

文章编号: 1000-4882 (2024) 01-0223-14

波浪与反弧面直墙防波堤相互作用的 砰击载荷数值预报研究

薛瑛杰, 赵伟文*, 万德成

(上海交通大学 船海计算水动力学研究中心 (CMHL) 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘 要

采用基于开源平台 OpenFOAM 开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对实尺度下波浪与反弧面直墙防波堤相互作用开展了数值研究。采用主动造波-消波方法生成不规则波, 采用基于分段线性界面模型的几何流体体积法捕捉自由面。数值模拟时在距造波点不同位置处设置了波高测点, 在防波堤表面布置了多个压力测点, 并将各测点得到的波高及砰击压力时历数据与试验进行对比。研究表明, 受入射波、反射波和空气涡流场的影响, 靠近防波堤位置处的波面线将会形成两个明显的峰区。在砰击发生后, 防波堤表面的砰击压力将随流体运动向顶部与底部转移, 在圆弧段顶部产生高频压力振荡。同时发现防波堤顶端的反弧墙将上涌流体转化为水平射流, 极大地改变了气相涡量场结构, 能缓解溢流问题。

关键词: 反弧面直墙防波堤; 砰击载荷; 几何流体体积法; 破碎波

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

0 引 言

近年来, 随着全球海平面的上升, 极端海洋状况频发。极端波浪会对海洋工程结构物产生不同程度的砰击破坏。砰击过程通常伴随着波浪破碎与气体卷吸, 涉及到气、液、固三相的复杂耦合。其中, 极端波浪砰击以及波浪反复冲击作用的影响一直是海洋工程领域关心的重点问题^[1]。以防波堤为代表的直墙这一类海洋结构物更易受到波浪砰击而破坏^[2], 对其开展波浪砰击载荷预报研究在工程设计上具有重要意义。

在 Oumeraci 等^[3]与 Hattori 等^[4]的早期试验中, 对波浪砰击以及砰击前后波浪的破碎进行全过程记录, 并对破碎波砰击压力进行监测。砰击时波浪的破碎状态大致可分为 4 类: 湍流涌浪、砰击破碎、充分发展的砰击破碎和向上翻卷破碎。Lugni 等^[5]和 Sun 等^[6-7]根据壁面受砰击时气、液的掺混状态, 将砰击破碎和充分发展的砰击破碎两种形式合并, 提出了水气掺混砰击、波浪卷气砰击和单相流波浪砰击 3 种砰击形式。在砰击试验中, 受前一个波反射的影响, 加剧了气、液掺混问题的复杂性, 使得每次砰击时的波面形状都不相同, 砰击压力呈现极强的非线性特点。

Kirkgöz^[8-9]在试验中发现, 当发生卷气形式的砰击时, 卷吸在壁面与水体之间的气泡开始向外逃

逸, 在水体中被分割为多个较小的气腔, 气腔的破裂和扩散导致压力频繁振荡。在 90 次的波浪砰击试验中发现, 波浪对直立墙面的冲击压力满足正态分布, 压力最大点频繁出现在水线位置以下。Hull 等^[10]在试验中进一步证明, 当发生卷气形式的波浪砰击时, 砰击压力的极值发生在静水面处, 随后压力向水底传播形成另一个压力极值。Cuomo 等^[11]通过对模型和实尺度试验砰击进行监测, 认为砰击载荷的大小和持续时间不满足弗劳德-克雷洛夫假定, 提出了一种考虑空气泄漏的直墙类实尺度砰击压力估算方法。

考虑到尺度效应以及复杂波浪破碎等问题, 越来越多的学者开始采用数值模拟计算方法开展波浪砰击研究。Song 等^[12]基于边界元法 (boundary element method, BEM) 实现对波浪卷气砰击的完整仿真, 发现当砰击开始发生时, 波浪内部将产生自由射流并有向气腔内部撞击的趋势, 因此在砰击发生后波浪内部将产生大量的气泡。De Finis 等^[13]使用单相流求解器 IHVOF 对砰击试验中的直墙高度、到斜坡的距离以及该处水深等参数进行研究, 对平板类砰击后液体向板后流动的问题进行了分析。Liu 等^[14]使用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法基于可压缩两相流模型对大尺度砰击问题开展研究, 将数值结果与试验对比, 证明在砰击过程中气体的可压缩性导致了在气穴处反复压缩和膨胀的过程, 压力不断振荡, 试验中的频率和振幅有被高估的可能。同时表明穴式卷吸大气的砰击压力峰值更小, 持续时间更长。

随着研究的不断深入, 有的学者开始针对带有前缘的直墙进行砰击测试。Dong 等^[15]通过试验表明, 使用顶部反曲式墙面的平均流体溢出降低了 98%, 远高于其它防波方法能达到的效果。Huang 等^[16]使用 IHFOAM 求解器对带有直角前缘的墙壁进行砰击数值模拟, 指出由砰击引起壁面垂向射流随砰击周期的增大而迅速减小, 而水平载荷减小的幅度相对缓慢。Ravindar 等^[17-19]对带有前缘的防波堤开展了数次试验研究与数值模拟, 针对不同波浪破碎下直墙面和反曲前缘面冲击压力的变化趋势、不同前缘形状对砰击和溢流的抑制作用开展模型和实尺度试验, 并将试验数据作为数值方法验证的标模案例公开。Chen 等^[20]针对模型尺度对象开展数值研究, 对比分析了砰击压力和波高, 对流场涡结构变化进行了探讨。

本文针对 Ravindar 等公开的实尺度试验数据, 采用主动造波-消波 (generating-absorbing boundary condition, GABC) 方法以及基于分段线模型的几何流体体积 (volume of fluid, VOF) 法, 对防波堤模型的波高及砰击压力开展数值研究, 将各测点得到的波高及砰击压力时历数据与试验进行对比, 对流场中波面的流动形式、砰击时刻的压力场和涡量场进行了分析。

1 数值模拟方法

本文采用自主开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU 进行 CFD 数值模拟。该求解器基于开源软件 OpenFOAM 进行开发, 包含数值造波、6 自由度浮体运动和系泊缆计算等多个模块, 实现了水动力-系泊的耦合计算^[21-23]。该求解器支持使用 waves2Foam 软件进行造波输入^[24], 并引入了高阶谱 (higher order spectral, HOS) 方法与 CFD 方法相结合的黏-势流耦合计算方法^[25]以及主动 GABC 方法^[26]。

1.1 控制方程

为实现对砰击过程的精确模拟, 采用不可压缩两相流的纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes, N-S) 方程进行求解, 包括连续方程和动量方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) + \mathbf{f}_\sigma \quad (2)$$

式中, \mathbf{U} 为流体速度; ρ 为流体密度; \mathbf{g} 为重力加速度; p_d 为动压力, $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$, p 为总压力; μ_{eff}

