



# 斜向波对斜坡堤胸墙波浪力的折减效应研究

张志鹏, 王超, 方波

(中交第四航务工程勘测设计院有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 总结对比了国内外现有斜向波作用下直立堤和斜坡堤胸墙波浪力折减计算方法。以北非某港口新建斜坡堤为例进行计算, 并与二维、三维物理模型试验结果对比验证。结果表明: 波向角呈  $30^\circ$  作用于斜坡堤时, van Gent 公式计算的单位堤长波浪力折减系数与实测值最接近, 各直立堤单位堤长波浪力折减公式对斜坡堤胸墙计算整体偏保守; Mares-Nasarre 公式计算的总波浪力纵向折减系数与实测值整体吻合较好, 但未考虑水平力与浮托力的折减效应差异, 与试验结果仍存在一定偏差; 李玉成等的直立堤总波浪力纵向折减公式不适用本斜坡堤胸墙算例。研究成果可为类似港口工程提供参考。

**关键词:** 斜坡堤胸墙; 斜向波; 单位堤长波浪力折减系数; 总波浪力纵向折减系数

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0016-05

## Reduction effect of oblique wave attacks on crest wall wave force of rubble mound breakwaters

ZHANG Zhipeng, WANG Chao, FANG Bo

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** This paper summarizes and compares the existing formulas for the wave force reduction of crest walls on vertical breakwaters and rubble mound breakwaters under oblique wave attacks. The paper takes a new rubble mound breakwater of a port in North Africa as an example and compares the calculation results with the results of two-dimensional and three-dimensional physical model tests. The results show that for rubble mound breakwaters under oblique wave attack of  $30^\circ$ , the unit-length reduction coefficient of wave force calculated by van Gent formula fits best with the measured value, and the unit-length wave force reduction formula of each vertical breakwater is conservative in the calculation of crest wall on rubble mound breakwaters. The longitudinal reduction coefficient of total wave force calculated by Mares-Nasarre formula is in good agreement with the measured value, but the difference in reduction effects between horizontal and uplift forces is not considered, and there is still some deviation from the experimental results. The longitudinal reduction formula of the total wave force of the vertical breakwater proposed by LI Yucheng et al. is not applicable to the calculation of the crest wall on rubble mound breakwaters. The research can provide a reference for similar port projects.

**Keywords:** crest wall on rubble mound breakwater; oblique wave; unit-length reduction coefficient; longitudinal reduction coefficient of total wave force

斜坡堤堤顶常设置胸墙以减少土石方用量或预留堤顶通道。堤顶胸墙的主要外部荷载为波浪力, 工程实际中, 波浪常常斜向作用于堤身, 与正向波相比, 斜向波波峰面对胸墙的冲击效应有所降低,

且沿胸墙传播时存在明显的相位差(图 1), 波浪力空间分布不均匀, 对胸墙迎浪面的冲击力局限在一定长度范围, 导致斜向波作用下的胸墙结构总波浪力大大降低。目前国内外关于斜向波对斜坡

收稿日期: 2022-11-20

作者简介: 张志鹏 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口工程设计工作。

堤胸墙波浪力折减的研究甚少, 我国现行 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》<sup>[1]</sup>(简称“国标”)未作明确规定, 且国内尚无定量公式研究成果供工程应用。传统设计中忽略斜向波的折减效应, 按正向波计算胸墙波浪力, 进而开展胸墙结构设计明显偏保守。



