

· 港口 ·



透空式上部结构开孔沉箱 前沿波压力试验分析

周松泽¹, 陈国平², 严士常², 卢生军³

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200030;

2. 河海大学港口、海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098; 3. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

摘要: 通过不规则波物理模型试验, 在前人对开孔沉箱波浪力研究的基础上进一步研究了透空式上部结构开孔沉箱前沿的波浪力。分析了结构前沿的波压力分布规律并与现有的波压力计算公式进行对比, 发现透空式上部结构面板和底部沉箱结构前沿波压力的计算可通过合田良实公式进行修正, 而上部结构纵梁所受的相对点压强值往往较大, 因此单独对纵梁上的相对波压强进行分析, 给出了计算相对波压强值的经验公式。

关键词: 透空上部结构; 开孔沉箱; 波压力

中图分类号: TV 139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)09-0052-07

Experimental research on wave pressure before perforated caisson with permeable superstructure

ZHOU Song-ze¹, CHEN Guo-ping², YAN Shi-chang², LU Sheng-jun³

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200030, China;

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

3. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Based on the previous research on wave forces of perforated caisson, we further study wave forces at the forefront of the perforated caisson with permeable superstructure through physical model tests of irregular waves. Analyzing the regular pattern of pressure distribution and comparing it with the existing formula of wave pressure, we find that the formula can be modified based on the Aida Yoshizane formula which is applied to the calculation of the pressure distribution of the upper structure's panel and the forefront of the lower part of perforated caisson with permeable superstructure. The stringers of the upper structure suffer greater relative point pressure. So, the relative wave pressure of stringers is studied separately and the empirical formula for calculating relative wave pressure is provided here.

Keywords: permeable superstructure; perforated caisson; wave pressure

如何建设具有良好消波效果的低反射码头, 一直是科研技术人员重点解决的问题。近些年众多的学者纷纷提出了各种新型的码头结构形式, 开孔沉箱结构是其中的一种, 其能够有效地降低码头前沿的波浪反射率及波浪力, 因而在国内外码头结构形式研究和工程设计中受到了普遍的重视。

开孔沉箱所受的波浪力是沉箱稳定分析中的

关键值, 现有文献关于波浪作用于开孔沉箱波浪力的计算方法有以下几种: 日本 Takahashi 推荐的修正合田公式^[1] (文中简称 Takahashi 公式); 法国 Tabet-Aoul 修正的合田公式^[2]; 我国 1998 年版防波堤设计与施工规范附录中推荐的由南科院提出的公式^[3]。陈雪峰等^[4]认为上述 3 种方法均未能反映顶板的存在与否和开孔率大小的影响, 因而

收稿日期: 2015-12-17

作者简介: 周松泽 (1987—), 男, 硕士, 从事港口海岸与近海工程的设计与研究工作。

对该结构作了进一步的理论分析与试验研究, 并在此基础上提出计算波浪力的实用方法。

以上研究都是针对无顶板和有顶板的开孔沉箱的研究, 而在实际的工程中, 开孔沉箱通常需要加设上部结构, 这样当波高较大和水位较高时, 上部结构的存在将会影响开孔沉箱码头的消浪性能。

本文通过物理模型试验, 分析了正向不规则波作用下透空式上部结构开孔沉箱码头前沿的波浪力分布, 给出了波浪力的计算方法。

1 设备仪器与试验方法

试验在河海大学港航动力实验室波浪水槽内进行, 该水槽长 80 m、宽 1 m、高 1.2 m。水槽的一端安装有液压式推板造波机, 通过电机系统控制推波板的运动行程和频率, 水槽的末端铺设消能缓坡, 以减小和消除波浪反射影响。

点压力的量测和采集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点压力传感器。模型由有机玻璃制作而成, 包括开孔沉箱和透空式上部结构两个部分。试验中开孔沉箱的开孔率取为 32%, 孔型是横条孔, 开孔区以下的区域以 1.2 g 左右的石子填充, 上部结构形式为 II 型梁透空。模型底宽 0.45 m、长 0.5 m (沿水槽宽度方向), 开孔沉箱高 0.57 m, 面板厚度为 5.6 cm。模型立面见图 1, 模型断面及点压力传感器布置见图 2。

