

波浪作用下混凝土砌块护坡稳定性试验研究

潘军宁¹ ,王登婷¹ ,吴美安² ,杨正己¹

(1. 南京水利科学研究院河流海岸研究所 ,江苏 南京 210024 ; 2. 淮河水利委员会水利水电开发中心 ,安徽 蚌埠 233001)

摘要 :针对一种新型的混凝土护面砌块 ,分别采用规则波和不规则波进行波浪水槽试验 .在分析研究波浪对砌块护坡作用机理的基础上 ,通过护面砌块稳定性系列试验得出了规则波和不规则波作用下的砌块厚度计算公式 .试验结果表明 ,块体厚度和波高成正比 ,并和破波参数、块体水下相对密度等因素有关 .通过与混凝土砌块和混凝土板的几种常用厚度计算公式的比较 ,验证了该计算公式的合理性 .

关键词 :混凝土砌块 ;护坡 ;波浪 ;稳定性 ;模型试验

中图分类号 :TV871 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2005)04-0476-06

目前国内外常用的堤坝护坡形式有抛石、干砌石、浆砌石、混凝土板、沥青混凝土等 .欧美发达国家 20 世纪 80 年代就已采用混凝土砌块作为堤坝的护坡材料 .与传统的砌石护坡相比 ,混凝土砌块有外形规则美观、对环境破坏小、易于机械化施工和施工质量易控制等优点 .混凝土砌块对堤身变形的适应性又优于混凝土板 ,可应用于基础较差的堤坝 .因此 ,在石料来源匮乏或因环保原因不能开采、地基可能有明显变形的情况下 ,混凝土砌块是护坡结构的一种较好选择 .

护面结构的主要作用是避免垫层和基土受波浪和水流的掏刷 ,因而需要抵抗波浪和水流的作用 .对于风浪较强的水库、江河和湖泊的堤坝而言 ,波浪是护面结构设计的主要控制因素 ,需要考虑护面结构在波浪作用下的稳定性和强度 .目前有关混凝土砌块稳定性的试验研究资料尚不多见 ,主要是荷兰等欧美国家的一些研究成果^[1~3] .混凝土砌块的形状对其稳定性有明显影响 ,不同结构形式的砌块在波浪作用下的稳定性有明显差异 .已有研究均针对一些特定的砌块形式 ,所提出的厚度计算公式的系数仅给出一个变化范围 .

目前国内一些水利工程也尝试用混凝土砌块作为堤坝护坡 ,但在实际应用中砌块块型的选择和砌块厚度的确定尚缺乏理论指导 .为研究砌块在风浪作用下的稳定性 ,笔者利用波浪水槽进行了一种典型砌块形式的系列模型试验 ,并依据试验结果求出了规则波和不规则波作用下的砌块厚度计算公式 .

1 试验内容和试验方法

1.1 试验内容

试验所采用的砌块形式如图 1 所示 .这种砌块在铺设时与相邻砌块彼此咬合(图 2) ,砌块之间的摩擦力和咬合作用有利于砌块稳定 .试验针对典型土坝进行 ,断面结构如图 3 所示 .坝体材料为均质黏土 ,黏土上覆盖一层 15 cm 厚的碎石垫层 ,碎石粒径大于 4 cm ,最上层为混凝土砌块 .对不同水深、不同坝坡坡度和不同块体厚度的组合进行了试验 .试验组合包括 :

- a. 试验水深(原型) :12 m ,8 m ,6 m ,4 m .
- b. 坝坡坡度 :1:2 ,1:3 .
- c. 块体厚度(原型) :8 cm ,10 cm ,12 cm ,15 cm .

