

规则波对水平板冲击作用试验研究

孙家文^{1,2,3}, 梁书秀^{*1}, 孙昭晨¹

(1. 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;

2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023;

3. 国家海洋局 海域管理政策与技术重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 波浪对透空式海上建筑物的冲击作用已经成为影响此类建筑物安全的重要因素. 进行了单向规则波对方形水平板冲击作用水槽试验研究. 总计进行了4个方向(0° , 垂向规则波; 15° , 30° , 45° , 斜向规则波), 入射波高 $H=7.5\sim 20.0$ cm, 增量 2.5 cm, 周期 $T=1.0\sim 2.0$ s, 增量 0.2 s, 水平板底面距离静水面的高度 Δh 与 H 的比值 $0\sim 0.5$, 增量 0.1 的试验研究. 采用小波分析方法去除了由于测压传感器振荡引起的测量数据的噪音信号. 讨论了上托力与相对入射波高 H/d 、相对板宽 B/L 、相对净空 $\Delta h/H$ 的关系.

关键词: 波浪冲击; 规则波; 方形水平板

中图分类号: P753 **文献标志码:** A

0 引言

随着近岸深水资源的高强度开发及船舶大型化的发展, 适于大型船舶停靠的深水岸线资源已开发殆尽, 离岸深水资源开发成为一种必然的趋势. 为适应外海环境条件, 新型建筑物一般设计成透空式, 而透空式结构极易受到波浪的冲击荷载而造成结构失稳或局部破坏.

有关透空式结构的波浪冲击荷载问题越来越引起研究人员及工程设计者的关注, 研究成果也较丰富. 如: Wang^[1]对水平板上的波浪力及其分布进行了分析, 并给出了波压力计算方法; 谷本胜利等^[2]对水平板底部上托力进行了理论推导, 首次考虑了水体空气层的影响; Kaplan 等^[3-4]、Baarholm 等^[5-6]亦通过引入边界条件对波浪作用下的水平板上托力进行了理论推导; 除理论推导外, 各国学者(合田良实^[7]、过达等^[8]、Wang 等^[9]、Ren 等^[10-11]、周益人等^[12])亦采用物理模型试验的方法, 针对特定的透空式结构形式, 总结出相应的波浪冲击压力或波浪上托力的计算方法. 波浪冲击涉及波浪的强非线性、湍流、黏性、水汽掺混及波浪与水平板的相互作用等, 其作用机理

十分复杂, 现有的研究成果对其作用机理的分析还不十分明确, 因此有必要进一步开展波浪冲击问题的相关研究.

本文对规则波作用下长宽比为1的方形水平板的受力进行系统的分析, 探讨相对入射波高 H/d 、相对净空 $\Delta h/H$ 、相对板宽 B/L 对方形水平板受力的影响规律.

1 试验设计

本次试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室非线性波浪水槽中进行, 水槽尺寸为 $60\text{ m}\times 4.0\text{ m}\times 2.8\text{ m}$; 水平板模型采用有机玻璃制作, 尺寸为 $75\text{ cm}\times 75\text{ cm}\times 1.5\text{ cm}$, 放置在水槽的中部(见图1); 水平板上均匀布置25个压力传感器(见图2), 压力数据采集频率选择1 000 Hz(以往的研究表明此采样频率已能满足冲击压力的测量要求).

本次试验水深为0.8 m, 考虑4种波浪入射角度($\beta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)、6种相对净空 $\Delta h/H$ (水平板底面距离静水面的高度 Δh 与入射波高 H 的比值) $0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ 和 0.5 . 试验入射波条件见表1.

收稿日期: 2011-10-05; 修回日期: 2012-12-20.

基金项目: “八六三”国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA11Z130); 国家创新研究群体科学基金资助项目(5092100).

作者简介: 孙家文(1983-), 男, 博士, 助理研究员, E-mail: sunjw84@126.com; 梁书秀*(1972-), 女, 副教授, E-mail: sxliang@dlut.edu.cn.

