

波浪荷载对半圆型潜堤作用的数值分析

胡宝琳^{1,2}, 姚文娟^{1,2}, 刘逸敏¹, 熊胜¹

(1. 上海大学 土木系, 上海 200072; 2. 上海市应用数学与力学研究所, 上海 200072)

摘要: 基于动量源数值造波原理, 运用 Fluent 软件模拟了半圆型潜堤表面波压的分布及变化规律, 采用 π 定理分析了波陡、水深及波长对半圆型潜堤表面波浪力的影响, 并通过统计潜堤表面各点所受压力(最大波压力与最小波压力的差值)最大值的分布, 给出了半圆型潜堤表面压力最大值出现的位置及概率. 分析结果表明, 在水深较深时, 波陡的改变会使波压力在堤顶至背浪侧发生明显变化; 水深波长比的改变, 会引起半圆堤两侧波压力不同的变化; 波压力的最大值一般发生在堤顶处及其偏向背浪侧附近; 半圆堤面上的动波压力最大值主要出现在两侧堤脚附近, 随着波高的增加, 堤面上各点的动波压力由近似对称分布向两侧受力不同转变.

关键词: 数值造波; 半圆型潜堤; 波压力; π 定理

中图分类号: U656.2⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)03-0038-07

潜堤, 一般是指淹没于水中的防护堤, 它不仅能削弱波能, 减弱波浪对其后建筑物的冲击作用和越浪量, 保护内海船舶在港内停泊平稳和作业安全, 还具有防止海岸被侵蚀的作用. 因此, 目前在海岸和近海工程中普遍作为耗散波能的海工建筑物. 半圆型防波堤作为一种较为新型的防护建筑结构, 自上世纪 80 年代末由日本港湾技术研究所等单位首次提出, 并于 1993 年在宫崎港北防波堤初次建造成功后, 引入我国并在天津港等工程中得到广泛应用. 其特点是: (1) 结构断面合理, 受波浪作用力较小(反射率低, 透射率高), 稳定性好; (2) 堤身断面形式简单, 造价低; (3) 波浪力指向圆心, 不产生倾复力矩, 地基应力较小且分布均匀, 特别适用于软弱地基; (4) 堤体预制安装, 勿须填石, 安装方便, 可抵御大浪袭击以及外观较美观等优点.

国内外学者对半圆型防波堤在波浪作用下进行了大量研究, 既有模型试验研究^[1-7], 也有半解析法^[8]和数值方法计算分析^[9-11], 但由于波浪与堤的作用机理复杂, 目前应用的波压力计算大多为经验和半经验公式, 尤其是堤顶淹没的情况下其计算结果与真实情况相差较大. 本文采用数值模型试验, 考虑波陡等影响因素, 对半圆型防波堤(不开孔淹没堤)受波浪作用下的波压力变化进行模拟, 并对计算结果进行了分析.

1 半圆型潜堤截面形式及控制方程

本文拟用线性波, 研究半圆型防波堤在 3 种波高、5 种水深共计 15 种工况组合下圆弧形堤面受到的波浪力. 圆弧堤截面形式见图 1. 波浪要素参见表 1 (波数 k 均为 0.314 15).

控制方程为不可压缩黏性流体的连续性方程和动量方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

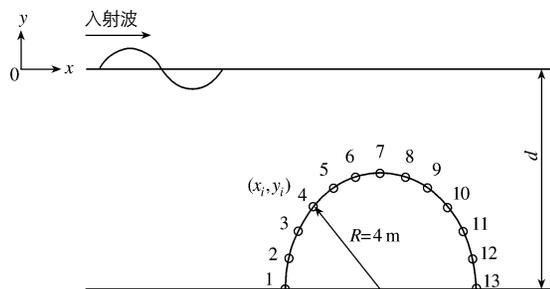


图 1 半圆型潜堤截面形式

Fig. 1 The section of a submerged semi-circular breakwater

收稿日期: 2012-09-20

基金项目: 上海大学创新基金项目(A10-0118-12-002)

作者简介: 胡宝琳(1980-), 男, 安徽宿州人, 讲师, 博士, 主要从事结构抗震、水工结构及其力学性能研究.