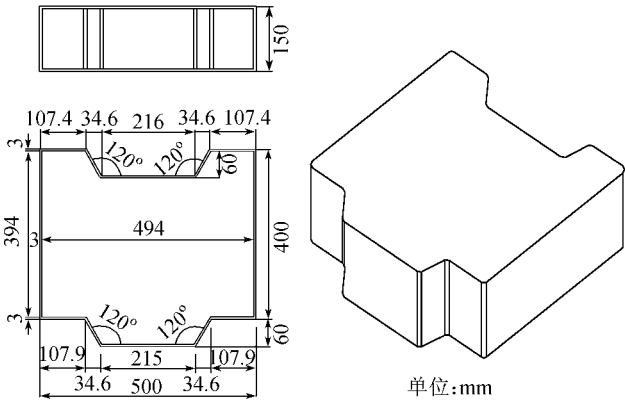


图 1 混凝土护面砌块结构形式

Fig.1 Configuration of the concrete block

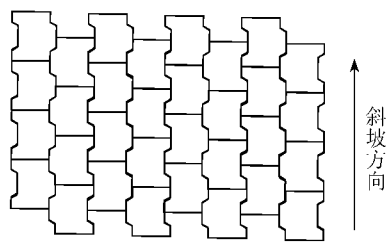


图 2 砌块铺砌方式
Fig.2 Placement of concrete blocks

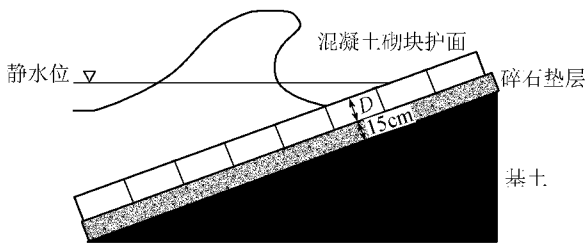


图 3 试验断面结构
Fig.3 Cross section of the test structure

对每一种试验组合,采用不同波高、不同波周期进行试验,以确定每一种厚度的块体满足稳定所对应的波要素.试验波浪类型为规则波和不规则波.

1.2 试验仪器设备

波浪试验在南京水利科学研究院河流海岸研究所的波浪水槽中进行.水槽长 62 m、宽 1.8 m、深 1.8 m.水槽的工作段分割成 0.6 m 和 1.2 m 两部分.0.6 m 宽的部分用来安放模型断面和进行模型试验,另一部分用于扩散造波板的二次反射波.水槽的一端配有消浪缓坡,另一端配有推板式不规则波造波机,由计算机自动控制产生所要求模拟的波浪要素(图 4).该造波系统可根据需要产生规则波和不规则波.波浪要素用电容式波高仪测量,由计算机自动采集和处理.

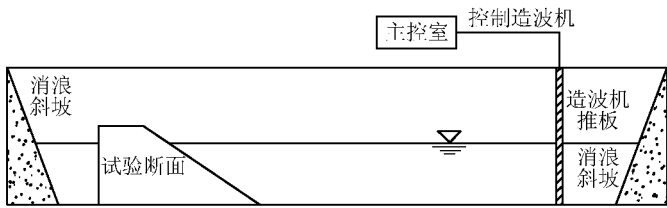


图 4 波浪水槽断面
Fig.4 Cross section of the wave flume

1.3 试验方法

试验采用正态模型,按照 Froude 相似律设计.模型长度比尺取为 1:10.

1.3.1 堤坝断面和护面砌块模拟

将堤坝断面按 1:10 的长度比尺制成模型.模型中结构与原型保持几何相似,护面砌块按选定的模型比尺缩小制作,其重量比尺为长度比尺的 3 次方.各物理量原型比模型的比尺如下:几何比尺 $L_r = 10$;时间比尺 $T_r = L_r^{1/2}$;重量比尺 $W_r = L_r^3$;压强比尺 $p_r = L_r$;速度比尺 $V_r = L_r^{1/2}$.护面块体用水泥、砂、铁粉加水配制,重量误差小于或等于 3%.

1.3.2 波浪模拟

分别采用规则波和不规则波进行试验.规则波采用 $H_{5\%}$ 波高和平均周期,不规则波的波谱采用《海港水文规范》^[4]推荐的风浪谱.波浪按重力相似准则模拟,规则波做到波高和波周期的相似,不规则波模拟波谱.将按模型比尺换算后的特征波要素输入计算机,产生造波讯号,控制造波机产生相应的规则波和不规则波序列.模型试验中波高和周期模拟值与设计值的误差控制在 $\pm 5\%$ 以内.造波机每次连续产生的规则波波数超过 20 个,不规则波波数超过 120 个.每一波况累计试验持续时间不小于原型 2 h,对最终选定的护面块形式累计试验时间不小于原型 3 h.为保证试验结果的可靠性,每组试验至少重复 3 次.当 3 次重复试验的失稳率差别较大时,则增加重复试验次数.每次试验护面块体均重新摆放.