图 1 斜向波沿堤身传播的相位差现象

国内外学者对斜向波作用下波浪力折减的研究主要针对直立堤, 合田良石提出的直立堤单位堤长波浪力公式中考虑了波向角修正系数  $\gamma_1$ , 并为日标 OCDI<sup>[2]</sup>和国标所采用。俞聿修等<sup>[3]</sup>研究发现, 相位差的存在使得最大波浪力并不同时出现在整段直立堤, 且作用在较长结构段上的总波浪力随波向角  $\beta$ (波向线与斜坡堤纵轴线法线的夹角)的增大而明显减小, 并提出了总波浪力纵向折减系数  $\gamma_2$ ; 通过大量试验发现,  $\gamma_2$  主要取决于波向角  $\beta$  和直立堤结构段相对堤长  $L_c/L_p$ ( $L_c$  为结构段长度,  $L_p$  为对应谱峰周期的波长)。李玉成等<sup>[4]</sup>通过试验研究斜向波作用下, 长峰不规则波和方向波谱对直立堤的影响, 提出了“改进的合田良石公式”和总波浪力纵向折减公式。

对于斜向波作用下斜坡堤胸墙波浪力的折减计算方法研究则相对较少, 目前国内尚无定量公式研究成果供工程应用。国外 van Gent 等<sup>[5]</sup>对不同波向角作用下的斜坡堤胸墙波浪力折减进行了大量试验研究, 得出具有一定适用范围的单位堤长波浪力折减(即波向角修正)计算公式; Mares-Nasarre 等<sup>[6]</sup>以胸墙结构段为单位, 提出了斜坡堤胸墙总波浪力纵向折减计算公式。此外, 沈雨生等<sup>[7]</sup>的研究表明, 波向角  $\beta$  越大, 波浪沿斜坡堤传播的相位差越大, 胸墙所受的波浪总水平力和总浮托力越小, 且浮托力的折减程度一般大于水平力, 但并未给出推荐定量公式。

本文总结和对比了国内外斜向波作用下直立堤和斜坡堤胸墙波浪力的折减计算方法, 结合北非某新建斜坡堤物模试验结果, 得出了  $30^\circ$  波向角作用下, 斜坡堤胸墙波浪力的推荐折减计算方法, 研究成果可为类似工程提供参考。

## 1 计算方法

作用于某一胸墙结构段上的斜向波总波浪力  $F_{\text{total}}$  等于单位堤长(每延米)斜向波浪力  $F_\beta$ 、结构段长度  $L_c$  和总波浪力纵向折减系数  $\gamma_2$  三者的乘积。其中, 单位堤长斜向波浪力  $F_\beta$  等于同等波浪要素下的正向波浪力  $F_\perp$  与单位堤长波浪力折减系数  $\gamma_1$  的乘积。由于试验条件、研究对象等的不同, 国内外学者提出的计算公式及适用性存在差异。

### 1.1 直立堤单位堤长波浪力折减计算公式

直立堤的单位堤长波浪力随波向角  $\beta$  增大而减小, 一般按下式进行折减:

$$\gamma_1 = (1 + \cos^n \beta) / 2 \quad (1)$$

式中:  $\beta$  为斜向波波向角。 $n$  的取值, 合田良石建议取 1, 我国《海港工程设计手册》<sup>[8]</sup>建议取 0.5。李玉成建议当计算水平波浪力时,  $n$  取 1; 当计算浮托力时,  $n$  取 1.52。

### 1.2 直立堤总波浪力纵向折减计算公式

李玉成等研究发现, 直立堤结构段总波浪力的纵向折减系数  $\gamma_2$  与结构段长度和波长之比  $l/L$  呈线性相关, 且相关性不受波浪要素影响, 提出的斜向不规则波的水平力和浮托力纵向折减系数分别为:

$$\text{水平力: } \gamma_{2h} = -1.67 \left( \frac{l}{L} \sin \beta \right) + 1 \quad (2)$$

$$\text{浮托力: } \gamma_{2v} = -0.99 \left( \frac{l}{L} \sin \beta \right) + 1 \quad (3)$$

式中:  $\beta$  为斜向波入射角;  $l$  为直立堤结构段长度;  $L$  为波长。

### 1.3 斜坡堤胸墙单位堤长波浪力折减计算公式

van Gent 等基于大量物模试验, 通过折减波浪爬高, 提出了斜向波作用下的斜坡堤胸墙单位堤长波浪力计算公式:

$$\text{水平力: } F_{H\perp} = c_{F,H} \rho g H_{\text{wall}} (Z_{2\% \perp} - A_c) \quad (4)$$

