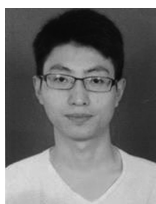


· 综 合 ·



港珠澳大桥岛桥结合部 结构的波浪力试验研究*

沈雨生, 潘军宁, 周益人, 孙忠滨
(南京水利科学研究院 河流海岸研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 港珠澳大桥岛桥结合部桥面高程较低, 设计水位和波浪条件下波浪对岛桥结合部的桥面、人工岛等结构作用复杂且较强。通过三维物理模型试验对岛桥结合部结构的波浪力进行试验研究。结果表明: 1) 设计水位和波浪条件下, 岛桥结合部单跨箱梁结构的无量纲波浪水平力最大为 $0.7F/(\rho g A_2 H_{1\%})$, 无量纲波浪上托力最大为 $0.2F/(\rho g A_1 H_{1\%})$ 。2) 在 S(正向 0°) 和 SSW(22.5°) 方向波浪作用下, 波浪力大于其他方向的结果。3) 随着水位抬高、超高变小, 岛桥结合部桥面箱梁结构受到的波浪上托力和水平力均变大。4) 无量纲上托压强最大为 $2.0p/(\rho g H_{1\%})$, 无量纲水平压强最大为 $1.9p/(\rho g H_{1\%})$ 。

关键词: 港珠澳大桥; 岛桥结合部; 上部桥面结构; 波浪总力; 波压力

中图分类号: P 752; U 652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0021-08

Experimental study on wave force of island-bridge joint structure of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

SHEN Yu-sheng, PAN Jun-ning, ZHOU Yi-ren, SUN Zhong-bin

(River and Harbour Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The elevation of the bridge deck at the island-bridge joint of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge is relatively low, thus the wave has a complex and strong effect on the bridge deck, artificial island and other structures at the joint of the island bridge under the design water level and wave conditions. The wave force of the island-bridge joint structure is experimentally studied through the 3D physical model tests. The results show that: 1) Under the design water level and wave conditions, for the island-bridge junction, the maximum dimensionless wave horizontal force of the single-span box girder structure is $0.7 F/(\rho g A_2 H_{1\%})$ and the maximum dimensionless wave uplift force is $0.2 F/(\rho g A_1 H_{1\%})$. 2) The wave force is larger under the action of the S(positive 0°) and SSW(22.5°) direction waves than results in other directions. 3) As the water level rises and the relative elevation becomes smaller, the wave uplift force and the horizontal force on the structure both increase. 4) The maximum dimensionless uplift wave pressure is $2.0p/(\rho g H_{1\%})$ and the maximum dimensionless horizontal pressure is $1.9p/(\rho g H_{1\%})$.

Keywords: Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge; island-bridge joint; upper bridge deck structure; total wave force; wave pressure

跨海大桥所处的海洋环境往往较为恶劣, 波浪荷载成为设计中的主要控制荷载之一。根据 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》^[1], 桥梁下净空应根据计算水位(设计水位计入雍水、浪高等)加安全高

度确定, 上部桥面高程往往较高, 不受波浪的作用。在以往的跨海桥梁设计中, 波浪荷载主要是桥梁桩基基础等受到的波浪作用^[2-3], 国内主要按照 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[4]中的方法计

收稿日期: 2022-02-21

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1600700)

作者简介: 沈雨生(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事波浪与建筑物相互作用研究。

算波浪力，或者通过专题数值模拟和物理模型试验研究桩基础的波浪荷载。美国设计规范 *AASHTO LRFD Bridge Specifications*^[5]、*Coastal engineering manual* 2002^[6] 及英国海工规范 *Maritime Structures BS 6349-12000*^[7] 等也都给出了桥梁桩基础波浪荷载的计算方法，均采用 Morison 方程进行计算。由于跨海桥梁上部桥面结构一般不受波浪的作用，专门针对跨海桥梁上部桥面结构波浪荷载的研究很少，当上部桥面结构受到波浪作用时可参照波浪对透空式水平板的作用。透空式水平板的波浪荷载已有一定的研究成果，周益人等^[8-11] 对透空式水平板波浪上托力冲击压强、波浪总上托力和波浪水平力等进行了研究，提出了相应的计算公式，由于透空式水平板的波浪冲击压强和波浪力试验结果的离散性较大，采用包络值拟合了计算公式，该波浪力公式的计算结果与实际波浪力结果相比整体上偏大，且主要适用于单一水平板结构，对于岛桥结合部的复杂情况以及高程变化的桥面结构不适用。

