

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.03.017

周益人, 潘军宁. 堤坝护面开孔砌块抗浪稳定性试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 126-131. (ZHOU Yi-ren, PAN Jun-ning. Experimental studies on stability of perforated concrete block revetment under wave action[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3): 126-131.)

堤坝护面开孔砌块抗浪稳定性试验研究

周益人, 潘军宁

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 护面砌块作为堤坝结构的组成部分,其抗浪能力对堤坝的整体稳定起着重要作用。通过较大比尺物理模型,针对我国堤坝设计的具体情况,对一种新型开孔勾连块体的抗浪稳定性进行试验研究,分析砌块厚度、戕台、波浪周期等因素的影响,得到砌块抗风浪稳定厚度计算式。建议护岸设计中应采用均衡设计的理念,综合考虑波浪荷载,将其平衡分配给护面、垫层和基土,对海岸、河流、大型湖泊和水库等水利工程的护岸和堤坝抗浪稳定设计具有指导意义。

关 键 词: 堤坝护面; 开孔砌块; 稳定性; 波浪

中图分类号: TV139.2⁺6;TV861 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2016)03-0126-06

海岸、河流、大型湖泊和水库等水利工程中的护岸和堤坝,因可能遭受较大风浪的作用而需采用抗浪护面。欧美发达国家自20世纪80年代开始,越来越多地采用混凝土砌块作为堤坝和护岸的护面材料,与传统的混凝土板和块石护面相比,混凝土砌块护面具有相对较好的可适应性和美观性,有较强的抗浪能力。近年来,随着我国经济水平的提高和环保意识的增强,一些大型堤坝工程也开始采用混凝土砌块护面^[1]。对于护坡工程而言,确定护面砌块抗风浪稳定性厚度十分必要。

目前,对于混凝土砌块在波浪作用下的稳定性研究主要采用理论分析与试验结合的方法,对不同型式的砌块提出相应的稳定性计算公式^[2-8]。K. W. Pilarczyk^[8]对波浪作用下护面砌块失稳问题进行了研究,从护坡结构组成方面来看,其失稳原因主要包括4个方面:①波浪上托力引起的砌块失稳;②垫层和反滤层破坏引起的砌块失稳;③下层土体失稳引起的砌块失稳;④护面层滑动引起的砌块失稳。由此提出护面砌块稳定厚度计算公式和垫层设计方法。M. K. Breteler等^[9]和英国《河渠和护岸工程(方案及设计导则)》^[10]也提出过相应的公式。

尽管现有混凝土砌块抗浪稳定性研究成果较多,但由于混凝土砌块的形状、下部垫层和基土条件等对其抗浪稳定性有明显影响,国内外关于砌块厚度的计算公式常包含一个或多个待定系数,取其值需要根据砌块和堤坝的结构而定。本文采用较大比尺物理模型,针对我国堤坝设计的具体情况,对一种新型开孔勾连块体的抗浪稳定性进行试验研究,分析不同因素的影响,提出砌块稳定计算公式。

1 试验概况

本次试验采用正态模型,模型几何比尺为10,按照Froude数相似律设计。模型试验在波浪水槽中进行,水槽长62 m、宽1.8 m、深1.8 m,可同时产生波浪、水流和风。混凝土砌块尺寸为460 mm×340 mm,开孔率为20%,采用2排4个35 mm×140 mm长方形开孔(见图1),干密度为2.4 t/m³。垫层为自然级配砂砾,中值粒径 $d_{50}=37$ mm,筛除小于5 mm的泥沙粒径级配见图2。

