

波浪对弹性支撑结构物冲击作用试验研究

孙见锋, 任冰*, 宋子路, 王永学

(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: 位于浪溅区的弹性结构物的上部结构可能会受到幅值很大、历时较短的波浪冲击荷载. 高强度的瞬时冲击荷载作用以及由它引起的结构振动响应往往是导致结构损坏的主要原因. 通过物理模型试验, 研究了波浪对弹性支撑平板结构的冲击作用. 试验中设计了3种不同支撑刚度的结构物模型, 对结构物底面所受的波浪冲击压力和结构物振动加速度响应进行了同步观测. 分析了支撑刚度对冲击压力和结构振动的影响, 以及结构物所受的波浪冲击压力与对应时段振动加速度之间的关系. 试验结果表明, 结构物支撑刚度越大, 其所受的冲击压力也越大, 对应时段的振动加速度幅值也越大.

关键词: 波浪冲击; 弹性支撑; 结构振动; 物理模型试验

中图分类号: TB122

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201402011

0 引言

波浪冲击(又说砰击)是波浪与结构物之间发生的强烈冲击碰撞现象, 涉及固、气、液三相介质之间的复杂耦合作用. 最为常见的冲击现象是波浪对海洋平台上部结构和海上漂浮建筑物的冲击作用, 以及船舶在水中航行时船舶艏尾所受到的波浪冲击. 严重的波浪冲击会造成结构物局部破坏或整体失稳, 对于诸如导管架海洋平台等弹性支撑的结构体系, 其在波浪冲击作用下发生的振动和变形, 也是引起结构物破坏的主要原因.

波浪对于海上结构物冲击作用的研究始于20世纪60年代. 对于小尺度构件, 工程中通常采用类Morison方程来计算冲击力, 冲击系数 C_s 的理论值等于 π ^[1]. 由于冲击过程具有很强的随机性, 由实验确定的冲击系数离散性很大, C_s 为3.2~6.4^[2-4]. 对于大尺度结构, Wang^[5]基于动量定理给出了计算色散波冲击压力的公式; Kaplan^[6]将其对小尺度水平圆柱的处理方法推广到平台结构的冲击问题, 基于势流理论给出了计算竖直冲击力的表达式. 上述理论研究成果假定流体无黏和无旋流动, 对于涉及液面破碎和砰击的复杂流动的冲击问题, 需借助物理模型试验和数值模拟的

手段来解决. 有研究通过系列物理模型试验方法给出了波浪冲击力的经验公式^[7-9]. 近些年来, 随着计算流体力学的发展, 基于VOF方法的有限差分法^[10]和SPH方法^[11]亦被用于模拟波浪对结构物的冲击作用.

上述研究均假定结构物为刚体, 这种简化假设对于小尺度结构物是合理的. 对于刚度相对较小的大尺度结构物, 除了结构物的动力响应需要考虑之外, 由于结构物在波浪冲击荷载作用下所产生的振动和弹性变形往往会引起结构物底面的水体表面形状和冲击压力等发生变化, 此时, 在弹性结构体系的波浪冲击问题研究中, 水弹性的影响已经不能忽略.

关于水弹性冲击问题, 目前已有的研究成果基本上是针对弹性船体的入水冲击问题. 典型的如: Faltinsen等^[12]基于Wagner理论应用梁模型给出了弹性板入水冲击的弯曲应力的解析解; Sumi等^[13]通过试验研究了近似平板的小倾角弹性板的入水冲击作用; Tanizawa^[14]应用边界元方法对二维弹性梁的匀速入水冲击问题进行了时域模拟. 海洋结构物的水弹性冲击问题与弹性船体结构的入水冲击问题有着明显的不同. 例如, 对导管架海洋平台来说其上部结构的刚度较大, 可视

为刚体,而其支撑柱腿的刚度则较小,应视为弹性支撑. Sulisz 等^[15] 据此开展了波浪对弹性支撑的刚性平板冲击作用的物理模型试验研究,得到了一个冲击周期中冲击压力和结构振动在 4 个不同阶段的特征. 目前关于弹性支撑的透空式结构物的波浪冲击作用研究还很少,缺乏基础性的试验数据和水弹性对冲击压力影响的研究,距离问题的解决和实际工程应用还相差甚远.