浮托力：

$$F_{v\perp} = c_{F,v}\rho g B_{wall}(Z_{2\% \perp} - A_c) \left[ 1 - \left( \frac{F_b}{A_c} \right)^{c_{F,b}} \right] \quad (5)$$

单位堤长波浪力折减系数：

$$\gamma_\beta = \gamma_1 F_\perp \quad (6)$$

$$\text{其中: } \gamma_1 = \frac{Z_{2\% \beta} - \gamma_A A_c}{Z_{2\% \perp} - \gamma_A A_c} = \frac{\gamma_\beta Z_{2\% \perp} - \gamma_A A_c}{Z_{2\% \perp} - \gamma_A A_c} \quad (7)$$

式中： $\rho$  为海水密度； $g$  为重力加速度； $H_{wall}$  为胸墙高度； $B_{wall}$  为胸墙底宽； $A_c$  为墙前护面顶距离静水面高差； $F_b$  为胸墙底距离静水面高差； $Z_{2\%}$  为累计频率 2% 的波浪爬高； $c_{F,H}=1$ ； $c_{F,b}=0.5$ ；当胸墙底水平时 $c_{F,v}=0.4$ ，胸墙底带插入楔时 $c_{F,v}=0.35$ ；当计算水平力折减时 $\gamma_A=1$ ，浮托力折减时 $\gamma_A=0.75$ ；波浪爬高折减系数 $\gamma_\beta=0.5 \cos^2 \beta + 0.5$ ；公式适用 $0.26 \leq (R_c - A_c)/H_s \leq 0.77$ 、 $1.27 \leq R_c/A_c \leq 1.55$ 、 $0.79 \leq R_c/H_s \leq 2.18$ （其中 $H_s$  为堤脚有效波高， $R_c$  为相对堤顶高程）。

#### 1.4 斜坡堤胸墙总波浪力纵向折减系数

Mares-Nasarr 等通过试验研究了斜向波作用下胸墙波浪力的纵向分布特点，基于最大波浪力 $F_{0.1\%}$ 的传播距离 $w_f$ 与胸墙结构段长度 $L_c$ 的相对大小关系，提出的胸墙总波浪力计算图示见图 2，总波浪力纵向折减系数计算公式如式(8)(9)：

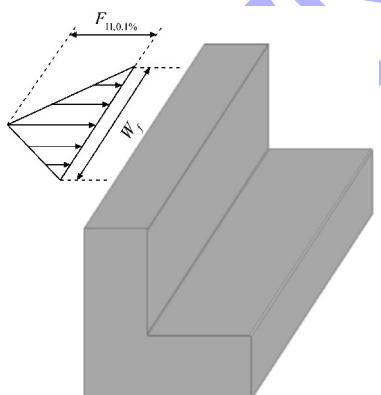


图 2 胸墙总波浪力纵向折减计算图示

当 $L_c \geq w_f$  时：

$$\gamma_2 = 0.24 \frac{\sqrt{H_{wall}} \gamma_\beta (R_{u2\%} - A_c)}{L_c H_s^{0.5} \sin^{1.2} \beta s_{m-1,0}^{0.3}} \quad (8)$$

当 $L_c < w_f$  时：

$$\gamma_2 = 6.5 \left( \frac{A_c}{H_s} \right)^2 \left[ \frac{(\gamma_\beta R_{u2\%} - A_c)}{L_c} \right]^{0.65} \quad (9)$$

式中： $L_c$  为胸墙结构段长度； $w_f$  为累计频率 0.1% 的最大波浪力传播距离； $H_s$  为有效波高； $s_{m-1,0}$  为波陡； $R_{u2\%}$  为累计频率 2% 的波浪爬高。公式适用 $15^\circ \leq \beta \leq 75^\circ$ 、 $0.541 \leq A_c/H_s \leq 1.102$ 、 $0 \leq (\gamma_\beta R_{u2\%} - A_c)/L_c \leq 0.045$ 。

