



斜向不规则波对斜坡堤堤头作用的试验研究

张华昌¹, 董 胜², 柳玉良¹, 李玉龙¹

(1. 海军工程设计研究院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 在物理模型试验的基础上, 描述斜向不规则波对斜坡式防波堤堤头的作用形态, 分析冲击波流的形成原因, 找出不同波向所产生冲击波流的影响范围及对护面块体的影响, 为同类工程的设计提供借鉴。

关键词: 斜坡式防波堤; 堤头; 物理模型试验; 不同方向波浪

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0020-05

Action on head of rubble mound breakwater by oblique random waves

ZHANG Hua-chang¹, DONG Sheng², LIU Yu-liang¹, LI Yu-long¹

(1. Navy Engineering Design and Research Institute, Qingdao 266100, China; 2. Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: On the basis of a physical model test, the paper describes the action on the head of a rubble mound breakwater exerted by the oblique random waves, analyzes how the shock wave-current happens, and finds out the influence scope and effects on the armor blocks. The results may serve as reference for similar project design.

Key words: rubble mound breakwater; dike head; physical model test; oblique random waves

防波堤在使用过程中往往受到多方向波浪的作用。波向不同, 波浪对斜坡式防波堤护面块体的作用形态也不同。其中最复杂的是堤头段, 该处护面块体所受波浪力与中间段差异较大, 除受到常规波浪力的作用外, 还受到由波浪形成的冲击波流的作用, 且冲击波流对护面块体的影响比一般波浪的作用大。因此, 利用波浪物理模型试验对堤头处波浪的作用规律进行研究, 了解波浪对该段护面块体的作用是十分必要的。

不同方向波浪对堤头段护面块体稳定的影响很大^[1]。有研究表明, 多向波作用下堤头后侧区的波动流速要比单向波时大1.2~1.3倍, 速度矢朝向下坡; 此时堤头中部和后部的护面块体稳定质量要比堤身段的大3.0倍^[2]。本文基于物理模型试验, 发现不同方向波浪经堤头绕射后均在背浪侧产生波流, 且有些波向产生的波流对护面块体的冲击性较强, 直接影响其稳定。通过对六个波向作用

时所产生的波流形态的比较, 分析了波流产生的原因及对护面块体的影响范围, 找出了产生较大波流的波浪方向, 对同类工程的设计具有一定的借鉴作用。

1 试验条件

1.1 防波堤结构设计

试验工程原设计方案根据位置的不同分为3个断面。第1断面位于端部, 包括50 m长的直线段和圆弧段, 堤顶高程13.0 m, 海底高程-21.0 m, 顶宽20 m, 在-4.0 m处设有宽度为9 m的戗台, 坡面均采用扭王字块体, 高程-4.0 m以上坡面块体重30 t, -4.0 m戗台及以下坡面块体重10 t, 坡面坡度均为1:1.75, 内外坡对称。第3断面长25 m, 顶宽10 m, 护面块体同样为扭王字块体, 其中, -4.0 m戗台以上块体重15 t, -4.0 m戗台及以下区域块体重6 t; 坡面坡度均为1:1.75; 断面2位于断面1和

