerical simulation in the future.

Keywords: Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge; island bridge joint; uplift wave force; horizontal wave force

收稿日期:2021-11-05

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFB1600700);船舶总体性能创新研究开放基金(31422118);南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y220013,Y221017,Y222004)

作者简介:刘清君(1986—),男,河南商丘人,博士后,主要从事波浪与建筑物相互作用研究。E-mail: qjliu@nhri.cn

通信作者:王登婷

港珠澳大桥与西人工岛结合跨,采用箱梁与人工岛搭接的方式实现由岛至桥的连接。由于箱梁下净空有限,在超强台风等极端天气条件下,波浪可能对箱梁底部形成冲击,造成梁体的滑移。为保障港珠澳大桥安全,对岛桥结合跨的箱梁波浪力进行研究,确定其所受波浪力大小是十分必要的。近几十年来,尤其 2004 年飓风 Ivan 和 2005 年飓风 Katrina 造成美国公路桥梁面板发生严重垮塌,各国学者对桥梁梁体或码头面板受力开展了大量研究^[1-8],形成了一定的认识,建立了波浪浮托力和水平力的经验公式^[1, 9-11],目前被广泛采用的公式之一为 Douglass 公式,该方法也被美国规范所采用^[12],之后又有学者对该公式进行了改进^[13]。但现有的上述计算公式几乎均是针对普通跨,并未见针对岛桥结合跨梁体受力的研究成果。由于受人工岛影响,波浪在岛桥结合段势必发生明显变形与破碎,同时受梁体与人工岛搭接段空间封闭的影响,空气受压缩,形成对梁体的气垫层,因此,岛桥结合跨的梁体受力与普通跨存在一定差别。

通过三维物理模型系列试验,对西人工岛、岛桥结合跨进行模拟,考虑波浪在人工岛前的传播变形以及岛桥结合跨封闭空间的影响,测量不同波浪入射角度、波高、波周期以及底部超高等影响因子下箱梁所受的水平力和浮托力,分析岛桥结合跨箱梁受力随上述各影响因子的变化特征与规律,提出岛桥结合跨箱梁水平力和浮托力的计算方法。

1 模型试验设计

试验在波浪港池中进行。港池尺寸为 40 m×30 m×1.0 m(长×宽×高),一端配有推板式不规则波造波机,另一端设置消浪斜坡。造波机长 20 m,由计算机自动控制产生所需的规则波和不规则波。同时可通过移动造波机,生成不同入射角度的波浪。

试验遵照《水运工程模拟试验技术规范》相关规定,采用正态模型,按照 Froude 数相似律设计。根据试验内容、设计水位、波浪要素、试验断面及试验设备条件等因素,模型比尺取为 55。

试验分别采用规则波和不规则波,试验组次安排如表 1 和表 2 所示。

表 1 规则波试验组次
Tab. 1 Test wave parameters (regular waves)

序号	平均波高 H/m	周期 T/s	入射波向与桥轴线夹角 $\theta/(^{\circ})$	人工岛前水深 d/m
1	4.85	9.58		
2	4.00	9.58		
3	3.28	9.58		
4	2.00	9.58	90.0、67.5、45.0	12.92、11.82、11.47
5	4.51	9.24		
6	3.04	9.24		
7	3.28	8.10		
8	3.28	7.60		

表 2 不规则波试验组次
Tab. 2 Test wave parameters (irregular waves)

序号	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{4\%}/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	平均周期 T/s	入射波向与桥轴线 夹角 $\theta/(^{\circ})$	人工岛前 水深 d/m
1	6.56	5.74	5.59	4.85	9.58		
2	6.13	5.36	5.21	4.51	9.24	90.0、67.5、45.0	12.92、11.82、11.47

由表 1 和表 2 可知,试验规则波波要素变化组次共 8 组,波高的变化范围为 2.00~4.85 m;波周期分别为 7.60、8.10、9.24 和 9.58 s。此外,考虑人工岛前水深变化,分别取 12.92 m、11.82 m 和 11.47 m;考虑入射波向变化,波浪入射方向与桥轴线夹角分别取为 90.0°、67.5°和 45.0°。不规则波波要素变化组次为 2 组,人工岛

