



带收缩水道的沉箱防波堤兼OWC装置 结构形式的研究*

秦辉, 王永学, 王国玉

(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: 设计一种带收缩水道的沉箱防波堤和OWC(Oscillating Water Column)波能发电装置相结合的复合结构形式, 开展物理模型试验研究。通过改变水道结构形式与OWC气室参数, 并分析实验数据, 探讨水道形式、入射波要素和OWC气室形状参数等对该复合结构工作性能的影响, 采用气室内波幅放大系数、气室顶部空气点压力和防波堤前波浪反射率作为考察参量。

关键词: 波浪能; 沉箱防波堤; 振荡水柱波能装置; 收缩水道; 气室; 物理模型试验

中图分类号: P 743.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0052-05

On caisson breakwater with contracted channel and OWC modeling

QIN Hui, WANG Yong-xue, WANG Guo-yu

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

Abstract: This paper presents a physical experiment study on caisson breakwater with contracted channel and OWC (Oscillating Water Column) modeling. The form of channel structure, factors of incident wave and shape parameters of OWC air chamber have a great influence on the work efficiency of this composite structure, how they affect the composite structure is observed in the experiment by changing them and analyzed the test date. The work efficiency of the structure is expressed by wave amplitude amplification factor, point-pressure on the top of OWC chamber and wave reflectivity before the breakwater.

Key words: wave energy; caisson breakwater; Oscillating Water Column; contracted channel; air chamber; physical experiment

能源是人类社会发展的重要基础资源, 海洋面积占地球总表面积的71%, 蕴藏着巨大的能量。海洋能包括潮汐能、波浪能、海流能、海水温差能和海水盐差能等, 其中波浪能分布最广且能流密度大, 开发利用波浪能的前景十分广阔。但由于海洋的特殊性, 当前利用波浪能发电的研究和实践存在能量分散不易集中、开发成本高、总转换效率低、装置运行的稳定性和可靠性差等各种问题。

迄今为止, 各国学者提出了多种波能转换装置, 其中OWC式波能发电装置受到广泛的重视。OWC装置是一种带有开口的半淹没气室, 波浪通过开口带动气室内水体振荡。其工作原理是先通过气室将波浪能转换成气动压力, 再通过空气透平将气动压力转换成电机转轴的轴功, 最后通过电机发电。该装置对生态环境影响小, 生产的是清洁能源, 且发电装置不与海水直接接触避免了海水的腐蚀破坏。日本在20世纪70年代末开发了

收稿日期: 2012-12-02

*基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体基金(59021001)

作者简介: 秦辉(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事沉箱防波堤兼OWC发电装置的研究。

“KAIMEI”波能发电船; 英国1990年以后制造了多个岸式OWC波能电站; 之后挪威、葡萄牙、澳大利亚等国也做了相关波能装置; 我国广东于2001年建成OWC岸式波能发电站, 并设有过压自动卸载保护、过流自动调位、水位限制、断电保护、超速保护等功能, 达到国际同期先进水平。

很多学者对OWC装置做了研究, 以提高其波能转化效率的同时降低其建造成本。Evans和Porter^[1-2]在忽略黏性的情况下, 用位势理论研究了矩形OWC的气室宽度和前墙入水深度对吸收波能的影响; Graw^[3]首次提出了将防波堤与波能转换装置结合的思想, 因为沉箱防波堤与OWC装置具有相似的尺度、相似的材料和安放位置。将防波堤与OWC波能发电装置整合为一体, 可以降低OWC波能发电装置整的制造费用, 同时也可减小防波堤前波浪的反射从而可降低防波堤结构的波浪力; Tseng^[4]等提出了一种可与防波堤结合的新型圆筒OWC气室装置, 并用模型实验研究了其工作性能; Wang^[5]等人探索了海岸坡度地形和水深变化对OWC装置捕获波能的影响; Roberts和Shepherd^[6]提出了一种在传统的斜防波堤上利用柔性管整合波浪能的装置; 国内的刘臻^[8]、史宏达^[9]设计了一种与OWC装置结合的沉箱防波堤的新型结构, 并用物理模型和数值模型对该结构做了验证。

本文在前人研究成果的基础上设计了一种带收缩水道的沉箱防波堤和OWC气室相结合的复合结构形式, 采用水工物理模型试验研究。以气室内外波幅放大系数(相对波幅)、气室顶部空气点压力以及结构物前的波浪反射率作为考察参量, 探讨了水道形式、入射波要素和气室的形状参数等对该复合结构工作性能的影响。

