

插砌条石护面防波堤的试验研究*

赵秀珍

(中国水产科学研究院)

提要 本研究首先对防波堤护面斜缝插砌和平缝插砌两种结构型式进行了力学分析,得到了条石临界稳定的力学平衡基本关系式;再通过40多种结构断面模型和1380组次的波浪模型试验,对影响条石护面厚度的有关因素进行了无因次分析;最后提出了确定插砌条石护面厚度的计算公式,为工程设计提供了必要的依据。同时,还提出了关于制订防波堤设计规范的试验成果及其分析意见。

主题词 条石护面,防波堤,波浪模型试验

插砌条石护面防波堤是沿海渔民创建的一种海上防护建筑物。这种防波堤的主要特点是堤坡较陡,断面较小,比一般斜坡式防波堤可以节省较多的材料用量和投资,可就地取材,土法上马、群众施工方便、抗浪性能较强,对保护渔船安全和促进渔业生产发挥了重要作用。但是,这种防波堤的建设,主要是借助前人的经验,对这种结构还缺少理论研究。目前,国内外对斜坡式防波堤护面块体尺寸的试验研究,都是在斜坡坡度较缓的条件下进行的,且忽略了块石间摩擦力的影响,在交通部已制定的《防波堤》规范中,也没有列入适用于插砌条石护面防波堤设计计算的有关方法。本文的目的是推导该种结构型式的设计计算公式和编写设计规范。

试验研究的条件

根据渔轮的吃水深度,沿海各地的潮位、波浪情况及试验的具体条件,确定了各组试验研究数据:堤前水深 $d=13,10,7,5$ 米;堤前波高 $H=1\sim6$ 米;波陡 $H/L=1/12,1/16,1/20,1/24$;护面坡度系数 $m=0.6,0.8,1.2,1.5,2.0$;堤顶超高 $a=5,4,3,1.5$ 米;堤前海底坡度 $i=1/50$;护面模型材料采用水泥铁砂条(容重 2.6 吨/米³)及闪长花岗岩条(容重 2.62 吨/米³);条石原型尺寸为底面 25×25 厘米²,长度 $l=0.4,0.6,0.8,1.0,1.2$ 米;模型几何比尺采用 1/20 和 1/30;试验护面条石构造采用斜缝插砌型式。观测护面条石稳定标准规定为四级:A级——完全稳定状态,B级——临界稳定状态,C级——局部失稳状态,D级——严重损坏状态。

试验是在波浪水槽上进行的,水槽尺寸为长 30 米,宽 1.0 米,高 1.3 米,由摇篮推板式造波机产生规则波,模型(见图 1)布置在离造波机 25 米处。用光电转速仪控制波周期、电容式浪高仪测定波高,每

* 本文曾提交给中国水产学会第四次全国会员代表大会暨学术年会(1987年11月5—10日),并在学术讨论的分组会上宣读。参加本试验研究工作的有大连工学院土木系(原水利系)李王成教授、仲跻权讲师及中国水产科学研究院庞甲育助理工程师。

组试验重复不少于两次。

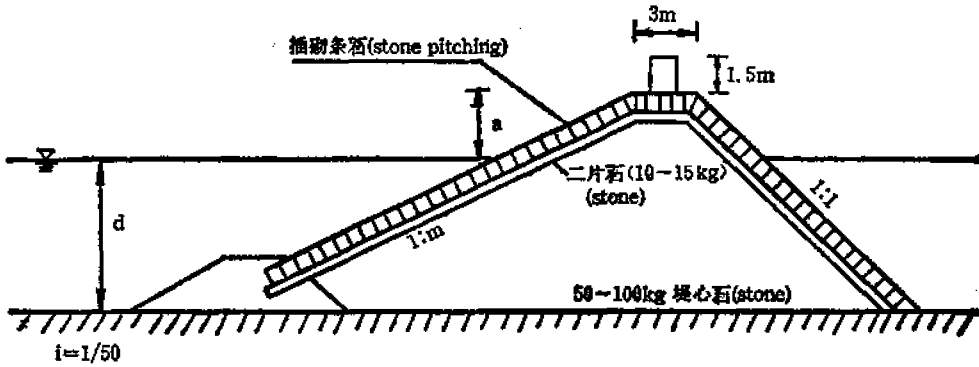


图 1 插砌条石护面防波堤断面图

Fig. 1 Sectional drawing on pitching breakwater with rectangular slab stone

试验研究和结果

本试验研究共作了 40 多种结构断面模型,1380 余组次的试验,试验的内容和取得的结果分为以下三个方面:

