



抛石防波堤波浪作用 CFD 仿真

王腾飞¹, 冯杰夫², 朱 翔¹

(1. 中交机场勘察设计院有限公司, 广东 广州 510220;

2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510220)

摘要: 从流体力学基本方程和气液混合耦合计算方程出发, 采用有限差分方法, 对随机布置块石形成的断面进行精细化网格划分。运用计算流体力学软件, 建立了抛石防波堤波浪作用仿真模型, 并严格按照实际情况设定边界条件, 精确完成气液混合相的耦合计算。对抛石防波堤压强和流速分布及块石受力的仿真计算表明, 水深会影响抛石堤水流入射区域、压强和流线分布; 堤前后侧压强差的改变是堤内发生渗流的必要条件, 而局部较大的孔隙率和孔隙连接程度, 会导致该区域渗流程度加大; 处于流线位置上的块石因受到快速水流的冲击作用, 会产生较大的水平作用力。

关键词: 海岸工程; 抛石防波堤; 波浪作用; 有限差分法; CFD 仿真

中图分类号: TV 871

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)10-0034-05

CFD simulation on wave action of mound breakwater

WANG Teng-fei¹, FENG Jie-fu², ZHU Xiang¹

(1. CCCC Airport Investigation and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510220, China;

2. CCCC FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510220, China)

Abstract: Based on the fluid mechanics basic equations and gas-liquid mixing coupling calculation equations, the section accumulated by rocks generated randomly was meshed in refinement using finite difference method. Based on CFD software, the simulation model on wave action of mound breakwater was established and the boundary condition was set in accordance with the actual situation strictly to gain an accurate gas-liquid mixing coupling calculation. Simulation results of pressure and flow lines distribution in and around the mound breakwater and strength of rocks indicate that the water depth has an effect on inlet area, pressure and flow lines distribution; the pressure difference of front and back side of the breakwater is necessary for transfusion inside of breakwater; lager local porosity and gap connection degree result in lager transfusion degree and strength of the rocks blocking in flow lines is lager as the conflict between water and rocks.

Keywords: coastal engineering; rubble mound breakwater; wave action; finite difference method; CFD simulation

在海岸和近海工程中, 建筑物通常会遭受来自波浪^[1]的侵害, 而抛石防波堤因取材方便、造价低廉、施工简易被广泛地应用于水工建筑物的波浪防护之中。抛石防波堤由非连续的离散介质组成, 块石之间存在一定的孔隙, 致使抛石堤内形成渗流, 目前研究对防波堤渗流的宏观假

设^[2-4], 无法反映其实际微观流动情况。本文从微观角度出发, 编写颗粒随机生成程序, 构造出满足工程目标孔隙率要求的二维块石防波堤断面, 建立抛石防波堤的计算流体力学模型, 设定边界条件, 采用有限差分法对网格化流域进行计算, 分析防波堤整体稳定性和局部块石受力情况。

收稿日期: 2015-01-20

作者简介: 王腾飞 (1989—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事结构振动与控制研究工作。

1 基本方程

流体力学所满足的最基本的规律是质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。这些定律在流体力学中的体现就是相应的连续性方程和 N-S 方程^[5]。对于二维非定常不可压缩黏性层流流动, 如果不考虑流场中的温度变化, 可通过下列基本方程来描述其性质:

连续性方程:

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

式中: u 、 v 、 w 为速度矢量 $\mathbf{v}$ 沿 x 、 y 、 z 轴的 3 个速度分量。

Navier-Stokes 方程 (动量守恒方程):

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \text{grad}p = \rho\mathbf{F} + \mu\nabla^2\mathbf{v} \quad (2)$$

式中: ρ 为不可压缩流体密度 (常数); p 为压力; $\mathbf{F}$ 为外力; 常数 μ 依赖于流体的性质, 称为黏性系数。Navier-Stokes 方程能准确地描述实际流动, 黏性流体的流动分析可归结为对方程 (2) 的求解。但由于其形式甚为复杂, 实际上只有极少数情况可以求出精确解, 故产生了通过数值方法求解的研究。

