

# 分层斜坡越浪式波能发电装置结构 受力试验研究

徐 国<sup>1</sup>, 纪君娜<sup>2,3</sup>, 曲恒良<sup>3</sup>, 刘 臻<sup>3\*</sup>

(1.中交烟台环保疏浚有限公司, 山东 烟台 264000; 2.山东省胶东调水工程棘洪滩水库管理处, 山东 青岛 266111;  
3.中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

**摘 要:**分层斜坡越浪式波能发电装置作为一种重要的波能转换型式,在开发利用波浪能的同时,可与防波堤或护岸工程相结合,将海岸工程的被动消能变为主动吸能,提高综合效益。在实际工程应用中,分层斜坡越浪式发电装置引浪面在波浪荷载作用下的安全性成为首要问题,由于其引浪面与防波堤或护岸的护面对水体磨阻影响不同,因此水体对结构的作用力不同,已有的斜坡式防波堤所受波浪荷载的研究无法用于指导分层斜坡越浪式发电装置引浪面的结构强度设计。通过水工物理模型试验,对分层越浪装置引浪面在不同波况条件下的结构受力进行研究分析,获得越浪装置引浪面上点压力及波浪力的分布规律,为装置的结构设计提供理论指导及设计支持。

**关键词:**分层斜坡越浪;引浪面;结构受力;试验

**中图分类号:** P743.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-3682(2017)02-0048-10

**doi:** 10.3969/j.issn.1002-3682.2017.02.006

目前,全球能源紧张,环境污染日益严重,发展可再生能源成为人类社会及经济发展的必要趋势。波浪能能量密度高,在海洋中传播广泛,因此具有巨大的开发潜力<sup>[1]</sup>。国际上提出的波浪能量转换技术按俘获技术分类主要有振荡浮子式(点吸收式)、鸭式、振荡水柱式、筏式、摆式和越浪式等<sup>[2]</sup>。斜坡越浪式波能发电装置主要原理:波浪通过引浪面进行爬升,越入引浪面后方蓄水池,经过波浪多次越入,蓄水池水位达到一定高度后,释放水体,水体返回大海过程中驱动水轮机实现波能转换。斜坡越浪式波能发电装置在开发利用波浪能的同时,可与防波堤或者护岸结构相结合,变被动消能为主动吸能,提高综合效益。对于固定式波能发电装置而言,潮差大会降低装置的吸能及发电时间<sup>[3]</sup>。为突破大潮差的限制,提高斜坡越浪式波能发电装置吸能发电水平,提出分层斜坡越浪式波能发电装置。将斜坡越浪式波能发电装置设置为多层型式,以适应不同潮位,保证各个潮位下装置的吸能及发电水平。

防波堤或护岸结构的作用是保证其掩护水域水面稳定或者保护岸堤安全,因此其坡面多铺设护面块体结构<sup>[4]</sup>,加强越浪水体能量耗散。而分层斜坡越浪式发电装置为实现波浪能发电最大化,需要大量水体越入蓄水池,引浪面设计需要尽可能光滑。二者对水体的影响作用不同,水体对引浪面结构的荷载作用亦不同,因此对防波堤或护岸结构波浪荷载的研究无法用于斜坡越浪式发电装置的结构设计。

杨宗宇等<sup>[5]</sup>设计优化越浪式波能发电装置,并通过模型试验对不同波况下结构的受力进行探究,归纳总结得到了单层斜坡越浪式波能发电装置在不同波况条件下波压力变化的规律。由于分层斜坡越浪式波能发电装置在结构型式及工作海况等方面相对复杂,对于该类装置引浪面在波浪中的受力情况并不明确。为保

收稿日期:2016-12-25

资助项目:山东省重点研发计划项目——新型分层斜坡越浪式波能装置能量转换关键技术研究(2016GSF115016)

作者简介:徐 国(1980-),男,工程师,硕士,主要从事地理信息与测量方面研究.E-mail:xuguo@tdc-2.com

\* 通讯作者:刘 臻(1979-),男,教授,博士,主要从事海洋可再生能源开发与利用方面研究.E-mail:liuzhen@ouc.edu.cn

(陈 靖 编辑)

证分层斜坡越浪式波能发电装置的安全性及可靠性,对其在极限波况条件下进行受力分析研究是十分必要的。

本文在斜坡越浪式波能发电装置基础上,设计并加工分层斜坡越浪式波能发电装置,通过物理模型试验,测量获得不同水深、不同波浪要素条件下分层越浪装置引浪面上点压力及波浪力,总结分析引浪面上波压力的变化规律及分布规律。

