

# 不规则波条件下波浪周期对海堤越浪量的影响

黄飞扬<sup>1</sup>, 陈羿名<sup>2,3\*</sup>, 栾华龙<sup>2,3</sup>

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024; 2. 长江科学院河流研究所, 湖北 武汉 430010;  
3. 水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 为了提高海堤设计中越浪量计算的精度, 特别针对长周期不规则波的影响因素展开研究。运用 FLUENT 模型, 对海堤越浪过程进行了准确模拟, 并在不同波况下计算了海堤越浪量。通过对 EurOtop(2018)越浪量计算公式的修正, 大幅度提高了长周期波浪条件下越浪量计算的准确性。结果表明, 波浪周期对海堤越浪量产生显著影响, 尤其是在长周期不规则波的情况下, 修正后的计算公式更为可靠。这一研究为海堤设计提供了更精确的越浪量计算方法, 有助于提高海堤工程的安全性和可靠性。

**关键词:** 越浪量; UDF; 水动力特征; 斜坡堤

中图分类号: U656.2; U656.31

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2024)10-0039-05

doi: 10.7640/zggwjs202410007

## Influence of wave period on wave overtopping of coastal embankment under irregular wave conditions

HUANG Fei-yang<sup>1</sup>, CHEN Yi-ming<sup>2,3\*</sup>, LUAN Hua-long<sup>2,3</sup>

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2. River Research Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China; 3. Key Laboratory of River and Lake Regulation and Flood Control in the Middle and Lower Reaches of the Changjiang River of Ministry of Water Resources, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** In order to enhance the precision of overtopping calculations in coastal embankment design, the influence factors of long-period irregular wave were studied especially. The FLUENT model was employed to accurately simulate the overtopping process along coastal embankments, and wave overtopping was calculated under various wave conditions. Through the refinement of the EurOtop (2018) overtopping calculation formula, the accuracy of overtopping calculation under long-period wave conditions has been significantly improved. The results demonstrate that wave period has a substantial impact on coastal embankment overtopping, particularly in the presence of long-period irregular waves. The modified calculation formula proves to be more reliable. This study provides a more precise method for calculating overtopping in coastal embankment design, contributing to increase safety and reliability in coastal engineering projects.

**Key words:** wave overtopping; UDF; hydrodynamic characteristics; sloping dike

### 0 引言

越浪量作为海堤、防波堤、海港重要的建筑设计的主要水力学参数之一, 在对海堤前坡护岸

种类的选择、海堤高程的设计以及后坡排水设备的建造中都发挥着极其重要的参考作用<sup>[1]</sup>。全球气候变化的影响作用逐渐加剧<sup>[2]</sup>, 导致海堤风暴潮不

收稿日期: 2023-07-09 修回日期: 2024-08-19

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目 (2022YFE0117500); 国家自然科学基金 (42376166)

作者简介: 黄飞扬 (1995—), 男, 安徽滁州人, 硕士, 研究方向为水利工程。

\*通讯作者: 陈羿名, E-mail: chenyingming@mail.crsri.cn

断增强、海平面不断上升,使越浪可能造成更为严重的影响,甚至初期没有进行越浪设计的相关堤防建筑物都会受到海浪的威胁,从而对相关建筑的稳定性产生影响。自20世纪以来,海堤越浪量作为海堤设计中重要参数,国内外学者针对越浪量问题进行了大量研究。其中,1953年 Saville<sup>[3]</sup>对斜坡直立式挡浪墙结构进行了越浪量相关的模型试验;1965年 Iwagaki 等<sup>[4]</sup>开展了波浪要素条件对海堤越浪量影响的相关物理试验;1980年 Owen<sup>[5]</sup>通过一系列水槽试验,建立了不透水断面海堤无量纲平均越浪量与出水高度之间的关系。此后1994年, Van der Meer 等<sup>[6]</sup>将波浪平均越浪量分为破碎和非破碎条件进行了研究,并给出了基于 Iribarren 为参数的海堤无量纲越浪量的计算方法。EurOtop 手册<sup>[7]</sup>分别于2007年和2016年参考 Van der Meer 计算越浪量的方法给出了海堤越浪量的计算公式。我国学者也对海堤越浪量问题开展了大量的物理模型试验和数值计算研究。21世纪初,陈国平等<sup>[8]</sup>、周益人等<sup>[9]</sup>、潘毅等<sup>[10]</sup>、俞聿修等<sup>[11]</sup>很多学者都进行了不同结构形式海堤的越浪量试验研究,并提出了相应的平均越浪量计算公式。

