

垫层质量对扭王护面斜坡堤稳定性的影响

王铁凝, 王月辛

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘要: 通过物理模型试验, 研究垫层质量对于斜坡堤稳定性的影响。垫层质量选取扭王字块体稳定质量的 $1/20 \sim 1/10$ 、 $1/40 \sim 1/30$ 、 $1/60 \sim 1/50$ 、 $1/100 \sim 1/90$, 在相同试验条件进行不规则波作用下的斜坡堤(含出水堤和淹没堤)稳定性影响研究, 通过录像和拍摄手段记录试验过程。结果表明, 淹没堤和出水堤在 $1/20 \sim 1/10$ 和 $1/40 \sim 1/30$ 这两种垫层质量时斜坡堤的稳定情况相近, 均可在计算所得的稳定波高下保持斜坡堤的稳定性, 只在极端波浪条件下发生失稳; 而其余两种垫层情况下, 堤身结构稳定性较差, 出现堤身变形、堤顶高程下降、垫层跑出、扭王字块体失稳等形式的破坏。对比两种高程的斜坡堤, 采用同样质量的垫层块石, 淹没堤的稳定性比出水堤更好。

关键词: 斜坡堤; 扭王字块体; 垫层; 稳定性

中图分类号: U 656.2⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0100-06

Influence of cushion layer mass on stability of sloping dike with twist Wang block bodyguard

WANG Tie-ning, WANG Yue-xin

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: By the physical model test, we research the influence of cushion layer mass on the stability of sloping dike. We choose $1/20 \sim 1/10$, $1/40 \sim 1/30$, $1/60 \sim 1/50$, $1/100 \sim 1/90$ of the stable mass of the twist Wang block as the cushion layer mass, research the influence of irregular wave on the stability of sloping dike (including effluent dike and submerged dike) under the same experimental conditions, and record the test process by video recording and shooting. The results show that effluent dike and submerged dike with the cushion layer mass of $1/20 \sim 1/10$ and $1/40 \sim 1/30$ have the similar stability of the sloping dike, and the stability of the two dikes can maintain under the calculated stable wave height, only slight instability occurs under the extreme wave conditions. And in the other two cases, the structural stability of the dike body is poor, resulting in the deformation of the dike body, the subsidence of the embankment top, the run-out of the cushion layer, the instability of the twist Wang block and other forms of damage. Compared with the sloping dike of two elevations, the stability of submerged dike is much better than that of the effluent dike with the same mass of cushion layer.

Keywords: sloping dike; twist Wang block; cushion layer; stability

在垫层块石质量选取方面,《防波堤设计与施工规范》^[1]对其做了一个简单的规定,即外坡护面垫层块石的质量取 $1/20 \sim 1/10$ 的护面块体质量,并且最小质量不小于护面块体质量的 $1/40$ 。而在

实际施工中,满足规范要求的大质量垫层块石较难获得且施工难度大。工程实践证明,1t 以上的垫层块石选料和抛填埋坡工艺难度较大,不易控制施工质量及施工进度^[2]。而且大块垫层块石开

收稿日期: 2020-11-05

作者简介: 王铁凝(1993—),男,硕士,工程师,从事航道疏浚设计。

采运输的成本会大幅提高。针对这个问题, Meer^[3]提出一种新的实用设计公式, 用以描述碎石堆护岸和防波堤在随机波浪作用下的稳定性, 并对于垫层块石的选择给出更精确的范围, 公式中引入一个定义明确的失稳等级参数; 高洪斌^[4]以唐山港设计为例, 论述工程失稳产生的损失以及造成失稳的原因与垫层质量不满足要求的关系; 任意等^[5]通过理论分析和模型试验研究在波浪作用下护坡采用面层-垫层-堤心土的设计模式, 垫层采用反滤层结构的护岸工程, 分析得出当面层渗透系数小于垫层渗透系数时, 在垫层内部会产生对面层的上举力, 从而可能引起面层失稳; 姜振春等^[6]通过水工物理模型试验及数值模拟的手段, 对人工块体替代垫层块石的可行性进行初步探究。

