

斜坡堤堤后次生波高试验与计算

郑 辉, 邓小敏, 程 曦

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 根据斜坡堤模型试验结果, 给出拟合公式。再采用拟合公式、现有规范公式和研究者给出的经验公式, 对斜坡堤不同堤顶高程下越浪产生的堤后次生波高值进行计算。对比计算结果与试验结果, 可知拟合公式与试验结果最为接近; 分析其他公式计算结果不吻合的原因。结果可为其他允许越浪斜坡堤在堤顶高程设计时的堤后次生波高计算和模型试验提供参考。

关键词: 斜坡堤; 堤后次生波高; 模型试验

中图分类号: TV 139.2⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)09-0074-05

Secondary wave height model test and calculation of sloping seawall

ZHENG Hui, DENG Xiao-min, CHENG Xi

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: According to the results of a sloping seawall model test, we obtain the fitting formula. Using the fitting formula, standard formula and empirical formula given by researchers, we calculate the secondary wave height produced by overtopping of the the sloping seawall under a different crest elevation, and compare the results with the model test, from which we know that the result by the fitting formula and test results are close most to each other; we also analyze the reason why the results from other fitting formulae are not consistent with the test result. The results may serve as reference for the secondary wave height calculation and model test of other sloping seawalls which allow the overtopping during the crest elevation design.

Keywords: sloping seawall; secondary wave height; model test

防波堤顶高程是决定防波堤造价最主要的因素之一。为降低工程投资, 须选择合适的堤顶高程。在水深浪大海域建设防波堤, 多按允许越浪来设计堤顶高程。目前, 在我国允许越浪的防波堤设计中, 多以允许越浪量为控制条件来确定堤顶高程, 再由物理模型加以验证^[1], 而大的越浪量则会在堤内水域上形成新的波浪, 称为堤后次生波。堤后次生波对于港内船舶的停泊情况有较大的影响。目前国内规范仅给出了潜堤的堤后传递波高, 国内研究者对于堤后次生波研究也较少。笔者根据斜坡堤模型试验的结果, 给出拟合经验公式,

并与规范公式和研究者给出的经验公式进行对比。

1 模型试验

1.1 斜坡堤断面结构

斜坡堤顶宽 12.61 m, 顶高程分别取 9、7、6、5 m 进行计算和模型试验。堤心石为 10 ~ 500 kg 块石, 内、外坡安放 1 层 20 t 扭王字块护面, 厚度 2.67 m, 坡度为 1:1.5; 护面下为 1.0 ~ 2.0 t 块石垫层, 厚度 1.64 m; 内坡坡底采用 400 ~ 500 kg 棱体块石压脚, 外坡坡底采用 1.0 ~ 2.0 t 块石护底。斜坡堤断面如图 1 所示。

收稿日期: 2015-01-19

作者简介: 郑辉 (1988—), 男, 助理工程师, 从事港口工程结构设计工作。

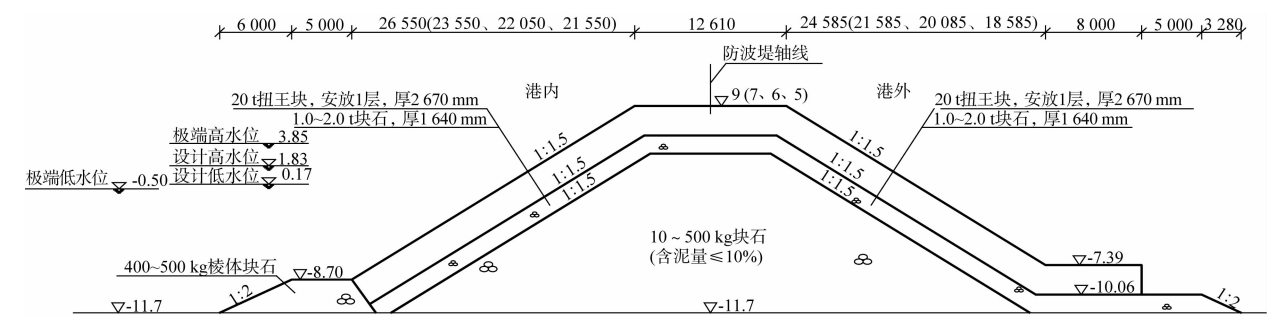


图 1 斜坡堤断面 (高程: m; 尺寸: mm)

