



波浪作用下扭王字块体稳定性研究

钟雄华¹, 林登荣², 陈国平¹, 严士常¹, 吴月勇¹

(1. 河海大学 港口海岸及近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 温州瓯飞围垦管理委员会, 浙江 温州 325000)

摘要: 通过物理模型试验, 研究在不规则波作用下斜坡式护岸护面采用扭王字块体时, 摆放方式、摆放密度和坡度对扭王字块体稳定性的影响, 给出不同摆放形式的护面层空隙率 P 以及不同摆放形式、摆放密度和坡度所对应的稳定系数 K_D 的取值范围, 并对越浪量进行对比分析, 为工程设计提供参考。

关键词: 扭王字块体; 摆放方式; 摆放密度; 坡度; 越浪量

中图分类号: U 656.2⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0055-06

Stability of accropode under wave actions

ZHONG Xiong-hua¹, LIN Deng-rong², CHEN Guo-ping¹, YAN Shi-chang¹, WU Yue-yong¹

(1. College of Coastal, Harbor and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Wenzhou Oufei Reclamation Management Committee, Wenzhou 325000, China)

Abstract: By physical model experiment which is performed under irregular wave and adopts accropode blocks on a sloped revetment, we study factors which affect the stability of accropode blocks including mode of placing, placing density, as well as the slope gradient, and obtain the void ratio of the revetment P under different modes of placing. We also give the value range of stability parameter K_D under different placing modes of accropode blocks, density of accropode blocks and slope gradient. In addition, overtopping data is also analyzed, which may serve as reference for future design.

Keywords: accropode; mode of placing; density of placing; slope gradient; wave overtopping

扭王字块体是海岸工程中常见的一种人工护面块体, 从 20 世纪初开始, 国内外学者即对这种人工块体进行了大量的研究工作。1938 年西班牙 Iribarren 工程师首次提出护面块体的稳定质量计算公式^[1]; 1959 年美国人 Hudson^[2] 提出块体稳定质量的计算公式, 目前国内的《防波堤设计与施工规范》^[3] 规范即用的该公式进行扭王字块体的稳定质量计算, 扭王字块体对应的 $K_D = 18$ 。该公式在一般情况下可获得较好的结果, 但也有很多批评意见, 主要是因为斜坡坡度较陡时, 波浪在坡面上并不发生破碎, 与假设情况不符。此外, Hudson 公式没有考虑波浪周期或波群、海底坡度和水深^[4] 的影响。为克服 Hudson 公式的缺点,

1987 荷兰工程师 Van dre Meer^[5] 总结前人经验, 并结合他本人的物理模型试验结果, 给出另外一种形式的稳定性公式。2005 年白银战^[6] 对比了中英两国在港口工程中扭王字块体的应用标准, 提出扭王字块体在施工过程中的注意事项。但是由于扭王字块体直接与水工建筑物的安全性有关, 且影响其稳定性的因素很多, 各家公式和各国标准都有自己的适用范围和局限性。因此, 继续开展扭王字块体稳定性的研究十分必要。

1 设备仪器与试验方法

波浪断面物理模型试验在波浪水槽中进行, 该水槽能同时产生波浪、水流和风。水槽长 80 m、

收稿日期: 2016-03-16

作者简介: 钟雄华 (1991—), 男, 硕士研究生, 从事波浪与建筑物相互作用研究。

宽 1.0 m、深 1.8 m，水槽的一端配有消浪缓坡，另一端配有推板式造波机，水槽沿纵向分成两部分，宽度都为 0.5 m，其中一部分用来铺设断面，另一部分用于减小二次反射波。为消除水槽试验中的二次反射波，造波板上安装了二次反射吸收装置。试验采用不规则波进行，不规则波波谱取 Jonswap 谱，越浪量采用集水称重法量测。

试验参数及组合：有效波高 H_s 为 6.00、7.40、12.50、14.00、16.80、17.80 cm，平均周期 T 为 1.45 s；坡度 $n=1.5、2.5$ ，堤前水深 d 为 49.00 cm；防浪墙顶距水面高度 h 为 18.40 cm，防浪墙与后方平台的高度差 P 为 8.90 cm。试验断面见图 1。

