

· 综 合 ·



# 斜坡堤护面块体的安全度分析

李贺青, 柳玉良

(海军工程设计研究院, 北京 100070)

**摘要:** 斜坡堤护面块体的稳定重力通常按赫德森公式计算, 但其安全水平并不明确。提出护面块体安全度的概念, 推导出其数值为 $K_N=2.2$ , 两组断面模型试验的结果验证了这个数值是合适的。利用护面块体的安全度, 可以客观确定护面块体的稳定重力、新型护面块体的稳定系数, 还可用来校验现有各种护面块体稳定系数的合理性。

**关键词:** 斜坡式防波堤; 护面块体; 安全度

中图分类号: TV 871.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0013-05

## Safety factor for armor blocks of rubble mound breakwater

LI He-qing, LIU Yu-liang

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

**Abstract:** The stable weight of armor blocks of sloping breakwaters is calculated by Hudson formula, yet it is indefinite for its safety level. The concept of safety factor for armor blocks and its value of  $K_N=2.2$  is given in this paper. Model experiments certify that the value of safety factor is appropriate. The safety factor can be used in determining the stable weight of armor blocks, the coefficient of stability for new-type armor blocks, and in checking the rationality of stability coefficient for all kinds of armor blocks.

**Key words:** rubble mound breakwater; armor blocks; safety factor

### 1 问题的提出

斜坡式防波堤是最古老、也是在今天应用最广的一种防波堤结构形式。它主要是由块石等散体材料堆筑的堤心和块石或人工块体护面两部分构成。块石护面只能抵抗较小的波浪, 仅用于水深较小的防波堤, 当代斜坡堤护面主要采用人工块体的护面形式。护面块体直接承受波浪打击, 保护内部的堤心材料, 对防波堤在波浪作用下的安全起着关键作用。护面块体在波浪作用下的稳定重力通常按赫德森公式计算, 我国防波堤设计规范也采用此式, 但对护面块体稳定重力的安全性问题却一直没有明确。无论是过去采用的安全系数法, 还是现在采用的基于概率理论的分项系数法, 在护面块体稳定重力的计算公式中都没有体现。在波浪作用下, 影响护面块体稳定的因素复杂, 计算出的块体重力往往都需要模型试

验的检验。模型试验中经常会遇到护面块体不稳定的情况, 需要根据试验结果对块体重力进行调整, 但重力增大到多少合适, 却没有客观的依据, 一般凭经验甚至凭感觉加大块体重力, 只要模型试验结果稳定就在实际工程中实施。这样确定的块体重力, 带有很大的随意性, 无法评价其在实际工程中的安全程度。为此, 本文对护面块体的安全性问题进行分析 and 探讨。

### 2 护面块体的安全度

#### 2.1 安全度的概念

我国防波堤设计规范<sup>[1]</sup>规定, 护面块体的稳定重力按下式计算:

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

式中:  $W$ 为单个块体的稳定重力;  $\rho_b$ 为块体材

收稿日期: 2013-09-30

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。

料的密度； $H$ 为计算波高 $H_{13\%}$ （ $\bar{H}/d < 0.3$ 时采用 $H_{5\%}$ ）； $K_D$ 为块体稳定系数； $S_b = \rho_b / \rho_0$ ， $\rho_0$ 为水的密度； $\alpha$ 为斜坡与水平面的夹角。

按照式（1）计算得到的护面块体重力是稳定重力，波高即使在一定程度上超过计算波高，护面块体也能保持稳定，也就是说，护面块体的重力有一定的安全富裕。保持块体重力不变，逐渐增大波浪的波高，块体最终就会出现失稳；同样，保持波高不变，逐渐减小块体重力，块体也会出现失稳。护面块体从稳定到不稳定，应当有一个临界状态。在此状态下，稍微增加波高，块体就会失稳；或者稍微减小块体重力，块体也会失稳。与临界状态相对应，护面块体和波高关系符合式（1）时的状态可称为稳定状态，波高为稳定波高。

护面块体临界稳定状态类似于工程结构可靠度中极限状态的涵义。在极限状态下， $R-S=0$ （ $R$ 为结构抗力， $S$ 为结构作用效应）。对于护面块体的稳定性，可以把块体重力 $W$ 类似为结构抗力，把波高类似为结构作用效应。护面块体的极限稳定状态就是块体重力刚好能抵抗波浪作用的状态。为使波高略超过极限状态波高的情况下，护面块体依然能保持稳定，护面块体的重力应当有一定的安全富裕，安全度就是描述这一安全富裕的量。

