底部透空不透水建筑物波压力研究

孙 涛[1], 王英波[1], 孙洪涛[2*]
（1. 日照实华原油码头有限公司, 山东 日照 276800;
2. 海博泰科技 (青岛) 有限公司, 山东 青岛 266010）

摘 要: 底部透空不透水建筑物是近海工程中的一种新型结构, 与传统水工建筑物相比, 其能灵活适应基床不发生变形、阻止波浪进入后方造成破坏。本文通过构建物理模型, 在波浪水槽中进行试验, 测试了底部透空不透水直立建筑物不规则波作用, 得到了不同水深、相同波浪要素时, 该型直立建筑物迎浪面和底面的水平总力最大时各测点正向波压力和负向波压力数据。对比分析了不同水深下底部透空不透水直立建筑物的水平总力及垂直力, 总结了波峰和波谷作用下波浪力沿建筑物表面的分布规律, 可为海岸工程结构设计提供依据。

关键词: 直立建筑物; 波压力; 波峰; 波谷
中图分类号: P75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-3682(2022)03-0250-08
doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220526001
引用格式: 孙涛, 王英波, 孙洪涛. 底部透空不透水建筑物波压力研究[J]. 海岸工程, 2022, 41(3): 250-257. SUN T, WANG Y B, SUN H T. Study of wave pressure on the buildings with permeable but impermeable bottom[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(3): 250-257.

防波堤和码头等水工建筑物是港区重要的组成部分, 其具有抵御外海波浪, 维持港内水域平稳以利于船舶停靠等优点, 波浪作用下不同结构形式的水工建筑物要维持其自身稳定, 波浪荷载是主要研究内容之一。相关学者对不同结构水工建筑物的波浪力作用进行了研究, 如: 李翔等[1]采用不规则波浪,对透水斜坡上不同开孔率混凝土面板受到的波浪打击力进行研究, 分析了打击力随各影响因素的变化特性, 给出了波浪打击力的统计分布规律; Cuomo 等[2]通过物理模型试验研究了波浪对竖墙的作用力, 并总结出竖墙表面波压力计算公式; Neelamani 等[3]对规则波作用下的冲击力进行较为系统的试验; 冯卫兵等[4]采用物理模型试验的方法, 研究在不规则波作用下最大打击力位置与相对深度的变化规律, 拟合得到最大相对波压力公式和波压力沿斜坡分布规律; 王登婷[5]通过物理模型试验研究防浪墙底面高程对其迎浪面及底面波浪压强及整体稳定性的影响; 柳玉良等[6]通过模型试验研究了圆形沉箱水平波浪力与浮托力的分布情况, 并与现有直立堤理论公式进行比较。

底部透空不透水直立建筑物是港口工程建设中的一种新型结构, 该型建筑物底部不透水, 透空部分通过设置钢筋混凝土墩安放在基床上, 在波吸力作用下使该型建筑物更加稳定, 在防波堤和码头中都可使用, 直立建筑物顶部设置挡浪墙, 增加顶面高程减少越浪以满足内侧船舶靠泊, 但波浪遇直立建筑物易产生驻波, 致使迎浪面和底面受波浪力的作用增大, 对底部透空不透水直立建筑物的稳定产生影响, 存在造成局部或整体失稳安全隐患。本文通过波浪断面物理模型试验, 对不同水深下底部透空不透水直立建筑物的波压力实测数据开展研究, 并根据《港口与航道水文规范》[7]规定的波浪力计算方法与物理模型试验波浪力结果进行对比, 分析总结波浪力分布规律, 为类似工程设计和理论研究提供参考。

收稿日期: 2022-05-18
作者简介: 孙 涛(1978—), 男, 工程师, 主要从事港口、油气及近海工程方面研究. E-mail: suntaorzh@163.com
*** 通信作者:** 孙洪涛(1987—), 男, 工程师, 主要从事港口、水文及近海工程方面研究. E-mail: 651628029@qq.com