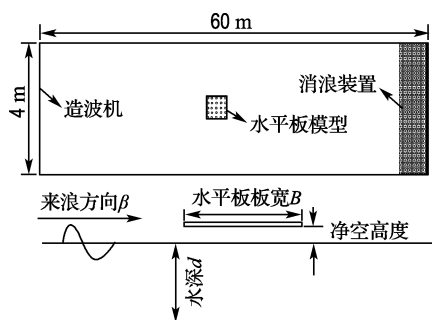


图1 模型试验布置示意图

Fig. 1 Sketch of experimental setup

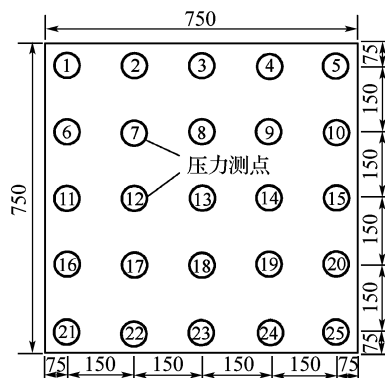


图2 水平板模型底部点压力传感器布置示意图(单位:mm)

Fig. 2 Sketch of pressure transducers on the surface of the deck model (unit: mm)

表1 实验中波浪参数

Tab. 1 Wave parameters in experiment

T/s	B/L	H/cm					
1.0	0.482	7.5	10.0	12.5			
1.2	0.341	7.5	10.0	12.5	15.0		
1.4	0.261	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	
1.6	0.211	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
1.8	0.178	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
2.0	0.155	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0

2 试验数据分析

2.1 压力数据分析的小波分析法

图3为压力传感器记录的典型冲击压力过程线。由过程线可以看出:压力过程线由冲击压力及动水压力两部分组成,其中冲击压力一般出现在波浪与水平板接触的瞬间,较动水压力大得多。图中细实线为压力的采集值,可以看出数据存在振荡,此种振荡一般是由于波浪作用于水平板时引起传感器的运动响应而产生的。在数据分析时,采用小波滤波与信号重构方法对采集的压力数据进行了处理,详细的处理方法及过程见文献[13]。

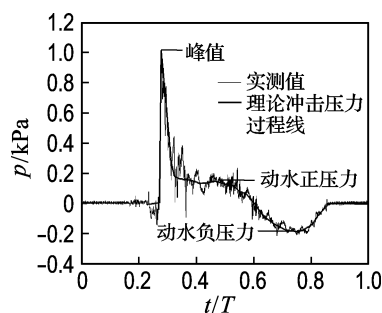


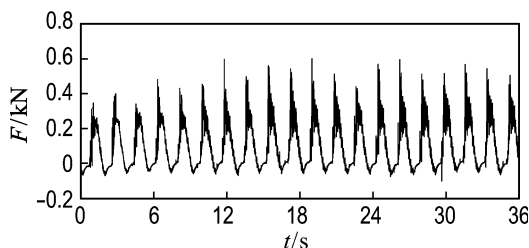
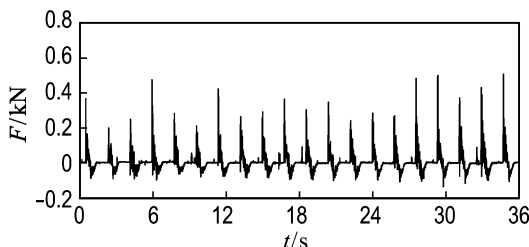
图3 冲击压力过程线

Fig. 3 Impact pressure time history curves

2.2 水平板上托力过程线

本次试验水平板模型为尺寸75 cm×75 cm×1.5 cm的有机玻璃板模型,受试验条件的限制,单纯用总力传感器测量上托力,水平板难以固定,上托力为采用点压力积分方式得到。具体的积分过程为采用25个压力传感器瞬时的压力值和该测点所代表的压力的作用面积,积分得到每一瞬时水平板上托力。以往的试验表明^[14],通过积分得到平板底面的上托力与总力传感器直接测量得到的上托力其变化规律相同,且二者上托力峰值一致。