## 1 物理模型试验

### 1.1 试验设备

#### 1.1.1 试验波流水槽

本文中水工物理模型试验在中国海洋大学工程学院水动力学实验室的波流水槽(图 1)中进行。该水槽长 30 m,宽 0.6 m,高 1 m,最大工作水深 0.6 m。造波机为低惯量伺服电机推板式造波机,安装于水槽首端。造波机通过波流软件控制造波,造波波高 0.02~0.20 m,周期 0.6~2.0 s,造波能力满足试验要求。水槽末端布置多层消波网,用于吸收波浪能量,减小反射。



图 1 波流水槽

Fig.1 Wave flume

#### 1.1.2 试验模型

本文试验模型主要包含 4 部分:下层引浪面、下层蓄水池、上层引浪面及上层蓄水池,装置设计尺寸如图 2 所示。为研究斜坡越浪式发电装置引浪面所受波浪作用力,在模型引浪面上安装 18 个压力传感器,编号 p1~p18。压力传感器总共布置 6 排,每排 3 个,编号为 p1~p6 压力传感器安装在分层越浪装置上层引浪面上,编号为 p7~p18 压力传感器安装在装置下层引浪面上,压力传感器布置水平间距为 14 cm,排间间距 3.33 cm。压力传感器布置图如图 3 所示。

试验模型放置于距离造波机 23.0 m 的位置,该位置波浪稳定,入射波浪满足试验波况要求,装置在水槽中的整体布置示意图如图 4 所示。

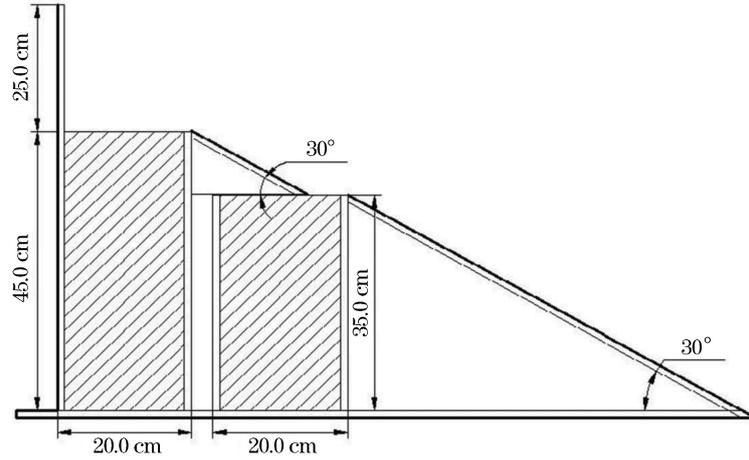
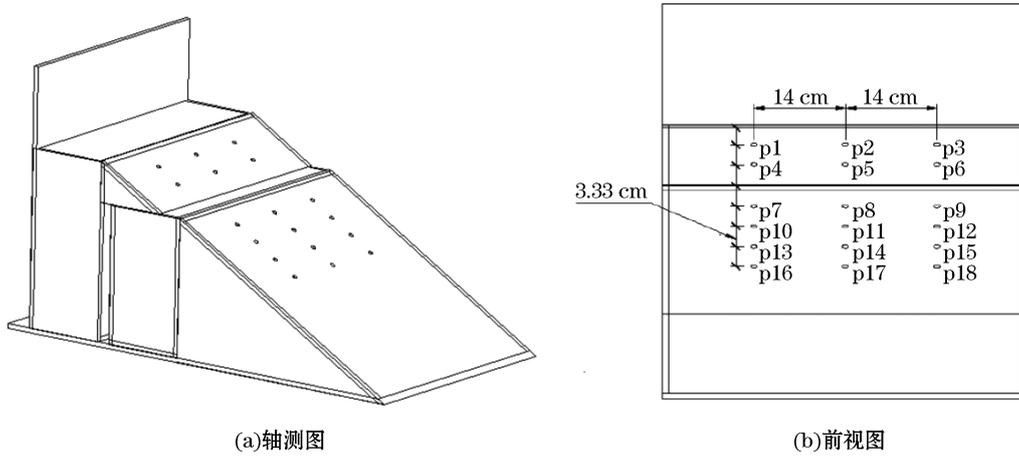