1.2 设计水位

极端高水位 3.85 m, 极端低水位 -0.5 m; 设计高水位 1.83 m, 设计低水位 0.17 m。

1.3 设计波浪要素

设计波浪要素见表 1, 模型试验风浪要素见表 2。

表 1 50 a 一遇 SE ~ WSW 向斜坡堤外侧堤前设计波要素								
水位/m	$H_{1\%}$ /m	$H_{4\%}$ /m	$H_{5\%}$ /m	$H_{13\%}$ /m	$\bar{H}$ /m	$\bar{T}$ /s	L /m	
极端高水位 3.85	8.91	7.82	7.61	6.61	4.49	11.5	134.8	
设计高水位 1.83	8.27	7.28	7.10	6.19	4.24	11.5	127.9	
设计低水位 0.17	7.60	6.71	6.54	5.72	3.94	11.5	121.5	
极端低水位 -0.5	7.15	6.3	6.15	5.37	3.69	11.5	118.8	

表 2 模型试验风浪要素				
水位/m	要求值		试验值	
	波高 H_s /m	周期 $\bar{T}$ /s	波高 H_s /m	周期 $\bar{T}$ /s
极端高水位 3.85	6.61	11.5	6.66	11.5
设计高水位 1.83	6.19	11.5	6.09	11.6
设计低水位 0.17	5.72	11.5	5.82	11.7

1.4 试验方法^[2]

试验按照《港口工程技术规范》及《波浪模型试验规程》进行, 试验采用不规则波, 不规则波波谱取 JONSWAP 谱, 按正态重力相似准则设计模型。结合试验断面及设备性能等因素确定模型长度比尺为 $\lambda = 38$ 。

时间比尺 $\lambda_t = \lambda^{1/2}$,

压强比尺 $\lambda_p = \lambda$,

越浪量比尺 $\lambda_q = \lambda^{3/2}$ 。

不规则波波谱取 JONSWAP 谱:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right] \gamma^{\exp \left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right]} \quad (1)$$

式中: α 为无因次常数; γ 为谱峰升高因子, 取 3.3;

$$\alpha = \begin{cases} 0.07 & \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & \omega > \omega_p \end{cases}, \text{ 为谱峰频率。}$$

将特征波要素输入计算机, 按模型比尺计算产生造波讯号, 控制造波机产生相应的不规则波序列。不规则波波数大于 120 个, 每组试验重复 3 次, 取其均值作为试验值, 结构稳定试验时, 波浪连续作用相当于原体一个风暴潮过程(约 3 h)。

试验在风浪水槽中进行。水槽长 80 m、宽 1.0 m、高 1.5 m, 水槽一端安装不规则造波机, 另一端设置消波系统。水槽纵向分为两部分: 一部分铺设试验断面, 另一部分用以消除波浪的二次反射。波高及波浪爬高采用电容式波高仪量测。

1.5 试验结果

堤后次生波高试验结果如表 3 所示。

表 3 各试验方案堤后波高					
堤顶 高程/ m	与 堤顶 距离	波高/m			堤后次 生波浪 周期/s
		极端高水位 $H_{13\%}=6.61$ m $T=11.5$ s	设计高水位 $H_{13\%}=6.19$ m $T=11.5$ s	设计低水位 $H_{13\%}=5.72$ m $T=11.5$ s	
9	0.5L	1.07	0.90	0.67	9.48
7	0.5L	1.34	0.94	0.66	9.31
6	0.5L	2.01	1.18	0.74	8.48
5	0.5L	2.87	1.41	0.77	8.30

2 试验结果分析

允许越浪的防波堤, 越浪水流越过堤顶后在堤后形成次生波, 将堤后次生波有效波高与入射波有效波高之比称为波高透射系数, 即 $K_t = H_t/H$ 。考虑堤顶出水高度 H_c 对堤后次生波高的影响, 引入无因次量 H_c/H 进行分析, 各试验方案结果 H_c/H 与 K_t 值如表 4 所示。

表 4 各试验方案 H_c/H 与 K_t 值

水位、波高	堤顶 高程/m	波高试验 结果/m	H_c/H	K_t
极端高水位(3.85 m), $H_{13\%}=6.61$ m	9	1.07	0.78	0.16
	7	1.34	0.48	0.20
	6	2.01	0.33	0.30
	5	2.87	0.17	0.43
计高水位(1.83 m), $H_{13\%}=6.19$ m	9	0.90	1.16	0.15
	7	0.94	0.84	0.15
	6	1.18	0.67	0.19
	5	1.41	0.51	0.23
设计低水位(0.17 m), $H_{13\%}=5.72$ m	9	0.67	1.54	0.12
	7	0.66	1.19	0.12
	6	0.74	1.02	0.13
	5	0.77	0.84	0.13