（陈 靖 编辑）

1　模型试验

1.1　试验设备

试验在中国海洋大学山东省海洋工程重点实验室开展, 该不规则波水槽长 50.0 m、宽 1.2 m、深 1.2 m。水槽一端为低惯量直流式电机不规则造波机, 可模拟正弦波和椭圆余弦波等规则波以及国内外常用的频谱(P-M 谱、B 谱、JONSWAP 谱等), 造波机可产生波高范围为 3～50 cm, 波浪周期范围 0.5～50 s。水槽另一端为消能设施, 其反射率<5%, 满足试验规范《水运工程模拟试验技术规范》[8] 要求。

1.2　试验参数

建筑物透空率为 12%, 率定试验波浪要素时, 在水槽内建筑物前制作坡度为 1∶25 的斜坡, 直立式模型安放于斜坡顶水平位置且波浪平稳段, 模型底部迎浪处采用透空型式, 底部后方采用不透水处理, 试验模型布置见图 1。

为测量建筑物波压力分布情况, 根据《水运工程模拟试验技术规范》[8] 和《防波堤与护岸设计规范》[9], 在建筑物迎浪面和模型底部加密布置一定数量的压力传感器, 模型同一高度处布置 2 个传感器, 便于校对数据。波压力传感器布置见图 2, 其中迎浪侧 20 个、底面 8 个。

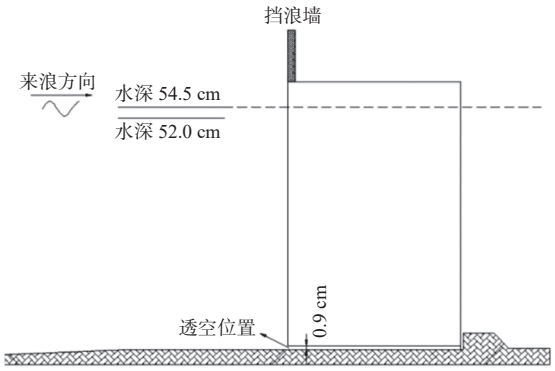
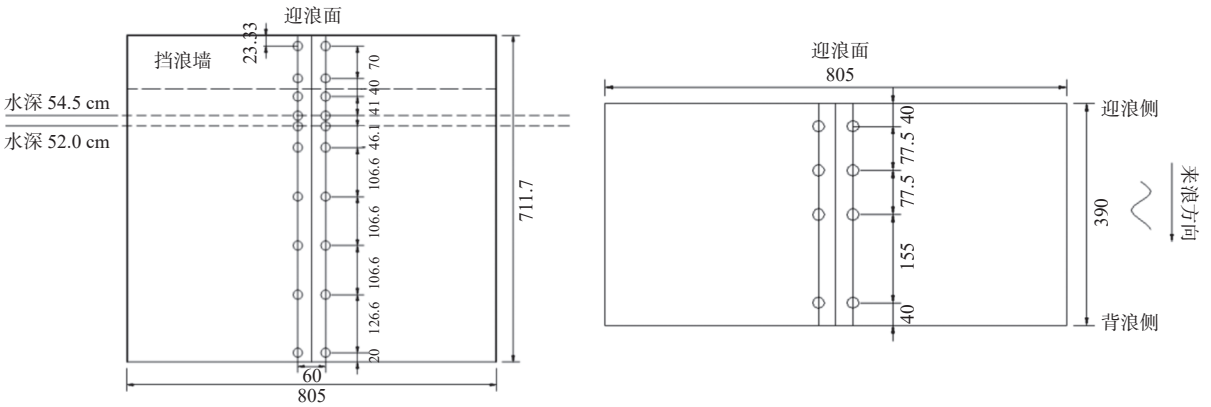


