



波浪在斜坡堤上传播的数值模拟*

安蒙华, 蒋勤, 张长宽
(河海大学, 江苏南京 210029)

摘要: 基于VOF自由表面追踪技术, 通过直接求解Navier-Stokes方程及 κ - ϵ 方程, 建立了求解波浪与建筑物相互作用的数值波浪水槽, 并将其用于研究波浪在不透水斜坡堤上传播的物理过程。首先, 通过对水平床上非线性波传播过程的模拟分析验证了该数值波浪水槽的模拟精度; 在此基础上, 对规则波在斜坡堤上传播的水动力过程, 包括波浪爬坡、越浪及越流等进行了数值模拟, 并通过物理模型试验结果对堤前水位及越浪量变化的模型模拟结果进行验证。

关键词: 波浪; 斜坡堤; 爬坡; 越浪; 数值模拟

中图分类号: TV 139.2*6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)06-0025-05

Numerical simulation of wave propagation on sloping dike

AN Meng-hua, JIANG Qin, ZHANG Chang-kuan
(Hohai University, Nanjing 210029, China)

Abstract: A numerical wave flume which is developed by directly solving Navier-Stokes equation and κ - ϵ equation with VOF technique and SMAC method is established to simulate the interaction of wave and coastal structures, especially to study the course of wave propagation on sloping dike. At first, the simulation accuracy of wave flume is verified by analyzing the non-linear wave propagation over a horizontal bed, based on which, the whole course of regular wave propagation on sloping dike is simulated, including the wave run-up and wave overtopping. Then the temporal variation of water elevation at measuring points on the slope and the overtopping rate are validated by experimental data.

Key words: numerical simulation; sloping dike; wave run-up; wave overtopping; numerical simulation

波浪传播到斜坡堤时, 受斜坡堤底坡的影响, 波浪剖面变陡, 波峰质点速度增加, 致使波浪发生破碎, 并沿斜坡爬升。当波浪的上爬高度超过坡顶时, 即发生越浪越流。正确评估斜坡堤上波浪的爬坡、越浪和越流与堤顶的设计及其安全性密切相关。因此, 研究波浪在斜坡堤上的传播过程, 特别是评估波浪的爬高和越浪量, 是国内外学者研究的传统热点课题。早在1955年, Saville T等^[1]就针对规则波在斜坡堤上的爬坡以及越浪现象进行了物理模型试验研究。此后, Owen^[2]和Van Der Meer等^[3]先后对斜坡堤的越浪

量问题做了大量的研究工作。20世纪90年代以后, Holger Schüttrumpf^[4]及Van-Gent^[5]通过物理模型试验研究给出了斜坡堤越浪量、越浪流的流速及流深的理论公式。

20世纪70年代后期, 随着计算机技术的发展, 数值波浪水槽的研究和应用受到人们的关注。关于波浪在斜坡堤上传播的数值模拟, Hu等^[6]基于非线性浅水方程, 使用AMAZON模型对斜坡堤上波浪爬高及越浪过程进行了模拟, 并与Saville T的试验结果进行了对比。Soliman^[7]采用RANS方程以及VOF自由表面追踪技术模拟了越浪过程。

收稿日期: 2013-10-20

*基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费(201201045)

作者简介: 安蒙华(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事波浪与建筑物相互作用的研究。

Li 等^[8]通过采用 VOF 方法构建的数值波浪水槽模拟了波浪与斜坡式以及直墙式建筑物的相互作用。Lu 等^[9]采用基于 RANS 方程及 $\kappa-\epsilon$ 湍流方程的二维数值水槽模拟了带有护面块体的海堤的波浪越浪过程。尽管数值模拟技术已经取得了长足的进步，但是在模拟波浪与建筑物相互作用方面，尤其是当水体出现大量紊动以及破碎的情况下，数值模拟的计算结果在准确度上与传统物理模型试验还是存在一定的差距。因而，数值模型仍有待于不断改进和完善，以求达到实际工程应用的要求。