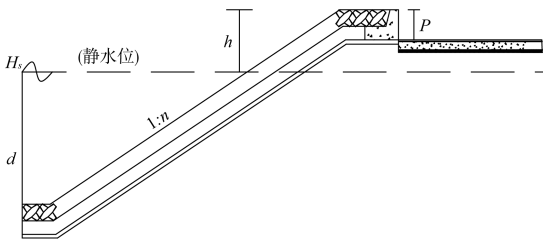
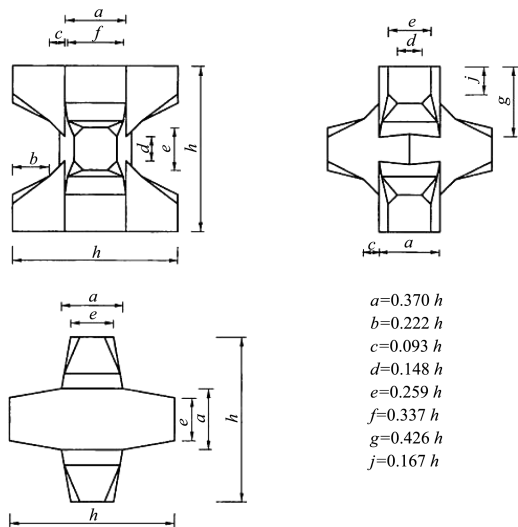


图 1 试验断面

试验采用不透水堤心，坡面上铺设土工布，5~25 g 垫层块石，护面块体采用 125 g 的扭王字块体 (a 型)，块体的主要参数见表 1 和图 2。

表 1 块体参数

块体在空气中的质量 m/g	块体的密度 $\rho/(g/cm^3)$	块体的体积 V/cm^3	块体的高度 h/cm
125	2.35	53.26	5.44



- $a=0.370 h$
- $b=0.222 h$
- $c=0.093 h$
- $d=0.148 h$
- $e=0.259 h$
- $f=0.337 h$
- $g=0.426 h$
- $j=0.167 h$

图 2 扭王字块体

2 扭王字块体的摆放方式及特点

2.1 扭王字块体的摆放方式

1) 随机摆放。

根据《防波堤设计与施工规范》^[3] 规定和白银战等^[6] 的研究，随机安放块体时应做到：①块体单层安放；②扭王字块体须 3 个肢杆端部着地；③相邻的扭王字块体的摆向不宜相同；④每个块体必须扣在所在排下方的两个块体之间的位置；⑤每个块体必须与其下方的垫层相接触，不能悬空放置(图 3a)。

2) 正反式规则摆放。

正、反式规则摆放的摆放姿态应做到：①3 个肢杆端部着地，另外 3 肢杆端部朝外；②相邻块体的摆放姿态不能一样，即肢杆端朝海与两肢杆端朝海相间摆放；③严格按照勾连块体摆放，确保块体接触紧密形成整体；④每个块体必须与其下方的垫层相接触，不能悬空放置(图 3b)。

3) 队列式规则摆放。

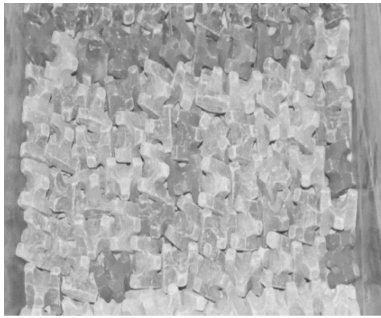
队列式规则摆放的摆放姿态应做到：①块体要保证 3 个肢杆端部着地；②相邻块体的摆放姿态相同，即都是一肢杆朝海进行摆放；③水平方向，相邻块体的翼缘相接触平行安放；④上下相邻的块体要紧密接触，形成一个整体(图 3c)。

4) 交错式规则摆放。

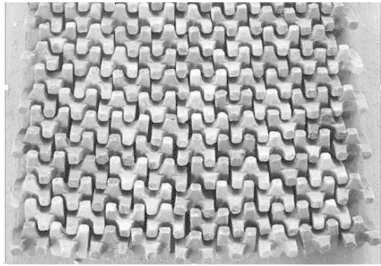
交错式规则摆放的摆放姿态应做到：①块体在空间上安放必须是倾斜的，要保证三个脚着地；②相邻块体的摆放姿态相同，即都是一肢杆朝海进行摆放；③水平方向，相邻的块体间隔一个肢杆的宽度；④后一排的扭王字块体的两肢杆分别靠在其前排的两个块体肢杆上(图 3d)。