收稿日期: 2015-07-13

作者简介: 周益人(1964—),男,浙江宁波人,教授级高级工程师,主要从事海岸工程研究。E-mail: yrzhou@nhri.cn

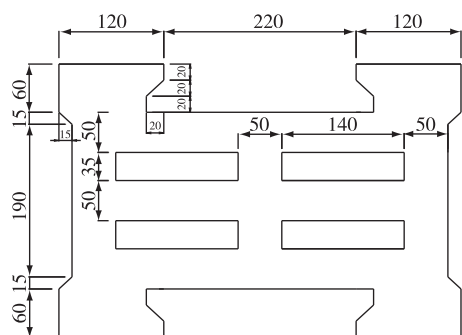


图1 护面砌块结构(单位:mm)

Fig. 1 Structure of concrete armor block (unit: mm)

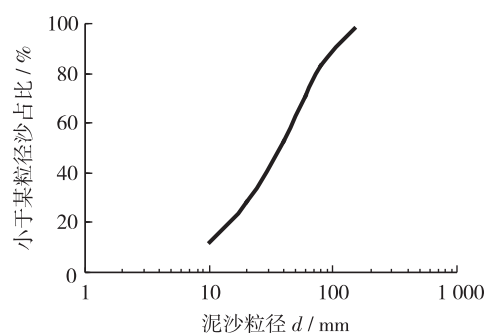


图2 垫层材料级配曲线

Fig. 2 Grading curve of granular filters

对开孔砌块进行不同影响因素的系列试验,试验组合包括:①坝坡坡度分别取 1:2.5, 1:3.0, 1:3.5;②砌块厚度分别取 15, 20, 24, 30 cm;③平均波周期分别采用 3.0, 3.9, 4.5, 6.0 s。

本次试验水深为 11 m(原型值)。以往研究结果表明,水位在戕台附近时,可能对护面砌块稳定产生影响,因此在试验中增加了一组水位在戕台以下 0.4 m 的砌块稳定试验。考虑到波浪作用下砌块护面的稳定程度,砌块临界稳定判别标准分别为标准一和标准二,标准一为护面砌块翘起高度达到砌块厚度的 1/3,坝面明显不平整的状态,标准二为规范稳定标准^[11],即砌块临近脱出。

模型砌块的密度与原型相同,满足几何及质量相似;垫层料级配按模型几何比尺筛选,保证模型砂级配相似。试验采用不规则波,波浪谱为规范谱^[11],波浪作用时间为原型 3 h,采用间隙式生波方式,不规则波每组波列的持续时间为 3.0~5.0 min,波数为 120~150 个。试验中不断增大波高,直至砌块至临界稳定状态,最终测量这个波浪要素,作为其稳定波高。

2 结果及分析

2.1 失稳机理分析

Pilarczyk^[4]对波浪作用下砌块失稳问题进行了详细阐述,主要原因是波浪上托力引起的砌块失稳。波浪在斜坡上的运动过程可分为 4 个阶段,即破碎、冲击、上爬和回落,其中,波浪的“冲击”和“下落”对护面稳定产生重要影响。当波浪对斜坡护面冲击时,护面所承受的正压力非常大,但护面砌块受到下部垫层和基土的支撑,只要垫层和基土具有较高的几何紧密度,变形较小,抗压强度较高,砌块就不会失稳。事实上,对于护面砌块本身稳定而言,波浪下落过程最危险。因为在波浪上爬至最高点时,坝体内部也有水渗入,水位与爬高点相当,当波浪沿斜坡表面回落时,表面水体下落很快,而坝体内孔隙水从砌块之间的缝隙中排出,水位下降较慢,护面层内外将产生一个水头差,形成对护面砌块的向外顶托力(图 3);而此时坡面表面的波浪下落速度很大,对护面产生较大切应力,使其发生整体下滑,同时也会淘刷垫层和下部基土泥沙,造成护坡失稳。

J. L. Loon 等^[5]采用理论和试验相结合的方法,对波浪上托力引起的护面砌块稳定性进行计算。不规则波作用下的块体稳定性计算公式为:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = f\left(\frac{D}{\Delta \xi_p}\right)^{0.67} = f\left(\frac{D k_T}{D_F k_F}\right)^{0.33} \xi_p^{-0.67} \quad (1)$$