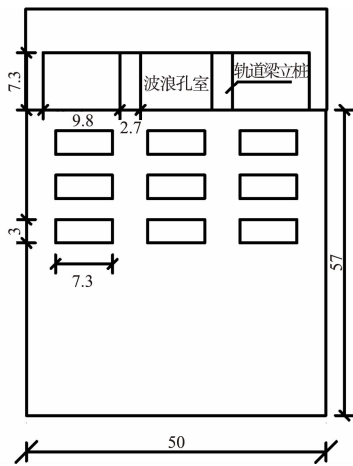


图 1 模型立面 (单位: cm)

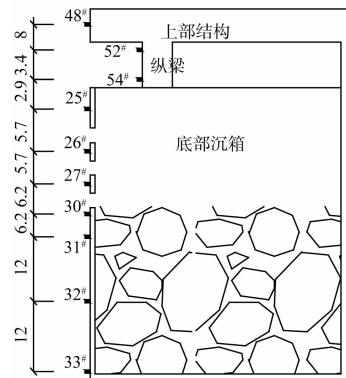


图 2 模型断面及点压力传感器布置 (单位: cm)

试验波要素及组合见表 1。

表 1 波要素及组合

水深 d/cm	波高 H_s/cm	周期 T_p/s	波长 L_s/m
4.00	13.8	1.83	4.00
	13.8	1.62	3.42
	13.8	1.42	2.83
	13.8	1.15	2.00
	10.1	1.62	3.42
	10.1	1.42	2.83
	10.1	1.15	2.00
	64.4	7.8	1.83
	7.8	1.42	2.83
	7.8	1.15	2.00
	6.8	1.62	3.42
	6.3	1.15	2.00
62.7	5.2	1.42	2.83
	4.6	1.15	2.00
	3.0	1.15	2.00
61.0	10.1	1.62	3.39
	6.8	1.62	3.39
61.0	10.1	1.62	3.36
	6.8	1.62	3.36

试验时将换算后的各组试验波浪要素的特征值输入计算机, 由计算机自动迭代计算, 在水槽内产生所需的波列。实测谱与期望谱之间有效波高误差控制在 5% 以内, 谱峰周期 T_p 误差控制在 3% 以内^[5-6]。

本次试验的期望谱选用《海港水文规范》的改进 JONSWAP 谱, 试验采用间隙式生波方式, 以消除波浪的多次反射, 不规则波每组波列的持续时间约为 5.0 ~ 6.0 min, 波数约为 110 ~ 150 个,

然后停机，待水面平静后继续进行下一组试验，为保证试验数据的稳定性，每组试验重复 3 次，取平均值。

2 数据处理

本次试验数据的处理，通过编写 Matlab 程序，采用上跨零点法对采集到的水平点压强数据进行统计。考虑到本次试验仪器设备和模型安装方法的限制，极个别有零线漂移现象的点压强数据信号需手动读取零线位置后再得到统计结果。

3 结构前沿点压强统计分布

本文先假定水平点压强均服从 Weibull 分布和瑞利分布，然后使用 K-S 方法分别对拟合结果进行检验。统计所有通过检验的组次， a 取值在 1 ~ 1.14， b 取值在 0.94 ~ 2.46，其平均值为 $a = 1.12$ ， $b = 1.62$ 。同理可得到各累积率冲击压强换算关系（表 2）。

表 2 累积率压强换算关系

$F/\%$	1	2	5	10	13	30	50
K_r	1.68	1.52	1.30	1.10	1.02	0.74	0.52

在分析压力分布规律时可以采用 $F = 13\%$ ，其他累积频率可以根据表 2 的累积率转换关系求得。

4 试验结果及分析

对结构前沿点压力传感器所采集到的点压强值进行统计不难发现，作用于纵梁上的波压力远大于上部结构面板及底部沉箱前沿的波压力值。分析可知这是由于波浪穿过了上部结构的前沿直接作用到了纵梁上，并于有限的空间内对纵梁产生了冲击作用，因此在分析透空式上部结构开孔沉箱结构前沿波压力分布时需将上部结构纵梁上的波压力分布拿出来单独分析，再与上部结构面板及底部沉箱前沿的波压力分布相结合并可得到整个结构前沿的波压力分布。结构及波压力分布见图 3。