因此，本文通过直接求解描述牛顿流体运动的 Navier-Stokes 方程及描述流体紊动过程的 $\kappa-\epsilon$ 方程，采用 VOF 自由表面追踪技术和 SMAC 数值计算方法建立了一个用于模拟波浪与建筑物相互作用的数值波浪水槽。采用该数值波浪水槽模拟了波浪在斜坡堤上爬坡以及越浪越流的过程，并通过试验数据对斜坡上波浪水位变化过程以及越浪量值进行了验证。

1 数值波浪水槽

1.1 数值波浪水槽介绍

本文建立的垂向二维数值波浪水槽，其控制方程由两部分组成，首先是适用于牛顿不可压缩流体的连续性方程和 Navier-Stokes 方程，为描述透水性结构内的水流特性，将控制方程进行了修改以适用于计算可透性介质内的水流运动。其次是描述紊流运动的 $\kappa-\epsilon$ 湍流方程，为了模拟波浪作用于建筑物后产生的如波浪破碎等强烈的自由表面变形现象，模型中采用了 VOF 自由追踪技术。模型具体控制方程参考文献[10]。

模型的造波边界采用 Isobe 等提出的有限振幅波速度分布的摄动解。当厄赛尔 (Ursell) 数 > 25 时，近似地使用三阶椭圆余弦波；当厄赛尔 (Ursell) 数 ≤ 25 时，近似地使用五阶 Stokes 波 (其中 $Ur = gHT^2/h^2$ ， H 是波高， T 是波周期， h 是水深)。为考虑波浪破碎及水体分解和融合等变形特性，自由面边界取压力为零，并采用 VOF

法追踪自由表面的运动。在数值波浪水槽的末端，采用 Sommerfield 无反射条件并引入人工透水层以消除或削弱水槽末端对波浪的反射作用。

1.2 数值波浪水槽的验证

所建立的数值波浪水槽设置了函数造波法和推板式造波法两种造波方式，本研究采用了函数造波法。在具体的数值计算中，为了避免波浪二次反射对模拟结果的影响，一方面在计算中适当增加了水槽的长度，另一方面仅选取反射波到达造波源之前的稳定的计算结果进行分析。

为了验证该数值波浪水槽造波的准确性，对波浪在水平床面上的传播过程进行数值模拟。图 1 为用于模型验证的数值波浪水槽的示意图，水槽长 90 m，高 1.6 m，水深 0.7 m。图 2 是 Stokes 波 (波高 $H=0.121$ m，周期 $T=4.15$ s) 及椭圆余弦波 (波高 $H=0.076$ m，周期 $T=2.51$ s) 在水槽中传播时距离造波板 50 m 处的波面历时曲线与理论值的比较。