本文通过物理模型试验, 选取不同的垫层质量, 研究其对斜坡堤稳定性的影响。

1 试验概况

1.1 试验断面与内容

为了对各影响因素进行分析, 本次模型试验断面采用扭王字块体护面的斜坡堤, 坡度为 1:1.5, 堤前水深为 0.5 m。试验中分别考虑堤顶高程 R_c 和垫层质量变化带来的影响。遵照《波浪模型试验规程》相关规定, 试验采用正态模型, 按照 Froude 数相似率设计。试验护面选用 35~38 g 扭王字块体, 其密度为 2.35 t/m³, 中值粒径 d_{50} 为 25 mm。堤脚选用 20 g 的块石, 堤心石采用 0.4 g 的小碎石。垫层采用 4 组平均单块质量相近的碎石铺设, 分别是扭王字块体质量 1/20~1/10 的碎

石 1.7~3.8 g; 扭王字块体质量 1/40~1/30 的碎石 0.9~1.3 g; 扭王字块体质量 1/60~1/50 的碎石 0.6~0.8 g; 扭王字块体质量 1/100~1/90 的碎石 0.4 g, 该组垫层和堤心石质量一致, 即采用堤心石铺设。垫层的质量筛选均采用分样筛筛选, 其质量保证在要求范围内。斜坡堤护面摆放见图 1, 筛选出的 4 种质量垫层块石见图 2, 试验断面见图 3。

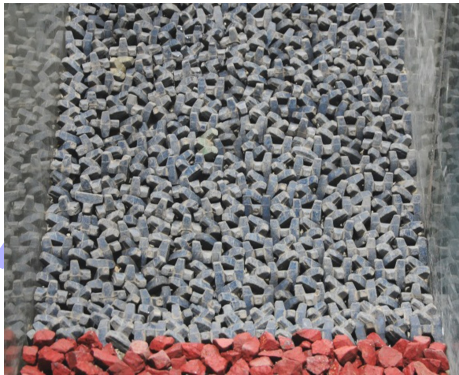


图 1 斜坡堤护面摆放



图 2 4 种质量的垫层块石

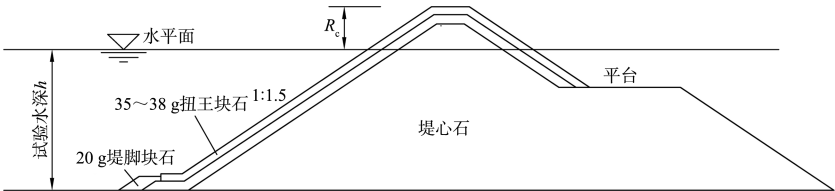
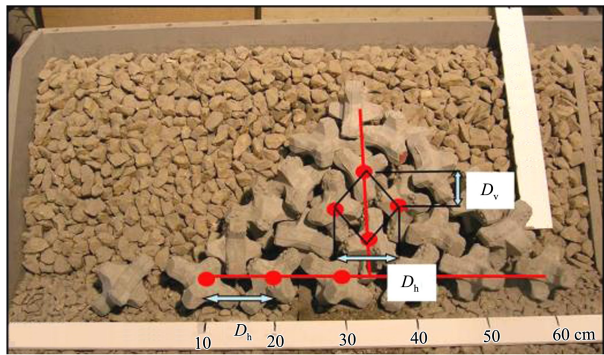


图 3 试验断面

1.2 扭王字块体摆放方式及摆放规则

本试验扭王字块体均采用单层定点随机安放，见图 4。



注：D_h、D_v分别为扭王字块的间距和排距。

图 4 扭王字块体单层定点随机安放

单层定点随机安放，即先假定安放扭王字块体的斜坡是一个网格，通过间距与排距之积等于设计面积与设计密度之比来确定扭王字块体安放的网格节点的位置，从而保证扭王字块体的安放密度。以斜坡堤堤顶超高 $R_c = 0.1\text{ m}$ 时的情况为例，斜坡堤扭王字块体前坡和后坡的安放密度为 555 块/5 000 cm^2 ；堤顶安放密度为 76 块/625 cm^2 。定点随机安放块体时应做到：1) 扭王字块体应从最下面一排摆起且必须放置在理论计算要求的位