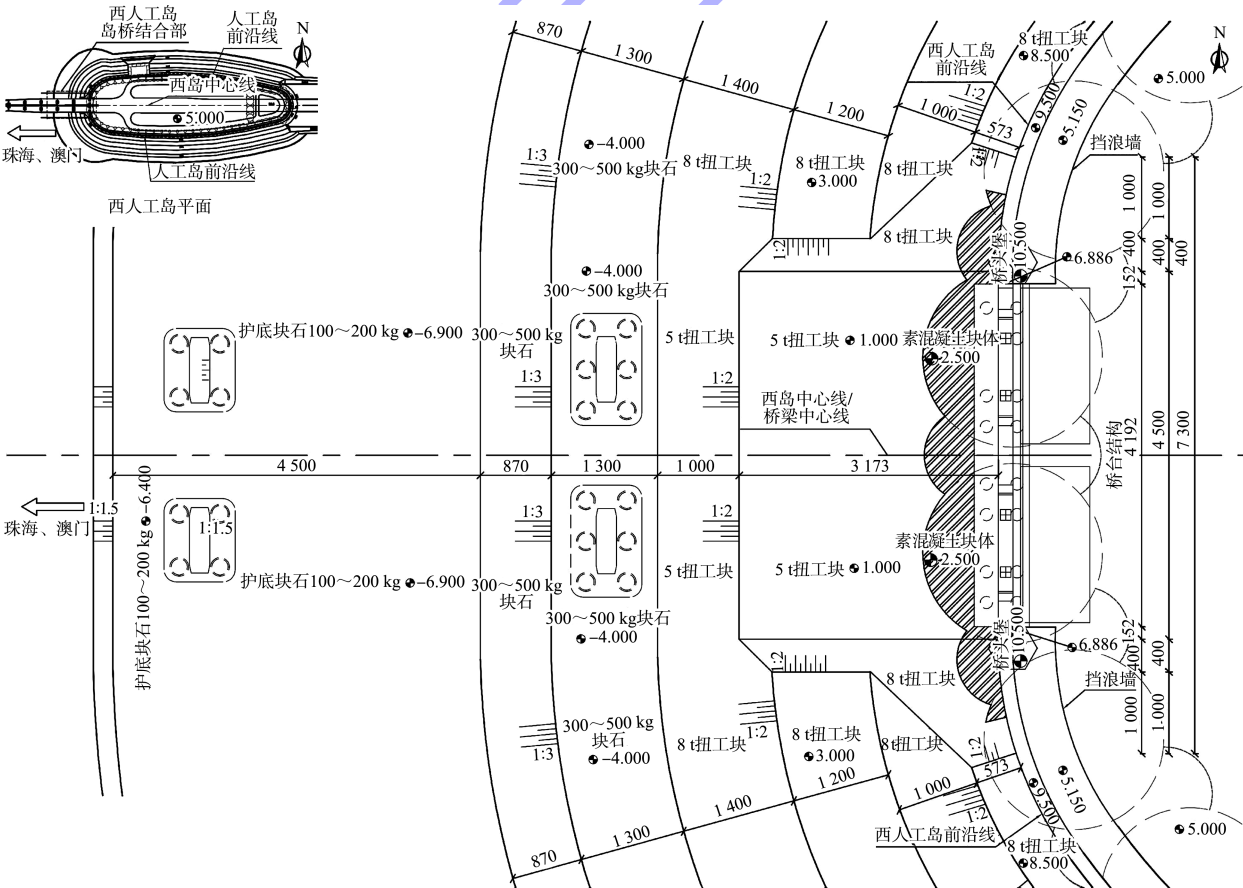
港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋，连接香港、珠海和澳门三地，是由隧、岛、桥组成的跨海交通集群工程，桥隧转换采用海中筑岛方式，在隧道两端各设置一个海中人工岛。东、西人工岛岛桥结合部非通航孔桥桥面高程较低，波浪对岛桥结合部的桥面、人工岛等结构作用非常复杂，在极端高水位下岛桥结合部的桥面箱梁结构底部距离水面很近，受到的波浪作用较强。

本文依托港珠澳大桥岛桥结合部波浪局部整体物理模型试验，研究设计水位和波浪条件下岛桥结合部上部桥面箱梁结构波浪上托力、水平力和波压力，分析波浪力的分布特征以及波向、水位和波高等因素对波浪力的影响规律。