为动力黏性系数; f_{σ} 为表面张力项, t 为时间。

1.2 VOF 两相流模型

碎击将导致液面发生剧烈破碎, 虽然基于代数求解方式的 VOF 模型在许多问题的处理中已得到有效论证, 但在处理破碎波面时存在精度不足的问题。因此, 本文采用一种基于分段线界面模型 (piecewise linear interface construction, PLIC) 的几何求解方法构造界面, 并将其应用于 VOF 两相流模型中以捕捉自由液面。其基本思想是用一个平面对每个单元网格进行切割, 使其能够满足计算时间步下相体积分数的要求, 随后通过面插值的方式将其分配给网格单元面, 以求解输运方程^[26]。与传统的 PLIC 方法相比, 该方法与非结构化网格有更高的适配性, 可提高计算鲁棒性, 能够较好地处理剧烈的自由表面变化。

1.3 主动 GABC 方法

本文采用 waves2Foam 软件开发的主动 GABC^[27] 方法, 通过边界输入进行造波, 即入口边界上水质点的速度满足波浪理论方程。与采用松弛区域的造波方法相比, 该方法无需设置松弛区域的计算网格, 在保证计算精度的同时, 减少造波入口处的网格数, 提高计算效率^[28]。

1.4 二阶 Stokes 波浪

本文采用二阶 Stokes 波浪, 入射边界处的速度满足式 (3) 和式 (4) 的要求:

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t + \varphi) + \frac{3}{8} \frac{\pi k H^2}{T} \frac{\cosh 2k(z+d)}{\sinh^4(kd)} \cos 2(kx - \omega t + \varphi) - \frac{1}{8} \frac{gkH^2}{\omega d} \quad (3)$$

$$v = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t + \varphi) + \frac{3}{8} \frac{\pi k H^2}{T} \frac{\sinh 2k(z+d)}{\sinh^4(kd)} \sin 2(kx - \omega t + \varphi) \quad (4)$$

波面满足式 (5) 要求:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t + \varphi) + \frac{kH^2}{16} \left(\frac{3}{\tanh^3 kd} - \frac{1}{\tanh kd} \right) \cos 2(kx - \omega t + \varphi) \quad (5)$$

式中, x, y, z 分别为纵向、横向和垂向坐标; u, v 分别为 x, y 方向的速度; H 为波高; T 为波浪周期; k 为波数; d 为水深; ω 为波浪圆频率; φ 为波浪初始相位角。

波数 k 和圆频率 ω 满足式 (6) 所示的色散关系:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (6)$$

2 计算模型

研究对象为一段带有前缘弧形的垂直防波堤墙体, 对其所受的波浪碎击进行 CFD 数值模拟, 相关试验设置与结果参考 Ravindar 等^[19]的研究。

2.1 模型参数

计算模型采取 1:1 实尺度模拟, 如图 1 所示。计算水槽长为 307 m, 宽为 5.0 m, 深为 7.0 m, 在距离入口平面 210 m 的位置处设置有坡度为 1:10 的斜坡。防波堤靠近斜坡末端, 距斜坡起始端为 33 m, 即在水平方向上距入口平面为 243 m。水槽中水深为 4.1 m。采用二维数值计算, 为方便网格划分, 将防波堤后的斜坡段改为水平段, 并将防波堤与出口间的距离缩短为 10 m。为对波面进行监测, 在水槽内纵向 (x 方向) 布置 12 个波高测点, 如表 1 所示。

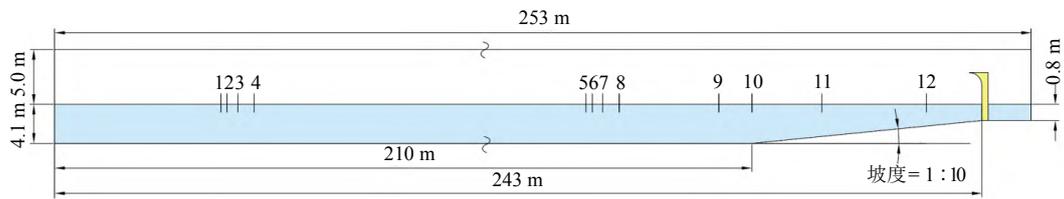


图1 计算模型与波高测点布置

表1 波高测点位置分布

测点编号	与入口平面距离/m	测点编号	与入口平面距离/m	测点编号	与入口平面距离/m
WP1	50.00	WP5	160.00	WP9	200.00
WP2	51.90	WP6	161.90	WP10	210.00
WP3	55.20	WP7	165.02	WP11	220.00
WP4	60.00	WP8	170.00	WP12	235.00

防波堤总高度为 2.37 m，底端距水槽底部 3.3 m，位于水面下 0.8 m 处，顶端距水槽底部 5.67 m，弧形曲率变化位置在水平面上方 0.96 m 处，上端弧形为半径 0.61 m，展开为 90° 的扇形，如图 2 所示。为了实现对砰击压力的监测，沿整个防波堤（包括扇形部分）的垂向布置了 16 个砰击压力测点，如表 2 所示。

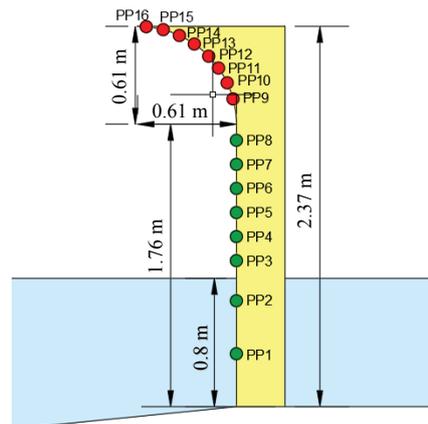


图2 防波堤砰击压力测点布置示意图

表2 防波堤砰击压力测点位置

测点编号	与入口平面距离/m	与水槽底部距离/m	测点编号	与入口平面距离/m	与水槽底部距离/m
PP1	243.0	3.63	PP9	242.98	5.22
PP2	243.0	3.96	PP10	242.94	5.32
PP3	243.0	4.21	PP11	242.89	5.41
PP4	243.0	4.36	PP12	242.83	5.48
PP5	243.0	4.51	PP13	242.74	5.56
PP6	243.0	4.66	PP14	242.65	5.61
PP7	243.0	4.81	PP15	242.55	5.65
PP8	243.0	4.96	PP16	242.44	5.67

2.2 计算工况

在水槽内选择规则波的波高 H 为 0.7 m，波浪周期 T 为 6 s。根据式 (6) 所示的色散关系，求得波数为 0.178 8，波长 $\lambda = 2\pi/k = 35.141$ m，属于有限水深波。