由于海堤越浪量影响因素十分复杂且受到试验条件的限制,各家公式研究的侧重点有所不同,甚至在相关的计算中计算结果差距很大,如波浪周期的影响,在各家公司公式中的计算范围和取值方法十分不明确,甚至出现流量随周期变化趋势不同的现象。本文将数值波浪水槽计算结果为基础,研究不同周期条件下海堤越浪量的变化情况。

## 1 波浪周期在越浪公式中表示方法

JTS 145—2015《港口与航道水文规范》<sup>[12]</sup>对海堤整体的断面形式、护坡类型、波高、周期、水深和堤顶高程等参数进行分类分析,得到了挡浪墙斜坡堤的越浪量计算公式,具体公式形式为:

$$Q = AK_A \frac{H_s^2}{T_p} \left( \frac{R_c}{H_s} \right) \left[ \frac{1.5}{\sqrt{m}} + \tanh \left( \frac{d}{H_s} - 2.8 \right) \right] \cdot \ln \sqrt{\frac{gT_p^2 m}{2\pi H_s}} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为单位时间单位堤顶宽度的平均越浪量;  $K_A$  为海堤表面糙率参数;  $A$  为与海堤前坡坡度  $m$  有关的经验系数;  $H_s$  为基于数据统计的入射有效波高;  $T_p$  为堤脚处入射波浪的谱峰周期;  $R_c$  为超高,即静水位至堤顶的垂直高度;  $m$  为海堤前坡

坡度;  $d$  为堤前水深;  $g$  为重力加速度。只考虑单宽越浪量与周期之间的关系,可知:

$$Q \propto \frac{\ln T_p}{T_p} \quad (2)$$

可以发现,单位时间内的海堤单宽越浪量随着周期的增大而逐渐减小。

较早时期, Owen<sup>[5]</sup>通过一系列水槽试验,给出了梯形断面不透水海堤的无量纲平均越浪量( $Q_0$ )与无量纲出水高度( $R_0$ )之间的关系:

$$Q_0 = \frac{q_w}{gH_s T_{m0}} = a_0 \exp(-b_0 R_0) \quad (3)$$

$$R_0 = \frac{R_c}{T_{m0} \sqrt{gH_s}} \quad (4)$$

式中:  $a_0$  和  $b_0$  是与海堤剖面形状相关的经验参数, Owen 对此给出了详细的计算方法;  $q_w$  为平均单宽越浪量;  $T_{m0}$  为基于波浪谱零阶矩计算的平均周期。公式适用范围为  $0.05 < R_0 < 0.3$ 。只考虑单宽越浪量与周期之间的关系,可知:

$$Q_0 \propto T_{m0} \exp\left(-\frac{1}{T_{m0}}\right) \quad (5)$$

对式(5)进行求导处理后可知单宽越浪量随着波浪周期的增大而逐渐增大。EurOtop (2018) 将 Iribarren 数 ( $\xi_p = \tan \alpha / (H_s / L_p)^{1/2}$ ) 用来反映波浪周期的影响。其中周期产生的影响主要是作用于波浪的有效波长  $L_p$ , 并没有在公式中体现。综上可知在各家公司公式中对于周期对越浪量影响的研究尚有不足,对此需做进一步分析和研究。

## 2 模型验证和参数设定

### 2.1 波浪水槽的造波和消波

本文采用的数值波浪水槽和海堤模型如图1所示,建立了一个长49.3 m,高2.8 m的二维数值波浪溢流水槽。海堤模型高0.4 m,前坡坡度为1:4.25,后坡坡度为1:3。在海堤模型前还设置了一个坡度为1:10、长度为2 m的陡坡。数值水槽的划分可利用 Workbench 中的 Meshing 模块将模型划分为四边形结构性网格,本文主要研究波浪溢流与海堤的作用,需要重点观察海堤表面的水动力特征,则要在海堤模型上加入边界层网格,划分后的全局网格尺寸为0.025 m,边界层网格尺寸为0.010 m。数值水槽的上方设为压力出口边界;底部设为壁面边界;左端为UDF函数输入速度入口边界;右端有自由出流边界和阻尼消波区,模拟得出的海堤越浪过程云图如图2所示。