5) 混合式摆放。

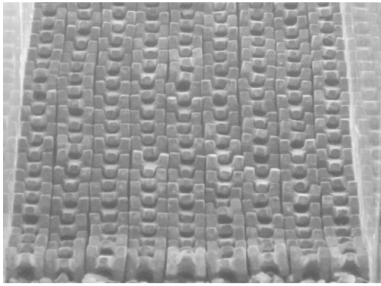
采用正反式规则摆放与随机摆放相结合的形式进行护坡。块体的摆放姿态分别根据正反式规则摆放和随机摆放来确定，安放过程中，要保证规则摆放与不规则摆放的衔接处的安放质量(图 3e)。



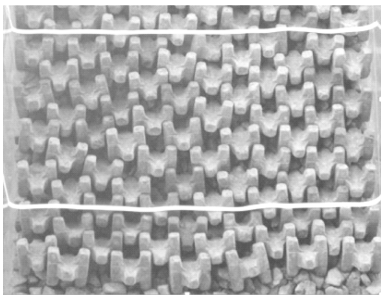
a) 随机摆放



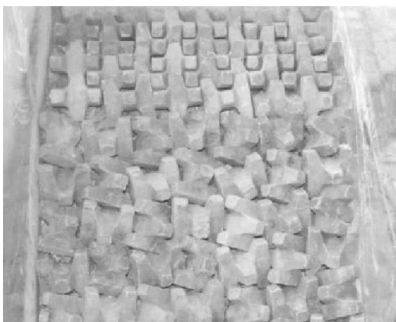
b) 正反式规则摆放



c) 队列式规则摆放



d) 交错式规则摆放



e) 混合式摆放

图 3 扭王字块体常见摆放方式

2.2 扭王字块体摆放的特点

1) 随机摆放: 本次试验随机安放的扭王字块体的个数为 110 块/2 500 cm²。随机安放时只需要确定扭王字块体的网格点位置, 对其安放姿态没有严格的要求, 因此适用于水上和水下的块体的施工, 块体之间咬合得比较紧密, 稳定性较好。

2) 正反式规则摆放: 正反式规则摆放的扭王字块体上下两排的块体需要咬合得较好, 所以除了需要确定其摆放位置还要保证其安放姿态, 水下施工难度比较大, 一般适用于水上施工, 块体之间咬合的比随机摆放紧密, 稳定性也比随机摆放好。

3) 队列式规则摆放: 队列式规则摆放的施工难度比前两种都大, 水下施工难度很大。块体主要与其相邻的上下两排的块体咬合, 稳定性较好。

4) 交错式规则摆放: 块体之间的空隙较集中, 相互咬合程度略低, 安放过程中较难保证块体姿态的一致, 块体常会出现向前倾覆, 水下施工难度很大, 稳定性差。

5) 混合式摆放: 其安放难度介于随机摆放和正反式规则摆放之间, 主要是因为规则与不规则摆放的衔接处很难保证块体的咬合效果, 稳定性比单独随机摆放和单独正反式规则摆放差。

随机摆放、正反式规则摆放、队列式规则摆放和交错式规则摆放的空隙率通过专门的摆放试验获得。试验结果见表 2。

表 2 空隙率

扭王字块的摆放方式	护面层的空隙率 P
随机摆放	0.50
正反式规则摆放	0.45
队列式规则摆放	0.40
交错式式规则摆放	0.50

3 试验结果与分析

稳定性的判断标准: 根据《波浪模型试验规程》^[7], 斜坡式建筑物护面块体的判断标准应符合下列规定: 1) 在波浪作用下, 随机抛放的护面块体累积位移超过单个块体的最大几何时即失稳, 强度起控制作用的大型护面块体, 其累积位移超过块体最大几何尺度一半时即失稳; 2) 在波浪作