1.3.3 护面块稳定性判别标准

关于护面块的稳定标准《海港水文规范》规定:波浪作用下斜坡式建筑物护面块体(块石或人工块体)的稳定标准,以容许失稳率 $n\%$ 表示,即静水位上下一个波高范围内,容许被波浪打击移动和滚落的块体个数所占的百分比.对于单层铺砌的护面块体,只要有一块块体在波浪作用下被吸出、脱落,或累计位移超过单个护面块厚度时即判定为失稳(即失稳率 $n\% = 0$).

对于松散的砌块(砌块连接缝不封闭、砌块间不用缆绳或钢筋串联),在波浪作用下如果一块脱出,其下的垫层或基土将因波浪淘刷而流失,进而影响其他砌块的稳定.在波浪持续作用下,可能造成大面积护坡砌块失稳.因此,本文将一块砌块脱出即视为破坏,或称为失稳.这与《海港水文规范》对于单层护面块体的规定一致.通常将护面砌块在某一风浪要素作用下发生跳动、位移且临近滚落损坏而没有发生损坏的状态称为临

界稳定,此时的作用波高称为临界波高.

2 波浪作用下砌块失稳机理

波浪传播至斜坡堤前时,由于结构物的存在,波浪将发生变形、破碎和反射.堤前波浪的形态(变形、破碎和反射)与波浪要素、堤坝外部结构特征以及内部结构特征有关.波浪要素包括波高和波周期,堤坝外部结构特征主要包括堤坝坡度、有无平台、堤脚水深、堤顶高程等,内部结构特征包括护面结构类型、尺寸、开孔率以及垫层类型、堤身材料等.对护面比较光滑平整的单一斜坡而言,波高、波周期和坡度是决定波浪形态的主要因素.

内陆水域堤坝主要受波长较短的风浪作用,坝坡常为 1:2~1:3,堤前波浪形态一般属于卷破波.在这种条件下,波浪爬高和落深较大,波浪作用力也较大.如图 5 所示,卷破波对护面层的作用可分为破碎、冲击、上爬和回落 4 个阶段.当波峰来临时,波浪在堤坡上发生破碎,波峰向前翻卷.随后大量水体自上而下地冲击坡面,在砌块上表面产生较大的正压力.该压力在冲击点处最大,自此向上、向下递减.位于水体冲击点的砌块被强大的冲击力推向堤身,而在其上、下未受冲击的砌块则受到浮托力的作用.然后水体沿斜坡向上涌高(上爬),部分水体进入砌块下部垫层及堤体内部,堤内水位升高.水体上爬至最高点后开始回落,砌块上表面水体下落较快,砌块下方垫层内水位下降较慢,护面层内外有一水头差,从而产生净顶托力(图 6).当护面层外水位降至最低时(即当下一个波打击斜坡前瞬间)净顶托力最大.该顶托力自最低水位点向上、向下递减.此时垫层内孔隙水从砌块之间缝隙排出.