1 物理模型试验设计

本文设计的带收缩水道的沉箱兼OWC装置模型(M1-1)如图1所示。在传统的沉箱结构基础上将中间的隔仓改造为OWC气室及收缩水道, 两边隔仓仍为填料仓, 以保证结构的稳定性。气室顶部开口为气流出口, 气室前墙下部开口为气室的水体入口。模型由有机玻璃材料制作, 以便于试验中观察气室内的波面振荡情况。模型比尺为

1:20。

为了验证收缩水道复合结构的工作性能, 本文同时设计了无水道结构模型M2和平行水道结构模型M3, 如图2所示。M2结构没有水道, 直接将沉箱外海侧的隔仓改造为OWC气室, M3结构将收缩水道改为平行水道。2种沉箱结构除了气室位置和水道形式有所不同外, 其余尺寸均与图1的收缩水道结构相同。

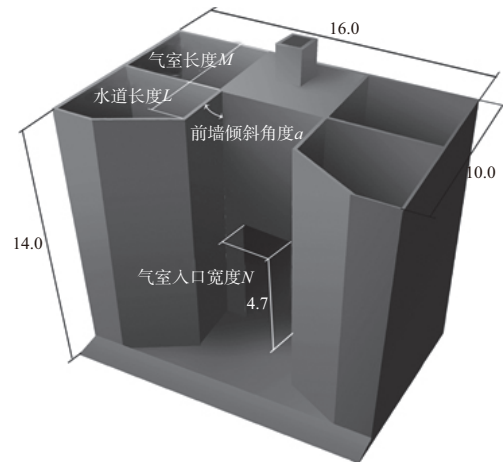
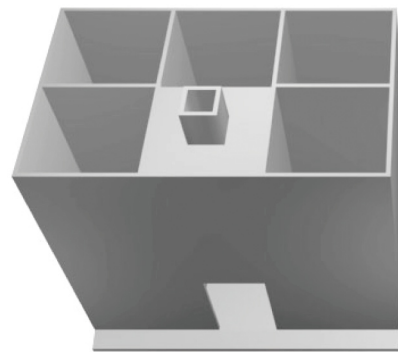
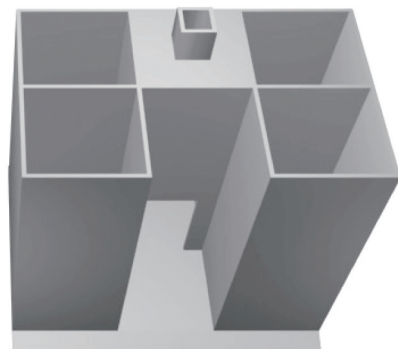


图1 带收缩水道的沉箱兼OWC装置模型(M1-1)(单位: m)



a) 无水道结构模型M2



b) 平行水道结构模型M3

图2 水道结构模型

物理模型试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的溢油水槽中进行，水槽长22 m，宽0.8 m，深0.8 m，水槽一端为液压推板式造波机，另一端为网箱消浪设备。

断面模型实验布置见图3。沉箱模型前壁距造波板距离12 m。1#浪高仪安放在气室中央位置，用来观测气室内波面振荡情况。在距模型前壁2 m处设置2个浪高仪2#和3#，2个浪高仪间距0.3 m，采用两点法分离入射波和反射波计算结构物前的波浪反射率。气室顶盖安装了8个点压力传感器，其分布位置见图4。

本研究为探索性研究，原型波要素中水深取10 m，入射波为规则波，波高为1.0, 1.5, 2.0 m，周期为5, 6, 7 s。图5为收缩水道结构模型(M1-1)实验照片。

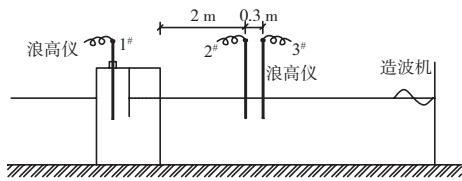


图3 断面物理试验布置

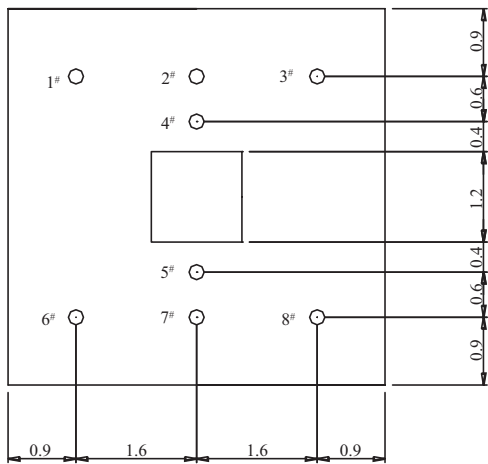


图4 气室顶部点压力传感器分布(单位: m)