对于气液混合相流体耦合计算, 常使用 Volume of Fluid 方法对其自由分界面进行处理^[6], 即对每个计算单元定义目标流体体积和网格体积的比值, 并由下述方程求解:

$$\frac{\partial C_l}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla C_l = 0 \quad (3)$$

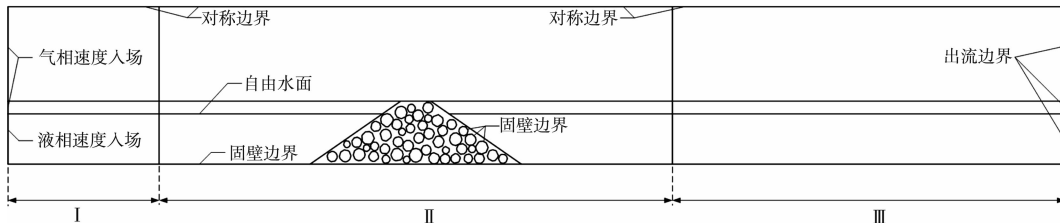


图 2 计算流域边界条件

如图 2 所示, 水深 1.2 ~ 1.6 m, 下部为液相流域, 上部为气相流域, 因此需将入射边界分开处理。空气来流速度可以依据文献 [8-9] 对 A 类地面粗糙度指数和梯度风高度的规定来确定:

式中: C_l 为液相的体积比率。则网格中流体的平均密度为:

$$\rho = (1 - C_l)\rho_g + C_l\rho_l \quad (4)$$

式中: ρ_g 和 ρ_l 分别为混合流体气相与液相质量密度。混合流体其他物理量也可按式 (4) 确定。

2 CFD 模型及边界条件

2.1 防波堤断面

首先利用 MATLAB 编制凸多边形颗粒随机生成程序, 在图 1 所示区域生成 50 个块石, 孔隙率为 42.64%, 抛石坝断面为等腰梯形, 上底 1 m、下底 7 m、高 2 m、坡度 1:1.5^[7]。组成抛石坝的颗粒最大半径为 210.5 mm, 最小半径为 117.1 mm, 颗粒半径在此范围内服从高斯分布, 平均粒径为 162 mm, 每个多边形颗粒随机生成 12 条边。

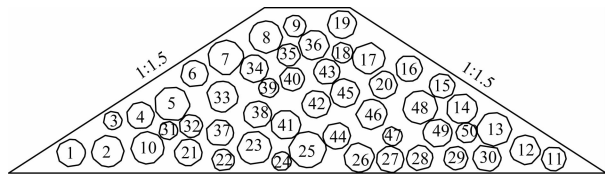


图 1 防波堤断面

2.2 边界条件

防波堤流体计算区域在长度和高度方向分别为其尺寸的 5 倍和 2.5 倍, 即计算流体区域大小为 35 m × 5 m, 将防波堤置于流域前 1/3 处 (图 2)。堤前和堤后计算流域长度分别为 10 m 和 18 m, 堤后计算长度为堤高 (2 m) 的 9 倍, 堤后扰流得以充分发展。

$$v_z = \mu_z^A v_{10} = 1.284 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.24} v_{10} \quad (5)$$

式中: μ_z^A 为 A 类场地粗糙度指数; v_{10} 为 10 m 处风速。由于 A 类地貌截断高度为 5 m, 而计算流域空气高度为 3 m, 因此入口来流速度应依据风压高