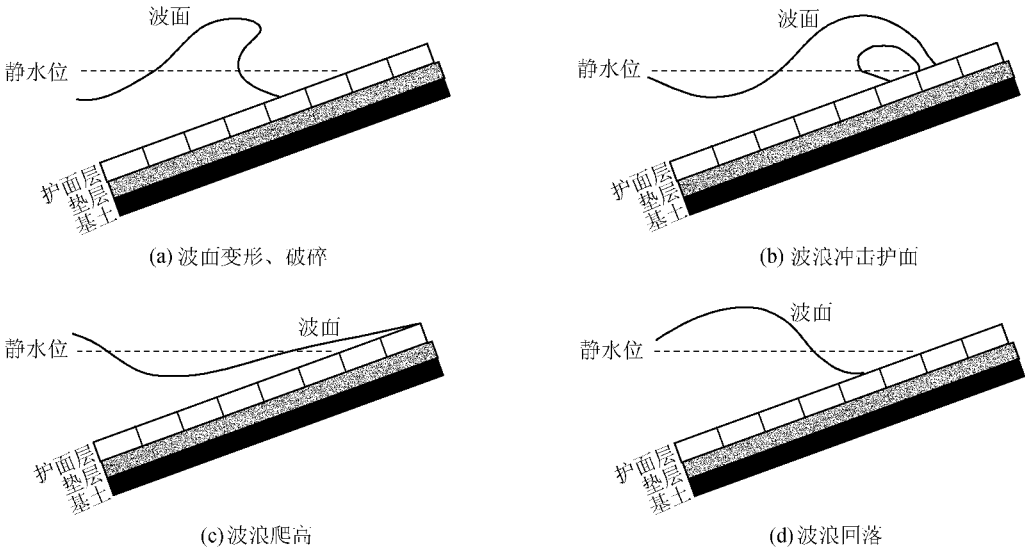


图 5 卷破波对护面层的作用过程

Fig.5 Procedure of plunging wave action on concrete blocks

砌块在静水中受到的力包括重力(扣除浮力)、垫层对砌块的支撑力以及砌块和垫层间的摩擦力.当波浪作用下砌块处于临界稳定状态时,砌块上表面受到波浪的压力、下表面受到垫层中水流的顶托力作用.此外还有重力、砌块之间的支撑力和摩擦力(图 7).特殊形状的砌块还存在相互咬合作用,此时垫层的支撑力、砌块和垫层间的摩擦力不再起作用.其中砌块上、下表面受到的压力和顶托力的合力(称为浮托力)是使块体运

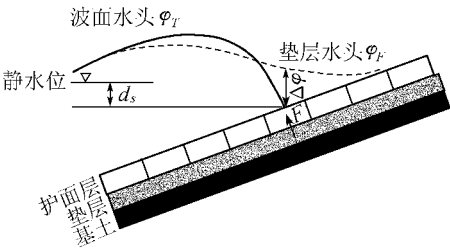


图 6 砌块上、下表面压强差示意图

Fig.6 Pressure difference between upside and bottom of the blocks

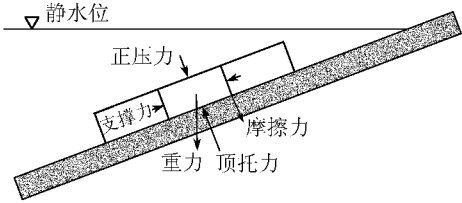


图 7 波浪作用下砌块临界稳定时受力情况

Fig.7 Forces acting on the block in critical stability

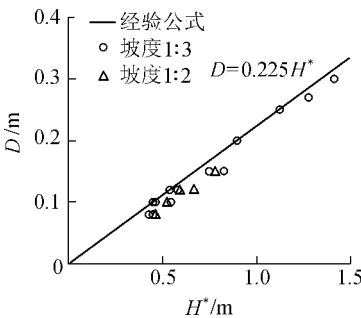
动的主要动力因素,而重力、砌块间的咬合和摩擦力起抑制砌块运动的作用.当砌块所受净浮托力大于砌块重量及砌块间摩擦和咬合力时,砌块被托起,以至脱落失稳,护面层遭到破坏.

砌块护坡的另一种破坏形式是面层整体向下滑动.其滑动推力为砌块净重力(除去浮力)沿斜坡方向的分量,其抗滑力为砌块与其下层基础间的摩阻力以及坡脚结构的支撑力.摩阻力和正应力成正比,在波浪作用下护面层受到顶托力作用,摩阻力相应减小,当砌块所受推力超过其抗滑力而堤脚又不能足够支撑时就会产生滑动破坏.因工程中常采取相应措施(如在堤脚做趾结构或将堤坡放缓)避免砌块护面的滑动,故滑动破坏并不常见.笔者的试验主要研究前一种破坏形式.