图 2 装置整体示意图

Fig.2 Sketch of the overall OWEC device



(a)轴测图

(b)前视图

图 3 压力传感器布置图

Fig.3 Layout of the pressure sensor

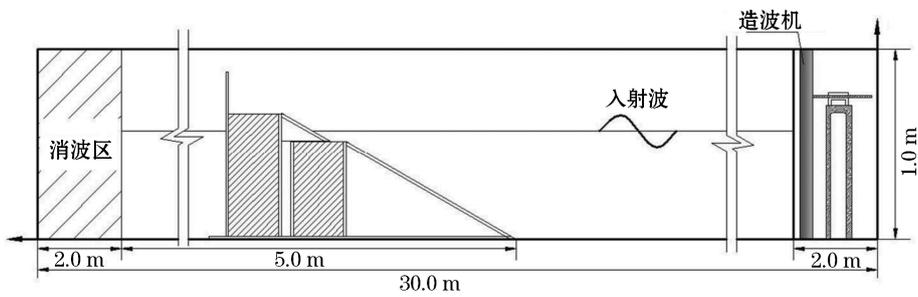


图 4 分层越浪装置整体布置示意图

Fig.4 Overall layout diagram of the OWEC device

1.1.3 数据测量采集设备

1)波高仪 在试验前期率波及正式试验过程中,采用 SG2000 型智能数据采集仪(图 5)与配套的电容式

波高仪(图 6)进行波浪要素的实时采集、监测。



图 5 SG2000 型智能数据采集仪

Fig.5 SG2000-type intelligent data acquisition instrument



图 6 波高仪

Fig.6 Wave-height gauge

2)波压力传感器 装置上下层引浪面所受的波浪压力通过 CY203 型微探头数字压力传感器(图 7)进行采集测量。该压力传感器充分利用其微处理器的处理和存储能力,可以直接输出显示存储的数字信号。该类压力传感器量程为 $-20\sim 30$  kPa,精度为量程的 0.1%。

3)数据采集处理系统 分层斜坡越浪式波能发电装置的波浪要素数据由 SG2000 智能采集仪完成数据采集,由配套的“DS-30 型数据采集处理系统软件”进行波浪要素的统计分析处理。装置上下层引浪面上的波压力经由 485-20 型数字传感器集线器(图 8)进行收集上传,利用配套软件“Smart Sensor”进行数据的实时统计分析。



图 7 压力传感器

Fig.7 Pressure sensor



图 8 485-20 型数字传感器集线器

Fig.8 485-20-type digital sensor hub

## 1.2 试验设计

### 1.2.1 相似准则及试验比尺

考虑到试验中重力起到决定性作用,因此本试验比尺按照重力相似准则<sup>[6]</sup>设计。综合考虑试验设备性能、模型尺寸及波浪条件,本试验模型长度比尺 $\lambda_l=16$ 。根据重力相似准则,可得本次试验中速度比尺为

$$\lambda_v = \lambda_l^{0.5} = 4; \quad (1)$$

时间比尺为

$$\lambda_t = \lambda_l / \lambda_v = 4; \quad (2)$$

本次试验中密度比尺  $\lambda_\rho = 1$ , 则力的比尺为

$$\lambda_F = \lambda_\rho \cdot \lambda_l^3 = 4\ 096; \quad (3)$$

压强比尺为

$$\lambda_p = \lambda_F / \lambda_A = 16. \quad (4)$$

式中,  $\lambda_A$  为面积比尺。

### 1.2.2 试验内容

对于结构设计, 极端荷载作用下的结构受力状况是判断结构安全与否的重要依据。因此, 本文将在大波高(波高为 10 cm)条件下研究模型引浪面所受波浪荷载, 分析总结相应的波压力变化规律及分布规律。具体试验工况如表 1 所示。

表 1 入射波要素一览表

Table 1 List of incident wave elements

工 况	波高/cm	周期/s	水深/cm	工 况	波高/cm	周期/s	水深/cm
01	10	0.8	30	07	10	1.2	35
02	10	1.0	30	08	10	1.4	35
03	10	1.2	30	09	10	0.8	40
04	10	1.4	30	10	10	1.0	40
05	10	0.8	35	11	10	1.2	40
06	10	1.0	35	12	10	1.4	40

试验准备阶段需对压力传感器进行率定校核, 保证实际数据与传感器输出数据间误差在 2% 以内。压力传感器采样频率设定为 50 Hz。率定结果如图 9 所示, 压力传感器输出数据的精度满足试验要求。