收稿日期: 2012-09-27

作者简介: 张华昌(1966—), 男, 高级工程师, 从事港口与海岸工程的物理模型试验研究。

断面3之间, 为过渡段, 长50 m, 不同高程范围采用的护面块体同第1断面相同。堤头段平面图和第1断面图见图1。

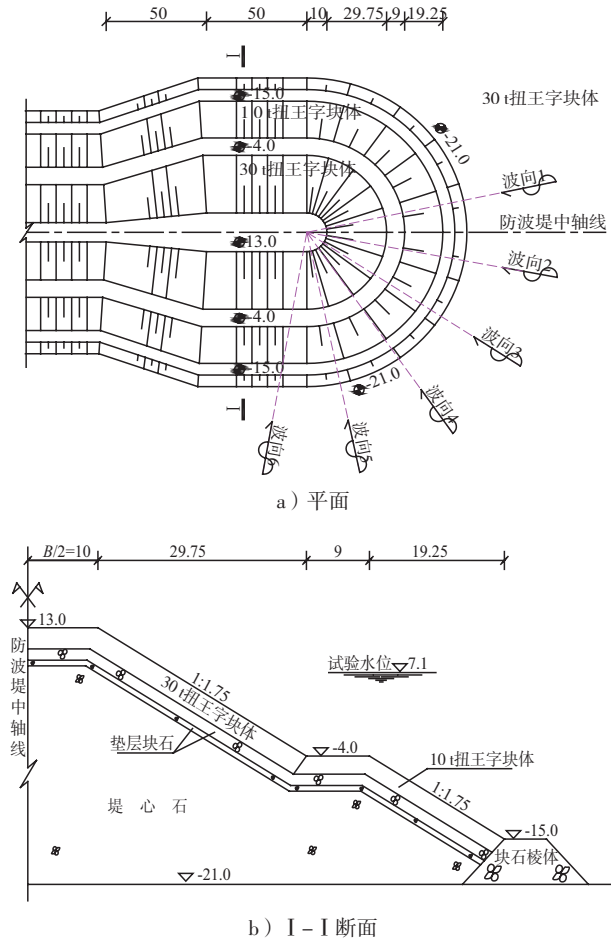


图1 防波堤堤头段平面布置及断面

1.2 工程水文

试验水位为7.1 m。试验波浪包括6个方向, 波向和防波堤的相对位置见图1, 不同波向和防波堤中轴线间的夹角(角度方向顺时针为正)及各波向波浪要素见表1。

表1 试验波向与防波堤轴线夹角及各波向波浪要素

波向	与堤轴线夹角/(°)	$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$H_{5\%}/m$	\bar{H}/m	\bar{T}/s
1	-11.92	10.79	7.87	9.20	5.17	11.3
2	10.58	10.01	7.26	8.52	4.75	10.7
3	33.08	8.79	6.19	7.29	3.99	9.8
4	55.28	8.06	5.70	6.68	3.63	9.5
5	78.08	8.33	5.88	6.86	3.82	9.6
6	100.58	7.68	5.50	6.50	3.54	9.4

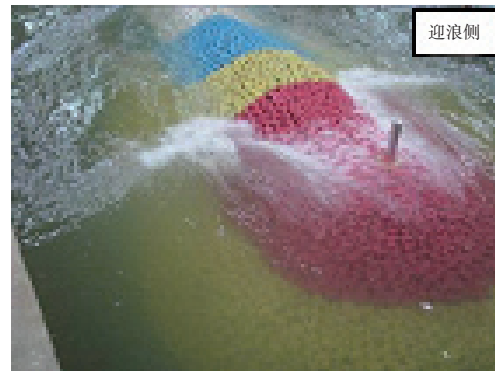
1.3 模型设计

模型比尺 $\lambda=50$ 。试验采用不规则波、规范

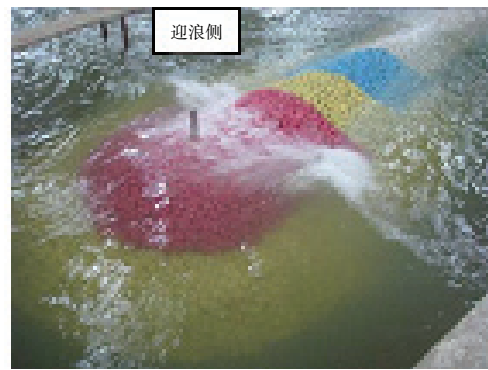
谱。由于试验波向跨度较大, 模型试验分2次进行, 第一次采用波向1、2、3, 第二次采用波向4、5、6。