用下, 单层铺砌的护面块体, 其累积位移超过单个块体的厚度时即失稳, 单层随机抛放的护面块体, 其位移后产生的缝隙宽度超过块体最大几何尺度一半时即失稳。

3.1 摆放方式对稳定性的影响

对以上 5 种扭王字块体按最大摆放密度摆放的稳定性进行了对比分析, 稳定性试验结果见表 3。

表 3 各种摆放方式的稳定性

波高 H/cm	周期 T/s	摆放方式	稳定性
6.00	1.45	交错式规则摆放	失稳
7.40	1.45	交错式规则摆放	失稳
12.50	1.45	随机摆放	稳定
		正反式规则摆放	稳定
		队列式规则摆放	稳定
		交错式规则摆放	失稳
14.00	1.45	混合式摆放	稳定
		随机摆放	稳定
		正反式规则摆放	稳定
		队列式规则摆放	稳定
16.80	1.45	交错式规则摆放	失稳
		混合式摆放	失稳
		队列式规则摆放	失稳
		交错式规则摆放	失稳
17.80	1.45	混合式摆放	失稳
		随机摆放	失稳
		正反式规则摆放	稳定
		队列式规则摆放	失稳
		交错式规则摆放	失稳
		混合式摆放	失稳
		队列式规则摆放	失稳

由表 3 可知, 随机摆放的块体, 当 H 在 16.80~17.80 cm 时, 个别块体剧烈摆动, 随着波浪长时间作用, 块体发生累积位移, 局部产生较大缝隙, 块体失稳, 根据 Hudson 公式反算得到 $26.47 \leq K_D \leq 31.49$, 而规范推荐的值是 18, 这是因为规范的稳定系数给了一定的富裕, 偏于安全考虑。

正反式规则摆放的块体因为块体之间的咬合效果好, 所以在 $H=17.80$ cm 的波浪长时间作用下, 仍未失稳, 对应的 $K_D > 31.49$ 。

队列式规则摆放的块体在波浪作用下, 先是

在静水位附近的扭王字块体向前倾, 由于上层块体与下层块体的摆放形式完全相同, 从而使上层块体下滑和向前倾, 下滑的位移不断累加, 波浪作用结束后, 在坡肩处形成较大的拉缝, 大量的块体向前倾, 失稳对应的 $15.32 \leq K_D \leq 26.47$ 。

交错式规则摆放的块体在波浪作用下, 水体上爬至最高点后开始回落, 扭王字块体随着水体的回落而下滑, 先是静水位附近的扭王字块体下滑, 之后其上层的扭王字块体因为缺少支撑也跟着下滑, 位移不断累积, 波浪作用结束后在坡肩处形成较大的缝隙, 大量的块体向前倾, 失稳对应的 $K_D < 1.21$, 这该摆放形式不建议采用。

混合式摆放的块体在波浪作用下, 规则摆放与不规则摆放的交界处, 有一个规则摆放的扭王字块体失稳, 滚动到平台上, 失稳对应的 $15.32 \leq K_D \leq 26.47$ 。

从块体咬合的角度来分析不同摆放方式扭王字块体的稳定性差异的原因: 由图 3 可知, 对于任意一个处于护面层中央位置的扭王字块, 随机摆放时, 有其它 4 个块体与其接触咬合; 正反式规则摆放时, 有 6 个块体与其接触并咬合; 队列式规则摆放时, 有 4 个块体与其接触, 其中只有上下两个块体与其咬合, 另外两个未咬合, 只是接触, 靠摩擦力来维持稳定; 交错式规则摆放时, 有 4 个块体与其接触, 每个扭王字块体都是通过两个肢杆与周围 4 个扭王字块体接触, 并无太大的咬合效果; 混合式规则摆放的扭王字块体的咬合程度介于随机摆放与正反式规则摆放之间, 在规则与不规则分界处, 块体的咬合程度要比随机摆放和正反式规则摆放的咬合程度差。扭王字块作为一种常见的钩连块体, 主要是通过块体之间的钩连来维持其稳定, 通过以上分析可知, 正反式规则摆放的形式钩连效果最好, 其次是随机摆放, 之后是队列式规则摆放, 交错式规则摆放的扭王字块体的咬合效果最差, 而混合式摆放的扭王字块体在分界处的钩连效果比单独用随机摆放和单独用正反式规则摆放的钩连效果差, 很容易在分界处失稳。

