

凹角堤段前波高增幅的整体模型研究

钟瑚穗, 潘 峰, 过 达

(河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 由于入射波与斜向反射波的叠加或两个堤段的反射波斜交, 在凹角堤段前将形成复杂的短峰波系, 这种波浪形态引起的波能集中使堤前波高可能增幅. 利用整体模型实测了凹角为 152° 的条件下不同入射波向对应的波高值, 同时根据实测资料推求了等效反射系数, 从而得到规则波或不规则波条件下的入射波高放大系数, 为带凹角形状的防波堤设计提供了依据. 实测凹角堤趾前的波浪底流速也明显增大, 这对工程防冲设计也是很重要的.

关键词 凹角形防波堤 斜向反射波 波浪底流速 整体模型

中图分类号 : P731.22 ; TV139.2+6 **文献标识码** : A **文章编号** : 1000-1980(2002)03-0011-04

1 凹角堤段前的波浪形态

凹角堤段是指防波堤堤线在平面上向港外拐折, 迎浪侧呈小于 180° 夹角的堤线布置形式. 凹角的存在有可能在其附近的堤段前产生波能集中现象, 特别是当该凹角等于或小于 150° 时, 由波能集中而形成的波高增幅十分明显. 我国交通部发布的“防波堤设计与施工规范”中规定, 两段堤轴线的外夹角不宜小于 150° . 众所周知, 在波浪斜向入射的情况下, 堤前将形成短峰波系. 凹角堤段的边界条件使短峰波系的出现几乎很难避免. 短峰波是一种典型的三维波动, 其波面形态具有平坦的谷和陡峭的岛形峰, 能形成比平常立波更高的破碎波. 而且合成波峰的传播速度比它的组成波还要快, 最大轨迹速度可达组成波轨迹速度的两倍, 使堤脚前的冲刷明显加剧^[1,2], 见图 1.

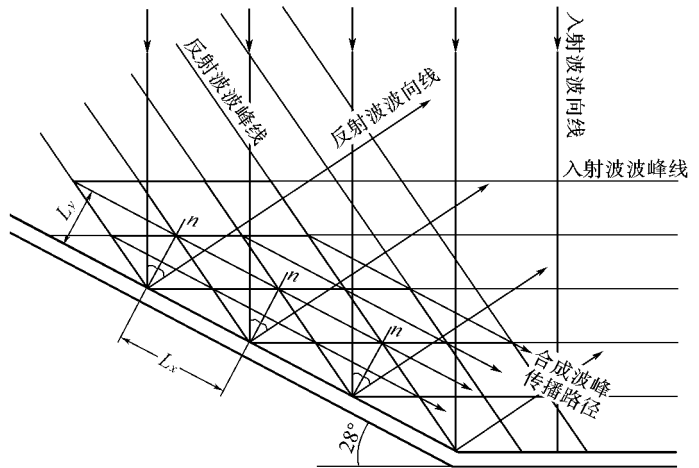


图 1 凹角堤段前的短峰波波浪形态

Fig.1 Short-crested wave pattern in front of concave breakwater

关于凹角堤段前的波高分布, 日本港湾技术研究所小舟浩治等人曾做过比较系统的研究^[3]. 研究结果表明, 凹角堤段前的波高同凹角的大小、堤身反射系数和堤长等密切相关. 若堤身为直立墙, 则 150° 的凹角将使得堤前经反射后的波高增大到 1.2 倍. 只有当堤身的反射系数减小到 0.3 左右, 波高的增幅才可能忽略不计. 因此在工程实践中应尽量避免出现凹角型式的堤身平面布置, 当不得已出现凹角堤段时, 要结合当地的地形和水文等条件对堤前的波高增幅现象认真加以研究.

2 研究凹角对堤前波高影响的方法

本研究是针对实际防波堤工程而进行的. 该工程从原防波堤堤头向前延伸 350 m, 新堤身同原堤轴线形成了 152° 的凹角. 为了确定凹角的存在对堤前波高究竟有多大影响, 一般可采用数值解法或整体模型试验方法. 前者的计算方法在参考文献^[3]中已有介绍, 本文着重介绍整体模型的研究方法. 通过量测和计算凹角堤

段前合成波的等效反射系数来确定堤前波高的增幅值,有了增幅后的波高值,则堤身的断面设计、越浪量等均迎刃而解.

