

· 港口 ·



## 直立堤平均越浪量计算方法对比\*

刘晓, 刘勇

(中国海洋大学 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 直立式防波堤、海堤和护岸等结构是港口海岸工程中经常采用的建筑物, 工程设计中需要计算直立堤平均越浪量。我国港口工程设计规范中, 尚未明确给出直立堤平均越浪量的计算方法。总结国内外直立堤平均越浪量的几种主要计算方法, 在不同堤前水深和波浪参数条件下, 对不同方法的计算结果进行对比分析, 可为港口工程设计提供参考。

**关键词:** 直立堤; 平均越浪量; 欧洲越浪手册; 海岸工程手册

中图分类号: U 65.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0037-05

### Comparison of calculating methods for mean overtopping discharge of vertical breakwater

LIU Xiao, LIU Yong

(Shandong Province Key Laboratory of Ocean Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** Vertical breakwaters, sea dikes and sea walls are often used in port and coastal engineering. The overtopping discharge of a vertical structure needs to be estimated in engineering. So far, the calculating method for the mean overtopping discharge of vertical structures has not been given in Chinese port engineering specifications. So, we summarize several major calculating methods for the mean overtopping discharge of vertical structures. A comparative analysis of mean overtopping discharges estimated by different calculating methods at different water depths and wave parameters are carried out, which can be used as reference for practical harbor engineering design.

**Keywords:** vertical breakwater; mean overtopping discharge; Eurotop; CEM

港口、海岸工程中, 常用防波堤、海堤和护岸等水工建筑物为岸线和码头结构等提供掩护。直立堤是上述水工建筑物的一种重要结构形式, 在港口、海岸工程中应用非常广泛。在直立堤设计中, 一个基本问题就是如何有效计算直立堤的越浪量。越浪量的定义主要包括平均越浪量和单波越浪量<sup>[1]</sup>。平均越浪量  $q$  定义为一个足够长 (例如: 包含 100 个以上的波浪) 的波列在单位堤长、单位时间内的平均越顶体积, 单位为  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。它反映较长时间内越浪的平均效应, 是考虑建筑物顶部及内坡冲蚀和堤后陆域排水问题的主要设计参数。单波越浪量定义为单个波浪在单位堤长上产生的越顶水体积, 单位为  $\text{m}^3/\text{m}$ , 主要反映越浪

的短期效果, 例如: 海堤附近个别大的越浪对过往行人和车辆安全造成的威胁可以用单波越浪量来反映。在工程设计中, 还需要规定允许越浪量的标准, 要求将越浪量控制在一定的允许范围 (允许越浪量) 内, 最近, 夏运强等<sup>[2]</sup>对允许越浪量标准进行了综述。本文重点关注平均越浪量的计算。

针对海岸结构物的越浪量计算问题, 国内外学者开展了大量物理模型试验研究, 提出了多种直立堤平均越浪量计算方法, 主要包括: 欧洲越浪手册法 (EurOtop)<sup>[3]</sup>、美国海岸工程手册法 (CEM)<sup>[4]</sup>、合田良实法<sup>[5]</sup>、大连理工大学法<sup>[6]</sup>和 Franco 法<sup>[7]</sup>等。俞聿修<sup>[8]</sup>曾对合田良实、大连理工

收稿日期: 2014-10-30

\*基金项目: 国家自然科学基金 (51322903)

作者简介: 刘晓 (1990—), 女, 硕士研究生, 从事港口、海岸及近海工程研究。

大学和 Franco 等方法进行了对比研究,但没有涉及到 EurOtop 法和 CEM 法。我国现行港口工程设计规范,仅给出了斜坡堤平均越浪量的计算公式,尚未明确给出直立堤平均越浪量的计算方法,使工程设计缺乏参考依据。

为此,本文进一步总结国内外直立堤平均越浪量的计算方法,并对各种计算方法进行分析比较,可为工程设计提供参考。

### 1 EurOtop 法<sup>[3]</sup>

EurOtop 法是在英国、美国等国家学者大量物理模型试验研究的基础上,提出的一系列不同类型海岸结构物越浪量的计算方法。该方法考虑 JONSWAP 谱,并按波向和堤前水深给出不同条件下平均越浪量概率性设计公式和确定性设计公式。概率性设计公式用于平均越浪量的预测或者与测量值相比较,确定性设计公式则用于对水工建筑物进行安全性评估。当堤前水深小于 0 时, EurOtop 中给出了海底坡度为 1:10 的平均越浪量计算公式;当堤前水深大于 0 时,给出正向波和斜向波作用下的平均越浪量计算公式。EurOtop 定义了一个很关键的堤前水深系数  $h_*$  :

$$h_* = 1.35 \frac{d}{H_s} \cdot \frac{2\pi d}{gT_{m-1.0}^2} \quad (1)$$

式中:  $H_s$  为堤前有效波高(m);  $d$  为堤前水深 (m);  $g$  为重力加速度 ( $m/s^2$ );  $T_{m-1.0} = 2\pi \cdot \frac{m_{-1}}{m_0}$ , 为海浪谱 0 阶矩  $m_0$  和 -1 阶矩  $m_{-1}$  计算得到的平均周期(s)。