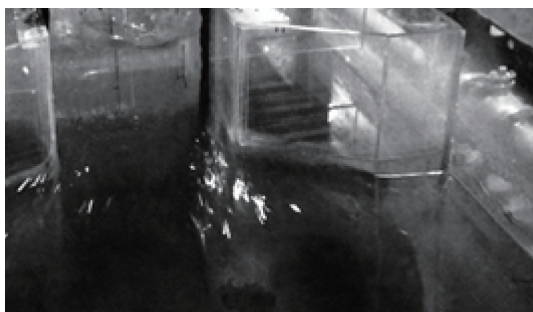
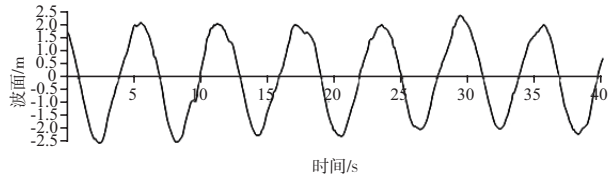
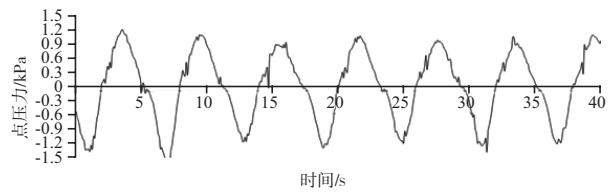


图5 收缩水道结构模型(M1-1)试验照片

图6是收缩水道结构M1-1在波高2.0 m，周期6 s时1#浪高仪和4#点压力传感器所测的波面和点压力随时间变化图。可以看出气室内波面和气室顶部点压力均随时间成周期性变化，变化周期与入射波周期相同。此外，波面历时曲线和点压力历时曲线相位不同步，有1/4周期的相位差。



a) 气室内波面的时间过程线



b) 4#传感器所测点压力的时间过程线

图6 波面、点压力历时曲线 (H=2.0 m, T=6 s)

图7为不同波高与周期情况下M1-1模型气室顶部1#~8#监测点所测的点压力。在波高和周期较小时，各测点所测的点压力值基本呈对称分布，压力值波动尺度较小；波高和周期增大时点压力分布的不均匀性增大，各个波况下8个传感器所测得的各点点压力值及8个测点的点压力平均值 \bar{P} 见表1。为便于各个沉箱形式之间波能吸收性能的对比，下文中的点压力均取8个测点点压力平均值 \bar{P} 。

本文用于分析气室工作性能的参量有相对波幅 λ (又称波幅放大系数, $\lambda=A/A_0$, A 为气室中央水面的波幅, A_0 为入射波波幅)、气室顶部8个点压力传感器所测得的点压力平均值 \bar{P} 、结构物前波浪反射率 R (采用两点法计算)。

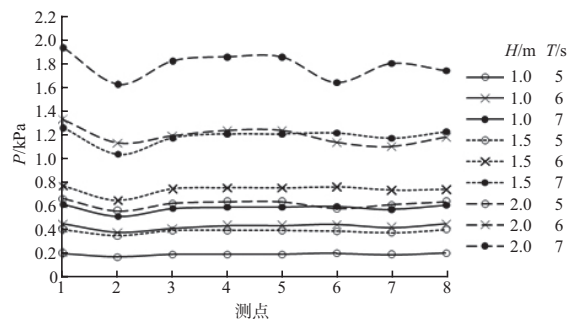


图7 气室顶部点压力分布

表1 不同波况情况下气室顶部点压力及8个测点压力平均值 \bar{P}

H/m	T/s	P_1/kPa	P_2/kPa	P_3/kPa	P_4/kPa	P_5/kPa	P_6/kPa	P_7/kPa	P_8/kPa	\bar{P}/kPa
1.00	5.00	0.22	0.19	0.21	0.22	0.22	0.23	0.21	0.23	0.22
1.00	6.00	0.47	0.40	0.43	0.45	0.45	0.46	0.44	0.47	0.45
1.00	7.00	0.63	0.53	0.59	0.60	0.60	0.61	0.59	0.62	0.60
1.50	5.00	0.42	0.37	0.41	0.41	0.41	0.41	0.39	0.42	0.41
1.50	6.00	0.78	0.66	0.76	0.76	0.76	0.77	0.75	0.75	0.75
1.50	7.00	1.26	1.04	1.17	1.21	1.21	1.21	1.17	1.23	1.19
2.00	5.00	0.67	0.57	0.64	0.65	0.65	0.59	0.63	0.65	0.63
2.00	6.00	1.33	1.13	1.19	1.23	1.23	1.14	1.10	1.18	1.19
2.00	7.00	1.92	1.62	1.81	1.84	1.84	1.63	1.79	1.73	1.77