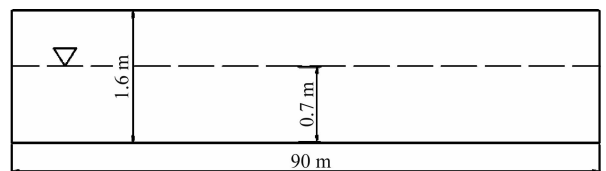


图 1 数值水槽

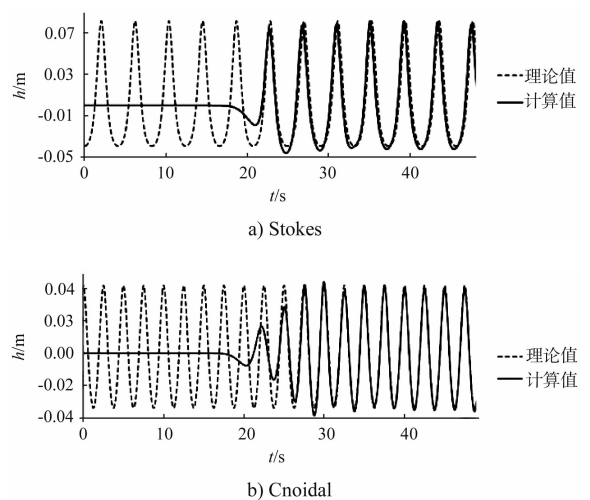


图 2 $x = 50$ m 处本文计算值与理论值的比较

从图 2 中可以看到，随着时间的推移，从造波板生成的波浪逐渐向水槽尾部推移，当测点波形达到稳定之后，模型模拟的波面历时曲线与理

论值吻合良好。波浪的沿程衰减率大约为 2%，在允许的范围之内。同时，从波形历时曲线可以看出，波峰尖陡而波谷较为平坦，并且波峰值远大于波谷值，表现出很强的非线性特性。表明该数值波浪水槽可以有效地模拟 Stokes 波及椭圆余弦波在水槽中的传播问题。

1.3 模型网格的划分

为准确地捕捉自由表面运动，提高对波浪传播过程中波浪破碎等现象的模拟精度，在以下关于波浪爬坡、越浪及越流过程的模拟中，引入了不均匀结构化网格处理。

1) 在垂直方向上：网格划分时以静水面为基准，在 $\pm H$ 范围内取网格尺度 $\Delta z = 0.01$ m，其余区域取 $\Delta z = 0.05$ m。

2) 在水平方向上：为了提高海堤堤面附近的计算精度，对斜坡堤所在计算区域进行了网格加

密，取网格尺度 $\Delta x = 0.01$ m，其余的计算区域则采用较疏松的计算网格，取 $\Delta x = 0.05$ m。

2 斜坡堤上波浪传播现象的模拟

为考察数值波浪水槽对斜坡堤上波浪的爬坡、越浪及越流等物理现象的再现能力，首先对波浪在不透水斜坡堤上传播的物理过程进行了数值模拟。图 3 给出了计算得到的描述在一个波浪周期内不同时刻波浪爬坡及越流过程的流速矢量。从图 3 中可以看到当波浪的波峰传播到堤前时，受斜坡堤底坡的影响，波浪剖面变陡，波峰质点速度增加，波浪发生破碎。之后水体沿斜坡迅速爬升，水舌厚度也不断减小。当波浪上爬高度超过堤顶时，形成越流。最终，越过堤顶的水体沿后坡下泄。由此可见，模型的模拟结果与传统的物模试验得到的结果在定性上吻合良好。