对于设定的波高 $H$ ，将临界稳定状态下的护面块体重力称为临界重力 $W_C$ ；或者对于设定的护面块体重力 $W$ ，将临界稳定状态下的波高称为临界波高 $H_C$ 。

将临界重力和按式（1）计算的稳定重力进行比较，就可以分析稳定重力的安全性。定义稳定重力和临界重力的比值为护面块体的安全度 $K_N$ ，即：

$$K_N = \frac{W}{W_C} \quad (2)$$

将 $H$ 和 $W_C$ 代入式（1）可得到护面块体的临界稳定系数 $K_{DC}$ ，或者将 $W$ 和 $H_C$ 代入式（1）也可以得到同样结果：

$$K_{DC} = 0.1 \times \frac{\rho_b g H^3}{W_C (S_b - 1)^3 \cot \alpha} \text{ 或}$$

$$K_{DC} = 0.1 \times \frac{\rho_b g H_C^3}{W (S_b - 1)^3 \cot \alpha} \quad (3)$$

由安全度的定义和式（3）还可以得出

$$K_N = \left( \frac{H_C}{H} \right)^3 \quad (4)$$

$$K_N = \frac{K_{DC}}{K_D} \quad (5)$$

之所以采用安全度的称谓，是因为这一参数并不直接出现在确定护面块体稳定重力的式（1）中，而是隐含在公式的稳定系数里，因此不宜使用工程可靠度理论中的分项系数概念，也不宜使用安全系数的概念。

### 2.2 安全度的值

对于设定的波高 $H$ ，在临界状态下，参照式（1）可得到护面块体的临界重力 $W_C$ 和临界稳定系数 $K_{DC}$ 之间的关系：

$$W_C = 0.1 \times \frac{\rho_b g H^3}{K_{DC} (S_b - 1)^3 \cot \alpha} \quad (6)$$

参照结构设计中的分项系数法，在式（6）中对波高 $H$ 增加一个扩大系数 $\lambda_H$ ，就可得到护面块体的稳定重力。在有关规范中，波浪力的分项系数 $\lambda_p=1.3$ ，而波浪力一般与波高为线性关系。为和我国工程结构可靠度标准规定的可靠指标相一致，参照波浪力的分项系数，取扩大系数 $\lambda_H=1.3$ ，通过式（6）得到护面块体的稳定重力：

$$W = 0.1 \times \frac{\rho_b g (1.3H)^3}{K_{DC} (S_b - 1)^3 \cot \alpha} = 2.2W_C \quad (7)$$

将 $W=2.2W_C$ 代入式（2），得到 $K_N=2.2$ 。

以钩连块体为例，法国规定波高采用 $H_{13\%}$ ，块体稳定系数 $K_D=12$ ，并指出这相当于对波高 $H_{13\%}$ 考虑了1.36的安全系数，或对块体重力考虑了2.52的安全系数<sup>[2]</sup>。

我国现行防波堤规范规定，扭王字块体的块体稳定系数 $K_D=18$ ，似乎高于法国规定的块体稳定系数。但我国规范规定<sup>[3]</sup>， $\bar{H}/d < 0.3$ 时波高采用 $H_{5\%}$ ，稳定系数事实上同法国的规定是基本一致的。对此论述如下：

1) 浅水条件下, 累积率波高。

$$H_r/\bar{H} = \left[ \frac{4}{\pi} (1 + H/\sqrt{2\pi}) \ln \frac{1}{F} \right]^{\frac{1-H}{2}} \quad (8)$$

式中:  $H^* = \bar{H}/d$ 。由此得到  $\bar{H}/d = 0.1 \sim 0.3$  时,  $H_{5\%}/H_{13\%} = 1.19 \sim 1.14$ , 则  $(H_{5\%}/H_{13\%})^3 = 1.68 \sim 1.50$ 。

2) 注意到稳定系数  $K_D = 18$  和  $K_D = 12$  的比值  $18/12 = 1.5$ 。

3) 由此可知, 利用式(1)计算护面块体重力, 在  $\bar{H}/d = 0.1 \sim 0.3$  时, 波高采用  $H_{5\%}$  和稳定系数  $K_D = 18$  得到的结果为采用  $H_{13\%}$  和  $K_D = 12$  所得结果的 1.1 ~ 1.0 倍。