前水深和入射波向的变化情况与规则波一致。

图 1 为试验模型布置情况。试验过程中保持模型不变,通过移动造波机,实现不同入射波向作用下岛桥结合跨箱梁受力试验。其中,造波机方向 1 对应于入射波向与桥轴线夹角 45.0° ;造波机方向 2 对应于入射波向与桥轴线夹角 67.5° ;造波机方向 3 对应于入射波向与桥轴线夹角 90.0° 。

进行总力测量时,将箱梁整体吊起,保持箱梁与桥墩和桥台的缝隙在 1 mm 左右,保证箱梁在波浪作用下除和总力传感器接触外不受其他外力作用。总力传感器用铁架和金属螺杆固定住。总力传感器采样频率为 125 Hz 。每次试验至少重复三次,取三次平均值作为试验结果。若三次重复试验的试验结果差别较大时,则增加重复次数。

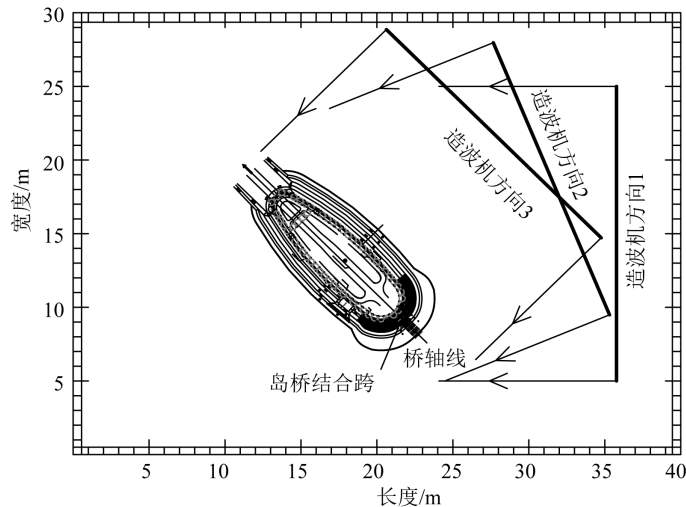


图 1 试验模型布置示意
Fig. 1 Sketch of test model layout

2 水平力试验结果分析

波高、波周期、波浪入射方向以及箱梁底面与静水面之间的悬空高度均是影响其受力的主要因素,分别对上述因素的影响进行分析。分析中采用无量纲参数,即:相对水平力 $\Delta F_H = \frac{F_H}{\gamma \cdot H \cdot a \cdot c}$ 、相对浮托力 $\Delta F_V = \frac{F_V}{\gamma \cdot H \cdot a \cdot b}$ 、相对梁底作用高度 $\Delta h = \frac{\eta_{\max} - h}{H}$ 、波陡 $\delta = \frac{H}{L}$ 以及波浪入射角 $\sin\theta$ 。上述无量纲参数中, F_H 为箱梁所受水平力, kN , F_V 为箱梁所受浮托力, kN , γ 为水的重度, kN/m^3 ; H 为波高, m ; a 为桥跨长度, m ; b 为箱梁宽度, m ; c 为箱梁高度, m ; L 为波长, m ; $\eta_{\max}$ 为波峰在静水面以上的高度, m ; h 为桥跨中心梁底与静水面之间的垂直距离, m , 梁底淹没时为负; θ 为波向与桥轴线之间的夹角, $(^{\circ})$, 当波向沿桥轴线时取 0° , 垂直桥轴线时取 90° 。

2.1 规则波试验结果分析

2.1.1 水平力随波陡的变化

图 2 为在相对梁底高度和波浪入射角度一定条件下,试验测得的岛桥结合跨箱梁水平受力随波陡的变化。

由图 2 可知,岛桥结合跨箱梁相对水平力随波陡的增大而减小,并逐渐趋于稳定,两者之间近似呈幂函数关系。相对梁底作用高度 $\Delta h = 0.53$ 和波浪入射角度 $\theta = 45^{\circ}$ 为例,在波陡 $\delta = 0.032$ 时,相对水平力 $\Delta F_H =$