2.3 网格划分

Ravindar 等^[19]关于网格收敛性验证的分析表明, 在沿 x 方向的一个波长范围内布置 200 个网格, 即 $\Delta x = \lambda / 200 \approx 0.17$ m; 在沿 z 方向的一个波高范围内布置 25 个网格, 即 $\Delta z = H / 25 = 0.028$ m, 可得到良好的计算结果。故本文模拟采用相同的设置, 在 OpenFOAM 软件中使用 blockMesh 模块划分背景网格, 利用 topoSet 和 refineMesh 模块组合进行区域性加密, 应用 snappyHexMesh 模块对防波堤进行表面几何贴合, 总网格数为 34.29 万。在自由液面附近, 靠近入口边界位置处设置 $\Delta x = 0.2911$ m, $\Delta z = 0.01544$ m; 靠近防波堤位置处设置 $\Delta x = 0.0190$ m, $\Delta z = 0.01544$ m。同时对水槽底部和防波堤表面附近的边界层进行加密, 其中水槽底部靠近入口边界位置设置第一层网格尺寸 $\Delta l = 0.04631$ m, 水槽底部防波堤附近设置第一层网格尺寸 $\Delta l = 0.005$ m, 防波堤表面设置第一层网格尺寸 $\Delta l = 0.005$ m。防波堤附近网格划分如图 3 所示。

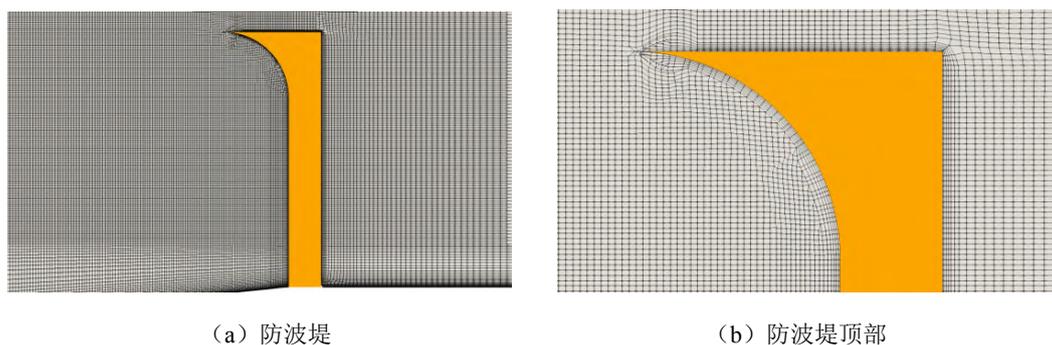


图 3 防波堤附近网格划分

3 计算结果分析

3.1 自由液面波高验证与计算结果分析

提取了 Ravindar 等^[19]试验数据中位于 160 m 和 235 m 处的 WP5 和 WP12 两个波高测点的数据, 作为本文自由液面波高的验证, 如图 4 所示。波浪砰击发生在 60 s 左右, 图 4(a) 为砰击发生前后的数值模拟与试验^[19]波高的对比, 图 4(b) 为砰击发生后靠近防波堤位置处的波高对比。从波浪周期和幅值来看, 数值模拟与试验数据吻合度较高, 尤其是靠近防波堤位置处的波高曲线峰值以及形状基本一致。

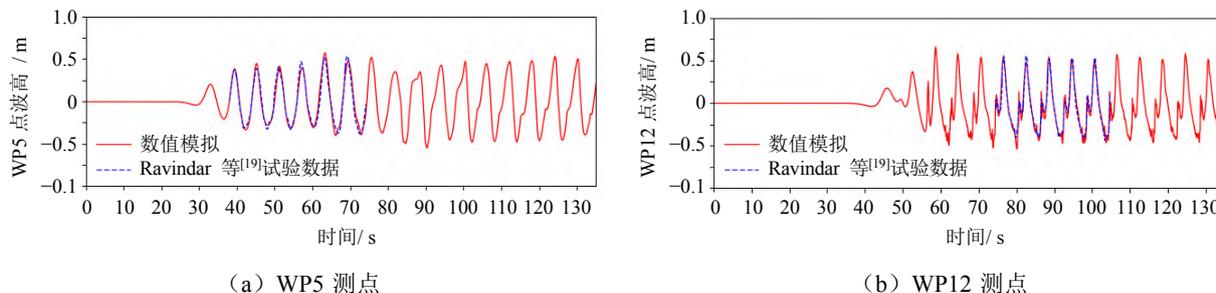


图 4 波高验证

在 WP5~WP12 测点中, 受防波堤波浪反射的影响, 在一个波浪周期内(两个主峰区波高峰值尖端之间的时段)有两个明显的波峰区, 分别称为主峰区和次峰区。主峰区为入口波浪形成的波峰区域, 包含一个最大的波高峰值; 次峰区为反射波叠加至入口波浪后所形成的一个峰值区域, 通常至少包含一个最大波高峰值。由于不同位置处波浪叠加的相位差不同, 主、次峰区在一个波浪周期内的顺序不

同。以 WP12 测点在 100 ~ 112 s 区间内一个完整波浪周期为例，主峰区包含一个极大的峰值 P5，次峰区出现在波浪从波谷逐渐回升至主峰区的过程中，含有两个较大的波高峰值（P2 与 P3）与两个较小的峰值（P1 与 P4），整体呈现先增大后减小，然后再增大后减小的趋势，如图 5 所示。各波高的峰值及发生时刻如表 3 所示。

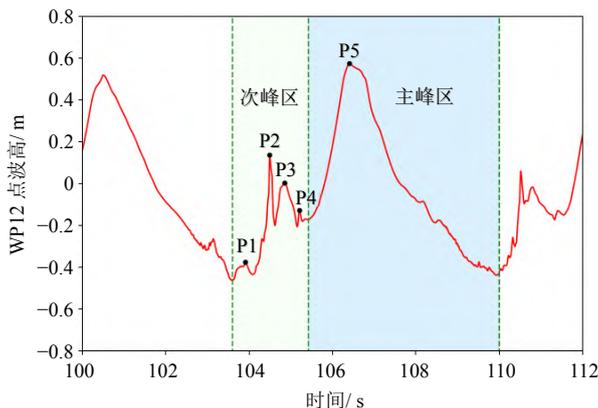
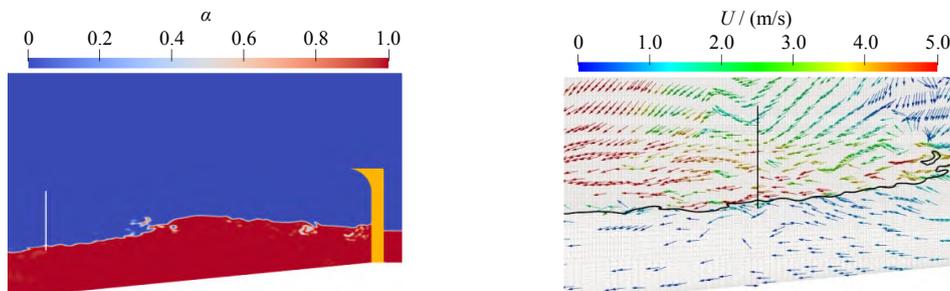


图 5 WP12 测点在一个波浪周期内的波峰区划分示意图

表 3 波高峰值及发生时刻

位置	P1	P2	P3	P4	P5
时刻/s	103.91	104.49	104.85	105.21	106.41
波高峰值/m	-0.377 1	-0.135 8	0.001 731	-0.129 3	0.573 9