斜坡式建筑物前经过反射以后的波高

$$H=H_i(1+\alpha)$$

(1)

式中: H ——堤前经反射以后的合成波高; H_i ——入射波高; α ——建筑物的波浪反射系数.

设 H' 为受到堤的平面边界条件影响而形成的、经反射后的堤前合成波高; α' 为等效反射系数,表示布置凹角后堤前的合成波高比没有凹角时会增大,相当于堤身的反射系数变大的等效结果.实际上只要堤身的断面形式、坡度、糙率和水深没有改变,堤的反射系数是不会变的.等效反射系数的引入只是反映了堤前合成波高增大的现实,是堤前合成波高变化的一种度量.所以

$$H'=H_i(1+\alpha')$$

(2)

类似地等效入射波高 H'_i 可以写成:

$$H'=H'_i(1+\alpha)$$

(3)

即

$$H'_i=\frac{1+\alpha'}{1+\alpha}H_i$$

(4)

式(2)和(3)表示,由于凹角的影响,堤前的实际合成波高由 H 变为 H' .这相当于 H_i 不变、 α 采用 α' 后得到的等效结果.或者相当于 α 不变、 H_i 采用 H'_i 以后得到的等效结果.在本次整体模型试验中入射波高 H_i 是保持不变的,式(4)说明凹角的存在相当于使入射波高增大了 $\frac{1+\alpha'}{1+\alpha}$ 倍.将 $K_\alpha=\frac{1+\alpha'}{1+\alpha}$ 称为波高放大系数.在整体模型的凹角堤段前按一定的间距布置浪高仪,这样就可以利用两点法或三点法等常规计算反射系数的方法,分别求出布置凹角前、后的同一段堤身的反射系数 α 和 α' ,从而确定 K_α .

3 凹角堤段前的波高及波动底流速

3.1 整体模型试验主要参数

试验水池的尺寸为 $50\text{ m}\times 17.3\text{ m}\times 1.2\text{ m}$,整体模型比尺采用 $1:80$.50 年一遇的设计波要素同 50 年一遇校核高潮位、设计高潮位和设计低潮位组合,并分别采用了规则波和不规则波.表 1 中仅列出了起控制作用的校核高潮位时的波要素.

表 1 校核高潮位时的波要素
Table 1 Wave factors at high tide level

	潮位/m	水深/m	波向	有效波高/m	平均波周期/s	谱峰周期/s
规则波	3.01	9.01	ENE	5.76	13.0	—
			E	5.18	11.4	—
不规则波	3.01	9.01	ENE	5.76	—	15.6
			E	5.18	—	13.7

整体模型模拟的原堤堤身长 600 m (约 6 倍平均波长),新堤长 350 m .堤身断面均为人工块体护面的斜坡堤,按海港水文规范计算的堤身反射系数为 0.489 .试验中凹角堤段两侧各 300 m 范围内布置了三排共 26 个浪高仪,见图 2.图中潮位 3.01 m , $H_i=5.76\text{ m}$,波周期 $T=13.0\text{ s}$.此外,沿堤还布置了 10 个测底流速的断面①.

3.2 堤前波高分布

ENE 向规则波作用下凹角堤段的波高分布如图 2 所示.此时堤前呈现短峰波的形态,凹角附近($12^\#$)和堤身外侧($21^\#$, $8^\#$)三个测波点上出现三个大波高值,如 $21^\#$ 点波高平均为 8.78 m ,是入射波高 5.76 m 的 1.52 倍; $12^\#$ 和 $8^\#$ 点波高分别为 7.10 m 和 6.89 m .而堤前其余各点($13^\#\sim 20^\#$ 和 $22^\#\sim 26^\#$ 共 13 个测波点)的波高平均值只有 4.30 m ,说明波面岛形峰的形态十分明显.E 向入射波与原防波堤轴线几乎正交,使堤前短峰波的形态不那么明显,波高沿原堤外侧普遍增大.此时堤前 $12^\#\sim 26^\#$ 共 15 个测波点的波高值平均为 7.55 m ,是入射波高的 1.46 倍.

不规则波作用时凹角的影响使得原防波堤堤前平均的有效波高增大,特别是最大有效波高点位几乎全部集中在凹角附近的 $12^\#\sim 15^\#$ 点以及 $17^\#$ 点,其中最大值达 8.31 m .