1 物理模型试验

1.1 岛桥结合部结构

西人工岛岛桥结合部平面布置及人工岛、桥梁断面结构见图 1、2。



注：高程系统采用 1985 国家高程基准。

图 1 西人工岛岛桥结合部平面布置（高程：m；尺寸：cm。下同）

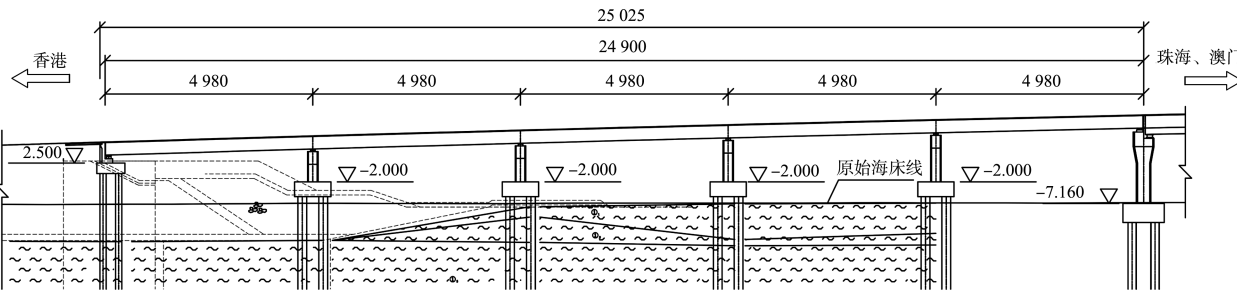


图 2 西人工岛岛桥结合部断面

桥梁上部桥面高程在远离人工岛处较高, 高于设计水位及设计波浪条件下波峰面高度; 在岛桥结合部, 由于受到人工岛高程的限制, 桥面高程需要降低以便与人工岛连接。本文研究高程相对较低、能够受到波浪作用的岛桥结合部前 3 跨桥面, 前 3 跨桥面底面高程(4 个节点的桥面底面高程)为 4.35、5.81、7.22、8.48 m。岛桥结合部桥面纵向坡度为 1:35, 桥面单跨长度 49.80 m, 桥面高度为 3 m, 宽度 2×20.3 m(南侧和北侧)。

1.2 试验水位及波浪要素

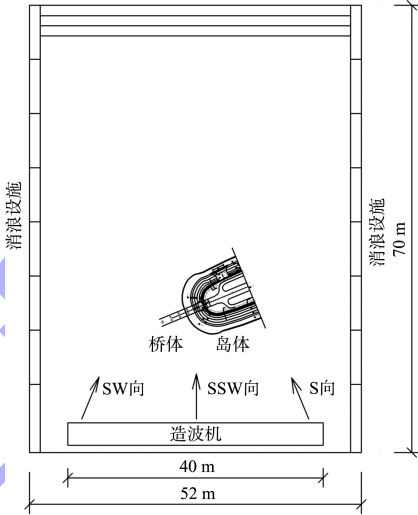
试验水位包括考虑海平面上升的 300 a 一遇极端高水位 4.22 m、300 a 一遇极端高水位 3.82 m 和补充水位(可能不利水位) 3.52 m。试验波浪方向为 SSE、S、SSW 和 SW 向, 设计波浪要素为 300 a 一遇、300 a 一遇波高增加 10%(即 1.1 倍), 见表 1。

表 1 300 a 一遇重现期的试验波浪要素

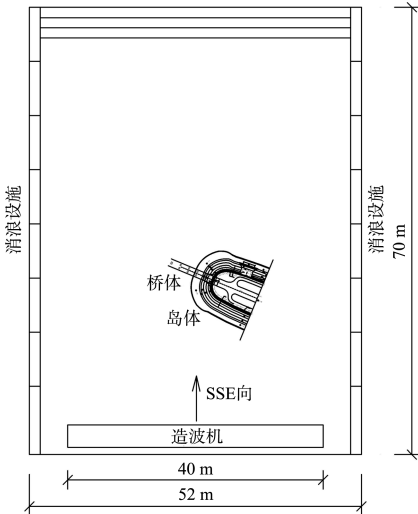
波浪 方向	波高/m				周期 T/s	波长 L/m
	$H_{1\%}$	$1.1H_{1\%}$	$H_{13\%}$	$1.1H_{13\%}$		
SSE	6.56	7.22	4.85	5.34	9.58	94
S	6.40	7.04	4.72	5.19	9.45	93
SSW	6.54	7.19	4.83	5.31	9.56	94
SW	6.22	6.84	4.57	5.03	9.30	91

1.3 试验方法

试验在波浪港池中进行, 港池长 70 m、宽 52 m、深 1.2 m, 造波机宽 40 m。采用正态模型, 模型比尺为 1:35。试验范围为西人工岛局部段及接岛前 4 跨非通航孔桥, 试验波浪方向为 SSE、S、SSW 和 SW 向(与岛桥结合部纵轴线法线方向的夹角分别为-22.5°、0°、22.5°和 45°, 向桥侧和顺时针方向为正), 模型布置见图 3, 岛桥结合部模型见图 4。采用的不规则波浪谱为 JONSWAP 谱。



