

· 综 合 ·



[技术讲座] 斜坡堤次护面块体的稳定性研究I

李贺青, 柳玉良, 夏运强

(海军工程设计研究院, 北京 100070)

摘要: 我国 JTJ 298—1998 《防波堤设计与施工规范》规定, 外坡在设计低水位以下 1~1.5 倍设计波高之间的护面块体质量, 取计算水位上下 1 倍波高间护面块体计算质量的 1/5。水深 30 m 的某防波堤工程模型试验结果表明, 按这一规定确定的质量稳定性不足。为检验这一规定, 进行了两个断面的模型试验, 分别位于静水面下 1 倍和 1.5 倍设计波高处的护面块体质量按上述规定确定。利用护面块体安全度的概念, 分析得到护面块体的安全度分别为 2.43 和 2.46 以上, 都大于 2.2。试验说明, 在 $\bar{H}/d \geq 0.3$ 时上述规定是合理的, 但在 $\bar{H}/d = 0.16$ 时失效。

关键词: 斜坡式防波堤; 护面块体稳定性; 安全度; 次护面块体

中图分类号: U 653.4

文献标志码:

文章编号: 1002-4972(2014)04-0012-04

Stability of minor armor blocks for rubble mound breakwater I

LI He-qing, LIU Yu-liang, XIA Yun-qiang

(The Navy Engineering Design and Research Institute, Beijing 100070, China)

Abstract: It is stipulated in the *Code of Design and Construction of Breakwaters* (JTJ 298—1998) that the stable weight of armor blocks positioned 1 to 1.5 times of $H_{13\%}$ under the LWL should be 1/5 of the calculating weight by Hudson formula. Model tests for a breakwater with water depth of 30 m show that there are some problems in applying the rule. To examine it, two model tests are conducted: one is armor blocks positioned 1 times $H_{13\%}$ under the MWL, and the other is 1.5 times. Using the concept of “safety factor” to analyze the test data, we obtain the value of 2.43 and above 2.46 respectively, both of which are larger than 2.2. It manifests that the rule mentioned above is effective at $\bar{H}/d \geq 0.3$ but failures at $\bar{H}/d = 0.16$.

Key words: rubble mound breakwater; stability of armor blocks; safety factor; minor armor block

1 问题的提出

2001年建设的某防波堤工程, 水深达 30 m, 是当时国内水深最深的防波堤。防波堤为抛石斜坡堤结构, 外坡采用扭王字块体护面。当时的 JTJ 298—1998 《防波堤设计与施工规范》4.2.12 条规定^[1], 外坡在设计低水位以下 1~1.5 倍设计波高之间的护面块体质量, 取计算水位上下 1 倍波高间护面块体计算质量的 1/5。防波堤 50 a 一遇波浪 $H_{5\%} = 9.0$ m, $H_{13\%} = 7.6$ m, $\bar{H} = 4.9$ m。因 $\bar{H}/d = 0.16 < 0.3$, 按照 JTJ 213—1998 《海港水文规范》的规定, 采用累积率 5% 的波高确定护面块体

的稳定性。外坡坡度 1:2, 经计算, 外坡 -10.0 m (相当于设计低水位以下 1 倍设计波高处) 以下扭王字块体稳定质量为 6.5 t, 设计取 7 t。经大连理工大学、天津港湾工程研究院、海军工程设计研究院港工室 3 家试验单位的断面模型试验, 7 t 护面块体均出现失稳现象, 块体质量增大到 10 t 才能稳定。后续建设的多座水深超过 20 m 的斜坡堤, 模型试验结果同样发现, 按上述 1/5 确定的护面块体质量稳定性不足。试验结果表明, 防波堤规范对设计低水位以下 1~1.5 倍设计波高之间护面块体规定的质量偏小。

收稿日期: 2013-08-30

作者简介: 李贺青 (1963—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事港口工程设计和研究。

上述事实给笔者以启发,也许随着水深的增加,波浪对防波堤的作用特性发生了变化;也可能规范如此规定本身就不合理。如果是波浪的作用特性发生变化,就意味着规范的一些规定对大水深的防波堤不再适用,这就需要确定规范的适用条件,在此基础上探讨深水防波堤的含义、研究深水防波堤的波浪作用特性;如果是规定不合理,则之前按其规定建设的防波堤就存在安全隐患。究竟属于哪种情况,一直没有这方面的研究成果。