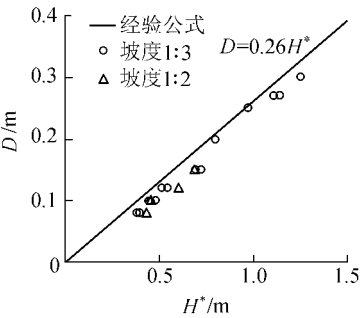
3 试验结果及分析

3.1 试验结果

针对不同块体厚度、不同坝坡坡度和不同水深的组合进行了系列试验.对于每一种组合,先以较小波高的波浪作用于砌块,如砌块稳定,再逐步增大波高,直至砌块失稳.试验发现,波峰来临时,波浪在堤坝前发生



(a) 规则波 ($H^* = H\xi^{0.5}/\Delta$)



(b) 不规则波 ($H^* = H\xi^{0.5}/\Delta$)

图 8 试验结果

Fig.8 Test results

水的密度; ξ ——破波参数; α ——坝坡角度; L ——堤前波长; R ——系数,对于本次试验块型, R 取值为 0.225.

b. 不规则波作用下砌块厚度计算公式

$$\Delta D/H_s = R\bar{\xi}^{0.5} \tag{2}$$

$$\bar{\xi} = \tan\alpha/\sqrt{H_s/L}$$

式中: R ——系数,对于本次试验块型, R 取值为 0.26; H_s ——有效波高; $\bar{\xi}$ ——破波参数; L ——堤前平均波长.

翻卷破碎,水体冲击在护面结构上并沿斜坡上溯,随后迅速回落,其破碎形态为典型的卷破波.当波高接近砌块失稳的临界波高时,在波浪持续作用下个别砌块开始上下振动并逐步向上突起,由于周围砌块的摩擦和咬合作用,突起的砌块在某一位置达到平衡而不脱落.当波高大于临界波高时,波浪作用一段时间后多个砌块显著突起,个别砌块向上位移不断增大直至脱落.试验中砌块最先发生失稳的位置一般位于静水位下 0.3~1.0 倍波高范围内.

根据本文砌块失稳机理分析,砌块处于临界稳定状态时,波浪净顶托力与砌块净重力及砌块之间的摩擦力达到平衡.由于波浪压强和波高成正比,故砌块所受净顶托力也和波高 H 成正比.净顶托力的大小还和破波形态有关,可用破波参数 ξ 反映其影响.砌块净重则由砌块水下相对密度 Δ 和砌块厚度 D 决定.规则波和不规则波作用下的试验结果如图 8 所示.从图 8 可见,试验数据和外包络线拟合较好.

根据图 8 得到了砌块在规则波和不规则波作用下的稳定厚度计算公式.

a. 规则波作用下砌块厚度计算公式

$$\Delta D/H = R\xi^{0.5} \tag{1}$$

$$\xi = \tan\alpha/\sqrt{H/L} \quad \Delta = (\rho_c - \rho_w)/\rho_w$$

式中: D ——混凝土砌块厚度; H ——波高; ρ_c ——混凝土砌块密度; ρ_w ——

表 1 本文公式与其他几种计算公式计算结果的比较

Table 1 Comparisons between the present results and those from previous formulae

波浪条件	文献 3 公式 (式 3)) D/m	文献 5 公式 (式 4)) D/m	《堤防工程 设计规范》 公式(式 5)) t/m	前苏联 《规范》公式 (式 6)) t/m	本文公式 (式 2)) D/m
$H_s = 0.72\text{ m}$ $\bar{T} = 3.0\text{ s}$	0.23($F = 3.7$) 0.17($F = 5$) 0.11($F = 8$)	0.19($\Psi = 4$) 0.17($\Psi = 4.5$) 0.15($\Psi = 5$)	0.22	0.21	0.18
$H_s = 0.55\text{ m}$ $\bar{T} = 2.5\text{ s}$	0.17($F = 3.7$) 0.12($F = 5$) 0.08($F = 8$)	0.14($\Psi = 4$) 0.13($\Psi = 4.5$) 0.11($\Psi = 5$)	0.14	0.14	0.13
$H_s = 0.45\text{ m}$ $\bar{T} = 2.5\text{ s}$	0.15($F = 3.7$) 0.11($F = 5$) 0.07($F = 8$)	0.12($\Psi = 4$) 0.11($\Psi = 4.5$) 0.10($\Psi = 5$)	0.12	0.12	0.12
$H_s = 0.38\text{ m}$ $\bar{T} = 2.5\text{ s}$	0.13($F = 3.7$) 0.10($F = 5$) 0.06($F = 8$)	0.11($\Psi = 4$) 0.10($\Psi = 4.5$) 0.09($\Psi = 5$)	0.10	0.10	0.10

