

# 随机波浪对浪溅区三维结构物冲击作用试验研究

丁兆强, 任冰\*, 王永学, 任效忠

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 通过物理模型试验研究了随机波浪对位于浪溅区三维结构物的冲击作用. 试验波浪为单向随机波. 试验中波浪分别从正向(波向角  $\beta=0^\circ$ )和斜向( $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ )入射, 入射波波高  $H_{1/3}=7.5\sim 20$  cm, 谱峰周期  $T_p=0.75\sim 2.0$  s, 模型相对净空  $s$  与入射波高  $H_{1/3}$  之比为  $0\sim 0.5$ . 对不同试验组次试验数据的统计分析比较得出: 正向波和斜向波作用于结构物底面的冲击压力特征值, 中部大、周围小; 波浪冲击压力等值线基本上垂直对称分布于波向线两侧; 结构物所受波浪冲击力随入射波波高增大而增大, 对应相对板宽的变化出现 2 个峰值, 在相对净空  $s/H_{1/3}$  为 0.1 和 0.2 时到达最大值.

**关键词:** 随机波浪; 单向波; 波浪冲击; 波向角

**中图分类号:** P753 **文献标志码:** A

## 0 引言

随着 21 世纪我国海洋开发规模的扩大, 越来越多的透空式建筑物如海洋石油平台、岛式码头和开敞式深水大型船舶专业码头在外海深水地区兴建起来, 外海大风浪所产生的极强冲击荷载严重威胁着这些海上建筑物上部结构的安全.

波浪冲击过程的机理十分复杂, 是海岸工程领域至今没有解决的困难课题之一. 目前国内外均局限于二维冲击问题的研究, 如 Wang<sup>[1]</sup> 基于一定的假设条件给出了计算波浪冲击力的方法; Kaplan<sup>[2]</sup> 采用与处理小尺度水平圆柱相近的方法, 给出了作用在水平平板上冲击力的公式. Goda 等<sup>[3~8]</sup> 分别给出了不同试验条件下冲击力的经验公式. 王永学等<sup>[9]</sup> 和 Ren 等<sup>[10]</sup> 利用求解含有自由表面的、二维不可压缩粘性流体非定常运动的流体体积法 (VOF) 建立了求解波浪冲击压力的数学模型. 上述研究均假设波浪正向作用于二维结构物, 对于建筑物位于波浪方向复杂的外海的三维冲击问题, 目前国内外的研究尚无较大进展, 距离采用多向不规则波进行海洋工程设计的发展趋势的要求相差甚远.

为了解波浪对三维结构物冲击问题的特性以

及冲击力在空间上和时间上的分布规律, 本文就单向随机波对位于浪溅区的三维结构物的冲击问题进行试验研究.

## 1 试验设计

试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的海洋环境水槽中进行. 水槽长 50 m, 宽 3 m, 深 1 m. 水槽的一端配有液压伺服不规则波造波机系统, 由微机控制造波与数据采集处理; 末端装有消能装置, 以减小和消除波浪反射的影响. 结构物模型放置在水槽后半部的中间位置, 如图 1 所示.

试验中设计的结构物为一海洋石油平台模型, 其中平台的面板采用有机玻璃制作, 长 60 cm, 宽 60 cm, 厚 2 cm. 平台桩腿共 4 根, 均用直径 2 cm 的钢管制作, 桩腿坡度为 10:1; 桩腿高度设计成可调, 使得平台面板距离静水面的距离  $s$  可以通过升降桩腿高度来调节. 结构物面板边缘距离两边水槽壁的距离为 1.0~1.2 m. 模型底面布置了 16 个压力传感器, 其布置如图 2 所示. 模型底面所受的冲击压力采用天津水运科学研究所生产的 SG-2000 型多点压力测量系统测量, 压

收稿日期: 2006-03-04; 修回日期: 2008-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50409014); 辽宁省自然科学基金资助项目(20041075).

作者简介: 丁兆强(1982-), 男, 博士生; 任冰\*(1972-), 女, 副教授, 博士生导师; 王永学(1955-), 男, 教授, 博士生导师.

力传感器的自振频率为 500 Hz, 采样间隔为 0.004 s.