图 1　试验模型布置

Fig. 1　The overall layout of the testedmodel



(a) 迎浪面　　(b) 底面

注：图中数据单位为 mm。

图 2　波压力传感器布置

Fig. 2　Layout of the wave pressure sensors

1.3　试验方案

为分析相同波要素、不同水深下波浪力的分布规律, 测试水平总力最大时各测点波压力。断面试验采取 2 种方案: 方案一, 工况 1 和工况 2 为相同波要素; 方案二, 工况 3 和工况 4 为相同波要素。

本次试验选取 2 种水深, 分别为 54.5 和 52.0 cm。试验工况见表 1。

表 1 试验工况

Table 1 Working conditions for the test

项 目	工 况	水深/cm	$H_{1\%}$/cm	$H_{13\%}$/cm	$\overline{T}$/s	项 目	工 况	水深/cm	$H_{1\%}$/cm	$H_{13\%}$/cm	$\overline{T}$/s
方案一	1	54.5	20.8	15.0	1.62	方案二	3	54.5	11.0	7.6	1.22
	2	52.0	20.8	15.0	1.62		4	52.0	11.0	7.6	1.22

注：$H_{1\%}$为累积频率 1% 的波高，$H_{13\%}$为累积频率 13% 的波高，$\overline{T}$为平均周期。

2 试验结果

为保证试验精度，每种工况波压力试验采集有效数据 4～5 次，同一高程的 2 个测点剔除异常值后取平均值作为该高程处的波压力值。数据处理后得到水平总力最大时刻的同步波压力分布值，通过积分得到模型迎浪面上每延米水平波浪总力。正负波压力规定为：水平波浪力计算中，沿来波方向为正，反向为负；垂直力计算以向上为正，向下为负。

使用 Matlab 软件，采用上跨零点法对采集到的点压强数据进行分析，结果表明：水平力最大值与浮托力最大值并不同步发生，迎浪面波压力近似呈梯形分布，建筑物底部的波压力从外侧向内侧相差较小。方案一波峰和波谷作用下水平总力最大时各测点波压力见表 2，波峰和波谷作用下水平总力最大时各测点波压力分布见图 3；方案二波峰和波谷作用下水平总力最大时各测点波压力见表 3，波峰和波谷作用下水平总力最大时各测点波压力分布见图 4。

表 2 方案一水平总力最大时各测点波压力（kPa）

Table 2 The wave pressure (kPa) at each measuring point when the horizontal total force is maximum in Scheme 1

测 点	工况 1		工况 2		备 注
	波峰	波谷	波峰	波谷	
1	32.3		8.3		
2	37.6		24.0		
3	47.8		34.4		
4	52.8	−1.6	44.8		
5	50.5	−8.5	47.7	−0.1	水平力
6	46.2	−21.7	45.8	−13.2	
7	36.5	−49.4	42.1	−44.1	
8	31.3	−45.0	37.4	−57.9	
9	27.8	−43.5	34.9	−57.2	
10	27.5	−43.7	34.5	−57.5	
11	29.8	−42.8	33.9	−54.8	
12	31.1	−40.3	32.5	−49.1	垂直力
13	25.6	−39.5	32.5	−48.4	
14	28.1	−39.7	32.6	−49.0	
	770.9	−624.4	758.6	−701.2	水平总力

注：测点 1～14 的波压力单位为 kPa，水平总力的波压力单位为 kN/m。空白处无数据。

表 3 方案二水平总力最大时各测点波压力（kPa）

Table 3 The wave pressure (kPa) at each measuring point when the horizontal total force is maximum in Scheme 2

测 点	工况 1		工况 2		备 注
	波峰	波谷	波峰	波谷	
1	2.8		2.7		
2	10.7		6.8		
3	21.5		15.6		
4	26.8	−0.2	24.4		
5	24.7	−6.6	27.4	−0.6	水平力
6	22.3	−13.2	24.6	−20.6	
7	18.3	−29.5	19.3	−30.1	
8	14.6	−24.8	14.9	−25.8	
9	12.6	−22.8	12.4	−23.8	
10	11.9	−22.2	11.5	−23.4	
11	11.1	−20.8	10.4	−21.8	
12	10.7	−20.6	10.1	−21.5	垂直力
13	10.5	−20.3	9.5	−20.9	
14	10.5	−20.7	9.8	−21.3	
	331.9	−340.0	325.9	−376.5	水平总力