式中: H_s 为护面砌块被顶托起时的有效波高; Δ 为混凝土砌块水下相对密度, $\Delta = (\rho_c - \rho_w) / \rho_w$, ρ_c 为混凝土砌块密度, ρ_w 为水的密度; f 为静力稳定系数, $5 < f < 15$,与块

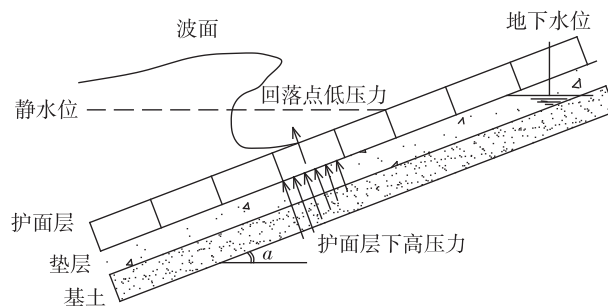


图3 波浪下落过程中砌块受力

Fig. 3 Force on blocks in wave run-down conditions

体间的摩阻力及咬合程度有关; D 为砌块厚度; ξ_p 为破碎参数, $\xi_p = \tan \alpha / (H_s/L_p)^{1/2}$, α 为护坡角度; D_F 为垫层厚度; k_T 和 k_F 分别为护面和垫层的渗透系数; Λ 为渗透长度,它反映了护面层和垫层渗透性之比,由下式表示:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{k_F D_F D}{k_T}} \quad (2)$$

由式(1)可知,影响护岸稳定性的因素是多方面的。如果为了减小波浪上托力而减小垫层渗透性,虽然可提高护面砌块稳定性,但同时也可能降低护坡的土工稳定性;反之,垫层越厚,土工稳定性越好,但护面稳定性就会降低。同时,为了提高护面砌块稳定性,在护面开孔增加孔隙率,如果这时不增大垫层砂粒粒径,就会发生泥沙淘刷破坏;而如果增大垫层砂粒粒径,就会使其渗透性增大,进而产生较大上托力^[12]。

2.2 试验结果分析

护坡破坏机理分析结果表明,在波浪作用过程中砌块、垫层和基土都影响到护面砌块稳定性,这些因素并不总是单独起作用,有时某种因素起主导作用,有时可能又是另一种因素,即使对于同样的砌块类型和垫层条件,由于波浪动力不同有时也会表现出不同的失稳机理。

2.2.1 砌块厚度影响 砌块厚度通常对应于稳定临界波高,同一类型的砌块越厚稳定性也越高。表1为斜坡坡度1:3时本次新型开孔勾连砌块厚度的临界稳定波高试验结果。由表可见,对于较厚砌块,标准一和标准二临界稳定波高相差约1.5倍,但在砌块厚度15 cm,波浪周期6.0 s时相差较小,只有1.2倍左右。

表1 不同砌块厚度临界稳定波高试验结果

Tab. 1 Test results of steady wave height for different block thickness

砌块 厚度/cm	平均 周期/s	不规则波临界有效波高 H_s/m			H_{s2}/H_{s1}
		标准一 H_{s1}	标准二 H_{s2}		
30	6.0	1.44	2.10		1.46
24	4.5	1.27	2.01		1.58
	6.0	1.14	1.69		1.48
20	3.9	1.07	1.59		1.49
	4.5	0.96	1.43		1.50
15	6.0	0.85	1.39		1.63
	3.0	0.96	—		—
	3.9	0.78	1.12		1.43
	4.5	0.75	1.01		1.34
	6.0	0.70	0.85		1.21