本文在实验室波浪水槽内开展波浪对弹性支撑的透空式水平板冲击作用的物理模型试验研究,通过对同步采集得到的波浪冲击压力和振动加速

度历时曲线的结果分析,讨论支撑刚度对冲击压力和振动加速度变化特性的影响,以及在不同时段结构物冲击压力和相对应的振动加速度的变化关系.

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波浪水槽中进行. 水槽长 22 m,宽 0.8 m,高 0.8 m. 水槽的一端为液压伺服式不规则造波机,造波机采用微机控制并且配有数据采集系统. 水槽的另一端设置有消能装置,用来减弱波浪的反射影响,结构物模型放置在水槽的中后部,如图 1 所示.

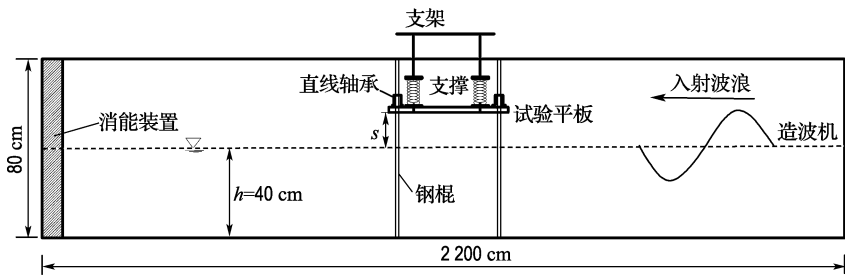


图 1 试验水槽布置
Fig. 1 Arrangement of experiment tank

结构物模型设计为弹性支撑的水平板结构. 水平板采用有机玻璃制作,其长度和宽度均为 0.76 m,厚度为 0.02 m,并通过 4 只弹簧连接到 4 根直径是 12 mm 的钢丝杆上. 钢丝杆一端连接弹簧,另外一端连接到可以控制水平板自由升降的装置上,如图 1 所示. 图 2 中 M1~M4 为弹簧与水平板连接位置. 为限制水平板的水平运动和转动,水平板还通过 4 个直线轴承穿过两端分别固定在水槽底部和上部的 4 根钢棍,从而使得平板只能竖向运动. 水平板底部布置了 8 个压力传感器(P1~P8)和 2 个加速度传感器(A1、A2),对称地布置在水平板的迎浪侧和背浪侧,如图 2 所示. 试验中压力和加速度采用美国国家仪器有限公司(National Instruments,简称 NI)生产的 Crio-9074 多通道同步采集仪器进行同步采集,采集频率为 1 000 Hz.

试验中设计了 3 种不同支撑刚度的模型,如图 3 所示. Model01 和 Model02 中连接水平板与钢丝杆的弹簧直径分别为 4 mm 和 6 mm,其刚度 k_1 和 k_2 分别为 1 605 N/m 和 4 704 N/m. Model03 的水平板直接连接在钢丝杆上,钢丝杆的直径为 12 mm,长度为 300 mm,弹性系数为

2.0×10^5 MPa. 3 种模型的自振频率 f 及其阻尼比 ξ ,通过自由振动法求出,列于表 1 中. 即首先给予水平板一个竖向的初位移,然后让其作自由振动,通过安装在水平板底部的加速度传感器对结构物自由振动的加速度进行了采集,对采集到的振动加速度历时曲线作傅里叶变换得到了结构物的固有频率 f 和竖向刚度 k ;同时可由振动加速度历时曲线上相邻的峰-峰幅值比求出结构的阻尼比 ξ . 由表 1

