波浪荷载对斜坡式潜堤作用的数值分析

胡宝琳，姚文娟，熊　胜，刘逸敏
(上海大学土木系，上海 200072)

摘要：基于动量源数值造波消波技术，运用Fluent软件成功地模拟了在不同的斜坡角角度和水深组合下斜坡式潜堤所受的波浪作用。通过分析斜坡角角度和水深对斜坡潜堤所受波浪力的影响，得出斜坡潜堤所受波浪力受水深影响较大、受斜坡角角度影响较小。该研究为进一步深入研究斜坡潜堤在波浪动力荷载作用下的力学行为提供计算模型，并为实际工程设计提供了有价值的参考。

关键词：造波消波；斜坡潜堤；水深；斜坡角角度

中图分类号：TV 139.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2013)01-0055-05

Numerical analysis of effect on sloping submerged breakwater by wave load

HU Bao-lin, YAO Wen-juan, XIONG Sheng, LIU Yi-min
(Department of Civil Engineering, Shanghai University Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on the generating and absorbing wave technology of momentum source method, this paper simulates successfully the wave effect on sloping submerged breakwater under different combination of slope angle and water depth using the fluent software. According to the analysis of the force affecting on sloping submerged breakwater under different slope angles and water depths, the conclusion that water depth has great influence while slope angle has little on the wave force on the slope-type submerged breakwater is drawn. The research can provide a calculation model for further study on the mechanical behavior of slope-type submerged breakwater under wave dynamic load, and provide valuable reference for practical engineering design.

Key words: generate and absorb wave; sloping submerged breakwater; water depth; slope angle

波浪是造成海滩侵蚀的主要动力因素之一，开敞式海岸地区尤为明显。在近岸潮间带，由于波浪作用，尤其是在近岸波浪破碎掀沙情况下，大部分被侵蚀泥沙向外海扩散运移，造成海滩前缘不断淘刷后退，进而威胁海堤安全。因此，必须采取工程措施对海滩加以保护。潜堤是一种常用的护岸建筑物，广泛应用于护岸、保滩促淤、围海造田以及导流等近海工程中。斜坡式潜堤不仅能阻挡和减弱外海浪作用，达到防止海岸被侵蚀的目的，而且其位于水面以下，不影响海岸景观，因此该结构以其独特的功能及不可替代的优势而引起了许多学者的关注[1-6]。但目前国内外对斜坡式潜堤的理论研究还很不成熟，大量的应用仅建立在摸索的基础上，应用中存在的很多问题都有待于进一步的研究。

本文以梯形断面的斜坡式潜堤为研究对象，运用Fluent软件，基于动量源数值造波消波技术，成功模拟了3个不同坡脚的斜坡式潜堤分别在5种不同水深情况波浪下的作用，并对结果进行了分析。

1　斜坡式潜堤截面形式、控制方程及边界条件

1.1　截面形式

本文共研究了3种截面尺寸在5种水深d（分别为5,6,7,8,9 m）的工况下共计15种情形下的波浪对

收稿日期：2012-05-18

作者简介：胡宝琳（1980—），男，博士，讲师，研究方向为结构抗震、水工结构及其力学性能。

潜堤的作用力。潜堤截面尺寸见表1，截面形式见图1，波浪要素见表2。

表1　斜坡式潜堤潜堤截面尺寸

截面形式	堤高h_t/m	坡角a/(°)	堤顶宽b_1/m	堤底宽b_2/m
1	4	30	1.5	15.356 4
2	4	45	1.5	9.500 0
3	4	60	1.5	6.118 8

表2　波高0.6 m时不同工况的波浪要素

水深D/m	波长L/m	波数k	圆频率ω	周期T/s
5	20	0.314 15	1.681 21	3.737 1
6	20	0.314 15	1.715 48	3.662 5
7	20	0.314 15	1.734 04	3.623 3
8	20	0.314 15	1.744 02	3.602 5
9	20	0.314 15	1.749 37	3.591 5