在两个波高峰值区间内，总共包含 3 种流场变化形式，如图 6 所示，图中， α 为 VOF 方法中的液相体积分数， U 为流体流动速度。第一种形式如图 6(a) 所示，P1 波高峰值时刻发生在波浪撞击后 1 s 内，此时波浪撞击产生的液滴飞溅基本消失，防波堤底部的波浪遭到反射后逐渐向上游回溯，此时气相和液相的速度均指向上游入射波的来波。因此，该时刻生成的极大峰值主要由反射波对上游扰动所致，属于次峰区流场的运动形式。第二种形式如图 6(b) 所示，发生在 P4 波高峰值时刻，此时第二个波浪开始靠近测点，液相的速度矢量方向从防波堤方向变为指向下一个波峰位置，而气相部分的速度矢量在测点位置处从上方指向液面，在测点两侧逐渐形成两个反向旋转的漩涡，即图中测点右侧逆时针的 1 号漩涡和左侧顺时针的 2 号漩涡，故此时刻的极大波高峰值主要由反射波和上游第二个波浪共同作用导致。第三种形式如图 6(c) 所示，发生在 P5 峰值时刻，气、液两相速度场构成一个逆时针旋转的漩涡，此时极大峰值主要由上游第二个波浪作用导致，属于主峰区流场运动形式。



(a1) 液相体积分数分布

(a2) P1 点附近流速分布

(a) $t = 103.91$ s

图 6 波面附近流场的 3 种变化形式

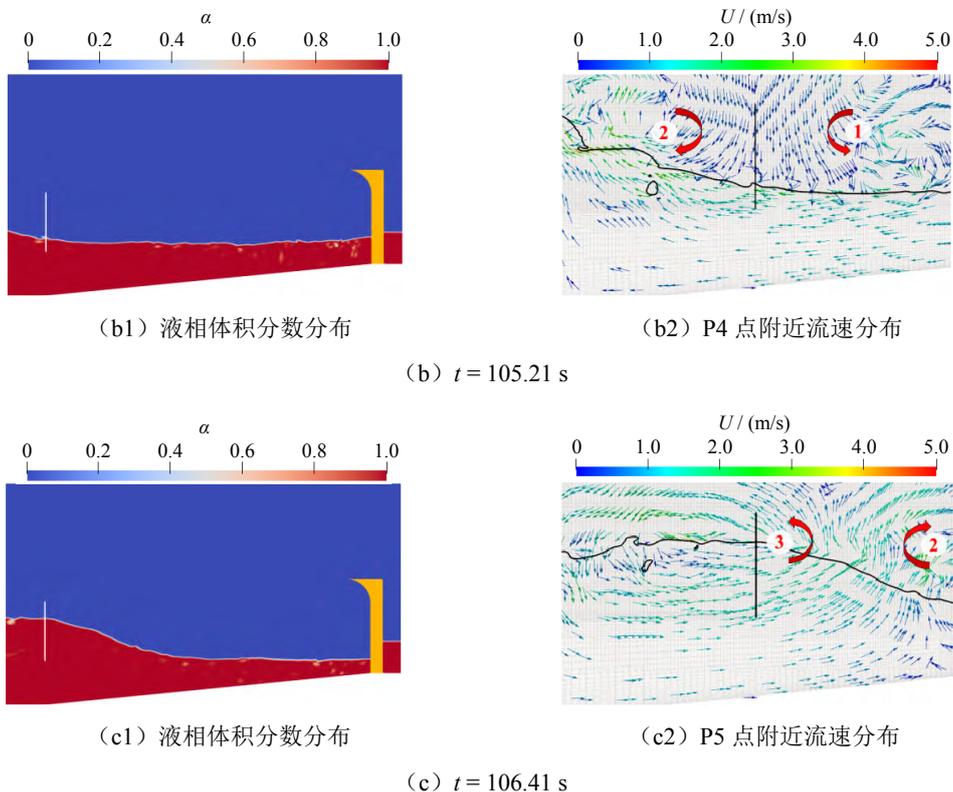


图 6 (续) 波面附近流场的 3 种变化形式

图 7 和图 8 所示分别为波面在 P2 点与 P3 点出现极大波高峰值邻近时刻附近区域的流场, 从流场的速度矢量分布可以看出 P2 点、P3 点与 P4 点在该时刻流动形态基本相同, 均属于第二种流场变化形式。尤其是 P2 点在该时刻出现了明显的波面卷吸和轻微的波浪破碎。