以 H_c/H 为横坐标, K_t 为纵坐标, 绘制散点图 (图 2)。由图 2 可以看出: K_t 随 H_c/H 增大而减小, 在 $0.3 < H_c/H < 1.5$ 范围内, K_t 与 H_c/H 基本呈线性关系, 拟合经验公式为:

$$K_t = -0.197(H_c/H) + 0.35 \quad (0.3 < H_c/H < 1.5) \quad (2)$$

式中: H_c 为堤顶出水高度, 潜堤时取负值。

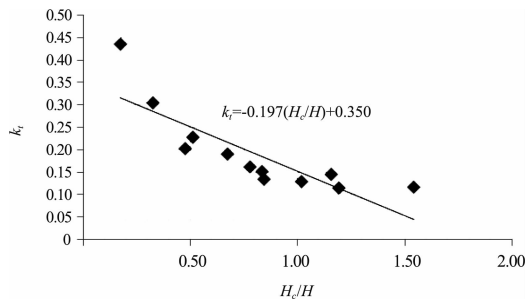


图 2 K_t 与 H_c/H 关系

3 堤后次生波高计算

为验证拟合公式的适用性, 采用拟合公式计算堤后次生波高的同时, 另外采用现有规范和研究者给出的经验公式进行计算, 将结果分别与试验结果进行对比。

《防波堤设计与施工规范》给出抛石潜堤透射系数计算公式^[3] (简称规范法)。另外现有国内研究者给出了经验公式, 戈龙仔等^[4] 给出防波堤堤后次生波有效波高、有效周期、频谱随着相对水深变化规律 (简称戈龙仔法)。代英男等^[5] 给出次生波波浪透射系数与无因次越浪量和相对堤顶高程的关系 (简称代英男法)。

3.1 拟合公式计算

采用前文给出的拟合公式计算波高透射系数 K_t 和堤后次生波高 H_t , 计算结果如表 5 所示。

表 5 拟合公式计算结果

水位、波高	堤顶高程/m	H_c/H	K_t	H_t/m
极端高水位(3.85 m), $H_{13\%}=6.61$ m	9	0.78	0.20	1.30
	7	0.48	0.26	1.69
	6	0.33	0.29	1.89
	5	0.17	0.32	2.09
设计高水位(1.83 m), $H_{13\%}=6.19$ m	9	1.16	0.12	0.75
	7	0.84	0.19	1.15
	6	0.67	0.22	1.35
设计低水位(0.17 m), $H_{13\%}=5.72$ m	5	0.51	0.25	1.54
	9	1.54	0.05	0.28
	7	1.19	0.11	0.66
	6	1.02	0.15	0.85
	5	0.84	0.18	1.05

3.2 规范法计算

《防波堤设计与施工规范》给出抛石潜堤的传递波高计算公式:

潜堤传递波高系数 K_t 见表 6, 规范法计算结果见表 7。

表 6 潜堤传递波高系数 K_t

h_c/H	K_t
$-2.0 < h_c/H < -1.13$	0.8
$-1.13 < h_c/H < 1.2$	$0.46 \sim 0.3 h_c/H$
$1.2 < h_c/H < 2.0$	0.10

注: h_c 为堤顶在计算水位以上的高度(m), 潜堤时 h_c 为负值。

表 7 规范法计算结果

水位、波高	堤顶高程/m	H_c/H	K_t	H_t/m
极端高水位(3.85 m), $H_{13\%}=6.61$ m	9	0.78	0.37	2.48
	7	0.48	0.29	1.92
	6	0.33	0.22	1.45
	5	0.17	0.13	0.85
设计高水位(1.83 m), $H_{13\%}=6.19$ m	9	1.16	0.37	2.28
	7	0.84	0.38	2.36
	6	0.67	0.35	2.19
设计低水位(0.17 m), $H_{13\%}=5.72$ m	5	0.51	0.30	1.89
	9	1.54	0.10	0.57
	7	1.19	0.36	2.07
	6	1.02	0.38	2.20
	5	0.84	0.38	2.19

3.3 戈龙仔法计算

戈龙仔等采用大比尺波浪断面物理模型试验,

测出不同堤顶淹没水深下, 堤后次生波高值, 并给出了波高透射系数的经验公式:

$$K_t=0.291(a/H)+0.541 \tag{4}$$

式中: a 为堤顶水深, 潜堤时为正值; 当 $a/H > 1.4$ 时, 堤后次生波的波高值变化很小, 取 $K_t=1$ 。

戈龙仔法 K_t 计算结果见表 8。

表 8 戈龙仔法 K_t 计算结果				
水位、波高	堤顶高程/m	a/H	K_t	H_t/m
极端高水位(3.85 m), $H_{13\%}=6.61\text{ m}$	9	-0.78	0.31	2.08
	7	-0.48	0.40	2.66
	6	-0.33	0.45	2.95
	5	-0.17	0.49	3.24
设计高水位(1.83 m), $H_{13\%}=6.19\text{ m}$	9	-1.16	0.20	1.26
	7	-0.84	0.30	1.84
	6	-0.67	0.34	2.14
	5	-0.51	0.39	2.43
设计低水位(0.17 m), $H_{13\%}=5.72\text{ m}$	9	-1.54	0.09	0.52
	7	-1.19	0.19	1.11
	6	-1.02	0.24	1.40
	5	-0.84	0.30	1.69