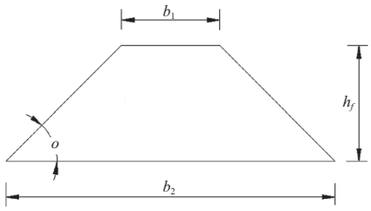


图1　斜坡式潜堤截面形式

1.2　控制方程

控制方程为不可压缩黏性流体的连续性方程和动量方程：

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

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

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

式中：u和v分别为x和y两个方向的速度分量；ρ为流体密度；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两个方向的附加动量源项。

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=0表示水相，体积分数a_q需要满足如下方程

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

$$\sum_{q=1}^{2} a_q=1 \tag{5}$$

2　动量源数值造波和消波方法以及模型边界条件

2.1　动量源数值造波和消波方法

控制方程如之前所述，并设经过造波和消波后的波动场为：

1）造波区。

$$\begin{cases} u_m=Cu_l \\ v_m=Cv_l \\ p_m=Cp_l \end{cases} \tag{6}$$

其中：$[C]_{x\,\min}=0$, $[C]_{x\max}=1$。

2）前端消波区。

$$\begin{cases} u_m=Cu_j+(1-C)u_l \\ v_m=Cv_j+(1-C)v_l \\ p_m=Cp_j+(1-C)p_l \end{cases} \tag{7}$$

其中：$[C]_{x\,\min}=0$, $[C]_{x\max}=1$。

3）尾端消波区。

$$\begin{cases} u_m=Cu_j \\ v_m=Cv_j \\ p_m=Cp_j \end{cases} \tag{8}$$

其中：$[C]_{x\,\min}=1$, $[C]_{x\max}=0$。

式（6）~（8）中：下标j表示计算值，下标l表示来波值，$C=C(x)$为与空间位置有关的光滑过渡的加权函数。在本文的计算中，光滑过渡函数是取值0~1之间的正弦函数：

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

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。

对附加动量源项，可以采用忽略黏性的欧拉方程来确定。将添加动量源项和没有添加的动量方程分别离散为：

$$\rho\frac{u_m^{n+1}-u_j^n}{\Delta t}+\rho u_j\frac{\partial u_j}{\partial x}+\rho v_j\frac{\partial u_j}{\partial y}=-\frac{\partial p_j}{\partial x}+S_x \tag{10}$$

$$\rho\frac{v_m^{n+1}-v_j^n}{\Delta t}+\rho u_j\frac{\partial v_j}{\partial x}+\rho v_j\frac{\partial v_j}{\partial y}=-\frac{\partial p_j}{\partial v}+S_y-\rho g \tag{11}$$

$$\rho\frac{u_m^{n+1}-u_m^n}{\Delta t}+\rho u_m\frac{\partial u_m}{\partial x}+\rho v_m\frac{\partial u_m}{\partial y}=-\frac{\partial p_m}{\partial x} \tag{12}$$

$$\rho\frac{v_m^{n+1}-v_m^n}{\Delta t}+\rho u_m\frac{\partial v_m}{\partial x}+\rho v_m\frac{\partial v_m}{\partial y}=-\frac{\partial p_m}{\partial x}-\rho g \tag{13}$$

由（6）~（8）和（10）~（13），可分别得出在造波区、前端消波区和尾端消波区中的附加动量源项[7-8]。

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，就可以进行数值造波和消波的数值模拟了。

2.2　模型边界条件

图2 为数值波浪水槽示意图，它由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*EF*为静水面，上部为空气，下部为水，斜坡式防波堤位于工作区内。

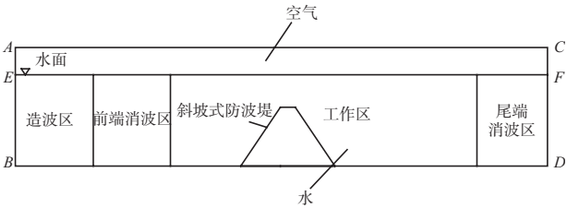


图2　数值波浪水槽示意图

边界条件和初始条件的设置如下：左边界*AB*，取对称边界条件，即*AB* 边的法向速度为 0；右边界*CD*，取固壁边界条件；上边界*AC*，取压力出口边界条件；底边界*BD*，取固壁边界条件（有限水深情况下）或对称边界条件（无限水深情况下）；初始条件，流场中的初始速度取为u=0，v=0。