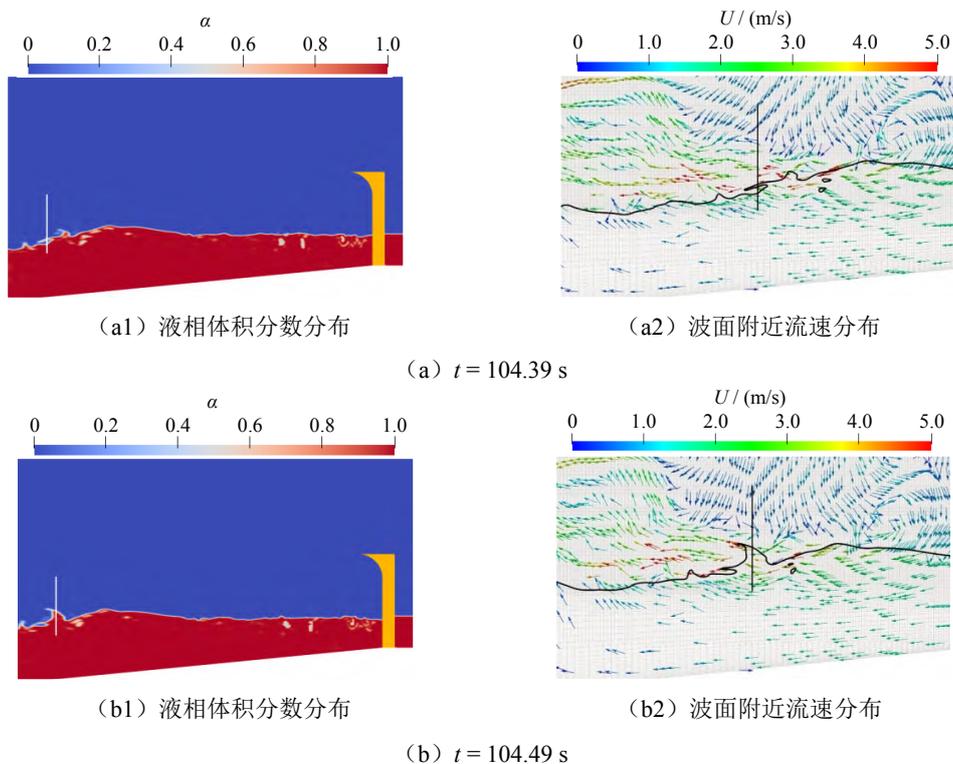


图 7 P2 位置极大波高峰值邻近时刻波面与流场

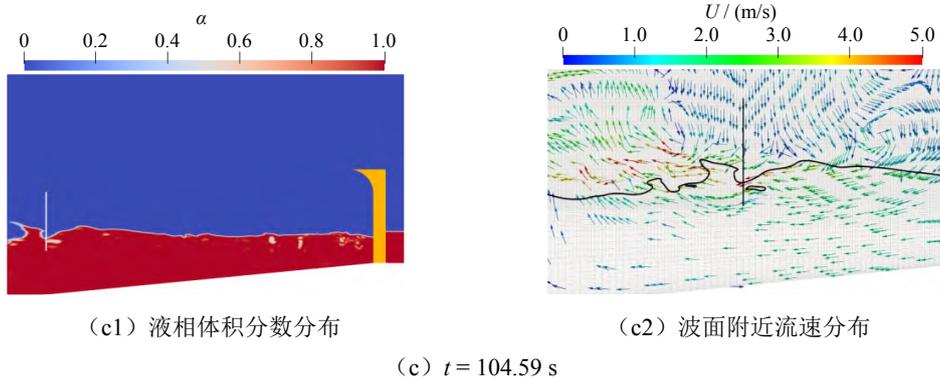


图 7 (续) P2 位置极大波高峰值邻近时刻波面与流场

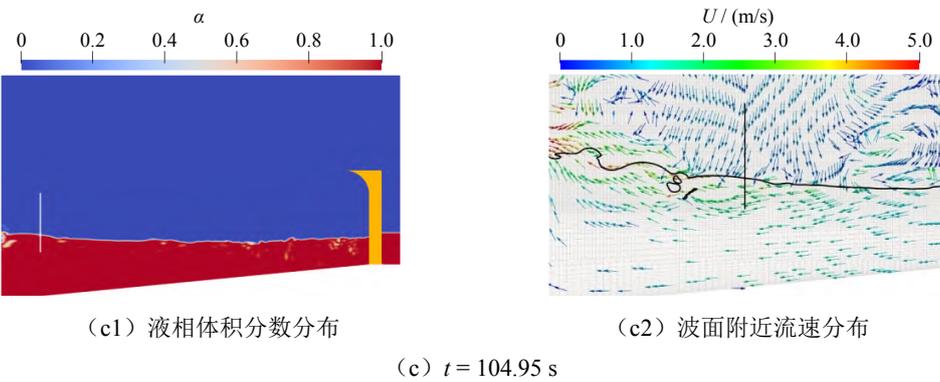
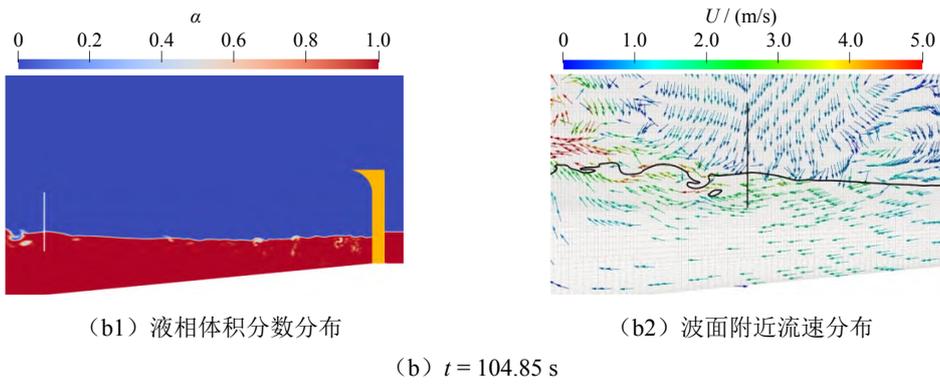
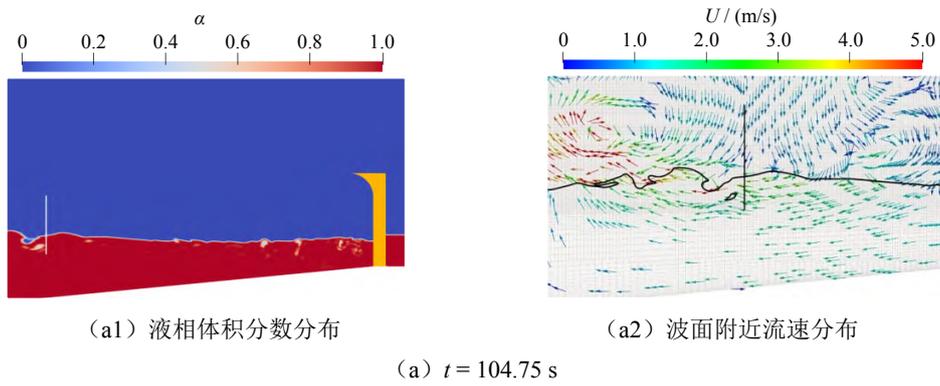


图 8 P3 位置极大波高峰值邻近时刻波面与流场

3.2 砰击压力

将砰击压力测点处数值计算得到的压力与 Ravindar 等^[19]的试验数据进行对比。图 9 所示为防波堤直墙段 PP1 点、PP2 点、PP3 点和 PP4 点在 66.0 s 时刻的砰击压力对比, 图 10 所示为防波堤圆弧段 PP14 点和 PP15 点的砰击压力对比。