E-mail: hubaolintz@163.com

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho g + S_y \quad (3)$$

式中: u 和 v 分别为 x 和 y 方向的速度分量; ρ 为流体密度, 此时为常数; μ 为动力黏性系数; g 为重力加速度; S_x 和 S_y 分别为 x 和 y 方向的附加动量源项。

表1 不同工况的波浪要素

Tab.1 Wave characteristics under different working conditions

波高/m	水深 D /m	波长 L /m	圆频率 ω	周期 T /s	波高/m	水深 D /m	波长 L /m	圆频率 ω	周期 T /s
0.3	5	20	1.681 21	3.737 1	0.9	5	20	1.681 21	3.737 1
	6	20	1.715 48	3.662 5		6	20	1.715 48	3.662 5
	7	20	1.734 04	3.623 3		7	20	1.734 04	3.623 3
	8	20	1.744 02	3.602 5		8	20	1.744 02	3.602 5
	9	20	1.749 37	3.591 5		9	20	1.749 37	3.591 5
0.6	5	20	1.681 21	3.737 1		5	20	1.681 21	3.737 1
	6	20	1.715 48	3.662 5		6	20	1.715 48	3.662 5
	7	20	1.734 04	3.623 3		7	20	1.734 04	3.623 3
	8	20	1.744 02	3.602 5		8	20	1.744 02	3.602 5
	9	20	1.749 37	3.591 5		9	20	1.749 37	3.591 5

为了追踪自由面的波动, 采用 VOF 方法. 为此, 引入体积分数 a_q , 其中 $a_q=0$ 表示单元内没有第 q 相流体, $a_q=1$ 表示单元内全部为第 q 相流体, $0 < a_q < 1$ 表示单元内第 q 相流体占得体积分数为 a_q . 本文中只有空气和水两相流体, $q=1$ 表示空气相, $q=2$ 表示水相, 体积分数 a_q 需要满足如下方程:

$$\frac{\partial a_q}{\partial t} + \frac{\partial(ua_q)}{\partial x} + \frac{\partial(va_q)}{\partial y} = 0 \quad (q=1,2) \quad (4)$$

$$\sum_{q=1}^2 a_q = 1 \quad (5)$$

2 动量源数值造波原理及模型边界条件

2.1 动量源数值造波

动量源造波法首先基于控制方程导出源函数, 源函数的作用可视为对造波区内的流体增加随时间周期性变化的动量, 由此进行数值造波模拟. 在此, 端部反射尤其是入射波与结构作用后在造波端的二次反射问题是不容忽视的.

本文的造波方法基于解析松弛造波-消波方法, 解决了波浪反射的影响, 进而保证能稳定长期地模拟波浪对结构物的作用. 其基本原理为对每一时刻的流速和压强进行修正, 修正表达式为:

$$\text{造波区} \quad um = Cu_1, \quad v_m = Cv_1, \quad p_m = Cp_1 \quad (6)$$

$$\text{前端消波区} \quad u_m = Cu_c + (1 - C)u_1, \quad v_m = Cv_c + (1 - C)v_1, \quad p_m = Cp_c + (1 - C)p_1 \quad (7)$$

$$\text{尾端消波区} \quad u_m = Cu_c, \quad v_m = Cv_c, \quad p_m = Cp_c \quad (8)$$

式中: 下标 m 表示修正值, 1 表示来波值, 下标 c 表示计算值. $C=C(x)$ 表示与空间位置有关的光滑过渡的加权函数, 是取值 $0 \sim 1$ 之间的函数:

$$C(x) = \begin{cases} \sin\left(\frac{x-x_1}{x_2-x_1} \times \frac{\pi}{2}\right) & (\text{造波区和前端消波区}) \\ \cos\left(\frac{x-x_1}{x_2-x_1} \times \frac{\pi}{2}\right) & (\text{尾端消波区}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_1, x_2 分别为造波区、前端消波区和尾端消波区首末端点的横坐标。

现从欧拉方程出发推导 RANS 方程中的源项 S_x 和 S_y 的表达式. 不考虑流体的黏性, 理想流体的运动方程——欧拉 (Eular) 方程表达式如下:

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{dv}{dt} &= \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y}\end{aligned}$$