置；2) 块体单层摆放且与垫层直接接触，每个扭王字块体必须嵌于位于其下方的相邻两个块体之间，块体之间不能自由移动；3) 摆放过程必须由网格模具作为引导，以达到所需的放置密度；4) 护面上每个块体与相邻块体或每个相邻区域的块体的摆放方向必须不一致，不允许出现相同方向和姿态的摆放方式。

1.3 试验设备与组次

试验在河海大学波浪水槽中进行，该水槽能同时产生波浪、水流和风。水槽长 80 m、宽 1.0 m、深 1.8 m，水槽的前端配有带二次反射吸收装置的推板式造波机，尾端配有消浪缓坡，另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进行试验，另一部分用于减小二次反射波。试验采用的不规则波浪谱为 JONSWAP 谱，将换算后的各组试验波浪要素的特征值输入计算机，由计算机自动迭代计算在水槽内产生所需的波列。试验过程中观察并统计护面扭王字块体、垫层块石以及堤身整体的失稳情况。试验时逐级增加波高值，找出各波周期下斜坡堤发生失稳情况时的波高大小。试验过程中，保证堤顶宽度不变，并改变堤顶超高，同时模拟出水堤和淹没堤的情况，试验组次见表 1。

表 1 垫层质量对斜坡堤稳定性影响试验组次

护面类型	堤顶超高/m	堤顶宽度/m	水深/m	垫层质量/g	扭王摆放方式	波高/m	周期/s	
35~38 g 扭王字块体	0.038(出水堤)	0.14	0.5	1.7~3.8	单层定点随机安放	0.050	1.45	
						1.45		
				0.9~1.3		0.075	2.00	
						2.75		
						1.19		
				0.6~0.8		0.100	1.45	
						1.98		
				0.4		2.75		
						1.45		
						0.125	2.00	
	2.75							

2 斜坡堤失稳判别

2.1 扭王字块体失稳判别标准

根据《波浪模型试验规程》^[7]，斜坡式建筑物护面块体的失稳判别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尺寸时即失稳，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寸一半时即失稳。

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寸一半时即失稳。

试验过程中满足上述两种条件之一即视为失稳,并统计扭王字块体失稳数量,记录该失稳情况下的波高值。

2.2 垫层块石失稳判别标准

规范中没有明确给出垫层块石的失稳判别标准,试验过程中发现,垫层块石质量减小的过程中,会发生原处跳动或从扭王字块体缝隙跑出等方式的失稳。试验过程中会统计垫层块石失稳数量,用以判别垫层块石的失稳程度。

2.3 斜坡堤整体变形失稳判别标准

试验过程中发现,斜坡堤由于波浪冲刷作用或是垫层和扭王字块体失稳,会导致斜坡堤整体发生失稳变形,主要表现在堤顶高程的下降。每轮试验后统计堤顶下降的高度,用以判别堤身失稳变形的程度。

3 试验结果及分析

在防波堤的设计中,比较注重护面块体的稳定性,《防波堤设计与施工规范》详细给出护面块体质量的计算公式。而斜坡堤稳定性不仅与护面块体的质量有关,也受到垫层质量、防波堤坡度和高度等因素的影响。当垫层块石质量较大,上部扭王字块体不易摆放平整,容易造成上部护面块体失稳;而垫层块石质量较小时,在入射波浪及越浪回流产生的浮托力等因素作用下,垫层块石极易容易被水流从扭王字块体的缝隙中带出,从而引起堤身形变。故从垫层块石质量入手,开展各垫层块石质量下斜坡堤的稳定性研究,从而找到较为合理的垫层质量水平。

3.1 扭王字块体失稳情况分析

综合试验数据进行整理分析,在 0.050 m 波高条件下的 4 组垫层试验,无论出水堤还是淹没堤,扭王字块体均未发生失稳,且在 0.075 m 波高条件下仅出水堤的 1/100~1/90 垫层质量发生扭王字块体失稳。0.100 和 0.125 m 波高条件下 4 组垫层质量时扭王字块体失稳情况见图 5。