注：测点 1～14 的波压力单位为 kPa，水平总力的波压力单位为 kN/m。空白处无数据。

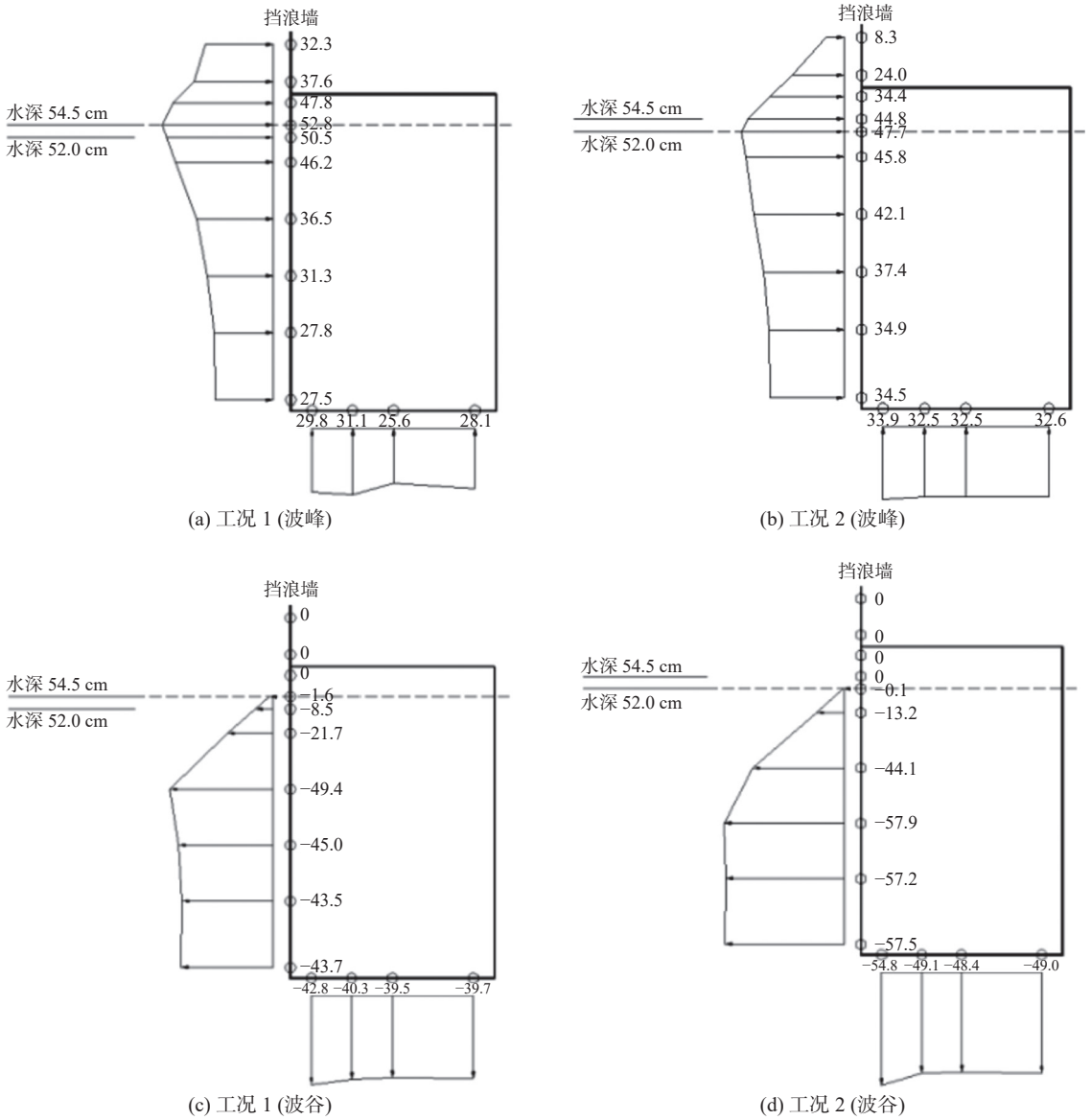


图 3　方案一水平总力最大时各测点波压力(kPa)