#### 1.5 小结

1) 学者提出的直立堤单位堤长波浪力折减公式基本一致，仅系数取值略有差异，其折减程度依次为：《海港工程设计手册》公式<合田良石公式≤李玉成公式，其中李玉成公式对浮托力的折减程度大于水平力。

2) 李玉成提出的直立堤总波浪力纵向折减公式对水平力的折减程度大于浮托力，且折减系数不受波浪要素影响。

3) van Gent 公式通过折减波浪爬高计算斜向波作用下的斜坡堤胸墙单位堤长波浪力，公式对浮托力的折减程度小于水平力。

4) Mares-Nasarre 公式根据最大波浪力传播距离与胸墙结构段长度的相对大小关系，提出了不同的斜坡堤胸墙总波浪力纵向折减公式，公式对水平力和浮托力的折减程度无异。

## 2 案例分析

### 2.1 项目概况

案例依托于北非某大型油气港扩建项目新建东防波堤，总长 876 m，项目总平面和典型断面见图 3、4；堤心采用 1~1 000 kg 开山石，内外坡分别采用 3 和 10 m<sup>3</sup> Accropode<sup>TM</sup> 作护面，胸墙顶高程 9.0 m，肩台宽 6.03 m。断面所处位置设计主浪向为 N+11.25°，波向角 $\beta$  为 30°，250 a 重现期的波浪要素见表 1。项目分别在二维和三维物理模型试验中测量了胸墙波浪力，波压测点布置见图 5，试验比尺分别为 1:30 和 1:68.9，模型符合 Froude 相似准则；同时在开展三维试验时，在一胸墙结构段（原型长度 $L=30.5$  m）布置 5 组波压测点（图 6），分析测点波压数据，研究斜向波对胸墙总波浪力的纵向折减效应。