a) S、SSW和SW向波浪作用模型



b) SSE向波浪作用模型

图 3 模型布置



图 4 岛桥结合部模型

采用总力传感器测量总力、采用压强传感器测量波压力。总力传感器用铁架和金属螺杆固定，分别测量岛桥结合部前 3 跨的南、北段总力，总

力传感器布置见图 5。对前 3 跨接岛桥梁上部结构进行波压力分布测量，每桥跨布置 5 个测量断面，每个断面 12 个测点，测点布置见图 6。

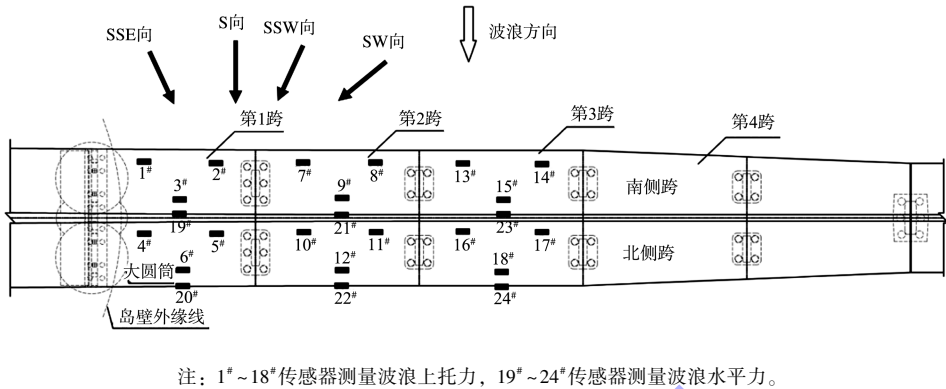


图 5 总力传感器布置

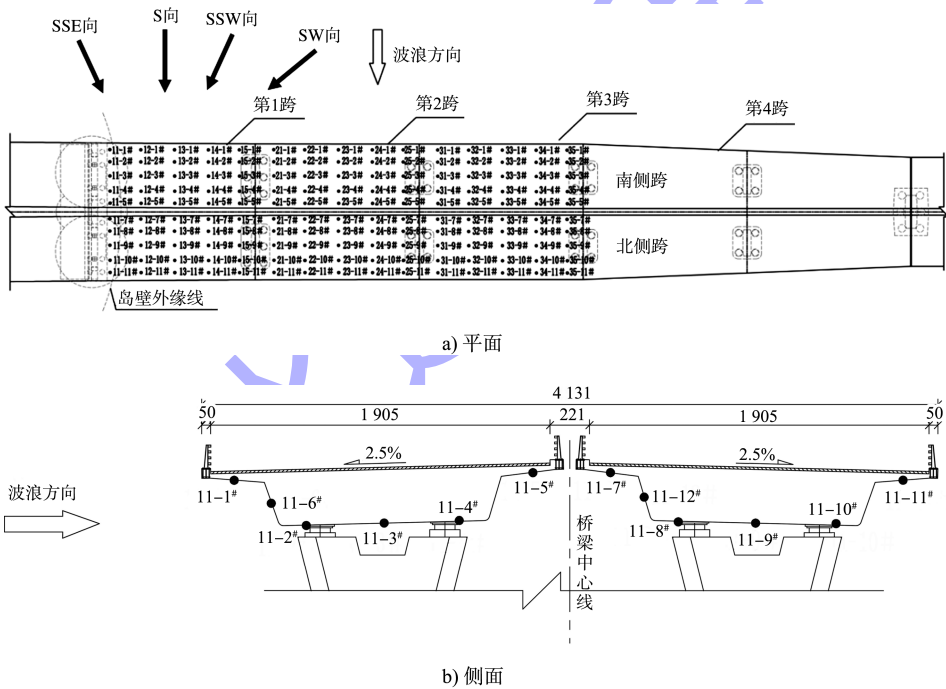


图 6 压强传感器布置

2 试验结果分析

2.1 上部桥面箱梁结构波浪力

采用无量纲的桥面箱梁结构波浪总力 $F/(\rho g A H_{1\%})$ 进行分析，其中： F 为试验测得的每跨结构波浪总上托力和总水平力最大值； ρ 为水的密度，取 $1\,000\text{ kg/m}^3$ ； g 为重力加速度，取 9.8 m/s^2 ； A 为相应的受力面积，上托力受力面积取 $A_1=49.8\text{ m(每跨结构长度)}\times 20.3\text{ m(每跨结构底面宽度)}=1\,010.94\text{ m}^2$ ，水平力受力面积取 $A_2=$

$49.8\text{ m(每跨结构长度)}\times 3\text{ m(高度)}=149.4\text{ m}^2$ ； $H_{1\%}$ 为每组工况的 1% 大波波高。

2.1.1 不同位置桥面箱梁结构的波浪力

图 7 给出了不同侧(南侧为迎浪侧、北侧为背浪侧)和不同跨(第 1 跨、第 2 跨和第 3 跨)的桥面箱梁结构的波浪力对比。水位为 100 a 一遇海平面上升影响后的 300 a 一遇高水位(4.22 m)，波浪为 300 a 一遇波浪波高增加 10%，其他波浪要素见表 1。