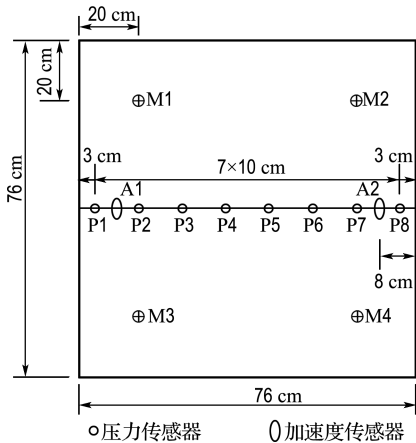


图 2 传感器布置
Fig. 2 Arrangement of sensors

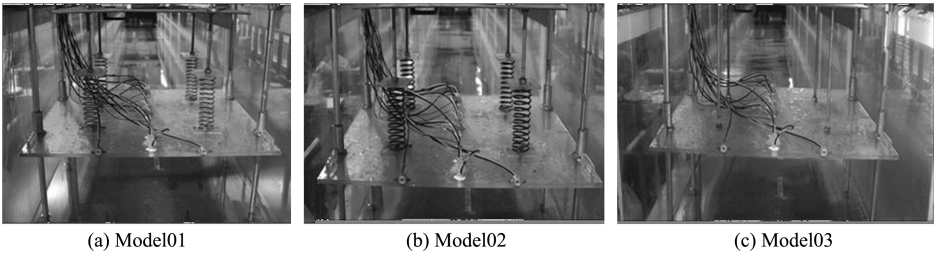


图 3 结构物模型
Fig. 3 Structure model

中数据可以看出,Model01 的刚度最小,Model03 的刚度最大.

表 1 结构物自振特性参数

Tab. 1 The characteristic of the structure's vibration

模型种类	f/Hz	m/kg	$k/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	ξ
Model01	4.6	8.8	7.3	0.23
Model02	7.5	8.8	19.5	0.20
Model03	36.6	8.8	464.9	0.08

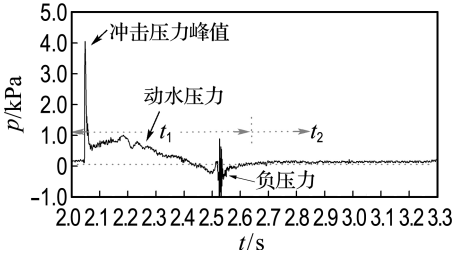
试验中入射波浪为规则波,入射波高 H 分别为 8、10 和 12 cm,周期 T 分别为 1.0、1.3、1.6 和 1.8 s,相对净空 s/H 分别为 0、0.2 和 0.4,其中 s 为水平板与静水面之间的距离. 每一试验组次至少重复 3 次.

2 试验结果

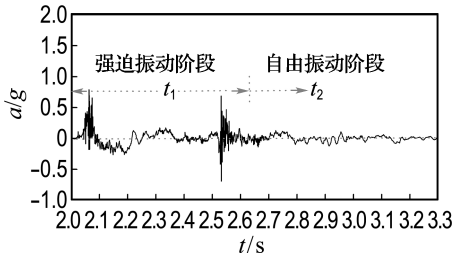
2.1 波浪冲击压力和振动加速度变化特性

图 4 给出了一个波浪周期内作用在透空式水平板底面上的竖向冲击压力历时曲线及其对应时段的振动加速度历时曲线. 从图中可以看出,在波浪冲击到结构物底面上时产生一个历时很短但是幅值很大的冲击压力峰值,之后为变化缓慢的动水压力过程,其后为一个负压力过程,最后当水体与板体完全分离后,水压力变为零. 在波浪冲击荷载作用期间内结构物处于强迫振动阶段,对应图中所示的 t_1 时间段. 当波浪冲击荷载作用结束后,结构物处于自由振动阶段,对应图中所示的 t_2 时间段.