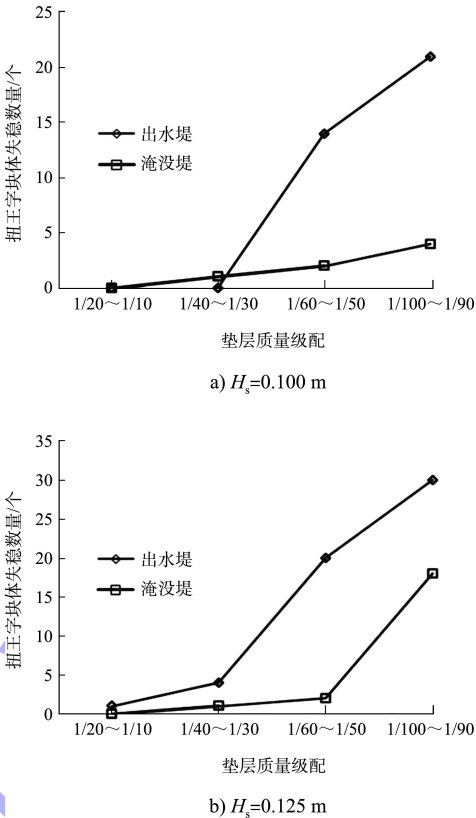


图 5 4 组垫层质量级配时出水堤和淹没堤扭王字块失稳情况

由图 5 可知,无论出水堤还是淹没堤,随着垫层质量减小,扭王字块的失稳个数均不断增加,且出水堤扭王字块失稳数的增加速率要大于淹没堤;无论出水堤还是淹没堤,垫层质量选取 1/20~1/10扭王稳定质量和 1/40~1/30 扭王稳定质量时,稳定性情况均较好,在 0.100 m 稳定波高条件下基本不发生失稳,在 0.125 m 波高条件下失稳数也少于 5 个,可以认为是较好的垫层质量;在稳定波高及更大的波高条件下,出水堤垫层块石选取 1/60~1/50 以及 1/100~1/90 扭王稳定质量时会发生严重的失稳情况,而淹没堤失稳情况要好于出水堤,但是在垫层质量选为 1/100~1/90 扭王稳定质量时,在 0.125 m 波高条件下,淹没堤上扭王字块也会发生严重失稳,失稳数量在 15 块以上。

为了更直观地表述垫层质量对扭王字块护面稳定性影响,本文利用 Hudson 公式分别计算了 4 组垫层质量级配情况下近似临界稳定波高对应的扭王字块稳定系数 K_D 范围,见表 2。

表 2 4 组垫层质量情况下扭王稳定波高对应的 K_D 范围

斜坡堤形式	垫层质量级配	扭王字块稳定波高范围/m	扭王字块 K_D 范围
出水堤	1/20~1/10	0.100~0.125	18.2~35.5
	1/40~1/30	0.075~0.100	7.7~18.2
	1/60~1/50	0.075	7.7 左右
	1/100~1/90	0.050~0.075	2.3~7.7
淹没堤	1/20~1/10	0.125	35.5
	1/40~1/30	0.100~0.125	18.2~35.5
	1/60~1/50	0.075~0.100	7.7~18.2
	1/100~1/90	0.075	7.7 左右

3.2 垫层块石失稳情况分析

在试验研究中发现,随着垫层质量减小,垫层块石更容易从扭王字块之间的缝隙中跑出,斜坡堤堤身变形凹陷,使得护面块体下部支撑力不够而出现即便扭王字块在安全稳定波高的情况下,也会发生失稳滚落,使斜坡堤稳定性大幅折减,3 种波高情况下,出水堤和淹没堤在 4 组垫层质量级配时垫层块石失稳情况见图 6。