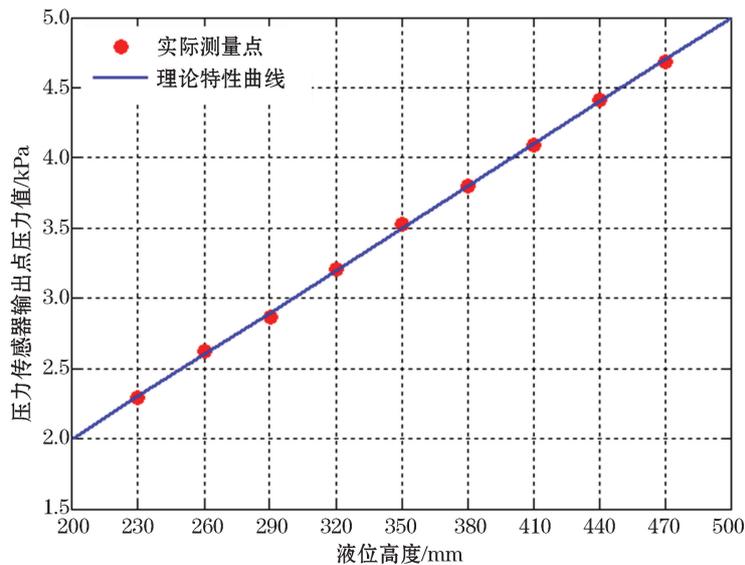


图 9 压力传感器率定曲线

Fig.9 Rating curve of the pressure sensor

## 2 试验结果及分析

试验过程中, 压力传感器采集输出的数据会出现一些明显异常的数据, 称为特异数据或可疑数据。该类数据混入到后续的数据处理及分析中将可能导致得出错误的结论, 因此在进行数据分析之前, 需对试验数据进行处理, 将特异数据从整个数据序列中剔除。利用肖维勒准则<sup>[7]</sup>对数据进行处理, 压力传感器实测数据经

肖维勒准则处理前后对比如图 10 所示,试验数据经肖维勒准则处理之后,剔除了特异数据,消除了特异数据对数据分析的影响,保证数据分析合理可靠。

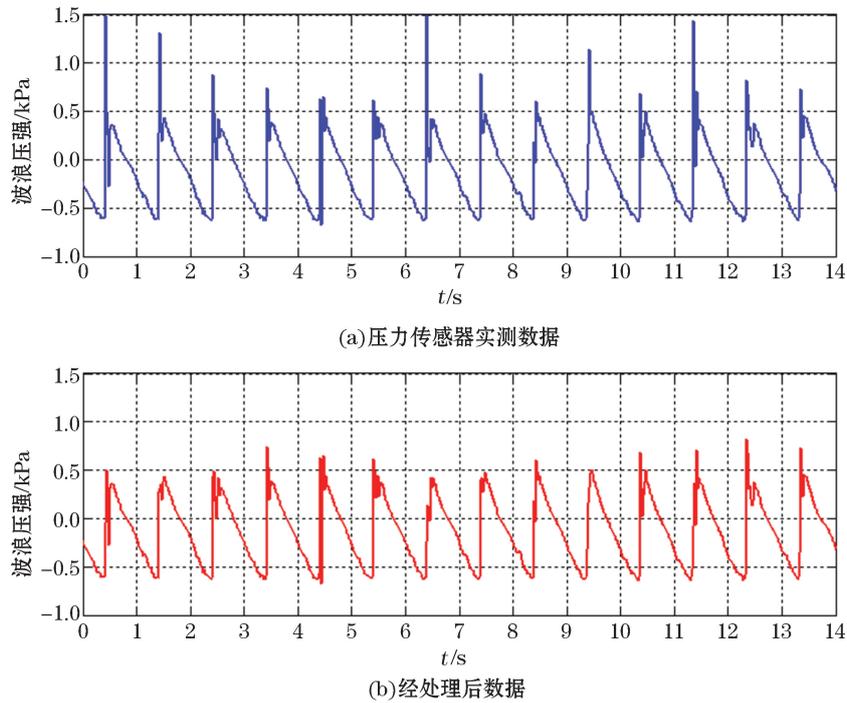


图 10 压力数据处理前后对比图

Fig.10 Comparison of the pressure before and after data processing

### 2.1 装置引浪面上的点压力

为方便对分层斜坡越浪式波能发电装置引浪面上的点压力进行分析,结合装置引浪面上的压力传感器位置分布,在装置引浪面上标记出 A,B,C,D,E,F 六个位置(图 11)。在波高 10 cm,周期 1.2 s,水深 30 cm 的条件下,装置引浪面各位置处的波浪压强时程曲线如图 12 所示。分析图 12 可知,A~F 位置处的波浪压强呈现周期性变化,周期大小与波浪周期基本一致;水面以上位置所受荷载主要为波压力,水面以下位置同时存在波压力及波吸力,水深越大,波吸力主导作用越明显。

