

· 综 合 ·



斜坡堤护面板上最大波压力研究

冯卫兵¹, 崔磊¹, 仲南艳², 庄雨农¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098;

2. 浙江省交通规划设计院, 浙江杭州 310006)

摘要: 采用物理模型试验的方法, 研究在不规则波作用下最大打击力位置的相对深度的变化规律, 拟合了最大打击力位置相对深度的公式; 通过分析最大相对波压力随破波参数 ζ 的变化规律, 拟合得到最大相对波压力公式和波压力沿斜坡分布规律。

关键词: 斜坡堤; 不规则波; 最大波压力

中图分类号: TV 139.2*5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)01-0012-04

On peak wave impact pressure on protection slab of uniform slope

FENG Wei-bing¹, CUI Lei¹, ZHONG Nan-yan², ZHUANG Yu-nong¹

(1. College of Port, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: Based on the wave modeling test of irregular wave, this paper analyzes the variation regularity of the relative depth on the location of the maximal wave pressure under irregular wave action, and gives the formulae of the maximum relative wave pressure and wave pressure along the slope by analyzing the regularity of the maximum relative wave pressure changing with the break parameter ζ .

Key words: uniform slope; irregular wave; peak wave impact pressure

波浪对斜坡的作用力是防波堤设计中的一个重要问题。波浪在打击整体式混凝土板护面造成破坏常常因强度不够先在局部范围发生板面断裂, 小块面板被抽脱, 以后再逐步扩大, 护面下垫层被淘刷, 致使护面整体被毁坏^[1], 这就和波浪在斜坡上的冲击压力的大小及其分布规律密切相关。使用较为广泛的斜坡上的波压力计算公式是前苏联规范^[2-3]中采用基于室内规则波试验得出的公式, 但工程界普遍认为前苏联规范公式偏于保守。

1 试验设备

本文的物理模型试验在河海大学港建楼波浪水槽内进行, 该水槽长40 m, 宽0.5 m, 高1.0 m,

由南京水利科学研究院研制的计算机系统控制造波和数据采集。

2 试验波要素及试验组次

本试验中采用的波谱为JONSWAP谱^[4](合田良实改进)

$$S(\omega) = \alpha H_s^2 \frac{\omega^{-5}}{\omega_0^2} \exp\left[-1.25\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4\right] \gamma \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\tau^2 \omega_0^2}\right] \quad (1)$$

式中: $\alpha = \frac{0.0624}{0.230 + 0.036\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}}$; ω_0 为谱峰频率, 是谱峰周期 T_0 的倒数, T_0 取为有效波周期的1.25倍; γ 取3.3; τ 为形状参数, 在 $\omega < \omega_0$ 时取0.07, $\omega > \omega_0$ 时取0.09; 试验取堤前水深 $d=40$ cm, 试验组次见表1。

收稿日期: 2012-05-29

作者简介: 冯卫兵(1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事近海水动力环境及物质扩散数值模拟和物理模型试验的研究。

表1 试验组次

边坡系数 m	有效波周期 T/s	有效波高 H_s/cm				
		6	8	10	12	14
1.5	1.0	✓	✓	✓		
2.0	1.4	✓	✓	✓	✓	✓
3.0	1.8	✓	✓	✓	✓	✓
4.0	2.2			✓	✓	✓
5.0						

3 压力传感器的布置

水面向下总计布置10个传感器, 水面向上布置了3个传感器, 波压力测试传感器的布置见图1。

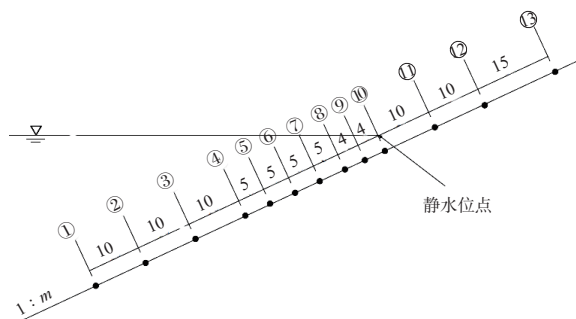


图1 波压力传感器布置

4 试验数据处理

波浪力的数据采集采用DJ800系统, 采集时间间隔为0.01 s, 在波浪平稳后再进行数据采集工作。在对采集的波压力数据点进行分析时, 采用波压力的峰值作为波压值, 然后统计分析有效值 $P_{1/3}$ 。图2为3#测点3次波浪作用过程波压力曲线。