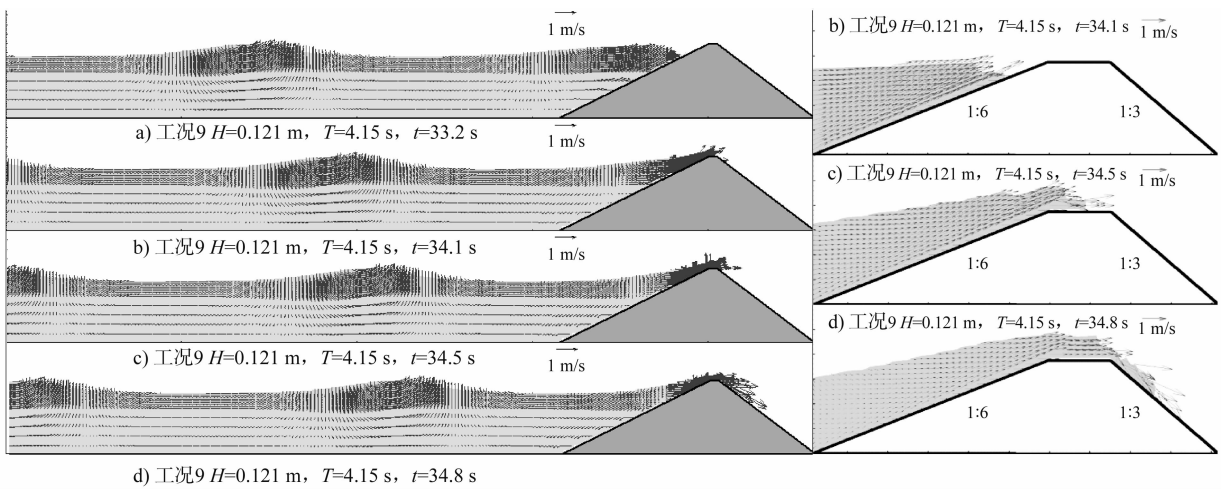


图 3 斜坡堤上波浪传播过程的流场

3 波浪爬坡验证

波浪的爬高是确定海堤堤顶高程的重要参数，并直接影响着工程的安全和造价。对斜坡堤波浪爬高的研究一直是波浪与斜坡堤相互作用研究的重点。准确地再现波浪在斜坡堤爬坡过程中的水位线变化，是计算波浪爬坡高度的基础，也是验证数值波浪水槽在模拟波浪爬高中可行性的关键。因此，本文通过对模型模拟的斜坡堤上沿程水位线变化与实测结果的比较，间接地验证该数值波浪水槽在计算斜坡堤波浪爬高中的可行性。

如图 4 所示，计算条件的设定采用了与文献 [8] 的物理模型试验相同的布置。其中，斜坡堤坡度为 1:6，堤脚处水深 $d = 0.7$ m，波高 $H = 0.16$ m，周期 $T = 2$ s，监测点 WG1，WG2 和 WG3 距堤脚处的水平距离分别为 0.00，1.02，2.81 m。

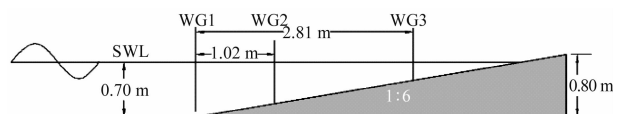


图 4 断面形态及测点位置

图 5a) 为斜坡堤堤脚处 WG1 的水位变化过程的模型计算结果与理论计算结果的比较。从图中可以看出, 堤脚处 WG1 测点的计算水位过程线与理论值吻合良好。说明波浪到达堤脚时, 能够达到物理模型中所要求的试验条件, 进而保证了对斜坡上测定的 WG2 和 WG3 水位过程进行计算值与实测值比较的可比性。