综上所述, 利用式(1)计算护面块体重力, 波高采用  $H_{5\%}$  和稳定系数  $K_D = 18$  与波高采用  $H_{13\%}$  和  $K_D = 12$  所得结果是基本一致的。

如果法国方法的安全系数为 2.52, 则按我国规范得到的结果也有 2.52 的安全系数, 这个数值与前面分析的  $K_N = 2.2$  接近。

通过以上分析, 建议护面块体安全度的值为  $K_N = 2.2$ 。

最后要说明的是, 尽管过去没有安全度的概念, 但在我国防波堤规范中, 护面块体的稳定系数  $K_D$  体现了安全方面的考虑。稳定系数的数值是通过模型试验确定的, 规范所采用的稳定系数远小于试验数值, 有一定的安全富裕。以扭王字块体为例, 规范规定稳定系数  $K_D = 18$ , 而在模型试验中稳定系数达 40 时护面块体基本都是稳定的, 甚至个别达到 70 以上护面块体也能稳定。

### 3 试验验证

#### 3.1 试验方法

护面块体稳定试验在海军工程设计研究院港工实验室进行。不规则波试验水槽长 81 m, 宽 1.4 m, 高 2.6 m。水槽一端安装有低惯量直流电机及滚珠丝杠系统驱动的不规则造波机, 另一端设有消能设施, 反射率小于 5%。水槽沿宽度方向分成两格, 分别为 0.8 m 和 0.6 m, 宽度 0.6 m 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 ~ 0.5 m, 周期 0.5 ~ 5.0 s 的单向不规则波。

试验采用的护面为扭王字块体, 为消除其他因素对试验结果的影响, 采用全斜坡断面。根据波高和水深相对关系, 试验分为两组。试验 1 中  $\bar{H}/d = 0.15 \sim 0.19$ , 试验 2 中  $\bar{H}/d = 0.10 \sim 0.15$ 。采用一系列不同波高、不同周期的不规则波浪进行试验。试验中扭王字块体随机安放 1 层, 每摆放一次采用 3 ~ 4 种波浪要素进行试验, 每种工况波浪对块体的作用时间为 30 min, 并重复 3 ~ 6 次。

#### 3.2 试验 1

护面块体稳定试验采用全斜坡断面(图1), 坡面坡度 1 : 1.5, 堤顶至静水面下 0.175 m 范围内随机安放 1 层 30 g 扭王字块体。试验主要观测 30 g 扭王字块体在波浪作用下的稳定性, 30 g 扭王字块体以下至坡底以大块体稳定护面。

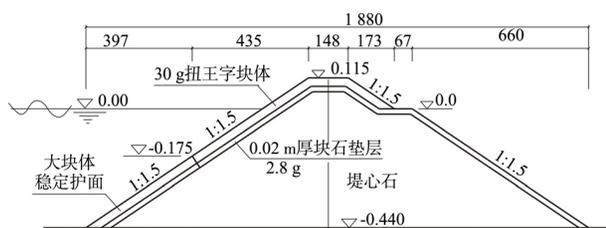


图1 试验断面 1

试验波要素见表 1。各组次水深均为 0.44 m, 波高  $H_{13\%} = 0.100 \sim 0.126$  m。

表 1 试验 1 波浪要素

组次	d/m	$\bar{T}$ /s	$H_{5\%}$ /m	$H_{13\%}$ /m	$\bar{H}$ /m	$\bar{H}/d$
1-11	0.44	1.00	0.118	0.100	0.065	0.15
1-12	0.44	1.21	0.120	0.102	0.067	0.15
1-21	0.44	1.07	0.126	0.107	0.070	0.16
1-22	0.44	1.29	0.126	0.107	0.070	0.16
1-31	0.44	1.12	0.139	0.119	0.078	0.18
1-32	0.44	1.36	0.138	0.117	0.077	0.18
1-41	0.44	1.22	0.147	0.126	0.083	0.19
1-42	0.44	1.43	0.146	0.125	0.083	0.19

试验观察到, 破坏位置基本都在水位下 1 倍波高  $H_{13\%}$  以内, 并且在同样的波要素作用下, 每次块体的破坏程度和位置都不尽相同, 失稳情况比较离散, 试验结果见表 2。