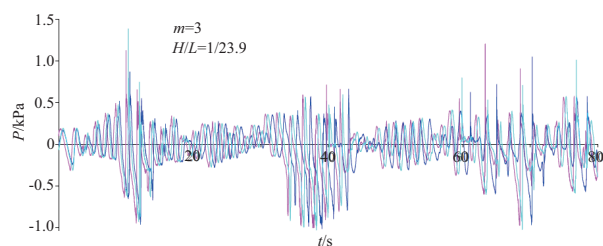


图2 3#测点3次波浪作用过程波压力曲线

5 最大波压力相对深度计算

5.1 e_0/H_s 计算公式

王鉴义等通过不规则波对单坡堤平板护面试验, 认为前苏联规范СНП II 57-75中的波压力和作用点公式同样适用于不规则波的有效波压力计算, 后者认为 $m < (2 \sim 2.5)$ 时, e_0/H_s 随 m 的增大而减小, $m > (2 \sim 2.5)$ 时 e_0/H_s 随 m 的增大而增大。向金 (ШАНКИН) 公式、黄碧珊公式认为 e_0/H_s 随着斜坡坡度的减缓而减小。

现以静水位与斜坡面的交点为坐标原点, 给出最大打击压力作用点水深示意图 (图3)。

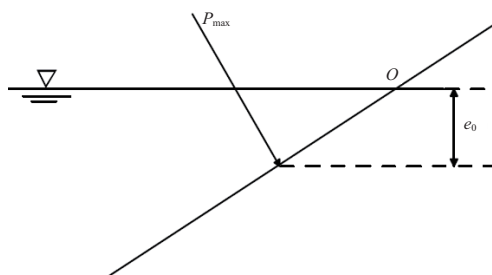
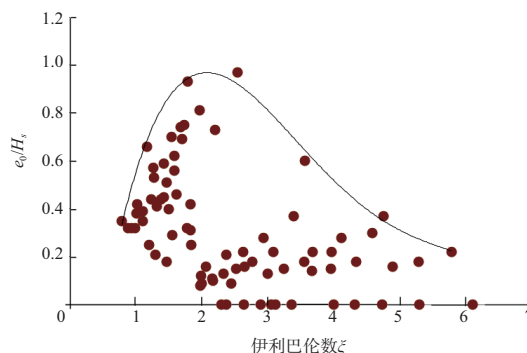


图3 坐标原点位置

经过数据分析, e_0/H_s 单独与 m 及 d/H_s 关系并不十分密切, 各家经验公式计算值差别较大, 现考虑 e_0/H_s 与伊里巴伦数 ξ 的关系

$$\xi = \frac{1}{m \sqrt{H_0 / \left(\frac{g T^2}{2\pi} \right)}} \quad (2)$$

式中: T 为平均周期; H_s 为有效波高; m 为斜坡坡度。 e_0/H_s 与 ξ 的散点关系见图4。

图4 e_0/H_s 与 ξ 的散点关系

单纯拟合散点关系的结果并不尽如人意, 所以考虑拟合其包络线方程:

$$y = -0.008x^4 + 0.158x^3 - 1.017x^2 + 2.491x - 1.074 \quad (3)$$

相关系数 $r = 0.994$ 。

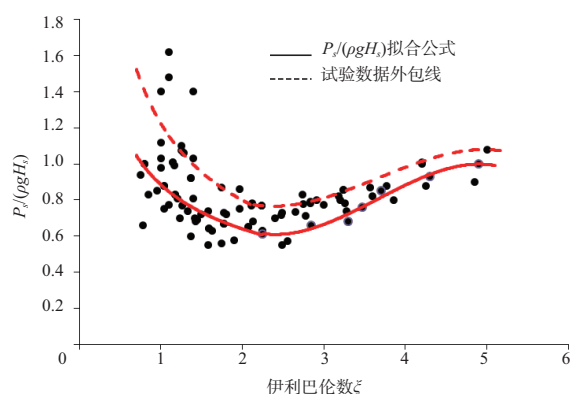
即在已知伊里巴伦数的情况下, 可求得最大打击压力点的范围。一般情况下, 最大打击压力点的深度控制在静水面以下0.8倍波高范围内。偶尔有试验数据达到1倍波高或以上, 并不排除试验误差或者最大打击压力点处在相邻测压点之间的情况。这与黄碧珊试验结果^[6]、向金公式及苏规 57-75 结果相吻合, 见表2。