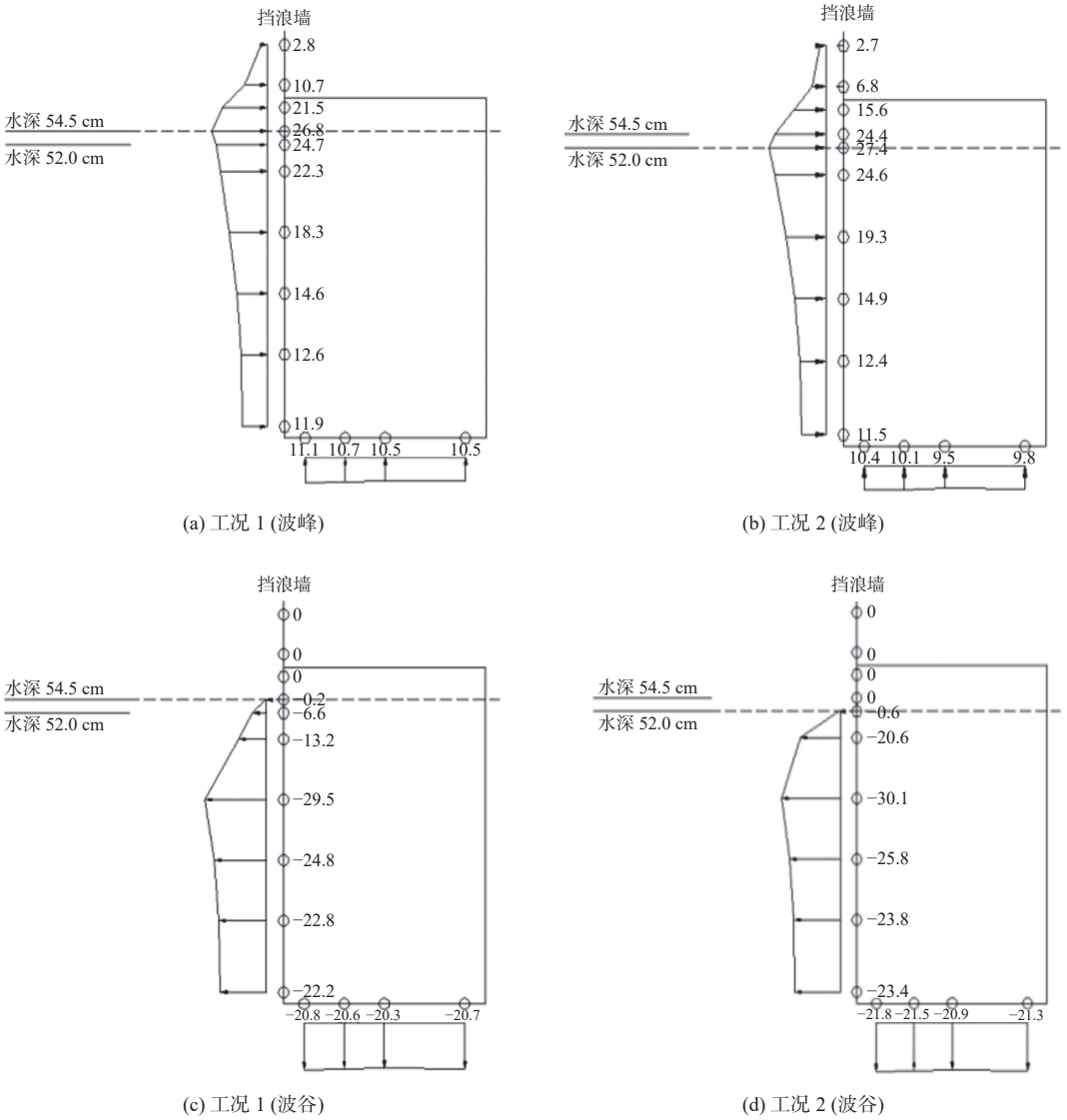
Fig. 3　The wave pressure (kPa) at each measuring point when the horizontal total force is maximum in Scheme 1