2 试验结果分析

2.1 水道形式对波能转化效果的影响

本研究采用平均点压力 \bar{P} 来反映OWC发电装置的波能吸收能力, 气室内的波幅放大系数 A/A_0 (相对波幅) 反映OWC发电装置的波能转换效率。

图8, 9给出了不同沉箱结构形式下OWC发电装置的波幅放大系数 A/A_0 与平均点压力 \bar{P} 随波浪周期的变化, 采用波高1.5 m, 周期5, 6, 7 s时的数据收集结果。

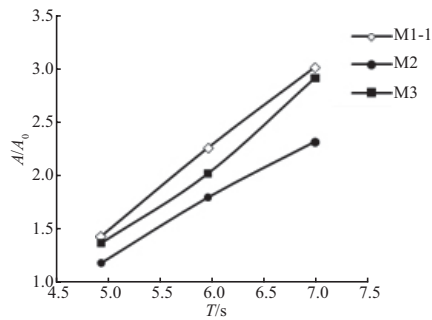


图8 相对波幅随周期变化曲线 ($H=1.5\text{ m}$)

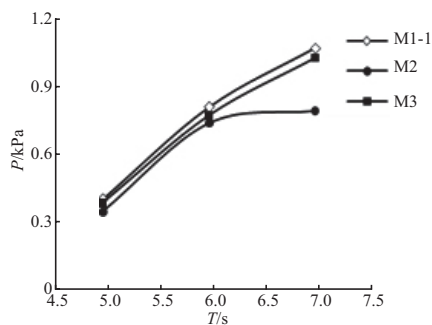


图9 点压力 \bar{P} 随周期变化曲线 ($H=1.5\text{ m}$)

从图9中可以看出水道结构形式对波能转化效果有明显的影 响, 收缩水道结构M1-1的波幅放大

系数 A/A_0 与平均点压力 \bar{P} 均大于平行水道结构M2和无水道结构M3, 即收缩水道结构M1-1工作性能要高于平行水道结构M2, 无水道结构M3的工作性能最低。

2.2 入射波要素对收缩水道结构形式M1-1的波能转化效果影响

图10, 11给出了波高和周期对收缩水道结构M1-1工作性能的影响。从图中可以看出, 波高一定时, 相对波幅和点压力随周期变化的规律基本一致, 均随周期的增大而增大, 可以得知实验装置对长周期波的吸收效率更高。周期一定时, 相对波幅随波高的增大而减小, 点压力随波高的增大而增大, 可见较大的波高产生了较大的能量损耗, 但转换的波能总量却增大。

入射波作用于OWC发电装置过程中, 能量一部分被装置吸收, 另一部分则通过反射波发散出去, 因此反射率的变化规律间接反映了装置波能转换效率的变化规律。图12反映出, 入射波周期越大波高越小, 结构物前波浪反射率越小, 结构的波能转换效率越高, 进一步说明了相对波幅用于表征装置波能转换效率的可靠性。

