



越浪的湍动及流场分析*

郭立栋¹, 孙大鹏², 黄明汉³

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461;

2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3. 中交天津港湾工程研究院有限公司 中国交建海岸工程水动力重点实验室, 天津 300222)

摘要: 越浪一直是波浪水动力问题的一个难点, 原因在于其形成受到多种强非线性现象的作用。应用一种新型数值波浪模型(0-1BEM + VOF 耦合模型)对越浪过程进行研究分析, 并探讨了湍动动能、动能耗散率及流场在周期内的变化趋势。

关键词: 越浪; 0-1BEM + VOF; 耦合模型; 湍动; 流场

中图分类号: O 353.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0032-05

Characteristics of turbulence and flow field during overtopping process

GUO Li-dong¹, SUN Da-peng², HUANG Ming-han³

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. CCCC-Key Hydrodynamic Laboratory for Coastal Engineering, CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: The overtopping is a complex phenomenon of gravity wave dynamics, including many nonlinear processes. Using a new coupling numerical model (0-1BEM + VOF), we study systematically the characteristics of flow field and turbulence during the overtopping process, and probe into the variation trend of the flow stream, velocity vector, turbulence kinetic energy and dissipation rated within a wave period.

Keywords: overtopping; 0-1BEM + VOF; coupling numerical model; turbulence; flow field

越浪是指防波堤在受到大的风浪袭击时, 因浪高超过堤顶高程导致部分水体越过堤顶进入内坡的现象, 一般用越浪量作为评价、计量及控制参数。越浪时波浪会不断地冲击堤顶, 使得防波堤遭受破坏, 严重时会造成溃堤, 对堤后居民的生命财产及工农业设施造成无法估量的损失。越浪也是波浪水动力问题的一个难点, 原因在于其形成过程受到多种强非线性现象的作用, 例如, 波浪翻卷、破碎、冲击等。越浪时回流的水流还会与上升的水流间互相掺混, 全程都伴随着剧烈的水流湍动现象。因此, 开展越浪的机理研究具有非常重要的工程价值和学术意义。

从20世纪50年代起, 国外学者就开始使用模型试验的手段对海岸工程中出现的越浪进行研究, Saville等^[1]、Weggel等^[2]、Van der Meer等^[3]、Hebsgaard等^[4]通过大量的越浪试验给出了越浪量的计算公式。我国学者自20世纪80年代始也进行了大量的越浪物模试验研究, 例如: 虞克等^[5]、卢无疆^[6]、王红等^[7]。通过物模试验可以获得直观、可靠的结果, 并分析给出相应的越浪量计算公式, 但是这种方式投资大、周期长, 并受到工况的限制以及模型比尺效应的影响。

目前, 越浪数值模拟的理论研究成果还比较少, 且多是基于Fluent软件。例如: 王鹏等^[8]、

收稿日期: 2014-01-15

*基金项目: 国家自然科学基金(51279027); 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放课题基金(LP1409)

作者简介: 郭立栋(1981—), 男, 博士, 从事海岸与近海工程方面的研究和管理工作的。

刘亚男等^[9], 均是应用 Fluent 软件, 采用控制方程中引入源项并使用一定的造波、消波技术的方法来模拟越浪。对于越浪的数值模拟结果, 大多仅关注越浪过程中的波面和越浪量变化, 而对于越浪的湍动和流场特性分析尚鲜有研究成果。因此, 本文采用 0-1BEM + VOF^[10] 耦合模型对越浪过程中的湍动和流场特性变化进行分析。

1 数值模型

本文采用的 0-1BEM + VOF^[10] 模型是一种新型的数值波浪耦合模型, 该模型在精度、稳定性及计算效率等方面具有良好的优势。其中, 模型的前域采用的是 0-1 型 BEM, 控制方程为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad z = \eta(x, t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{1}{2} \nabla \phi \nabla \phi - g\eta \quad z = \eta(x, t) \quad (2)$$

式中: η 是波面位置; ϕ 是速度势; g 是重力加速度; x, z 为坐标方向; t 是时间。

模型的后域采用的是 VOF, 控制方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + 2 \frac{\partial v_t}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v_t}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial z} = g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + 2 \frac{\partial v_t}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v_t}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial z} \quad (5)$$