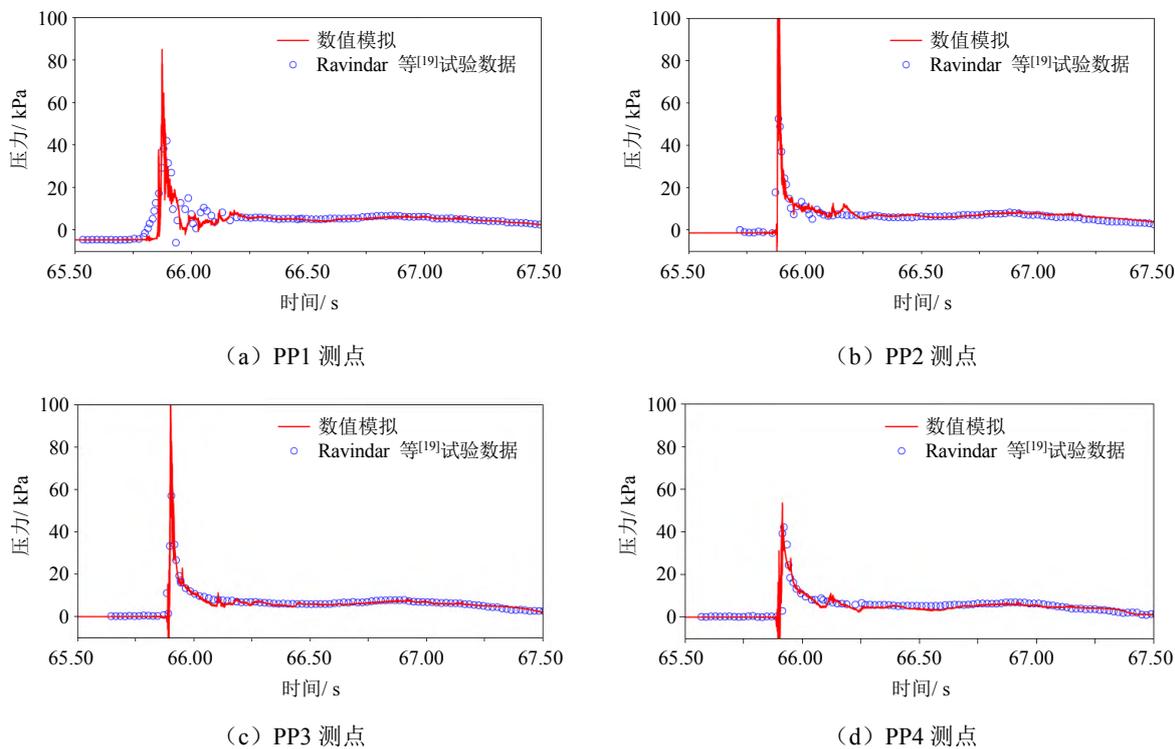


图 9 直墙段测点压力对比

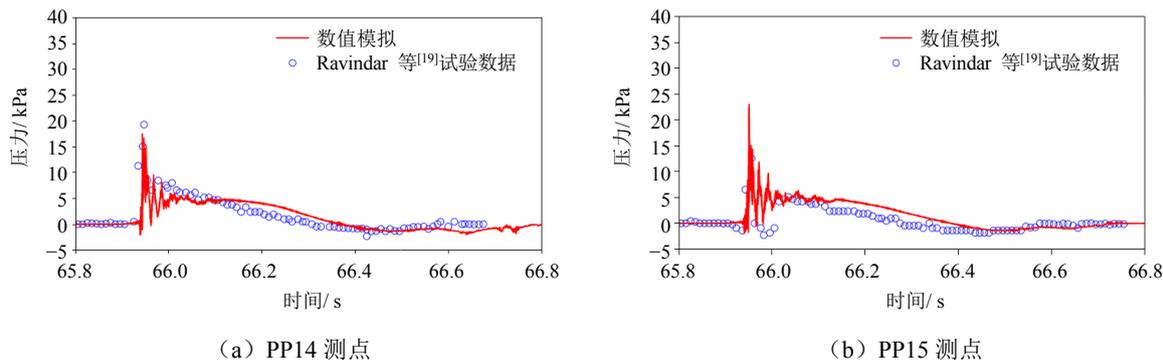


图 10 圆弧段测点压力对比

图 9 中 4 组测点在整体波形上能够与试验对比印证, 尤其是在砰击后压力的下落段与试验对比吻合较好, 同样存在多个小幅压力振荡。但是在砰击瞬间, 只有 PP4 测点的最高峰值与试验吻合度较好, 其余测点的数值模拟值均高于试验结果, 这种差异可能是不同的前端卷吸式砰击形式造成的。在砰击前, 波浪顶端的涌浪速度较大, 已与自由液面发生卷吸, 并携带着一个非常大的气泡空腔一起向前运动, 如图 11(a) 所示; 在砰击时, 自由液面的法向与防波堤直墙段接近垂直, 整个波浪液面垂直冲击在防波堤上, 如图 11(b) 所示; 在砰击发生后, 前端波浪的流体向防波堤上下两侧扩散, 同时将压力带至上下两侧区域, 如图 11(c) 所示。而在 Ravindar 等^[19]的试验中, 卷气发生在砰击时刻, 此时波浪前端顶部率先砰击到壁面, 与自由液面、直墙壁下端共同形成一个卷吸气泡。该气泡起到了一定的缓冲作用, 这也使得图 9(a) 中 PP1 测点的压力试验数据上升相对较为缓和。圆弧段两组压力测点的数值模拟结果在极大峰值上与试验数据吻合较好, 但数值模拟结果的高频振荡更为剧烈。这是由于在砰击发生后, 前端较大的冲击会导致前端液体在圆弧段顶端形成一些细小的雾状液滴, 如图 11(d) 所示, 这些雾状液滴砰击所引起的高频振荡是试验难以精细捕获的。同时, 在波浪砰击后, 卷吸在液体之间的

气泡无法承受入射波与反射波的双向挤压, 逐渐被分割为多个较小的气泡。这些被分割的小气泡的变形和溃灭将导致数据振荡, 如图 11(e) 和图 11(f) 所示。同时, 防波堤顶端圆弧段改变了上涌流体的运动轨迹, 产生一段较长水平射流, 极大地改变了气相涡量场结构。