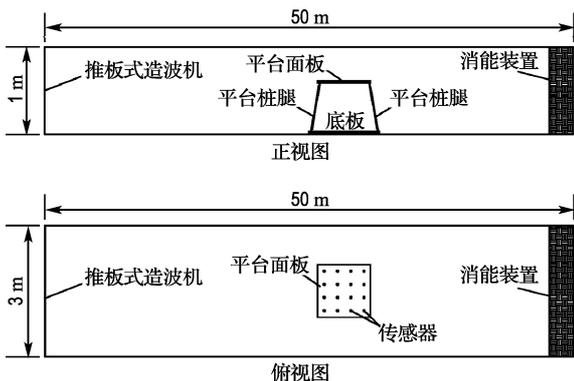


图1 试验设备示意图

Fig.1 Sketch of experimental setup

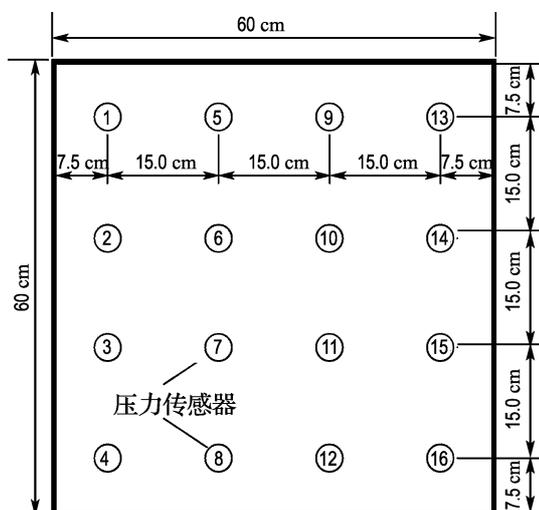


图2 结构物模型底部点压力传感器布置示意图

Fig.2 Sketch of pressure transducers on the surface of the structure model

## 2 试验组次

试验中随机波的目标谱选用改进的 JONSWAP谱, 其表达式为

$$S(f) = \beta_j H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}(T_p f)^{-4}\right] \times \gamma^{\exp[-(f/f_p-1)^2/2\sigma^2]}$$

$$\beta_j = \frac{0.06238}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1} \times [1.094 - 0.01915 \ln \gamma]}$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07; & f \leq f_p \\ 0.09; & f > f_p \end{cases}$$

式中谱参数  $T_p$  是谱峰周期,  $H_{1/3}$  是有效波高, 谱峰升高因子  $\gamma = 3.3$ .

试验中波浪分别正向入射(波浪入射角  $\beta = 0^\circ$ )和斜向入射( $\beta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ),  $\beta$  的定义见图 3. 入射波波高  $H_{1/3}$  分别为 7.5、10.0、12.5、15.0、17.5 和 20.0 cm, 谱峰周期  $T_p$  分别为 0.75、1.0、1.25、1.5、1.75 和 2.0 s, 并由谱峰周期代入线性微幅波理论公式计算出其代表波长, 分别为 0.876、1.512、2.179、2.825、3.447、4.054 m; 由于结构物的板宽  $B$  为 0.6 m, 则结构物的相对板宽  $B/L$  分别为 0.685、0.397、0.275、0.212、0.174、0.148. 结构物底面距静水面的净空  $s$  与入射波高  $H_{1/3}$  之比  $s/H_{1/3}$  分别为 0、0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5. 试验水深  $d$  为 50 cm, 经合理组合后,  $0^\circ$  和  $45^\circ$  波向确定了 168 个组次列于表 1,  $15^\circ$  和  $30^\circ$  波向则对于每个试验波要素选做了相对净空  $s/H_{1/3}$  为 0、0.1 和 0.2 等组次, 每个组次至少重复试验 3 次.

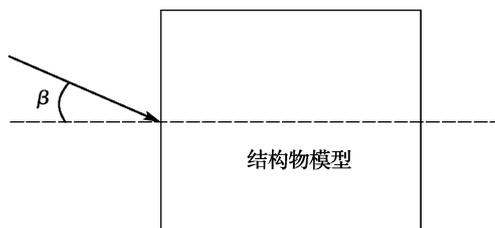


图3 波浪入射角  $\beta$  定义示意图

Fig.3 The definition of wave direction  $\beta$

表1 随机波各波向试验组次

Tab.1 Random wave impact test cases of the different wave directions

$T_p/s$	$H_{1/3}/cm$								
0.75	7.5	1.25	7.5	1.5	7.5	1.75	7.5	2.0	7.5
	7.5		10.0		10.0		10.0		
	10.0		12.5		12.5		12.5		
1.0	12.5	1.5	15.0	1.75	15.0	2.0	15.0	2.0	15.0
	15.0		17.5		17.5		17.5		
	—		—		20.0		20.0		20.0

### 3 试验结果分析

#### 3.1 冲击力历时曲线特性

试验中通过布置在结构物模型底面的 16 个压力传感器,测量了各个方向入射波浪作用下不同试验组次各测点的冲击压力历时曲线.取模型底面  $i$  测点在采样时间内的冲击压力峰值,从大

到小依次排列的前 1/3 个峰值的平均值  $P_{i,1/3}$  作为各测点的冲击压力峰值特征值,其单位为 kPa.

