



桩基双挡板透空式防波堤 水平波压力试验与计算

虞丹君¹, 冯卫兵¹, 李艳波², 杨斌^{1,3}

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092;
3. 国家海洋局第二海洋研究所 工程海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 通过物理模型试验的方法, 采用不规则波研究影响两侧挡板透空式防波堤水平波压力的主要因素及其规律性。在不越浪的前提下, 分别对挡板不开孔、错位开孔和不错位开孔3种结构形式进行系统的物理模型试验, 并分析总结无量纲因素即挡板相对入水深度和波坦对水平波压力的影响。在上述研究成果的基础上, 提出了较为实用的透空式防波堤水平波压力计算公式, 对透空式防波堤的研究和设计具有较高参考和借鉴价值。

关键词: 透空式防波堤; 波压力; 水平力

中图分类号: TV 149.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0019-06

Experimental study and calculation of horizontal wave pressure of piled baffle penetrated breakwater

YU Dan-jun¹, FENG Wei-bing¹, LI Yan-bo², YANG Bin^{1,3}

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China;

3. Key Laboratory of Engineering Oceanography, The Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Based on the physical modeling experiment, we study the main factors effecting the horizontal wave pressure of the penetrated breakwater with both-sides baffles and their regularities under the irregular wave. Without the overtopping wave, we carry out systematic physical model experiments respectively for the three kinds of structures, i. e. the structure without hole baffle, the one with staggered hole baffle and the one with unstaggered hole baffle, to analyze the influences of horizontal wave pressure effected by the dimensionless factors, which are the relative water depth of the baffles and the wave length-height ratio. On the basis of the research results above, more practical breakwater wave pressure formula are presented, which may serve as reference for the research and design of the penetrated breakwater.

Keywords: penetrated breakwater; wave pressure; horizontal force

透空式防波堤是把防浪结构安设在桩、柱支撑上, 下部可以透水的新型防波堤结构形式, 与传统实体防波堤相比, 透空式防波堤具有结构简单、造价低、施工方便、环境影响小等优点, 尤其适用于软土地基。

许多学者对透空式防波堤结构受力问题进行了大量的研究, 并根据不同的结构形式和模型简化方法得出了多种研究成果^[1-7], 但是对有前后挡浪板且有水平面板的透空式防波堤的结构受力研究还比较少。挡板式透空防波堤的垂直挡板是主

收稿日期: 2014-06-04

作者简介: 虞丹君(1989—), 女, 硕士研究生, 从事海洋、海岸工程研究。

要的挡浪结构,通常被置于波能集中的水深范围内。在外海波浪作用下,挡板式透空防波堤受到的外力主要是水平力和上托力。透空式防波堤消浪效果越好,透浪系数越小,同时挡板受到的水平波浪力往往较大,可能会引起挡板的局部破坏甚至整个透空堤结构的破坏或失稳。一般情况下,上托力能被结构自重抵消一部分,影响结构安全稳定的主要因素还是波浪引起的水平作用力。

因此,本文针对在波浪要素不同、前后挡板入水深度不同、前后挡板结构形式不同的情况,着重研究透空式防波堤的水平受力问题。此外,目前专门针对透空式结构水平力的计算方法不多,《海港水文规范》^[8]对直墙式和斜坡式建筑物有明确的计算公式,一般在计算中采用与直立实体式建筑物上波浪荷载相类似的方法处理。据此,本文提出了较为实用的透空式防波堤水平波压力的计算公式,对透空式防波堤的研究和设计具有较高参考和借鉴价值。

1 模型试验

1.1 试验设备和仪器

物理模型试验在河海大学港航动力实验室波浪水槽内进行,水槽长 60 m、宽 1 m、高 1.2 m。水槽来波方向安装有液压式推板造波机,末端铺设消能缓坡,以减小和消除波浪反射影响。水槽中后部的试验段用隔板将水槽分隔等间距的两部分,取外侧的 50 cm 水槽宽度作为有效试验宽度进行模型试验,以减少透空堤挡板产生的反射波传播到造波板引起的二次反射影响。波高和波浪力的量测和采集均采用水利部北京水科院研制的 DJ800 型水工试验系统及其配套的传感器。