2011年修订的JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》^[2]提出了深水防波堤的概念,并将上述规定的1/5改为1/2,但上述问题并没有解决。修订规范说明中将深水防波堤定义为设计低水位下水深超过20m的防波堤,但仅规定水深是片面的。原因很简单:1)按照相似律,水深不足1m的模型试验可以模拟水深数10m的原型。因此,仅按水深定义深水防波堤是不够的,波浪作用是关键因素。2)修订规范没有明确原规范相关规定是不合理还是有其适用范围问题。因此,仍然需要通过研究明确以下问题:1)原规范关于外坡设计低水位以下1~1.5倍设计波高之间的护面块体质量的规定在水深较小的条件下是否合理?2)如果不合理,合理的规定是什么?3)如果合理,其适用条件是什么?4)在超出其适用条件后合理的规定是什么?

在确定以上问题后,就可以明确定义深水防波堤是否有意义。为搞清这些问题,在实际工程的基础上,海军工程设计研究院港工实验室进行了数年的模型试验,对波浪作用下护面块体的稳定性进行了较为系统的研究。限于篇幅,本文介绍其中的部分研究成果。

为叙述方便,将设计低水位下1倍设计波高 $H_{13\%}$ 值处以上的护面块体简称为主护面块体,设计低水位下1.0倍设计波高 $H_{13\%}$ 值处以下的护面块体简称为次护面块体。

2 护面块体的安全度

我国防波堤规范规定^[1-2],计算水位上下1倍

设计波高的护面块体的稳定质量按下式计算:

$$W = 0.1 \times \frac{\rho_b H^3}{K_D (S_b - 1)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

为研究护面块体的稳定性,首先需要明确按式(1)确定的护面块体质量的安全富裕。文献[3]中定义了稳定质量和临界质量的比值为护面块体的安全度 K_N :

$$K_N = \frac{m}{m_c} \quad (2)$$

式中: m 为利用式(1)得出的护面块体稳定质量; m_c 为护面块体临界稳定质量。由安全度的定义还得出^[3]:

$$K_N = \left(\frac{H_c}{H} \right)^3 \quad (3)$$

式中: H_c 、 K_{DC} 分别为护面块体处于临界稳定状态时的波高和稳定系数。通过分析和模型试验,得出 $K_N = 2.2$ 。

3 次护面块体的稳定试验

3.1 试验方法

试验在海军工程设计研究院港工实验室进行,采用不规则波浪。试验水槽长81m,宽1.4m,高2.6m。水槽一端安装低惯量直流电机及滚珠丝杠系统驱动的不规则造波机,另一端安装消能设施。水槽沿宽度方向分成两格,分别为0.8m和0.6m,宽度0.6m的窄水槽部分放置模型,另一侧用于消能,以减少造波机推板二次反射的影响。不规则波造波机可产生波高0.03~0.5m和周期0.5~5.0s的不规则波。

根据试验水槽和造波条件,次护面块体采用32g的扭王字块体。按原防波堤规范规定,次护面块体质量为主护面块体质量的1/5,相应的主护面块体质量为160g。稳定系数 $K_D = 18$, $\cot \alpha = 1.5$,块体密度 $\rho_b = 2.3 \text{ t/m}^3$,淡水密度 $\rho = 1.0 \text{ t/m}^3$ (试验使用淡水),按照式(1)反算32g的稳定波高: $H = \left(\frac{\rho_b}{\rho} - 1 \right) \left(\frac{m K_D \cot \alpha}{0.1 \rho_b} \right)^{1/3} = 0.160 \text{ m}$,即

$H_{13\%} = 0.160 \text{ m}$;或者,对应 $\bar{H}/d < 0.3$ 的情况, $H_{5\%} = 0.160 \text{ m}$ 。

试验波浪要素在稍超过 $H_{13\%}$ ($H_{5\%}$) = 0.160 m 一定范围内取值, 最大波高尽可能使块体出现失稳情况。主护面块体质量应足够大, 以防止其失稳影响次护面块体的稳定性。实际试验选用的主护面块体质量 590 g。在设备性能允许的条件下, 试验水深尽可能小, 以模拟浅水情况。