式中: u, v 为流体在 x, z 方向的速度分量; p 是压力; ρ 为流体密度。该方程也称为雷诺时均 N-S 方程。

采用标准 $k-\varepsilon$ 模型对雷诺时均 N-S 方程进行封闭。

k 模型:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial z} = \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \left(\frac{\partial^2 k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\sigma_k} \left(\frac{\partial v_t}{\partial x} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{\partial v_t}{\partial z} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + 2v_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] +$$

$$v_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - \varepsilon \quad (6)$$

ε 模型:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \left(\frac{\partial v_t}{\partial x} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v_t}{\partial z} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + 2C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} v_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} v_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

式中: 模型参数 $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 需通过具体试验来确定。在涡团黏度模型 ($k-\varepsilon$ 模型) 中, k 为湍流动能, ε 为湍流动能耗散率。

图 1 为模型布置, 其中, 与越浪有关的物理因素为: 波长 L 、波高 H 、堤顶到静水位高度 (胸墙高度) H_c 、堤前水深 d 、外侧坡度 m 、平台宽度 B 、平台高程 H_r 。应用本文模型对越浪进行计算时, 将耦合域取在距离斜坡堤堤脚 $0.8L$ 处, 耦合域的长度取为 $0.2L$ 。

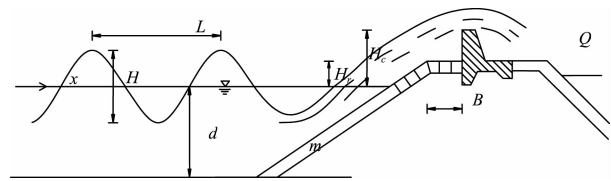


图 1 数模布置

图 2 为胸墙相对高度 $H_c/H = 0.25$, 相对水深 $d/H = 3.1$, 波陡 $H/L = 1/20$, 平台超高 $H_r/H = 0$, 外坡坡度 $m = 1.5$ 及平台宽度 $B/L = 0.05$ 条件下计算得到的越浪量历时变化曲线。

由图 2 可知, 一定时间后的越浪能保持基本稳定, 判断依据为: 相邻周期的越浪量变化曲线的高度、形状大体相当。此时的数据可用来研究越浪的湍动及流场特性。

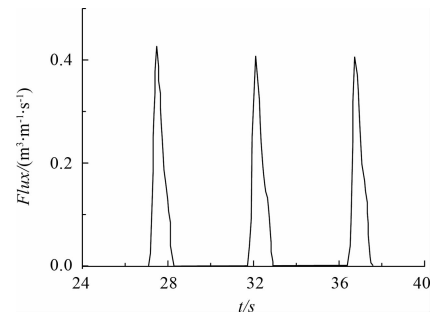


图 2 越浪历时变化曲线

2 越浪的湍动特性

图3为上述工况下,越浪在不同相位(时间间隔 $1/4T$)时的湍动动能变化的等值线。在涡团黏度模型中,水体的湍动由湍动动能 k 值直接反映, k 值大,则湍动强; k 值小,则湍动弱。如图3所示,越浪的湍动动能主要集中在水体与斜坡堤的最前端交汇处,并且其最大值随着波峰的前移而一起运动。在湍动强度较高、范围较大的区域,湍动产生的能量耗散也比较多。当波浪出现雍高时($1/4T$ 时刻),湍动的范围较大;当波谷传播到迎浪面时($3/4T$ 时刻),湍动的范围较小,此时的湍动集中在斜坡堤的平台和胸墙附近。