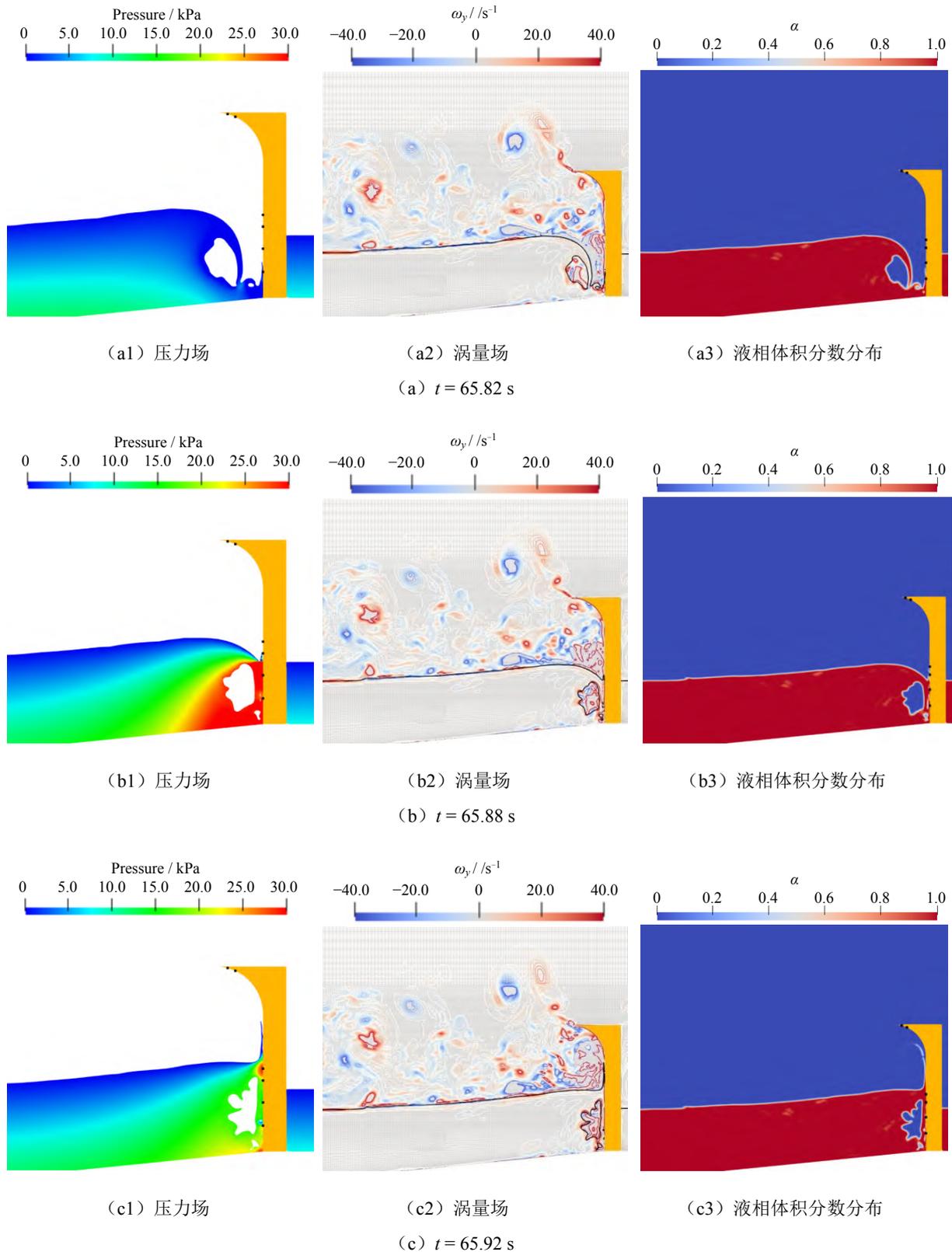


图 11 波浪砰击时的液体压力场、涡量场与相体积分数场

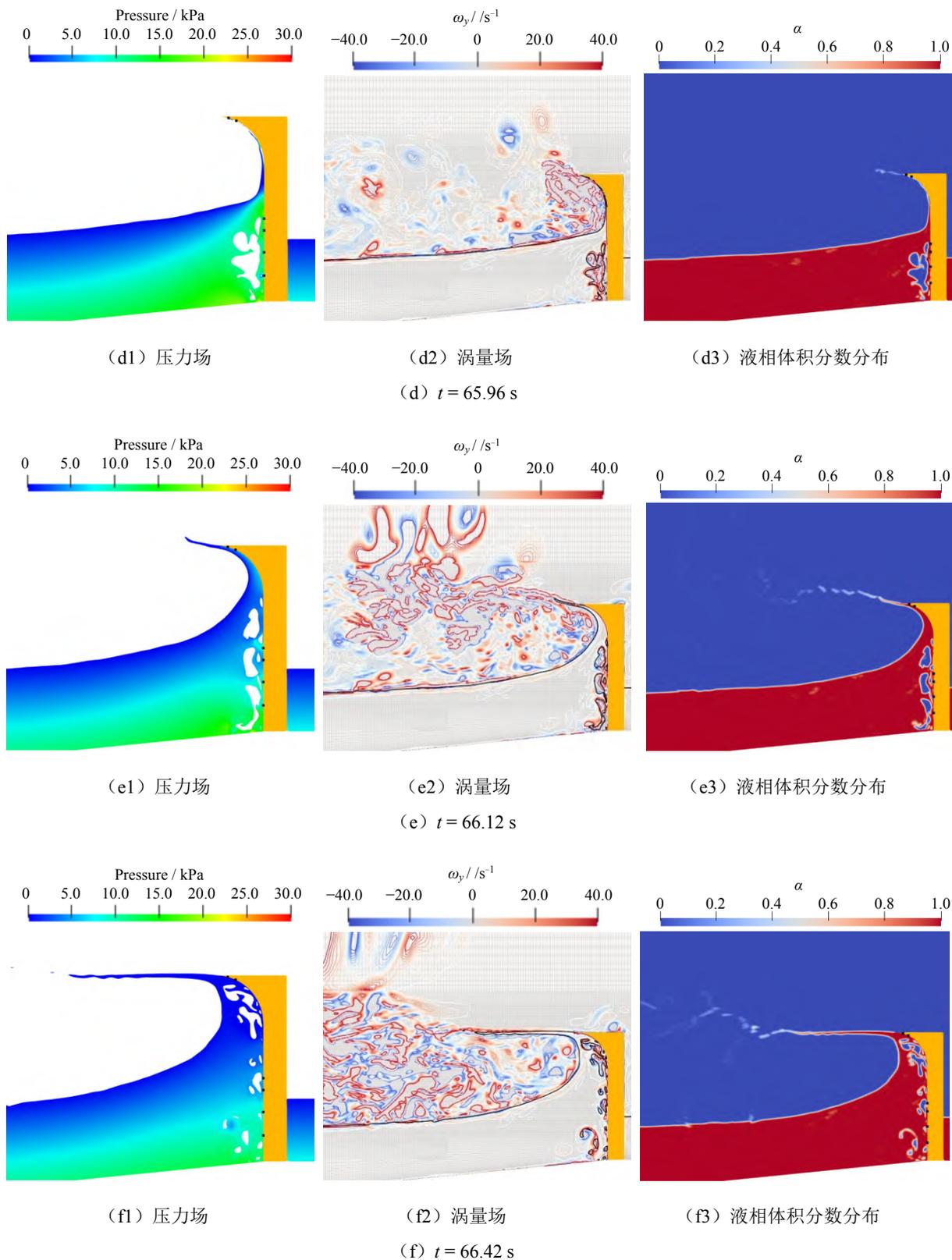


图 11 (续) 波浪砰击时的液体压力场、涡量场与相体积分数场

4 结 论

本文采用自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器,对顶端带圆弧的防波堤波浪砰击进行分析。采用主动 GABC 方法和基于 PLIC 方法的 VOF 模型生成二阶 Stokes 波,与试验吻合良好。对波浪破碎过程中的气体卷吸现象、防波堤砰击压力、涡量场以及波浪反射后的波面抬升进行了分析,得到以下结论:

(1) 在波浪砰击发生时,整体波面呈现典型的规则波运动,波面幅值由入射波主导;在砰击发生后,受波浪反射与破碎的影响,靠近防波堤的波浪存在主峰区和次峰区。主峰区的波面运动以入射波为主导,次峰区的波面运动受入射波、反射波以及空气涡流场的共同作用。

(2) 在波面由次峰区向主峰区过渡的过程中,会经历 3 种流场运动变化形式。第一种发生在砰击发生后较短的时刻内,此时气相和液相的速度均指向入射波来波方向;第二种发生在由次峰区向主峰区过渡的过程中,往往伴随剧烈的波面振荡和轻微的波浪破碎,液相的速度矢量从防波堤指向下一个波峰,气相部分在测点两侧逐渐形成两个反向旋转的旋涡;第三种发生在下一个入射波到来时,气、液两相速度场在波峰附近共同构成一个逆时针旋转的旋涡。

(3) 在波浪对防波堤砰击的过程中,垂直式的砰击将产生更大的砰击压力峰值,并且在砰击后压力将随流体运动向防波堤顶部和底部转移。上涌流体由于速度过大,有一部分将变为雾状液滴,导致圆弧段顶部产生高频压力振荡。同时,防波堤顶端圆弧段使得上涌流体发生偏转,形成水平射流,极大地改变了气相涡量场结构。