图4为规则波作用条件下水平板上托力过程线。净空高度一定时,各个周期内上托力的类型相似;平板的净空高度较小时,动水压力较大,与冲击压力界限较分明;平板的净空高度较大时,动水压力过程不太明显,上托力变化以冲击压力为主。

(a) $H=17.5$ cm, $T=2.0$ s, $\Delta h/H=0$ (b) $H=17.5$ cm, $T=2.0$ s, $\Delta h/H=0.4$ 图4 规则波作用下水平板上托力的时间过程线
Fig. 4 Time series of regular wave uplift force on horizontal deck

3 水平板上托力影响因素分析

以往研究表明,水平板上托力与入射波高 H 、水平板的相对宽度 B/L 及相对净空 $\Delta h/H$ 密切相关。

为进一步分析上述各因素(除入射波高 H)与水平板上托力的关系,均采用量纲分析法(量纲一参数选择为 $\rho g H A$)分析,其中 ρ 为水体的密度(kg/m^3), g 为重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), H 为入射波高(m), A 为最大上托力发生时刻波浪作用在平板的底面积(m^2), L 为入射波波长(m)。

上述参数中唯一难以确定的是最大上托力发生时刻波浪作用在水平板上的面积 A 。分析可知入射波波长及水平板底面与波面的相对位置均会影响波浪作用于水平板底面的分布宽度,因此分布宽度应与波浪和水平板的接触宽度有关。在本次试验中,大部分试验组次最大上托力发生时水平板底面均布压强分布宽度为波浪与水平板接触宽度的 $0.35 \sim 0.60$ 。结合波浪作用下水平板底面均布压强分布宽度的相关研究^[14],本文数据分析中采用周益人等给出的上托力最大时均布压强的分布宽度大体等于波浪与水平板接触宽度的 $1/2$ 的结论。通过对试验数据的处理分析发现,上托力最大时均布型压力分布出现在相对净空 $\Delta h/H \leq 0.3$,这与相关文献给出的结论是相同的。对于 $\Delta h/H > 0.3$ 的情况,上托力以冲击型为主,而本次试验中,在波浪传播方向布置的压力监测点较少,并不能真实反映局部冲击压强的分布宽度,对于这种局部冲击压强的分布宽度取值亦借鉴文献^[14]中的结论:局部冲击型压强分布宽度与波浪和水平板的接触宽度成正比,分布宽度为波浪与水平板接触宽度的 $1/10$ 。

3.1 入射波高对上托力的影响

图5为相同相对板宽 B/L 、不同相对净空

$\Delta h/H$ 、不同角度入射波条件下水平板上托力与入射波波高的关系。图中横坐标为相对入射波高 H/d ,纵坐标为水平板上托力 F 。

由图5可知,在本次入射波高范围内,水平板上托力随着波高的增大而增大(仅有个别组次数据不符合此规律)。

3.2 相对净空对上托力的影响

图6为水平板上托力 $F/\rho g H A$ 随相对净空 $\Delta h/H$ 的变化关系。由图可以看出:水平板上托力峰值不会出现在固定的净空高度处,而出现在 $\Delta h/H = 0 \sim 0.3$;普遍规律为净空高度达到某一位置时,上托力达到最大值,而后随着净空高度的进一步增大,上托力反而减小。分析现象产生的原因在于,净空高度越小时,波浪的垂向速度越大,自然水平板上托力较大,但净空高度越小水平板下封闭的气体越多,气体垫层对冲击的缓冲作用越大,因此,水平板上托力峰值不会出现在固定的净空高度处。

但当 $\Delta h/H > 0.3$ 时,水平板底面气体垫层的影响越来越小,上托力主要受波浪垂向冲击速度控制;同时,此时上托力分布应对应局部冲击型分布,虽然此时冲击压强较大,但冲击压强作用的面积较小,因此对应的上托力较小。

