



斜向波作用下斜坡堤平均越浪量的折减效应

王超, 方波, 张志鹏, 戈浩波

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 总结对比了国内外现有斜向波作用下斜坡堤平均越浪量计算方法, 以北非某港口新建斜坡堤为例, 计算并与3D物理模型试验结果对比验证。结果表明: 波向角在 $0^\circ\sim 20^\circ$, 斜向波对平均越浪量的折减效应较不明显, 设计可按正向波考虑; 波向角大于 20° , 折减效应逐渐显著, 宜考虑折减效应。对于波向角为 30° 、AccropodeTM作护面的斜坡堤, 神经网络法和van Gent公式(组合2)计算结果贴近试验值; Galland、van der Meer和van Gent公式(组合1)结果相近且偏小; 国标公式计算结果偏保守; Lykke公式偏冒险, 不建议采用。

关键词: 斜坡堤; 斜向波; 波向角; 平均越浪量; 折减效应

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0024-05

Reduction effect of oblique wave attack on average overtopping volume of mound breakwaters

WANG Chao, FANG Bo, ZHANG Zhi-peng, GE Hao-bo

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

Abstract: This paper summarizes and compares the existing calculation methods for the average overtopping volume of mound breakwaters under oblique wave attack both at home and abroad. Taking a new mound breakwater of a port in North Africa as an example, we calculate the average overtopping volume and compare it with the result of a 3D physical model test. The results show that when the wave attack angle ranges from 0° to 20° , the reduction effect of oblique waves on the average overtopping volume is insignificant, and they can be considered perpendicular waves in design; when the wave attack angle is greater than 20° , the reduction effect is gradually significant, which should be taken into account. For AccropodeTM armored mound breakwaters with a wave attack angle of 30° , the calculation results of the neural network method and van Gent formula(Combination 2) are close to those of the physical model test, and the results of the Galland formula, van der Meer formula, and van Gent formula(Combination 1) are similar and relatively small. The calculation results by Chinese standards are conservative; the Lykke formula is risky, and thus it is not recommended.

Keywords: mound breakwater; oblique waves; wave attack angle; average overtopping volume; reduction effect

斜坡式防波堤是港口工程中应用广泛的一种结构形式, 平均越浪量是确定斜坡堤堤顶高程和上部结构形式的重要依据。在实际工程中, 波浪往往斜向作用于堤身, 针对斜向波作用下平均越浪量的折减效应, 我国现行JTS 145—2015《港口

与航道水文规范》^[1]未作明确说明, 国内传统的设计方法忽略了斜向波的折减效应, 按正向波计算平均越浪量, 进而确定堤顶高程并开展堤顶结构设计, 虽然在一定程度上增加了结构安全富余度, 但大大降低了方案经济性和竞争力。

自20世纪90年代起, 国内外学者针对斜向波作用下斜坡堤平均越浪量开展了大量研究, 分别提出具有一定适用范围的计算公式。Owen^[2]分别对有无肩台的斜坡堤越浪量进行研究, 首次提出斜向波的波向角修正系数; Galland^[3]提出块石和常见人工块体的平均越浪量折减系数表达式, 为斜向波的影响研究奠定了重要基础; van der Meer等^[4]分别研究了长峰波和短峰波斜向波对平均越浪量的影响, 提出的平均越浪量公式和斜向波折减公式为欧洲多数国家堤防设计规范所采用; van Gent^[5]从能量折减的角度, 通过对块石护面斜坡堤的大量试验研究, 拟合出新的平均越浪量公式和斜向波折减公式; Owen、Galland、朱嘉玲等^[6]的研究还发现: 当波向角 β (浪向与堤身法线夹角)较小时, 平均越浪量基本不变, 甚至在特定情况下出现“小角度下斜向越浪增加”的现象, 当 β 较大时, 平均越浪量随角度增大显著减小。

本文总结和对比国内外斜向波作用下斜坡堤的平均越浪量折减计算方法, 结合北非某项目的新建斜坡堤3D整体物理模型试验结果, 给出30°波向角作用下斜坡堤平均越浪量的推荐计算方法。

1 斜向波作用下的平均越浪量计算方法

1.1 我国现行规范

JTS 145—2015《港口与航道水文规范》(简称《规范》)给出了堤顶有胸墙的斜坡堤在正向波作用时的平均越浪量的计算公式:

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

式中: Q 为单位时间单位堤宽的越浪量, 即平均越浪量 [$\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$]; K_A 为护面结构影响系数; $H_{1/3}$ 为有效波高; T_p 为谱峰周期 (s); H'_e 为胸墙墙顶在静水面以上的高度 (m); m 为斜坡坡度系数; d 为堤前水深 (m); b_1 为胸墙前肩度 (m); B 为与

m 有关的经验系数。公式适用范围详见《规范》10.2.4.3节。

式(1)考虑了波浪要素、堤顶超高、护面结构形式、水深、坡度及胸墙前肩宽等对平均越浪量的影响, 但没有考虑斜向波的折减效应。

1.2 van der Meer公式

van der Meer提出的平均越浪量公式为:

若 $\gamma_b \xi_0 \leq 2$, 则:

$$\frac{q}{\sqrt{g H_s^3} \sqrt{\tan \alpha}} = 0.067 \gamma_b \exp \left(-\frac{K_2 R_c \sqrt{S_0}}{\gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v H_s \tan \alpha} \right) \quad (2)$$

若 $\gamma_b \xi_0 > 2$, 则:

$$\frac{q}{\sqrt{g H_s^3}} = 0.2 \exp \left(-\frac{K_2 R_c}{\gamma_f \gamma_\beta H_s} \right) \quad (3)$$

式中: q 为平均越浪量 [$\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$]; H_s 为堤脚有效波高 (m); S_0 为波陡; $\tan \alpha$ 为斜坡堤坡度; ξ_0 为波浪破碎系数; γ_b 、 γ_f 、 γ_β 、 γ_v 分别为肩台、块体糙率、波浪入射角、胸墙的影响系数; 系数 K_1 、 K_2 试验结果均值, 分别为 4.75 和 2.60; R_c 为相对堤顶高程。

针对堤心不透水的块石护面斜坡堤, van der Meer 通过物模试验分别研究了长峰波和短峰波对斜坡堤平均越浪量的折减, 得出了折减系数公式:

1) 长峰波:

$$\begin{cases} \gamma_\beta = 1 & (0^\circ \leq \beta \leq 10^\circ) \\ \gamma_\beta = \cos^2(\beta - 10^\circ) & (10^\circ \leq \beta \leq 50^\circ) \\ \gamma_\beta = 0.6 & (\beta > 50^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

2) 短峰波:

$$\begin{cases} \gamma_\beta = 1 - 0.0033\beta & (\beta \leq 80^\circ) \\ \gamma_\beta = 0.736 & (\beta > 80^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

式中: β 为波向角 ($^\circ$), 即波向线与斜坡堤纵轴线法线的夹角。

1.3 Galland公式

Galland 通过大量物理模型试验得出: 斜向波折减本质上是对波高的折减, 并受块体类型的影响, 斜向波作用下的等效正向波高为 $H_s \cos \beta^x$, 并给出了波向角 $0^\circ \sim 75^\circ$ 范围内长峰波斜向波对块石、AccropodeTM、Antifer 和 Tetrapode 作护面的斜坡堤(堤心透水)平均越浪量折减系数公式:

$$\gamma_\beta = \cos \beta^x \quad (0^\circ \leq \beta \leq 75^\circ) \quad (6)$$

式中: 斜向波影响因子 x 取值为: 块石 1/3、AccropodeTM 3/4、Antifer 1.0、Tetrapode 0.6。

1.4 Lykke 公式

Lykke^[7]在 van der Meer 公式的基础上, 研究了堤心透水斜坡堤在波向角 0°~60°范围的平均越浪量, 并给出了斜向波作用下斜坡堤平均越浪量折减系数公式:

1) 长峰波:

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0077\beta \quad (\beta \leq 60^\circ) \quad (7)$$

2) 短峰波:

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0058\beta \quad (\beta \leq 60^\circ) \quad (8)$$