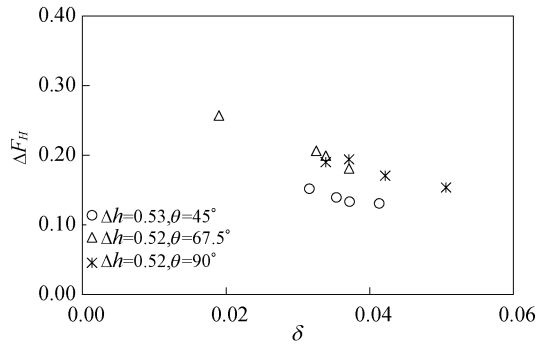


图 2 岛桥结合跨箱梁相对水平力随波陡的变化
Fig. 2 Variation of relative horizontal force of island-bridge span box girder with wave steepness

0.15, 当波陡 δ 增大至 0.035 时, 相对水平力 ΔF_H 迅速减小至 0.14, 随着波陡的进一步增大, 当波陡 δ 增大至 0.037 和 0.041 时, 相对水平力 ΔF_H 略有减小, 保持在 0.13 左右。

2.1.2 水平力随梁底作用高度的变化

图 3 为在入射波波陡和入射角度一定条件下, 试验中测得的岛桥结合跨箱梁水平力随相对梁底作用高度的变化。

由图 3 可知, 在相对梁底作用高度 $0 < \Delta h < 0.6$ 范围内, 相对水平力 ΔF_H 随相对梁底作用高度 Δh 的增大而增大, 两者之间呈相关性较好的线性关系 (相关系数在 0.97 以上)。这与波浪压力的分布规律密切相关。根据波浪压力沿垂向分布可知, 静水面以上的波浪压力近似按直线分布。

此外, 根据图 3 还可看出波陡 δ 和波浪入射角 θ 对两者之间的斜率存在一定影响。

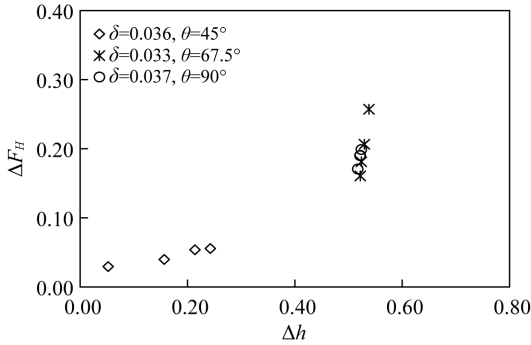


图 3 岛桥结合跨箱梁相对水平力随相对梁底高度的变化
Fig. 3 Variation of relative horizontal force of island-bridge span box girder with beam bottom height

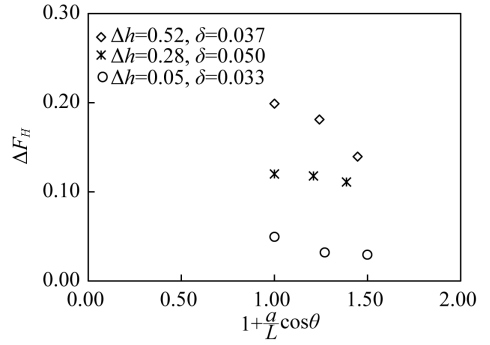


图 4 岛桥结合跨箱梁相对水平力随波浪入射角度的变化
Fig. 4 Variation of relative horizontal force of island-bridge span box girder with wave incident angle

2.1.3 水平力随波浪入射角度的变化

图 4 为在相对梁底高度和波陡一定条件下, 试验中测得的岛桥结合跨箱梁水平力随波浪入射角度的变化。其中, 纵坐标为相对水平力 ΔF_H , 横坐标为波浪入射角度 $[1 + a \cos \theta / L]$, 其物理意义为沿波向箱梁长度所占波长的比值, 该比值可反应箱梁所受水平力的相位影响。

由图 4 可知, 在相对梁底作用高度 Δh 和波陡 δ 一定的条件下, 相对水平力 ΔF_H 随波浪入射角度 $[1 + a \cos \theta / L]$ 的增大而减小, 两者之间近似呈幂函数关系。

2.1.4 规则波水平力的计算

根据上述箱梁水平力随波陡、净空高度以及波浪入射角度的变化可知, 箱梁水平力与波陡和波浪入射角度之间存在幂函数关系, 与净空高度之间存在线性关系。经试验数据拟合, 箱梁水平力计算公式:

$$\frac{F_H}{\gamma \cdot H \cdot a \cdot c} = 0.048 \cdot \left(1 + \frac{a}{L} \cdot \cos \theta\right)^{-0.25} \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.65} \left(\frac{\eta_{\max} - h}{H}\right) \quad (1)$$