3.3 相对板宽对冲击力的影响

图7为不同入射角度条件下,水平板上托力 $F/\rho g H A$ 随水平板相对宽度 B/L 的变化关系。

由图可以看出:水平板上托力随着相对板宽的增大会出现2个峰值,第1个峰值出现在相对板宽 $B/L = 0.178$ 时,第2个峰值出现在相对板宽 $B/L = 0.261$ 时,这与文献^[15]中给出的规则波实验条件下二维水平板的试验结论是类似的。

相对板宽较小时,波浪可以作用在整个水平板上,水平板的面积越大,相应的上托力越大;相对板宽较大时,水平板的宽度大于上托力最大值

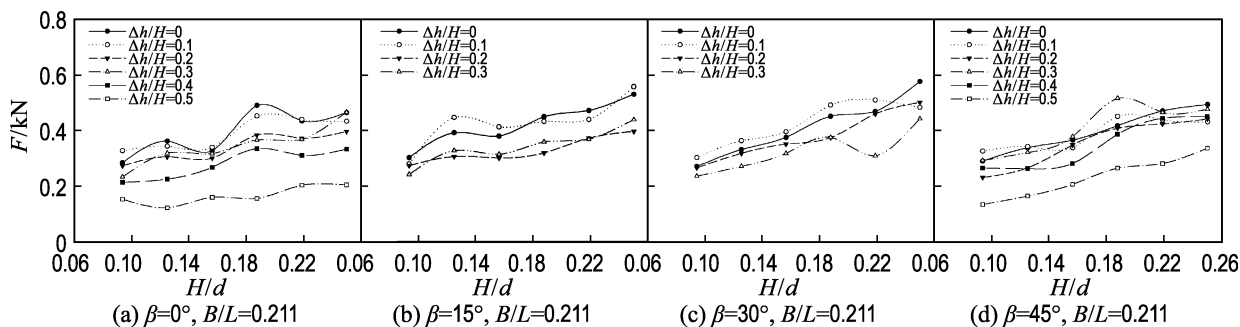


图5 不同方向规则波作用下水平板底面上托力与波高关系

Fig. 5 The regular wave uplift forces versus the relative wave height from the different wave directions

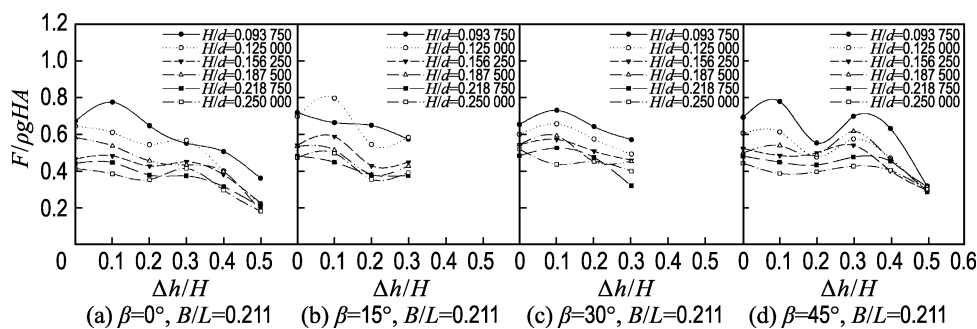


图6 不同方向规则波作用下水平板上托力与相对净空关系

Fig. 6 The regular wave uplift forces versus the relative clearance from the different wave directions