图 5 给出了 3 种不同刚度模型在波高 $H=12$ cm,周期 $T=1.3$ s,相对净空分别为 0 和 0.2 情况下 P3 测点冲击压力和 A1 测点振动加速度的同步历时曲线. 从冲击压力和振动加速度变化过程看,冲击压力和相对应的振动加速度可以分为 4 个阶段:水体冲击结构物瞬间、水体淹没结构物阶段、水体从结构物底面脱离阶段和水体与结构物彻底分离阶段. 4 个阶段依次用 s1~s4 表示,



(a) 冲击压力



(b) 振动加速度

图 4 一个周期竖向冲击压力和振动加速度历时曲线($H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.2$)

Fig. 4 Time series of vertical impact pressure and vibration acceleration in one period ($H=12$ cm, $T=1.3$ s, $s/H=0.2$)

如图 5 所示, s1 阶段历时很短(0.04~0.06 s),波浪刚刚与 P3 测点接触发生砰击作用,产生一个幅值很大的冲击压力,相对应的振动加速度也出现较大幅值,且振荡剧烈. s2 阶段历时较长,压力为变化平缓的动水压力,该动水压力与结构物被水体淹没的状态有关,相对应的振动加速度幅值较 s1 阶段小. s3 阶段水体开始与结构物脱离,水压力由正值变成负值,相对应的振动加速度出现较大幅值,且振荡剧烈. s4 阶段水体与结构物已经脱离,水压力变为零,而相对应阶段振动加速度值逐渐趋于 0,结构物处于自由振动阶段. 由此可以看出 s1~s2 阶段为结构物的强迫振动阶段, s3 为一个过渡阶段, s4 为结构物的自由振动阶段.

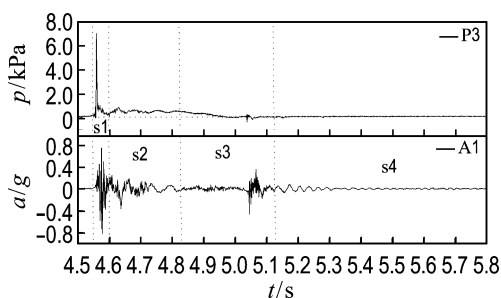
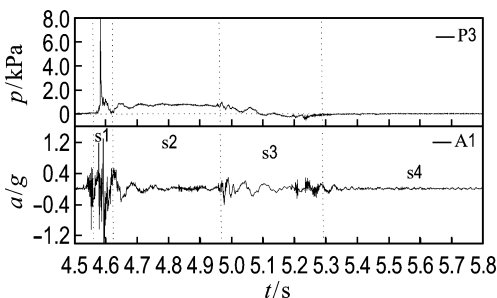
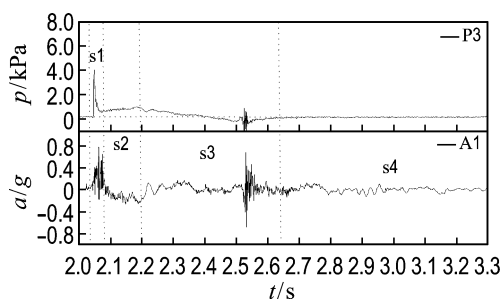
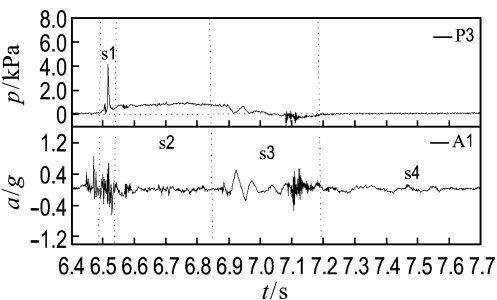
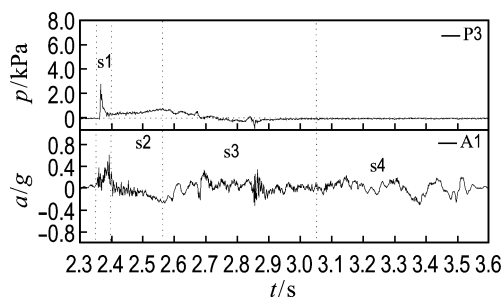
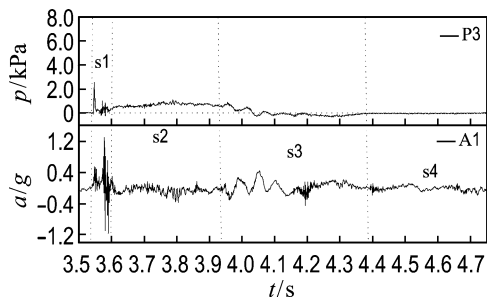