根据每一瞬时模型底面 16 个测点所受的冲击压力和该测点所代表的压力作用面积,积分得到每一瞬时结构物模型底面所受的冲击力.

图4给出了波浪正向和斜向入射时结构物所

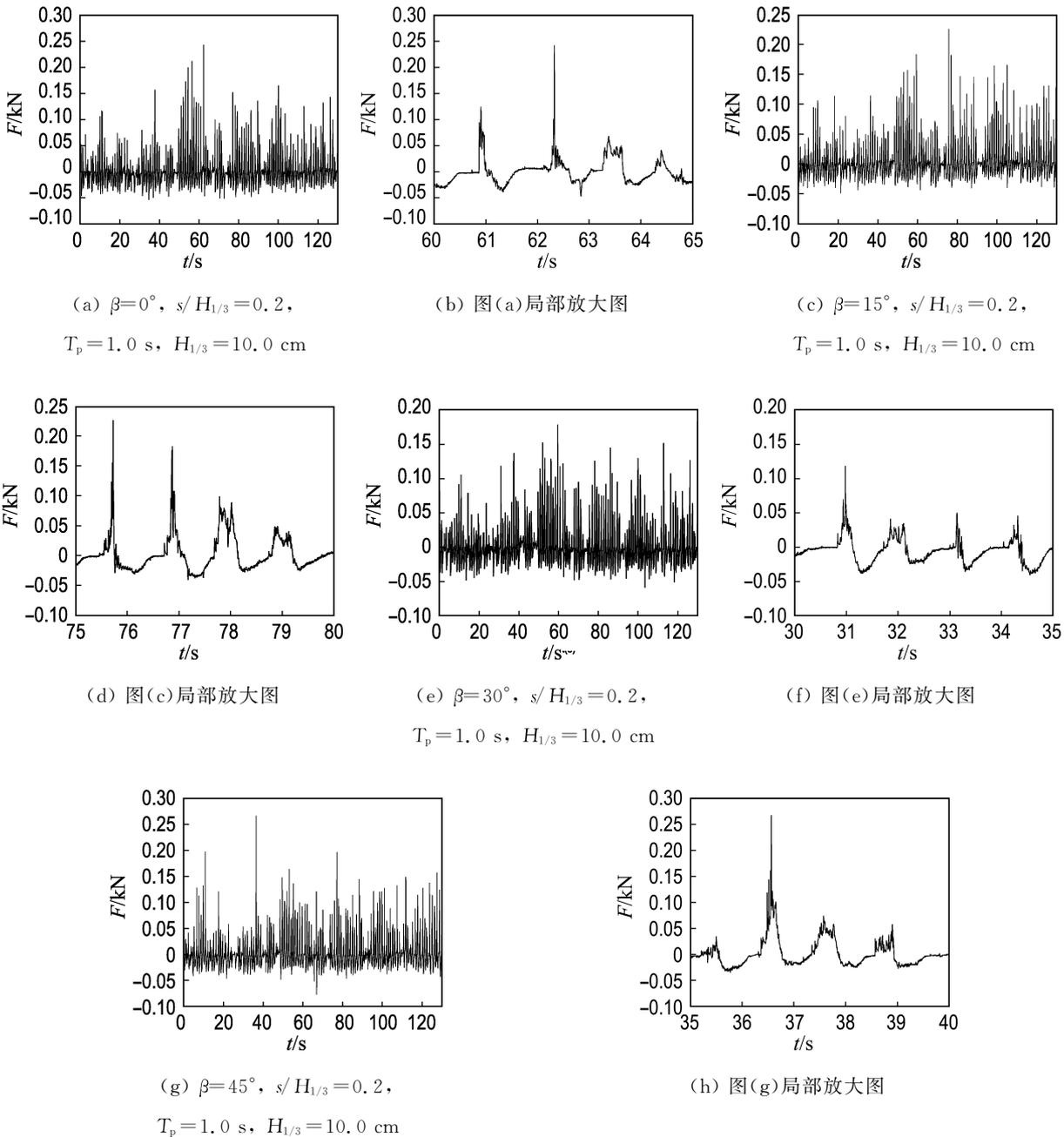


图 4 不同方向波浪作用下结构物所受的波浪冲击力历时曲线

Fig. 4 Time series of the wave impact forces from different wave directions

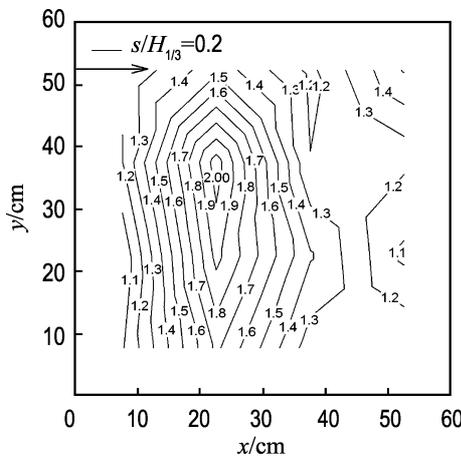
受的冲击力  $F$  历时曲线. 由图 4 可以看出, 结构物所受的冲击力具有明显的周期性, 其周期和入射波周期一致, 且各个周期冲击力的幅值具有随机性. 在一个冲击周期内, 当波浪冲击到结构物上时, 结构物先是受到正向冲击力的作用, 之后在水体脱离结构物时, 受到一个幅值较小的负冲击力作用. 本文取结构物在采样时间内正向冲击力的  $1/3$  作为结构物冲击力的特征值.

### 3.2 冲击压力峰值在结构物底面的分布规律

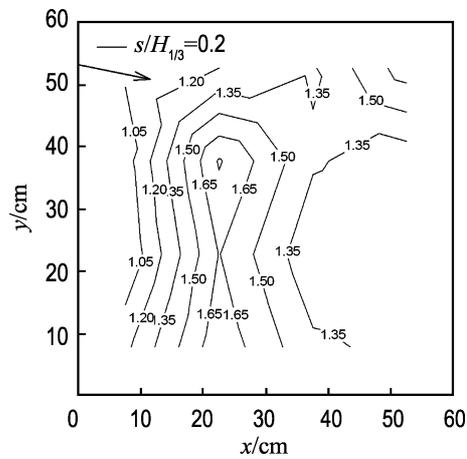
图 5 给出了  $s/H_{1/3}$  为 0.2,  $B/L$  为 0.212, 有

效波高  $H_{1/3}$  为 10 cm 的情况下, 当波浪以不同角度入射时结构物模型底面各点的冲击压力峰值的分布.