在不越浪条件下,采取不规则波进行物理模型试验。试验模型采用双挡浪板结构形式,前后挡浪板采用 3 种结构:不开孔、前后错位开孔和前后不错位开孔(每块小挡板高度为 5 cm,宽度

为 50 cm,开孔直径为 3 cm,均匀布置在小挡板上,开孔率为 14%)。上部结构底高程取 40 cm,与设计水深一致,挡浪墙高程取 75 cm,前挡浪板入水深度取 5~30 cm,后挡浪板入水深度取 0~30 cm,在挡浪墙和前挡浪板上均匀布置 9 个压力测点,在后挡浪板上均匀布置 6 个电压力测点(图 1)。

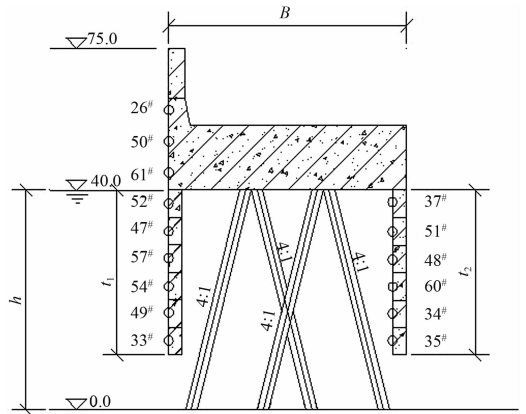


图 1 防波堤断面结构模型(单位:cm)

1.2 试验参数

取堤宽 $B=43.3$ cm,采用不规则波进行试验,其入射波有效波高 H_s 保持 10 cm 不变。试验主要通过改变前后挡板入水深度 t 、有效波长 L_s 、有效周期 T_s 等影响因素来分析挡板式透空堤的水动力特性。具体的试验参数见表 1。

表 1 波要素组合

H_s/cm	L_s/cm	堤前水深 h/cm	T_s/s	H_s/L_s
10	150	40	1.02	0.27
	200		1.23	0.20
	300		1.68	0.13
	400		2.15	0.10

1.3 试验方法和试验组次

试验的期望谱选用改进的 JONSWAP 谱。试验采用间隙式生波方式,以消除波浪的多次反射,每组波列的持续时间约为 5.0~6.0 min,波数约为 120~150 个,然后待水面平静后继续进行下一组试验。试验总计 135 组,为保证试验数据的稳定性,每组试验重复 3 次。

2 试验结果及分析

2.1 挡板式透空堤堤前波浪形态

挡板式透空堤的结构形式不同于实体式防波堤, 其挡板入水深度的变化会影响入射波浪的自由传播, 从而在堤前产生不同的波浪形态, 而不同的波浪形态又会使波浪与建筑物的相互作用产生显著的差异。因此在分析挡板式透空堤垂直挡板点压强分布前, 必须要弄清堤前波浪形态。《海港水文规范》^[8]将堤前波浪形态划分为立波、近破波和远破波 3 种, 并给出了各自的产生条件。在本次试验中, 入射波的最大波陡为 1/15, 在堤前没有发生任何波浪破碎现象。试验现象表明, 波浪传至透空堤时, 一部分波浪遇到挡浪墙和前挡浪板发生反射; 由于挡浪板底下透空, 还有一部分波浪从前挡板下部穿透后, 在堤身内产生较强的紊动作用。在前挡浪板迎浪面, 反射波与入射波大小不同, 传播方向相反, 入射波高和反射波高叠加之后在堤前形成较大的合成波高, 这种波态可称为不完全立波波态或称部分立波波态。

2.2 水平点压强分布规律

不规则波对透空堤结构垂直挡板上的水平点压强作用具有随机性, 因此在分析垂直挡板上水平点压强分布时, 需要研究水平点压强的统计分布, 以得到不同累计率下的水平点压强换算关系。对透空堤水平点压强峰值的统计分布进行检验, 发现其服从 Weibull 分布, 从而得到满足 Weibull 分布的各累计率压强换算关系见表 2 (以 52[#]点压强为例), 然后取特征点压强分析变化规律。