图4为厚度30和15 cm砌块在标准二条件下的临界稳定状况。

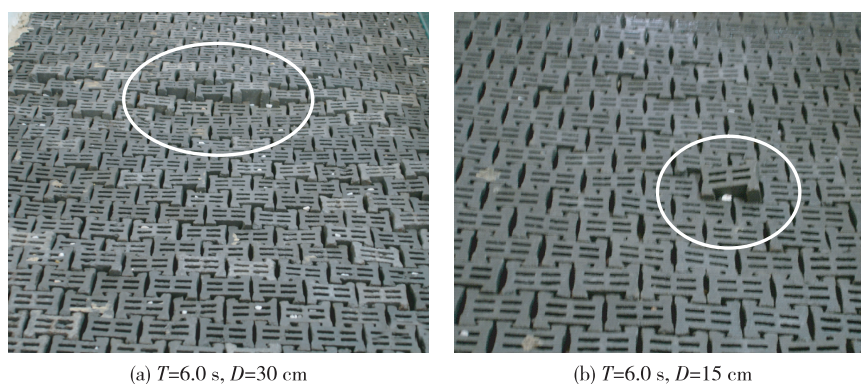


图4 砌块临界稳定状况(标准二)

Fig. 4 Critical steady situation of blocks (criterion II)

由图4可见,不同厚度的砌块护面破坏情况不同,对于厚度 $D=15$ cm的砌块护面,表现为1个或2个砌块被掀起,但护面保持平整,即使在标准二情况下整体护面仍相当平整;而对于厚度 $D=30$ cm的砌块护面,

表现为较大范围的砌块突起和下陷,护面明显不平整,在标准二情况下护面已变得极不平整。这主要是由于开孔砌块厚度较大时,砌块重力及咬合阻力较大,对应的临界波高较大,不仅对砌块产生较大的冲击力,也使其下部垫层变形加大,使护面变得凸凹不平,此时护面砌块的稳定性已受到波浪上托力和垫层稳定性的双重影响。而对于厚度较小的砌块,对应的临界波高较小,此时波浪还不足以对垫层产生较大影响,因而砌块的稳定主要受波浪上托力的控制。实际工程中为了增强护坡的抗风浪能力而一味增强护面的抗上托力稳定性,可能并不能得到满意的效果。

2.2.2 钱台附近水位影响 试验表明,钱台附近水位的影响在钱台下1倍有效波高 H_s 范围内,斜坡坡度1:3.5时,砌块稳定试验结果见表2。可见,在钱台附近水位,砌块的稳定性有所降低,特别是在砌块厚度较大,临界波高较大时。造成这种结果的原因有:波浪主作用区域在静水位附近,由于钱台的存在,静水位以上护面的砌块数量较少,使护面咬合形成的整体稳定性减弱;此外,静水位与钱台的高差较小,波浪爬上钱台,在钱台附近发生变形,在波浪沿斜坡回落时,钱台上的水回落很慢,仍保持较高的压力水头,对砌块和垫层的作用增强。

2.2.3 坡度影响 $T=4.5$ s 不规则波作用下,不同砌块厚度的临界稳定波高随护坡坡度变化见图5。由图可见,随着护坡坡度变缓,临界稳定波高变大,砌块稳定性增强。

2.3 砌块稳定厚度计算式

试验和分析结果表明,砌块厚度与波高成正比,此外还与相对密度 Δ 、堤坡坡度、破波参数 ξ 等因素有关,对于诸如垫层、砌块开孔率等因素的影响都考虑在综合影响因子 F 中,以便于设计者使用。

依据系列试验的结果,得到不规则波作用下护面砌块稳定厚度计算式:

$$\frac{\Delta D}{H_s} = a F \bar{\xi}^{0.5} \quad (3)$$

式中: H_s 为不规则波有效波高; F 为综合稳定系数,对于稳定标准一, $F=0.20$,对于稳定标准二, $F=0.15$,设计中可按不同标准选取; a 为钱台影响系数,对单坡断面 $a=1$,对钱台下1倍有效波高范围 $a=1.1$; $\bar{\xi}$ 为破波参数, $\bar{\xi} = \tan\alpha / (H_s/\bar{L})^{1/2}$, α 为护坡角度, $\bar{L}$ 为平均波长,其他参数同式(1)。