因  $\bar{H}/d < 0.3$ , 采用累积频率 5% 波高  $H_{5\%}$  分析块体稳定性。为确定块体的临界稳定波高, 对

同一波要素测得的不同失稳率取平均值 $\bar{n}$ ，绘制 $\bar{n}$ 与 $W/(\rho_b g H_{5\%}^3)$ 关系曲线(图2)。从图2拟合的曲线可以确定，块体失稳率为0的临界稳定波高 $H_{5\%}=0.124$  m。利用式(1)得到30 g扭王字块体对应的稳定波高 $H=0.092$  m，由式(4)得护面块体安全度 $K_N=2.46$ 。

表2 试验1稳定性观测结果

组次	重复次数	失稳率n/%	$\bar{n}/\%$
1-11	3	0, 0, 0	0
1-12	3	0, 0, 0	0
1-21	5	6.1, 4, 0, 0, 0	2
1-22	4	2, 2, 0, 2	1.5
1-31	6	1.8, 11.5, 4, 5.8, 大面积破坏, 1.9	5
1-32	6	31, 0, 4, 9.6, 21, 5.7	11.9
1-41	4	16.4, 0, 29.5, 15.5	15.4
1-42	1	9.9	9.9

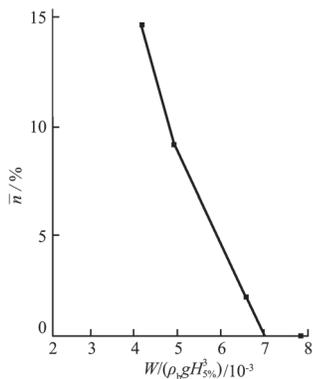


图2 试验1中 $\bar{n}$ 与 $W/(\rho_b g H_{5\%}^3)$ 关系曲线

### 3.3 试验2

试验2同样采用全斜坡结构断面，堤顶至静水面下0.13 m范围内随机安放1层20 g扭王字块体，块体以下至坡底以大块体护面(图3)。

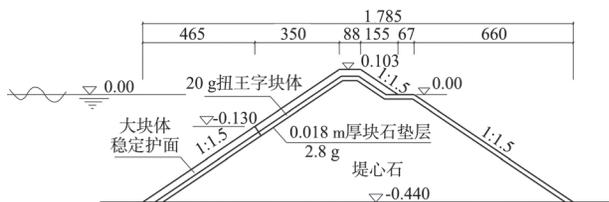


图3 试验断面2

试验波要素见表3。水深0.44 m，波高 $H_{13\%}=0.076 \sim 0.104$  m， $\bar{H}/d=0.11 \sim 0.15$ 。

表3 试验2波要素

组次	d/m	$\bar{T}/s$	$H_{5\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$\bar{H}/m$	$\bar{H}/d$
2-11	0.44	0.91	0.091	0.076	0.049	0.11
2-12	0.44	1.01	0.094	0.079	0.051	0.12
2-13	0.44	1.11	0.095	0.080	0.052	0.12
2-21	0.44	0.93	0.103	0.088	0.057	0.13
2-22	0.44	1.02	0.104	0.088	0.057	0.13
2-23	0.44	1.17	0.103	0.087	0.056	0.13
2-31	0.44	1.00	0.110	0.094	0.061	0.14
2-32	0.44	1.10	0.114	0.097	0.063	0.14
2-33	0.44	1.25	0.110	0.094	0.061	0.14
2-41	0.44	1.02	0.123	0.104	0.068	0.15
2-42	0.44	1.15	0.120	0.102	0.066	0.15
2-43	0.44	1.31	0.122	0.104	0.068	0.15

表4为试验结果。相同波要素作用下，每次观测得的块体失稳情况比较离散，破坏程度和位置也不尽相同。

在波浪作用下，观测到的试验现象及结果与试验1非常接近，波高及波周期对块体的稳定性均有影响。绘制块体失稳率 $\bar{n}$ 与相对重力 $W/(\rho_b g H_{5\%}^3)$ 的关系曲线，见图4。