2 试验现象

当波浪传播至斜坡堤堤头时所呈现出的传播规律与中间段完全不同, 不仅产生常规的绕射、反射现象, 而且在堤头处产生冲击力较强的冲击波流, 波流的形态、作用位置随波浪方向的不同而变化。6个方向波浪在试验中产生的试验现象见图2。



a) 波向1



b) 波向2



c) 波向3



d) 波向4



e) 波向5



f) 波向6

图2 不同方向波浪在堤头产生的波流形态

不同波向所产生的冲击波流有以下特点：

1) 波向1和波向2在迎浪侧和背浪侧均产生波流，但背浪侧波流较大，迎浪侧波流较小；其余波向只在背浪侧产生波流。因为波向1和波向2基本对称于防波堤轴线，所形成的波流形态基本相同，作用位置也对称于堤轴线。

2) 波向2~6位于防波堤的同一侧，随着波向与防波堤轴线间夹角的增大，所形成波流的方向与堤轴线的夹角也逐渐增大，波流冲击点逐渐偏离堤身，对护面块体的影响逐渐减弱。

3) 每个波向产生波流的方向与波向不重合，两者之间存在一定的夹角。

虽然六个波向都在堤头处产生冲击波流，但不同波向的波流对堤头段护面块体的影响程度却差别较大。波向1~3产生的波流较大，对护面块体的影响较大，其中波向2对护面块体的影响最大，波向5，6对护面块体的影响较小。原设计中堤头段上部（高程-4.0 m以上）区域采用30 t扭王字块体，下部区域采用10 t扭王字块体，试验中在1~4方向波浪作用时均出现局部失稳现象（失稳位置位于波流冲击点处）。图3为波向2作用时，30 t扭王字护面块体的失稳状态。后续试验中将上部块体改为40 t扭王字块体，下部改为30 t扭王字块体，试验中，波流冲击点处块体间缝隙仍有增大现象，但未失稳（波向1，2时缝隙最大）。

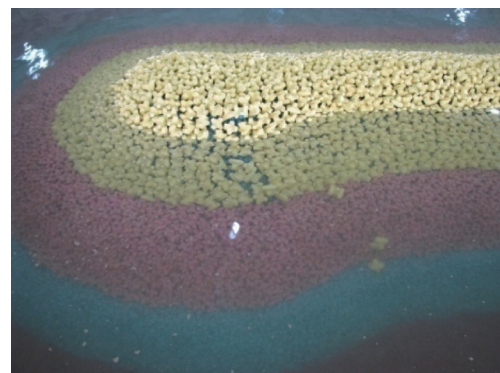


图3 波向2作用时的失稳状态

3 不同方向波浪对防波堤堤头作用机理分析

3.1 冲击波流的成因

为便于描述波浪在堤头段的传播规律，将堤头段水域分为4个区，见图4。图中abcd表示堤头弧形坡面在垂直于波向线方向、经过弧形坡面圆心的剖面； L_1, L_2, L_3 表示3个平行于来波方向的垂直面，其中， L_1 与堤顶弧形顶面边缘线相切（如果波浪爬高低于坡顶， L_1 应经过波浪最高爬坡点）， L_2 经过剖面与静水面线的交点， L_3 经过波谷与剖面的交线。 a, b, c 分别为 L_1, L_2, L_3 和abcd剖面的交点。图中点划线 L_{ab} 表示经过ab中点的、垂直于来波方向的垂面。把 L_1 以内的区域称为A区， L_1 和 L_2 间的区域称为B区， L_2 和 L_3 间的区域称为C区， L_3 以外的区域称为D区。