1. 从理论上分析了插砌条石护面防波堤在波浪水流作用下的受力情况,建立了插砌护面条石临界稳定的平衡方程。

波浪作用下,护面条石间存在由重力产生的、沿坡面的切向分力,使坡面上下条石相互挤紧,由于条石表面加工粗糙,某些条石并不全部承受其上部条石的挤压作用,从最不利情况考虑,忽略上层条石对下层单个条石的挤压作用。考虑单个条石承受与下层条石间由挤压产生的摩擦力和由重力产生的垂直压紧坡面的法向分力,这两个力组成了单个护面条石极限平衡的稳定力。使护面条石失稳的外力,是波浪水流作用下产生的、最大的离开坡面的法向动水压力。根据平缝和斜缝插砌护面条石的受力情况(见图 2、图 3)建立

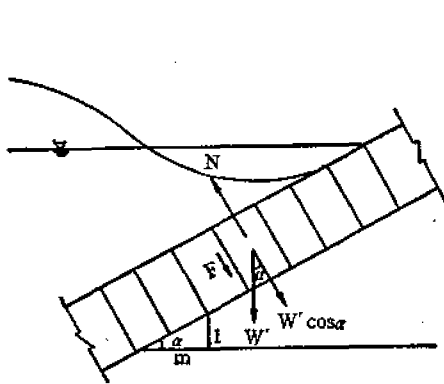


图 2 平缝插砌护面条石极限平衡力学图

Fig. 2 Mechanical drawing of the limit equilibrium on stone pitching with plane seam

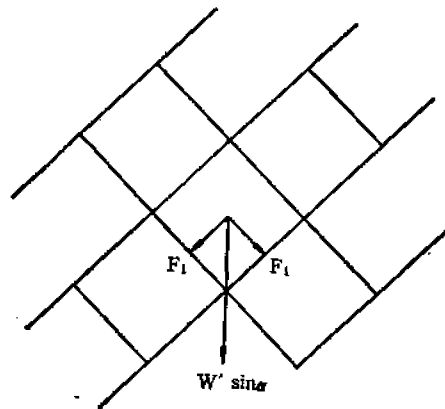


图 3 斜缝插砌护面条石力学正面上视图

Fig. 3 Top drawing of frontal mechanics on stone pitching with oblique seam

插砌单个护面条石临界稳定的平衡方程如下:

(1) 平缝插砌护面条石临界稳定平衡方程

$$\begin{aligned} W' \cos \alpha + fW' \sin \alpha &= N \\ N &= K_1 \gamma HS \\ W' &= sl(\gamma_b - \gamma) \\ \frac{l}{H} &= \frac{\gamma}{\gamma_b - \gamma} \cdot \frac{K_1}{\cos \alpha + f \sin \alpha} \\ \text{ctg } \alpha &= m \\ \frac{l}{H} &= \frac{\gamma}{\gamma_b - \gamma} \cdot \frac{K_1 \cdot \sqrt{m^2 + 1}}{m + f} \end{aligned}$$

(2) 斜缝插砌护面条石临界稳定平衡方程

$$\begin{aligned} W' \cos \alpha + 2F_1 f &= N \\ F_1 &= \frac{W' \sin \alpha}{\sqrt{2}} \\ W' \cos \alpha + f\sqrt{2}W' \sin \alpha &= N \\ \frac{l}{H} &= \frac{\gamma}{\gamma_b - \gamma} \cdot \frac{K_1}{\cos \alpha + f\sqrt{2} \sin \alpha} \\ \frac{l}{H} &= \frac{\gamma}{\gamma_b - \gamma} \cdot \frac{K_1 \sqrt{m^2 + 1}}{m + f\sqrt{2}} \\ \text{令 } K_2 &= \frac{\gamma}{\gamma_b - \gamma}; K = K_1 \cdot K_2 \\ \text{则 } \frac{l}{H} &= K \cdot \frac{\sqrt{m^2 + 1}}{m + f\sqrt{2}} \end{aligned}$$

式中: α ——坡面与水平线的夹角; f ——护面条石间摩擦系数;
 m ——坡度系数; H ——波高;
 γ ——水容重; L ——波长;
 N ——法向动水压力; γ_b ——条石容重;
 S ——单个条石底面积; W' ——单个条石水下重量;
 l ——护面厚度(条石长度); K_1 ——综合有关因素影响系数;
 K ——综合系数; K_2 ——容重系数;