#### 1.1 正向波条件

当  $h_* > 0.3$  时,

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.04 \exp\left(\frac{-aR_c}{H_s}\right) \quad 0.1 < R_c/H_s < 3.5 \quad (2)$$

当  $h_* < 0.2$  时,

$$\frac{q}{h_*^2 \sqrt{gd^3}} = b \left(\frac{h_* R_c}{H_s}\right)^{-3.1} \quad 0.03 < \frac{h_* R_c}{H_s} < 1.0 \quad (3)$$

$$\frac{q}{h_*^2 \sqrt{gd^3}} = c \times 10^{-4} \left(\frac{h_* R_c}{H_s}\right)^{-2.7} \quad \frac{h_* R_c}{H_s} < 0.02 \quad (4)$$

式中:  $R_c$  为胸墙在静水面以上高度 (m);  $a$ 、 $b$ 、

$c$  为系数,取值见表 1。

表 1 公式(2)~(4)中系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的取值

公式	$a$	$b$	$c$
概率设计计算公式	2.6	$1.5 \times 10^{-4}$	$2.7 \times 10^{-4}$
确定性设计计算公式	1.8	$2.8 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-4}$

当  $0.2 < h_* < 0.3$  时,平均越浪量计算要综合考虑  $h_* > 0.3$  和  $h_* < 0.2$  两种情况的影响,并取较大值。

#### 1.2 斜向波条件

当  $h_* > 0.3$  时,

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.04 \exp\left(-\frac{2.6}{\gamma_\beta} \cdot \frac{R_c}{H_s}\right) \quad 0.1 < \frac{R_c}{H_s} < 3.5 \quad (5)$$

式中:  $\beta$  为波浪入射角 ( $^\circ$ );  $\gamma_\beta$  为考虑波浪方向影响的越浪量折减因子。当  $0^\circ < \beta < 45^\circ$  时,  $\gamma_\beta = 1 - 0.006 2\beta$ ; 当  $\beta > 45^\circ$  时,  $\gamma_\beta = 0.72$ 。

当  $h_* < 0.2$  时,波浪入射角  $\beta$  为  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$  时的平均越浪量计算公式见表 2。

表 2 EurOtop 中斜向波作用下平均越浪量计算公式

$\beta/(^\circ)$	$h_* R_c/H_s$	概率设计计算公式	确定性设计计算公式
15	$\geq 0.2$	$\frac{q}{h_*^2 \sqrt{gd^3}} = 5.8 \times 10^{-5} \left(\frac{h_* R_c}{H_s}\right)^{-3.7}$ (6) 公式(3)	
	$< 0.2$	公式(3)	未给出
30	$\geq 0.07$	$\frac{q}{h_*^2 \sqrt{gd^3}} = 8.0 \times 10^{-6} \left(\frac{h_* R_c}{H_s}\right)^{-4.2}$ (7) 公式(7)	
60	$\geq 0.07$	公式(5)	公式(2)

EurOtop 法与文献[8]中 Allsop 法有很多相似之处,都是考虑堤前水深对平均越浪量的影响,提出堤前水深系数,并根据波浪破碎情况给出平均越浪量计算公式。但 EurOtop 法中多考虑了波向的影响,比 Allsop 法更为全面。

### 2 CEM 法<sup>[4]</sup>

美国海岸工程手册给出如下直立堤平均越浪量计算公式:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.082 \exp\left(\frac{-3.0R_c}{H_s} \cdot \frac{1}{\gamma_\beta \gamma_s}\right) \quad (8)$$

式中:  $\gamma_s$  为考虑结构配置和形状的修正因子,对于平直墙面,  $\gamma_s$  取 1.0。此公式在文献[8] Franco C 法中已有研究,在此基础上,美国海岸工程手册

中又规定波向角  $\beta$  取值范围为  $0^\circ \sim 60^\circ$

考虑波向角对平均越浪量  $q$  的影响时, 折减因子  $\gamma_\beta$  的取值如下:

斜向波:

$$\gamma_\beta = \begin{cases} \cos\beta & 0^\circ \leq \beta \leq 37^\circ \\ 0.79 & \beta > 37^\circ \end{cases} \quad (9)$$

短峰波:

$$\gamma_\beta = \begin{cases} 0.83 & 0^\circ \leq \beta \leq 20^\circ \\ 0.83 \cos(20^\circ - \beta) & \beta > 20^\circ \end{cases} \quad (10)$$

### 3 合田良实法<sup>[5]</sup>

依据直立堤和水平混合式直立堤越浪量的试验研究结果, 合田良实给出了直立堤平均越浪量的计算图表。在表中, 无因次越浪量  $q/(gH_0'^3)^{1/2}$  由  $R_c/H_0'$  (0.5 ~ 2.0)、 $d/H_0'$  (0.5 ~ 10) 和  $H_0'/L_0$  (0.012 ~ 0.036) 这3个参数确定, 海底坡度也有一定影响。这里,  $L_0$  为深水有效波长 (m),  $H_0'$  为考虑折射、绕射效应的深水波高 (m), 考虑波浪浅水变形时,  $H_s = K_s H_0'$ , 其中,  $K_s$  为浅水系数。

根据合田良实的计算图表, 俞聿修<sup>[8]</sup>指出: 当相对水深  $d/H_0'$  较小 (波浪可能破碎) 时, 越浪量随水深、波坦和海底坡度的增大而增大; 当相对水深  $d/H_0' > 1.7 \sim 2.1$  时, 越浪量随水深增大而减小。

### 4 大连理工大学法

2007年, 俞聿修等学者考虑 JONSWAP 谱和光易型方向分布函数, 试验研究了多向不规则波对直立堤的越浪量<sup>[6]</sup>, 得到斜向波和多向不规则波作用下直立堤的平均越浪量计算公式:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.051 \exp\left(\frac{-0.684d}{H_s} \cdot \frac{R_c}{H_s} \cdot \frac{1}{\gamma_\beta}\right) \quad (11)$$

其中,  $R_c/H_s = 0.47 \sim 1.31$ , 波陡  $S_{op} = 2\pi H_s / (gT_p^2) = 0.025 \sim 0.05$  (其中,  $T_p$  为谱峰周期),  $d/H_s = 3.7 \sim 5.1$ ,  $\beta$  取值范围为  $0^\circ \sim 45^\circ$ , 方向分布宽度  $\sigma$  的取值范围为  $0^\circ \sim 25^\circ$ , 其中  $0^\circ$  为长峰波。考虑波浪方向影响的越浪量折减因子  $\gamma_\beta$  的取值见表3。

表3 大连理工大学法斜向波越浪量折减因子  $\gamma_\beta$  的取值

$\beta / (^\circ)$	$\gamma_\beta$	
	斜向波(长峰波)	多向波(短峰波)
0	1.00	0.78
10	0.91	0.77
20	0.81	0.76
30	0.72	0.70
45	0.67	0.65

### 5 不同方法对比分析

考虑越浪量的主要影响因素, 采用两个不同的算例, 对前文所述各种计算方法进行对比分析。

#### 5.1 正向波作用下平均越浪量

算例1: 采用文献[8]中算例, 设定有效波高  $H_s$  为3m, 波浪平均周期为6.17s, 波向角  $\beta = 0^\circ$ ,  $R_c/H_s$  分别为0.6、0.9和1.3。

算例2: 采用文献[5]中算例, 设定有效波高  $H_s$  为4.9m, 波浪平均周期为8.5s, 波向角  $\beta = 0^\circ$ ,  $R_c/H_s$  分别为0.8、1.0和1.2。

#### 5.1.1 波浪不破碎

当堤前水深较大时, 波浪不发生破碎。设定算例1中堤前水深为11.1、12.3m,  $d/H_s$  分别对应为3.7、4.1。算例2中堤前水深为19.6、21.6m,  $d/H_s$  分别对应为4.0、4.4。采用各种不同方法计算直立堤的平均越浪量, 计算结果见表4。

表4 正向不规则波 (不破碎) 条件下直立堤平均越浪量

算例	$R_c/H_s$	越浪量/( $m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )						
		EurOtop法		CEM法	合田良实法		大连理工大学法	
		概率设计	确定性设计		$d/H_s = 3.7$	$d/H_s = 4.1$	$d/H_s = 3.7$	$d/H_s = 4.1$
1	0.6	0.137	0.221	0.220	0.105	0.091	0.182	0.154
	0.9	0.063	0.129	0.090	0.042	0.034	0.085	0.066
	1.3	0.022	0.063	0.027	0.011	0.009	0.031	0.022
2	0.8	0.170	0.322	0.253	0.110	0.099	0.194	0.156
	1.0	0.101	0.225	0.139	0.045	0.038	0.112	0.085
	1.2	0.060	0.157	0.076	0.027	0.022	0.065	0.047