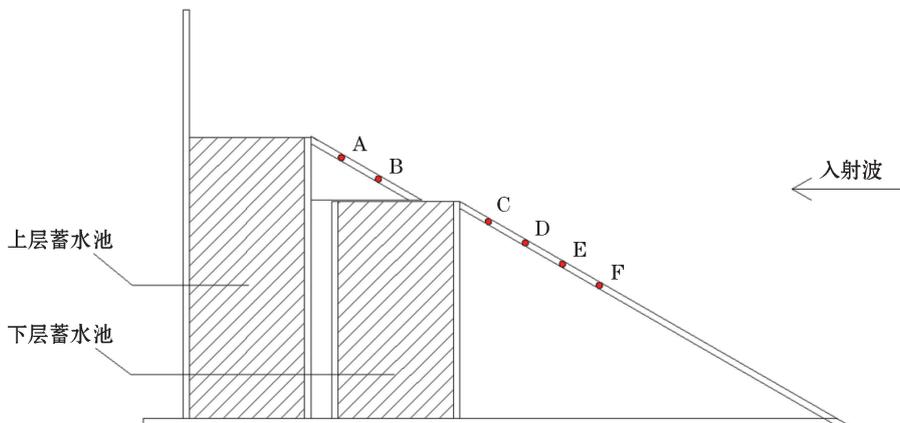


图 11 模型点压力位置示意图

Fig.11 Position of the point pressure

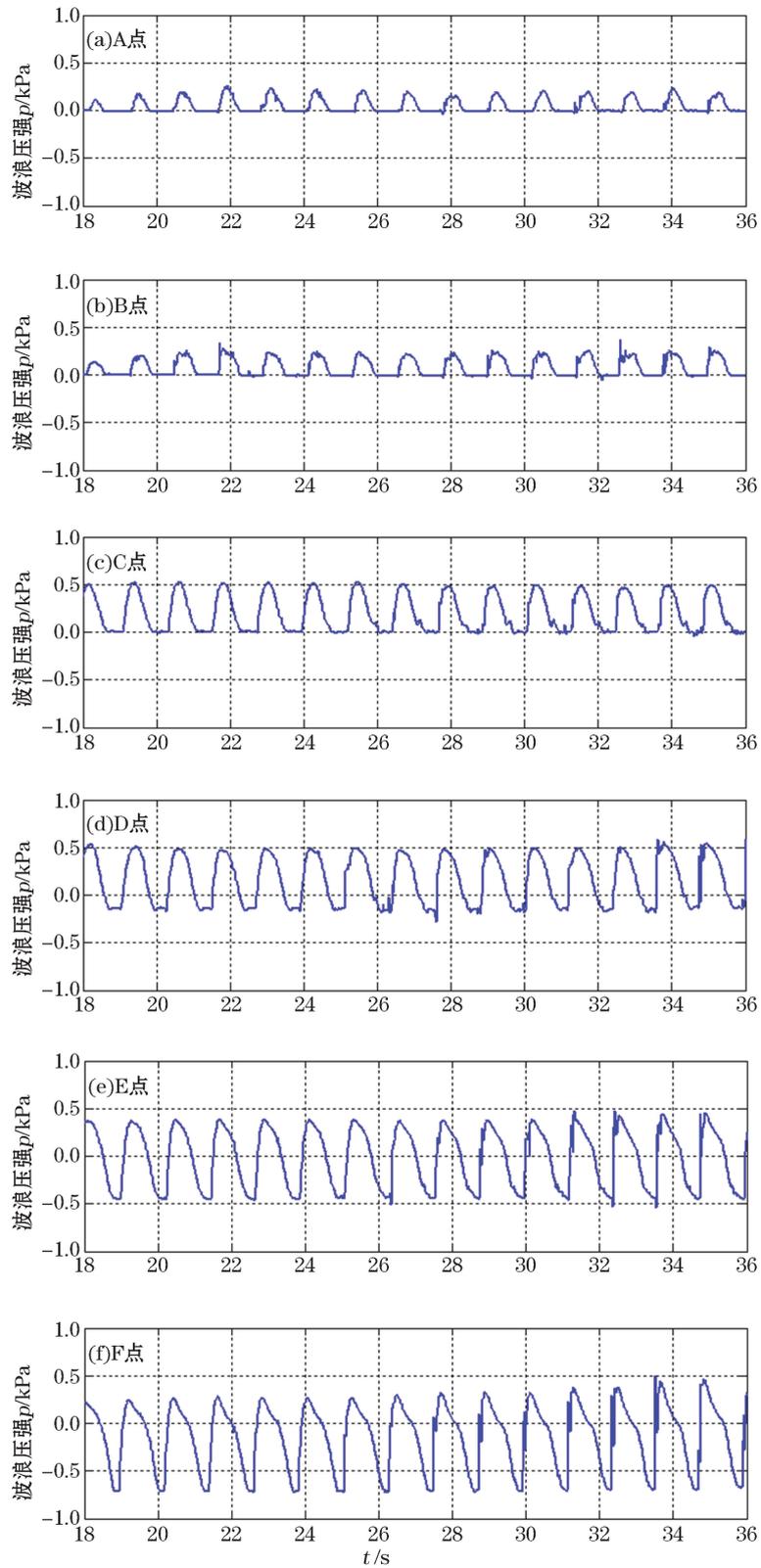


图 12 引浪面上各位置波浪压强时程曲线

Fig.12 Time history curve of the wave pressure at different positions on the wave-guide slope surface