度变化系数最小值 1.09 和基本风压 ω_0 计算得到:

$$v_{air} = 1.09 \times \sqrt{1\,600\,\omega_0} \tag{6}$$

式中: 基本风压取 0.85 kN/m², 得到入射风速为 40.2 m/s。

波浪入射形式为余弦波^[10], 其速度方程为:

$$v_{water} = A\cos(\omega t) \tag{7}$$

式中: A 为波压力幅值, 可以根据小振幅波理论求出; y 为距底部海床的高度; ω 为波浪的圆频率; t 为入射时间。水流入射速度是关于时间和入射高度的函数, 需要使用 C 语言编制 User Defined Function 导入 Fluent 与其对接, 完成边界设定。

不考虑海流的冲淤效应, 假定近海海床坚硬稳定, 将流域底面和块石边界均设置为固壁边界; 流域顶面设定为对称边界, 在该边界处不发生质量、动量和能量交换; 流域出口统一处理为自由出流, 这需要足够大的计算区域使得堤后扰流发展充分。

考虑到块石的不规则性, 采用具备较强自适应能力的三角形非结构化网格。图 2 中的流域 I 区, 为气液两相混合起波区域, 该区域网格需进行适当加密; 在流域 II 区, 波浪与防波堤发生碰撞, 流体各项性质发生剧烈改变, 因而该区域网格需进行精细化划分, 以保证问题计算收敛性, 图 3 为未经细化和细化过的区域网格对比; 流域 III 区, 对问题计算影响不大, 可适当放宽划分条件, 以节约计算时间。

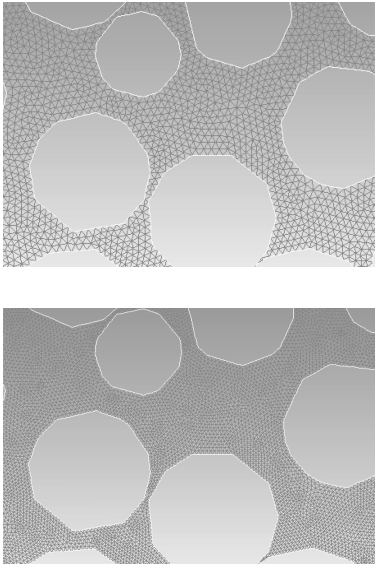


图 3 局部网格加密

3 圆柱绕流仿真结果与理论值对比

国内外学者对黏性流体的绕物体流动问题已做出了大量的研究, 文献 [11] 给出了物体绕流阻力系数 C_d 随流体雷诺数变化的趋势。对本问题海水雷诺数在 $10^4 \sim 10^5$, 针对圆柱体绕流, 其阻力系数 C_d 在 1.2 左右。本文为验证 CFD 仿真的正确性, 建立了单圆柱绕流模型 (图 4a)); 计算得到单圆柱受到海水阻力系数为 1.22 左右 (图 4b))。仿真计算结果同理论值非常接近, 说明 FLUENT 在求解黏性流体绕物体流动问题是切实可行的。