图 5 P3 测点冲击压力与 A1 测点振动加速度对应历时曲线

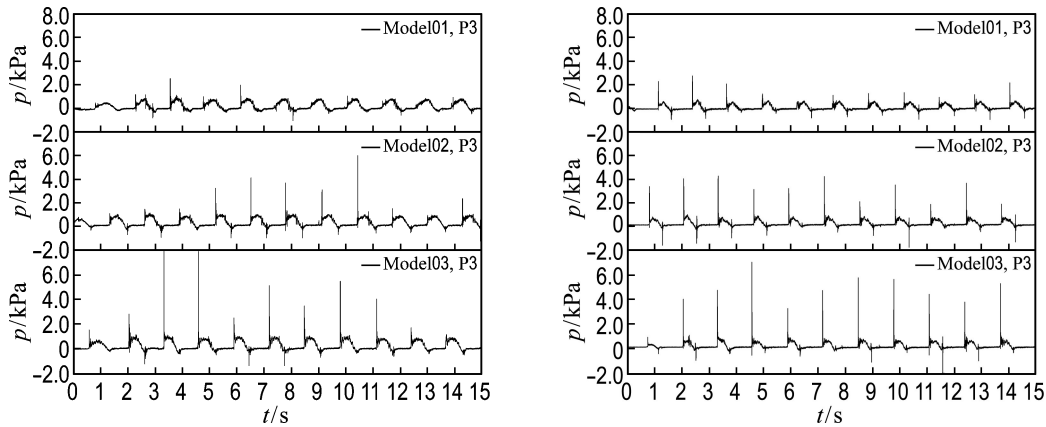
Fig. 5 Time series of impact pressure measured at P3 and vibration acceleration measured at A1

2.2 支撑刚度对波浪冲击荷载的影响

图 6 给出了 3 种不同刚度结构物模型底面上 P3 测点冲击压力历时曲线。从图中可以看出刚度越大的结构物,其所受的波浪冲击压力越大。在相同入射波浪作用下,Model01 的 P3 测点处大幅值冲击压力的出现频率很小,Model02 的 P3 测点处大幅值冲击压力的出现频率明显大于 Model01,而 Model03 的 P3 测点处基本在每个波浪周期内都有大幅值冲击压力出现,且冲击压力的幅值明显大于 Model02。由于在波浪冲击作用下结构物受到的冲击压力不仅取决于波浪要素而且还取决于结构物的响应,在波浪要素不变的情况下,支撑刚度越小的结构物,越容易将波浪的冲击能量转化为结构物的弹性势能,从而减缓波浪的冲击作用。因此,刚度大的结构物相比刚度小的结构物,其所受的冲击压力大。