4个区域的波浪到达防波堤后呈现出不同的运动状态。A区波浪到达防波堤后由于行进路线被完

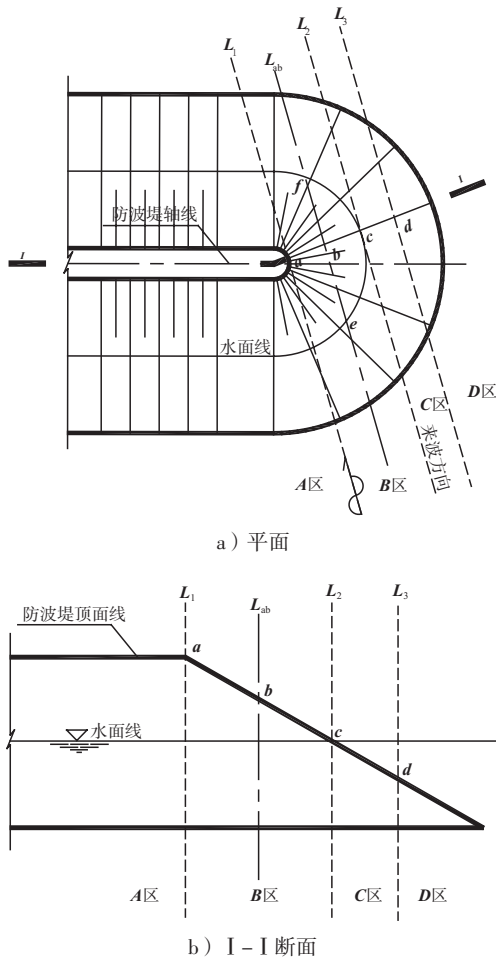


图4 堤头段水域分区示意

全阻挡而形成雍水,如果入射波方向与防波堤轴线垂直,波浪仅沿坡面周期性上爬和回落,波峰水体或渗入堤身或爬上堤顶,如果入射波不与堤轴线垂直,波峰水体即沿坡面上爬,又沿原来的方向传播,从而在坡面上形成蛇形运动;C区波浪受防波堤的影响较小,到达防波堤后呈绕射运动;D区波浪以原来的波态和速度向前传播。B区波浪到达防波堤坡面后的运动形态较为复杂,正是由于该区域波峰水体的复杂运动导致了冲击波流的产生。

B区波浪的波峰接触弧形坡面时,水体沿倾斜的坡面上爬(上爬高度高于正常波峰的峰顶),并越过 $abcd$ 坡面沿背浪侧坡面跌落,这部分水体的运动速度略快于波浪正常的传播速度(主要原因是倾斜坡面有一定的导浪作用,再者水体越过坡面后存在重力加速度)。C区的波浪绕射至后坡时略有迟缓(波峰水体运行路径稍

长),因此,2个分区的波峰水体到达后坡的时刻存在时间差。这个时间差虽然很小,但却是冲击波流产生的直接原因。当B区越过坡面的波峰水体在后坡跌落时,后坡刚经历了波谷,水面较低,且坡面存在一定的负压,而C区波峰水体由于绕射尚未完全到达,因而水头差较大,这部分水体携带的动能和势能突然释放,从而产生了较强的冲击波流。

比较6个波向的试验可以看出,当来浪方向与防波堤轴线间夹角较小时,在防波堤两侧均产生冲击波流,但背浪侧波流较大,迎浪侧波流较小(波向1和2);随着波向与防波堤轴线间夹角的增大,迎浪侧波流逐渐消失,只在背浪侧产生波流,且随着波向与防波堤轴线间夹角的增大,波流的冲击位置逐渐偏离防波堤。

3.2 冲击波流冲击点位置的确定

根据试验观察,波流冲击点中心的平面位置位于图4中 L_{ab} 和后坡水面线交汇点偏外处,即平面图中直线 L_{ab} 上 f 点偏外的位置,立面上在水面以下(即 f 点坡面和波谷交汇处)。B区波浪从波峰线接触到坡面时开始雍水,至波峰水体越过坡面在后坡跌落,最大冲击点距离触堤点(即图4中 e 点)约 $0.5L$ (L 为波长),受冲击波流影响最大的区域约为距最初触堤点($0.25\sim 0.75$) L 范围(沿 L_{ab} 长度)。

显而易见,入射波波高越大、周期越小,则波陡越大,所形成波流的冲击性越强。

3.3 冲击波流对护面块体的影响

6个波向的试验中,波向1~3产生的波流较大,波向4~6产生的波流较小,由此可断定当波浪方向与堤轴线间夹角小于 33° 时产生的波流较大。由图2看出,随波向与防波堤轴线间夹角的增大,生成的波流逐渐偏离堤身,对护面块体的影响逐渐减弱。各波向中,波向1和2产生的波流平行于坡面,对护面块体的影响最大,因此可推断当波浪方向与堤轴线间夹角小于 12° 时,对护面块体的影响最大。