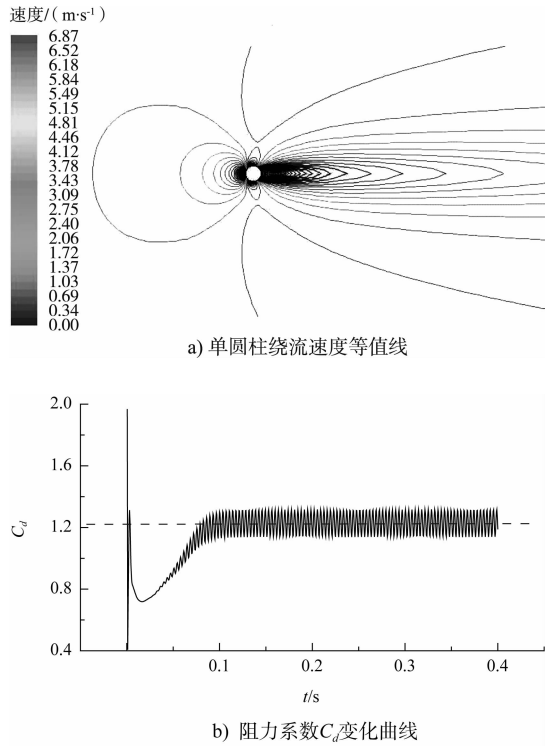


图 4 圆柱绕流仿真计算结果

4 防波堤 CFD 仿真结果

对该抛石坝体在不同水深、不同波压力幅值和不同圆频率波浪作用下, 抛石堤内的压力场、速度场和典型块体的受力进行了模拟计算。考虑两种波浪, 其计算参数见表 1。

表 1 波浪工况			
工况	水深/m	波压力幅值/Pa	圆频率/(rad·s ⁻¹)
波浪 1	1.2	1.2	6.86
波浪 2	1.6	1.6	7.92

计算得到两种波浪工况下, 抛石堤内部及周边压力场 (图 5)。

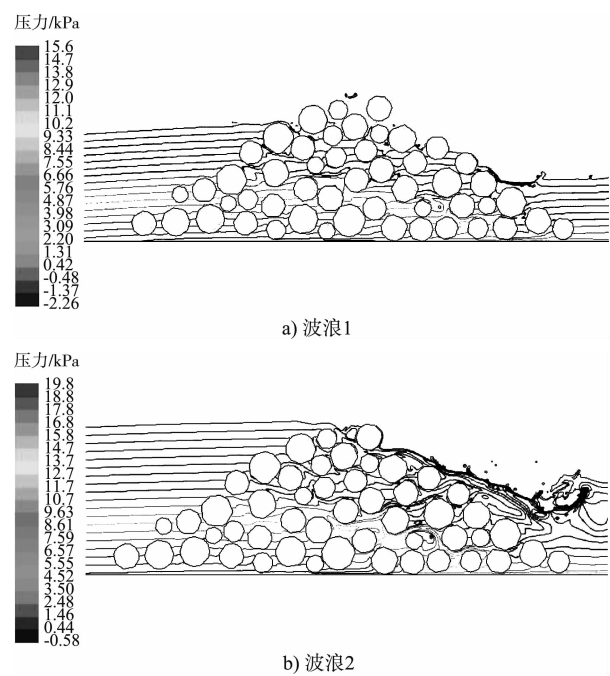


图5 抛石堤压力场

计算结果表明,堤前侧压强随水深变化呈线性增长;堤后由于抛石堤遮挡作用,水深有所降低,致使堤后侧压强整体偏低;抛石堤前后压力差使得堤内形成过渡压力场,等压线向海床方向倾斜。在工况 2 下,水深较大,波浪漫过抛石堤,在堤后侧区域形成回流(图 5b))。将堤前石块自海床向上编号为 1[#]~9[#],堤后块石编号为 11[#]~19[#],编号块石相对位置见图 1,输出工况 2 下各编号块石的平均压强(图 6)。

由图 6 可知,工况 1 堤前水位刚好漫过 7[#]块石,而堤后出流则处于 16[#]块石中部,因而堤前 8[#]~9[#]和堤后 17[#]~19[#]块石压强接近于 0。对于水深 1.6 m 的工况 2,波浪漫过抛石堤,堤前 1[#]~9[#]块石