在波浪和海堤相互作用的过程中,由于海堤

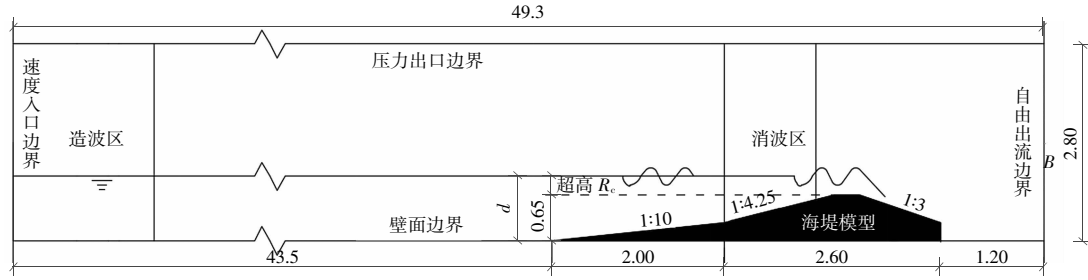


图 1 数值波浪溢流水槽 (m)

Fig. 1 Schematic diagram of numerical wave overtopping flume (m)

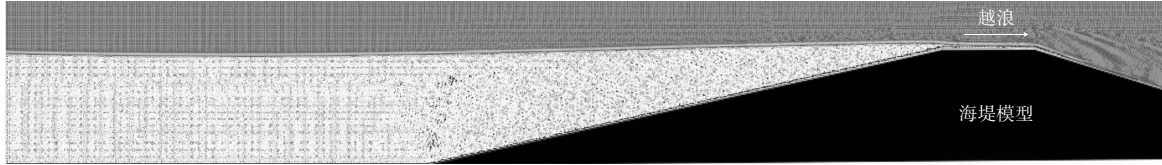


图 2 波浪水槽越浪过程云图

Fig. 2 Wave flume overtopping process contour map

波浪反射作用,使得波高仪在采取波高时,波高参数数据与输入参数存在明显差异。物理水槽中一般通过三点法去除海堤反射波的影响。而 FLUENT 中主要通过在海堤前加入阻尼源项,消除海堤附近波浪的反射作用,此方法可以产生与波浪碰撞相反方向的速度值阻止波浪反射到水槽中。

## 2.2 湍流方程和 VOF 方法

本文采用标准的二维 RANS 方程以求解无孔介质海堤模型湍流中速度场和压力分布情况,公式具体形式为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\alpha_k \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

式中:  $G_k$  为平均速度梯度产生的湍流动能;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  为经验参数;  $\rho$  为流体密度;  $t$  为时间;  $x_i$  和  $x_j$  为笛卡尔坐标系中的第  $i$  个和第  $j$  个坐标方向(如  $x$  或  $y$ );  $u_i$  为平均速度分量,表示流体在第  $i$  个方向上的速度分量;  $\mu_{\text{eff}}$  为有效黏性系数;  $k$  为湍动能;  $\varepsilon$  为湍动能耗散率;  $\alpha_k$  和  $\alpha_\varepsilon$  分别代表  $k$  和  $\varepsilon$  参数的湍流普朗特数。在本研究中,UDF 函数可以在数值水池中产生波高和波周期等参数,便于选择合适的控制波理论,并在边界处产生波浪。为了跟踪自由表面的运动,FLUENT 采用了 VOF 多相流模型,通过该技术计算网格每个单元中各相的比例(体积分数)。体积分数方程如下:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \quad (8)$$