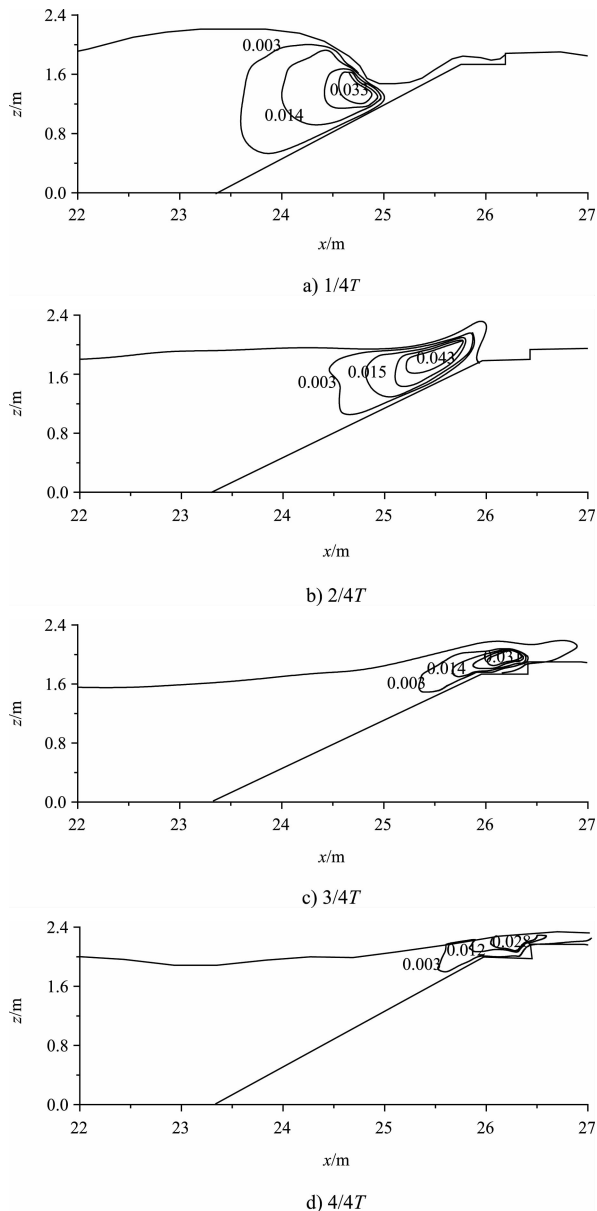


图3 湍动动能等值线(等值线单位: J)

图4为上述工况下,越浪在不同相位(时间间隔 $1/4T$)时的湍动动能耗散率的等值线。湍动耗散率 ϵ 是衡量湍动动能转化为其它能量的速率参数,由图3和图4可知,湍动耗散率等值线与湍动动能等值线具有大体相同的变化趋势。当波浪出现雍高时($1/4T$ 时刻),湍动耗散的范围较大;当波谷传播到迎浪面时($3/4T$ 时刻),湍动耗散的范围较小。