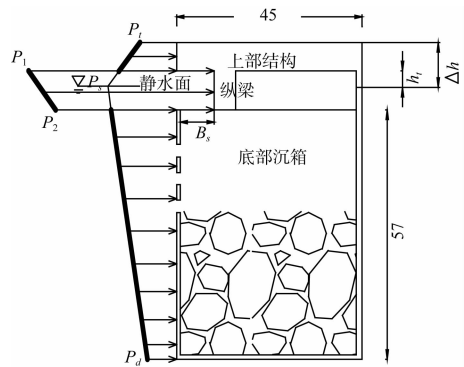


图 3 结构及压力分布（单位：cm）

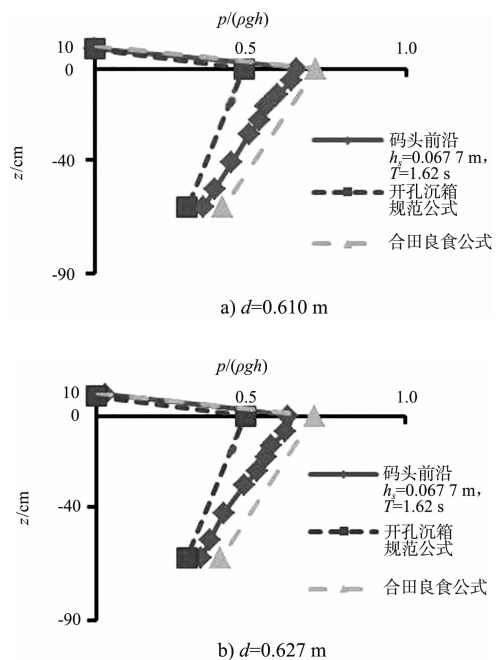
4.1 上部结构面板及底部沉箱上点压强的计算

在计算上部结构面板及底部沉箱上的点压强时暂不考虑上部结构纵梁的相对压强值，认为上部面板与底部沉箱之间的压强线性过渡。

波浪对开孔沉箱建筑物的波浪力主要有如下两大类计算方法：一是《防波堤设计与施工规范》附录 H 中开孔消浪沉箱波压力的计算方法（简称开孔沉箱规范公式计算方法），二是目前国际上比较通用的合田良实公式计算方法。

4.1.1 水平点压强试验值与计算值的对比

将结构前沿水平点压强分布的试验值与开孔沉箱规范公式计算值和合田良实公式计算值进行对比，结果见图 4。



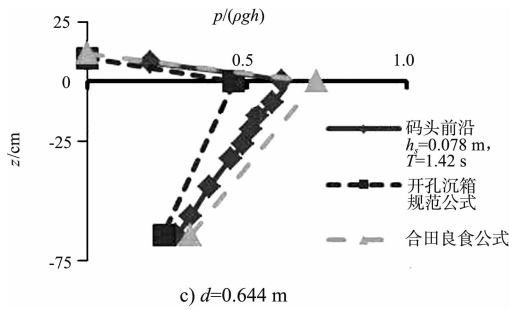


图 4 试验值与规范公式、合田公式计算值对比

由图 4 可知, 开孔沉箱规范公式计算值比试验值明显偏小许多, 而合田良实公式计算值又比试验值偏大很多, 可见无论是用规范公式还是合田良实公式计算透空式上部结构开孔沉箱码头前沿的波压强分布都不合理。

规范中开孔沉箱计算公式仅适用于无上部结构开孔沉箱结构前沿波压力分布的计算, 不考虑码头顶部的越浪及面板底部对波浪的消能作用, 因而, 当水位位于上部结构附近时, 若仍然使用规范的公式进行计算的话将会产生偏差。合田良实公式用于直立堤墙式建筑物前波压力的计算, 公式中静水面处波压强值为:

$$P_s = \rho g H \left\{ 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi d/L}{\text{sh}(4\pi d/L)} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

式中: H 为建筑物前完全立波的 $1/2$ 波高, 即 $(H_1 + H_R)/2$, 完全立波时 $H_1 = H_R$, 当建筑物为透空式上部结构的开孔沉箱时, 其前的波浪为不完全立波, 此时若仍按完全立波处理必然会产生误差。

4.1.2 上部结构面板及底部沉箱上点压强计算方法

仔细观察各图不难发现, 结构前沿的压强分布线与合田公式计算的压强分布线大致平行, 认为透空式上部结构开孔沉箱前沿的压强分布规律与合田公式计算的压强分布规律大体相似。因此可以考虑对合田公式进行修正得到符合透空式上部结构开孔沉箱结构前沿压强分布的计算公式。