注:计算是针对不规则波进行的,坡度 $m = 1:3$, $d = \infty$.

由式(1)(2)可见,护面板体厚度和波高成正比,并与破波参数有关.破波参数中包含坝坡和波陡等因素的影响.坝坡越陡,所需护面板体厚度越大;波高不变时,波周期越长,对应的波长越大,波陡越小,所需护面板体厚度越大;护面板体水下相对密度 Δ 越小,所需护面板体厚度越大.水深的变化只影响波长,对护面板体稳定无直接影响.

3.2 几种计算公式的比较

选择国内外有关混凝土砌块及混凝土板厚度的几个常用计算公式与本文结果进行比较.这些常用计算公式包括:

a. 文献[3]公式

$$\frac{H_s}{\Delta D} = F \xi_p^{-2/3} \tag{3}$$

$$\xi_p = \tan \alpha / \sqrt{H_s / L_p} \quad L_p = g T_p^2 / (2 \pi) \quad T_p = \bar{T} / 0.82$$

式中: ξ_p ——不规则波的破波参数; L_p ——深水时的波长; T_p ——谱峰周期; F ——系数,取值范围为3.7~8.0.

b. 文献[5]公式

$$\frac{H_s}{\Delta D} = \Psi \frac{\cos \alpha}{\xi_p^{0.5}} \approx \frac{\Psi}{\xi_p^{0.5}} \tag{4}$$

式中 Ψ 为系数,松散砌块时 $\Psi=3\sim4$,砌块间有咬合摩阻时 $\Psi=4\sim5$.

c. 《堤防工程设计规范》公式^[6]

$$t = \eta H \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_b - \rho_w} \frac{\bar{L}}{B m}} \tag{5}$$
$$m = \cot \alpha$$

式中: t ——混凝土护面板厚度; η ——系数,开缝板时可取0.075,上部为开缝板、下部为闭缝板时可取0.10; H ——波高,取 $H_{1\%}$; ρ_b ——混凝土板的密度; B ——沿斜坡方向(垂直于水边线)的护面板长度; m ——斜坡坡率; α ——斜坡的坡角.

d. 前苏联 CH288—64《规范》公式^[7]

$$t = 0.07 C \frac{H}{\Delta} \sqrt[3]{\frac{L}{B}} \frac{\sqrt{m^2 + 1}}{m} \tag{6}$$
$$m = \cot \alpha$$

式中: C ——系数,装配式护面板取 $C=1.1$; H ——波高,取 $H_{1\%}$.

由上述计算公式可见,国外关于砌块厚度的计算公式均包含一个或多个待定系数,其取值需根据砌块形式和堤坝结构确定.混凝土板厚度计算公式的适用对象一般为平面尺寸较大的板,由于其不考虑砌块之间咬合及摩擦力的影响,计算结果可能偏保守.

