



规则波作用下挡浪板式防浪墙波浪力研究

范可, 刘子涵, 陈达

(河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过物理模型, 对挡浪板式防浪墙的波浪力进行研究。研究表明: 规则波作用下挡浪板式防浪墙的水平波浪力和浮托力随时间变化呈双峰现象, 水平总波浪力与浮托力随波高、水深的增大而增大, 随波坦的增大先减小后增大; 挡浪板式防浪墙挡浪板倾角的不同不影响波压力的分布规律, 相同工况下, 波浪力随倾角的减小而增加。据此, 得出不同倾角下水平波压力换算系数公式, 并对工程设计提出相应建议。

关键词: 规则波; 挡浪板; 防浪墙; 波浪力; 物理试验

中图分类号: U 656.2⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)10-0007-06

On wave forces of wave wall with wave boards under action of regular wave

FAN Ke, LIU Zi-han, CHEN Da

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper carries out a research on the wave forces of wave wall with wave boards by physical model. The research results show that the horizontal wave force and uplift pressure presence the double peak phenomena under the action of regular wave; the total horizontal wave force and uplift pressure increase with the increase of wave height and water depth, and decrease at first and then increase along with the increase of wave smoothness. Different angles of wave walls with wave boards have nothing to do with the distribution of the wave pressures, and under the same work condition, wave forces increase with the decrease of dip angle. Hereby, we find the formulae for the horizontal wave pressure coefficient under different angles, and can give suggestions for the engineering design.

Keywords: regular wave; wave boards; wave wall; wave force; physical formula

斜坡堤是海岸工程中普遍采用的防浪建筑物。工程中, 为了减小堤身断面土石方量而不降低抗御波浪爬高的标准, 常在堤顶设置防浪墙。目前, 针对提高斜坡堤抗御波浪能力的研究集中于防波堤堤身形式、消浪设计和岸滩保护方面^[1-3], 对新型防浪墙的研究较少。因此, 本文提出了挡浪板式防浪墙, 并对其受到的波浪力及其规律进行研究。

通过规则波波浪模型试验, 对直立防浪墙和不同倾角的挡浪板式防浪墙的水平波浪力和浮托力在入射波要素、防浪墙前水深、堤身形式对其波浪力的影响, 及其变化规律方面进行了分析比较, 并没有考虑堤前水深(墙底与静水面的垂距)

对波浪力的影响。

1 试验概况

1.1 试验设备和方法

主要采用7种防浪墙断面形式, 分别为: 直立防浪墙、60°固定倾角防浪墙、45°固定倾角防浪墙、30°固定倾角防浪墙、60°活动倾角防浪墙、45°活动倾角防浪墙、30°活动倾角防浪墙。按照相关规范和要求^[4], 本试验的水槽长80 m, 宽1 m, 高1.2 m。水槽的一端通过推板造波机生成试验所需波浪, 水槽另一端铺设效能缓坡, 减小二次反射对研究结果造成的影响。试验中, 水槽

收稿日期: 2014-03-22

作者简介: 范可(1990—), 女, 硕士研究生, 从事港口、海岸及近海工程方面研究。

用玻璃板分割成等间距的两部分，取外侧 50 cm 作为有效试验宽度放置试验模型，另一侧用以扩散二次反射的波能。试验中直立防浪墙采取 L 型布置，高为 15 cm，底宽为 15 cm。固定倾角与活动倾角的防浪墙物理模型，下部也采用 L 型布置，高为 10 cm，底宽为 15 cm，上部挡浪板长度为

5 cm。胸墙安放在斜坡堤的堤顶上，断面斜坡坡度 $m = 1:1.5$ ，墙前预留两排扭王字块。试验中防浪墙上压力探头安装相对位置一致，试验模型布置如图 1 所示。防浪墙上部采用圆环连接结构作为轴承设置带倾角的挡浪板，并定义倾角 θ 为挡浪板上部与水平方向的夹角。