按照次护面块体在水面下的位置, 进行两个断面的试验。断面 1 的次护面块体在水面下 1 倍波高以下, 断面 2 在水面下 1.5 倍波高以下。

3.2 断面 1 试验结果分析

试验 1 的次护面块体顶端距水槽底面 0.233 m, 每一工况的水深 = 1 倍波高 + 0.233 m。试验断面见图 1, 断面模型见图 2。试验波浪要素见表 1, 试验波高 $H_{13\%}$ 的范围为 0.15 ~ 0.19 m, 平均周期分别为 1.5 s 和 2.0 s, $\bar{H}/d = 0.27 \sim 0.31$ 。对每一工况重复进行 8 次试验, 每次重新摆放块体。试验观测结果见表 2, 破坏情况见图 3。

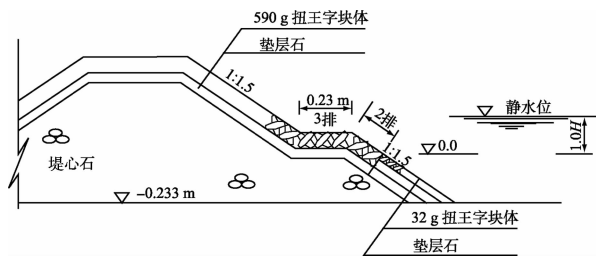


图 1 试验断面 1



图 2 断面 1 模型

由表 2 可以看出, 工况 1-1 ~ 1-6 之前各组即波高 $H_{13\%} < 0.179$ m 时, 32 g 扭王字护面块体都是稳定的; 当 $H_{13\%}$ 增大到 0.189 m 时, 护面块体出现了失稳现象。

表 1 断面 1 波浪要素

工况	d/m	\bar{T} /s	$H_{5\%}$ /m	$H_{13\%}$ /m	\bar{H} /m	\bar{H}/d
1-1	0.383	1.50	0.173	0.150	0.102	0.27
1-2	0.383	2.00	0.177	0.154	0.105	0.27
1-3	0.398	1.51	0.190	0.166	0.114	0.29
1-4	0.398	2.00	0.188	0.164	0.112	0.28
1-5	0.413	1.52	0.199	0.174	0.119	0.29
1-6	0.413	2.09	0.205	0.179	0.123	0.30
1-7	0.423	1.54	0.216	0.189	0.131	0.31
1-8	0.423	1.95	0.217	0.190	0.132	0.31

表 2 断面 1 试验结果

工况	失稳块体个数							
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第6次	第7次	第8次
1-1	0	0	0	0	0	0	0	0
1-2	0	0	0	0	0	0	0	0
1-3	0	0	0	0	0	0	0	0
1-4	0	0	0	0	0	0	0	0
1-5	0	0	0	0	0	0	0	0
1-6	0	0	0	0	0	0	0	0
1-7	0	0	0	1	0	0	0	0
1-8	1	1	1	0	8	5	5	2

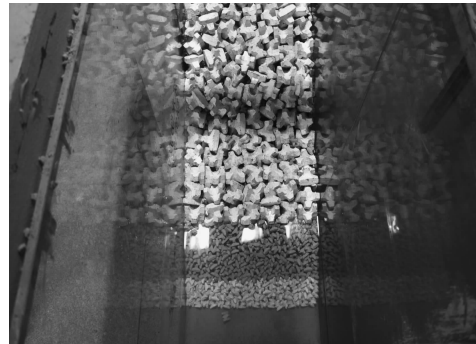


图 3 断面 1 破坏情况

《海港水文规范》^[4] 规定, 验算护面块体的稳定性采用波高 $H_{13\%}$, 但 $\bar{H}/d < 0.3$ 时, 采用 $H_{5\%}$ 。按此规定, 工况 1-1 ~ 1-5 应该采用波高 $H_{5\%}$, 而工况 1-6 ~ 1-8 应采用波高 $H_{13\%}$ 。

首先分析工况 1-1 ~ 1-5 的情况, 这时采用波高 $H_{5\%}$ 。各工况的 32 g 块体均是稳定的, 波高最大值是工况 1-5 的 $H_{5\%} = 0.199$ m, 因此块体的临界波高应在 0.199 m 以上。32 g 块体的稳定波高 $H_{5\%} = 0.16$ m, 从文献[3]公式(3), 得出 32 g 块体的安全度 K_N 在 1.91 以上。

其次分析工况 1-6 ~ 1-8 的情况, 这时采用波高