2.3 支撑刚度对振动加速度的影响

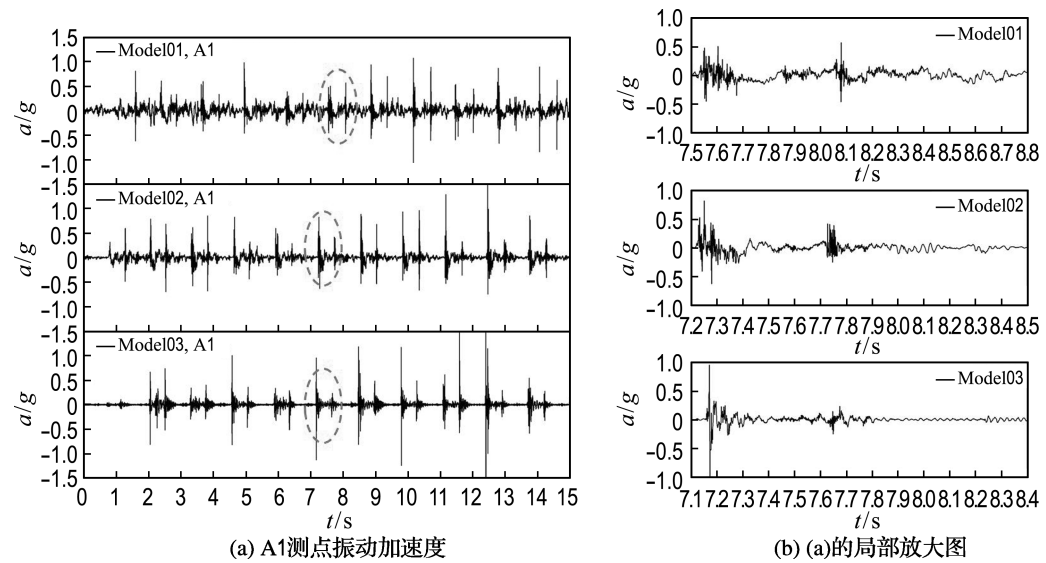
图 7 给出了 3 种模型在波高 $H=12\text{ cm}$, 周期 $T=1.3\text{ s}$, 相对净空 $s/H=0.2$ 时, A1 测点的振动加速度历时曲线。从图中可以看出, 在一个波浪周期内, 在波浪刚冲击到结构物上时, 结构物的振动加速度幅值很大, 且振荡比较剧烈, 随后振动加速度趋于平缓, 当水体脱离结构物时又产生一个幅值较大的振动加速度, 最后振动加速度趋于零, 结构物处于自由振动阶段。对于不同刚度的结构物模型, 冲击阶段振动加速度的最大幅值随着模型支撑刚度的增加而增加, 振动加速度振荡较小, 特别是在自由振动阶段, 支撑刚度较大的结构物的振动加速度很快趋于零。结合结构物所受冲击压力来看, 支撑刚度较大的结构物其所受的冲击压力较大, 因此相对应的振动加速度也较大。而刚度较大的结构物其自振频率较大, 因此振动加速度振荡较小。



(a) $H=12\text{ cm}$, $T=1.3\text{ s}$, $s/H=0$ (b) $H=12\text{ cm}$, $T=1.3\text{ s}$, $s/H=0.2$

图 6 P3 测点冲击压力历时曲线

Fig. 6 Time series of impact pressure measured at P3



(a) A1 测点振动加速度 (b) (a) 的局部放大图

图 7 A1 测点振动加速度历时曲线 ($H=12\text{ cm}$, $T=1.3\text{ s}$, $s/H=0.2$)

Fig. 7 Time series of vibration acceleration measured at A1 ($H=12\text{ cm}$, $T=1.3\text{ s}$, $s/H=0.2$)

3 结 语

本文通过物理模型试验研究了波浪对弹性支撑透空式水平结构物的冲击作用. 试验中设计了 3 种不同支撑刚度的结构物模型, 采用 Crio-9074 多通道同步采集仪器对结构物底面所受的波浪冲击压力和振动加速度历时曲线进行了同步采集. 研究表明: 波浪冲击压力和结构物的振动加速度在水体冲击结构物瞬间、水体淹没结构物阶段、水体从结构物底面脱离阶段和水体与结构物彻底分离阶段具有显著不同的特征. 在相同入射波浪要素作用下, 刚度越大的结构物, 其所受的波浪冲击压力越大. 试验中支撑刚度最大的 Model03 上的测点基本在每个波浪周期内都有大幅值的冲击压力出现, 且冲击压力的幅值明显大于 Model02

和 Model01 中同一测点处的幅值. 不同刚度的结构物模型, 在波浪冲击阶段振动加速度的最大幅值随着模型支撑刚度的增加而增加, 且振动加速度振荡较小, 特别是在自由振动阶段, 支撑刚度较大的结构物的振动加速度很快趋于零.