参 考 文 献

- [1] 陈群斌. 聚焦波浪及其对直墙作用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
- [2] HITACHI S. Case study of breakwater damages Mutsu-Ogawara Port[C]// Proc. Int. Workshop on Wave Barriers in Deepwaters, Port and Harbours Research Institute, Yokosuka, 1994: 308-331.
- [3] OUMERACI H, KLAMMER P, PARTENSKY H W. Classification of breaking wave loads on vertical structures[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1993, 119(4): 381-397.
- [4] HATTORI M, ARAMI A, YUI T. Wave impact pressure on vertical walls under breaking waves of various types[J]. Coastal Engineering, 1994, 22(1-2): 79-114.
- [5] LUGNI C, BROCCINI M, FALTINSEN O M. Wave impact loads: The role of the flip-through[J]. Physics of Fluids, 2006, 18(12): 122101.
- [6] SUN H, SUN Z, LIANG S, et al. Numerical study of air compressibility effects in breaking wave impacts using a CIP-based model[J]. Ocean Engineering, 2019, 174: 159-168.
- [7] 孙宏月. 波浪对结构物冲击的可压缩两相流数值模拟与实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [8] KIRKGÖZ M S. An experimental investigation of a vertical wall response to breaking wave impact[J]. Ocean Engineering, 1990, 17(4): 379-391.
- [9] KIRKGÖZ M S. Breaking wave impact on vertical and sloping coastal structures[J]. Ocean Engineering, 1995, 22(1): 35-48.
- [10] HULL P, MÜLLER G. An investigation of breaker heights, shapes and pressures[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(1): 59-79.
- [11] CUOMO G, ALLSOP W, TAKAHASHI S. Scaling wave impact pressures on vertical walls[J]. Coastal Engineering, 2010, 57(6): 604-609.
- [12] SONG B, ZHANG C. Boundary element study of wave impact on a vertical wall with air entrapment[J]. Engineering

- Analysis with Boundary Elements, 2018, 90: 26-38.
- [13] DE FINIS S, ROMANO A, BELLOTTI G. Numerical and laboratory analysis of post-overtopping wave impacts on a storm wall for a dike-promenade structure[J]. Coastal Engineering, 2020, 155: 103598.
- [14] LIU S, GATIN I, OBHRAI C, et al. CFD simulations of violent breaking wave impacts on a vertical wall using a two-phase compressible solver[J]. Coastal Engineering, 2019, 154: 103564.
- [15] DONG S, ABOLFATHI S, SALAUDDIN M, et al. Enhancing climate resilience of vertical seawall with retrofitting-A physical modelling study[J]. Applied Ocean Research, 2020, 103: 102331.
- [16] HUANG M, KENNEDY A, TOMICZEK T, et al. Solitary wave impacts on vertical and overhanging near-coast structures[J]. Coastal Engineering Journal, 2018, 60(3): 356-370.
- [17] RAVINDAR R, SRIRAM V, SCHIMMELS S, et al. Characterization of breaking wave impact on vertical wall with recurve[J]. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 25(2): 153-161.
- [18] RAVINDAR R, SRIRAM V. Impact pressure and forces on a vertical wall with different types of parapet[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2021, 147(3): 04021007.
- [19] RAVINDAR R, SRIRAM V, SALAUDDIN M. Numerical modelling of breaking wave impact loads on a vertical seawall retrofitted with different geometrical configurations of recurve parapets[J]. Journal of Water and Climate Change, 2022, 13(10): 3644-3674.
- [20] CHEN S, ZHAO W, WAN D. Numerical study on breaking wave interaction with vertical wall attached with recurved parapet[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2023, 33(2): 132-140.
- [21] CAO H, WAN D. Benchmark computations of wave run-up on single cylinder and four cylinders by naoe-FOAM-SJTU solver[J]. Applied Ocean Research, 2017, 65: 327-337.
- [22] SHEN Z, WAN D, CARRICA P M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. Ocean Engineering, 2015, 108: 287-306.
- [23] ZHAO W, ZOU L, WAN D, et al. Numerical investigation of vortex-induced motions of a paired-column semi-submersible in currents[J]. Ocean Engineering, 2018, 164: 272-283.
- [24] ZHUANG Y, WAN D C, BOUSCASSE B, et al. Regular and irregular wave generation in OpenFOAM using high order spectral method[C]// The 13th OpenFOAM Workshop (OFW13), 2018: 189-192.
- [25] ZHUANG Y, WAN D. Parametric study of a new HOS-CFD coupling method[J]. Journal of Hydrodynamics, 2021, 33: 43-54.
- [26] CHEN S, ZHAO W, WAN D. Turbulent structures and characteristics of flows past a vertical surface-piercing finite circular cylinder[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(1): 015115.
- [27] BORSBOOM M, JACOBSEN N G. A generating - absorbing boundary condition for dispersive waves[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2021, 93(8): 2443-2467.
- [28] HUO S, DENG S, SONG Z, et al. On the hydrodynamic response and slamming impact of a cylindrical FPSO in combined wave-current flows[J]. Ocean Engineering, 2023, 275: 114139.

Numerical Prediction of Wave Impact on Vertical Wall Attached with Recurved Parapet

XUE Yingjie, ZHAO Weiwen*, WAN Decheng

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract

In this paper, the interaction between the full-scale breaking wave and vertical wall attached to the recurved parapet is numerically investigated using the in-house computational fluid dynamics (CFD) solver naoe-FOAM-SJTU, which is developed based on the OpenFOAM framework. The irregular waves are generated by utilizing the generating-absorbing boundary condition, and the free surface is captured by the volume of fluid method (VOF) based on the piecewise linear interface calculation method. Wave probes are set up at different locations before the wall and pressure probes are placed on the wall surface. The predicted wave elevation and surface pressure are compared with experimental data. The results show that, induced by the incident waves, reflected waves, and air vortex field, there will be two distinct peak areas formed on the free surface near the seawall. Besides, following fluid flow, the impact pressure on the seawall will transfer towards the top and the bottom, leading to high-frequency pressure oscillations at the top of the recurved parapet. It is observed that the recurved parapet section could mitigate overflow issues by transforming upwelling fluid into horizontal jet flows, thus significantly altering the structure of the gas-phase vorticity field.

Key words: vertical wall with recurved parapet; impact loads; geometric VOF method; breaking waves

作者简介

薛瑛杰 男, 1999年生, 博士研究生。主要从事海上漂浮式风机及波浪载荷等研究。

赵伟文 男, 1990年生, 博士, 助理研究员, 硕士研究生导师。主要从事船海水动力学、流固耦合、海洋工程、海上新能源开发与利用等方面的计算理论、求解器开发与应用研究。

万德成 男, 1967年生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事计算船舶水动力学、海上新能源开发与利用、无网格粒子法、船型优化和流固耦合等研究。

*通讯作者: 赵伟文