式中:  $U$  为  $u$ 、 $v$ 、 $w$  (3 个不同方向的速度分量)组成的速度场;  $t$  为时间;  $\alpha$  为水的体积百分比,取值范围为 0~1,例如,当网格中全为水时  $\alpha=1$ ;当网格中全为空气时  $\alpha=0$ 。体积分可以计算出混合物在每个网格单元内的密度,水气混合物的密度  $\rho^*$  估计为:

$$\rho^* = \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a \quad (9)$$

式中:  $\rho_w$  和  $\rho_a$  分别为水和空气的密度。

## 2.3 造波模型的验证

该模型用于再现入射不规则波,并预测不透水堤防的越浪量。采用数值模型对 20 个波况进行了模拟,数值模型的模拟时间均设置为 120 s。根据波周期的不同,模拟的持续时间是通过比较使用部分时间序列测量流量和使用整个越浪时间序列的流量进行确定。数据对比后发现,80 s 的时间序列给出了基于整个时间序列整体的变化规律。因此,采用 80 s 作为计算量和结果精度之间的折中时间,将模拟得到的自由表面高程、累积越浪量与 Pan 等<sup>[10]</sup>的实测结果进行了比较,证明数值模型对入射不规则波的再现能力。

图 3 为数值模型给出的入射自由水面高程时间序列与 Pan 试验组次 3 对比结果,数值模型和物理模型结果之间的一致性较好,两者之间的均方根误差(RMSE)为 0.138 4。结果表明,数值模型能较好地再现波浪的传播过程。图 4 为数值波浪水槽单宽累积越浪量和试验值的对比。试验单宽累积越浪量  $q_t$  是根据数值模型中模拟时间对应的 0~80 s 入射波面高程时间序列得到的。对比图

4 中单宽累积越浪量随时间的变化可以得到数值模型结果平均绝对百分比误差仅为 5.2%。总体而言, 本节给出的结果表明, 数值模型能够准确地再现入射不规则波越浪过程。

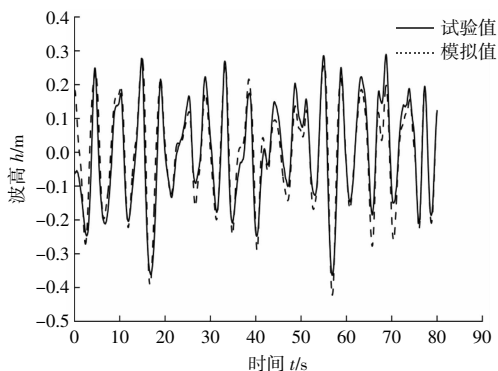


图 3 数值波浪水槽其中 80 s 的波形和 Pan 试验值的对比  
Fig. 3 Comparison of numerical wave flume waveform at 80 s with Pan experimental data

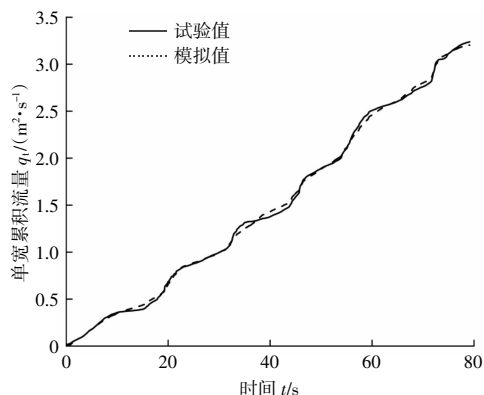


图 4 数值波浪水槽单宽累积越浪量和 Pan 试验值的对比  
Fig. 4 Comparison of cumulative overtopping volume for single width in numerical wave flumes and Pan experimental data

### 3 计算结果与对比

波浪周期对海堤越浪量的影响并不直接, 但是波浪周期与波浪高度、波浪速度等参数有关, 这些参数会影响海堤越浪量的大小。一般来说, 波浪周期越长, 波浪高度越大, 波浪速度越大, 对海堤的冲击力就越大, 越容易造成海堤越浪。不过, 这也取决于海堤的设计和建造是否符合要求, 以及海堤所处的水深、海流等环境因素。因此, 在设计和建造海堤时, 需要综合考虑多种因素, 而不是单纯地研究波浪周期对海堤越浪量的影响。对此本文建立了 20 个不同波浪要素组次用于研究波浪周期对越浪量的影响, 模拟组次如表 1 所示。