表 2 满足 Weibull 分布的水平点压强累积率换算

P/%	1	2	5	10	13	30	50
实测统计值/kPa	2.37	2.14	1.82	1.55	1.44	1.05	0.75

2.2.1 水平点压强随波坦变化规律

在前后挡板不开孔的情况下, 采用相对入水深度 t/h 为 0.75 的前后挡板, 分析前后挡板

上迎浪面的波压强随波坦的变化规律, 见图 2 (其中 P_s 为压强峰值 1/3 大值的平均值)。由图 2 可知, 对于前挡板, 静水面以上各点压强随着波坦的增大而减小, 静水面以下各点压强随着波坦的增大而增大; 对于后挡板, 各点压强随着波坦的增大而增大; 说明在有效波高一定的情况下, 波长越小, 在透空堤前反射越厉害, 越容易形成立波, 从而造成静水面以上波压力增大, 由于反射对波能的消耗, 静水面以下各点压强则逐渐减小。

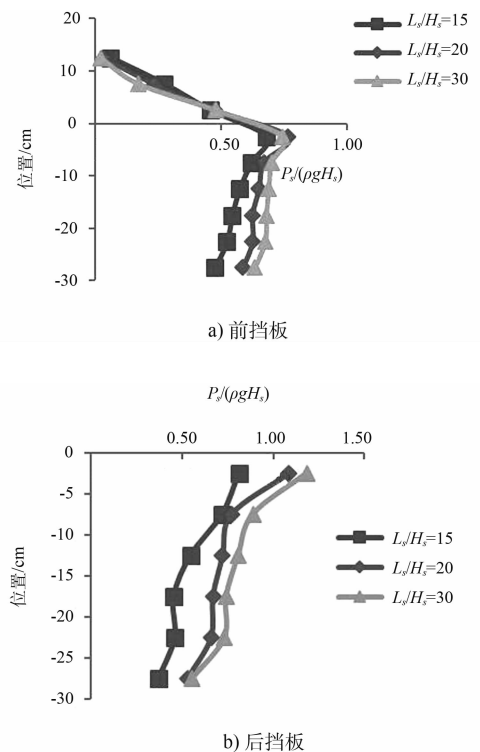


图 2 $t/h = 0.75$ 时前后挡浪板相对点压强随波坦的变化

2.2.2 水平点压强随相对入水深度变化规律

1) 前后挡浪板入水深度一致。

在前后挡板不开孔的情况下, 采用波长 200 cm 的不规则波, 分析不同入水深度时的前后挡板迎浪面的波压强分布 (图 3)。由图 3 可见, 前后挡板迎浪面相对波压强随相对入水深度的减小而减小, 这是因为入水深度越小, 透空堤的挡浪效果越差, 波浪透过前挡板传递到堤后的能量就越多。