在动量方程中,压力项采用SIMPLE算法,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

3.1　模拟计算

本文拟用线性波，波浪的波长L=20 m，波高H=0.6 m，分别针对水深为5 m，6 m，7 m，8 m和9 m在斜坡坡脚角度为30°，45°和60°的15种不同工况下进行数值模拟。

如之前所述，本文设计坡脚角度不同的3个梯形断面，并且通过数值试验，得到了在不同坡脚和不同水深情况下斜坡堤上9个点的波压力幅值(最大波压力与最小波压力的差值)。如图3所示，对斜坡堤左边即迎浪面4等份，取5个点；对斜坡堤右边即背浪面2等份，取3个点；最后加取堤顶中点，总计9个点。

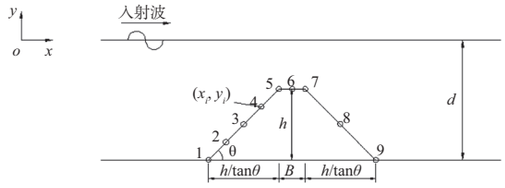


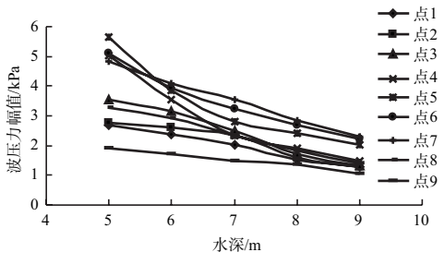
图3　斜坡堤示意图

波浪水槽模型总长度为200 m，0~40 m为造波区，40~80 m为前端消波区，80~160 m为工作区，160~200 m为尾端消波区。斜坡堤处于工作区内，取水面纵坐标为0，斜坡堤左坡脚处即点1的坐标为（110 m，$-d$），斜坡上任一点的横坐标和纵坐标可以按照斜坡坡脚角度、斜坡堤尺寸和水深依次计算。

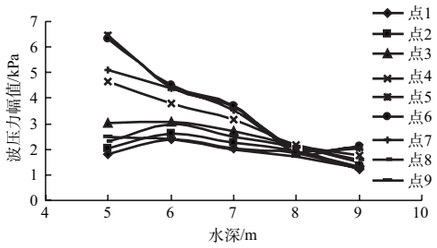
在数值模拟中潜堤表面边界取为固壁边界，未考虑斜坡堤面粗糙度和透水等影响。

3.2　水深对斜坡潜堤上各点波压力幅值大小的影响

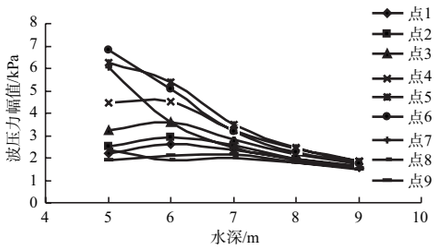
水深对斜坡潜堤上波压力幅值大小的影响如图4所示，由图4可知，斜坡堤上点的波压力幅值随着水深的增加而不断地减小，还可以看出，点4,5,6和7的波压力幅值与水深关系曲线斜率较大，点1，2，3，8和9的波压力幅值与水深关系曲线斜率较小，并且曲线斜率基本上随着点的纵坐标的增加而不断的增加，点5，6和7的斜率基本上相近。