软件中难以实现速度对时间的偏微分, 因此采取差分方法将欧拉方程瞬态项离散为下式:

$$\begin{aligned}\rho \frac{u_m^{n+1} - u_m^n}{\Delta t} + \rho u_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + \rho v_m \frac{\partial v_m}{\partial y} &= \rho f_x - \frac{\partial p_m}{\partial x} \\ \rho \frac{v_m^{n+1} - v_m^n}{\Delta t} + \rho u_m \frac{\partial v_m}{\partial x} + \rho v_m \frac{\partial v_m}{\partial y} &= \rho f_y - \frac{\partial p_m}{\partial y}\end{aligned} \quad (f_x = 0, f_y = |g|) \quad (10)$$

将添加源项的的动量方程离散为:

$$\begin{aligned}\rho \frac{u_m^{n+1} - u_c^n}{\Delta t} + \rho u_c \frac{\partial u_c}{\partial x} + \rho v_c \frac{\partial v_c}{\partial y} &= \rho f_x - \frac{\partial p_c}{\partial x} + S_x \\ \rho \frac{v_m^{n+1} - v_c^n}{\Delta t} + \rho u_c \frac{\partial v_c}{\partial x} + \rho v_c \frac{\partial v_c}{\partial y} &= \rho f_y - \frac{\partial p_c}{\partial y} + S_y\end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)与(10)相减并代入式(6)~(9), 可分别得到造波区、前端消波区和尾端消波区中的附加动量源项 S_x 和 S_y 的具体表达式^[12-13]. 根据不同区域的波动场表达式, 将附加动量源项代到动量方程(2)和(3)中, 则可进行数值造波和消波的数值模拟。

2.2 模型边界条件

图2为数值波浪水槽示意图. 水槽由4个区域组成: 造波区, 前端消波区, 工作区和尾端消波区, 其中上部为空气, 下部为水, 半圆型防波堤位于工作区内。

边界条件和初始条件的设置如下: 左边界, 取对称 (symmetry) 边界, 即此面法向速度为零; 右边界, 取固壁 (wall) 边界, 即此面法向和水平向速度均为零; 底边界, 取固壁 (wall) 边界, 即此面法向和水平向速度均为零; 上边界, 取压力出口边界条件 (pressure-outlet); 初始条件, 流场中的初始速度取为 $u=0, v=0$ 。

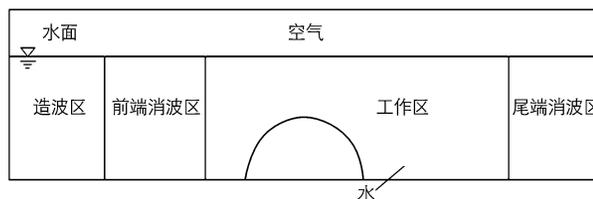


图2 数值波浪水槽示意

Fig. 2 Wave flume for numerical simulation

在求解中, 压力速度耦合采用 PISO 算法, 压力时间项采用一阶隐格式插分算法, 对流和扩散项采用一阶迎风插分格式算法. 在 VOF 方法中, 自由面采用几何重构法。

3 计算结果分析

如前所述, 本文对半径为 4 m 的半圆型防波堤进行了数值模拟, 得到了在不同波高和水深情况下堤面上 13 个点的波压力幅值 (最大波压力与最小波压力的差值). 取点方式见图 1, 即迎浪面和背浪面 5 等份, 取得 12 个点, 最后加取堤顶中点, 总计 13 个点。

波浪水槽模型总长度为 200 m, 划分为 4 个区域, 分为 0~40 m 处的造波区, 40~80 m 处的前端消波区, 80~160 m 处的工作区, 160~200 m 处的尾端消波区. 将圆弧堤置于工作区内, 取静水面处为初始纵坐标, 圆弧堤左底脚处即点 1 (图 1) 的坐标为 (126 m, -d), 斜坡上任一点的横坐标和纵坐标可以按照堤面尺寸和水深计算得到。