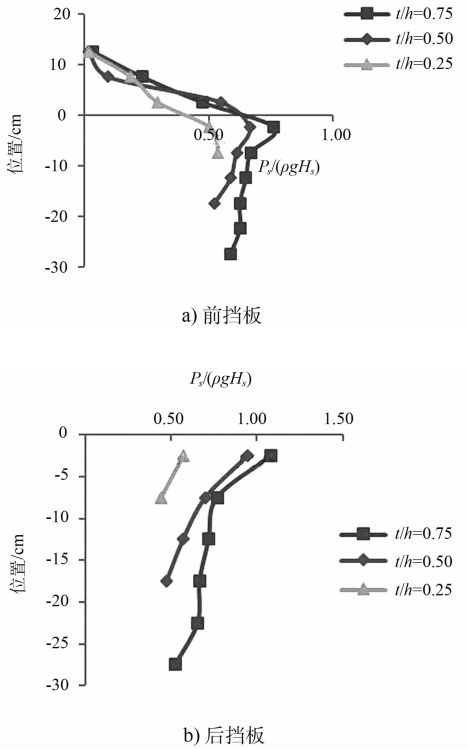


图3 $L_s/H_s = 20$ 时前后挡浪板相对波压强随入水深度的变化

2) 前后挡浪板入水深度不一致。

在前后挡板不开孔的情况下，采用波长 200 cm 的不规则波，分析在后挡板入水深度不变时，前挡浪板不同相对入水深度时其迎浪面的波压强分布（图 4），其中 t_1 为前挡板入水深度， t_2 为后挡板入水深度。由图 4 可见，当后挡浪板相对入水深度一定时，前挡板迎浪面相对点压强随前挡浪板相对入水深度的减小而减小，这是因为前挡浪板相对入水深度越小，透空堤的挡浪效果越差，波浪透过前挡板传递到堤后的能量就越多。

在前后挡板不开孔的情况下，采用波长 200 cm 的不规则波，分析在前挡板入水深度不变的情况下，后挡浪板不同相对入水深度时的前后挡板上迎浪面的波压强分布（图 5、6）。由图 5、6 可见，当前挡浪板相对入水深度一定时，前后挡板迎浪面相对波压强随后挡浪板相对入水深度的减小而减小，这是因为后挡浪板相对入水深度越小，透空堤的挡浪效果越差，波浪透过前挡板传递到堤后的能量就越多。但是，对比图 5、6 可以发现，随着前挡浪板相对入水深度的减小，相对波