6 最大相对波压力 $P_s/(\rho g H_s)$ 计算公式拟合

本试验中引入伊里巴伦数 ξ 来拟合最大相对波压力的计算公式。 $P_s/(\rho g H_s)$ 随 ξ 变化的试验结果见图5。

表2 黄碧珊试验压力打击点位置水深及对比

边坡系数 m	波陡 H/L							
	1/10			1/15.4			1/19.7	
	苏规57-75	向金公式	试验值	苏规57-75	向金公式	试验值	苏规57-75	试验值
2.0	0.03H	0.45H	0.50H	0.09H	0.40H	0.50H	0.14H	1.13H
3.0				0.27H	0.40H	0.40H	0.33H	0.88H
3.5	0.28H	0.42H	0.42H	0.34H	0.33H	0.33H	0.40H	0.67H
5.0	0.41H	0.45H	0.50H	0.48H	0.33H	0.33H	0.54H	0.60H

图5 最大相对波压力与 ζ 之间的关系

可见最大相对波压力随着 ζ 的变化较为明显。当 ζ 超过某一值时, 相对冲击压力随 ζ 的增加而增加; 当其小于这一值时, 相对冲击压力反而随 ζ 的减小而增大, 相对波压力在 $\zeta=2.5$ 附近取极小值。将所有的Iribarren 数 ζ 以0.25 (第1段间隔取0.375) 为一间隔分成15组, 取每组的平均波压力与 ζ 之间的曲线进行公式拟合 (表3), 将 ζ 的数据分成两段进行公式拟合, 当 $\zeta \leq 2.375$ 时选用指数曲线进行拟合公式, 当 $\zeta > 2.375$ 时选用双曲正切曲线进行公式拟合。

表3 分段平均最大波压力

ζ	$P_s/(\rho g H_s)$	ζ	$P_s/(\rho g H_s)$
1.000	0.959	3.125	0.796
1.375	0.889	3.375	0.743
1.625	0.798	3.625	0.844
1.875	0.717	3.875	0.872
2.125	0.719	4.125	0.966
2.375	0.686	4.375	0.9
2.625	0.717	4.625	0.933
2.875	0.739		

当 $\zeta \leq 2.375$ 时, 假定公式形式为:

$$\frac{P_s}{\rho g H_s} = k_1 \exp(k_2 \zeta) + k_3 \quad (4)$$

当 $\zeta \geq 2.375$ 时, 假定公式形式为:

$$\frac{P_s}{\rho g H_s} = l_1 \tanh(l_2 \zeta + l_3) + l_4 \quad (5)$$

基于MATLAB和SPSS数学软件, 根据实测试验数据拟合出指数曲线公式的系数 $k_1=0.954$, $k_2=-0.719$, $k_3=0.519$; 双曲正切曲线公式的系数 $l_1=-0.122$, $l_2=-1.597$, $l_3=5.633$, $l_4=0.808$ 。由此可得到本试验中最大相对波压力 $P_s/(\rho g H_s)$ 与 ζ 的拟合公式 (图5实线):

$$\begin{cases} \frac{P_s}{\rho g H_s} = 0.954 \exp(-0.719 \zeta) + 0.519 & 0.76 \leq \zeta \leq 2.37 \\ \frac{P_s}{\rho g H_s} = -0.122 \tanh(-1.597 \zeta + 5.633) + 0.808 & 2.37 < \zeta \leq 4.91 \end{cases} \quad (6)$$

从安全角度出发, 本文也给出了试验数据外包线^[7]拟合计算公式 (图5虚线):

$$\begin{cases} \frac{P_s}{\rho g H_s} = 1.977 \exp(-1.376 \zeta) + 0.72 & 0.76 \leq \zeta \leq 2.37 \\ \frac{P_s}{\rho g H_s} = -0.14 \tanh(-1.597 \zeta + 5.633) + 0.929 & 2.37 < \zeta \leq 4.91 \end{cases} \quad (7)$$

应指出, 图5中 $P_s/(\rho g H_s)$ 相关图所依据的资料, 其试验参数的变化范围为: $\zeta=0.76 \sim 4.91$, $m=1.5 \sim 5$, $H_s/L=1/14 \sim 1/42$, $d/L=0.097 \sim 0.273$, 应用本文的方法时, 一般宜限于上述参数范围内。

7 波压力沿斜坡分布规律

波动过程中, 不仅斜坡上固定点的波浪打击力是变化的, 而且斜坡上各处的波浪力也大小不一^[8]。将一次打击过程中各测点处的相对打击力有效值 $P_s/(\rho g H_s)$ 连成曲线, 可得斜坡上打击力沿斜