由前面分析可知, 将合田良实公式用于透空式上部结构开孔沉箱前沿波压力分布计算的关键是对结构前波峰面高度作修改。

对合田良实公式进行修改, 可将公式中的 H 改写成:

$$H = (H_1 + H_R)/2 = H_s(1 + k_r)/2 \quad (2)$$

式中: H_s 为入射波高; k_r 为反射系数^[7]。将 H 代入合田良实公式得:

$$P_s = \rho g H_s \frac{(1 + k_r)}{2} \left\{ 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi d/L}{\text{sh}(4\pi d/L)} \right]^2 \right\} \quad (3)$$

式中: P_s 为静水面处的波压强值, 水底处波压强 P_d 的计算公式及静水面以上波压强零点位置仍同原合田良实公式。

水面以上的点压强值可由静水面处的压强与压强零点值进行线性插值计算, 水面以下任意入水深度处的点压强值可由静水面处的压强与水底处的压强之间进行线性插值计算。

用修正后的合田良实公式进行计算, 结果见图 5。

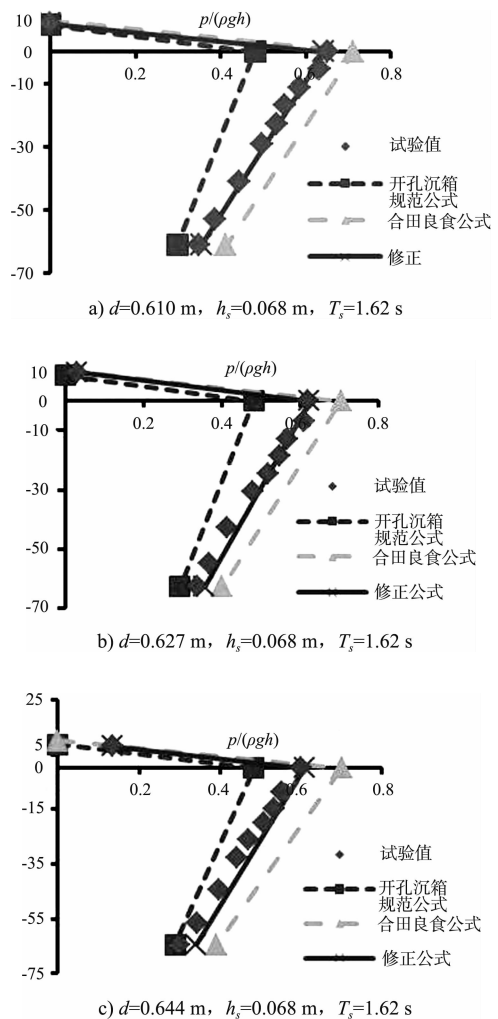


图 5 试验值与修正后的合田公式计算值对比

由图5可知,绝大多数情况下修正后的公式计算出的透空式上部结构开孔沉箱前沿的波压强能够较好地与试验值吻合,个别情况下计算值比试验值略大,偏于安全考虑认为修正后的合田良实公式能够用于本文结构前波压强的计算。

4.2 纵梁上的点压强分布规律

对纵梁上的压强进行单独分析,用单因素分析法找出相对点压强值与各个影响因子之间的关系。纵梁顶部点压强为 p_1 、底部点压强为 p_2 。用 $p_1/(\rho gH)$ 、 $p_2/(\rho gH)$ 表示点压强的相对大小,影响 $p_1/(\rho gH)$ 、 $p_2/(\rho gH)$ 的主要因素有波陡(H_s/L_s)、透空式上部结构相对宽度(B_s/L_s)、面板相对底超高(h_t/H_s)及码头面板相对顶超高($\Delta h/H_s$)。

由于测力试验中透空式上部结构开孔沉箱的结构形式保持不变,因此通过改变波长实现透空式上部结构相对宽度的变化,改变水深实现面板相对超高的变化。相对点压强同各个影响因子之间的相关关系见图6~11。