压强随后挡浪板相对入水深度的减小而减小的趋势越来越不明显，说明对相对波压强影响较大的是前挡浪板的入水深度，前挡浪板对透空堤的挡浪效果起到重要作用。

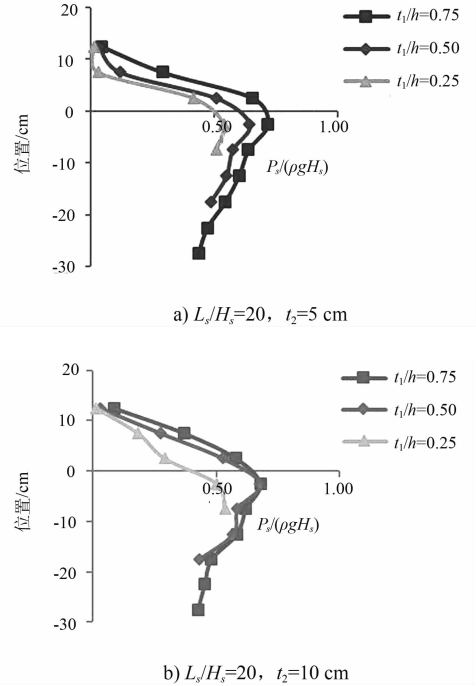


图4 前挡浪板相对波压强随 t_1 的变化

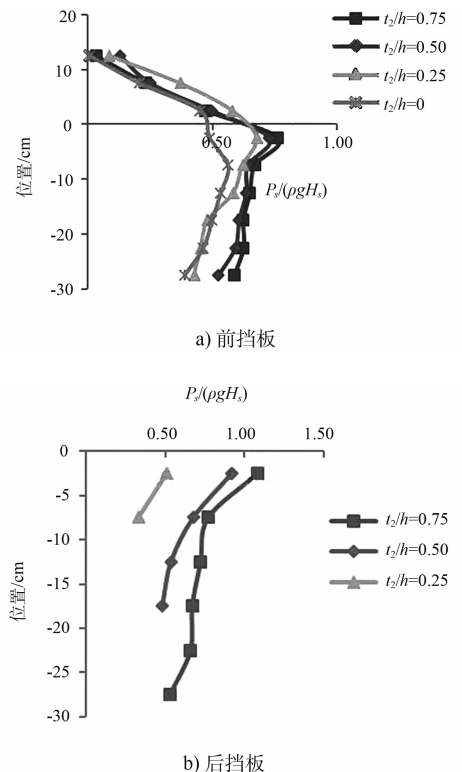


图5 $L_s/H_s = 20$ 、 $t_1 = 30$ cm 时前后挡浪板相对波压强随 t_2 的变化

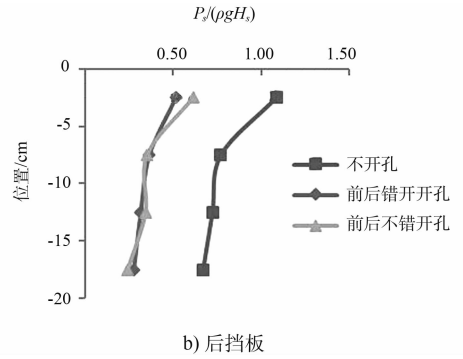
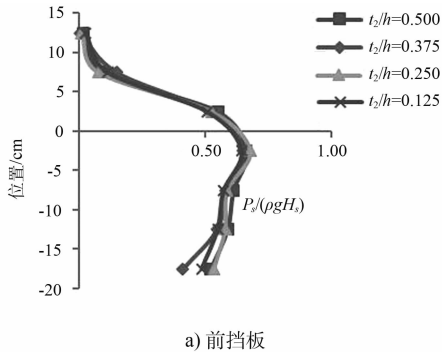


图 7 $t/h = 0.75$ 时前后挡板相对波压强随不同结构形式的变化

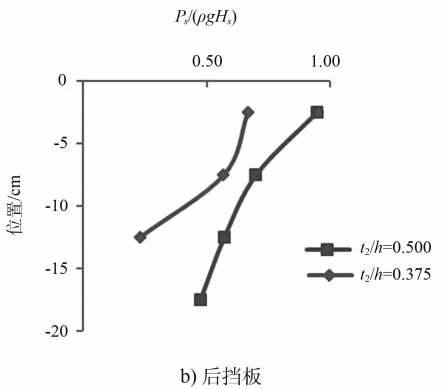
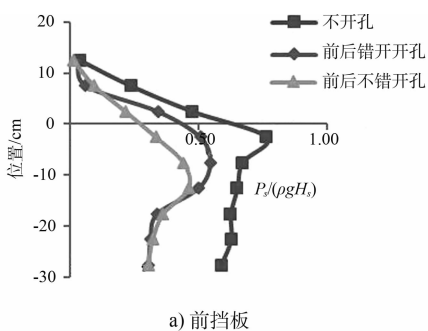


图 6 $L_s/H_s = 20$ 、 $t_1 = 20$ cm 时前后挡板相对波压强随 t_2 的变化

2.2.3 水平点压强随挡板结构形式的变化规律

采用波长为 200 cm 的不规则波, 在相对入水深度为 0.75 时, 分析前后挡板在不开孔、前后错位开孔、前后不错位开孔的情况下, 前挡板上迎浪面的波压强分布 (图 7)。由图 7 可见, 前后挡板迎浪面在不开孔情况下的相对波压强要明显大于在开孔情况下的相对波压强。对于前挡板, 相对波压强的分布规律为: 不开孔 > 前后错位开孔 > 前后不错位开孔。这说明在挡板开孔情况下, 当前后挡板错位开孔时, 波浪在透过透空堤的过程中, 所消耗的波能较大, 此时消浪效果较好。



3 水平力计算方法

目前专门针对波浪对透空式结构水平力的计算方法不多, 一般在计算中采用与波浪对直立实体式建筑物上波浪荷载相类似的方法处理。当前挡板入水深度为 30 cm 时, 挡板下部透过的波浪很少, 可以类似于波浪与直立式建筑物的相互作用。通过试验值与各个理论公式的比较, 发现合田良实公式^[1]与试验值吻合得最好。本文考虑以合田良实公式作为计算透空结构时的波压力的基本公式。合田良实公式为 (静水面上波压强零点位置 $H_0 = 1.5H$, 其中 H 为直立实体堤前立波波峰面高度, 本文 H 采用最大波高来计算):

