



斜向波作用下斜坡堤平均越浪量的试验研究*

朱嘉玲¹, 王震¹, 陈凌彦¹, 孙天霆², 王登婷²

(1. 河海大学, 江苏南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210024)

摘要: 通过对平均越浪量的计算来设计斜坡式海堤是我国常用方法。归纳总结国内外平均越浪量的研究进展和相关计算公式, 并通过整体物理模型试验, 重点分析和讨论波浪入射方向与斜坡堤堤顶越浪量的关系, 并提出修正的越浪量计算公式。

关键词: 平均越浪量; 斜向角; 斜坡堤

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0009-05

Experimental study on mean overtopping of sloping seawall under oblique irregular waves

ZHU Jia-ling¹, WANG Zhen¹, CHEN Ling-yan¹, SUN Tian-ting², WANG Deng-ting²

(1. Hohai University, Nanjing 210098 China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: It is the common method to design sloping seawall by calculating the mean overtopping. The research process and relevant calculation formulae of the mean overtopping at home and abroad are summarized. Based on the overall physical model experiment, we analyze the relationship of wave direction and mean overtopping of sloping seawall, and propose the adjusted computational formula of the mean overtopping.

Keywords: mean overtopping; wave direction; sloping seawall

斜坡式防波堤是保护沿海地区免遭潮、浪袭击的重要工程设施。每年台风的风暴潮可能是海堤损坏、而且造成人员伤亡和财产损失的重要原因。因此, 在海堤护岸设计中, 控制平均越浪量的大小是需要考虑的重要内容。

从20世纪起, 国内外就有很多学者对越浪量进行研究。1958年, 美国的 Saville^[1] 基于二维规则波浪水槽试验的大比尺模型试验研究成果, 提出了平均越浪量计算公式; 1965年, 日本 Yuichi Iwagaki 等根据 Saville 的试验资料, 得到水深和波高对越浪量的影响曲线; 1975年, 日本的合田良实^[2] 进行了不规则波越浪量的试验研究; 1980—1991年, 英国的 Owen^[3] 对海堤越浪量进行完整而

系统的研究, 给出了单坡和复坡斜坡堤平均越浪量计算公式; 1992—2002年, 荷兰的 Van der Meer^[4-6] 对海堤越浪量问题做出了大量的试验研究, 提出的越浪量计算公式被许多欧洲国家的海堤设计规范所采用; 1985年, 卢无疆^[7] 研究得到堤前抛石的直立堤上规则波平均越浪量计算方法; 1991年, 余广明等^[8] 通过模型试验, 得到风浪在单坡堤上平均越浪量; 1995年, 贺朝敖等^[9] 通过最小二乘法得到了斜坡堤越浪量计算的公式; 1996年, 王红等^[10] 通过不规则波物理模型试验, 提出了单坡堤上平均越浪量计算方法; 2007年, 李晓亮等^[11] 在不规则波的基础上专门针对斜向和多向波对斜坡堤进行三维模型试验, 给出的平均越浪量

收稿日期: 2015-11-16

*基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目 (201401004); 国家自然科学基金 (51579156); 南京水利科学研究院基金重大项目 (Y214009)

作者简介: 朱嘉玲 (1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为波浪及其建筑。

公式考虑了波向角、方向分布宽度、相对堤顶超高、相对水深及深水波陡等因素。

影响越浪量的因子有很多，主要包括建筑物的结构尺寸、波浪要素、水流作用等。本文通过对比分析国内外现有越浪量公式，进行整体模型试验，重点讨论波浪入射方向与斜坡堤堤顶平均越浪量的关系，并提出在斜向波条件下有胸墙的斜坡堤平均越浪量的计算公式。

1 斜坡堤上平均越浪量的计算方法

对于斜向波入射的斜坡式海堤越浪量问题，我国现行 JTS 145-2—2013 《海港水文规范》^[12] 并没有明确说明，国内外众多学者针对这一问题进行的大量试验研究得到的结构往往差别很大，每个公式都有适用范围。

1.1 李晓亮等拟合得平均越浪量估算公式

李晓亮等^[11] 提出适用于混凝土护面和扭王字块护面斜坡堤上斜向和多向不规则波的平均越浪量估算公式：

$$\frac{QT_p}{H_s^2} = A \left(\gamma_\beta \gamma_b \frac{R_c}{H_s} \right)^B \left[\frac{1.5}{\sqrt{m}} + \tanh \left(\frac{d}{H_s} - 2.8 \right) \right]^2 \ln \sqrt{\frac{m}{S_{op}}} \quad (1)$$