图6~7为改变波高时波陡的变化引起的纵梁上相对压强的变化的关系。由图6可知,纵梁顶部相对点压强 $p_1/(\rho gH)$ 随着波陡的增大而出现小幅的增大,从能量的角度看,当波浪不破碎时,波长不变,波高变大,波陡变大,能量分布变得集中,波浪穿过透空式上部结构作用到纵梁上的相对冲击能量就变得越大,因此作用于纵梁上的相对点压强呈现出增大的趋势。但增大的幅度不是很明显,这可能是由于波浪于前沿开孔处发生了不同程度的破碎,使得这种纵梁上相对点压强随波陡增大的规律不是很明显。这种不明显的规律在纵梁底部表现得更加突出(图7)。

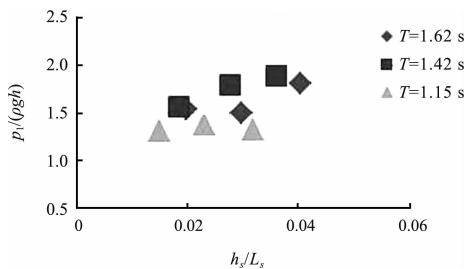


图6 纵梁顶部 $p_1/(\rho gH)$ 随 H_s/L_s 的变化($d=0.644\text{ m}$)

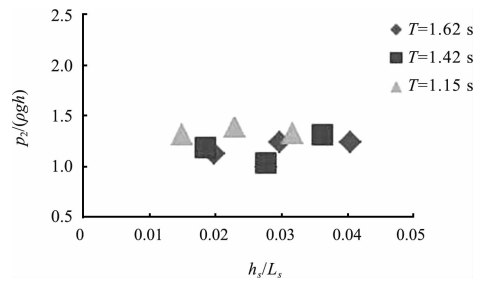


图7 纵梁底部 $p_2/(\rho gH)$ 随 H_s/L_s 的变化($d=0.644\text{ m}$)

图8~9反映的是纵梁上相对点压强随码头面板相对底超高的变化关系,由于试验中码头面板厚度保持不变,因此横坐标 h_t/η_s 变化的同时码头面板相对顶超高 $\Delta h/\eta_s$ 也随之发生了变化,图8~9反映出纵梁上相对点压强随面板相对底超高的增大而减小的规律中已经包含了面板相对顶超高的影响。面板相对底超高的增大会导致码头上部结构透空区的空间变大,即消浪空间变大,从而使得纵梁上的相对压强变小,另一方面面板相对顶超高的增大会导致越过码头顶部的能量减小,作用到纵梁上的冲击能量增大,从而使纵梁上的相对压强变大。对纵梁上的相对压强起主导作用的是码头面板相对底超高,因此本文暂不考虑码头面板顶超高的影响。

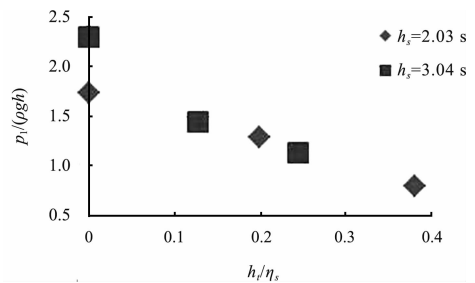


图8 纵梁顶部 $p_1/(\rho gH)$ 随 h_t/η_s 的变化($T_s=8.9\text{ s}$)

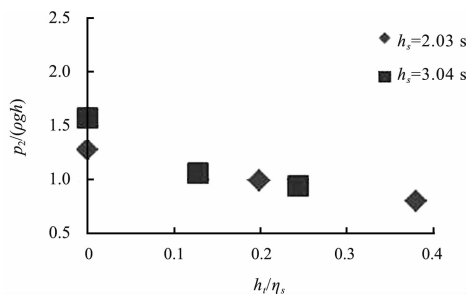


图9 纵梁底部 $p_2/(\rho gH)$ 随 h_t/η_s 的变化($T_s=8.9\text{ s}$)

图 10~11 为改变波长时透空式上部结构相对宽度的变化引起的相对压强的变化的关系。由图可知, 纵梁顶部相对点压强 $p_1/(\rho gH)$ 与纵梁底部相对点压强 $p_2/(\rho gH)$ 随着透空式上部结构相对宽度 B_s/L_s 的变化关系类似, 不同之处在于纵梁顶部相对压强随相对宽度 B_s/L_s 的变化更为明显 (图中表现为曲线更为倾斜)。总的来说相对压强均是随着相对宽度的增大而减小, 这是由于透空式上部结构相对宽度的增大使得波传播至纵梁的距离变长, 此时面板底部对波浪的阻碍作用更为明显, 从而导致作用于纵梁上的相对压强变小。