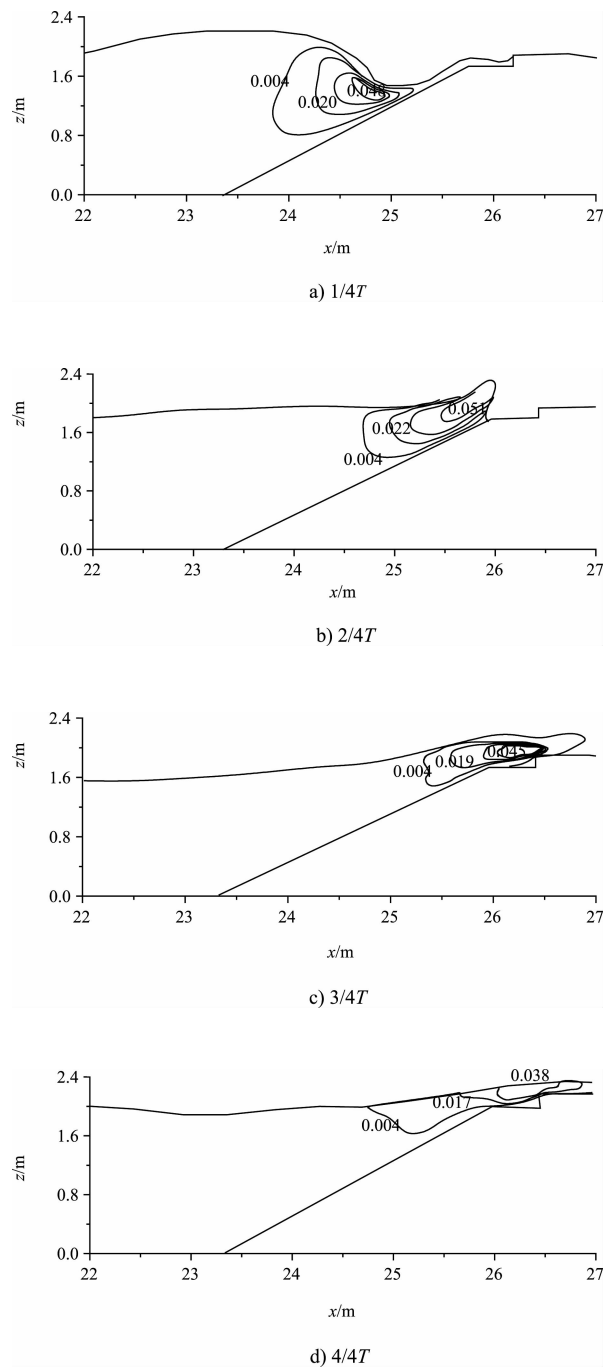


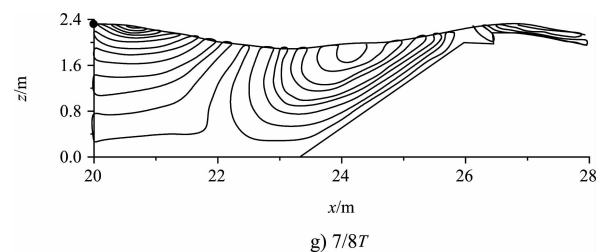
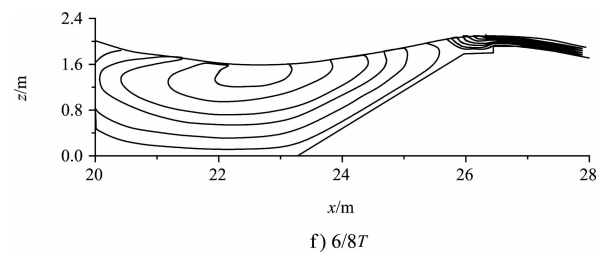
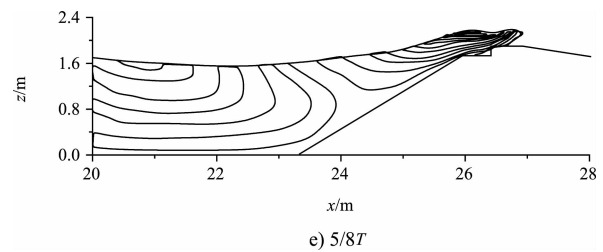
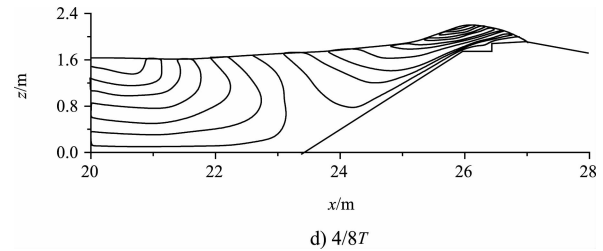
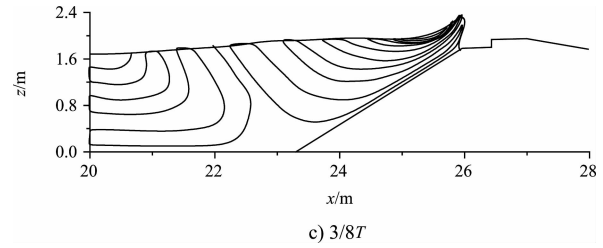
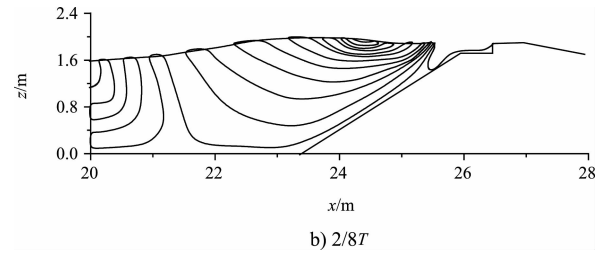
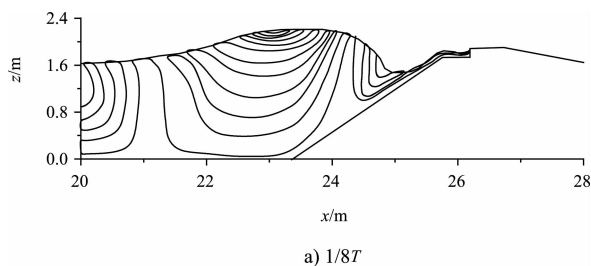
图4 湍动动能耗散率等值线(单位: $W \cdot kg^{-1}$)