由表 2 和表 3 可知, 底部透空不透水建筑物最大压强发生在静水位处, 随着水深的增加迎浪面上波压力减小; 当波高和周期相同、水深不同时, 迎浪面波压力分布随水位的降低静水位以上测点波压强随之减少, 静水位以下各测点波压强增大。

对方案一和方案二在不同水深、波峰及波谷作用下的波浪力分析可知, 相同波要素下, 波峰作用时大水深迎浪面水平总力大于小水深, 波谷作用时迎浪面的水平总力则反之。

其中, 工况 1 波峰作用下迎浪面水平总力比工况 2 大 1.5%, 工况 3 波峰作用下迎浪面水平总力比工况 4 大 1.8%; 工况 1 波谷作用下迎浪面水平总力比工况 2 小 12.3%, 工况 3 波谷作用下迎浪面水平总力比工况 4 小 10.7%,

由图 3 和图 4 可知, 对于底部透空, 底部和两侧不透水建筑物, 由于建筑物后方底部透空不透水, 底面波压力数值差别较小。



(a) 工况 1 (波峰)　(b) 工况 2 (波峰)

(c) 工况 1 (波谷)　(d) 工况 2 (波谷)

图 4　方案二水平总力最大时各测点波压力(kPa)

Fig. 4　The wave pressure (kPa) at each measuring point when the horizontal total force is maximum in Scheme 2

3　波压力试验值与计算值比较

因《港口与航道水文规范》[7] 未对底部透空不透水直立建筑物底面波浪力的计算进行阐述，所以本文只按照规范计算了该型建筑物迎浪面波浪力，并与物理模型试验结果对比，分析总结波浪力分布规律。根据《港口与航道水文规范》[7] 可知，直立建筑物前波浪波态均为立波，2 种方案波浪力计算方法如下。

1)方案一

波峰作用下立波作用力按式(1)～式(4)计算：

$$h_s = \frac{\pi}{H^2} L \mathrm{cth} \frac{2\pi d}{L}, \tag{1}$$

$$p_d = \frac{\gamma H}{\mathrm{ch} \dfrac{2\pi d}{L}}, \tag{2}$$

$$p_s = (p_d + \gamma d)\frac{H + h_s}{d + H + h_s}, \tag{3}$$

$$p_b = p_s - (p_s - p_d)\frac{d_1}{d}, \tag{4}$$

式(1)～式(4)中: h_s 为波浪中线超出静水面的高度(m); H 为建筑物所在处进行波波高(m); L 为波长(m); d 为建筑物前水深(m); p_d 为水底处波浪压力强度(kPa); γ 为水的重度(kN/m^3); p_s 为静水面处波压力强度(kPa); p_b 为墙底处波压力强度(kPa); d_1 为基床上水深(m)。

波谷作用下立波作用力按式(5)～(7)计算:

$$p'_d = \frac{\gamma H}{\mathrm{ch}\dfrac{2\pi d}{L}}, \tag{5}$$

$$p'_s = \gamma(H - h_s), \tag{6}$$

$$p'_b = p'_s - (p'_s - p'_d)\frac{d_1 + h_s - H}{d + h_s - H}, \tag{7}$$

式(5)～式(7)中: p'_d为波谷作用下水底处波浪压力强度(kPa); γ为水的重度(kN/m^3); H 为建筑物所在处进行波波高(m); d 为建筑物前水深(m); L 为波长(m); p'_s为波谷作用下静水面以下深度 H-h_s 处波压力强度(kPa); h_s 为波浪中线超出静水面的高度(m); p'_b为波谷作用下墙底处波压力强度(kPa); d_1 为基床上水深(m)。