采用式(1)的水平力计算值与试验值的对比见图 5。由图 5 可知, 式(1)计算值与试验值总体符合较好, 相关系数达到 0.90 以上。

2.2 不规则波水平力的计算

借鉴上述规则波作用下的箱梁水平力随各参数的变化规律, 将规则波的箱梁水平力计算公式, 拓展至不规则波。经对不规则波试验数据拟合, 箱梁水平力计算公式:

$$\frac{F_{H_{\max}}}{\gamma \cdot H_{1\%} \cdot a \cdot c} = 0.075 \left(1 + \frac{a}{L} \cos \theta\right)^{-0.25} \left(\frac{H_{1\%}}{L}\right)^{-0.65} \left(\frac{\eta_{\max} - h}{H_{1\%}}\right) \quad (2)$$

式中: $F_{H_{\max}}$ 为箱梁最大总水平力, kN; $H_{1\%}$ 为累积频率 1% 的波高, m; 式中其它各参数与式(1)一致。

采用式(2)的不规则波水平力计算值与试验值的对比见图 6。由图 6 可知, 式(2)计算值与试验值较为符合, 且计算值略大于试验值, 相关系数达到 0.92 以上。

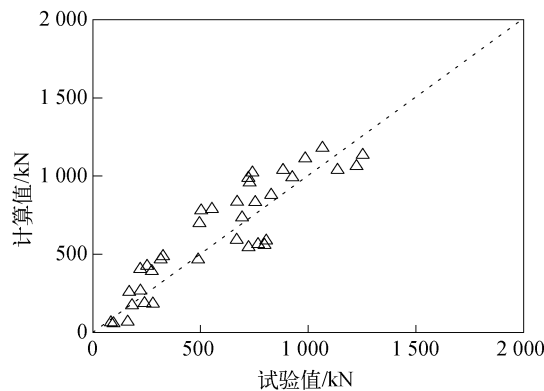


图 5 规则波水平力计算值与试验值的对比

Fig. 5 Comparison between calculated and tested values of regular wave horizontal force

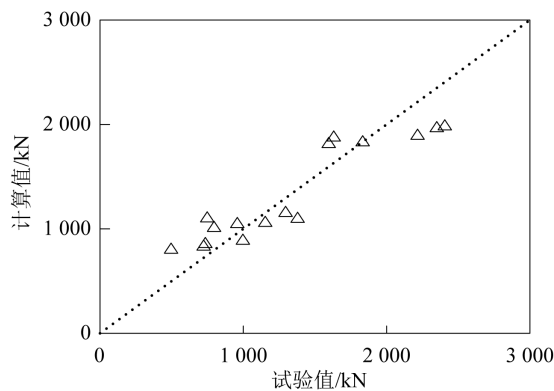


图 6 不规则波水平力计算值与试验值的对比

Fig. 6 Comparison between calculated and tested values of irregular wave horizontal force

3 浮托力试验结果分析

3.1 规则波试验结果分析

3.1.1 浮托力随波陡的变化

图 7 为试验测得的岛桥结合跨箱梁浮托力随波陡的变化。由图 7 可知,岛桥结合跨箱梁相对浮托力随波陡的增大而减小,并逐渐趋于稳定,两者之间近似呈幂函数关系。相对梁底作用高度 Δh 和波浪入射角 θ 对两者间的幂函数关系存在一定影响。以相对梁底作用高度 $\Delta h=0.53$ 和波浪入射角度 $\theta=45^\circ$ 为例,在波陡 $\delta=0.02$ 时,相对浮托力 $\Delta F_v=0.15$,当波陡 δ 增大至 0.03 时,相对浮托力 ΔF_v 迅速减小至 0.13,随着波陡的进一步增大,当波陡 δ 增大至 0.032 和 0.035 时,相对浮托力 ΔF_v 略有减小,保持在 0.12 左右。