通过对越浪过程的湍动特性分析可知, 越浪时的湍动均集中在水体与防坡堤的最前端交汇处。在本文耦合模型的越浪计算中, 将耦合域取在距离斜坡堤堤脚 $0.8L$ 处, 耦合域长度取为 $0.2L$, 因水流湍动均位于斜坡堤以上, 而耦合域中的湍动动能和湍动耗散率的值都为零, 所以湍动并没有对本文耦合域产生任何影响。

3 越浪的流场特性

图 5 和 6 是上述波况时周期内 (时间间隔 $1/8T$) 的越浪流线和速度矢量图。流线较密集的区域, 流速较大; 流线较稀疏的区域, 流速较小。速度矢量的方向即代表该单元水体的流速方向, 矢量的长短则代表速度的大小。由于耦合的两个模型网格设置的不同, 因此在速度矢量图中 $x = 23 \text{ m}$ 位置处可以清楚地看到一条分割线。

分析越浪流线和速度矢量图, 可以得出一个周期内波浪爬高越浪的整个过程: 在图 5a) 中, 波浪开始爬高, 在迎浪面上形成雍高, 并与前一周期没有越过胸墙的水流互相掺混, 波峰处的速度比较大, 回流的速度较大; 图 5b), 波浪破碎坍塌后出现水舌继续爬坡, 波浪前端速度非常大, 迎浪面上有较少的回流; 图 5c), 波浪开始越上平台, 平台和水舌发生碰撞, 波浪的前端有射流出现; 图 5d), 水舌越上胸墙, 随后水舌坍塌; 图 5e), 胸墙与前端的水流形成猛烈的撞击, 出现速度很大的射流; 图 5f), 波峰越过胸墙, 波谷传播到堤脚附近, 此时胸墙上的水体速度较为稳定; 图 5g), 波谷传播到斜坡堤迎浪面, 开始出现回流, 胸墙上的水流流速减弱; 图 5h), 波峰传播到堤脚处, 准备继续下一周期的爬高。



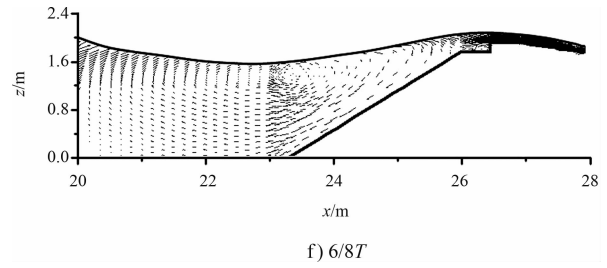
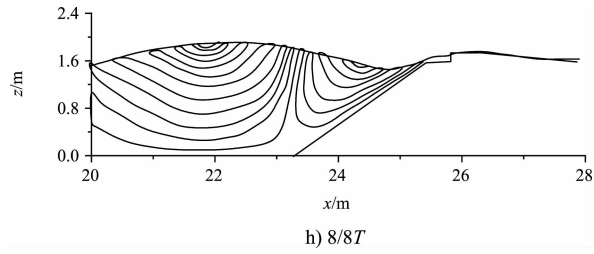