取装置引浪面每个位置上波浪压强时程曲线的峰值(考虑到试验结果的稳定性,对每个波取其峰值,然后取前 1/3 大波峰值进行平均)作为该位置处的点压力。每个工况进行 3 次重复性试验,取 3 次点压力平均值作为该位置处的最终点压力值。图 13~图 15 分别为水深 30,35,40 cm 情况下,装置各位置处的点压力随周期变化的关系曲线。

由图 13a,14a,15a 可知,在水深为 30,35 和 40 cm 的情况下,装置上层引浪面位置 A 处的点压力均随着周期的增加呈增长趋势,且 A 处的点压力值均小于 B 处的点压力值。装置在波高较大的波况条件下,水体在装置引浪面上自下而上爬坡越浪,爬坡过程中由于能量不断的消耗及部分水体的回流,水体对引浪面的作用逐渐减弱。由图 13a 可知,在 30 cm 水深下,装置上层引浪面位置 B 处的点压力在周期为 1.0 s 时取得最大值。原因在于 30 cm 水深、波高为 10 cm 条件下,装置上层蓄水池越浪量在周期为 1.0 s 时取得最大值,越浪量越大,B 位置处的点压力也越大。由图 14a 及 15a 可知,在水深为 35 和 40 cm 的情况下,装置上层引浪面位置 B 处的点压力随着周期的增大而增大。

由图 13b 可知,在水深为 30 cm、波高 10 cm 的情况下,装置下层引浪面上位置 C 和 D 处的点压力均随着周期的增大而增大;位置 E、F 处的点压力随着周期的增大呈现先减小后增大的趋势,点压力存在最小值。当水位较低,装置下层蓄水池能够正常工作时,下层引浪面处于水面附近位置处的点压力较大,在进行装置下层引浪面设计时应重点考虑。由图 14b 可知,在水深为 35 cm 的情况下,在周期为 0.8 与 1.4 s 时,下层引浪面上 C,D,E,F 四个位置处的点压力自上往下逐渐减小;在周期为 1.0 与 1.2 s 时,4 个位置处的点压力同周期下数值差别较小。当水位恰好淹没装置下层蓄水池,下层引浪面顶端位置处的点压力较大,是结构设计时需要考虑的重点。由图 15b 可知,在水深 40 cm、波高 10 cm 的情况下,位置 C 和 D 处的点压力在周期为 1.0 s 时取得最大值,然后随着周期的增加逐渐下降;位置 E 和 F 处的点压力随着周期的增加先增大后减小,在周期为 1.2 s 时取得最大值。