1.5 van Gent 公式

van Gent 等^[8]认为斜向波对斜坡堤冲击效应的折减本质上是波浪能量 E 的折减, 与波高 H 呈二次关系, 即波能由 $1/8\rho g H^2$ 折减为 $1/8\rho g H^2 \cos^2 \beta$ 。通过对块石护面斜坡堤(堤心透水)的大量试验研究, 从能量折减角度提出的平均越浪量和斜向波折减系数公式:

$$\frac{q}{\sqrt{g H_s^3}} = a \exp \left[-\frac{b}{\gamma_f \gamma_\beta} \left(\frac{R_c}{H_s} \right)^c \right] \quad (9)$$

$$\gamma_\beta = \frac{\ln q_\perp}{\ln q_\beta} = 0.65 \cos^2 \beta + 0.35 \quad (10)$$

式中: q_\perp 和 q_β 分别为正向波和斜向波作用下的堤顶平均越浪量; 根据试验数据, 系数 a 、 b 、 c 分别可取 0.20、2.06、1.00(组合 1)或 0.09、1.65、1.30(组合 2), 2 个组合的计算结果均与试验结果高度拟合。

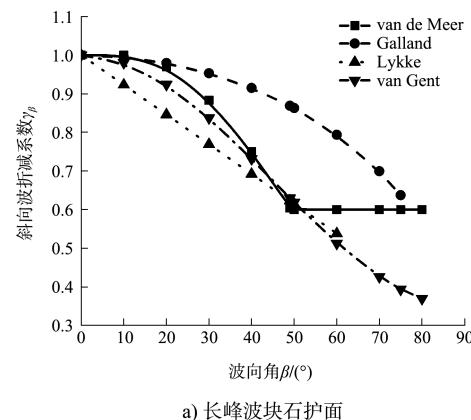
1.6 神经网络法

欧盟 Clash 项目基于 1.5 万组物理模型试验, 建立了基于神经网络模型计算海岸防浪建筑平均越浪量和单波最大越浪量的预测方法, 计算时需要输入结构外轮廓、波况、水位等信息^[9]。对于斜向波, 该方法通过输入波向角 β 实现越浪量的折减。

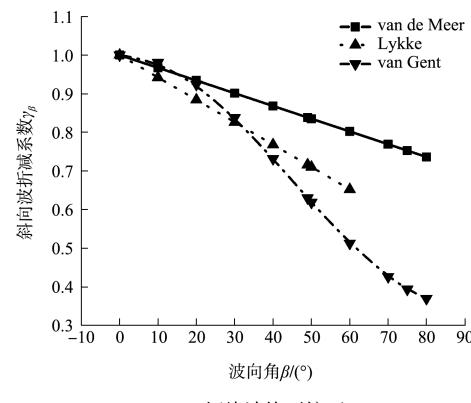
1.7 计算方法对比

上述计算公式中, 我国现行《规范》无法考虑斜向波作用下的平均越浪量折减; 其余公式对波

向性、波向角范围、护面类型、堤芯透水性等的适用性存在一定差异, 综合对比如图 1。可以看出: 1)当波向角 β 在 0°~20°范围, 除 Lykke 公式外, 其它公式的平均越浪量折减系数均大于 0.9, 斜向波折减效应较不明显; 当 β 大于 20°时, 折减效应逐渐显著, 见图 1a)。2)对于长峰波作用下的块石护面斜坡堤, Galland 公式计算的折减效应最小, Lykke 公式最大, van der Meer 认为 β 大于 50°时, 折减效应不再发展; 对于短峰波作用下的块石护面斜坡堤, 当 β 小于 20°时, van der Meer 公式和 van Gent 公式折减效应基本一致, Lykke 公式较大; 当 β 大于 20°时, van Gent 公式折减效应显著增大; 当 β 大于 70°时, van Gent 公式的折减效应发展趋缓, 见图 1b)。3)仅 Galland 对斜向波作用下块石和几种常见人工块体的平均越浪量折减效应进行了对比研究, 结果表明: 斜向波对人工块体护面的平均越浪量折减效应大于块石, 折减程度依次为: Antifer > AccropodeTM > Tetrapode > 块石, 见图 1c)。