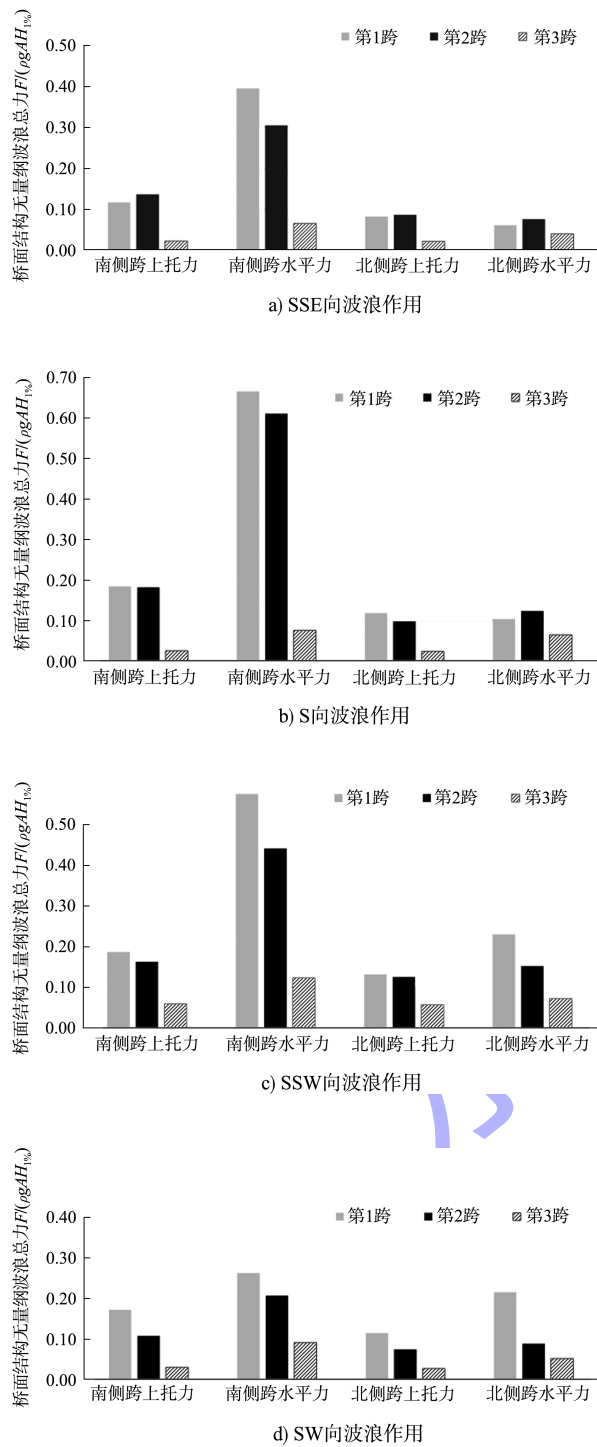


图 7 不同位置桥面箱梁结构的波浪力对比

1) 在相同位置处，相同水位和波浪条件下，桥面箱梁结构每跨的无量纲波浪水平力整体上大于其无量纲波浪上托力(尤其是迎浪侧的南侧跨结构)，无量纲波浪水平力最大为 $0.7F/(\rho g A_2 H_{1\%})$ ，无量纲波浪上托力最大为 $0.2F/(\rho g A_1 H_{1\%})$ 。这是由于，一方面桥面箱梁结构的侧面高度约为

$1/30L$ 、底面宽度约为 $1/5L$ ，桥面箱梁结构侧面高度(对应于波浪水平力)与其底面宽度(对应于波浪上托力)相比明显较小，波峰作用时箱梁侧面波浪冲击相位差较小、箱梁底面相位差较大；另一方面，箱梁为 T 形结构、箱梁底面不规则，箱梁底面不同高度位置的波浪冲击相位差较大。但是由于波浪水平力的受力面积显著小于波浪上托力的受力面积，桥面箱梁结构受到的波浪总水平力(绝对值大小)仍明显小于其波浪总上托力。

2) 由于南侧跨位于迎浪侧、北侧跨位于背浪侧，波浪首先作用于南侧跨，相同水位和波浪条件下，南侧跨桥面箱梁结构受到的波浪力整体大于北侧跨结构的受力，尤其对于超高较小的第 1 跨(箱梁底面距离水位的超高为 $0.02H_{1\%} \sim 0.23H_{1\%}$)和第 2 跨(超高为 $0.23H_{1\%} \sim 0.43H_{1\%}$)，北侧跨结构波浪上托力和水平力与南侧跨相比分别减小了 35% 和 70%。分析其原因，主要是由于超高较小时，入射波浪波峰首先作用于迎浪侧结构，迎浪侧结构对入射波浪波峰存在明显的消减作用，使得作用于背浪侧结构的波峰变小，从而背浪侧结构受力相比迎浪侧减小。

3) 4.22 m 水位下，岛桥结合部第 1 跨、第 2 跨和第 3 跨的桥面箱梁底面距离水面的超高分别为 $0.02H_{1\%} \sim 0.23H_{1\%}$ 、 $0.23H_{1\%} \sim 0.43H_{1\%}$ 和 $0.43H_{1\%} \sim 0.61H_{1\%}$ 。由于第 3 跨超高较大(平均超高大于 $0.5H_{1\%}$)，在不同方向波浪作用下，其受到的波浪上托力和水平力均明显小于前两跨结构，本次试验范围内第 3 跨结构受到的波浪上托力和水平力约是第 2 跨和第 1 跨结构的 $1/9 \sim 1/2$ 。对于前两跨结构，在 SSE 向波浪作用下，由于人工岛头部对第 1 跨桥面结构的掩护作用，第 2 跨结构受到的波浪上托力相比第 1 跨较大。在 S、SSW 和 SW 向波浪作用下，由于岛桥结合部桥面下部及周围的护岸对波浪存在反射和波能聚集作用，第 1 跨结构受到的波浪力相比第 2 跨整体较大。

2.1.2 波浪方向对桥面箱梁结构波浪力影响

由于第3跨结构波浪力明显小于前两跨的波浪力，图8给出了不同方向波浪作用下前两跨桥面箱梁结构的波浪力对比。水位为4.22 m，波浪为300 a一遇波浪波高增加10%。