3.1.2 浮托力随梁底作用高度的变化

图 8 为试验中测得的岛桥结合跨箱梁浮托力随相对梁底作用高度的变化。由图 8 可知,保持波陡 δ 和波浪入射角 θ 一致的条件下,在 $0<\Delta h<0.6$ 范围内,相对浮托力 ΔF_v 随相对梁底作用高度 Δh 的增大而增大,两者之间近似呈线性关系,相关系数均在 0.95 以上。波陡 δ 和波浪入射角 θ 对两者之间的斜率存在一定影响。

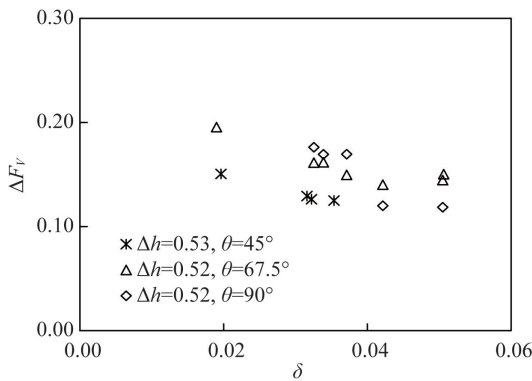


图 7 岛桥结合跨箱梁相对浮托力随波陡的变化

Fig. 7 Variation of relative uplift force of island-bridge span box girder with wave steepness

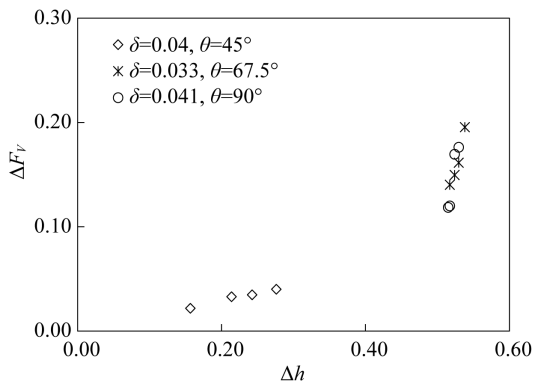


图 8 岛桥结合跨箱梁相对浮托力随相对梁底作用高度的变化

Fig. 8 Variation of relative uplift force of island-bridge span box girder with beam bottom height

3.1.3 浮托力随波浪入射角度的变化

图 9 为试验中测得的岛桥结合跨箱梁浮托力随波浪入射角度的变化。其中,纵坐标为相对浮托力 ΔF_v ,横坐标为波浪入射角度 $[1+L\sin\theta/b]$,其物理意义为梁底宽度所占波长的比值,该比值可反应箱梁宽度所受浮托力的相位影响。

由图 9 可知,在相对梁底作用高度 Δh 和波陡 δ 一定的条件下,相对浮托力 ΔF_v 随波浪入射角度 $[1+L\sin\theta/b]$ 的增大而增大,两者之间近似呈幂函数关系。

3.1.4 规则波浮托力的计算

综合上述箱梁浮托力随波陡、净空高度以及入射角度的变化可知,箱梁浮托力与波陡和波浪入射角度之间存在幂函数关系,与净空高度之间存在线性关系。经试验数据拟合,岛桥结合跨箱梁浮托力计算公式:

$$\frac{F_V}{\gamma \cdot H \cdot a \cdot b} = 0.045 \left(1 + \frac{L}{b} \sin \theta \right)^{0.25} \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.4} \left(\frac{\eta_{\max} - h}{H} \right)$$

(3)

采用式(3)的浮托力计算值与试验值的对比见图 10。由图 10 可知,式(3)计算值与试验值总体符合较好,相关系数达到 0.94 以上。

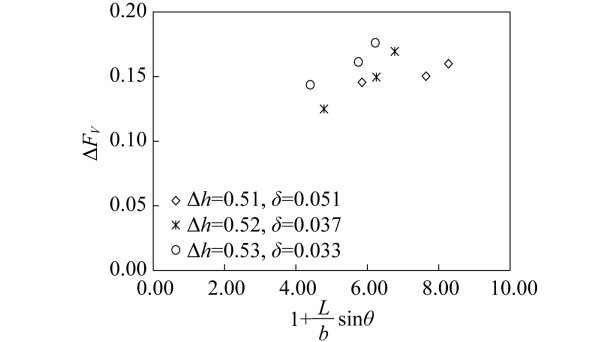


图 9 岛桥结合跨箱梁相对浮托力随波浪入射角度的变化
Fig. 9 Variation of relative uplift force of island-bridge span box girder with wave incident angle