摩擦系数对护面厚度的影响: 在斜缝插砌护面条石临界稳定平衡方程中设 $H=1$ 得 $l/K = \sqrt{m^2 + 1}/m + f\sqrt{2}$, 对于不同的 f 值, 可求得 l/K 与 m 的关系(见图4)。从图4看, $f=0$ 时, l/K 随 m 的增加而减小; $f=0.5$ 时, l/K 最小值出现在 $m=1.5$ 处; $f=0.7$ 时, l/K 最小值出现在 $m=1.0$ 处; $f=0.85$ 时, l/K 最小值出现在 $m=0.8$ 附近。这说明不考虑摩擦力时, 护面相对厚度随坡度变缓而减小, 对一定的 f 值, 存在一个最小护面相对厚度, 此时的边坡即为该一定 f 值的最佳边坡。

2. 通过水工模型试验和对大量试验数据的归纳、研究, 提出了插砌条石护面防波堤护面厚度的确定方法和计算公式。

不区分波陡, 观测护面条石B级临界稳定状态时, 条石护面相对厚度的较大平均值(见表1)。

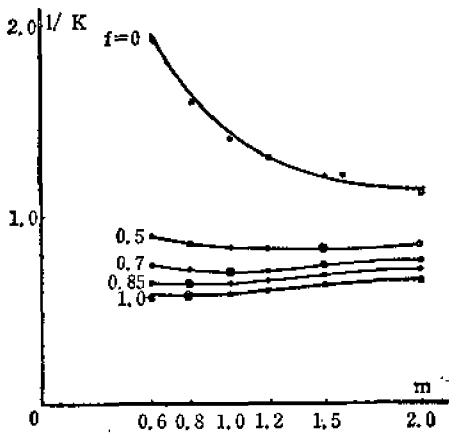


图4 不同f值的m与l/K关系曲线
Fig. 4 m of the different f value and l/K relative curve

根据条石护面相对厚度的较大平均值，确定了各种坡度和不同摩擦系数条件下的K值（见表2）。

由于K值随m的变化不大及f=0.85之曲线与试验点接近，故选取f=0.85时K值的总平均值得：

$$\frac{l_B}{H} = 0.296 \cdot \frac{\sqrt{m^2 + 1}}{m + 0.85\sqrt{2}} \text{ 关系式。}$$

考虑经验曲线应包络各试验点，将f=0.85的K值乘上1.05系数得护面条石B级临界稳定状态下护面厚度的计算公式为：

$$l_B = 0.31 \cdot \frac{\sqrt{m^2 + 1}}{m + 0.85\sqrt{2}} \cdot H$$

考虑相对水深d/H对护面厚度的影响：在波浪作用下，插砌条石护面在相对水深d/H=1.66~3.33及不同斜坡坡度(m=0.6, 1.2, 2.0)的条件下，按B级临界稳定状态统计护面相对厚度l_B/H，用最小二乘法分析d/H和l_B/H的关系，经分析计算得相对水深影响系数K_d=0.476+0.157d/H。

表1 l_B/H 试验值
Table. 1 l_B/H test value

m \ d 米(m)	0.6	0.8	1.2	1.5	2.0
13	0.2027	0.182*	0.2025	0.2023	0.2025
10	0.156	0.198	0.176*	0.2	0.2
7	0.2021	0.174	0.199	0.208**	0.214
5	0.200			0.208	
平均 Average	0.1902	0.185	0.1925	0.2045	0.2055

* 利用C级稳定状态资料推出 From the reference of the utilization of C class stable condition
** 花岗条石资料 Reference of granite

表2 不同m、f之K值
Table. 2 K value of different m and f

m \ f	0.6	0.8	1.2	1.5	2.0	K平均值 K average value	变化范围 Change range
0.7	0.259	0.258	0.2699	0.2824	0.275	0.269	0.26~0.28
0.85	0.2939	0.289	0.289	0.307	0.2943	0.296	0.29~0.31
1.0	0.323	0.320	0.322	0.331	0.314	0.323	0.31~0.33

由试验知，护面处于完全稳定状态时条石长度为临界稳定状态时条石长度的1.2~

1.5倍,采用较大值1.5倍,最后得出插砌条石护面完全稳定状态时护面厚度的计算公式为:

$$\text{斜缝插砌} \quad l_A = K_\gamma \cdot 0.744 \frac{\sqrt{m^2 + 1}}{m + 1.2} \cdot H \cdot (0.476 + 0.157d/H)$$

$$\text{平缝插砌} \quad l_A = K_\gamma \cdot 0.744 \frac{\sqrt{m^2 + 1}}{m + 0.85} \cdot H \cdot (0.476 + 0.157d/H)$$

式中: K_γ ——容重系数($K_\gamma = K_s$)。

3. 通过水工模型试验还得出编写渔港及其它海岸防护工程设计标准、技术规范有关的试验数据:

(1) 插砌条石护面防波堤堤前波浪形态主要有破碎波和非破碎波。相对水深 $d/H = 1.5 \sim 2.5$ 为两种波态的临界范围,大于此范围一般产生非破碎波,小于此范围产生破碎波。

(2) 插砌条石护面失稳,首先由单个条石跳脱,继而出现少量条石跳脱,最后出现插砌条石大片脱落,护面失稳,失稳位置主要在静水面以下一个波高范围的区域。

(3) 插砌凹凸坡面的稳定性,比插砌平整坡面的稳定性略强。

(4) 在坡度较陡($m = 0.6 \sim 2$)情况下,条石间摩擦力可以使护面厚度减小(摩擦系数 $f = 0.5$ 时可减小 26%~54%),但坡度过陡应注意防波堤的整体稳定,建议在采用 $m = 0.6$ 时应慎重。

(5) 试验测得护面条石间的摩擦系数为 0.6~0.9。

(6) 当堤前水深为 4~7 米,坡度系数 $m = 0.6 \sim 2$ 范围内,波浪的爬高值一般为波高的 1.4~2.8 倍。

(7) 当堤前水深为 7~13 米,波高不小于 3 米,胸墙高为 1.5 米条件下,防波堤的超高与波高相同时,波浪均发生越顶情况。

(8) 凹凸坡面的波浪爬高,一般约是平整坡面的 86%~94%。

(9) 波浪爬高的试验值,比按《海港水文》规范方法计算值小,规范计算平均值为试验平均值的 1.17 倍。

(10) 在堤前水深为 5~10 米范围内,当防波堤超高为堤前波高的 0.92~1.5 倍时,堤后波高一般是堤前波高的 0.32~0.17 倍。

(11) 防波堤有胸墙时堤后波高,是无胸墙时堤后波高的 37%~92%。

(12) 坡脚抛石棱体稳定块石重量,采用直墙建筑抛石基础稳定块重计算法,计算值与试验结果基本相符。

(13) 波浪作用下,坡脚抛石棱体块石的稳定性,在有胸墙的情况下,比无胸墙时差。

(14) 不设置胸墙时,堤顶面采用立砌条石,厚度与堤坡护面相同,在相应波浪作用下,试验结果是稳定的。

(15) 当波陡在 $H/L = 1/12 \sim 1/20$ 范围内,护面稳定厚度相差无几,当波陡 $H/L = 1/24$ 时,护面稳定厚度有所减小。

(16) 波浪作用下,插砌护面条石几种稳定状态间的关系为: $l_A/l_B = 1.2 \sim 1.5$; $l_C/l_B = 0.56 \sim 0.88$ 。

结 论

1. 用本文提出的护面厚度计算公式与《海港水文》公式、向金公式三种方法验算 12 个防波堤工程实例。结果表明,本文方法的计算值比较符合实际情况,特别适用于坡度较陡的情况,在 $m < 1.2$ 时,本文方法比向金公式更符合实际;《海港水文》方法的计算值一般偏大。

2. 插砌条石护面防波堤工程,充分利用了护面条石间摩擦力的作用,在波高、水深、地质条件等计算参数相同条件下,可比其它斜坡式防波堤节省约 30% 的建设资金。据统计,福建省平潭县因兴建避风港(主要兴建插砌条石护面防波堤),每年可增收 1.643 亿元。

参 考 文 献

- [1] 交通部, 1978. 海港水文规范。人民交通出版社。北京。
- [2] 交通部, 1987. 防波堤规范。人民交通出版社。
- [3] 交通部第一航务工程勘察设计院, 1982. 防波堤设计手册。人民交通出版社。
- [4] 华东水利学院、农牧渔业部水产局, 1984. 渔港工程。农业出版社。北京。
- [5] 薛鸿超, 1978. 海岸动力学。人民交通出版社。

A TEST OF PITCHING BREAKWATER WITH RECTANGULAR SLAB STONES

Zhao Xiuzhen

(The Chinese Academy of Fisheries Sciences)

ABSTRACT The mechanical analysis was made to two types of structure models of oblique and plane seams pitched with rectangular slab stones, in regard to the conditions of waves and water flows, thus the basic mechanical equilibrium relationship of critical stability of stones was obtained. On the basis of 40 varied structure section models and 1,380 times of wave model test was then made non-dimension analysis of relevant factors which may affect the thickness of pitched stones. As a result, the calculation formula for determining the thickness of building pitching stones were put forward, which may provide a theoretical framework for engineering design of breakwaters. Besides, some experimental results about the standard for breakwater design as well as some analytic ideas were also provided in this paper.

KEYWORDS pitching with rectangular slab stones, breakwater, wave model test