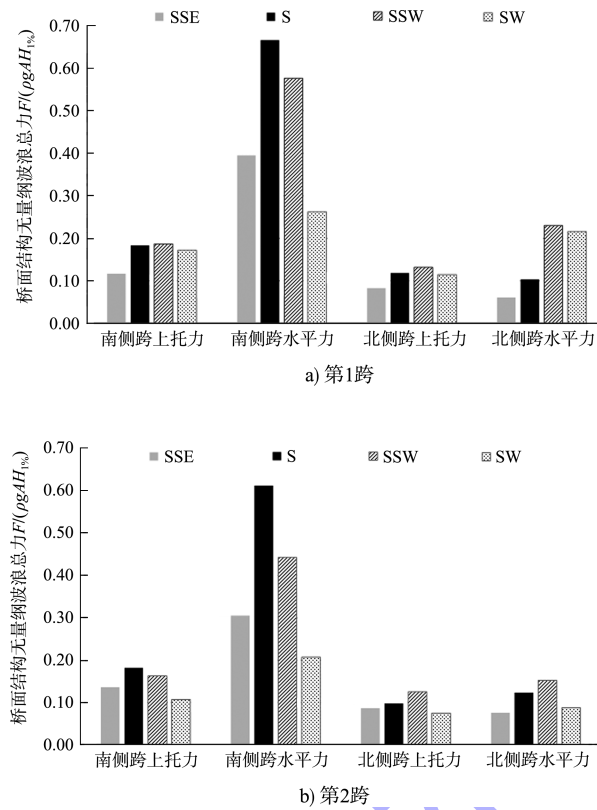


图8 不同波浪方向下桥面箱梁结构的波浪力对比

岛桥结合部桥面箱梁结构受到的波浪力在S和SSW向波浪作用下相比其他方向波浪作用时较大。这是由于，一方面S和SSW向波浪桥面箱梁结构的夹角较小，波峰作用时结构受波浪冲击的相位差较小；另一方面S和SSW向波浪作用下，岛桥结合部桥面箱梁结构下部及周围的护岸对波浪存在反射和波能聚集作用，使得桥面箱梁结构受到的波浪作用变大。虽然SSE向波浪与波浪桥面箱梁结构的夹角也较小，但是由于该方向波浪作用下人工岛头部对岛桥结合部桥面箱梁结构存在一定的掩护作用，所以该方向波浪作用下的岛桥结合部桥面箱梁结构波浪力相比S和SSW向波浪作用时较小。虽然SW向波浪作用下

岛桥结合部桥面箱梁结构下部及周围的护岸对波浪也存在明显反射和波能聚集作用，但是由于该方向与桥面箱梁结构斜向夹角较大，波峰作用时结构受波浪冲击作用的相位差较大，所以该方向波浪作用下的岛桥结合部桥面箱梁结构波浪力相比S和SSW向波浪作用时也较小。

2.1.3 水位对桥面箱梁结构波浪力影响

图9给出了SSW向波浪作用下不同水位时(4.22、3.82、3.52 m)前两跨桥面箱梁结构的波浪力对比。波浪条件为300 a一遇波浪波高增加10%。第1跨~第2跨3个水位对应的超高分别为 $0.02H_{1\%} \sim 0.43H_{1\%}$ 、 $0.08H_{1\%} \sim 0.49H_{1\%}$ 和 $0.12H_{1\%} \sim 0.53H_{1\%}$ 。

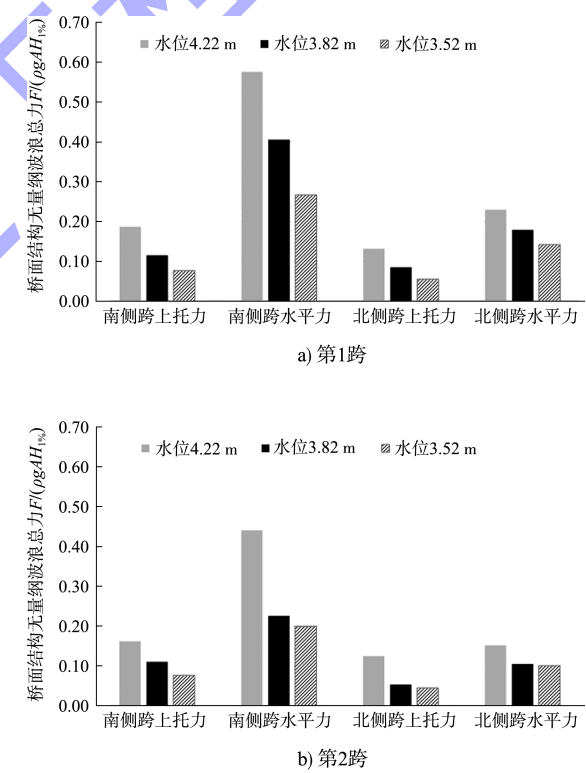


图9 不同水位下桥面箱梁结构的波浪总力对比

在试验范围内，随着水位抬高、桥面箱梁结构底面超高变小，岛桥结合部桥面箱梁结构受到的波浪上托力和水平力均变大。分析其原因，随着水位抬高、桥面箱梁结构底面超高变小，由于岛桥结合部桥面箱梁结构底面和水面的空隙部分变小，加上其下部人工岛护岸的阻水影响，高水