图6为不规则波作用下稳定标准一、标准二和钱台附近的砌块稳定系列试验结果及计算值,图中横坐标 $H^* = H_s \bar{\xi}^{0.5} / \Delta$ 。

式(3)表明:护面砌块厚度与波高成正比;堤坡越陡,所需护面块体厚度越大;波高一定时,波周期越长,波陡越小,所需砌块厚度越大。实际应用时,尚需考虑垫层和下层基土的综合影响,合理确定综合稳定系数 F 。

表2 钱台附近水位砌块临界稳定波高试验结果(标准一)

Tab. 2 Test results of steady wave height of blocks near berm (criterion I)

砌块 厚度/cm	平均 周期/s	不规则波临界有效波高 H_s /m		H_{sq1}/H_{s1}
		无钱台 H_{s1}	钱台附近 H_{sq1}	
30	4.5	1.87	1.62	0.87
	6.0	1.55	1.39	0.90
24	3.9	1.61	1.32	0.82
	4.5	1.34	1.10	0.82
	6.0	1.27	1.00	0.79
15	3.0	0.96	0.86	0.90
	3.9	0.81	0.77	0.95
	4.5	0.76	0.72	0.95
	6.0	0.71	0.68	0.96

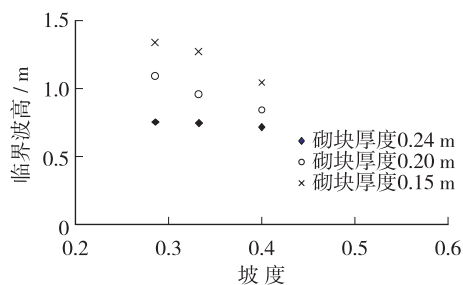


图5 砌块临界稳定波高随坡度的变化

Fig. 5 Changes in steady wave height of blocks with dike slope

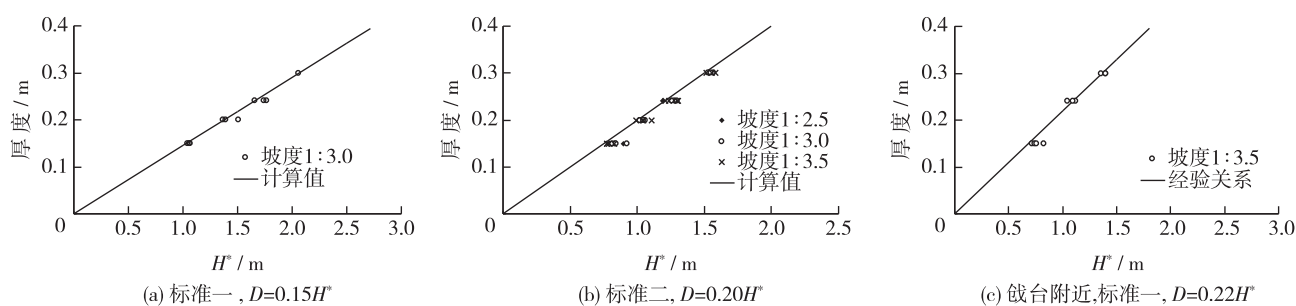


图 6 不规则波作用下砌块稳定试验结果及计算值

Fig. 6 Comparisons between calculated and measured results of block steady thickness under irregular wave action

3 结 语

对一种新型开孔勾连混凝土砌块的抗浪稳定性进行了试验,根据试验结果,阐述了护坡砌块失稳现象和机理分析,在波浪作用下,护面与垫层相互依存、相互影响,过分偏重于某一方面的稳定,不仅会增加工程造价,而且可能削弱另一方面的稳定,导致堤坝整体稳定性降低。在此基础上,通过对反映砌块失稳影响因素的分析,提出了一个不规则波条件下砌块稳定厚度的经验式。