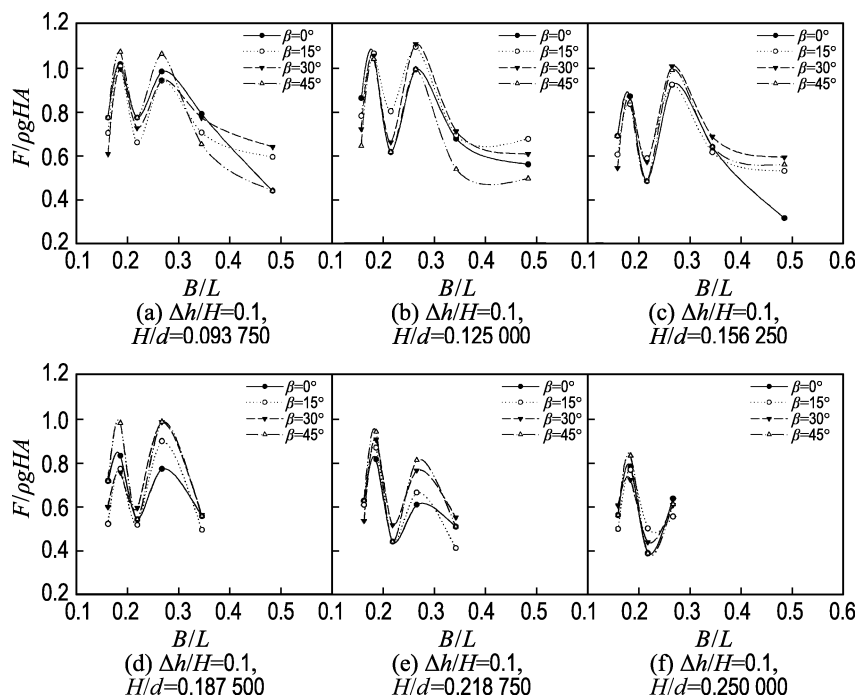


图7 不同方向规则波作用下水平板上托力与相对板宽的关系

Fig. 7 The regular wave uplift forces versus the relative deck width from different wave directions

发生时波浪作用于水平板上的宽度,此时水平板不仅要受到向上的上托力作用,而且还会受到负压作用,水平板的相对总上托力会减小。

由于本次试验相对板宽 B/L 仅在 0.155~0.482,对板宽进一步增大情况没有作进一步的分析。

4 结 论

(1)规则波作用下,各周期上托力的类型相似;净空高度较小时,动水压力较大,与冲击压力界限较分明;净空高度较大时,上托力变化以冲击压力为主。

(2)在本次试验入射波高范围内,水平板上托力随着波高的增大而增大(仅有个别组次数据不符合此规律)。

(3)水平板上托力峰值不会出现在固定的净空高度处,而是出现在相对净空 $\Delta h/H$ 为 0~0.3 处。

(4)水平板上托力随着相对板宽的增大会出现 2 个峰值,第 1 个峰值出现在相对板宽 $B/L=0.178$ 处,第 2 个峰值出现在相对板宽 $B/L=0.261$ 处。

参考文献:

- [1] Wang Hsiang. Water wave pressure on horizontal plate [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1970, **96**(10):1997-2017.
- [2] 谷本胜利,高桥重雄,泉田芳和. 水平版に働く揚圧力に関する研究[R] // 港湾技术研究所报告, 017-02-1. 横须贺: 港湾技术研究所, 1978: 3-46. (in Japanese)
- [3] Kaplan P. Wave impact force on offshore structures: re-examination and new interpretations [C] // *Offshore Technology Conference*. Houston: [s n], 1992: 79-86.