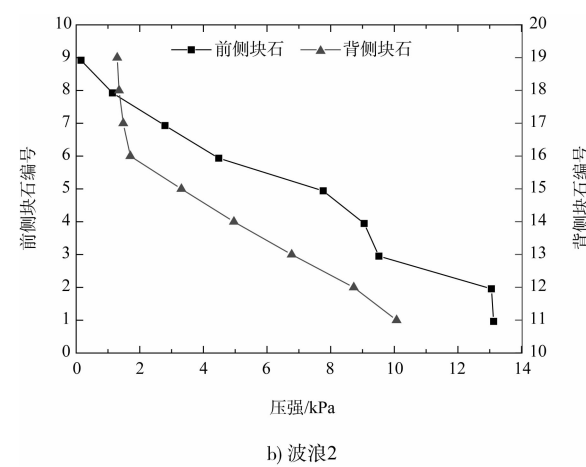
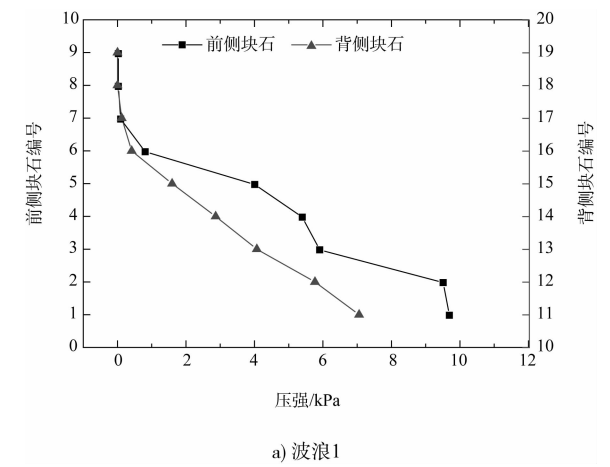


图6 块石平均压强

压强呈递减趋势,而波浪在堤后被掀高形成回拍水流,至使 17[#]~19[#]的块石压强保持在 1 300 Pa 左右。

在 $t = 4\text{ s}$ 时刻,不同波浪工况的速度云图见图 7。

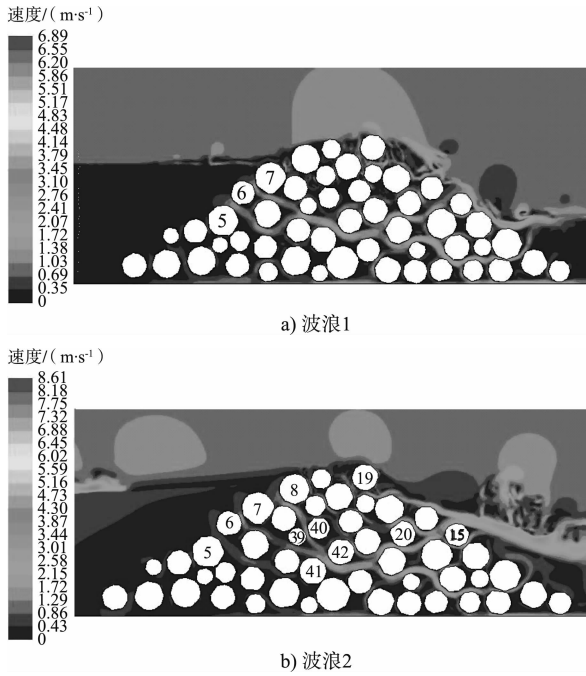


图7 抛石堤速度云图

如图 7 所示,水流在抛石堤内部的较大缝隙处形成高于平均流速的快速流动。两种波浪工况下,抛石堤出口口基本一致;而主要入口口因入射水深和水速的不同存在一定差别,工况 1 水流主要从 6[#]块石两侧流入,而工况 2 水流主要从 6[#]和 8[#]块石两侧的缝隙流入。堤前坝顶和堤后都存在一定程度的扰流,特别是在工况 2 情况下,堤后区域形成了较大涡流,但对堤脚区域影响不