需要指出的是,单纯提高护面砌块的稳定性并不能较大幅度提高护坡整体稳定性,在护岸设计中,应采用均衡设计理念,综合考虑波浪荷载,将其平衡分配给护面、垫层和基土。砌块稳定厚度计算时,应综合分析各方面的影响,选取合适的 F 值。

参 考 文 献:

- [1] 潘军宁,王登婷,吴美安,等.波浪作用下混凝土砌块护坡稳定性试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(4):476-481. (PAN Jun-ning, WANG Deng-ting, WU Mei-an, et al. Experimental study on concrete block revetment under wave action [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2005, 33(4): 476-481. (in Chinese))
- [2] 潘少华.波浪作用下斜坡堤干砌块石护面的稳定计算[J].河海大学学报(自然科学版),1995,23(2):1-6. (PAN Shao-hua. Stability of placed stone revetment under wave action[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 1995, 23(2): 1-6. (in Chinese))
- [3] BURGER A M, BRETELER M K, BANACH L, et al. Analytical design method for relatively closed block revetments [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1990, 116(5): 525-544.
- [4] 龚丽飞,杨捷,程卫国.新型铰接式砌块护坡体系的应用及其计算方法[J].水利水电技术,2009,40(1):58-61. (GONG Li-fei, YANG Jie, CHENG Wei-guo. Application of a new articulated concrete block revetment and its design calculation method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(1): 58-61. (in Chinese))
- [5] LOON J L, DE LOOFF H, BRETELER M K. Design and re-use of placed block revetments [C] // 27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE). Sydney, Australia, 2000: 1983-1990.
- [6] HERBICH J B. Handbook of coastal engineering [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 1999: 1-24.
- [7] 余广明.堤坝防浪护坡设计 [M]. 北京:水利电力出版社,1987: 158-159. (YU Guang-ming. Design of wave protection revetments of dikes [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1987: 158-159. (in Chinese))
- [8] PILARCZYK K W. Dikes and revetments: design, maintenance and safety assessment [M]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 126.
- [9] BRETELER M K, BEZUYEN A. Simplified design method for block revetments [C] // Proceedings ICE Conference on Coastal Structures and Breakwaters. London, 1991: 423-436.
- [10] HEMPHILL R W, BRAMLEY M E. Protection of river and canal banks: a guide to selection and design [M]. London: Butterworths, 1989.

- [11] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S]. (JTJ/T 234—2001 Wave model test regulation[S]. (in Chinese))
- [12] 周益人, 潘军宁, 李鹏. 波浪作用下垫层对混凝土砌块护坡稳定的影响[J]. 世界农业, 2009(2): 29-31. (ZHOU Yi-ren, PAN Jun-ning, LI Peng. Influence of granular filters on stability of concrete block revetment under wave action[J]. World Agriculture, 2009(2): 29-31. (in Chinese))

Experimental studies on stability of perforated concrete block revetment under wave action

ZHOU Yi-ren, PAN Jun-ning

(*Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: The concrete blocks are the major protection structures of the revetment and play an important role in revetment stability under the action of waves. In this study, systemic model test studies on the stability of new type hook perforated concrete blocks under the action of waves are carried out with focus on the practical design of dikes and breakwaters in China. The influence of the thickness of the concrete blocks, berm and wave period on the stability of the concrete blocks is analyzed, and an empirical formula to calculate the stability thickness of the concrete blocks is obtained from analyses of the factors mentioned above. It is found from the analyses that the concept of “equilibrium design” (e. g. the filters are selected for adaption to concrete blocks) should be applied to the design of the bank protection works. And the model test results can be beneficial to the design of the concrete block revetment for coasts, river banks, large lakes and reservoirs and will be a guide to the selection and design of the revetment works.

Key words: dike and revetment; perforated concrete block; stability; wave