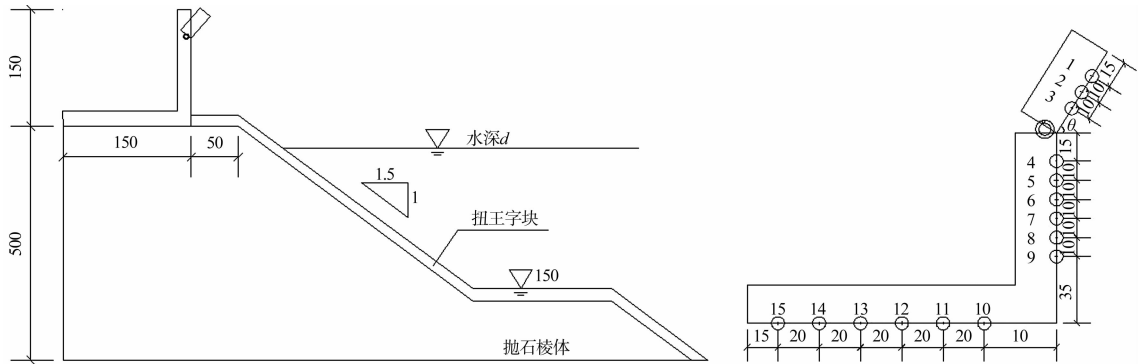


图 1 试验模型

试验中，采用不同波要素对各种断面形式的条件组合进行波浪力试验。试验水深 $d = 0.45、0.475、0.5$ m，波高 $H = 0.12、0.15、0.18$ m，波周期 $T = 1.2、1.4、1.6$ s。规则波每组波列持续 20 s，波数为 12 ~ 15 个，试验后停机，待水面平静后进行下一组试验。

1.2 试验数据采集和选取

使用 DJ800 多功能采集系统记录，采样频率为 125 Hz。由于波浪的复杂性，为保证试验数据的稳定性和可靠性，采用重复试验，每组试验进行 3 次。试验采用基于 MALLAT 算法的多分辨率分析方法提取信号，并运用 MARLAB 软件绘制波形图，剔除毛刺后进行数据分析。

2 试验结果和分析

试验测得如图 2 和 3 所示的防浪墙波浪力随时间的变化关系。可以看出，波浪力会出现双峰的现象。该规律与 Martin 等^[5]测得直立胸墙波浪力时间序列的规律大体一致。波浪在爬高过程中与防浪墙发生作用，产生水平波浪力的第 1 个峰值，在重力的作用下水流回落再次与防浪墙发生作用，产生第 2 个峰值，峰值大小取决于回落水体的质量^[6]；由于能力损耗，故水平波浪力第一峰值大于第 2 峰

值。波浪爬高至胸墙底端时，水流流入垫石与胸墙之间的缝隙，产生第 1 个浮托力峰值；波浪上涌后回落，产生第 2 个浮托力峰值，由于水流重力影响，浮托力第 1 峰值小于第 2 峰值。