大。水流主要流动路线上的块石受到较大的作用力，因此需对其进行重点分析。块石所受作用力除与波浪形式有关外，还与其尺寸大小有关，将其

受力大小除以直径，得到块石平均受力，本文仅考虑流动更为剧烈、块石受力更大的波浪工况 2，其堤前、堤后以及流线上块石平均作用力见表 2。

表 2 块石平均作用力

块石 编号	平均作用力/(N·m ⁻¹)		块石 编号	平均作用力/(N·m ⁻¹)		块石 编号	平均作用力/(N·m ⁻¹)	
	x 方向	y 方向		x 方向	y 方向		x 方向	y 方向
1	-79.24	2 170.81	11	-34.08	1 695.64	33	67.32	2 569.75
2	-126.56	2 634.34	12	-398.64	2 412.97	34	-167.99	2 371.66
3	-56.49	1 453.22	13	649.36	2 460.21	39	327.03	1 383.90
4	20.19	2 166.16	14	883.98	2 852.66	40	-9.03	1 929.97
5	-77.86	2 695.29	15	1 534.42	1 924.79	41	667.46	3 137.75
6	253.08	2 012.72	16	184.94	1 433.75	42	311.53	1 444.44
7	56.48	1 677.46	17	396.98	1 592.75	46	-99.13	2 734.86
8	230.47	1 126.70	18	475.56	767.32	20	563.26	1 471.68
9	14.12	71.68	19	0.55	-7.76	49	59.05	2 614.54

表 2 中 1[#]~9[#]块石位于堤前侧，11[#]~19[#]块石位于堤后侧，而其余编号块石则处于堤内水流主要流动路线上。堤前侧和堤后侧最大水平作用力出现在 6[#]和 15[#]块石处，这是因为进流主要从 6[#]块石两侧入射，而从 15[#]块石上侧缝隙流出。堤内最大水平作用力出现在 39[#]、20[#]、41[#]、42[#]块石处，尤其以 41[#]块石受力最大，其原因是 39[#]、41[#]和 42[#]块石形成的孔隙区域较大，堤前入射的 3 条流线于此处汇合，并受到 41[#]块石的阻挡。而在靠近堤后区域有两条流线在 20[#]块石后方交汇，致使其水平作用力较大。在竖向作用力方面，波浪在堤后侧坝顶区域被掀高回拍，仅对 19[#]块石造成负压力。

5 结论

1) 堤前和堤后区域存在水位高差和压强差，这使得水流倾斜向海床在防波堤内形成渗流，且渗流强度随水深增加而增加。

2) 水流在防波堤内的流动路径与块石间的孔隙率和孔隙间的连通程度有关，为保证堤内块石的受力均匀性和堤坝的整体稳定性，需避免在堤内形成较大的孔隙，并采取措施阻断孔隙间较长连通，以将水流分割为均匀、细密的短程流动。

3) 处于防波堤内部渗流路径上的块石受到较大水平作用力，内部渗流强度越大受力越显著。

参考文献：

[1] 宋军营,宋继浩,齐彦博.某斜坡式防波堤工程优化设

计[J].水运工程,2014(4):57-62.

[2] Nørgaard J Q H, Andersen T L, Burcharth H F. Wave loads on rubble mound breakwater crown walls in deep and shallow water wave conditions [J]. Coastal Engineering, 2013, 80: 137-147.

[3] Dieter Vanneste, Peter Troch. An improved calculation model for the wave-induced pore pressure distribution in a rubble-mound breakwater core [J]. Coastal Engineering, 2012, 66: 8-23.

[4] Jeng D S, Ye J H. Three-dimensional consolidation of a porous unsaturated seabed under rubble mound breakwater[J]. Ocean Engineering, 2012, 53: 48-59.

[5] Kim D H, Park W S. Neural network for design and reliability analysis of rubble mound breakwaters[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(11-12): 1 332-1 349.

[6] Dhinakaran G, Sundar V, Sundaravadivelu R, et al. Dynamic pressures and forces exerted on impermeable and seaside perforated semicircular breakwaters due to regular waves[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(15): 1 981-2 004.

[7] 谢建.斜坡式防波堤的结构优化设计[J].福建建筑, 2009(4): 113-114.

[8] DL 5077—1997 水工建筑物荷载设计规范[S].

[9] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].

[10] 任增金.抛石防波堤内波浪运动的研究[D].天津:天津大学,2003.

[11] 陈卓如,金朝铭,王洪杰,等.工程流体力学[M].北京:高等教育出版社,2004.

(本文编辑 武亚庆)