a) 长峰波块石护面



b) 短峰波块石护面

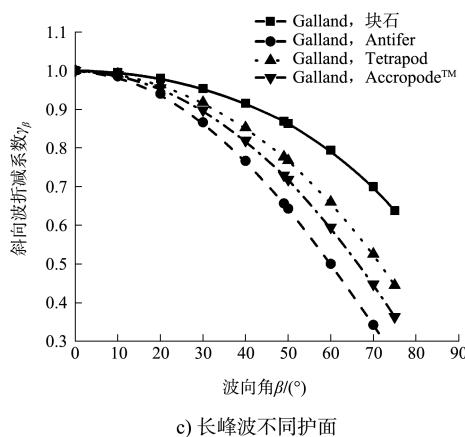


图 1 斜坡堤的折减系数

2 案例分析

2.1 工程概况

算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 2、3。堤心采用 1~1 000 kg 开山石，内外坡分别采用 3、10 m³ 的 AccropodeTM 作护面，胸墙顶高程 9.00 m，肩台宽 6.03 m。断面所处位置设计主浪向为 11.25°N，波向角 β 为 30°，1 a 和 250 a 重

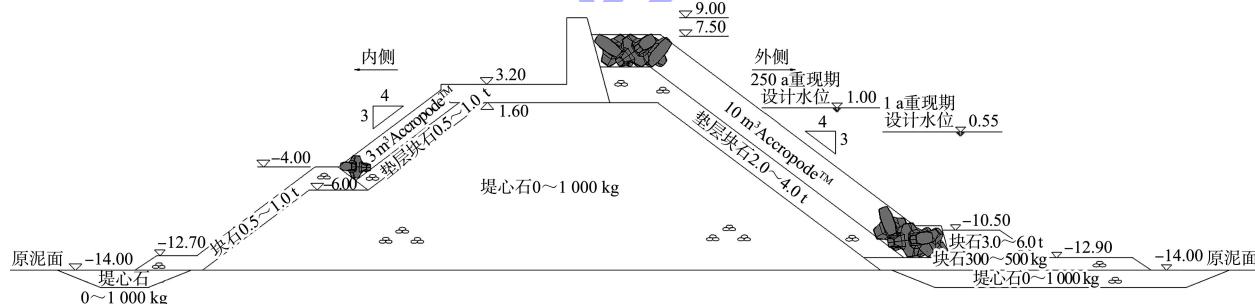


图 3 设计典型断面 (单位: m)

2.2 计算与试验结果对比

根据上述不同公式计算的平均越浪量和试验实测值见表 2。

表 2 平均越浪量计算值与实测值

计算方法	γ_β	平均越浪量/($L \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)	
		计算值	实测值
《规范》	1.000	0.900	525.00
van Der Meer	0.901	0.019	42.75
Galland	0.898	0.018	41.74
Lykke	0.826	0.004	23.37
van Gent 组合 1	0.838	0.085	42.89
van Gent 组合 2	0.838	0.040	54.94
神经网络法	-	0.063	60.10
3D 试验实测值	-	0.052	70.20

现期的波浪要素见表 1, 项目要求 1 a 和 250 a 重现期的平均越浪量分别小于 1、100 L/(m·s)。本项目开展了 3D 整体物理模型试验, 试验比尺为 1:68.9, 模型符合 Froude 相似准则。

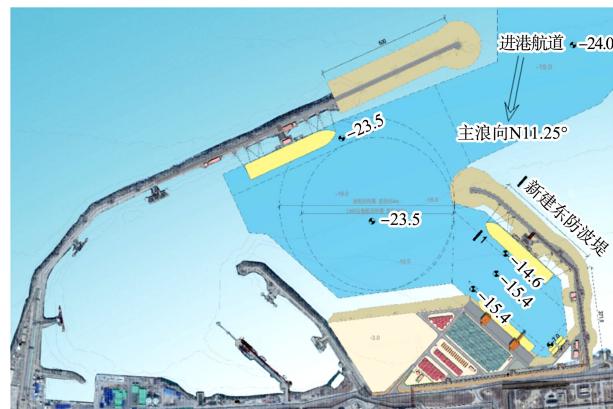


图 2 项目总平面 (高程: m)

表 1 设计波浪要素

波浪要素	重现期/	设计高	波向角	有效波高	谱峰周期
	a	水位/m	$\beta/(^\circ)$	H_{mo}/m	T_p/s
3D 物模试验	1	0.55	30	4.1	13.5
	250	1.00	30	7.5	15.5

由表 2 可知, 与 3D 物理模型试验结果相比, 神经网络法的平均越浪量计算结果最为接近, 其次为 van Gent 公式(组合 2); Galland、van der Meer 和 van Gent 公式(组合 1)计算结果相近且偏小; 国标公式由于未考虑斜向波的折减且其适用条件具有局限性, 计算结果显著偏大; Lykke 公式计算结果最小, 且偏离试验值较多。