a）坡脚30°



b）坡脚45°

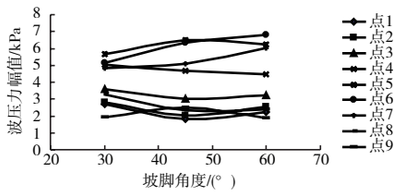


c）坡脚60°

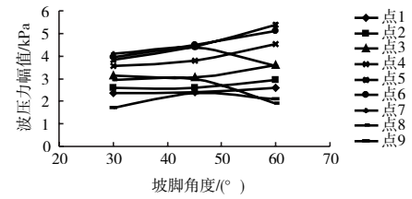
图4　不同坡脚度数时，水深对不同点波压力幅值的影响

3.3　坡脚角度对斜坡潜堤上各点波压力幅值大小的影响

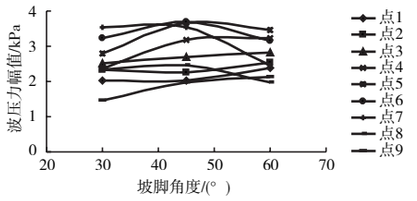
坡脚角度对斜坡潜堤上波压力幅值大小的影响如图5所示，由图5可知，斜坡堤上点1,2,3,4,8和9的波压力幅值随着坡脚的变化而呈现离散性的变化，基本上坡脚角度变化对其波压力幅值无明显影响；点5,6和7的波压力幅值在5 m和6 m水深时，波压力幅值随着坡脚角度的增加而增加；在7 m水深时，波压力幅值随着坡脚角度的增加呈现先增加后减小的趋势；在8 m水深时，波压力幅值随着坡脚角度的增加呈现先减小后增加的趋势；在9 m水深时，波压力幅值随着坡脚角度的增加而减小。这样，在水深较小(5 m,6 m,7 m)的情况下，建造坡脚角度为30°或较小角度的斜坡潜堤有利于减小堤顶的波浪压力幅值；在水深适中(8 m)的情况下，建造坡脚角度为45°左右的斜坡潜堤有利于减小堤顶的波浪压力幅值；而在水深较大(9 m)的情况下，建造坡脚角度为60°或较大角度的斜坡潜堤有利于减小堤顶的波浪压力幅值。总体来说，坡脚角度对斜坡潜堤上整体的波压力幅值影响不大。



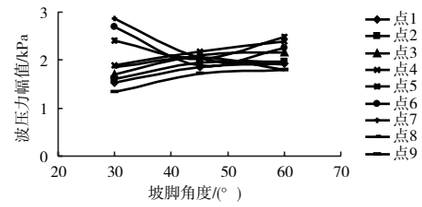
a）水深5 m



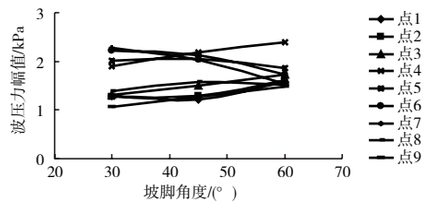
b）水深6 m



c）水深7 m



d）水深8 m



e）水深9 m

图5　不同水深时，坡脚角度对不同点波压力幅值的影响

3.4　最大波压力幅值最大值作用点统计分析

如上所述，在每个工况9个点的波压力幅值中会有一个波压力幅值最大值P_{max}，这样，15个工况会有15个P_{max}，这15个P_{max}将会按照概率分布在9个点之中，对其统计见表3。

表3　波压力幅值最大值作用点概率统计

点号	P_{max}出现次数	概率/%
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	1	6.67
5	6	40.00
6	4	26.67
7	4	26.67
8	0	0
9	0	0

从表3可以看出，波压力幅值最大值P_{max}在点5出现的概率最大，然后依次是点6和点7，再是点

4，最后是点1,2,3,8和9。所以根据此项统计，波压力幅值最大值一般发生在堤顶处，并且在堤顶偏向迎浪面处出现波压力幅值最大值的概率较大。

3.5　迎浪面和背浪面受力比较

如图3所示，点1,3和5的纵坐标分别与点9,8和7的纵坐标相等，将迎浪面点1,3和5的波浪压力幅值进行求和并记为$P_{迎}$，将背浪面点7,8和9的波浪压力幅值进行求和并记为$P_{背}$。这样，可以认为$P_{迎}$和$P_{背}$分别代表着波浪对斜坡潜堤迎浪面和背浪面的整体受力，将上述15个工况迎浪面和背浪面的整体受力$P_{迎}$和$P_{背}$及其差值（$P_{迎}$–$P_{背}$）统计如表4所示。