3.1 半圆型防波堤受力的影响因素分析

由于波浪流过潜堤是一种复杂的运动现象, 为了对复杂流动进行定性分析, 此处采用 π 定理作为分析

方法. 在不考虑风和流的影响下, 圆弧面堤各点上的波压力幅值 Δp 的函数关系^[14]可表达为

$$\Delta p = f(H, T, L, D, R, \rho) \quad (12)$$

式中: H 为波高; T 为波浪周期; L 为波长; D 为初始水深; R 为圆弧堤半径; ρ 为密度. 根据本文具体问题选取 H, T, ρ 等 3 个基本变量, 则这 3 个物理量的量纲包含了 L, T, M 等 3 个基本量纲, 现检验其独立性

$$[L] = L^1 T^0 M^0, [T] = L^0 T^1 M^0, [\rho] = L^{-3} T^0 M^1$$

其指数行列式为

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1 \neq 0$$

可见 3 个物理量在量纲上是互相独立的. 根据 π 项定理, 式(12)可转化为

$$\pi_{\Delta p} = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3) \quad (13)$$

根据量纲和谐原理可以推出

$$\Delta p = \frac{\rho L}{2\pi} \text{th}\left(\frac{2\pi D}{L}\right) f\left(\frac{H}{L}, \frac{D}{L}, \frac{R}{L}\right) \quad (14)$$

由式(14)可得出 3 个变量与波压力的关系. 由于本文预先给定了圆弧堤半径和波长(即 R/L 为定值)的大小, 这样, 实际变量只有 2 项即波陡 H/L 和水深与波长比值 D/L . 讨论时将 D/L 固定不变, 讨论波压力幅值与 H/L 的关系; 同理, 将 H/L 固定不变(即 H/R 不变时), 讨论波压力幅值与 D/L 的关系. 因此, 我们可以根据 $D/R, H/R$ 这两种影响因素研究圆弧防波潜堤在消浪过程中波压力幅值对堤面的影响作用.

3.2 波压力幅值分布的影响

3.2.1 波陡 H/L 对堤面波压力幅值分布的影响

圆弧堤面上的波压力幅值受波陡的影响见图 3. 可见, 随着水深的改变, 不同的波陡情形有着不同的特点. 对于小波陡的情形即 $H/L=0.015$ 时, 图 3 中圆弧堤面上两侧波压力幅值不论在数值上还是斜率变化上都是近似的, 对圆弧堤的稳定产生有利影响; 在波陡较大的两种情形下, 波压力幅值的改变又有所不同. 主要表现在水深相对较浅的图 3(a) 和 (b) 中, 3 种波陡对波压力的作用近似对称于堤面两侧, 极大值一般出现在堤顶附近; 水深较深的图 3(c) ~ (e) 中, 在堤顶至背浪侧压力幅值斜率会陡然上升, 这些突变的点一般出现在靠岸侧紧挨堤顶处即点 8, 9 处. 随着水深的增加最早出现幅值突变的是波陡为 0.03 的情形, 当水深进一步增加时, 波陡为 0.045 的情形也出现了波压力的突变.