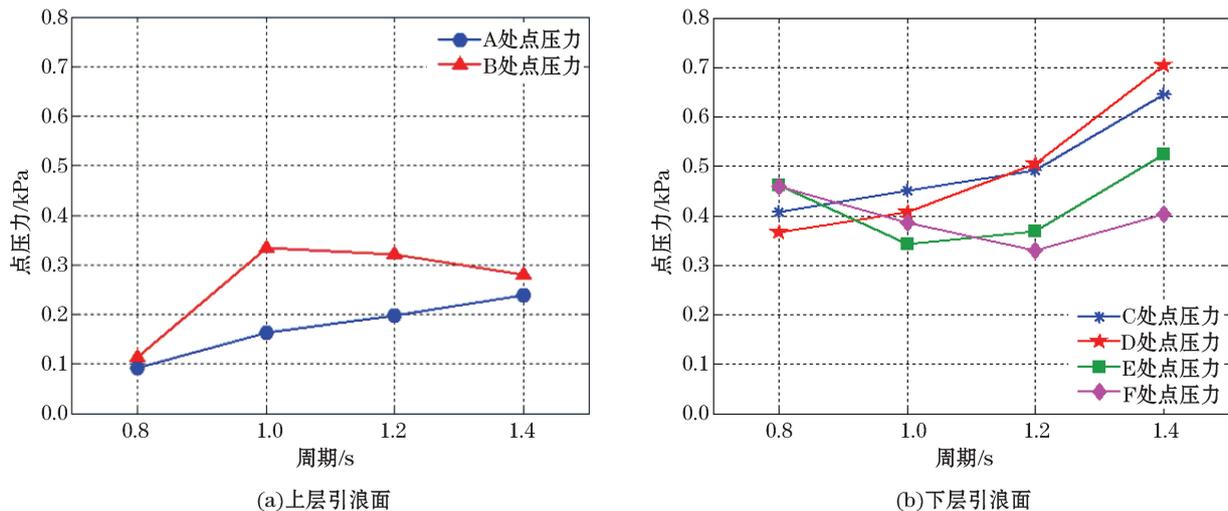


图 13 30 cm 水深下装置点压力与周期关系曲线

Fig.13 Relationship between the point pressure and the wave period for the device at a water depth of 30 cm

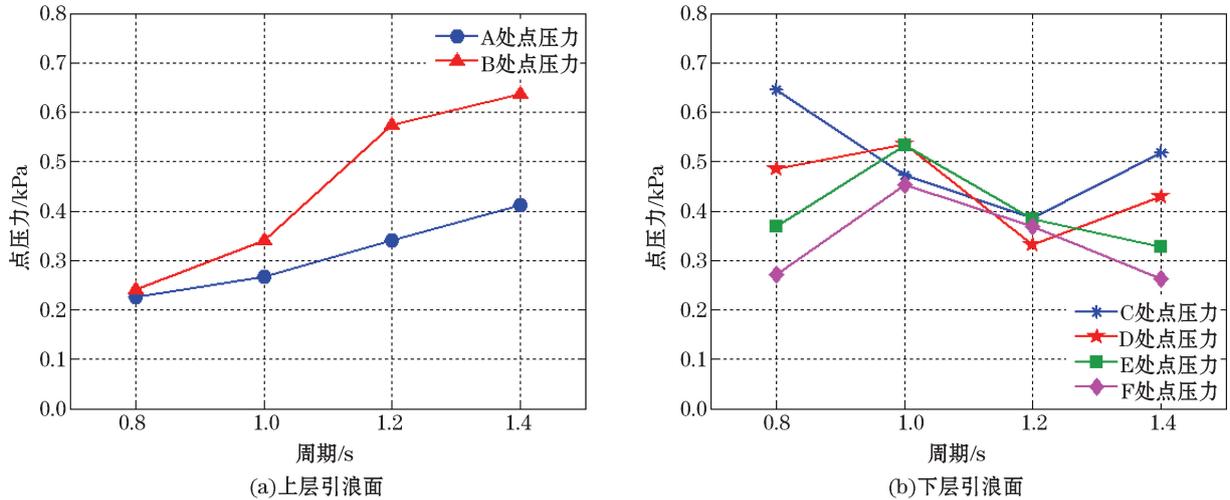


图 14 35 cm 水深下装置点压力与周期关系曲线

Fig.14 Relationship between the point pressure and the wave period for the device at a water depth of 35 cm

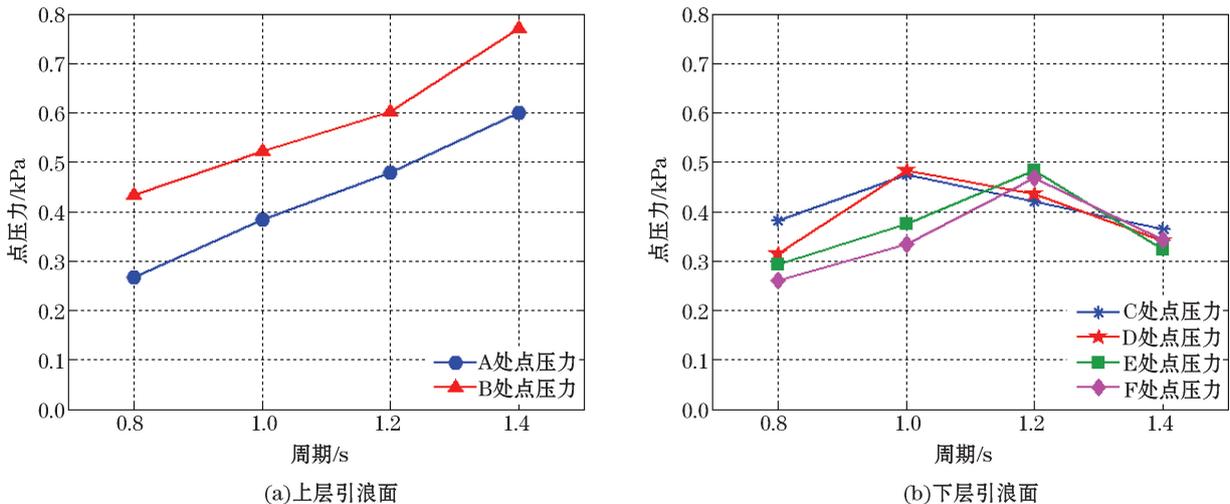


图 15 40 cm 水深下装置点压力与周期关系曲线

Fig.15 Relationship between the point pressure and the wave period for the device at a water depth of 40 cm