3.4 代英男法计算

代英男等针对梯形光面防波堤, 通过断面物理模型试验, 建立了堤上越浪流厚度、堤后次生波的波高透射系数的关系, 并给出经验公式:

$$K_t=-0.19(R_c/H)+0.45 \tag{5}$$

式中: R_c 为堤顶出水高度, 潜堤时为负值。

表 9 为代英男法 K_t 计算结果。

表 9 代英男法 K_t 计算结果				
水位、波高	堤顶高程/m	R_c/H	K_t	H_t/m
极端高水位(3.85 m), $H_{13\%}=6.61\text{ m}$	9	0.78	0.30	2.00
	7	0.48	0.36	2.38
	6	0.33	0.39	2.57
	5	0.17	0.42	2.76
设计高水位(1.83 m), $H_{13\%}=6.19\text{ m}$	9	1.16	0.23	1.42
	7	0.84	0.29	1.80
	6	0.67	0.32	1.99
	5	0.51	0.35	2.18
设计低水位(0.17 m), $H_{13\%}=5.72\text{ m}$	9	1.54	0.16	0.90
	7	1.19	0.22	1.28
	6	1.02	0.26	1.47
	5	0.84	0.29	1.66

4 计算结果对比分析

采用模型试验测得的堤后次生波高与各计算方法的结果进行对比 (表 10)。

表 10 堤后次生波高计算结果与模型试验结果比较						
水位、波高	堤顶高程/m	计算结果/m				模型试验结果/m
		拟合公式	规范法	戈龙仔法	代英男法	
极端高水位 (3.85 m), $H_{13\%}=6.61\text{ m}$	9	1.30	2.48	2.08	2.00	1.07
	7	1.69	1.92	2.66	2.38	1.34
	6	1.89	1.45	2.95	2.57	2.01
	5	2.09	0.85	3.24	2.76	2.87
设计高水位 (1.83 m), $H_{13\%}=6.19\text{ m}$	9	0.75	2.28	1.26	1.42	0.90
	7	1.15	2.36	1.84	1.80	0.94
	6	1.35	2.19	2.14	1.99	1.18
	5	1.54	1.89	2.43	2.18	1.41
设计低水位 (0.17 m), $H_{13\%}=5.72\text{ m}$	9	0.28	0.57	0.52	0.90	0.67
	7	0.66	2.07	1.11	1.28	0.66
	6	0.85	2.20	1.40	1.47	0.74
	5	1.05	2.19	1.69	1.66	0.77

- 从表 10 可以看出:
- 1) 拟合公式计算结果与模型试验结果基本吻合, 但在 $H_c/H < 0.3$ 或者 $H_c/H > 1.5$ 时, 结果偏差较大, 此时戈龙仔法和代英男法与试验结果接近。
 - 2) 规范法计算结果趋势与模型试验结果相反, 且在同水位和波高下, 堤顶高程越小, 堤后波高反而越小, 不符合常理。可见在出水堤堤后次生波高计算中, 规范法并不适用。
 - 3) 戈龙仔法和代英男法计算结果趋势与模型试验结果一致, 但是结果基本偏大 1 倍左右。

原因分析: 由于戈龙仔法计算公式是根据堤顶不同淹没水深下的堤后波高值拟合出来的, 相当于潜堤试验结果, 未考虑波浪爬坡的消减作用; 代英男法计算公式是根据光面防波堤的试验结果拟合的, 未考虑波浪在人工块体护面上爬坡的消减。本文中模型试验断面为扭王字块护面的出水斜坡堤, 为此在采用经验公式计算堤后次生波高时, 需引入折减系数。

堤后次生波高产生的原因是堤顶越浪, 《海港水位规范》中给出了斜坡堤堤顶越浪量的护面结构影响系数 $K_A^{[6]}$, 但未给出扭王字块体的 K_A 值。根据计算结果和模型试验结果比较的结论, 推算扭王字块护面结构影响系数可取 0.5。