1) 静水面处波压强:

$$P_1 = \alpha \rho g H \quad (1)$$

$$\alpha = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \quad (2)$$

2) 海底面处波峰压力强度值:

$$P_2 = \frac{P_1}{\text{ch}(2\pi h/L)} \quad (3)$$

在其基础上添加系数进行公式修正, 设定静水面点压强公式为:

$$P_1/(\rho g H) = K [P_1/(\rho g H)]_{\text{合田}} \quad (4)$$

假设 K 与波坦 L_s/H_s 、前挡浪板相对入水深度 t_1/h 、后挡浪板相对入水深度 t_2/h 之间成线性关系 (由于本文挡板开孔率为定值, 因此未将开孔情况考虑进拟合公式)。初步假设 K 的形式为:

$$K = a_4 \left(1 + a_1 \cdot \frac{L_s}{H_s} \right) \left(1 + a_2 \cdot \frac{t_1}{h} + a_3 \cdot \frac{t_2}{h} \right) \quad (5)$$

根据前后挡浪板不开孔时的试验数据, 计算

得到水平力计算公式为:

1) 静水面处点压强:

$$P_1/(\rho g H) = \left(1 - 0.011 \frac{L_s}{H_s}\right) \left(1 + 0.45 \frac{t_1}{h} + 0.15 \frac{t_2}{h}\right) \cdot \left[(P_1/(\rho g H)) \right]_{\text{合田}} \quad (6)$$

2) 水底处点压强按照静水面处点压强同比例缩小:

$$P_2/(\rho g H) = \left(1 - 0.011 \frac{L_s}{H_s}\right) \left(1 + 0.45 \frac{t_1}{h} + 0.15 \frac{t_2}{h}\right) \cdot \left[(P_1/(\rho g H)) \right]_{\text{合田}} \quad (7)$$

由此计算得到的点压强试验值与计算值比较见图8, 两者吻合得较好, 其相关系数为0.88。从计算结果可以看出: K 的计算式是比较合理的, K 与波坦 L_s/H_s 、前挡浪板相对入水深度 t_1/h 、后挡浪板相对入水深度 t_2/h 之间成线性关系。该公式在 $L_s/H_s = 15 \sim 40$, $t_1/h = 0.125 \sim 0.75$, $t_2/h = 0 \sim 0.75$ 条件下适用。

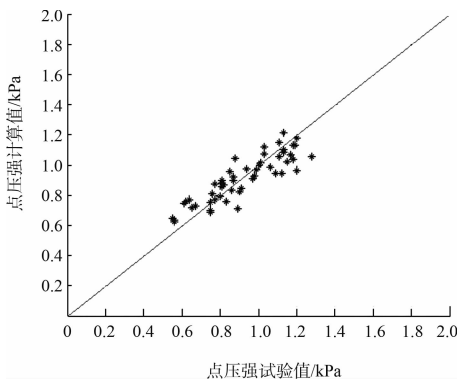


图8 前后挡浪板不开孔时, 静水面处点压强试验值与计算值比较

4 结论

1) 水平力与波浪要素、前后挡板相对入水深度、结构形式都有关, 其中前挡浪板相对入水深度是影响相对点压强分布的主要因素。

2) 前后挡浪板开孔与否对其水平相对点压强也有很大的影响。

3) 修正后的公式均可以较好地与试验值相吻合, 说明假设可行, 修正公式具有较好的精确度和推广性。

参考文献:

- [1] Goda Y. Random seas and design of maritime structures[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2000.
- [2] 盛祖荫, 过达. 深水桩基码头波浪力的计算[J]. 华东水利学院学报, 1984 (2): 54-64.
- [3] 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): 16-35.
- [4] 宋初, 白立兴. 波浪对离岸透空式码头上部结构的作用[J]. 港工技术, 1997 (4): 5-13.
- [5] 董霞. 桩基挡板透空式防波堤结构波压力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [6] 邵杰. 不规则波作用下挡板式透空堤水动力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [7] 王伟. 单挡板透空式防波堤透浪系数和波浪力研究[D]. 南京: 河海大学, 2011.
- [8] JTJ/T 213—1998 海港水文规范 [S].

(本文编辑 武亚庆)

著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。