表 1 数值模拟越浪组次

Table 1 Numerical simulation overtopping events

模拟组次 编号	超高 $R_c/m$	波浪要素		模拟时长/s
		$H_s/m$	$T_p/s$	
WS1	0.02	0.21	2.10	120
WS2	0.02	0.26	2.30	120
WS3	0.02	0.32	3.10	120
WS4	0.02	0.33	3.80	120
WS5	0.02	0.41	4.40	120
WS6	0.02	0.45	4.93	120
WS7	0.02	0.51	5.05	120
WS8	0.02	0.56	5.96	120
WS9	0.02	0.66	5.86	120
WS10	0.04	0.23	6.35	120
WS11	0.04	0.41	6.93	120
WS12	0.04	0.61	6.28	120
WS13	0.06	0.22	6.66	120
WS14	0.06	0.42	7.02	120
WS15	0.06	0.61	7.30	120
WS16	0.10	0.23	7.63	120
WS17	0.10	0.44	7.97	120
WS18	0.10	0.65	8.26	120
WS19	0.10	0.83	8.62	120
WS20	0.10	0.24	8.97	120

由于海堤越浪现象非常复杂, 海堤结构形式影响很大, 现有计算平均越浪量的公式大多适用范围较窄, 使用起来有很大的局限性, 且彼此之间的计算结果差异也很大。针对图 1 所示的海堤模型特征, 本文参考了《港口与航道水文规范》<sup>[12]</sup>、Owen 公式<sup>[5]</sup>及 EurOtop(2018)<sup>[7]</sup>中的 Van der Meer 公式, 用于计算在表 1 所设定的工况下海堤越浪量的大小。本文使用不同公式计算结果和适用范围对表 1 所示波况条件下单宽越浪量进行了计算, 计算结果见图 5 ( $H_{m0}$  为基于波浪谱的波浪有效波高)。

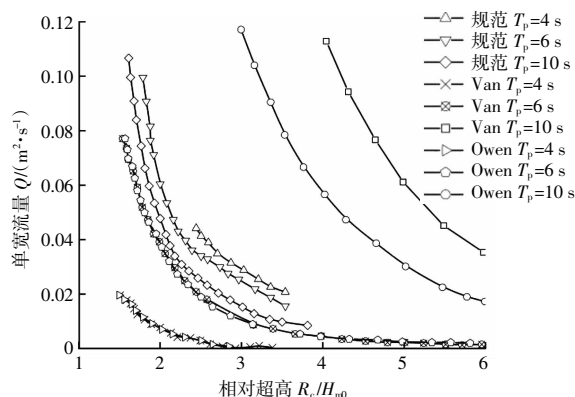


图 5 各种公式下海堤越浪量变化

Fig. 5 Variation of wave overtopping of coastal embankment under various formulas

由图 5 可知, 在上述公式中由于对越浪参数考虑侧重点的不同, 使得海堤越浪量在考虑周期因素时, 计算值存在较大的差异。经过第 1 节和图 5 所示的工况越浪量对比后发现,《港口与航道水文规范》<sup>[12]</sup>在计算越浪量时, 波浪周期影响作用较小, 但是总体的影响效果与其他两家存在明显差异, 表现为随着周期增加, 越浪量有减小的趋势, 这与实际情况严重不符。这主要是因为我国海岸波浪形态较为平缓, 海堤越浪量主要与海堤的断面形式和护面块体类型有关, 所以对波浪要素的考虑存在不足。与《港口与航道水文规范》<sup>[12]</sup>不同的是, Van der Meer 公式中周期对越浪的影响较大, 这主要反映在波浪的波长上从而改变了波陡参数( $H_s/L_p$ ), 随着波长  $L_p$  增加, 破波参数  $\xi_p$  也随之增加。对于较短周期波浪的较小越浪量, Owen 和 Van der Meer 的计算结果很接近, 这主要是由于欧洲海堤越浪量控制标准较高, 允许越浪量较小, 研究者更关注于小越浪量( $Q$  通常小于  $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ )的研究, 计算结果也相对精确。将海堤数值模拟的越浪量与计算公式进行比较, 如图 6 所示, 随着周期  $T_p$  的不断增大, 海堤越浪量也随之增加, 可达到公式计算越浪量的 1~2 倍, 此时, EurOtop(2018)难以满足计算精度要求。