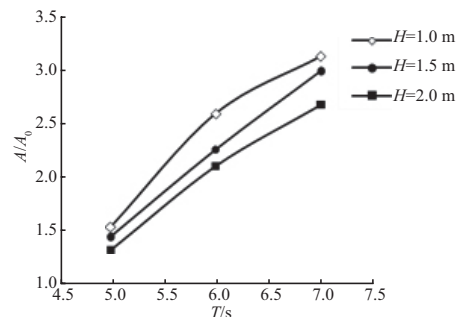


图10 气室内相对波幅随周期变化曲线

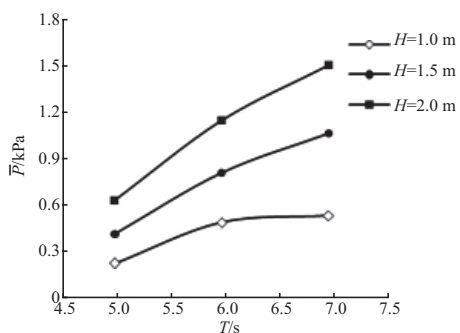


图11 点压力 \bar{P} 随周期变化曲线

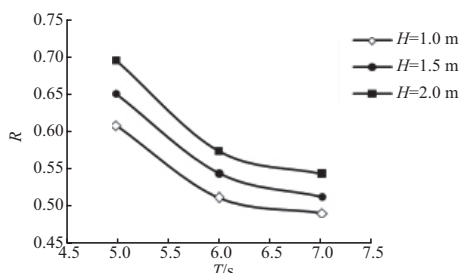


图12 结构物前波浪反射率随周期变化曲线

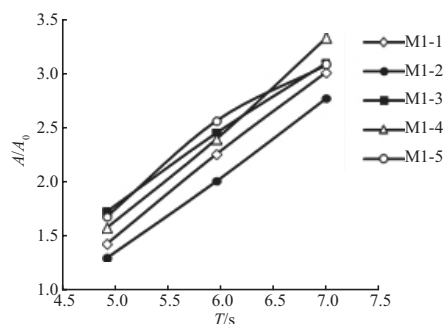


图13 相对波幅随周期变化图 ($H=1.5\text{ m}$)

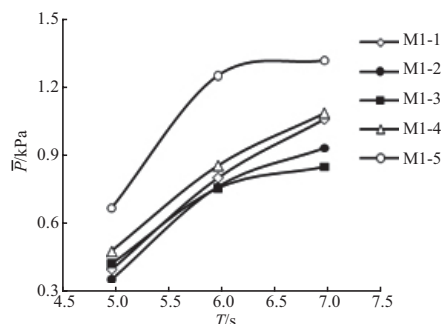


图14 点压力 \bar{P} 随周期变化图 ($H=1.5\text{ m}$)

2.3 气室形状参数对收缩水道结构形式M1的波能转化效果影响

为进一步讨论气室形状参数对收缩水道结构工作性能的影响，试验中在模型M1-1的基础上改变水道长度、气室长度、前墙倾斜角度、气室入口宽度得到另外4种结构形式M1-2 ~ M1-5，见表2。图13和表3给出了5种结构形式下OWC装置的波幅放大系数 A/A_0 、平均点压力 \bar{P} 与反射系数 R 的比较，采用波高1.5 m，周期5, 6, 7 s时的数据采集结果。由图14和表3的试验结果，对4种结构形式M1-2 ~ M1-5的工作性能与M1-1进行了比较分析。

结构形式M1-2与结构形式M1-1相比，其水道长度 L 减小后工作性能降低。为此可以得出在一定范围内增加水道长度可增强气室内外水体的联动性，波幅和点压力增大，沉箱结构前的波浪反射率降低，装置波能转换能力增强。

表2 试验工况

工况	水道长度 L/m	前墙倾斜角度 $\alpha/(\text{°})$	气室长度 M/m	气室入口宽度 N/m
M1-1	3.0	90.0	5.0	3.0
M1-2	2.0	90.0	5.0	3.0
M1-3	3.0	90.0	4.0	3.0
M1-4	2.0	81.9	5.0	3.0
M1-5	3.0	90.0	5.0	5.0

结构形式M1-3与结构形式M1-1相比，其气

表3 气室前墙反射率计算结果

工况	M1-1	M1-2	M1-3	M1-4	M1-5
$R/\%$	54.29	59.14	53.23	49.84	44.29

室长度 M 减小后，波幅放大系数 A/A_0 略有增加，平均点压力 \bar{P} 略微增大后减小，反射率 R 略有减小。当气室长度 M 减小后，气室内水体和气体的体积同时减小，在同样的入射波条件下气室内水体的运动幅值增大，气体的运动幅度也相应增大，但由于气室内气体的总体积减小，所以气流速度在短周期情形略微增大而长周期情形降低，点压力曲线先上升后降低。气室长度对装置工作性能的影响和入射波周期相互作用，因此在实际工程中应在试验的基础上根据波能电站选址当地的海况条件合理的选择气室长度。

结构形式M1-4与结构形式M1-1相比，前墙倾斜角度 $\alpha=81.9^\circ$ 时工作性能略有提高。结构形式M1-4倾斜的前墙可以汇聚气室内水体的动能，催化水体能量转化为空气能量，进而提高装置的波能转换效率。

结构形式M1-5与结构形式M1-1相比，其气室入口宽度 N 增大后，工作性能有较大的提高，表现在平均点压力 \bar{P} 明显增大，反射系数明显减小。

(下转第62页)