从试验现象看,冲击波流使护面块体受到平行于坡面,指向斜下方的冲击力,其中波流冲击

点处块体受冲击最大。单个块体的重力、块体间的咬合力及块体间缝隙的大小是护面块体能否抵抗波流冲击的关键。增大护面块体的重力和相邻块体间的咬合力、减小块体间缝隙是解决该问题的有效手段。

3.4 堤头段护面块体稳定重力的探讨

规范^[4]第4.2.4条规定：在波浪正向作用下，且堤前波浪不破碎，斜坡堤堤身在计算水位上、下1倍设计波高之间的护面块体中，单个块体的稳定重力可按下式计算

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

式中：W为单个块体的稳定质量(t)；H为设计波高(m)； ρ_b 为块体材料的密度(t/m^3)； K_D 为块体稳定系数； ρ 为水的密度(t/m^3)； α 为斜坡与水平面的夹角($^\circ$)。

规范^[4]第4.2.16条还规定斜坡堤堤头部分的块体重力可按式(1)计算的结果增加20%~30%，位于波浪破碎区的堤身和堤头的重力，均应再增加10%~25%，必要时可通过模型试验确定。

在6个试验方向中，波向4~6与防波堤轴线间夹角大于 45° ，可以近似看作正向浪，波向1~3与防波堤轴线间夹角小于 45° ，属于斜向浪的范畴。从试验中各方向波浪对堤头护面块体的影响程度看，斜向浪的影响明显大于正向浪，对堤头护面块体的稳定起控制作用。为寻求斜向浪作用下堤头护面块体的稳定重力，利用公式(1)反求公式中的 K_D 值。式(1)中， $K_D=18\sim 24$ ，在计算堤头处块体重力时，如果将第4.2.16条中要求增加的20%~30%考虑在内，相当于 $K_D=13.8\sim 20$ 。

本次试验中确定的堤头块体的稳定质量为40 t，控制工况为波向1和2。公式(1)中 ρ_b 取 $2.3 t/m^3$ ， ρ 取 $1.025 t/m^3$ ， $m=\cot\alpha=1.75$ ，H取 $H_{5\%}$ 。经计算，波向1时， $K_D=13.3$ ，波向2时， $K_D=10.6$ 。

由上述计算看出，利用式(1)确定斜向浪作用时堤头护面块体的稳定重力时，规范规定的 K_D 值偏大，应该根据来浪方向和防波堤轴线间的夹角适当调整。从本次试验的情况看， K_D 值不应大于10.6。也就是说，如果按式(1)计算堤头护面块体的重力(K_D 取18)，应该在此基础上增加70%。

5 结 论

由于波浪对斜坡堤堤头的影响较中间段复杂，斜坡堤堤头段护面块体的稳定重力应比中间段大，根据物理模型试验结果，斜向浪作用时堤头段护面块体的稳定重力为中间段块体重力的1.7倍。需要说明的是，本论文仅进行了6个特定波向的作用，没有测量冲击波流的速度和冲击力随波浪要素的变化规律，这些问题尚需进一步研究。

参考文献：

- [1] Araki S, Yanagihara T, Nijima H, et al. Deformation of submerged breakwater head under oblique wave incidence [C]. Hawaii: Proceedings of the 13 International Offshore and Polar Engineering Conference, 2003.
- [2] Matsumi Y, Kimura A, Ohno K. Stability of armour units on breakwater heads under multidirectional waves [C]. New York: Proc, 27th ICCE, 2000.
- [3] JTJ 213—1998 海港水文规范 [S].
- [4] JTJ 298—1998 防波堤设计与施工规范 [S].
- [5] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程 [S].

(本文编辑 郭雪珍)