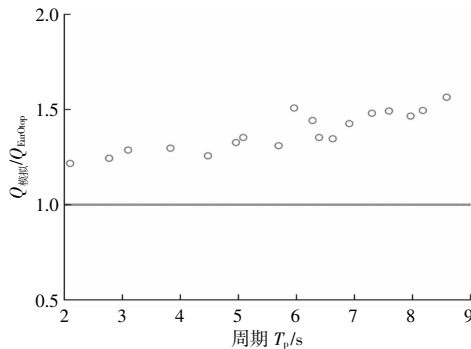


图 6 数值模拟结果与 EurOtop(2018)越浪量计算结果比较

Fig. 6 Comparison between numerical simulation results and EurOtop(2018) calculation results of wave overtopping

在海堤防护中, 风暴潮作用下, 海浪在风力作用下产生了风浪和涌浪的混合浪, 由于波能的输入, 波高急剧增加, 此时波浪周期也得到了-定的增加, 从而对海堤的破坏作用更加明显。结合上述可知 EurOtop(2018)公式着重考虑波浪要素对越浪量的影响, 但是对大周期越浪量考虑不足, 因此, 本文将在 EurOtop(2018)公式的基础上, 引

入波浪周期影响参数, 通过不断计算和尝试, 本文引入波陡变换参数  $(0.5L_p/H_s)^{3/4}$  以代替波浪周期对越浪量的影响。拟合得到的计算公式如下:

$$Q' = 1.05Q \exp(0.5L_p/H_s)^{3/4} \quad (10)$$

式中:  $Q'$  为公式修正后的越浪量;  $Q$  为通过 EurOtop(2018)公式计算得到的越浪量; 将数值模拟结果与公式(10)计算结果进行对比, 如图 7 所示, 在对大周期越浪模拟时, 发现海堤越浪量随着周期的增加, 呈现逐渐增大的趋势。本文公式修正值也随着周期的增加, 其准确度也随之变高, 当周期  $T_p$  大于 4 s 时, 修正公式计算结果与数值模型实测结果均方根(RMSE)误差为 0.262 4。但在越浪量较小时, 需要使用原 EurOtop(2018)公式, 以满足计算精度要求。

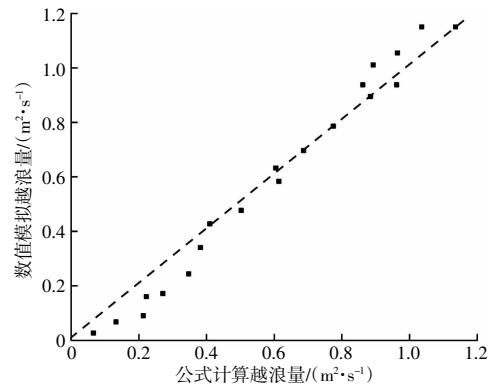


图 7 公式计算值和数值模拟越浪量结果之间的对比

Fig. 7 Comparison between formula calculation values and numerical simulation results of wave overtopping

#### 4 结语

本文对各个越浪量计算公式进行了对比, 发现各公式在考虑周期因素对越浪量影响时存在明显差异。本文针对此问题进行探究, 利用 FLUENT 软件建立了海堤数值模型, 研究了不同周期条件下海堤越浪量的变化情况, 并对比了各家公式在计算不同周期越浪量条件下的优缺点和适用条件。得出结论如下:

1) 各公式中周期对海堤越浪量的作用效果不同,《港口与航道水文规范》在计算越浪量时, 波浪周期影响作用较小, 表现为随着周期增加, 越浪量有减小的趋势。Van der Meer 公式中周期对越浪的影响较大, 周期主要作用于波浪的波长, 从而影响越浪量。Owen 和 Van der Meer 的计算结果相近, 但 Owen 更关注于小越浪量( $Q$  通常小于

(下转第 101 页)