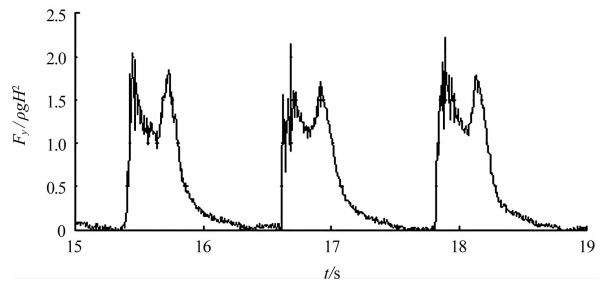


图 2 水平波浪力-时间变化曲线

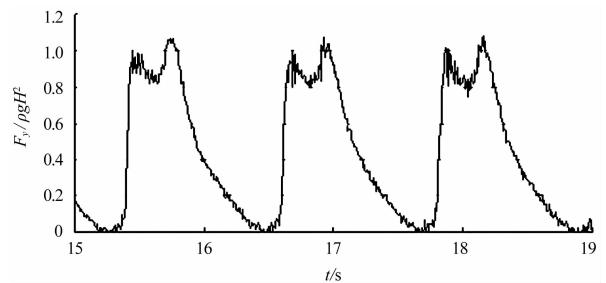


图 3 浮托力-时间变化曲线

2.1 防浪墙的波压强分布

从图 4 和 5 中可以看出，规则波作用下，水平波压强有极大值，即最大压强点。且水平波压强在最大压强点附近沿防浪墙迎水面向上减小迅速，向

下减小缓慢。波浪沿斜坡堤爬高过程至防浪墙发生波浪破碎, 最大压强点发生在波浪破碎撞击防浪墙的位置。波浪破碎后沿防浪墙向上运动, 动能转化为重力势能的过程中有损耗, 故沿防浪墙迎水面向上减小迅速; 而沿防浪墙迎水面向下由于扭王字块的掩护, 故防浪墙迎水面向下减小缓慢。

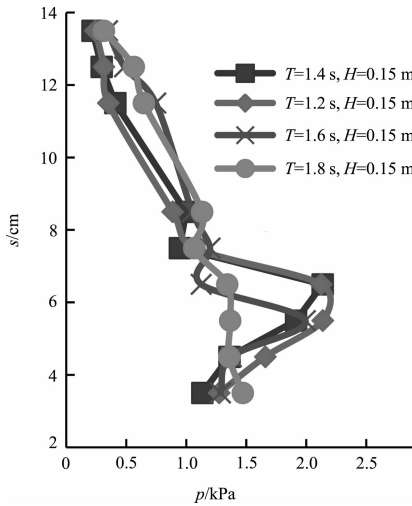


图 4 直立防浪墙波压强分布

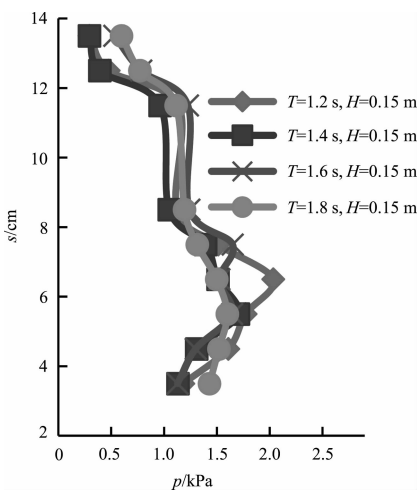


图 5 活动 45° 倾角防浪墙波压强分布

从图 6 和 7 中可以看出, 底部波压强在胸墙迎浪面处达到极大值及浮托力的最大压强点。随着迎浪面宽度和底宽的增加, 压强逐渐减小, 波压强变化速率渐为平缓。这是因为水流在防浪墙底部与垫层之间的缝隙沿底宽流动时, 产生能量损耗, 故压浮托力逐渐减小。

2.2 波高、水深、波坦对波浪力的影响

从图 8 和 9 中可以看出, 规则波作用下, 水

深、周期等因素相同时, 作用在防浪墙上的水平波浪总力随波高的增大而增大, 且基本呈线性关系。若波高持续增大, 将发生越浪现象, 水体动能转化为势能, 将不再满足线性关系。当波高、周期相同时, 水平波浪总力随水深的增大而增大, 且增加速率基本一致。