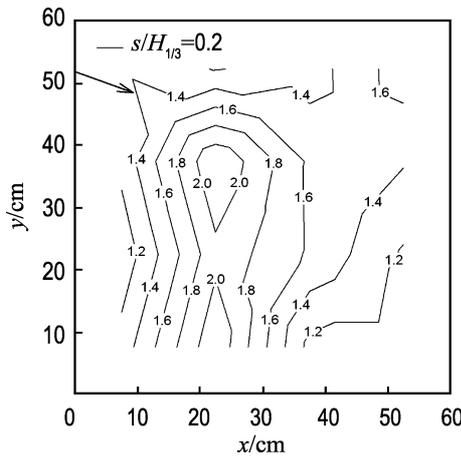
由图 5 可以看出, 与规则波入射的情况类似, 当  $\beta=0^\circ$ , 模型底面的压力等值线基本与波向线垂直; 当  $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  时, 模型底面的压力等值线基本垂直于波向线对称分布. 在各个波向的波浪入射下, 模型底面中间位置的冲击压力峰值明显大于周围位置的冲击压力峰值.



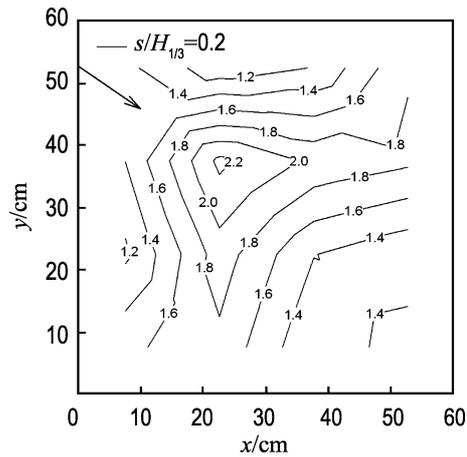
(a)  $\beta=0^\circ, B/L=0.212, H_{1/3}=10\text{ cm}$



(b)  $\beta=15^\circ, B/L=0.212, H_{1/3}=10\text{ cm}$



(c)  $\beta=30^\circ, B/L=0.212, H_{1/3}=10\text{ cm}$



(d)  $\beta=45^\circ, B/L=0.212, H_{1/3}=10\text{ cm}$

图 5 不同方向波浪作用下结构物底面各点冲击压力峰值分布

Fig. 5 The distribution of peak pressures on the underside of the structure at the different wave directions