3.2 摆放密度对稳定性的影响

在实际工程中, 常有扭王字块体的实际安放个数少于设计或规范要求的块体个数的情况发生。本次试验针对随机摆放和正反式规则摆放两种情况, 进行了摆放密度对稳定性影响的试验, 摆放密度 = (实际安放的扭王字块体的个数 / 理论需安放的扭王字块体的个数) × 100%。

稳定性试验结果见表 4。

表 4 各种摆放密度的稳定性

摆放方式	波高 H/cm	周期 T/s	摆放密度 / %	稳定性
随机摆放	12.50	1.45	100	稳定
			91	失稳
	16.80	1.45	100	稳定
			91	失稳
	17.80	1.45	100	失稳
			91	失稳
正反式规则摆放	12.50	1.45	100	稳定
			86	失稳
	17.80	1.45	100	稳定
			86	失稳

由表 4 可知, 对于随机摆放的扭王字块体而言, 当摆放密度为 91% 时, 在 $H = 12.50$ cm 的波浪作用下, 块体下滑, 块体重新调整相互之间的接触以达到稳定状态, 在平台与斜坡分界处的块体下滑, 平台上的块体在波浪作用下向胸墙滑动, 因此在坡肩处形成较大的拉缝, 所对应的 $K_D < 10.91$; 当摆放密度为 100% 时, 所对应的 K_D 在 26.47~31.49。

正反式规则摆放的扭王字块体, 当摆放密度为 86% 时, 在 $H = 12.50$ cm 的波浪作用下, 静水位附近的扭王字块体先下滑, 因为块体是规则摆放, 所以下滑的位移会累加, 在波浪作用结束后, 在静水位以上形成了多个缝隙, 块体已经紊乱, 块体失稳, 对应的 $K_D < 10.91$; 当摆放密度为 100% 时, 所对应的 $K_D > 31.49$ 。

通过以上分析可知, 对于随机摆放和正反式规则摆放这两种方式而言, 减少其摆放密度对其稳定性影响很大。

3.3 斜坡坡度对稳定性的影响

护坡坡面坡度也是影响扭王字块体的稳定性的因素之一, 本次试验对比了 1:1.5 和 1:2.5 两种

坡度情况下, 随机摆放的扭王字块体的稳定性。试验表明, 两种坡度下, 虽然扭王字块体所对应的失稳波高 H 均在 16.80~17.80 cm, 但是两者的失稳形态不同。在 1:1.5 的坡度下, 个别块体剧烈摆动, 随着波浪长时间作用, 块体发生累积位移, 局部产生较大缝隙, 块体失稳; 在 1:2.5 的坡度下, 波浪主要在静水位附近破碎, 失稳的扭王字块体在波浪上爬过程中先凸起, 块体持续晃动, 长时间波浪作用下, 该块体滚落到下方的扭王字块体上, 失稳。

3.4 各种因素对越浪量的影响

在进行稳定性试验的同时, 对不同摆放形式、摆放密度和坡度的堤顶越浪量也进行了测量(表 5)。

表 5 不同摆放形式、摆放密度和坡度的越浪量

坡度	摆放密度 / %	摆放形式	波高 H_s/cm	T/s	相对越浪量 $Q/(gH_s^3)^{0.5}$	
1:1.5	100	随机摆放	14.00	1.45	0.001 3	
			16.80	1.45	0.002 9	
			17.80	1.45	0.003 5	
		正反式规则摆放	17.80	1.45	0.004 6	
			队列式规则摆放	14.00	1.45	0.001 4
				16.80	1.45	0.003 0
	90	集中式规则摆放	17.80	1.45	0.004 4	
			12.50	1.45	0.000 4	
			14.00	1.45	0.000 7	
		随机摆放	12.50	1.45	0.000 5	
			14.00	1.45	0.000 9	
			正反式规则摆放	12.50	1.45	0.000 5
1:2.5	100	14.00		1.45	0.000 3	
		16.80		1.45	0.000 9	
17.80		1.45	0.001 4			