5 结语

先根据模型试验结果, 给出拟合公式, 并引用其他 3 种计算方法, 分别计算该斜坡堤的堤后

次生波高值。通过计算结果与模型试验结果的比较可知：在 $0.3 < H_c/H < 1.5$ 范围内，拟合公式计算结果与试验结果最为接近，而当 $H_c/H < 0.3$ 或者 $H_c/H > 1.5$ 时，戈龙仔法和代英男法与试验结果最为接近；《防波堤设计与施工规范》中给出的抛石潜堤的传递波高计算公式并不适用于出水堤；而戈龙仔法和代英男法计算的结果普遍偏大 1 倍，为此引入护面块体影响系数（扭王字块体取 0.5）对结果进行修正。

本文给出的斜坡堤堤后次生波高计算的拟合公式,可为其他允许越浪斜坡堤在堤顶高程设计时的堤后次生波高计算和模型试验提供参考。

(上接第 73 页)

换言之, 虽然随着前舱加水高度 h 的增加, 定倾高度 m 增加, 但是当前舱加水到一定高度时, 方沉箱将不再满足浮游稳定特性, 即沉箱前舱加水高度 h 并非越高越好, 只有在一定范围内, 方沉箱才能满足其浮游稳定特性, 而这一点规范^[3]中并无有所体现。

以本文实际方沉箱为例, 在沉箱密度 $\rho = 2.50 \text{ t/m}^3$ 的情况下, 前舱加水高度 h 只有在 $2.5 \sim 3.7 \text{ m}$ 时, 沉箱才满足浮游稳定特性。超出此范围均不满足规范^[3]要求的定倾高度 ($h < 2.5 \text{ m}$) 或处于不稳定平衡状态 ($h > 3.7 \text{ m}$)。

随着前舱加水高度 h 的增加, 沉箱吃水 T 增加且变化速率也与沉箱密度 ρ 无关。同前, 沉箱吃水的增加必将增加浮游稳定条件的苛刻性。因此, 在确保沉箱浮游稳定情况下, 尽量减少前舱加水高度从施工上来说是很有必要的。

3 结语

1) 沉箱密度 ρ 和前舱加水高度 h 是影响方沉箱浮游稳定特性(定倾半径 r 、质心到浮心的距离 a 、定倾高度 m 和沉箱吃水 T) 的重要因素。

2) 在前舱加水高度 h 不变的情况下, 方沉箱定倾半径 ρ 和质心到浮心的距离 a 随着沉箱密度 ρ 增加而减小, 定倾高度 m 和沉箱吃水 T 则相反, 变化速率均相同。

参考文献:

- [1] 俞士修. 斜坡堤上平均越浪量计算方法的比较[J]. 港工技术, 2011, 48(1): 1-4.
- [2] 河海大学. 揭阳港前詹作业区通用码头一期工程波浪断面物理模型试验[R]. 南京: 河海大学, 2012.
- [3] JTJ 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [4] 戈龙仔, 迟杰, 张慈珩. 防波堤堤后次生波的试验研究[J]. 水道港口, 2010, 31(3): 204-209.
- [5] 代英男, 柳淑学, 常江, 等. 斜坡堤越浪流厚度及堤后次生波的试验研究[J]. 水运工程, 2011(12): 1-5.
- [6] JTJ 145-2—2013 海港水文规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)

3) 在沉箱密度 ρ 不变的情况下, 方沉箱定倾半径 ρ 和质心到浮心的距离 a 随着前舱加水高度 h 增加而减小, 定倾高度 m 和沉箱吃水 T 则相反, 变化速率也相同。

4) 在计算方沉箱的定倾高度 m 和沉箱吃水 T 时, 规范对沉箱密度 ρ 的不同取值是合理且偏保守的。

5) 前舱加水高度 h 过高, 会引起方沉箱的浮游由稳定平衡变为不稳定平衡, 存在较大风险, 而规范中并未有所体现, 建议设计时加以考虑, 同时尽量减少前舱加水高度从施工上来说是很有必要的。

参考文献:

- [1] Graff W J, William J. Introduction to Offshore Structures: Design, Fabrication, Installation [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1981.
- [2] 周申一, 张立荣, 杨仁杰, 等. 沉井沉箱施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [3] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].
- [4] 徐彦东, 李双泉, 宋先勇. 某港码头沉箱的浮游稳定计算分析[J]. 水运工程, 2011(4): 25-28.
- [5] 张宏飞. 沉箱浮游稳定计算和精安装施工工艺[J]. 湖南水利水电, 2014(1): 7-9.
- [6] 陈庆韬. 中海油海南洋浦护岸工程沉箱浮游稳定计算[J]. 中国水运, 2014(1): 184-185.

(本文编辑 武亚庆)