式中： Q 为平均越浪量； H_s 为有效波高； T_p 为谱峰周期； R_c 为堤顶高程； m 为海侧堤面坡比； d 为堤前水深； S_{op} 为按线性波浪理论求得的深水波陡， $S_{op} = \frac{2\pi H_s}{gT_p^2}$ ； A 、 B 为随坡比变化的系数； γ_β 为波向角影响因子； γ_b 为护面结构影响因子。

1.2 Hebsgaard 公式

Hebsgaard 等^[13] 的平均越浪量计算公式为：

$$Q = k_1 \sqrt{gH_s^3} \ln(S_{op}) \exp \left[\frac{k_2 (\cot \alpha)^{0.3} (2R_c + 0.35b)}{\gamma_f H_s \sqrt{\cos \beta}} \right] \quad (2)$$

式中： β 为波向角，即波浪传播方向和堤坝垂直线的夹角，因此当波浪垂直堤坝轴线入射时，波浪入射角 β 为零； γ_f 为护面层糙率影响系数； k_1 、 k_2 为系数，无胸墙时 $k_1 = -0.3$ 、 $k_2 = -1.6$ ，有胸墙时 $k_1 = -0.01$ 、 $k_2 = -1.0$ 。

1.3 Owen 研究方法

Owen^[3] 对于正向入射波浪作用下堤顶平均越浪量得出的公式为：

$$\frac{Q}{T_m g H_s} = A \exp \left[-\frac{B R_c}{T_m (g H_s)^{0.5}} \right] \quad (3)$$

式中： T_m 为海堤堤脚处入射波浪的平均周期； A 、 B 为经验系数，对单坡和带肩台的斜坡堤取值不同。公式的适用范围为 $0.05 < \frac{R_c}{T_m (g H_s)^{0.5}} < 0.30$ 。

式(3)为单向波正向作用下斜坡堤平均越浪量的公式，要考虑斜向波的影响，需将系数 A 、 B 分别乘以波向角修正系数 K_A 、 K_B ^[14]。

1.4 van der meer

1.4.1 越浪公式

van der meer 提出平均越浪量计算公式全部展开如下：

1) 当 $\gamma_b \xi_0 \leq 2$ 时，

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3} \sqrt{\tan \alpha}} = 0.067 \gamma_b \exp \left(\frac{-K_2 R_c \sqrt{S_0}}{H_{m0} \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v \tan \alpha} \right) \quad (4)$$

2) 当 $\gamma_b \xi_0 > 2$ 时，

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.2 \exp \left(\frac{-K_2 R_c}{H_{m0} \gamma_f \gamma_\beta} \right) \quad (5)$$

式中： H_{m0} 为堤脚的典型浪高； ξ_0 为破碎参数， $\xi_0 = \sqrt{\tan \alpha} / \sqrt{S_0}$ ； $\tan \alpha$ 为平均坡度； γ_b 、 γ_f 、 γ_β 、 γ_v 分别为肩台、糙率、波浪入射角、胸墙的影响系数；系数 K_1 、 K_2 试验结果的均值为 $K_1 = 4.75$ 、 $K_2 = 2.6$ ，为安全考虑由均值加标准差作为建议值，即 $K_1 = 4.3$ 、 $K_2 = 2.3$ 。

1.4.2 波浪入射角的影响

长脊波与短脊波入射角对爬高的影响系数计算方法不同。对于长脊波，波浪入射角的影响系数 γ_b 很小，可忽略不计，主要原因是长脊波在波长范围内偏离了传播方向，而对于短脊波，波浪入射角的影响系数如下：

$$\gamma_b = 1 - 0.0033 |\beta| \quad 0^\circ \leq |\beta| \leq 80^\circ \quad (6)$$

$$\gamma_b = 1 - 0.0033 \times 80 \quad |\beta| \geq 80^\circ \quad (7)$$

1.4.3 平台影响系数

平台的宽度一般用 B 来表示, 平台的坡度须在水平和 1:15 之间, 平台的宽度不应超过波长的 1/4。平台对波浪爬高的影响系数为 γ_b , 即

$$\gamma_b = 1 - \frac{B}{L_b} \left[0.5 + 0.5 \cos \left(\pi \frac{d_h}{x} \right) \right] \quad (8)$$

式中: L_b 为平台向上游和下游各自延伸 H_{m0} 高度后得到的水平距离; d_h 为平台中心点到静水线的距离, 当 $-Z_{2\%} \leq d_h < 0$ 时, $x = Z_{2\%}$, 当 $0 \leq d_h < 2H_{m0}$ 时, $x = 2H_{m0}$ 。