2)方案二

波峰作用下立波作用力按式(8)～式(10)计算:

$$p_s = \gamma H, \tag{8}$$

$$p_z = \gamma H\frac{\mathrm{ch}\dfrac{2\pi(d - z)}{L}}{\mathrm{ch}\dfrac{2\pi d}{L}}, \tag{9}$$

$$p_b = \gamma H\frac{\mathrm{ch}\dfrac{2\pi(d - d_1)}{L}}{\mathrm{ch}\dfrac{2\pi d}{L}}, \tag{10}$$

式(8)～式(10)中: p_s 为静水面处波浪压力强度(kPa); γ为水的重度(kN/m^3); H 为建筑物所在处进行波波高(m); p_z 为静水面以下深度 Z 处的波浪压力强度(kPa); d 为建筑物前水深(m); z 为静水面以下深度(m); L 为波长(m); p_b 为墙底处波浪压力强度(kPa); d_1 为基床上水深(m)。

方案二波谷作用下立波作用力同样按式(5)～式(7)计算。

方案一计算结果见表 4, 方案二计算结果见表 5。由表 4、表 5 与表 2、表 3 对比, 波峰作用下各点波压力试验值小于规范计算值, 波谷作用下, 由于底部透空结构的影响, 除水位附近点位试验值和计算值接近之外, 其他点位试验值大于规范计算值。

表 4 方案一各点波压力强度计算值(kPa)

Table 4 Wave pressure (kPa) at each measuring point in Scheme 1

测 点	工况 1（波峰）	工况 1（波谷）	工况 2（波峰）	工况 2（波谷）	备 注
1	29.7		23.8		
2	46.6		40.6		
3	56.2		50.2		
4	63.6	−2.5	60.1		
5	62.3	−9.4	63.3	−2.5	水平力
6	59.9	−23.0	60.8	−16.1	
7	54.2	−44.0	55.1	−43.9	
8	48.4	−41.3	49.3	−41.5	
9	42.7	−38.6	43.6	−39.0	
10	36.0	−35.4	36.8	−36.1	

注：空白处无数据。

表 5 方案二各点波压力强度计算值(kPa)

Table 5 Wave pressure (kPa) at each measuring point in Scheme 2

测 点	工况 1（波峰）	工况 1（波谷）	工况 2（波峰）	工况 2（波谷）	备 注
1					
2	11.4		4.1		
3	23.1		15.9		
4	32.0	−2.5	27.9		
5	29.9	−9.4	31.7	−2.5	水平力
6	25.9	−23.0	27.6	−16.1	
7	18.5	−23.5	20.0	−23.9	
8	13.5	−19.9	14.4	−20.3	
9	11.4	−16.3	11.8	−16.7	
10	11.4	−12.1	11.8	−12.5	

注：空白处无数据。

4 结 论

本文通过物理模型试验，针对底部透空不透水建筑物的波压力进行测试，并根据规范计算结果与试验结果对比分析，研究了不规则波作用下底部透空不透水建筑物迎浪面及底面波压力分布规律，得出以下主要结论。

1)底部透空不透水建筑物最大压强发生在静水位处，随水深的增加迎浪面上波压力减小。波要素相同，迎浪面波压力随着水位的降低，静水位以上测点波压强减小，静水位以下各测点波压强增大。

2)不同水深，相同波要素下，大水深时波峰作用下迎浪面水平总力比小水深时大，而大水深时波谷作用下迎浪面水平总力比小水深时小。

3)与传统水工建筑物相比，模型底部透空不透水时底面测点波压力数值较为接近，波压力分布既不是呈梯形分布，也不是呈合田良实[10]提出的三角形分布。

4)通过对该型直立建筑物试验研究及波压力计算结果比较，波峰作用下各点波压力试验值小于规范计算值，波谷作用下受底部透空结构的影响，试验值大于规范计算值。

参考文献 (References):