参考文献:

[1] Kaplan P, Silbert M N. Impact forces on platform horizontal members in the splash zone [C]// Offshore Technology Conference, 3-6 May, Houston, Texas. Houston:OTC, 1976; OTC-2497-MS.
[2] Miller B L. Wave slamming loads on horizontal circular elements of offshore structures [J]. Naval Architect, 1978(3): 81-98.
[3] Faltinsen O, Kjaerland O, Nøttveit A, et al. Water

- impact loads and dynamic response of horizontal circular cylinders in offshore structures [C] // **Offshore Technology Conference, 2-5 May, Houston, Texas**. Houston:OTC, 1977:OTC-2741-MS.
- [4] Sarpkaya T. Wave impact loads on cylinders [J]. **SPE Journal**, 1979, **19**(1):29-36.
- [5] Wang Hsiang. Water wave pressure on horizontal plate [J]. **Journal of the Hydraulics Division**, 1970, **96**(10):1997-2017.
- [6] Kaplan P. Wave impact forces on offshore structures; re-examination and new interpretations [C] // **Offshore Technology Conference, 5/4/1992, Houston, Texas**. Houston:OTC, 1992:OTC-6814-MS.
- [7] Goda Y, Suzuki Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments [C] // **15th International Conference on Coastal Engineering**. New York: American Society of Civil Engineers, 1976.
- [8] Elghamry O A. Uplift forces on platform decks [C] // **Offshore Technology Conference, 19-21 April, Houston, Texas**. Houston:OTC, 1971:OTC-1381-MS.
- [9] 过 达,蔡保华. 透空式建筑物面板波浪上托力计算[J]. 华东水利学院学报, 1980(1):14-33.
GUO Da, CAI Bao-hua. Uplift forces calculation of wave slamming on an open-piled structure [J]. **Journal of East China Technical University of Water Resources**, 1980(1):14-33. (in Chinese)
- [10] REN Bing, WANG Yong-xue. Numerical simulation of random wave slamming on structures in the splash zone [J]. **Ocean Engineering**, 2004, **31**(5-6):547-560.
- [11] 任 冰,高 睿,金 钊,等. 波浪对透空式结构物冲击作用的光滑粒子流体动力学数值模拟[J]. 海洋学报, 2012, **34**(1):163-177.
REN Bing, GAO Rui, JIN Zhao, *et al.* The numerical simulation of wave slamming on an open-piled structure using the SPH model [J]. **Acta Oceanologica Sinica**, 2012, **34**(1):163-177. (in Chinese)
- [12] Faltinsen O M, Kvålsvold J, Aarsnes J V. Wave impact on a horizontal elastic plate [J]. **Journal of Marine Science and Technology**, 1997, **2**(2):87-100.
- [13] Sumi Y, Okada S, Mukai H, *et al.* Study on water impact of elastic plate with small deadrise angles [J]. **Journal of the Society of Naval Architects of Japan**, 1997(182):639-646.
- [14] Tanizawa K. A time-domain simulation method for hydroelastic impact problem [C] // **Proceedings of the 2nd International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology**. Fukuoka: Yomei Printing Cooperative Society, 1998.
- [15] Sulisz W, Wilde P, Wisniewski M. Wave impact on elastically supported horizontal deck [J]. **Journal of Fluids and Structures**, 2005, **21**(3):305-319.

Experimental study of wave impact on structure with elastic supporters

SUN Jian-feng, REN Bing*, SONG Zi-lu, WANG Yong-xue

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

Abstract: When waves propagate against a structure in the splash zone, an impact force with a large magnitude and short duration may act on it. The high-strength instant impact force and the wave-induced structure vibrations may cause a significant damage to the structure. So, the wave impact on an elastically supported horizontal deck is focused on. Physical models with three kinds of different stiffness of the supporters are considered. The impact pressure and the vibration acceleration of the structure are measured simultaneously in the experiments. The influence of the stiffness of the supporters on impact pressure as well as the structure vibration is discussed. The relationship between the impact pressure and its corresponding vibration acceleration is analyzed. It is shown that the larger the support stiffness of the structure is, the greater the impact pressure and its corresponding vibration acceleration amplitude are.

Key words: wave impact; elastic supporter; structure vibration; physical model experiment