### 3.3 冲击力与波向角的关系

图 6 给出了当波浪以不同角度入射时, 结构物底面的冲击力与相对板宽的关系。

由图 6 可以看出, 当波浪以不同的方向角入射时, 结构物受到的冲击力也不同, 且当结构物处于不同的净空位置时, 冲击力和入射波方向的关系也不同。当结构物相对净空  $s/H_{1/3}$  为 0 时, 冲击力最大值出现在波向角  $\beta=15^\circ$  时; 当结构物相对

净空  $s/H_{1/3}$  为 0.1 和 0.2 时, 冲击力最大值基本出现在波向角  $\beta=0^\circ$  和  $45^\circ$  时。

### 3.4 冲击力与相对板宽的关系

由图 6 结构物底面的冲击力与相对板宽的关系图可以看出, 波浪冲击力随相对板宽的变化出现两个峰值, 最大峰值出现在相对板宽  $B/L$  为 0.174 时; 次大峰值出现在相对板宽  $B/L$  为 0.275 时。

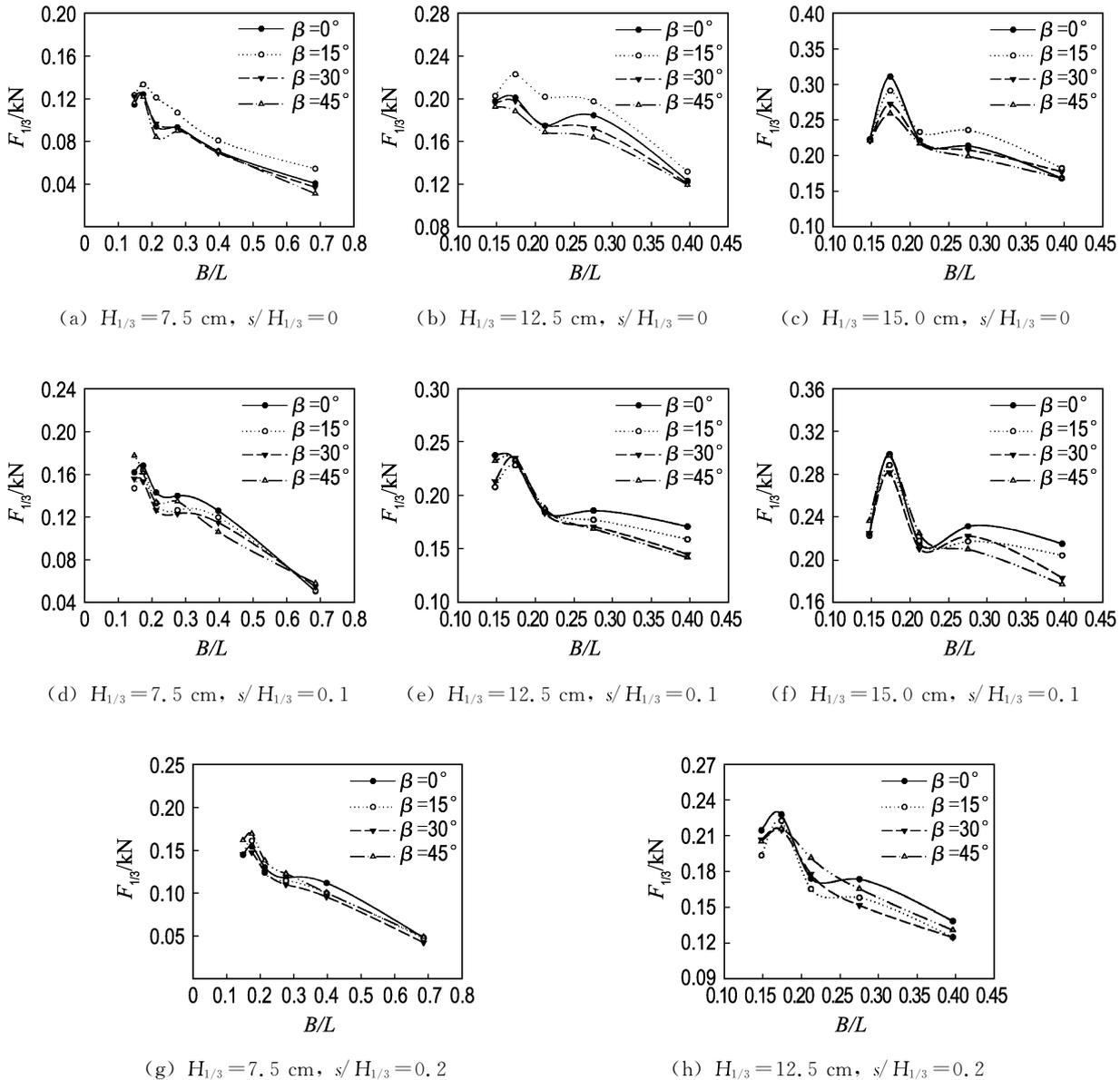


图 6 不同方向波浪作用下结构物所受的冲击力与相对板宽的关系

Fig. 6 Wave impact forces versus the relative structure width for different wave directions