[1] 李翔, 陈国平, 严士常, 等. 不同开孔率混凝土护面板上波浪打击力试验研究[J]. 水运工程, 2011(11): 25-31. LI X, CHEN G P, YAN S C, et al. Experiment study on wave impact force on armoring concrete slab with differentporosity[J]. Port and Waterway Engineering, 2011(11): 25-31.

[2] CUOMO G, ALLSOP W, BRUCE T. Breaking wave loads atvertical seawalls and breakwaters[J]. Coastal Engineering, 2010, 57(4): 424-439.

[3] NEELAMANI S, SCHUTTRUMPF H, MUTTRAY M, et al. Prediction of wave pressures on smooth impermeable seawalls[J]. Ocean Engineering, 1999, 26(8): 739-765.

[4] 冯卫兵, 崔磊, 仲南艳, 等. 斜坡堤护面板上最大波压力研究[J]. 水运工程, 2013(1): 12-15. FENG W B, CUI L, ZHONG N Y, et al. On peak wave impact pressure on protection slab of uniform slope[J]. Port and Waterway Engineering, 2013(1): 12-15.

[5] 王登婷. 弧形防浪墙的模型试验[J]. 水运工程, 2004(7): 1-5. WANG D T. Model test of arc wave screen[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(7): 1-5.

［6］ 柳玉良, 杨洪旗, 王爱群, 等. 圆形沉箱防波堤波压力的试验分析[J]. 海岸工程, 2004, 23(4): 8-16. LIU Y L, YANG H Q, WANG A Q, et al. Test and analysis of wave pressure on circular caissonbreakwater[J]. Coastal Engineering, 2004, 23(4): 8-16.

［7］ 中华人民共和国交通运输部. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code of Hydrology for Harbor and Waterway: JTS 145—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.

［8］ 中华人民共和国交通运输部. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社, 2021. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specification for simulation test of water transportation engineering: JTS/T 231—2021[S]. Beijing: China Communications Press, 2021.

［9］ 中华人民共和国交通运输部. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code of Design for Breakwaters and Revetments: JTS 154—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.

［10］ 合田良实. 港工建筑物的防浪设计[M]. 刘大中, 孙巨才, 译. 北京: 海洋出版社, 1984: 109-118. GODA. Wave-proof design of port structures[M]. LIU D Z, SUN J C, trans. Beijing: China Ocean Press, 1984: 109-118.

Study of Wave Pressure on the Buildings with Permeable But Impermeable Bottom

SUN Tao[1]，WANG Ying-bo[1]，SUN Hong-tao[2]

（1. *Rizhao Shihua Crude Oil Terminal Co.*, *Ltd.*, Rizhao 276800, China；

2. *Haibotai Technology (Qingdao) Co.*, *Ltd.*, Qingdao 266010, China）

Abstract: The buildings with permeable but impermeablebottomare a new-type structure in offshore engineering. Compared tothe traditional hydraulic structures, this type of structure can flexibly adapt to the base bed without deformation and preventthe waves from entering the rear to cause damages. By constructing the physical model and testing in the wave flume, the action of irregular wave on anvertical building with permeable but impermeablebottom is measured,and the positive and negative wave pressure data at each measuring point are obtained at different water depths and same wave elements as well as at the time when the horizontal total force reaches the largest on the wave-facing surface and underside of the vertical building. In addition, the horizontal total force and the vertical force of the vertical building at different water depthsare compared and the distribution law of wave force along the surface of the verticalbuildingunder the actions of wave crest and trough is summarized. These can provide basis for the design of coastal engineering structures.

Key words: vertical building；wave pressure；wave crest；wave trough

Received: May 18, 2022