位时该处的波能聚集效应更明显, 故结构受力变大。

2.1.4 入射波高对桥面箱梁结构波浪力影响

图 10 给出了 SSW 向波浪作用下不同入射波高时 (波浪为 300 a 一遇波浪波高增加 10% ($H_{1\%}=7.19\text{ m}, T=9.56\text{ s}$) 和 300 a 一遇波浪波高 ($H_{1\%}=6.54\text{ m}, T=9.56\text{ s}$)) 前两跨桥面箱梁结构的波浪力对比。

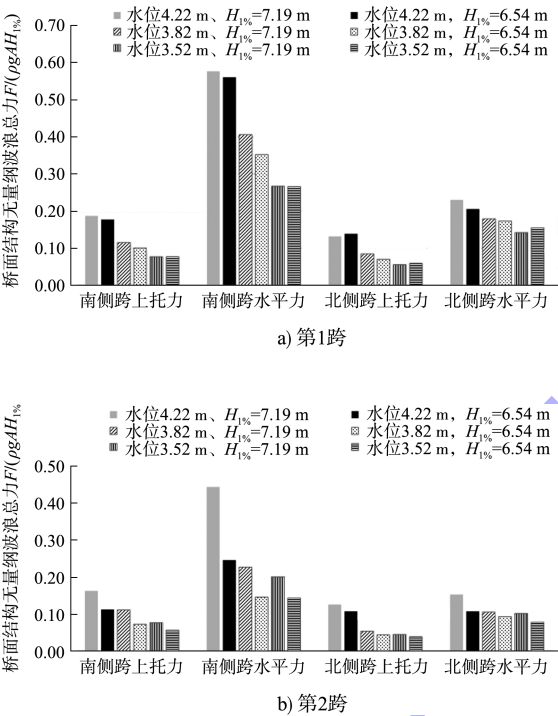


图 10 不同入射波高下桥面箱梁结构的波浪总力对比

随着入射波高的增大, 由于波浪作用的非线性增强, 波峰面高度与入射波高的比值增大, 岛桥结合部桥面箱梁结构受到的无量纲波浪力 $F/(\rho g A H_{1\%})$ 整体上呈增大的趋势。对于超高较小的第 1 跨箱梁结构, 无量纲波浪力 $F/(\rho g A H_{1\%})$ 随着波高增大而变大的幅度总体上不明显; 对于南侧第 2 跨箱梁结构 (不同水位下超高范围为 $0.23H_{1\%} \sim 0.53H_{1\%}$), 无量纲波浪力 $F/(\rho g A H_{1\%})$ 随着波高增大而明显变大, 主要是由于在该超高范

围内结构受到的波浪力对波高变化较敏感; 对于北侧第 2 跨箱梁结构, 无量纲波浪力 $F/(\rho g A H_{1\%})$ 随着波高增大而变大的幅度总体上不明显, 主要是由于其位于背浪侧, 波浪首先作用于迎浪侧的南侧跨, 南侧跨对波浪的消减作用降低了北侧第 2 跨箱梁结构受力对入射波高变化的敏感性。

2.2 上部桥面箱梁结构波压力

除了分析波浪总力, 还分析了结构上单点的最大波浪冲击压强。基于波浪总力分析结果, 对于波压力, 主要分析了 4.22 m 水位叠加不同波向 300 a 一遇波浪波高增加 10% 波浪下前两跨的波压力。波压力分析采用无量纲波压力 $p/(\rho g H_{1\%})$, 其中 p 为试验测得的各测点波压力最大值, 其余符号含义同无量纲波浪总力。图 11 给出了不同方向波浪作用下前两跨结构的最大无量纲波压力, 最大波压力发生位置见表 2。