表4　迎浪面和背浪面整体受力统计

水深/m	坡脚角度/（°）								
	30			45			60		
	$P_{迎}$/Pa	$P_{背}$/Pa	($P_{迎}$– $P_{背}$)/Pa	$P_{迎}$/Pa	$P_{背}$/Pa	($P_{迎}$– $P_{背}$)/Pa	$P_{迎}$/Pa	$P_{背}$/Pa	($P_{迎}$– $P_{背}$)/Pa
5	11 890.58	10 002.10	1 888.48	11 324.13	9 923.15	1 400.98	11 693.86	10 280.72	1 413.13
6	9 345.21	8 748.63	596.58	9 882.02	9 723.96	158.07	11 574.05	7 557.83	4 016.23
7	7 336.55	7 339.79	–3.24	8 368.11	7 966.12	401.99	8 663.60	6 575.38	2 088.23
8	5 640.79	6 050.73	–409.95	5 971.27	5 835.64	135.64	6 572.90	5 509.62	1 063.29
9	4 623.07	4 735.40	–112.33	4 770.11	4 869.70	–99.60	5 154.49	4 542.36	612.13

从表4中可以看出，迎浪面的整体受力普遍比背浪面的整体受力大，并且在水深为5 m时，3种不同坡脚角度的迎浪面和背浪面整体受力差值（$P_{迎}$– $P_{背}$）均比较大，在斜坡坡脚角度为60°时，5种不同水深的（$P_{迎}$– $P_{背}$）也均比较大，这就说明在水深较小和斜坡坡脚角度较大的情况下，迎浪面对波浪力的敏感度要比背浪面的敏感度大。

4　结语

计算结果表明，波压力幅值和斜坡坡脚角度、水深以及斜坡点纵坐标有关。

1）波压力幅值随着点的纵坐标的增加而增加，即斜坡点越往上靠近堤顶，该处所受波浪力越大，波浪力最大处基本上发生在堤顶并偏向迎浪面处，波浪对堤顶的影响明显要高于对堤底的影响。

2）水深对波浪力的影响较显著，其它因素一定的情况下，水深越大堤顶水深越大，导致波浪传至斜坡潜堤时，大部分的能量就会直接透射过去，使得整个斜坡堤所受的波浪力就会越小。

3）总体来说，坡脚角度对斜坡潜堤上任一点或者整体受力影响不大。但是考虑到堤顶的受力，斜坡坡脚角度大小应该根据水深大小进行选取，一般的，斜坡坡脚角度与水深成正比例变化比较有利于减小堤顶的受力。

4）在水深较小和斜坡坡脚角度较大的情况下，迎浪面对波浪力的敏感度要比背浪面的敏感度大，此时尤其需注意迎浪面的护坡处理工作的质量。

参考文献：

[1] Dattatri J, Raman H, Shankar J N. Performance characteristic of submerged breakwaters[C]. Hamburg: Proceedings of 16th Coastal Engineering Conference: ASCE, 1978:2 153–2 171.

[2] 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: 1 325–1 335.

[3] Abdul Khader M H, Rai S P. A study of submerged breakwaters[J]. Journal of Hydraulic Research: IAHR, 1980, 18(2): 113–121.

[4] Kobayashi Nobuhisa, Meigs L E, Ota T, et al. Irregular breaking wave transmission over submerged porous breakwater[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2007(3): 104–116.

[5] Van der Meer J W, Daemen I F R. Stability and wave transmission at low-crested rubble-mound structures [J]. Journal of Waterways ,Port , Coastal and Ocean Engineering , 1994 , 120 (1) : 1–19.

[6] Jeng D S, Schacht C, Lemckert G. Experimental study on ocean waves propagating over a submerged breakwater in front of a vertical seawall[J]. Ocean Engineering, 2005, 32: 2 231–2 240.

[7] 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, 2007, 22(1): 76–82.

[8] 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.

（本文编辑　武亚庆）