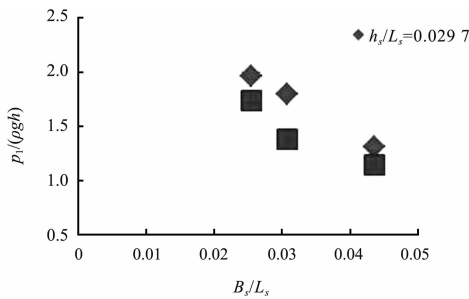


图 10 纵梁顶部 $p_1/(\rho gH)$ 随 B_s/L_s 的变化 ($d=0.644$ m)

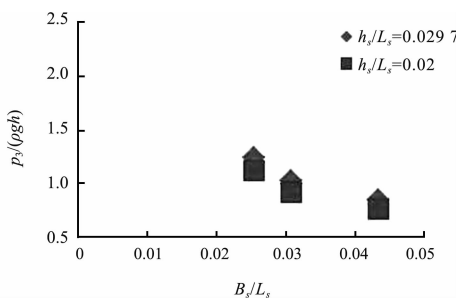


图 11 纵梁底部 $p_2/(\rho gH)$ 随 B_s/L_s 的变化 ($d=0.644$ m)

综上所述可知纵梁顶部相对压强 $p_1/(\rho gH)$ 和底部相对压强 $p_2/(\rho gH)$ 与各个影响因素之间的相关性类似: 与波陡变化关系不明显, 考虑忽略波陡的影响; 透空式上部结构相对宽度、码头面板相对底超高均是影响纵梁上相对压强的主要因素。

4.3 纵梁上的点压强的计算

前人^[8-11]的研究认为影响冲击压强的主要因素主要包括 3 个方面, 其一是几何因素 (即波浪冲击角), 其二是动力因素 (包括波高、波速等), 其三是空气垫层, 而其他因子只是通过改变这 3 个

因素对冲击压强产生影响。陈国平^[12]在前人研究的基础上对多种结构形式码头面板的上托力进行规则波和不规则波试验, 对规则波和不规则波冲击产生的面板最大冲击压强影响因素分别进行综合分析, 根据试验结果提出最大冲击压强计算公式。其中不规则波作用下斜坡接岸式高桩码头面板最大冲击压强的计算公式如下:

$$\bar{p}_{1/3}/(\rho gH_s) = k_1 \left(1.5 - \frac{h_t}{\eta_s} \right)^{0.4} e \left[-1.3 \left(\frac{h_t}{\eta_s} - 0.6 \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$k_1 = \frac{6}{1 + 6e^{-[L_m/(2.5B)]}} \quad (5)$$

式中: $\bar{p}_{1/3}$ 为斜坡接岸式高桩码头面板波浪冲击压强峰值 1/3 大值平均值; H_s 为不规则波入射波有效波高; L_m 为入射波平均波长; h_t 为面板底部距静水面的高度; η_s 为波面距静水面最大高度。

以上公式能够很好地计算不规则波作用下斜坡接岸式高桩码头面板最大冲击压强。由公式不难发现, h_t/η_s 、 L_m/B 均是影响面板最大冲击压强的主要因素, 这与本文研究的纵梁上的相对压强的主要影响因素一致, 因此在求纵梁上最大冲击压强时, 可以陈国平公式形式为基础, 加入待定参数, 公式形式变为:

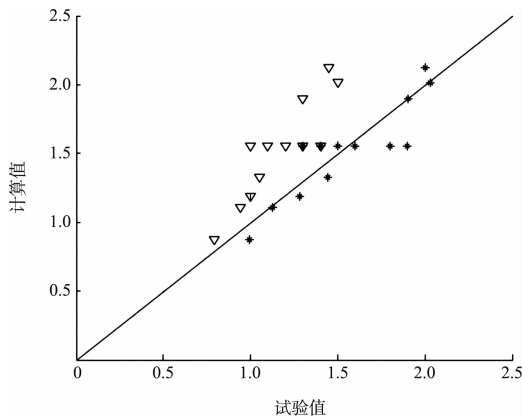
$$p_s/(\rho gH_s) = k_1 \left(a_1 - \frac{h_t}{\eta} \right)^{a_2} e^{a_3 \left(\frac{h_t}{\eta_s} - a_4 \right)^2} \quad (6)$$