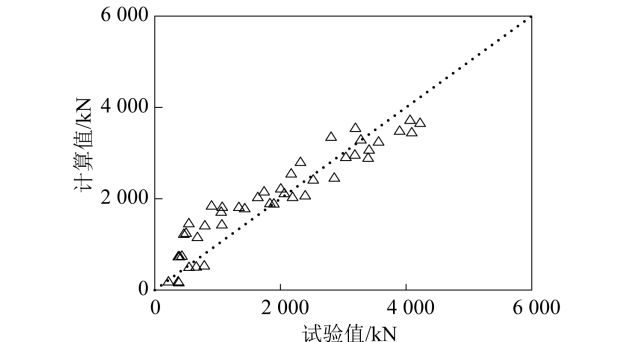


图 10 规则波浮托力计算值与试验值的对比
Fig. 10 Comparison between calculated and tested values of regular wave uplift force

3.2 不规则波浮托力的计算

借鉴上述规则波作用下的箱梁浮托力随各参数的变化规律,将规则波的箱梁浮托力计算公式,拓展至不规则波。经对不规则波试验数据拟合,箱梁浮托力计算公式:

$$\frac{F_{V\max}}{\gamma \cdot H_{1\%} \cdot a \cdot b} = 0.1 \left(1 + \frac{L}{b} \sin \theta \right)^{0.25} \left(\frac{H_{1\%}}{L} \right)^{-0.4} \left(\frac{\eta_{\max} - h}{H_{1\%}} \right)$$

(4)

式中: $F_{V\max}$ 为箱梁最大总上托力,kN; $H_{1\%}$ 为累积频率 1%的波高,m;式中其它各参数与式(3)一致。

采用式(4)的不规则波浮托力计算值与试验值的对比见图 11。由图 11 可知,式(3)计算值与试验值较为符合,且计算值略大于试验值,相关系数达到 0.95 以上。

4 关于本文公式的讨论

对于跨海桥梁梁体水平力和浮托力的计算,2006 年,Douglass^[1]提出了计算方法。而后,2015 年 James 等^[13]对上述方法进行了改进。为方便表示,下文称其为 Douglass 修正公式。采用 Douglass 修正公式对本次试验工况进行计算,并与试验值进行对比,见图 12。

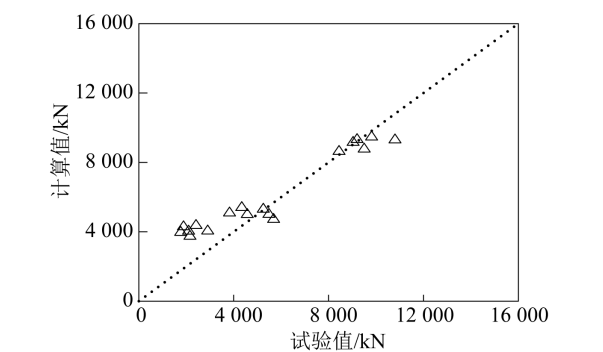


图 11 不规则波浮托力计算值与试验值的对比
Fig. 11 Comparison between calculated and tested values of irregular wave uplift force

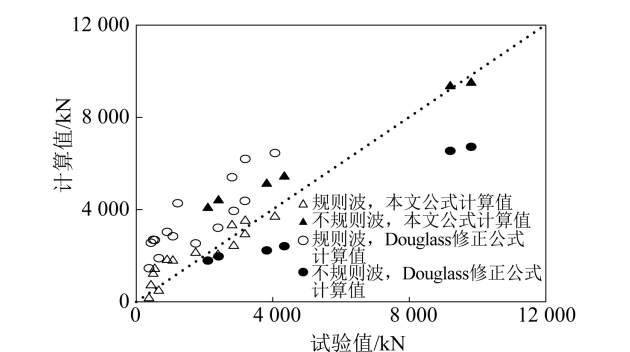


图 12 Douglass 修正公式计算值与本文公式计算值对比
Fig. 12 Comparison between the calculated values of Douglass's modified formula and those of the formula in this paper