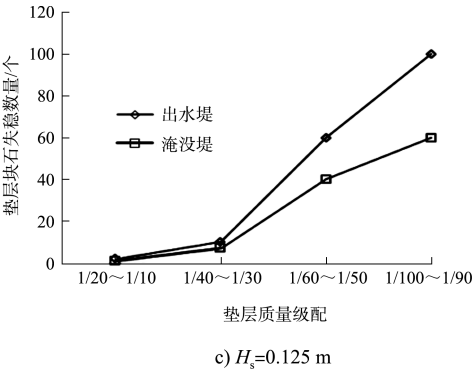
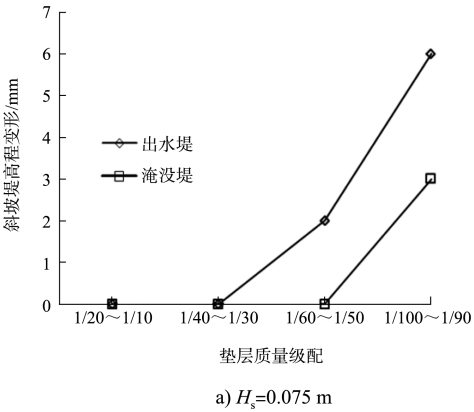
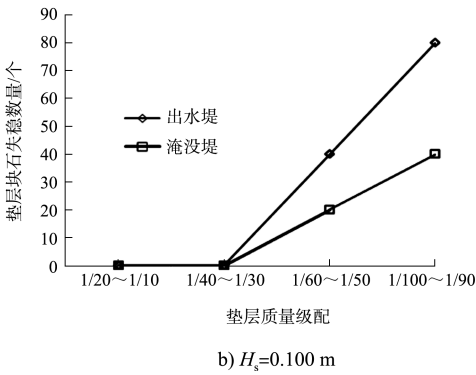
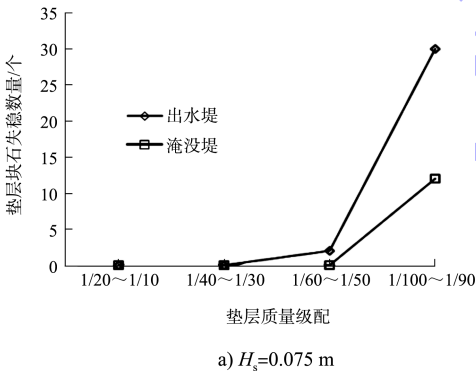


图 6 出水堤和淹没堤在 4 组垫层质量级配时垫层块石的失稳情况

由图 6 可以看出,垫层失稳变化趋势和扭王字块失稳变化趋势是一致的,因此扭王字块的失稳与垫层失稳跑出的关系密切。

3.3 斜坡堤堤身变形失稳情况分析

波浪在与斜坡堤相互作用时会对斜坡堤的前坡肩、堤顶及后坡肩这 3 处较易发生变形的部位产生较大的冲击力,随着垫层质量逐渐减小,垫层更易从扭王字块的缝隙中跑出,其抵御波浪冲击力的能力也会随之减弱,由于这两方面的原因,斜坡堤堤身变形程度会逐渐变大。试验过程中,在波浪作用后,量测斜坡堤高程下降情况,用其高程下降的数值描述堤身变形程度。0.075、0.100、0.125 m 波高条件下斜坡堤堤身变形情况见图 7。