表4 试验2稳定性观测结果

组次	重复次数	失稳率n/%	$\bar{n}/\%$
2-11	1	0	0
2-12	1	0	0
2-13	1	0	0
2-21	3	0, 0, 1.9	0.6
2-22	3	0, 1.9, 0	0.6
2-23	5	5.7, 1.9, 0, 0, 0	1.5
2-31	1	0	0
2-32	1	0	0
2-33	2	3.8, 0	1.9
2-41	4	0, 5.7, 13.4, 14.9	8.5
2-42	4	0, 0, 7.5, 5.6	3.3
2-43	1	0	0

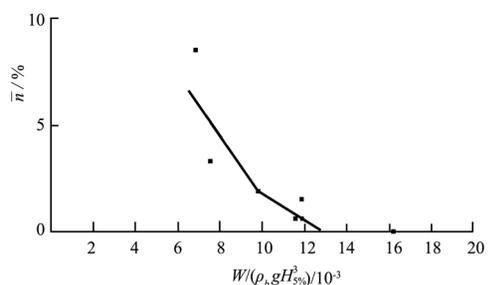


图4 试验2中 $\bar{n}$ 与 $W/(\rho_b g H_{5\%}^3)$ 关系曲线

从拟合的曲线中确定20 g扭王字块体失稳率为0的临界稳定波高 $H_{5\%}=0.101$  m。利用式(1)得到20 g扭王字块体对应的稳定波高 $H=0.080$  m, 由式(4)得护面块体安全度 $K_N=2.00$ 。

### 3.4 验证结论

试验1波浪范围 $\bar{H}/d=0.15 \sim 0.19$ , 试验得出护面块体安全度 $K_N=2.46$ ; 试验2波浪范围 $\bar{H}/d=0.10 \sim 0.15$ , 护面块体安全度 $K_N=2.00$ 。考虑到护面块体稳定性试验影响因素多、离散性大, 试验结果同安全度的建议值 $K_N=2.2$ 是较为一致的。

## 4 安全度的应用

引入护面块体安全度的概念, 防波堤规范中护面块体稳定重力所包含的安全水平就有了量化的概念。利用护面块体的安全度, 在进行波浪作用下防波堤的稳定性试验中, 可以客观确定护面块体的稳定重力; 在进行新型护面块体的稳定性研究中, 可以客观地确定稳定系数; 还可以用来校验现有各种护面块体稳定系数的合理性。

例如, 利用安全度的概念就可以分析文献[4]中双联块体的稳定系数。文献[4]通过模型试验得到了双联块体的临界稳定系数为20.04, 但没给出用于确定稳定重力的稳定系数, 如何确定稳定

重力仍然未知。利用安全度建议值 $K_D=2.2$ , 通过式(5), 容易得出双联块体的稳定系数 $K_N=9$ 。对于文献[4]提到的极端高水位50a一遇波高 $H_{13\%}=4.97$  m, 利用式(1)算得稳定重力82 kN, 实际采用80 kN是适当的。

## 5 结论

护面块体安全度是描述斜坡堤护面块体的稳定重力安全性的量, 本文推导出安全度的值为 $K_N=2.2$ , 并得到了在 $\bar{H}/d=0.10 \sim 0.19$ 范围内进行的断面模型试验的验证。利用安全度的概念, 可以客观确定护面块体的稳定重力和新型护面块体的稳定系数、校验现有各种护面块体稳定系数的合理性。

### 参考文献:

- [1] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [2] 严恺. 海港工程[M]. 北京: 海洋出版社, 1996.
- [3] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].
- [4] 陈汉宝, 戈龙仔, 王美茹, 等. 双联块体稳定性试验研究及参数测定[J]. 水运工程, 2013(6): 20-23.

(本文编辑 武亚庆)

## · 消 息 ·

### 中国港湾积极践行“五商中交”战略 签约印尼EPC合同

日前, 中国港湾与印尼合作方PT. EQUATOR SUMBER ENERGY公司在北京签署了印尼DBK-MRC煤炭开发及运输通道基础设施项目的框架协议、股份购买协议、股东协议及项目的EPC合同, 合同额近9亿美元, 工期42个月, 特许经营期为40年。

该项目位于印尼中加里曼丹岛, 项目旨在通过建设165公里长的道桥及对应的出运、转运码头, 打通煤矿的运输通道, 工程建成后由项目公司以部分自营和分包的方式, 实现煤炭的开采、运输和销售, 并获取投资回报。该项目各项协议的签署, 是中国港湾积极发挥海外业务平台作用, 推动“五商中交”战略在海外落地的一项重要成果。

(摘编自《中国交通建设网站》)