由图12可知,规则波时,Douglass修正公式计算值均大于试验值,不规则波时,Douglass修正公式计算值均小于试验值,即采用Douglass改进计算公式规则波时会高估岛桥结合跨的受力,不规则波时会低估岛桥结合跨的受力。本文公式计算值与试验值的吻合性优于Douglass修正公式。这主要是由于Douglass修正公式是针对普通跨,而本文试验是针对人工岛岛桥结合跨。岛桥结合跨受地形变化以及岛桥搭接段气体封闭影响,其受力不同于普通跨。因此,本文公式更适合于岛桥结合跨箱梁受力的计算。

本文仅是针对港珠澳大桥西人工岛岛桥结合跨箱梁受力计算,然而实际情况中,人工岛断面结构形式存在差别,断面结构形式的改变势必对波浪产生影响,进而对箱梁受力产生影响,因此本文建立的计算公式仍存在一定的局限性,后期还需针对不同的人工岛断面形式对上述公式进行修正完善。公式各参数之间的关系,可为今后研究提供指导。

5 结 语

通过物理模型试验对港珠澳大桥西人工岛岛桥结合跨箱梁波浪力进行研究,分析了浮托力和水平力随波陡、相对梁底作用高度和波浪入射角度的变化规律。在此基础上,分别给出了规则波和不规则波作用下箱梁所受浮托力和水平力的计算公式。与目前广泛采用的公式相比,本文提出的计算公式更适合于岛桥结合跨箱梁受力计算。本研究成果可为港珠澳大桥防灾减灾提供技术支撑,也可为数值模拟研究提供参考。波浪对岛桥结合跨梁体作用较为复杂,本研究仅针对港珠澳大桥岛桥结合跨,后续尚需针对不同的人工岛断面形式、梁体类型等进一步深入研究。

参考文献:

- [1] DOUGLASS S L, CHEN Q, OLSEN J M, et al. Wave forces on bridge decks [R]. Mobile, A L: University of South Alabama, 2006.
- [2] CUOMO G, SHIMOSAKO K, TAKAHASHI S. Wave-in-deck loads on coastal bridges and the role of air [J]. Coastal Engineering, 2009, 56(8): 793-809.
- [3] JIN J, MENG B. Computation of wave loads on the superstructures of coastal highway bridges [J]. Ocean Engineering, 2011, 38(11): 2185-2200.
- [4] HAYATDAVOODI M, SEIFFERT B, ERTEKIN R C. Experiments and computations of solitary-wave forces on a coastal-bridge deck. Part II: Deck with girders [J]. Coastal Engineering, 2014, 88: 210-228.
- [5] 方庆贺. 近海桥梁上部结构波浪作用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. (FANG Qinghe. Study on wave forces acting on superstructures of coastal bridges [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese))
- [6] 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. (ZHAO Xizeng, TONG Chenyi, YAO Yanming. Study on extreme wave impacting on superstructure of coastal bridge [J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 48(12): 127-132. (in Chinese))
- [7] 张翔宇. 波浪作用下箱梁式跨海桥梁受力试验研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017. (ZHANG X Y. Experiment study of wave loads on the box girder coastal bridge [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources Electric Power, 2017. (in Chinese))
- [8] 周益人, 陈国平, 黄海龙, 等. 透空式水平板波浪总上托力试验研究 [J]. 海洋工程, 2004, 22(4): 43-50. (ZHOU Yiren, CHEN Guoping, HUANG Hailong, et al. Experimental study on uplift forces of waves on a horizontal plate of an open-wharf [J]. The Ocean Engineering, 2004, 22(4): 43-50. (in Chinese))
- [9] XU G, CAI C S, DENG L. Numerical prediction of solitary wave forces on a typical coastal bridge deck with girders [J]. Struct. Infrastruct. Eng., 2016, 13(2): 254-272.
- [10] Aashto. Guide specifications for bridges vulnerable to coastal storms [S]. Officials AAOS, 2008.
- [11] HUANG B, ZHU B, CUI S, et al. Experimental and numerical modelling of wave forces on coastal bridge superstructures with box girders, Part I: regular waves [J]. Ocean Engineering, 2018, 149: 53-77.
- [12] Hydraulic engineering circular No. 25—Highways in the coastal environment: FHWA-NHI-07-096 [S]. U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2008.
- [13] JAMES D, CLEARY J, DOUGLASS S. Estimating wave loads on bridge decks [C]//Proceedings of the Structures Congress 2015. 2015: 183-193.