由表 5 可以得出, 当随机摆放的扭王字块体按最大摆放密度安放时, 护面斜坡越陡, 越浪量越大, 这主要是因为斜坡越陡, 斜坡的坡面长度越短, 消浪效果也越差, 所以越浪量也就越大。对于在 1:1.5 坡度下摆放的扭王字块体, 摆放密度越小, 越浪量越小。这是因为摆放密度越小时, 护面层的空隙率就越大, 斜坡堤的消浪效果就越好, 越浪水体也就越少, 因而越浪量也就越小。对于在 1:1.5 坡度下、按最大密度进行摆放的各种形式的扭王字块体, 其越浪量从大到小分别是正

反式规则摆放、队列式规则摆放、随机摆放和交错式规则摆放,其中正反式规则摆放与队列式规则摆放越浪量的差异不大。

4 结论

1) 随机摆放的扭王字块体对安放的态度没有严格的要求,施工难度最小,且适用于水下施工,规则摆放的扭王字块体水下施工的难度很大,一般适用于水上施工。5种摆放方式的施工难度从难到易分别是,交错式规则摆放、队列式规则摆放、正反式规则摆放、混合式摆放、随机摆放。随机摆放、正反式规则摆放、队列式规则摆放和交错式规则摆放这4种摆放方式所对应的护面层的空隙率 P 分别为 0.50、0.45、0.40、0.50。

2) 在坡度为 1:1.5 的条件下,扭王字块体按最大密度摆放时,混合式摆放与队列式规则摆放的稳定性相同,其余4种摆放方式的稳定性从好到差分别为正反式规则摆放、随机摆放、队列式规则摆放、交错式规则摆放,这4种摆放方式所对应的稳定系数 K_D 分别为 >31.49、26.47~31.49、15.32~26.47、<1.21,扭王字块体不推荐采用交错式规则摆放的形式。

3) 在 1:1.5 坡度下,扭王字块体的摆放密度对稳定性影响很大,摆放密度越小,块体越容易

失稳,应严格控制扭王字块体的摆放密度;不同坡度下,随机摆放的扭王字块体的失稳形态不同。

4) 越浪量与斜坡的坡度正相关,与摆放密度负相关。在 1:1.5 坡度下,几种按最大摆放密度安放的扭王字块体的摆放方式越浪量从大到小分别是正反式规则摆放、队列式规则摆放、随机摆放和交错式规则摆放,其中正反式规则摆放与队列式规则摆放越浪量的差异不大。

参考文献:

- [1] 俞聿修.防波堤技术的新进展[J].中国港湾建设:1999(1):49-52.
- [2] Hudson R Y .Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters[J]. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering: ASCE, 1959, 83(3):93-121.
- [3] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [4] 杨运泽.混凝土异形护面块体的现状及展望[J].港工技术,1996(2):24-33.
- [5] Van Der Meer J W.Stability of breakwater armor layers design formula [J]. Coastal Engineering, 1987 (11): 219-239.
- [6] 白银战,庄正勇.港口工程中扭王字块应用标准的比较[J].水运工程,2005(11):36-39.
- [7] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].

(本文编辑 郭雪珍)

~~~~~  
(上接第 54 页)

2) 在码头的长期使用过程中,本系统与传统码头靠船装置相比,具有广阔应用前景。液压装置的应用,能避免码头主体结构承受靠船撞击力,进而减缓船舶荷载引起的码头承载能力下降的速率。在码头承载能力已经下降的情况下,启动备用设施,仍然能保证承载能力再次满足设计要求。

#### 参考文献:

- [1] 王元战.港口与海岸水工建筑物[M].北京:人民交通出版社,2013.

- [2] 周世良.内河架空墩式码头桩身时变可靠度分析[J].中国水运,2014(12):286-289.
- [3] 求是科技.MATLAB7.0 从入门到精通[M].北京:人民邮电出版社,2006.
- [4] Logan D L.有限元方法基础教程[M].伍义生,吴永礼,译.3版.北京:电子工业出版社,2003.
- [5] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].
- [6] 陆明万.弹性理论基础(上册)[M].北京:清华大学出版社,2001.
- [7] Gere J M, Timoshenko S P. Mechanics of Materials [M]. Second SI edition. USA: Van Nostrand Reinhold, 1984.

(本文编辑 武亚庆)