1.5 《海港水文规范》方法

我国学者根据模型试验研究, 分别给出了不规则波正向作用时, 斜坡堤在有、无胸墙情况下的平均越浪量计算公式, 其中有胸墙情况下斜坡堤的平均越浪量为:

$$Q = 0.07^{H_c/H_{1/3}} \exp \left(0.5 - \frac{b_1}{2H_{1/3}} \right) BK_A \frac{H_{1/3}^2}{T_p} \cdot \left[\frac{0.3}{\sqrt{m}} + \text{th} \left(\frac{d}{H_{1/3}} - 2.8 \right) \right]^2 \ln \sqrt{\frac{gT_p^2 m}{2\pi H_{1/3}}} \quad (9)$$

式中系数见《海港水文规范》^[12]。

1.6 神经网络法

欧盟 CLASH 项目下建立了一种基于神经网络模型估算不同类型的海岸工程结构物越浪量的预测方法。该方法不仅可以预测平均越浪量, 还可以预测不同置信区间的越浪量。

1.7 各公式中越浪量影响因子对比

1) 上述计算公式中, 斜坡堤越浪量受波浪入射方向的影响都由位于计算公式中的受斜向波影响的因子确定。在 Van der meer 公式中为 γ_b , 在李晓亮公式中为 γ_β , 在 Hebsgaard 公式中为 $\cos\beta$, 在 Owen 公式中为 K_A 、 K_B , 神经网络法中也考虑了波向角 β 的作用。《海港水文规范》不能考虑波向角 β 的影响, 李晓亮公式中波向角系数只有考虑波向角 β 范围为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 的情况, Owen 公式中 A 、 B 的波向角修正系数 K_A 、 K_B 考虑了波向角 β 范围为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的情况。

2) Van der meer 法在波向角 β 较大时计算所得的斜向波无量纲越浪量值比较大。国外规范的

允许越浪量与国内存在差异, 导致计算精度不同。因此, Van der meer 公式用于计算周期大于 10 s 的波浪越浪量更为准确, 更适用于估算英国国内海堤平均海浪量。

3) 李晓亮公式和 Owen 公式仅适用于无胸墙堤。关于护面块体形式, 本文试验、Van der meer 公式和 Hebsgaard 公式为扭王字块体, 李晓亮公式和规范仅给出扭工字块体的成果, 本文参考扭工字块体来取护面结构影响系数。

2 模型试验

2.1 试验条件

模型试验场地为南京水利科学研究院海岸工程试验厅, 水池长 70 m、宽 52 m、深 1.2 m, 港池两侧都配备多向不规则造波机, 该造波机根据计算机自动控制产生所要求模拟的波浪要素。在水池中及两边可布置消能器, 用于吸收波浪能量以防波浪反射。本试验依据《波浪模型试验规程》^[15] 采用 JONSWAP 谱, 波要素通过电阻式波高仪进行测量, 由计算机自动采集和处理。

本次试验中, 测量平均越浪量所用的接水器宽度为 0.2 m, 有效波高 H_s 为 10 cm, 平均周期 T 分别为 1.0、2.0、3.0 s; 波浪入射波角度 β 分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 。为减小试验误差, 需对相同波要素进行至少 3 次试验, 若试验结果相差不大则取其平均值作为最终试验结果, 否则增加试验次数直至有 3 组试验结果接近。共计 81 组试验, 试验断面见图 1。

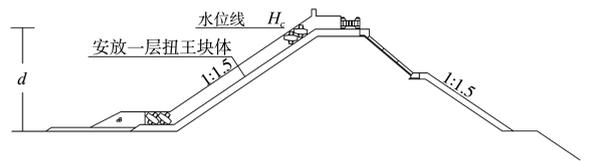


图 1 试验斜坡堤断面

2.2 试验结果分析

根据试验结果处理, 可得无因次越浪量 $Q/\sqrt{gH_s^3}$ 与入射波波陡 H/L 的关系 (图 2)。 $m = 1.5$ 、 $R_c/H_s = 0.8$ 保持不变, 当考虑波向角 β 对平均越