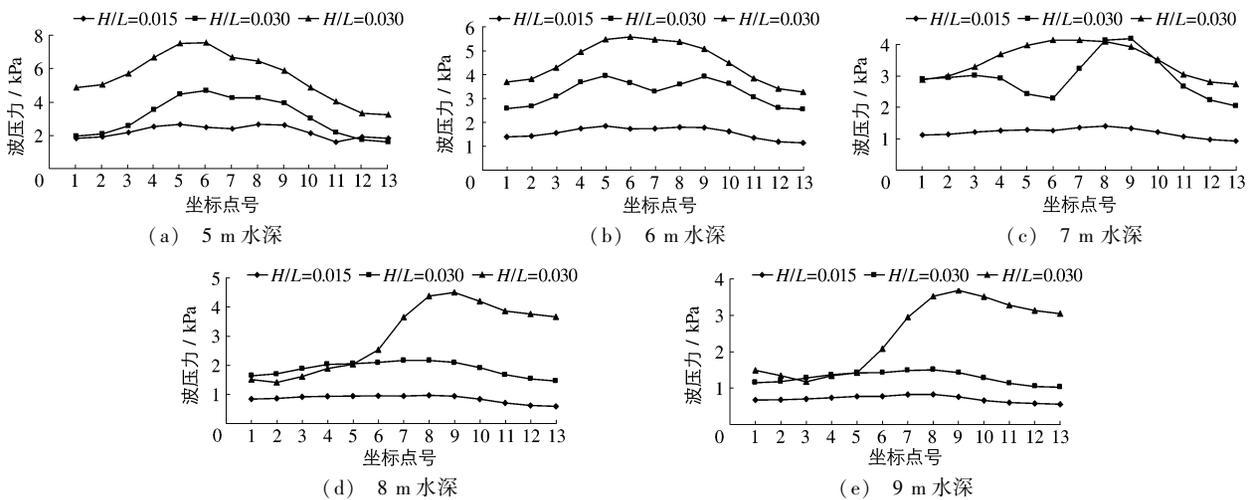


图 3 不同水深波陡对堤面波压力幅值的影响
Fig. 3 Influences of H/L on the values of the wave pressure amplitude of 13 points under different water depths

从模拟过程中所表现的现象可见, 出现这种情形应该是波浪翻越防波堤, 在背浪侧出现波高累加所致. 由于圆弧堤两侧波压力幅值变化的不同, 对圆弧堤的稳定受力是不利的, 所以对于水深较深尤其是经常出现大波高的近海区域, 工程设计中应该加以注意.

3.2.2 水深与波长比值 D/L 对堤面波压力幅值分布的影响 计算结果分迎浪侧和背浪侧两部分分别讨论. 图4(a)~(c)为迎浪侧 D/L 对堤表面各点波压力幅值的影响,从图中可见波高为0.3和0.9 m时,各点压力幅值随着 D/L 的增加呈递减趋势,各点在数值上逐步接近,在斜率变化上各点近似;波高为0.6 m时,压力幅值变化相比波高为0.3和0.9 m时复杂,在点1,2,3处和堤顶处压力幅值随着 D/L 的变化出现了先增大后减小的变化趋势,也就是说在中水波($0.05 < D/L < 0.5$)中会出现一种引起堤脚处和堤顶处产生大幅值变化的情形. 图4(d)~(f)为背浪侧 D/L 对堤表面各点波压力幅值的影响,可见,3种不同水深下 D/L 的改变对压力幅值变化产生的作用是不同的.0.3 m水深下,背浪侧波压力幅值改变接近于迎浪侧变化;0.6 m水深下,背浪侧波压力幅值改变总体上呈先增后减的趋势,极值一般出现在 $D/L=0.30 \sim 0.35$ 处,不同于迎浪侧只是部分点出现这种变化趋势;0.9 m水深下,背浪侧波压力幅值呈先减后增,极小值出现在 $D/L=0.35$ 处.