① 河海大学港口航道及海岸工程学院,嵊泗中心渔港综合治理工程凹角堤段前波高分布的整体模型试验研究,2001.

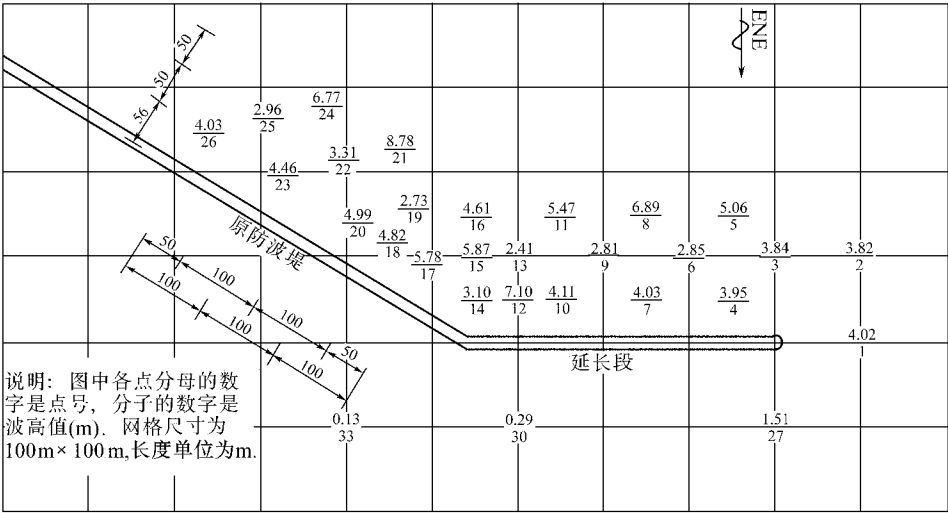


图 2 ENE 向规则波作用时的波高平均值

Fig. 2 Average wave height under the action of regular wave in ENE direction

实测的波高分布及其峰值在一定程度上反映了凹角堤段前复杂的波浪形态及波能集中现象,但因测波点位置并不刚好设置在最大的波峰位置,故还需利用实测波高来确定反射系数,才能求得堤前合成波的最大峰值.

3.3 堤身(等效)反射系数

按两点法或三点法计算确定的堤身反射系数和等效反射系数见表 2.

显而易见,仅有原堤时用规则波实测的堤前反射系数 α 同按规范的计算值十分接近. 不规则波的 α 值较大是因为谱峰周期一般达到平均周期 1.2 倍的缘故. 有了凹角后不论对于原堤还是新堤,表中之值实际上是等效反射系数 α' . 不论对于规则波还是不规则波, α' 值在 0.54 ~ 0.65 之间,平均而言 $\alpha' = 0.60$. 因此,对于规则波, $K_a = 1.60/1.48 \approx 1.08$ 对于不规则波, $K_a = 1.60/1.53 \approx 1.05$. 这就表明,由于 152° 凹角的存在,使堤身反射系数为 0.489 的斜坡堤堤段前合成后波高比没有凹角时明显增大,它相当于入射波高增大了 5% ~ 8%,在该工程的断面设计中应当按照增大后的入射波高来验算块体稳定重量和越浪量.

表 2 原防波堤延长前后的(等效)反射系数

Table 2 (Equivalent) Reflection coefficients before and after the extension of original breakwater

计算工况		系数	波向	规则波	不规则波
原防波堤		α	ENE	0.48	0.53
			E	0.47	0.54
原防波堤延长后	原堤堤前 新堤堤前	α'	ENE	0.540.60	0.60
			E		0.55
			ENE	0.65	0.61
			E		0.63

根据国外对凹角堤段前波高增幅现象的研究^[3],波高放大系数 K_a 是堤身反射系数 α 和凹角角度 β 的函数. 在 $\alpha = 0.50, \beta = 150^\circ$ 的条件下,凹角堤段前的 $K_a = 1.03 \sim 1.06$,同本试验结果 ($\alpha = 0.489, \beta = 152^\circ, K_a = 1.05$) 十分相近. 若 β 由 150° 减小为 135° 和 120° ,则 K_a 分别增大到 1.04 ~ 1.10 以及 1.05 ~ 1.12. 或者 β 保持 150° 不变, α 由 0.50 增加到 0.80 和 1.0(直立墙),则 K_a 分别增大到 1.08 ~ 1.15 以及 1.13 ~ 1.23. 可见,防波堤规范限制两堤段轴线的外夹角不小于 150° 是十分必要的. 但似乎还要补充堤身反射系数的限制条件,才能保证凹角堤段前的波高放大系数控制在 1.05 以下.