3 结语

1) 对于波浪斜向作用的斜坡堤, 可在设计时考虑斜向波对平均越浪量的折减效应, 进而在一

定程度上优化堤顶高程及堤顶结构形式, 提升设计方案的整体竞争力、降低项目成本。

2) 对比斜坡堤平均越浪量计算公式可知, 当波向角 β 小于 20° 时, 除 Lykke 公式外, 其它公式对平均越浪量的折减系数均大于 0.9, 斜向波折减效应较不明显, 设计中可按正向波考虑; 当 β 大于 20° 时, 折减效应逐渐显著, 可根据实际情况考虑斜向波的折减效应。

3) Galland 公式计算表明, 斜向波对常见几种人工护面块体斜坡堤的平均越浪量折减效应均大于块石, 折减程度依次为: Antifer>AccropodeTM>Tetrapode>块石。

4) 结合依托项目经验得出, 当波向角为 30° 时, 推荐采用神经网络法计算斜坡堤平均越浪量, 亦可与 van Gent 公式(组合 2)计算对比后选用较为保守的结果; 实施阶段再通过模型试验进行验证和修正。Galland 公式、van der Meer 公式和 van Gent 公式(组合 1)计算结果相近且偏小; 国标公式由于未考虑斜向波的折减且其适用条件具有局限性, 计算结果显著偏大; Lykke 公式对平均越浪量的折减程度较其他公式相对冒险, 建议实际工程中谨慎使用。

5) 受限于特定项目的波浪要素和试验断面, 研究成果可供类似项目参考, 对不同波向角作用下及不同护面块体对平均越浪量折减效应的计算方法还有待进一步研究。

(上接第 17 页)

- [2] 徐景中, 寇媛, 袁芳, 等. 基于结构特征的机载 LiDAR 数据与航空影像自动配准[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3502-3508.
- [3] 李德仁, 刘立坤, 邵振峰. 集成倾斜航空摄影测量和地面移动测量技术的城市环境监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(4): 427-435, 443.
- [4] 王頡, 兖保军, 王朝. 倾斜摄影测量在港口中的应用及精度分析[J]. 水运工程, 2022(2): 168-171.
- [5] 谢宏全, 谷风云. 地面三维激光扫描技术与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2016.

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘测设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [2] OWEN M W. Design of seawalls allowing for wave overtopping[M]. London: HR Wallingford, 1980.
- [3] GALLAND J C. Rubble mound breakwater stability under oblique waves: an experimental study[J]. Coastal engineering, 1994(10): 1061-1074.
- [4] VAN DER MEER J W, JANSSEN. Wave run-up and wave overtopping at dikes[J]. American society of civil engineers, 1995, 12(2): 175-189.
- [5] VAN GENT M R A. Oblique wave attack on rubble mound breakwaters[J]. Coastal engineering, 2014, 88(6): 43-54.
- [6] 朱嘉玲, 王震, 陈凌彦, 等. 斜向波作用下斜坡堤平均越浪量的试验研究[J]. 水运工程, 2016(5): 9-13, 18.
- [7] ANDERSEN L T, BURCHARTH H F. Three-dimensional investigations of wave overtopping on rubble mound structures[J]. Coastal engineering, 2008, 56(2): 180-189.
- [8] 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(9): 78-96.
- [9] VAN GENT M R A, VAN DEN BOOGAARD H F P, POZUETA B, et al. Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures[J]. Coastal engineering, 2006, 54(8): 586-593.

(本文编辑 王传瑜)

- [6] 尚大帅, 马东洋, 高振峰, 等. 机载 LiDAR 点云数据与影像数据融合[J]. 测绘工程, 2012, 21(1): 18-20, 24.
- [7] 李峰, 刘文龙. 机载 LiDAR 系统原理与点云处理方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017: 1-35.
- [8] 潘中华. 基于 LiDAR 点云数据与影像融合的建筑物提取[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- [9] 周建红, 冯传勇, 杨彪. 低空机载 LiDAR 水面点云自适应分类算法研究[J]. 人民长江, 2018, 49(18): 80-85.

(本文编辑 王传瑜)