### 3.5 冲击力与波高的关系

图 7 给出了相对板宽  $B/L$  为 0.397 和 0.212 的情况下,当波浪以不同角度入射时结构物所受的冲击力与入射波有效波高的关系。

由图 7 结构物所受的冲击力与入射波有效波高的关系图可以看出,在入射波有效波高从 7.5 cm 到 20 cm 的变化范围内,大多数试验组次三维结构物所受的冲击力均随入射波有效波高的增大而增大。

### 3.6 冲击力与相对净空的关系

图 8 给出了波向角  $\beta$  为  $0^\circ$  和  $45^\circ$  时,结构物底部所受的冲击力与相对净空的关系。

由图 8 结构物所受的冲击力与相对净空的关系图可以看出,结构物所受的最大冲击力在个别试验组次发生在相对净空  $s/H_{1/3}$  为 0.2 时,对大多数试验组次,结构物所受的最大冲击力发生在相对净空  $s/H_{1/3}$  为 0.1 时。

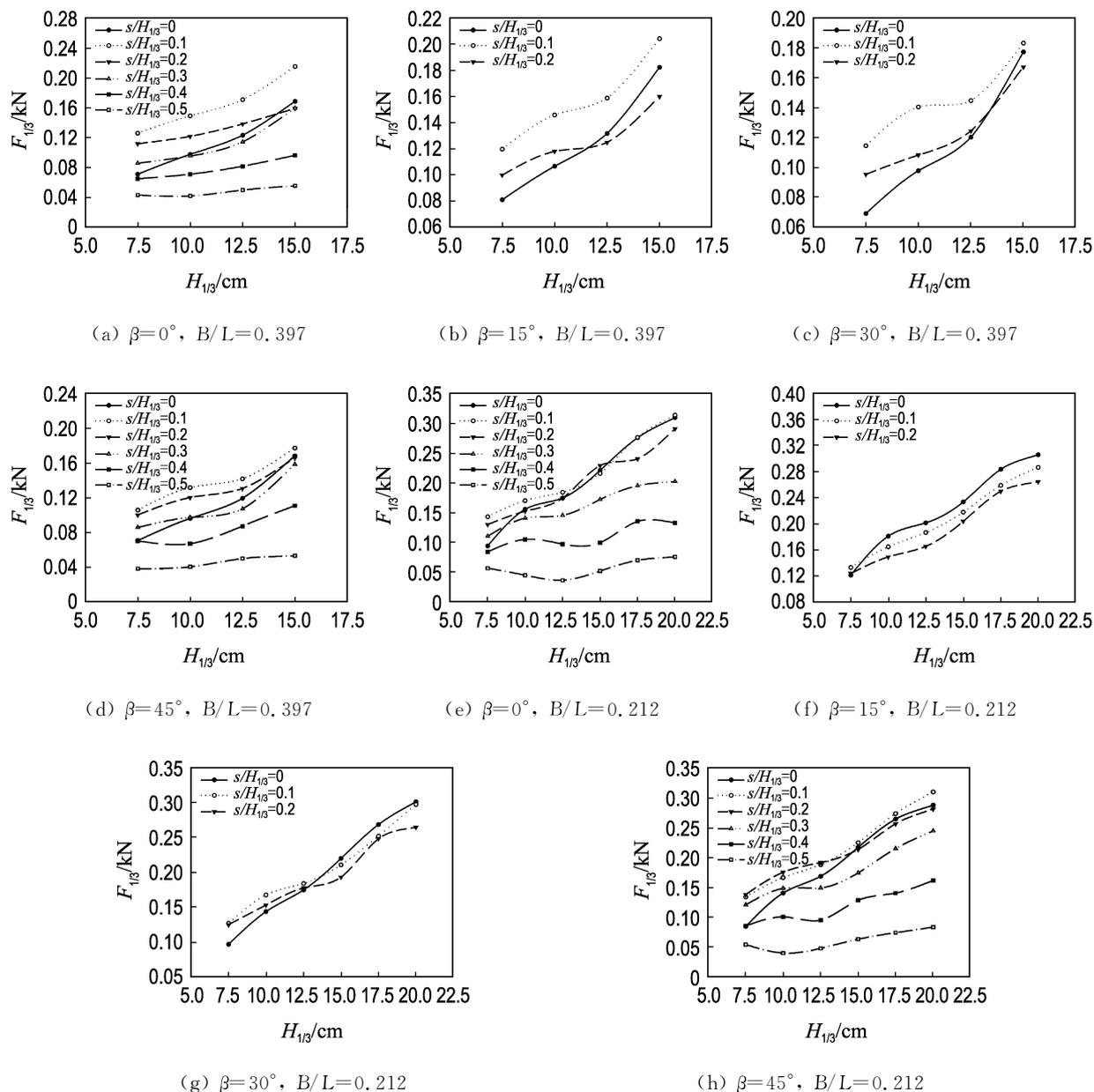


图 7 不同方向波浪作用下结构物所受的冲击力与波高关系

Fig. 7 The wave impact forces versus the significant wave height at the different wave directions

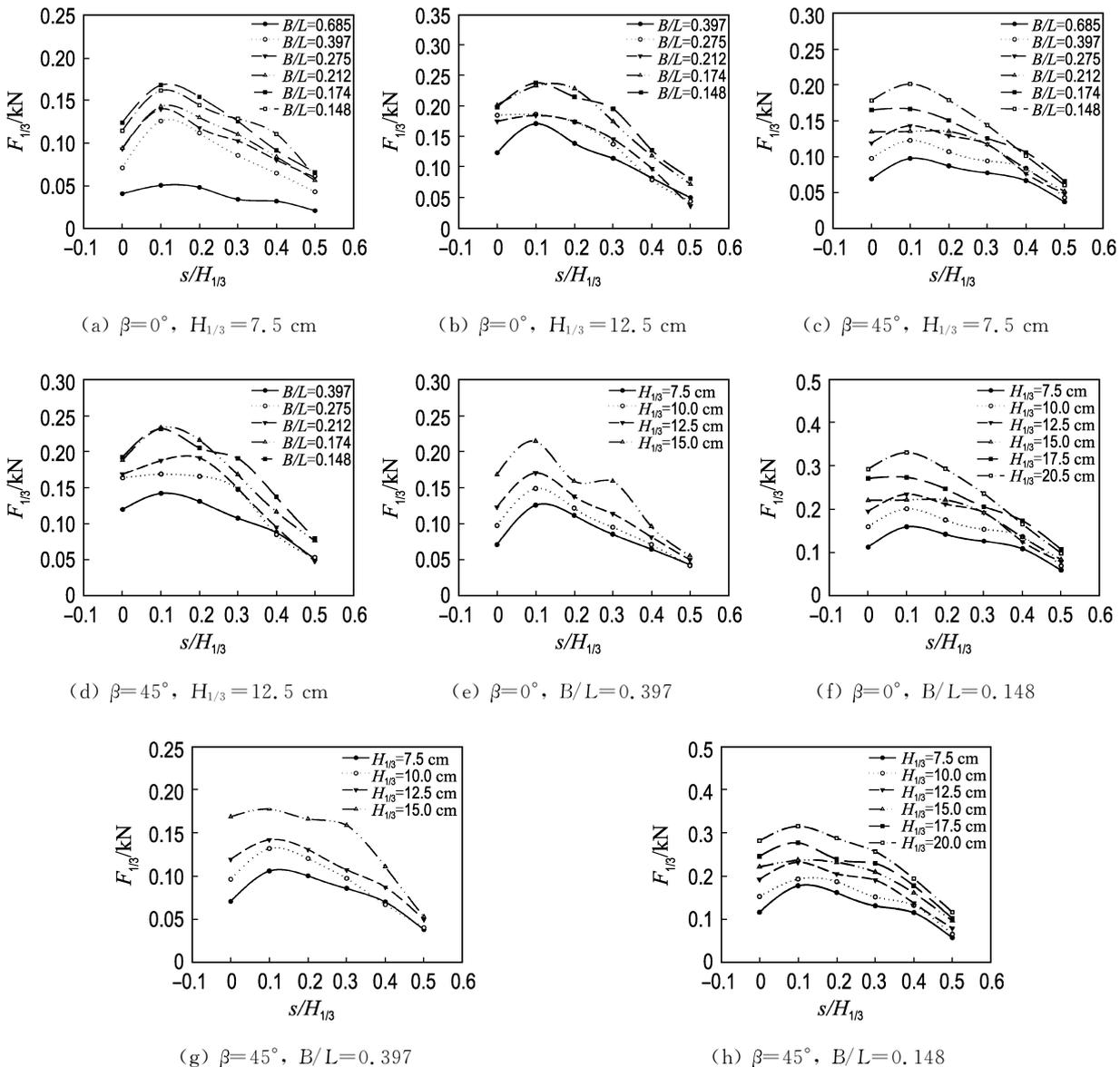


图8 不同方向波浪作用下结构物所受的冲击力与相对净空关系

Fig.8 The wave impact forces versus the relative clearance at the different wave directions