坡的分布图。将各测点处的相对打击力有效值与最大打击压力点的相对打击力有效值相比,以最大相对压力打击点为坐标原点,在同一坡度下,不同波高和周期时, P_{sx}/P_x 随沿斜坡的相对距离 x/L 的变化见图6。

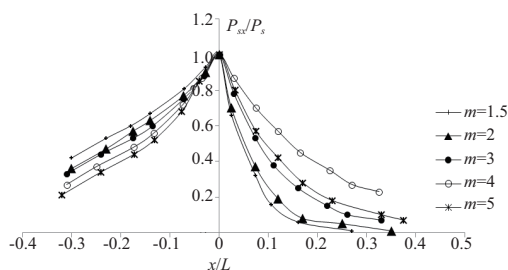


图6 P_{sx}/P_x 随沿斜坡的分布

假定选取指数曲线形式来拟合波压力沿斜坡的分布规律:

$$\text{左侧} \quad \frac{P_{sx}}{P_x} = \exp\left(a \frac{x}{L}\right) \quad (8)$$

$$\text{右侧} \quad \frac{P_{sx}}{P_x} = \exp\left(b \frac{x}{L}\right) \quad (9)$$

其中,左侧是指最大波压力点向水下的方向,取负值;右侧反之。基于MATLAB和SPSS数学软件平台,根据实测试验数据拟合出 P_{sx}/P_x 与 x/L 的关系曲线,其中系数 a 与 b 见表4。

表4 系数 a , b 取值

m	a	b
1.5	3.082	-15.653
2	3.569	-13.205
3	3.786	-8.501
4	4.450	-4.659
5	5.050	-7.328

拟合 m 与 a 和 b 之间的关系:

$$a = 0.637m + 2.104 \quad r = 0.975 \quad (10)$$

$$b = -\frac{22.072}{m} - 1.261 \quad r = 0.947 \quad (11)$$

从而可得相对波压力沿斜坡分布的拟合曲线为:

$$\text{左侧} \quad \frac{P_{sx}}{P_x} = \exp\left[\left(0.637m + 2.104\right) \frac{x}{L}\right] \quad (12)$$

$$\text{右侧} \quad \frac{P_{sx}}{P_x} = \exp\left[\left(-\frac{22.072}{m} - 1.261\right) \frac{x}{L}\right] \quad (13)$$

式中: x 是不同条件下以最大打击力点为原点的,计算点至原点的距离。

8 结语

本文在实测试验数据的基础上,分析了最大有效压力的作用点相对深度 e_0/H_s 的变化规律,拟合出相对深度的计算公式,同时拟合了最大相对波压力的有效值与破波参数 ζ 的关系式并得出了波压力有效值沿斜坡面分布的规律。与此同时,值得注意的是,为了便于统计和计算,本文所给出的最大波压力值是其有效值。目前港工规范中对斜坡堤护面板设计波高累积频率标准尚无明确规定,在今后的设计研究中,或可考虑取 $H_{1\%}$,其设计波浪力也相应地宜取1%大值(即与胸墙设计一样)。在混凝土护面板强度计算时,需考虑有效值与极值之间的关系,或可采用概率统计方法得到各处打击压力极值以及1%大值的分布规律,供工程设计参考。另外需要注意的是,沿斜坡各点的有效值或极值并非同步出现,对于同步压力分布的研究也是十分有意义的。

参考文献:

- [1] 严恺. 海岸工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [2] СНиП II 57-75 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения(водные, ледовые и от судов). М., Стройиздат[S].
- [3] СНиП II 2.06.04-82* 波浪、冰凌和船舶对水工建筑的荷载与作用[S]. 潘少华, 译. 南京: 河海出版社, 1993.
- [4] 中国水利学会围涂开发专业委员会. 中国围海工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [5] Irribarren C R, Nogales C. Protection des Ports, Section II, Comm 4[C]. Lisbon: 17th Int Nav Congress, 1949.
- [6] 黄碧珊. 板护面的斜坡上波浪打击压力的特性研究[J]. 重庆交通学院学报, 1991, 10(2): 84-93.
- [7] 潘少华. 波浪作用下斜坡堤干砌块石护面的稳定计算[J]. 河海大学学报, 1995, 23(2): 1-6.
- [8] 叶立光. 斜坡堤护面板体波浪力的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 1986.

(本文编辑 武亚庆)