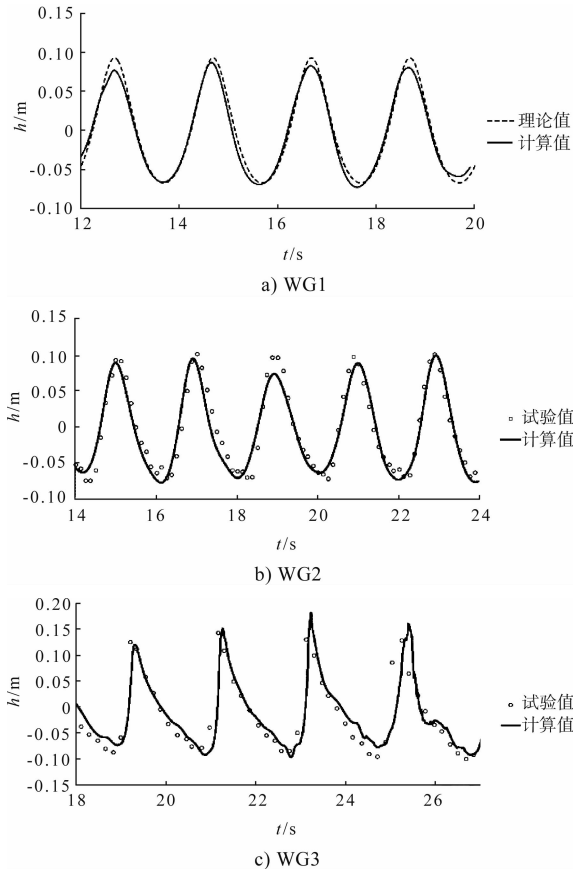


图 5 斜坡堤上测点水位过程线的计算值与实测值比较

图 5b) 和图 5c) 为沿斜坡堤的测点 WG2 和 WG3 处的水位变化过程的模型计算结果与实测结果的比较。从图中可以看出, 除 WG2 测点的水面波峰值略有起伏外, 总体上测点 WG2 和 WG3 处的波面水位在量值和相位上均与实测值吻合良好, 表明该数值波浪水槽能够较好地模拟波浪在不透水斜坡堤上的爬坡过程。

4 越浪量的验证

越浪量是影响斜坡堤设计的另一个重要因素。对越浪量的准确模拟, 也是验证数值波浪水槽可行性的关键。本文参照 Holger Schüttrumpf^[4]的物理模型试验数据对计算得到的越浪量值进行了验证。

图 6 为计算采用的波浪水槽及斜坡式海堤的断面形态。水槽长 90 m, 高 1.6 m, 水位高度 0.7 m, 建筑物高度 0.8 m, 堤顶宽度 0.3 m, 前坡坡度为 1:6, 后坡坡度为 1:3。本文针对规则波与斜坡式海堤相互作用的 12 组工况进行了数值模拟。表 1 列出了具体的计算条件, 其中 d 为水深, R_c 为堤顶超高, H 为波高, T 为波周期, Q 为单宽越浪量。

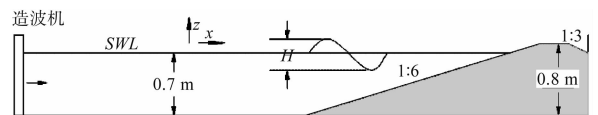


图 6 建筑物断面形态

表 1 数值模拟各工况计算条件

工况	d/m	R_c/m	H/m	T/s	$Q/(L \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$	
					试验结果	计算结果
1	0.7	0.1	0.076	2.51	0.98	0.46
2	0.7	0.1	0.076	3.25	1.73	1.86
3	0.7	0.1	0.075	6.02	3.32	4.97
4	0.7	0.1	0.109	1.50	0.00	0.00
5	0.7	0.1	0.117	2.45	2.32	1.82
6	0.7	0.1	0.119	3.15	5.79	7.95
7	0.7	0.1	0.121	4.15	8.59	8.66
8	0.7	0.1	0.155	1.96	3.33	4.34
9	0.7	0.1	0.158	2.45	4.66	5.23
10	0.7	0.1	0.164	3.16	11.06	12.00
11	0.7	0.1	0.196	1.95	6.01	8.80
12	0.7	0.1	0.209	2.44	8.79	9.62

如式 (1) 所示, 本文选取堤顶与后坡交接处的越浪流水舌厚度与流速的乘积估算越浪量的量值, 以避免堤顶水体回流的影响, 并可以得出较为准确的越浪量值。

$$q = \int_{t_1}^{t_2} q(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} h(t)u(t) dt \quad (1)$$

考虑到对于规则波而言, 当越浪达到稳定状态以后, 3 个完整的越浪过程已经具有一定的代表性, 越浪量的计算采用了 3 个越浪过程的平均值。图 7 给出了采用上述方法对工况 9 进行计算而得出的越浪量计算结果。其中, 图 7a) 和 7b) 分别为模型模拟的水舌厚度和流速随时间的变化, 图 7c) 为计算得到的越浪量随时间的变化。可以看出, 由该数值模型得出的越浪过程曲线在定性上与传统的物理模型试验得出的结果十分吻合。