由表4可以看出：EurOtop法中，确定性设计公式的计算结果明显大于概率设计公式的计算结果。4种不同方法计算所得的越浪量值从大到小依次为：EurOtop法（确定性设计方法）、CEM法、大连理工大学法、合田良实法。在波浪不发生破碎时，仅合田良实法和大连理工大学法计算所得越浪量与相对水深  $d/H_s$  有关，且相对水深越小，越浪量越大。而用EurOtop法和CEM法得到的结果与相对水深无关（从计算公式中也直接看出）。

5.1.2 波浪发生破碎

当堤前水深较小时，设定算例1中堤前水深为4.5 m， $h_* = 0.153 < 0.2$ ，波浪发生破碎；算例2中堤前水深为6.5 m， $h_* = 0.153 < 0.2$ ，波浪发生破碎。分别计算直立堤的平均越浪量，计算结果见表5。

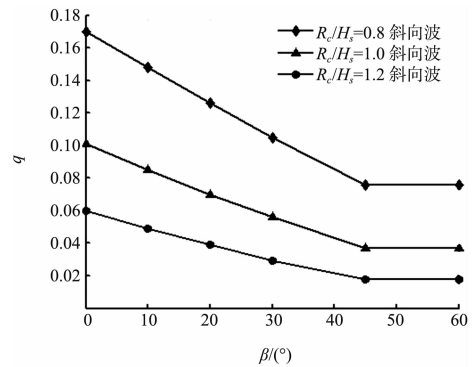
表5 破碎波正向作用于直立堤上的平均越浪量

算例	$R_c/H_s$	越浪量/( $m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )		
		EurOtop法		合田良实法
		概率设计	确定性设计	$d/H_s = 1.5$
1	0.6	0.137	0.263	0.171
	0.9	0.063	0.129	0.073
	1.3	0.022	0.063	0.024
2	0.8	0.174	0.326	0.135
	1.0	0.087	0.163	0.063
	1.2	0.050	0.093	0.034

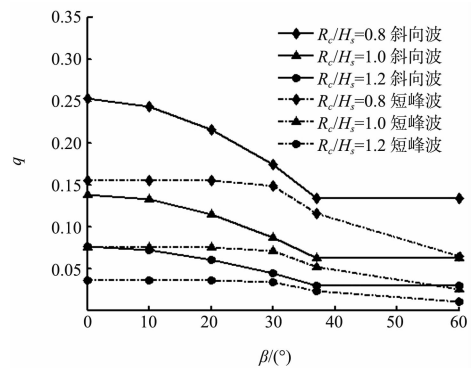
由表5可以看出：当相对水深较小，波浪发生破碎时，可采用EurOtop法或合田良实法计算直立堤的平均越浪量，EurOtop法计算结果明显大于合田良实法。对比表4与表5可以发现：当采用合田良实法计算越浪量时，破碎波条件下的计算结果明显偏大，但是，EurOtop法破碎波和不破碎波条件下的计算结果没有明确大小变化规律。此外，文献[8]中另有Besley法给出基床直墙堤上破碎波越浪量计算公式，其计算结果与其他方法相比明显增大，这些说明对于直立堤上破碎波越浪量有待于进一步研究验证。

5.2 斜向波和短峰波作用下平均越浪量

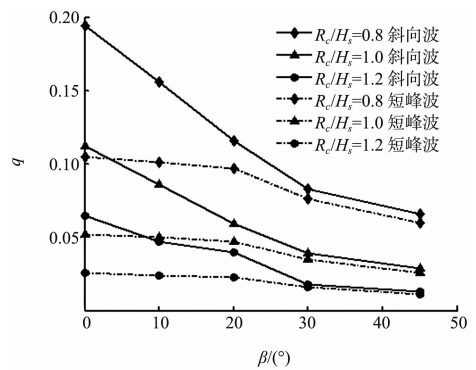
考虑斜向和多向不规则波，采用5.1节中相同的算例，对不同方法平均越浪量的计算结果进行了对比分析。图1绘出算例2的计算结果。