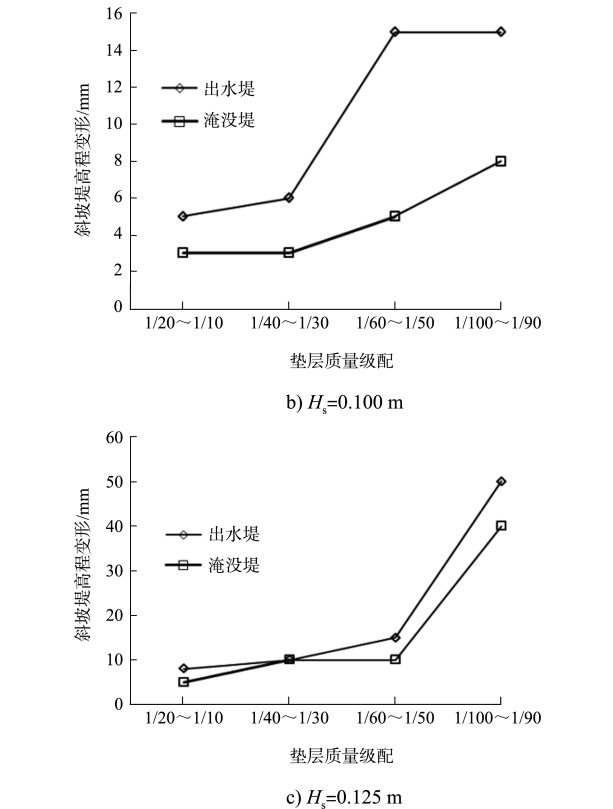


图 7 4 组垫层质量级配时出水堤和淹没堤堤顶高程变形情况

由图 7a)可知,淹没堤在波高 0.075 m 的情况下,只有 1/100~1/90 扭王字块稳定质量的垫层情况出现堤顶高程下降,堤身变形;而出水堤则在 1/60~1/50 的垫层情况就发生堤身变形,且出水堤的总变形量大于淹没堤。由图 7b)可知,在波高 0.100 m 时,出水堤 1/60~1/50 垫层情况与1/100~1/90垫层情况堤身变形相同,而淹没堤的变化规律则与其他波高情况保持一致。由图 7c)可知,此时波高为 0.125 m,无论出水堤还是淹没堤在前 3 种垫层情况下堤顶高程变化平缓上升,在最后一种垫层情况下发生突变,失稳量大幅增加。

3.4 堤顶高程对斜坡堤稳定性影响

在防波堤的设计中,因堤顶高程的不同分为出水堤和淹没堤。出水堤直接抵挡来波,而淹没堤潜于水下,波浪的透射能力相对较强,两种防波堤分别用于不同的波浪情况。0.100 m 波高下淹没堤和出水堤块石稳定性对比结果见表 3。

表 3 0.100 m 波高下不同堤顶高程斜坡堤稳定性试验结果

垫层块石 质量/g	周期/s	出水堤			淹没堤		
		扭王字块	垫层块石	堤身变形	扭王字块	垫层块石	堤身变形
1.7~3.8	1.45	稳定	稳定	无变形	稳定	稳定	无变形
	1.98	晃动	轻微变形	高程下降 5 mm	稳定	稳定	高程下降 3 mm
	2.75	晃动	轻微变形	高程下降 5 mm	轻微晃动	稳定	高程下降 3 mm
0.9~1.3	1.45	稳定	晃动	高程下降 4 mm	稳定	稳定	无变形
	1.98	晃动	晃动	高程下降 6 mm	稳定	稳定	高程下降 3 mm
	2.75	隆起	晃动	高程下降 5 mm	1 块滚落	稳定	高程下降 3 mm
0.6~0.8	1.45	2 块滚落	淘刷严重	失稳变形	晃动,露出缝隙	发生推移	高程下降 8 mm
	1.98	失稳晃动	淘刷严重	高程下降 15 mm	晃动,缝隙加大	发生推移	高程下降 8 mm
	2.75	滚落 10 块以上	垫层被淘空	严重变形	晃动,缝隙 10 mm	卷出 20 粒	高程下降 10 mm
0.4	1.45	2 块滚落	淘刷严重	高程下降 10 mm	轻微晃动	大量跑出	高程下降 3 mm
	1.98	产生位移,缝隙 1 cm	淘刷严重	高程下降 15 mm	晃动	大量跑出	高程下降 5 mm
	2.75	滚落 10 块以上	垫层被淘空	严重变形	剧烈晃动	大量跑出	高程下降 8 mm

由表 3 的对比结果可看出,在相同波要素作用下,不同质量垫层块石的淹没堤的稳定性均比相同质量垫层块石的出水堤稳定性好。

在 0.1 m 波高的波要素下,出水堤的扭王字块出现晃动时,淹没堤扭王字块依然维持稳定;出水堤的扭王字块失稳滚落时,淹没堤扭王字块只出现晃动。淹没堤扭王字块的稳定性更好;出

水堤垫层块石发生晃动、推移变形时,淹没堤垫层块石依旧维持稳定;出水堤垫层块石发生逸出、淘刷时,淹没堤垫层块石发生推移变形,少量随波浪卷出。淹没堤垫层块石的稳定性远强于出水堤;对比堤身变形情况,发生失稳变形时,淹没堤的变形也弱于出水堤,其变形量明显较小。

(下转第 141 页)