浪量的影响时，保持波陡 H/L 不变；当考虑波陡 H/L 对平均越浪量的影响时，保持波向角 β 不变。

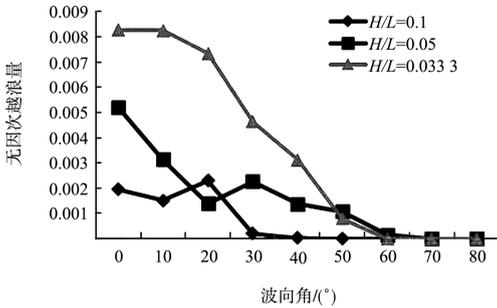


图2 试验结果

1) 斜坡堤上无因次越浪量 $Q/\sqrt{gH_s^3}$ 总体上随波向角 β 的增大而减小。Owen 认为在光滑斜坡堤上，单向波的越浪量在波向角 $\beta < 30^\circ$ 时基本不变，或可能出现比正向入射时更大的值，即所谓“小角度斜向增加”。在本次试验中，在 $H/L=0.1$ 时，波浪出现了“小角度斜向增加”现象，即在波向角 $\beta = 20^\circ$ 时，平均越浪量大于正向波的平均越浪量，增幅 $\leq 20\%$ ；在波向角 $\beta = 20^\circ \sim 80^\circ$ 时，平均越浪量随波向角的增加而减小。

2) 1957年，Perroud^[16] 在研究斜向入射的孤立波与直立式建筑物相互作用时，发现了 stem wave，即浪与直立式建筑以小于 45° 的角入射时，除了入射波与反射波，还有沿直立式建筑物传播的波浪。stem wave 是由波浪的反射和绕射现象产生的，其波高和波宽随着沿直立式建筑物的推进而增大。模型试验中，胸墙对斜向入射的波浪会有波高影响。在 $H/L=0.05$ 时，平均越浪量总体趋势随波向角 β 的增大而减小，在 $\beta = 20^\circ \sim 30^\circ$ 时平均越浪量增大，但并未大于正向波产生的平均越浪量； $H/L=0.0333$ 时，平均越浪量总体趋势随波向角 β 的增大而减小，在波向角 $\beta = 0^\circ \sim 20^\circ$ 时平均越浪量减小速度较缓慢，在波向角 $\beta = 20^\circ \sim 60^\circ$ 时平均越浪量减小速度较迅速。

3) 对于某一波向角来说，平均越浪量总体上随着波陡 H/L 的减小(周期的增大)而增大；反之，随着波浪的 H/L 增大(周期的减小)，平均越浪量明显减小。

3 各公式计算结果与试验结果对比分析

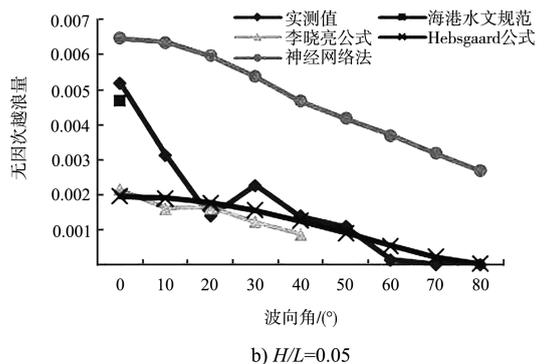
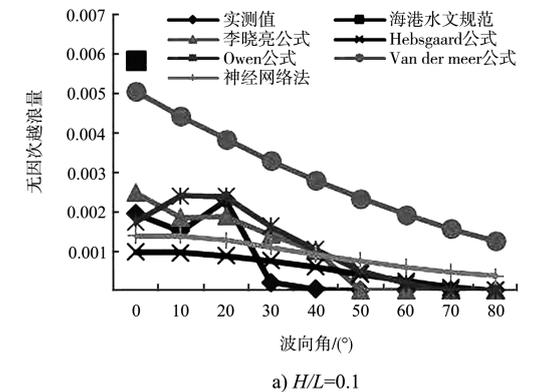
斜坡堤上正向无因次越浪量 $Q/\sqrt{gH_s^3}$ 的计算结果见表1。

表1 斜坡堤上正向无因次越浪量

方法	$H/L=0.1$	$H/L=0.05$	$H/L=0.0333$
试验实测	0.0019	0.0052	0.0083
海港水文规范	0.0058	0.0047	0.0060
李晓亮公式	0.0025	0.0022	0.0017
Hebgsaard公式	0.0010	0.0020	0.0023
Owen公式	0.0017		
Van der meer公式	0.0050		
神经网络法	0.0014	0.0065	0.0111

由表1可以看出，除了海港水文规范和李晓亮公式，上述各方法计算的平均越浪量的变化趋势相同。入射波陡 H/L 越大(周期越小)，平均越浪量越小；波浪入射波陡 H/L 越小(周期越大)，平均越浪量越大。