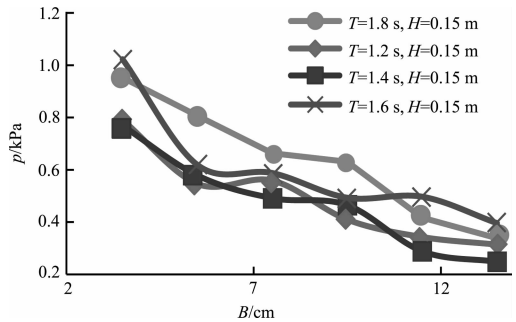


图 6 直立防浪墙浮托力分布

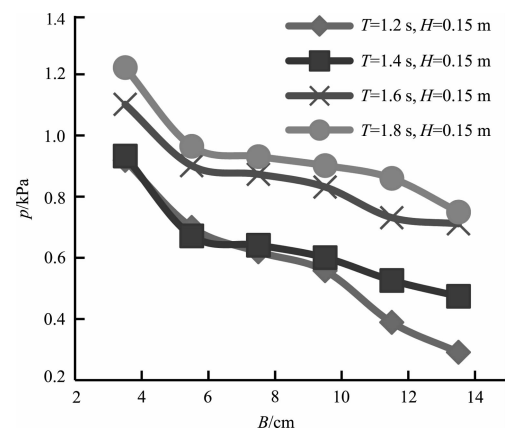


图 7 活动倾角防浪墙浮托力分布

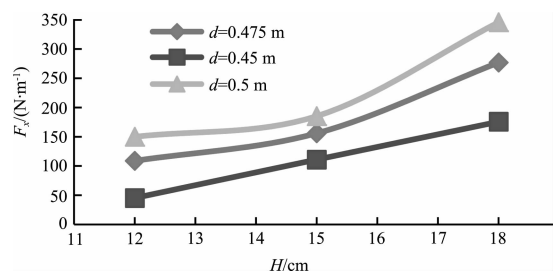


图 8 直立防浪墙水平波压力-波高关系

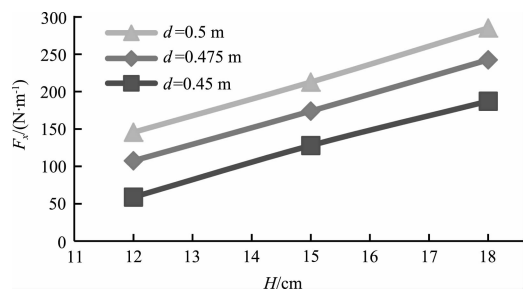


图 9 倾角 45° 防浪墙水平波压力-波高关系

从图 10 和 11 中可以看出, 规则波作用下, 水深、周期等因素相同时, 作用在防浪墙上的浮托力随波高的增大而增大, 也基本呈线性关系; 当波高、周期相同时, 浮托力随水深增大而增大, 水位较低时, 浮托力增加速率较快且稳定, 当水深继续增加, 其增加速率较慢。

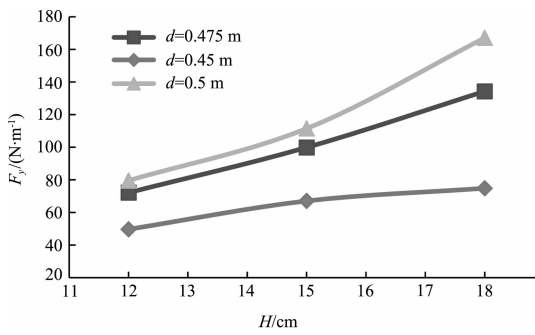


图 10 直立防浪墙浮托力-波高的关系

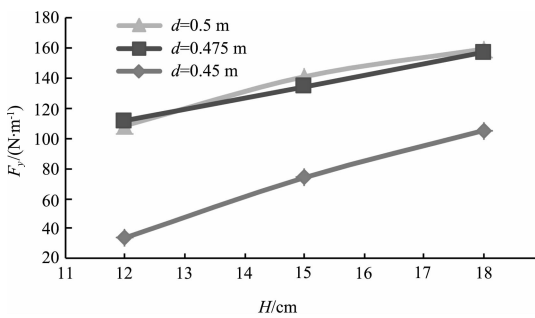


图 11 倾角 45° 防浪墙浮托力-波高关系

2.3 波坦对波浪力的影响

波坦是反映波浪形态的重要参数, 反映了波长与波高的关系, 是无量纲因子。在研究波高、水深、波坦对波浪力的影响时, 防浪墙的水平波浪力和浮托力包含波坦的影响, 但没有做重点研究。现对其进行分析, 研究中, 水平波浪总力取 $F_x/\rho g H^2$, 浮托力取 $F_y/\rho g H^2$ 。图中断面分别代表直立防浪墙、60° 倾角防浪墙、45° 倾角防浪墙、30° 倾角防浪墙。