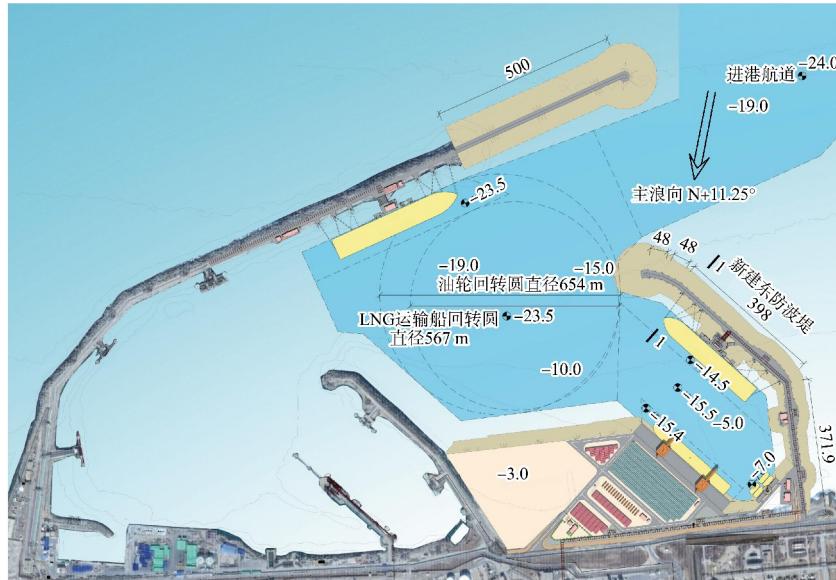


图3 项目总平面

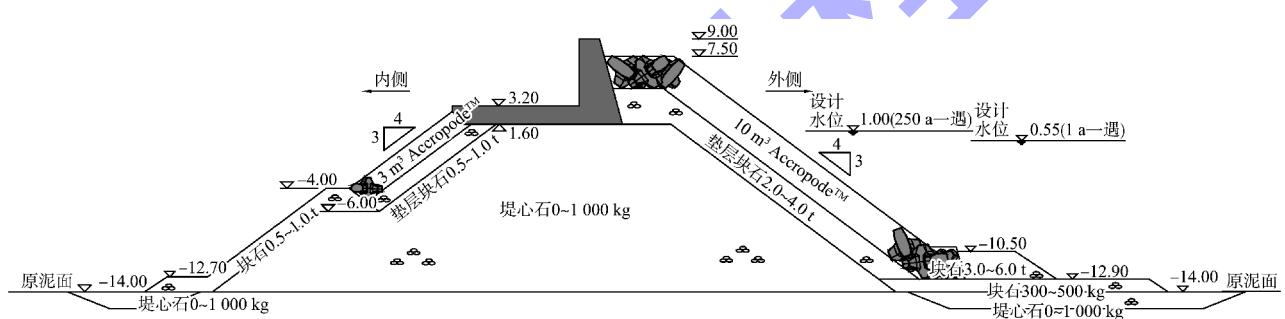


图4 1-1 典型设计断面 (单位: m)

表1 设计波浪要素

重现期/a	设计高水位/m	波向角 $\beta/(^{\circ})$	有效波高 $H_{\text{mo}}/\text{m}$	谱峰周期 $T_p/\text{s}$
250	1.0	30	7.5	15.5

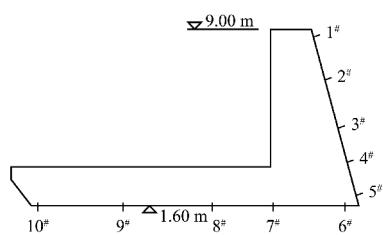


图5 二维和三维物模试验断面波浪力测点布置

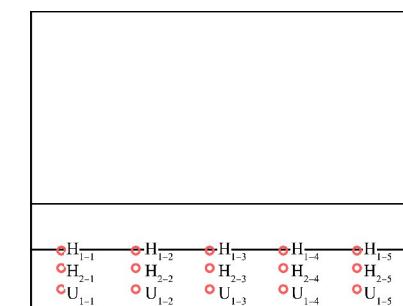
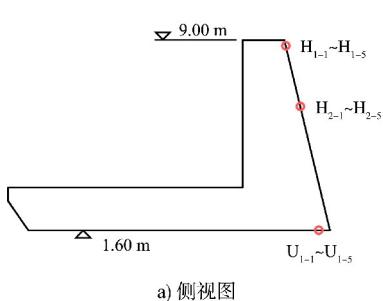


图6 三维物模试验纵向波浪力测点布置

## 2.2 计算结果对比与分析

### 2.2.1 单位堤长波浪力折减系数 $\gamma_1$

二维和三维物模试验实测最大单位堤长波浪力及折减系数结果见表2; 直立堤单位堤长折减系数公式与斜坡堤胸墙单位堤长折减系数公式的计算结果见表3。对比表2、3可知, 与实测单位堤长波浪力折减系数相比, van Gent 公式的计算值

最为接近,且折减程度较实测值大;直立堤计算公式的折减程度普遍偏小。同时,本算例单位堤长水平力的实测波浪力折减系数小于浮托力,与 van Gent 公式相吻合。

表 3 单位堤长波浪力折减系数与偏差计算

公式	适用结构	水平力 $n$ 取值	$\gamma_1$ 计算	$\frac{\gamma_1 \text{计算} - \gamma_1 \text{实测}}{\gamma_1 \text{实测}} / \%$	浮托力 $n$ 取值	$\gamma_1$ 计算	$\frac{\gamma_1 \text{计算} - \gamma_1 \text{实测}}{\gamma_1 \text{实测}} / \%$
合田良石公式		1.0	0.93	15	1.00	0.93	12
《海港工程设计手册》公式	直立堤	0.5	0.97	19	0.50	0.97	16
李玉成公式		1.0	0.93	15	1.52	0.90	8
van Gent 公式	斜坡堤胸墙	-	0.73	-10	-	0.79	-5