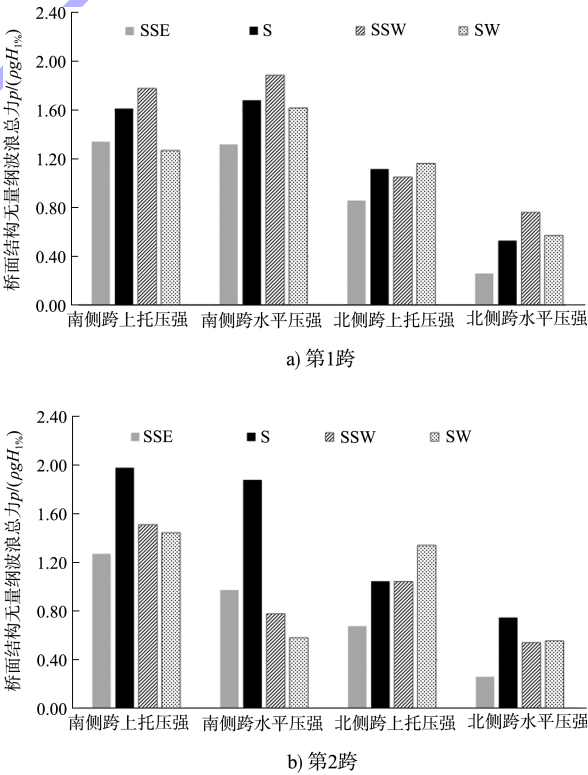


图 11 不同方向波浪作用下桥面箱梁结构的无量纲波压力对比

表 2 上部桥面箱梁结构前两跨最大波压力测点位置

水位/m	波浪要素	波浪方向	位置	最大波压力发生测点位置			
				南侧跨		北侧跨	
				上托压强	水平压强	上托压强	水平压强
4.22	300 a 一遇波高增加 10%	SSE	第 1 跨	15-1 [#]	15-6 [#]	14-10 [#]	15-12 [#]
			第 2 跨	21-1 [#]	21-6 [#]	22-9 [#]	21-12 [#]
		S	第 1 跨	15-1 [#]	15-6 [#]	12-8 [#]	14-12 [#]
			第 2 跨	21-1 [#]	21-6 [#]	22-8 [#]	21-12 [#]
		SSW	第 1 跨	15-1 [#]	14-6 [#]	15-10 [#]	11-12 [#]
			第 2 跨	21-1 [#]	21-6 [#]	22-8 [#]	21-12 [#]
		SW	第 1 跨	11-1 [#]	14-6 [#]	12-8 [#]	11-12 [#]
			第 2 跨	21-2 [#]	21-6 [#]	21-8 [#]	21-12 [#]

注：测点位置编号“11”表示第 1 跨的第 1 条断面，编号 11 行上的 1[#]测点为图 6 测点布置中的 11-1[#]点，以此类推。

1)对于岛桥结合部上部桥面箱梁结构，在本次试验条件下，无量纲上托压强最大为 $2.0p/(\rho gH_{1\%})$ ，无量纲水平压强最大为 $1.9p/(\rho gH_{1\%})$ 。可见，由于岛桥结合部箱梁结构高程变化且结构底面形状不规则，波峰作用时结构不同位置处最大冲击波压力的发生时刻存在显著的相位差，结构无量纲波压力最大值明显大于无量纲波浪总力最大值(波浪总力对应于结构上各点的同步波压力)。

2)相同条件下，南侧跨(迎浪侧)的底面上托压强和侧面水平压强均大于北侧跨(背浪侧)。对于南侧(迎浪侧)桥面箱梁结构，波压力在 S 和 SSW 向波浪作用下的结果相比 SSE 和 SW 向波浪作用时大。对于北侧(背浪侧)桥面箱梁结构受到的波压力，在 SW 向波浪作用时也比较大，主要是由于该方向波浪作用下，波浪与桥梁的斜向夹角变大，南侧跨对波浪的消减作用相对减弱。

3)不同方向波浪作用下，岛桥结合部上部桥面箱梁结构最大波压力主要发生在第 1 跨全段至第 2 跨部分段范围内(该段内箱梁结构底面超高小于 $0.4H_{1\%}$)。一方面该段范围内超高较小，受到的波浪冲击较强；另一方面，该段距离紧靠人工岛护岸，在 S、SSW 向和 SW 向波浪作用下，该段结构受人工岛护岸的波浪反射和波能聚集影响明显。

3 结语

1)采用无量纲波浪总力 $F/(\rho gAH_{1\%})$ 对岛桥结

合部的上部桥面箱梁结构波浪力进行分析。在本次试验条件下，对于单跨箱梁结构(T 形,长度约为 $1/2L$ 、侧面高度约为 $1/30L$ 、底面宽度约为 $1/5L$)，无量纲波浪水平力最大为 $0.7F/(\rho gA_2H_{1\%})$ ，无量纲波浪上托力最大为 $0.2F/(\rho gA_1H_{1\%})$ 。南侧跨(迎浪侧)桥面箱梁结构受到的波浪力整体大于北侧跨(背浪侧)结构的受力，超高较大的第 3 跨结构(平均超高大于 $0.5H_{1\%}$)，所受到的波浪上托力和水平力均明显小于第 2 跨和第 1 跨。岛桥结合部桥面箱梁结构受到的波浪力在 S 和 SSW 向波浪作用下比其他方向波浪作用下大。随着水位抬高、超高变小，岛桥结合部桥面箱梁结构受到的波浪上托力和水平力均变大。岛桥结合部桥面箱梁结构受到的无量纲波浪力 $F/(\rho gAH_{1\%})$ 随着入射波高的增大整体呈增大的趋势。

2)采用无量纲波压力 $p/(\rho gH_{1\%})$ 对岛桥结合部的上部桥面箱梁结构波压力进行分析。在本次试验条件下，无量纲上托压强最大为 $2.0p/(\rho gH_{1\%})$ ，无量纲水平压强最大为 $1.9p/(\rho gH_{1\%})$ ，结构无量纲波压力最大值明显大于无量纲波浪总力最大值。岛桥结合部上部桥面箱梁结构最大波压力主要发生在第 1 跨全段至第 2 跨部分段范围内(该段内箱梁结构底面超高小于 $0.4H_{1\%}$)。

3)需要在跨海桥梁岛桥结合部的桥梁结构设计中核算桥梁上部桥面箱梁结构所受的波浪力对结构安全性的影响。
(下转第 49 页)