式中: k_1 是关于透空式上部结构相对宽度的函数, a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 均为待定参数; η 为码头前沿的最大波峰面高度^[7]。 p_s 为最大冲击压强的有效值, 通过 matlab 编程调试各个参数, 最终得出以下结果:

$$k_1 = \frac{9}{7 + e^{-(L_s/B)}}, a_1 = 3, a_2 = 0.4, a_3 = -1, a_4 = -0.5.$$

公式(6)为纵梁上最大冲击压强的计算公式, 公式的相关系数 $R = 0.8527$, 由该公式计算得到的最大冲击压强值与实测值的对比情况见图 12。由图 12 可知, 纵梁上最大冲击压强的计算值与试验值符合较好, 可以用上述公式计算纵梁上最大冲击压强。由于上部结构纵梁高度较小, 偏于安全考虑, 假设作用在纵梁上的荷载按最大冲击压强值均布, ∇ 表示纵梁底部压强 P_2 公式计算值与

实测值对比, 可见全部点位于 $y = x$ 上方, 但幅度不大, 即计算值略大于试验值, 因此按公式计算得到纵梁上的最大冲击压强, 然后纵梁上的荷载按该值均布, 此方法大致可行。



注: 图中实线为 $y = x$, * 表示纵梁上最大冲击压强 (即纵梁顶部压强 P_1), ▽ 表示公式计算值与实测值的对比。

图 12 冲击压强试验值与计算值对比

5 结论

1) 在研究透空式上部结构开孔沉箱前沿的波压力时, 需将上部结构纵梁上的波压力分布拿出来单独分析, 再与上部结构面板及底部沉箱前沿的波压力分布相结合并可得到整个结构前沿的波压力分布。

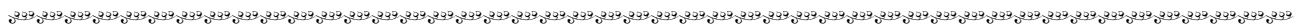
2) 上部结构面板及底部沉箱上的点压强值可用修正的合田良实公式来计算。

3) 上部结构纵梁上的冲击压强值用本文拟合的经验公式来计算。

参考文献:

- [1] Takahashi S. Design of Vertical Breakwaters[R]. Japan: Port and Harbor Research Institute, Reference Document N 34, 1996.
- [2] Tabet-Aoul E H, Ambert E. Tentative new formula for maximum horizontal wave forces acting on perforated caisson [J]. J of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2003, 129 (1): 34-40.
- [3] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [4] 陈雪峰, 李玉成, 滕斌. 开孔沉箱总水平力若干计算方法的比较[J]. 港工技术, 2005(1): 1-5.
- [5] 左东启. 模型试验的理论与方法[M]. 北京: 水利水电出版社, 1984.
- [6] 吴宋仁, 陈永宽. 港口及航道工程模型试验[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [7] 周松泽. 透空式上部结构开孔沉箱码头水动力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2012.
- [8] Von karman T. The Impact on Seaplane Floats During Landing [R]. Germany: Aerodynamical Institute of the Technical High School Aachen, 1929.
- [9] 谷本胜利, 高橋重雄, 泉田芳和. 水平版に働く揚圧力に関する研究[R]. 东京: 港湾技術研究所報告, 第 17 卷, 第 2 号, 1978.
- [10] 合田良实. 構造物に働く波力[C]. 1967 年度水工学に関する夏期研修会講義集, B. 东京: 海岸港湾コース, 1967.
- [11] 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): 1-9.
- [12] 陈国平. 不规则波作用下高桩码头面板上托力计算试验研究总报告[R]. 南京: 河海大学, 2009.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

振华重工成功交付世界最大自航泥驳

8 月 20 日, 由交通运输部长江口航道管理局委托振华重工建造的一艘自航开底泥驳“长江口驳 2”, 在振华重工启东海洋工程公司成功交付。

该船总长 101.7 m、型宽 22 m、型深 9 m, 泥舱最大舱容 7 100 m³, 是世界最大的自航泥驳。该船采用双机双全回转推进器, 适航于无限航区, 主要作业区域为长江口及沿海水域, 承担长江口航道局的维护清理工作。

与“长江口驳 2”一同建造的“长江口驳 1”也已整装待发, 预计将于 8 月底交付, 并服务于 12 000 m³ 耙吸挖泥船。

(摘编自《中国交通建设网》)