3.4 堤前波动底流速

在整体模型试验中利用 ADV 多普勒测速仪实测了防波堤延长前后的堤前波动底流速变化,并且同按规范的计算值进行了比较,表 3 为该校高潮位时的底流速.

表 3 规则波与不规则波作用下防波堤前沿波浪底流速

Table 3 Bottom velocities of wave motion in front of breakwater under the action of regular and irregular waves								
波向	潮位/m	试验工况	沿堤方向流速/(m·s ⁻¹)		垂直于堤方向流速/(m·s ⁻¹)		合成流速/(m·s ⁻¹)	计算值/(m·s ⁻¹)
ENE	3.01	原防波堤	不规则波 $V_{1/3}$	1.80	-1.27	1.51	-1.68	2.41
			规则波 V_m	1.99	-1.47	2.66	-2.09	2.84
		防波堤延长后	不规则波 $V_{1/3}$	0.99	-1.42	2.06	-2.97	2.80
			规则波 V_m	1.41	-0.76	3.18	-3.05	3.26

注 沿堤方向流速以指向堤头为正 垂直于堤方向流速以离堤方向为正 ; $V_{1/3}$ 表示实测不规则波底流速中最大 1/3 的平均值 ; V_m 表示规则波的底速最大值.

试验结果表明,波浪底流速中垂直于堤的流速分量大于沿堤的流速分量,出现凹角后一般沿堤分量减小,垂直于堤分量增大.合成流速在出现凹角后增大,且大于计算值.流速的最大值均集中于凹角附近.这同堤前合成波高增幅的趋势是一致的.

4 结 论

凹角堤段前因建筑物的斜向反射而形成复杂的短峰波系.本试验在规则波作用下,经反射后的合成波高由原来的 1.48 倍入射波高增大到 1.60 倍,增幅 8% 在不规则波作用下堤前合成波高的增幅为 5% 左右.相应地凹角堤段前由波浪产生的合成底流速最大值大于按现行规范的计算值.为控制凹角堤段前波高的增大幅度,必须同时限制堤身反射系数 α 和凹角的角度 β .在 $\alpha \leq 0.5$ 和 $\beta \geq 150^\circ$ 的条件下,堤前合成波高的增幅一般不超过 5% .

参考文献：

[1] Silvester R, Hsu J R C. Coastal stabilization : Innovative concepts[M] . Englewood Cliffs : PTR Prentice-Hall, Inc, 1993. 68 ~ 78.
[2] Herbich J B. Handbook of coastal and ocean engineering[M] . Houston : Gulf Publishing Company, 1990. 95 ~ 100.
[3] 小舟浩治,大里睦男.防波堤隅角部付近の波高分布に關する研究[A] .港湾技術研究所報告 [C] . 1976,第 15 卷第 2 号 .60 ~ 63,77.

Study on Amplification of Wave Height in Front of Concave Breakwater by Means of 3-D Physical Model

ZHONG Hu-sui, PAN Feng, GUO Da

(College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai Univ. , Nanjing 210098, China)

Abstract : A complex short-crested wave system may occur in front of a concave breakwater due to the superposition of incident waves upon oblique reflected waves or the crossing of reflected waves from two breakwater sections, and the concentration of wave energy may result in amplification of wave height. In this paper, by use of a 3-D physical model, the wave heights corresponding to incident waves from different directions are measured under the condition of a concave angle of 152°, and the equivalent reflection coefficients are deduced based on the measured data. Further, the amplification factors are obtained for regular and irregular waves, providing a basis for the design of breakwaters of concave shapes. It is also found that the concave shape may also lead to obvious increase of bottom velocity of wave motion, and that the factor is also important to the design of erosion control in projects.

Key words : concave breakwater ; oblique reflected wave ; bottom velocity of wave motion ; 3-D physical model