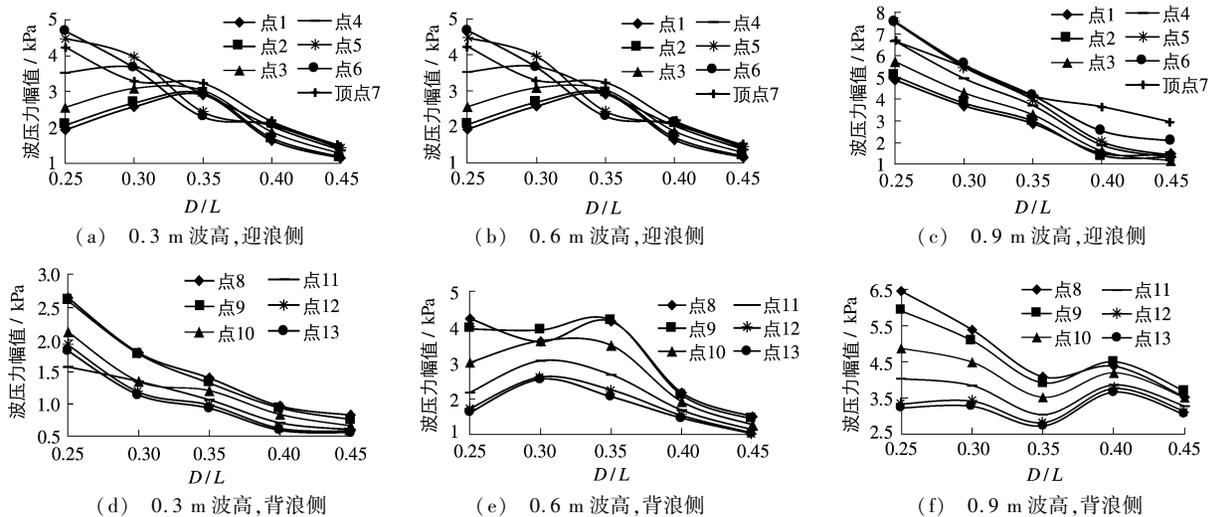


图4 不同波高时 D/L 对迎浪侧和背浪侧压力幅值的影响

Fig. 4 Influences of D/L on the values of the wave pressure amplitude at the front and back sides of the semi-circular breakwater with different wave heights

3.3 波压力最大值作用点统计分析

如上所述,13个观测点的波压力幅值中会有一个最大值 P_{\max} ,故15个工况会有15个 P_{\max} ,其分布和概率分别为:1~6号点, P_{\max} 出现次数为0,概率为0;7,8,9号点, P_{\max} 出现次数为6,5,4,概率依次为40.0%,33.3%,26.6%;10~13号点, P_{\max} 出现次数为0,概率为0.可见,波压力幅值最大值 P_{\max} 在7号点出现的概率最大,然后依次是8和9号点,最后是1~6和10~13号点.所以根据此项统计,波压力幅值的最大值一般发生在堤顶处,并且在堤顶偏向背浪面处出现波压力幅值最大值的概率较大.

3.4 动波压力随 D/L 的改变和分布规律

图5给出了半圆堤堤面上各点动波压力随 D/L 的变化,其中,动波压力=波压力最大值-静水压力,静水压力= ρgh_i , ($i=1,2,\dots,13$)代表半圆堤上的点号.从图5(a)~(b)中可见,当入射波高为0.3和0.6 m时,堤面上各点的动波压力关于7号点与圆心连线呈对称分布,4~10号点之间的各点动波压力在数值上变化不大,最大值一般出现在堤脚附近,即2和12号点;且随着 D/L 的增加,同一点动波压力将有所减小,只在少量点处略有不符,譬如波高为0.6 m而相对水深又较小($D/L=0.25$)时,动波压力最大值将出现在堤顶两侧,此时,迎浪侧的动波压力将大于背浪侧.从图5(c)可见,当入射波高为0.9 m时,堤面上各点的动波压力在迎浪侧和背浪侧的变化已经呈现不同的变化趋势,当相对水深较小($D/L=0.25,0.30,0.35$)时,迎浪侧的动波压力将大于背浪侧,动波压力最大值将出现于堤面迎浪侧堤脚处(2号点);而相对水深较大($D/L=0.40,0.45$)时,背浪侧的动波压力将大于迎浪侧,动波压力最大值将出现于背浪侧堤脚处(12号点, $D/L=0.40$ 时)和背浪侧堤面中间处(10号点, $D/L=0.45$ 时).对比3幅图中同一点处的动波压力可以发现,除堤脚1,13

号点外,随着入射波高的增加,动波压力将增大;而在堤角 1,13 号点处,动波压力将随相对水深的不同分别出现在入射波高为 0.6 和 0.9 m 时.综合上述分析可知,设计半圆型潜堤时需重点关注堤脚和背浪侧的波压力变化,尤其当入射波较大时,迎浪侧和背浪侧的波压力将随深度的改变发生明显不同的变化.