用上述各种方法计算斜坡堤平均越浪量，对计算结果进行对比分析，可得无因次越浪量 $Q/\sqrt{gH_s^3}$ 随波向角 β 变化的曲线，见图3。



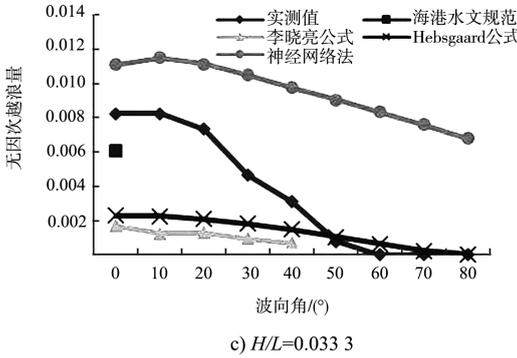


图 3 各公式无因次越浪量比较

当 $H/L=0.05$ 和 $H/L=0.033 3$ 时, Owen 公式和 Van der meer 公式所得结果偏大, 因此不考虑这两个公式。

由图 3 进行对比分析, 可以得出如下结论:

1) 不规则波正向入射, $H/L=0.1$ 时, 实测结果与 Owen 公式计算结果最接近; $H/L=0.05$ 时, 实测结果与《海港水文规范》计算结果最接近; $H/L=0.033 3$ 时, 实测结果与神经网络法计算结果最接近。Van der meer 公式计算结果偏大, Hebsgaard 公式计算结果偏小, 且这两种处理方法在考虑胸墙对越浪量的影响时比较粗略, 会对计算结果造成不同程度影响。

2) 斜向波对斜坡堤越浪量的影响总体上随波向角 β 的增大而减小。随着入射波波陡 H/L 的增大, 李晓亮公式平均越浪量减小, 且计算结果与实测值的偏差增大, 因此李晓亮公式适合小周期不规则波的平均越浪量计算。

3) 随着入射波波陡 H/L 的增大, Owen 公式和 Van der meer 公式所得的平均越浪量增大, 且计算结果与实测值的偏差增大, 因此 Owen 公式更适合平均周期小于 10 s 的不规则波平均越浪量计算。

4) $H/L=0.1$ 和 $H/L=0.05$ 时, 神经网络法计算结果与实测值变化趋势基本相同。波向角 β 越大, 计算值与实测值的偏差就越大, 因此神经网络法更适合波浪波作用时斜坡堤越浪量的计算。

5) 以上介绍的 6 种公式均是通过物理模型试

验得出的经验公式, 《海港水文规范》中只有正向波对斜坡堤越浪量的计算, 其他 5 种公式也都有适用范围和使用限制。本文通过越浪量模型试验对这 6 种现有越浪量公式进行对比分析, 讨论波向角 β 与平均越浪量的关系, 提出改进的 Hebsgaard 公式如下:

$$Q = k_1 \sqrt{gH_s^3} \ln(S_{op}) \exp \left[\frac{k_2 (\cot\alpha)^{0.3} (2R_c + 0.35b)}{\gamma_f H_s \cos\beta} \right] \quad (10)$$

式中: 有胸墙时 $k_1 = -0.037$ 、 $k_2 = -1.0$, 其余系数与 1.2 节相同。

利用式 (10) 计算的无因次越浪量与实测值进行对比, 结果见图 4。由图 4 可知, 平均越浪量计算值与实测值吻合较好, 计算值比实测值略偏大, 公式在不同工况计算中偏安全。

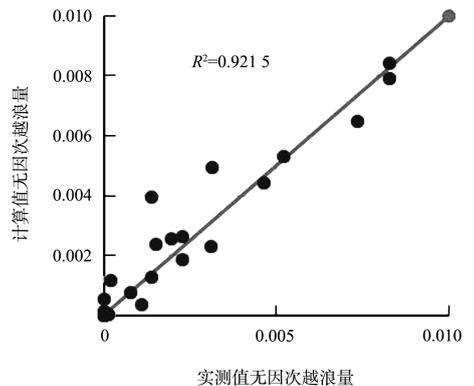


图 4 改进 Hebsgaard 计算值与实测值对比

4 结语

1) 对于某一测点来说, 平均越浪量总体上随着波向角 β 的增大而减小, 在波向角较小时, 也会出现 Owen 提出的“小角度斜向增加”情况。

2) 对于某一波向角来说, 平均越浪量总体上随着波陡 H/L 的减小(周期的增大)而增大。

3) 本文通过整体物理模型试验, 建议采用式 (10) 对斜向波作用下有胸墙的斜坡堤平均越浪量进行计算。本文提出的公式只针对某一断面, 因此建议遇到不同断面时, 采用整体物理模型试验进行分析考虑。

(下转第 18 页)