图5 越浪的流线在周期内的变化

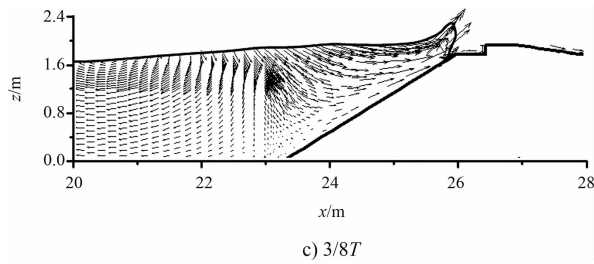
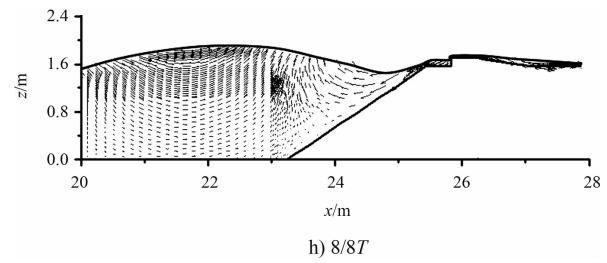
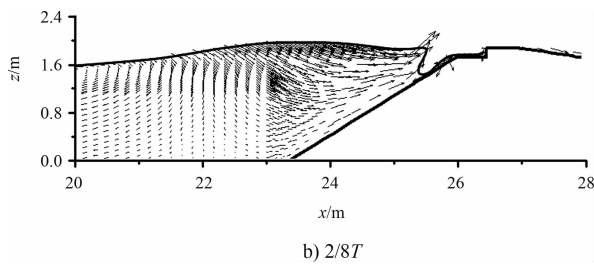
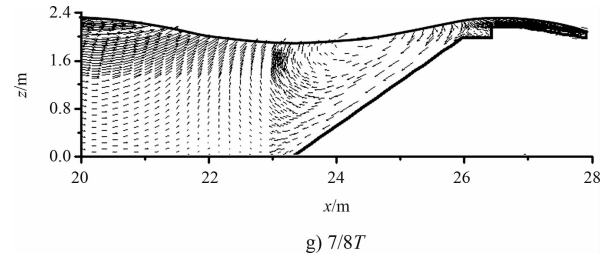
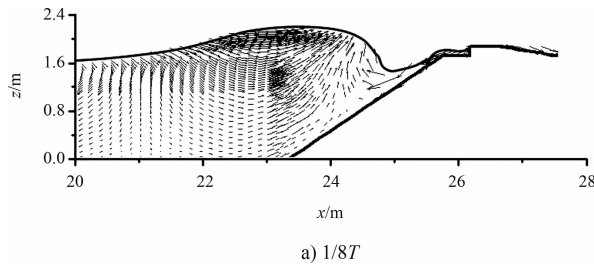
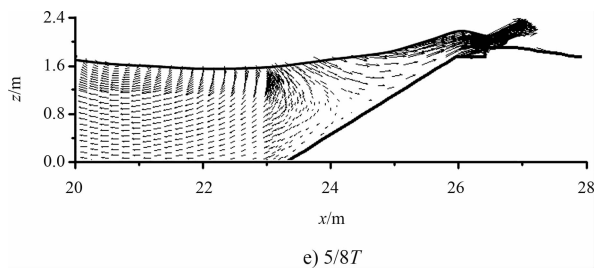
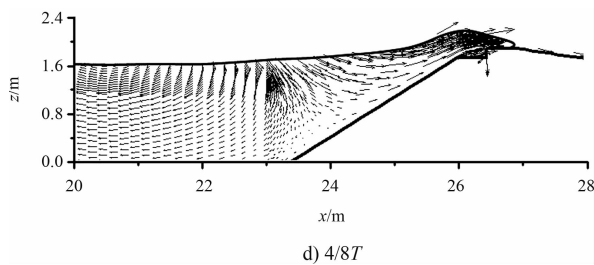


图6 越浪速度矢量在周期内的变化

4 结论

本文对越浪过程中的湍动与流场特征进行研究，得到一个周期内湍动动能、湍动耗散率、流线及速度矢量的变化趋势。越浪的湍动动能主要集中在水体与斜坡堤的最前端交汇处，并且其最大值随着波峰的前移而一起运动。当波浪出现雍高时，湍动的范围较大；当波谷传播到迎浪面时，湍动的范围较小，此时的湍动主要集中在斜坡堤的平台和胸墙附近。湍动耗散率等值线与湍动动能等值线具有大体相同的变化趋势。在湍动强度较高、范围较大的区域，湍动产生的能量耗散也比较多。本文还得出周期内波浪爬高越浪的整个流程，同时验证了耦合域位置的选取对于越浪的计算是可行的。



(下转第 50 页)