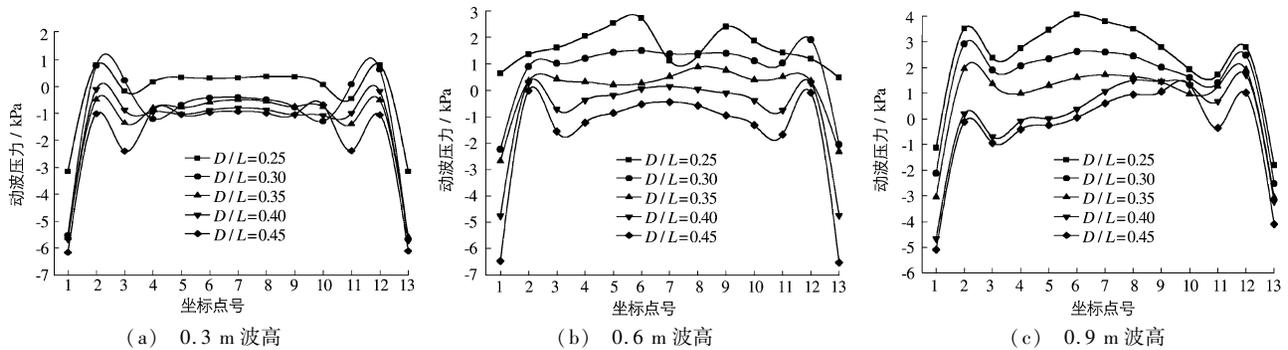


图5 不同波高时 D/L 对动波压力的影响

Fig.5 Influences of D/L on hydrodynamic pressure during different wave heights

4 结 语

本文拟采用数值模型试验,考虑波陡等影响因素,对半圆型防波堤(不开孔淹没堤)受波浪作用下的波压力变化进行模拟,并采用 π 定理对计算结果进行分析.结果表明:

(1) 影响圆弧面的波压力特性的因素,除了 $H/L, D/L$ 外,还与 R/L 有关,各因素相互关联对堤面受力起到不同的作用.

(2) 对于小波陡即 $H/L=0.015$ 的情形,圆弧堤两侧波压力幅值不论在数值上还是斜率变化上都是近似的,都有利于圆弧堤的稳定;在波陡较大的情况下,圆弧堤两侧压力幅值的变化是不同的,在堤顶至背浪侧压力幅值斜率会骤然变大,这主要是波浪翻越防波堤时,在背浪侧出现波高累加的结果.

(3) 在波高为 0.3 和 0.9 m 时,各点压力幅值随 D/L 的增加呈递减趋势,在斜率变化上各点比较近似;在波高为 0.6 m 时,压力幅值变化相比波高为 0.3 和 0.9 m 时复杂,在 1,2,3 号点处和堤顶处压力幅值随着 D/L 的变化出现了先增大后减小的变化趋势.

(4) 截面形式不同使得圆弧面防波堤与一般的斜坡潜堤有着明显不同的波力特性,尤其是分析结构稳定时两者波压力幅值出现的位置并不相同,半圆型堤波压力幅值的最大值一般出现在堤顶偏于朝岸侧.

(5) 当波高为 0.3 和 0.6 m 时,动波压力最大值一般出现在堤脚附近,堤面上各点的动波压力关于堤顶和堤心连线呈对称分布;且随着水深的增加,同一点处动波压力会有所减小.当波高为 0.9 m 时,随着水深的增加,半圆堤面上的动波压力最大值将先出现于迎浪侧堤脚,再出现于背浪侧堤脚和背浪侧堤面靠中间位置;迎浪侧堤面上的动波压力将随着水深的增加先是大于背浪侧,而后小于背浪侧.除了堤脚两侧附近,堤面上其余各点的动波压力将随着入射波高的增加而增大,堤脚两侧的动波压力变化将与入射波高和水深的不同而发生变化.

参 考 文 献:

- [1] DATTATRI J, RAMAN H, SHANKAR J N. Performance characteristic of submerged breakwaters[C] // Proceedings of 16th Coastal Engineering Conference, ASCE, Hamburg, 1978: 2153-2171.
- [2] ABURATANI S, KOIZUKA T, SASAYAMA H, et al. Field test on a semi-circular caisson breakwater[J]. Coastal Engineering in Japan, 1996, 39(1): 59-78.
- [3] CHO Y S, LEE J I, KIM Y T. Experimental study of strong reflection of regular water waves over submerged breakwaters in tandem[J]. Ocean Engineering, 2004, 31: 1325-1335.
- [4] SHI Y J, WU M L, JIANG X, et al. Experimental researches on reflective and transmitting performances of quarter circular breakwater under regular and irregular waves[J]. China Ocean Engineering, 2011, 25(3): 469-478.