从图 12 和 13 中可以看出, 水深、波高因素相同时, 在一定范围内, 作用在防浪墙上的水平波压力和浮托力均随波坦的增加先减小后增加, 在 $L/H = 17$ 存在极小值。不同断面形式不影响防浪墙的水平波浪总力的变化规律, 但影响其变化速率。

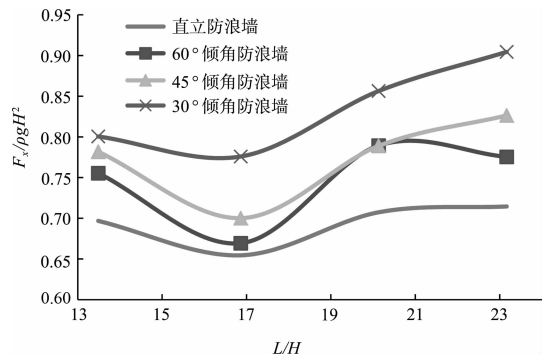


图 12 不同倾角下固定防浪墙波坦-水平波浪总力关系

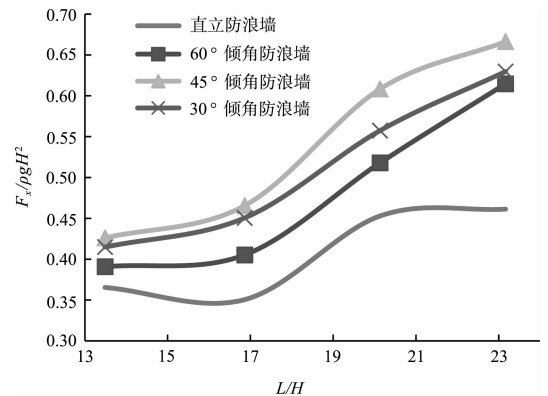


图 13 不同倾角下固定防浪墙波坦-浮托力关系

2.4 挡板式防浪墙波浪力特性差异分析

2.4.1 挡浪板防浪墙波浪力特性分析

从图 14 和 15 中可以看出, 各波要素相同时, 规则波作用下固定式挡浪板防浪墙水平波压力随着倾角 θ 的增加而减小; 其浮托力随着倾角 θ 的增加而减小。波浪与直立防浪墙发生碰撞后沿防浪墙上涌, 动能转化成势能并且伴随损耗; 挡浪板式防浪墙由于其上端有前倾结构, 阻碍波浪上涌, 动能无法顺利转化为势能, 故撞击能量大, 波浪力增加。且上端结构倾角 θ 越小, 其阻碍波