### 4 结论

(1)波向角  $\beta$  对模型底面各点的冲击压力分布影响较大,  $\beta=0^\circ$  时模型底面的压力等值线基本与波向线垂直, 当  $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  时, 模型底面的压力等值线基本对称于波向线分布. 在各个波向的波浪入射作用下, 模型底面中间位置的冲击压力峰值明显大于周围位置的冲击压力峰值.

(2)波浪冲击力随结构物相对板宽变化出现两个峰值, 最大峰值出现在相对板宽  $B/L$  为

0.174时, 次大峰值出现在相对板宽  $B/L$  为 0.275 时.

(3)当结构物相对净空  $s/H_{1/3}$  为 0 时, 冲击力最大值出现在波向角  $\beta=15^\circ$  时; 当结构物相对净空  $s/H_{1/3}$  为 0.1 和 0.2 时, 冲击力最大值基本出现在  $\beta=0^\circ$  和  $45^\circ$  时.

(4)结构物所受的冲击力随入射波高的增大变化的基本趋势是增大的, 但有个别试验组次不符合此规律.

(5)结构物所受的冲击力与相对净空的关系

表明,随机波作用下结构物所受的最大冲击力基本发生在相对净空为 0.1 和 0.2 时。

### 参考文献:

- [1] WANG H. Water wave pressure on horizontal plates [J]. **Proceedings of ASCE**, 1970, **96**(HY10): 1997-2017
- [2] KAPLAN P. Wave impact force on offshore structures: re-examination and new interpretations [C] // **Offshore Technology Conference**. Houston: [s n], 1992:79-86
- [3] GODA Y. A comparative review on the functional forms of directional wave spectrum [J]. **Coastal Engineering**, 1999, **41**(1):1-20
- [4] ELGHAMRY O A. Uplift forces on platform decks [C] // **Proceeding of Offshore Technology Conference OTC 1381**. Dallas:OTC, 1971:537-548
- [5] 过 达,蔡保华. 透空式建筑物面板上波浪上托力的计算[J]. 河海大学学报, 1980, **1**(1):14-33
- [6] WANG Yong-xue, LIU Meng-zhe, REN Bing. Experimental study of wave slamming [C] // **OMAE'98**. Lisbon:OMAE, 1998:OMAE98-0403
- [7] 任 冰,王永学. 不规则波对浪溅区结构物冲击作用的试验研究——频域分析[J]. 海洋工程, 2003, **21**(4):53-60
- [8] 周益人,陈国平,黄海龙,等. 透空式水平板波浪上托力冲击压强试验研究[J]. 海洋工程, 2004, **22**(3): 30-40
- [9] 王永学,任 冰. 波浪冲击过程的湍流数值模拟[J]. 水动力学研究与进展:A辑, 1999, **14**(4):409-417
- [10] REN Bing, WANG Yong-xue. Numerical simulation of random wave slamming on the structure in the splash zone [J]. **Ocean Engineering**, 2004, **31**(5-6):547-560

## Experimental research on random wave impact on three-dimensional structure in splash zone

DING Zhao-qiang, REN Bing\*, WANG Yong-xue, REN Xiao-zhong

( State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** The experimental investigation of random wave slamming on the three-dimensional structure in the splash zone is conducted by physical model test. The test wave is unidirectional and irregular wave. The experiments are carried out with perpendicular random waves ( $\beta = 0^\circ$ ) and oblique random waves ( $\beta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ), the significant wave heights  $H_{1/3}$  ranging from 7.5 cm to 20 cm, the peak wave periods  $T_p$  ranging from 0.75 s to 2.0 s, and the relative clearance of the model with respect to the significant wave height ranging from 0 to 0.5. The statistical analysis results of different test cases are: The statistical distribution characteristics of the oblique, perpendicular and irregular waves indicate that the impact pressures in the center part of the structure are obviously greater than that on the surrounding part. The isoline of the peak pressures is perpendicular to the wave ray and has a symmetrical distribution. The significant peak impact force increases with an increase of the significant wave height, and has two peak values versus different relative structure width, and the significant peak impact force reaches the maximum value at  $s/H_{1/3} = 0.1$  and 0.2.

**Key words:** random wave; oblique wave; wave impact; wave direction