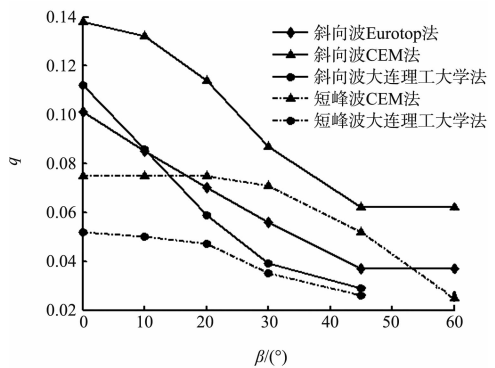
a) EurOtop法



b) CEM法



c) 大连理工大学法



d)  $R_c/H_s=1.0, d/H_s=4.0$

图1 波浪入射角度对平均越浪量影响

由图1可以看出：总体而言，平均越浪量随着波浪入射角度  $\beta$  的增大而减小，随相对堤顶高

度  $R_c/H_s$  的增大而减小, 且短峰波的越浪量小于长峰波的越浪量。但是, 不同方法计算结果的详细变化规律有所不同。EurOtop 法仅考虑波浪未发生破碎情况 (即  $h_* > 0.3$ ),  $\beta \leq 45^\circ$  时, 长峰波越浪量随着波向角  $\beta$  的增大而减小;  $\beta > 45^\circ$  时, 越浪量不再随  $\beta$  变化。CEM 法,  $\beta \leq 37^\circ$  时, 长峰波越浪量随  $\beta$  的增大而减小;  $\beta > 37^\circ$  时, 越浪量不再随  $\beta$  变化。而短峰波的越浪量在  $\beta \leq 20^\circ$  时没有变化;  $\beta > 20^\circ$  时, 越浪量随  $\beta$  的增大而减小。图 1d) 给出斜向波作用下, EurOtop 法、CEM 法和大连理工大学法计算结果的对比, 可以看出: 大连理工大学法短峰波条件下的计算结果最小。

## 6 结语

本文对 EurOtop 法、CEM 法、合田良实法、大连理工大学法 4 种直立堤平均越浪量计算方法进行了对比分析, 这 4 种方法的计算公式、计算结果和计算条件有很大不同。总体而言, 各公式计算得到的平均越浪量随着波向角  $\beta$  的增大而减小, 随  $R_c/H_s$  的增大而显著减小。EurOtop 法根据波向和堤前水深情况, 列出不同形式下平均越浪量的计算公式, 计算方法比较详细。EurOtop 法与合田良实法可以考虑破碎波的影响, 但是 CEM 法和大连理工大学法没有考虑破碎波的影响。在斜向波和多向波条件下, CEM 法和大连理工大学

法的计算结果偏安全。在工程设计中, 可根据具体波浪情况、水深条件选择合适的平均越浪量计算方法。

## 参考文献:

- [1] 俞聿修. 海岸工程的允许越浪量[J]. 港工技术, 2009, 46(1): 1-3.
- [2] 夏运强, 李贺青, 沈如军. 港口工程允许越浪量标准分析研究[J]. 海洋工程, 2013, 31(6): 104-109.
- [3] The Eurotop Team. Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, 2007[S].
- [4] U S Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual [M]. Washington D C, USA: US Army Corps of Engineers, 2003.
- [5] Goda Y. Random Seas and Design of Maritime Structures [M]. Hongkong: World Scientific Publishing Company, 2000.
- [6] 俞聿修, 赵凤亚, 李晓亮, 等. 斜向和多向不规则波对直立堤的平均越浪量研究[J]. 海洋工程, 2007, 25(3): 32-39.
- [7] Franco C, Franco L. Overtopping formulas for caisson breakwaters with non-breaking 3D waves [J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 1999, 125(2): 98-108.
- [8] 俞聿修. 直立堤上平均越浪量计算方法的比选[J]. 港工技术, 2011, 48(3): 1-3.

(本文编辑 武亚庆)

## · 消 息 ·

### 四航局承建的广西北海港码头工程通过验收

5月28日, 四航局承建的广西北海港铁山港区北幕作业区神华1#泊位码头工程通过验收。

该项目位于铁山港区兴港镇, 码头总长323 m, 水工结构按10万吨级泊位设计, 为重力式沉箱结构。项目合同额约1.54亿元, 工期29个月, 主要工程内容包括水工建筑物、助导航设施、水工范围内给排水及电气埋管、南侧护坡、1#和2#泊位基槽及停泊回旋水域开挖等。

该项目在实施期间, 连续两年被评为广西壮族自治区“平安工地”, 被交通运输部列为全国“平安工地”示范创建项目。1#泊位的建成, 将有助于促进北海港能源基地的建设, 对推动北部湾经济社会发展具有重要意义。

(来源: 四航局)