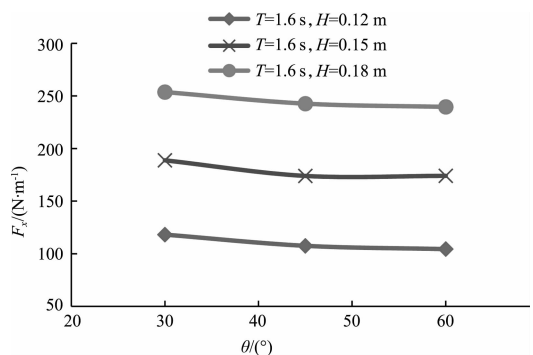


图 14 不同倾角下活动防浪墙波坦-水平波浪总力关系

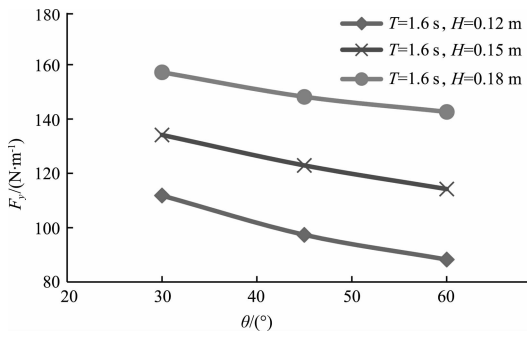


图 15 不同倾角下活动防浪墙波坦-水平波浪总力关系

浪能量转化成势能的作用越显著。由此可见, 为尽量减小防浪墙所受波浪力, 防浪墙上端倾角不宜过小。相同波要素条件下, 使用活动式挡浪板防浪墙代替固定式, 重复试验, 得到的波浪力变化规律相同。

2.4.2 固定式和活动式挡浪板防浪墙波浪力特性差异分析

从图 16 和 17 中可以看出, 各波要素相同时, 规则波作用下的固定式挡浪板防浪墙受到的总波压力大于其在活动式挡浪板防浪墙上所受波浪总力。活动式挡浪板在波浪作用下可以向上摆动, 部分能量转化为势能, 且其作用时间增加, 减小了波浪力对防浪墙的作用。

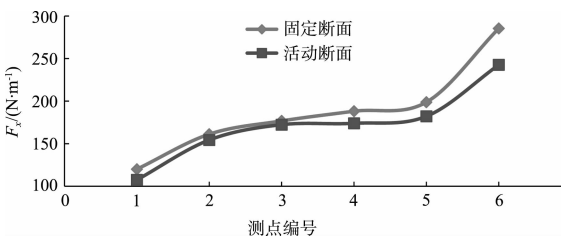


图 16 45°倾角断面水平总波压力值差异

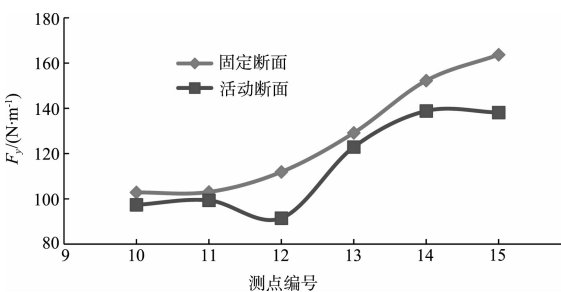


图 17 45°倾角断面浮托力值差异

2.5 规则波作用下水平总波压力系数换算分析

本文定义了波压力的换算系数 $k = F_φ / F_1$, $F_φ$

为带倾角的固定胸墙所对应的波浪力, $φ = 60°、45°、30°$; F_1 为直立胸墙所对应的波浪力。并定义 $k_x、k_y$ 为水平波压力换算系数和浮托力换算系数。选取水深 d 、波长 L 和倾角 $θ$ 为影响因素, 波高 H 和周期 T 为基本物理量, 有:

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{d}{H} \\ \pi_2 = \frac{L}{H} \\ \pi_3 = \frac{\theta}{\pi} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{得: } k = f\left(\frac{d}{H}, \frac{L}{H}, \frac{\theta}{\pi}\right) \quad (2)$$

波压力换算系数 k 与各无量纲因子取非线性函数关系的乘法模型:

$$k = \beta \left(\frac{d}{H}\right)^{x_1} \left(\frac{L}{H}\right)^{x_2} \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{x_3} \quad (3)$$

两边取自然对数, 得:

$$\ln k = \ln \beta + x_1 \ln\left(\frac{d}{H}\right) + x_2 \ln\left(\frac{L}{H}\right) + x_3 \ln\left(\frac{\theta}{\pi}\right) \quad (4)$$

将试验数据代入式(4), 进行多元线性回归计算, 得到堤前水深 $d_1 \leq 0$ 时的规则波作用下波压力换算系数公式:

$$k_x = 0.5044 \left(\frac{d}{H}\right)^{-0.02147} \left(\frac{L}{H}\right)^{0.236133} \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{-0.10845} \quad (5)$$