- [4] Kaplan P, Murray J J, YU W C. Theoretical analysis of wave impact forces on platform deck structures [C] // **OMAE 95**. Copenhagen:OMAE, 1995:189-198.
- [5] Baarholm R. Theoretical and experimental studies of wave impact underneath decks of offshore platforms [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2001.
- [6] Baarholm R, Stansberg C T. Extreme vertical wave impact on the deck of a gravity-based structure (GBS) platform [C] // **Rogue Waves 2004**. Brest: French Research Institute for Exploitation of the Sea, Plouzaue, France (1985-2004) (Revue), 2004:1-14.
- [7] 合田良実. 構造物に衝く波力, 1967年度水工学に関する夏期研休会講義集[C] // 海岸港湾コース. 東京:海岸工程学会, 1967. (in Japanese)
- [8] 过达, 蔡保华. 透空式建筑物面板上波浪上托力的计算[J]. 华东水利学院学报, 1980(1):14-33. GUO Da, CAI Bao-hua. Calculation methods of uplift forces of waves on open-piled structures [J]. **Journal of East China College of Hydraulic Engineering**, 1980(1):14-33. (in Chinese)
- [9] WANG Yong-xue, REN Bing. Experimental study of irregular wave slamming [C] // **Proceedings of the Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference**. Kitakyushu:ISOPE, 2002: 492-495.
- [10] REN Bing, WANG Yong-xue. Laboratory study of random wave slamming on a piled wharf with different shore connecting structures [J]. **Coastal Engineering**, 2005, **52**:463-471.
- [11] 任冰, 王永学. 不规则波对透空式建筑物上部结构冲击作用时域分析[J]. 大连理工大学学报, 2003, **43**(6):818-824. REN Bing, WANG Yong-xue. Time-domain analysis of irregular wave slamming on subface of open-piled structures [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2003, **43**(6):818-824. (in Chinese)
- [12] 周益人, 陈国平, 王登婷, 等. 透空式水平板波浪上托力计算方法[J]. 海洋工程, 2004, **22**(2):26-30. ZHOU Yi-ren, CHEN Guo-ping, WANG Deng-ting, *et al.* Calculation methods of uplift forces of waves on a horizontal plate [J]. **The Ocean Engineering**, 2004, **22**(2):26-30. (in Chinese)
- [13] 孙家文, 孙昭晨, 梁书秀, 等. 随机波对水平板冲击作用的实验研究[J]. 海洋工程, 2010, **28**(4):46-53. SUN Jia-wen, SUN Zhao-chen, LIANG Shu-xiu, *et al.* Experimental study of random wave impact on a horizontal plate [J]. **The Ocean Engineering**, 2010, **28**(4):46-53. (in Chinese)
- [14] 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. ZHOU Yi-ren, CHEN Guo-ping, HUANG Hai-long, *et al.* An experimental study on uplift impact pressure of waves on a horizontal plate of an open wharf [J]. **The Ocean Engineering**, 2004, **22**(3): 30-40. (in Chinese)
- [15] 孟艳秋, 陈国平, 严士常. 离岸式高桩码头面板上托力试验及分析[J]. 解放军理工大学学报, 2010, **11**(1):72-78. MENG Yan-qiu, CHEN Guo-ping, YAN Shi-chang. Wave-in-deck uplift force on detached high-piled wharf [J]. **Journal of PLA University of Science and Technology**, 2010, **11**(1):72-78. (in Chinese)

Experimental study of regular wave impact on a horizontal plate

SUN Jia-wen^{1,2,3}, LIANG Shu-xiu^{*1}, SUN Zhao-chen¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China;

3. Key Laboratory of Sea-Area Management Technology, SOA, Dalian 116023, China)

Abstract: The impact of wave on open marine buildings is of significance for safety of these buildings. The test wave is unidirectional and regular wave. The experiments are carried out with perpendicular regular waves ($\beta=0^\circ$) and oblique regular waves ($\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$), the wave heights H ranging from 7.5 cm to 20.0 cm with 2.5 cm increment, the wave periods T ranging from 1.0 s to 2.0 s with 0.2 s increment, and the clearance of the model with respect to the wave height $\Delta h/H$ ranging from 0 to 0.5 with 0.1 increment. Wave impact pressures are obtained by using wavelet analysis to remove noise signals from the dynamic responses of the instruments. The influence of different incident wave parameters, including the relative incident wave height H/d , the relative plate width B/L and the relative clearance $\Delta h/H$ on the wave uplift forces, is discussed.

Key words: wave impact; regular wave; square horizontal plate