### 3 结 论

通过水工物理模型试验,研究了分层斜坡越浪式波能发电装置引浪面在不同波况及吃水深度情况下的受力,总结得到引浪面上波压力的变化规律及分布规律如下:

1) 分层斜坡越浪式波能发电装置引浪面位于水位以上部分受到波压力作用,水位以下部分受到波压力及波吸力交替作用,引浪面所受波浪荷载作用呈周期性变化,且变化周期与波浪周期相同;

2) 装置上层引浪面所受波浪荷载随着水深及波浪周期的增加而增大,并且上层引浪面下部受到波浪作用大于上部;

3) 不同水位条件下,波高一定,装置下层引浪面上各个位置处的点压力随着周期变化呈现出各不相同的变化规律,但下层引浪面上部所受荷载始终处于相对较高水平,因此在结构设计中下层引浪面顶部附近应增加强度,以应对波浪荷载。

## 参考文献:

- [1] YIN Y B, TOMIJI W. Principle and device of the ocean wave energy conversion[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2011. 阎耀保, TOMIJI WATABE. 海洋波浪能量综合利用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2011.
- [2] WEN F S, WU S H, WU L X, et al. Research and design of oscillating buoy wave energy conversion experimental apparatus[J]. Coastal Engineering, 2016, 35(1):1-15. 闻福三, 伍时和, 吴乐贤, 等. 波浪能振荡浮子转换方式实验装置的研究与设计[J]. 海岸工程, 2016, 35(1): 1-15.
- [3] WANG C K, LU W. Analysis methods and reserves evaluation of ocean energy resources[M]. Beijing: China Ocean Press, 2009. 王传崑, 卢苇. 海洋能资源分析方法及储量评估[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [4] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code of design and construction of breakwaters; JTS 154-1—2011[S]. Beijing: China Communication Press, 2011. 中华人民共和国交通运输部. 防波堤设计与施工规范; JTS 154-1—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [5] YANG Z Y, LIU X P. The Experimental study on overtopping discharge and wave pressure of an overtopping wave energy converter[J]. Coastal Engineering, 2016, 35(3):63-73. 杨宗宇, 刘晓鹏. 一种越浪式波能发电装置越浪量和波压力的试验研究[J]. 海岸工程, 2016, 35(3): 63-73.
- [6] LI Y Z. Engineering fluid mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006:249-255. 李玉柱. 工程流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 249-255.
- [7] LIU G L, NING M. Construction supervision for port and waterway engineering[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2011: 183-186. 刘桂林, 宁萌. 水运工程监理[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2011: 183-186.

## An Experimental Study on Structural Stress of Slope-type OWEC of Double Reservoirs

XU Guo<sup>1</sup>, JI Jun-na<sup>2,3</sup>, QU Heng-liang<sup>3</sup>, LIU Zhen<sup>3</sup>

(1.Cccc.TDC Yantai Enviromental Protection Dredging Co., Ltd., Yantai 266400, China;

2.Jihongtan Reservoir Management Section of Management Bereau of Water Diversion  
from the Yellow River into Qingdao of Shandong Province, Qingdao 266111, China;

3.Collge of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** As an important type of wave energy convertor, the slope-type overtopping wave energy convertor (OWEC) can be installed together with breakwater or revetment, which can not only turn passive energy dissipation into active energy absorption in the development and utilization of wave energy, but also enhance comprehensive benefits. In practical engineering application, the safety of the wave-guide slope surface of OWEC under the action of wave load becomes one of the most important issues. Because the influence of the slope surface of OWEC on the water resistance differs from that of the armor of breakwater or revetment, the acting force of the water body on the structure is different. The existing studies of the wave load on slope-type breakwater cannot be applied for guiding the design of the structural strength of the wave-guide slope surface of OWEC. In order to study the structural stress of the wave-guide slope surface of OWEC, hydraulic physical model experiments are conducted under different wave conditions, by which a distribution law of the point pressure and the wave force on the wave-guide slope surface of OWEC is obtained, providing theoretical guidance and design support for the structural design of OWEC.

**Key words:** OWEC; wave-guide slope surface; structural stress; experiment

**Received:** December 25, 2016