表1比较了本文公式和几种关于混凝土砌块或混凝土板的厚度计算公式的计算结果.从表1可以看出,文献[3]公式中系数 F 取5时的计算值与本文结果十分接近.文献[3]公式是根据混凝土砌块的波浪模型试验得出的,其系数 F 的取值范围为3.7~8,本文砌块试验结果对应的 F 略小于5.0,符合该公式取值范围.文献[5]公式中系数 Ψ 取4.5时的计算值也和本文结果很接近.砌块间有咬合摩阻时 Ψ 的取值范围为4~5,本文结果位于该取值范围之内.混凝土板厚度计算公式(5)和(6),波高较小时其计算结果和本文结果非常一致.但对于较大波高($H_s=0.72\text{ m}$)这2个公式的计算结果比本文结果大20%左右.这是因为波高较大时,所需的砌块厚度也较大,较厚的砌块间的嵌固、咬合和摩擦力作用更为显著,可以有效减小块体稳定所需的厚度,而混凝土板计算公式一般用于计算平面尺寸较大的板,未考虑各板间嵌固、咬合产生的摩擦力作用.可见,在波高较大的情况下,将《堤防工程设计规范》中有关混凝土板的计算公式应用于平面尺寸相对较小的混凝土砌块可能会导致较为保守的计算结果.

4 结 论

a. 笔者针对一种新型混凝土砌块进行了波浪作用下的砌块稳定性系列试验.该砌块可广泛应用于河

道、湖泊、水库等风浪较小水域的堤防护坡。在波浪作用下,砌块失稳的主要原因是砌块上表面水体和垫层中水体的水头差产生的净顶托力,该净顶托力会导致砌块托起并脱落。混凝土砌块最先发生失稳的位置一般位于静水位下 0.3~1.0 倍波高范围内。

b. 通过砌块稳定性系列试验得出了规则波和不规则波作用下的块体厚度经验计算公式。试验结果表明,波高是决定砌块厚度的最直接因素,砌块厚度和波高成正比,并和破波参数 ξ 、块体水下相对密度 Δ 等因素有关。由于现场风浪属不规则波,工程应用中宜采用不规则波试验结果。

c. 与国外常用的砌块厚度计算公式相比,本文结果均位于其系数的合理取值范围之内。混凝土板厚度计算公式仅在小波高条件下,其计算结果与本文结果较为一致;当波高较大时,采用有关混凝土板的厚度计算公式将高估砌块厚度。

d. 本文采用的临界稳定判别标准适用于一般河道、湖泊及海岸堤防。由于现场情况较为复杂,在应用本文公式时可根据工程特点考虑一定的安全系数。

e. 砌块之间的摩擦和咬合力有助于砌块的稳定,为进一步提高砌块的稳定性,可考虑采用立体连锁砌块或砌块用绳索串联等方式。

参考文献：

[1] KLEIN BRETELER M, BEZUIJEN A. Simplified design method for block revetments[A]. In :Proceedings ICE Conference on Coastal Structures and Breakwaters[C]. London :Thomas Telford ,1991. 423—436.

[2] ALLSOP N W H, MCCONNELL K J. Handbook of coastal engineering[M]. New York :McGraw-Hill ,1999. 1—24.

[3] KLEIN BRETELER M, BEZUIJEN A. Design criteria for placed block revetment[M]. Rotterdam :Balkema A A ,1998. 217—248.

[4] JTJ213—98 海港水文规范[S].

[5] THOMAS R S, HALL B. Seawall design[M]. Oxford :Butterworth-Heinemann ,1992. 223—225.

[6] GB 50286—98 堤防工程设计规范[S].

[7] 余广明. 堤坝防浪护坡设计[M]. 北京 :水利电力出版社 ,1987. 182—183.

Experimental study on stability of concrete block revetment under wave action

PAN Jun-ning¹, WANG Deng-ting¹, WU Mei-an², YANG Zheng-ji¹

(1. River and Harbor Engineering Department , Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210024 , China ;
2. Water Conservancy and Hydropower Development Center ,
Huaihe River Water Conservancy Committee , Bengbu 233001 , China)

Abstract :Model tests were carried out on the stability of a new type concrete block revetment under regular and irregular waves in a wave flume. Based on an analysis of the mechanism of wave action on the revetment , formulae for block thickness under the actions of regular and irregular waves were obtained through a series of stability tests. The results show that the block thickness is in direct proportional to wave height and also related to the break parameter and block density in water. Compared with several thickness formulae for concrete blocks and slabs conventionally used , the present formulae give a reasonable result.

Key words :concrete block ; revetment ; wave ; stability ; model test