### 2.2.2 总波浪力纵向折减系数 $\gamma_2$

由表 4 可知, Mares-Nasarre 公式的计算结果与实测总波浪力纵向折减系数较为贴近,李玉成

表 2 实测波浪力与单位堤长波浪力折减系数

波浪力	二维断面试验 实测值/(kN·m <sup>-1</sup> )	三维整体试验 实测值/(kN·m <sup>-1</sup> )	实测单位堤长波浪 力折减系数 $\gamma_1$ 实测
水平力	397	323	0.81
浮托力	317	264	0.83

公式计算结果严重偏离实测值,不适用本案例。本案例实测的水平总波浪力纵向折减系数与浮托力存在一定差异,与 Mares-Nasarre 公式结论不同。

表 4 总波浪力纵向折减系数与偏差

公式	适用结构	水平力 $\gamma_2$ 计算	水平力 $\gamma_2$ 实测	$\frac{\gamma_2 \text{计算} - \gamma_2 \text{实测}}{\gamma_2 \text{实测}} / \%$	浮托力 $\gamma_2$ 计算	浮托力 $\gamma_2$ 实测	$\frac{\gamma_2 \text{计算} - \gamma_2 \text{实测}}{\gamma_2 \text{实测}} / \%$
李玉成公式	直立堤	-3.11(不适用)	0.69	-	-1.43(不适用)	0.77	-
Mares-Nasarre 公式	斜坡堤胸墙	0.66	0.59	12	0.66	0.70	-6

## 3 结语

1) 对波浪斜向作用的斜坡堤堤顶胸墙,可在设计时考虑斜向波对单位堤长波浪力和胸墙结构段总波浪力的纵向折减效应,进而在一定程度上优化堤顶结构,提升设计方案的整体竞争力、降低项目成本。

2) 对比上述公式并结合本算例,当波向角为 30°时,van Gent 公式计算的单位堤长波浪力折减系数与实测值最为接近但略偏冒进。本案例中单位堤长水平力的实测波浪力折减系数小于浮托力,与 van Gent 公式相吻合。Mares-Nasarre 公式计算的总波浪力纵向折减系数与实测值整体吻合较好、但未考虑水平力与浮托力的折减效应差异,与试验结果仍存在一定偏差。

3) 当波向角为 30°时,合田良石、《海岸工程设计手册》及李玉成等提出的直立堤单位堤长波浪力折减公式整体偏保守,不建议直接运用到斜坡堤胸墙波浪力计算中。李玉成等提出的直立堤总波浪力纵向折减计算公式不适用本斜坡堤胸墙算例。

4) 本文受限于特定项目的波浪要素和试验断面,在不同波向角作用下,不同护面块体、不同结构段长度对斜坡堤胸墙波浪力折减效应的“定量”影响有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [2] The overseas coastal area development institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan [S]. Tokyo: OCDI, 2020.
- [3] 俞聿修, 李本霞, 张宁川, 等. 斜向和多向不规则波作用于直墙堤上的波浪荷载 [J]. 水运工程, 2011 (1): 24-28.
- [4] 李玉成, 孙昭晨, 董国海, 等. 斜向不规则波对直墙作用的实验研究 [J]. 海洋工程, 2002, 20(1): 57-63.
- [5] VAN GENT M R A, VAN DER WERF I M. Influence of oblique wave attack on wave overtopping and forces on rubble mound breakwater crest walls [J]. Coastal engineering, 2019, 151: 78-96.
- [6] MARES-NASARRE P, VAN GENT M R A. Oblique wave attack on rubble mound breakwater crest walls of finite length [J]. Water, 2020, 12(2): 353.
- [7] 沈雨生, 孙忠滨, 周益人. 斜向波浪对斜坡堤胸墙作用力的试验研究 [J]. 水运工程, 2018(1): 35-40.
- [8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港工程设计手册 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社. 2018.

(本文编辑 赵娟)