根据式(5), 表明在波高 H 和周期 T 已知的情况下, 波长 L 对水平波压力的影响最大, 其次是挡浪板式防波堤的倾角 $θ$, 水深 d 的影响最小。

为确保公式的可靠性和试用性, 下面用试验资料对公式进行验证:

选取 0.475 m 水深, 45° 倾角的活动挡浪墙为例, 在 $T = 1.6 \text{ s}$, $H = 0.15 \text{ m}$ 时, 做验证:

$$\text{由 } L = \frac{gT^2}{2\pi} \text{th} \frac{2\pi d}{L} \text{ 迭代, 波长 } L = 1.48 \text{ m, 代入}$$

式(5), 得 $k_x = 0.98$ 。选取 6 个测点进行验证, $k_1 = 0.92、k_2 = 0.90、k_3 = 0.95、k_4 = 0.99、k_5 = 0.92、k_6 = 0.91$; 相对误差 $|\varepsilon|_{\max} = 8.1\%$, 与试验结果吻合度较高。

3 结论

1) 在规则波作用下, 挡浪板式防浪墙水平波压强和浮托力有极大值, 存在双峰现象, 且峰值不同步。由于动能在波浪爬高过程中转化为重力势能, 最大水平波压强附近向上减小速率大, 向下减小速率缓慢。

2) 在规则波作用下, 相同工况时, 挡浪板式防浪墙水平总波浪力与浮托力随波高、水深的增大而增大, 且大致呈现线性关系; 随波坦的增大先减小后增大, 并在 $L/H = 17$ 附近出现极小值。

3) 在规则波作用下, 挡浪板倾角的变化不影响波浪力的分布和变化规律, 活动式挡浪板防浪墙受到的波浪力小于固定式挡浪板防浪墙受到的波浪力。相同工况时, 波浪力随倾角的减小而增大, 故设计有前倾装置的防浪墙时应避免倾角过小。

4) 在规则波作用下, 波压力换算系数公式为:

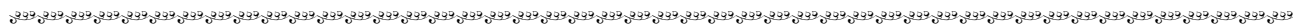
$$k_x = 0.504 4 \left(\frac{d}{H}\right)^{-0.021 47} \left(\frac{L}{H}\right)^{0.236 133} \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{-0.108 45} \circ$$

(本文编辑 郭雪珍)

5) 在规则波作用下, 波高 H 和周期 T 已知时, 波长 L 对水平波压力的影响较最大, 其次是挡浪板式防波堤的倾角 θ , 水深 d 的影响最小。

参考文献:

[1] GB 50286—1998 堤防工程设计规范[S].
 [2] GB 50201—1994 防洪标准[S].
 [3] 吉红香, 黄本胜, 邱秀云. 植物消波消浪研究综述[J]. 水利水运工程学报, 2005(1): 75-78.
 [4] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].
 [5] Martín F L, Vidal C, Losada M Á, et al. Un metodo para el calculo de las acciones del oleaje sobre los espaldones de los diques rompeolas[J]. Ingeniería del agua, 1995, 2(3): 37-52.
 [6] 王颖, 薛雷平, 刘桦. 弧形防浪墙波浪力的试验研究[J]. 水道港口, 2007(4): 81-85.



· 消 息 ·

舟山 3 年投资 3 000 亿元打造新区

《浙江舟山群岛新区建设 3 年(2013—2015 年)行动计划》近日发布, 行动计划提出, 到 2015 年, 舟山群岛新区建设固定资产投资力度达 3 000 亿元以上, 实现海洋生产总值 1 000 亿元, 舟山港域港口货物年吞吐量达到 4 亿 t 以上; 未来 3 年, 将要重点实施基础设施建设、现代海洋产业发展、重大平台建设、海上花园城建设、改善民生等五大行动计划。新区建设的 3 000 多亿元投资计划中, 基础设施建设和现代海洋产业发展各占投资金额的 1 000 亿元。其中, 基础设施建设包括综合交通、能源、水利围垦以及信息设施项目等。

(摘编自《中国交通新闻网》)