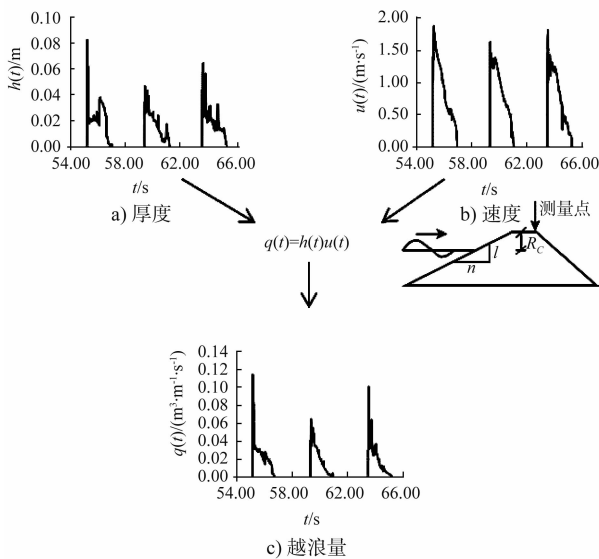


图 7 越浪量计算方法

图 8 为采用数值波浪水槽得出的越浪量的计算值与试验值的比较。可以看出越浪量的数值计算结果与试验结果吻合良好。两者的平均相对误差为 23.07%, 引起该误差的主要原因大概为: 数值模拟中采用了矩形网格, 造成斜坡式建筑物表面是锯齿状的, 这与物理模型中采用的光滑表面有一定差异, 从而在计算中引入了一定的误差。

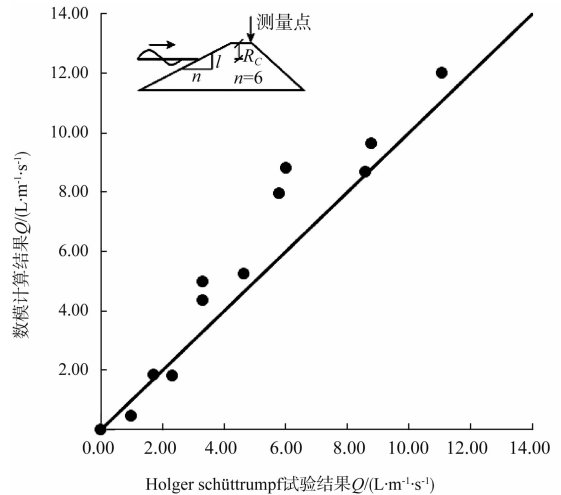


图 8 越浪量计算值与试验值的比较

此外, 当波高较小、非线性特性较弱时, 越浪流流经堤顶时流态较为平稳, 并没有产生剧烈的紊动, 堤顶与后坡交接处的流速及水舌厚度都能保持一个稳定的状态, 数值计算结果较准确。而当波高逐渐增加以后, 波浪与海堤相互作用的非线性特性增强, 越浪流经过堤顶时会产生复杂的变形和破碎, 并卷入大量的空气。堤顶与后坡处越浪流流速与水舌厚度的历时曲线也会出现大量锯齿状的波动, 这也就造成了越浪量计算精度的降低。

5 结语

本文采用基于 VOF 法建立的数值波浪水槽, 对不透水斜坡堤上波浪传播过程中的波浪爬坡及越浪越流现象进行了数值模拟。在此基础上, 采用实测资料对波浪在斜坡上爬坡过程中的水位变化进行了验证, 证实了本数值模型对波浪爬坡现象模拟的准确性。同时, 对斜坡堤越浪量进行了计算, 并与 Holger Schüttrumpf 模型试验结果进行了比较, 数值计算结果与实测资料吻合良好。

研究表明, 本文提出的数值波浪水槽在模拟波浪与斜坡堤相互作用中具有良好的可靠性, 并且能够达到一定的模拟精度。在今后的研究中, 拟增加透水性建筑物并考虑斜坡堤表面的糙渗系数, 以便更好地再现波浪与斜坡堤相互作用的物理现象。