- [5] 谢世楞. 淹没情况下半圆型导堤上的波浪力[J]. 港工技术, 1998(2): 1-5. (XIE Shi-leng. Wave forces acting on a submerged semi-circular jetty[J]. Port Engineering Technology, 1998(2): 1-5. (in Chinese))
- [6] 俞聿修, 张宁川, 饶永红. 半圆型防波堤的水力特性研究[J]. 海洋工程, 1999, 17(4): 39-48. (YU Yu-xiu, ZHANG Ning-chuan, RAO Yong-hong. Hydraulic experimental study on semi-circular breakwaters[J]. The Ocean Engineering, 1999, 17(4): 39-48. (in Chinese))
- [7] 饶永红, 俞聿修, 张宁川. 淹没状态下半圆型防波堤的水力特性研究[J]. 海洋学报, 2001, 23(2): 124-131. (RAO Yong-hong, YU Yu-xiu, ZHANG Ning-chuan. Hydraulic experimental study on submerged semi-circular breakwaters[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1999, 17(4): 39-48. (in Chinese))
- [8] LIU Y, LI H J. Analysis of wave interaction with submerged perforated semi-circular breakwaters through multipole method[J]. Applied Ocean Research, 2012, 34: 164-172.
- [9] LIN P Z, LIU P L F. A numerical study of breaking waves in the surf zone[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 359: 239-264.
- [10] YUAN D K, TAO J H. Wave forces on submerged, alternately submerged and emerged semicircular breakwaters[J]. Coastal Engineering, 2003, 48: 75-93.
- [11] 袁德奎, 陶建华. 半圆型防波堤波浪力的计算方法[J]. 中国港湾建设, 2002(2): 11-15. (YUAN De-kui, TAO Jian-hua. Calculation of wave forces on semi-circular breakwater[J]. 2002(2): 11-15. (in Chinese))
- [12] 李凌, 林兆伟, 尤云祥, 等. 基于动量源方法的黏性流数值波浪水槽[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2007, 22(1): 76-82. (LI Ling, LIN Zhao-wei, YOU Yun-xiang, et al. The numerical wave flume of the viscous fluid based on the momentum source method[J]. Journal of Hydrodynamics(Ser A), 2007, 22(1): 76-82. (in Chinese))
- [13] 周勤俊, 王本龙, 兰雅梅, 等. 海堤越浪的数值模拟[J]. 力学季刊, 2005, 26(4): 629-633. (ZHOU Qin-jun, WANG Ben-long, LAN Ya-mei, et al. Numerical simulation of wave overtopping over seawalls[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2005, 26(4): 629-633. (in Chinese))
- [14] 刘颖辉, 吴永强, 李炎保. 圆弧面防波堤水力特性的实验研究[J]. 海洋技术, 2006, 25(2): 94-98. (LIU Ying-hui, WU Yong-qiang, LI Yan-bao. Model experiment on hydraulic characteristics of quarter-circular breakwater[J]. Ocean Technology, 2006, 25(2): 94-98. (in Chinese))

Numerical analysis of wave load on a submerged semi-circular breakwater

HU Bao-lin^{1,2}, YAO Wen-juan^{1,2}, LIU Yi-min¹, XIONG Sheng¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai 200072, China)

Abstract: Submerged semi-circular breakwaters are widely used in the port engineering. The numerical wave generation method based on the theory of momentum source by using fluent simulation is adopted in the study of the changing laws and distribution of the wave pressures on the surface of submerged semi-circular breakwater. By means of the π theorem, the effects of wave steepness, water depth, and wave-length on the amplitude of wave pressures on its surface are analyzed. Besides, through the statistics, the position and occurring probability of the maximum amplitude of the wave pressure on the surface of the semi-circular breakwater are given in the study. The analysis results show that the wave steepness has a large influence on the changing tendency of the amplitude of the wave pressure at the crest and back sea side of the breakwater. The amplitude of the wave pressure at both sides of the submerged semi-circular breakwater is different with different relative depths. The maximum amplitude of the wave pressure generally occurs at the crest or nearby the back sea side. The maximum dynamic wave pressures mainly occur at two bottom-toes of the semi-circular breakwater. With the increasing of wave height, the distribution of dynamic wave pressure on the surface of the semi-circular breakwater changes from symmetric distribution to asymmetric distribution.

Key words: numerically generated waves; submerged semi-circular breakwater; wave pressure; π theorem