

闫圣, 邹志利, 徐杰, 等. 丁坝附近交叉波浪场引起的裂流系统实验研究[J]. 海洋学报, 2023, 45(10): 135–146, doi:10.12284/hyxb2023149
Yan Sheng, Zou Zhili, Xu Jie, et al. Experimental studies of rip current systems induced by the intersecting waves near a groin[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(10): 135–146, doi:10.12284/hyxb2023149

丁坝附近交叉波浪场引起的裂流系统实验研究

闫圣^{1,2,3}, 邹志利^{2*}, 徐杰², 常承书², 尤再进^{1,3}, 王东⁴

(1. 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 大连海事大学 港口与航运安全协同创新中心, 辽宁 大连 116026; 4. 大连海事大学 环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 裂流是狭窄而集中的离岸方向水流, 对海岸水底变形、物质输移和游泳者安全有重要影响。波浪在垂直海岸建筑物(如丁坝、航道挡沙堤等)上产生的反射会导致沿岸驻波, 在驻波节点区域由于波高很小会产生裂流, 这是海岸出现裂流原因之一。本研究通过物理模型实验给出了沙坝海岸上建筑物附近裂流系统不同于开敞水域交叉波裂流系统的特征, 讨论了波高沿岸变化对裂流系统的各裂流单元流量平衡的影响。结果表明: 建筑物的存在引起了沙坝和海岸之间背离建筑物方向的沿岸流动, 这导致了裂流系统中各裂流单元之间存在着流量的交换, 对各单元裂流流量大小和分布产生了直接影响; 各单元侧向流流量对裂流的贡献依赖于单元距建筑物的距离。

关键词: 裂流系统; 交叉波浪; 沙坝海岸; 海岸建筑物; 模型实验

中图分类号: P751 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2023)10-0135-12

1 引言

裂流是狭窄而集中的离岸方向水流, 通常从岸线附近穿过波浪破碎带向海延伸^[1]。裂流流速可高达 1~2 m/s^[2-3], 向海延伸的距离可长达 1~3 个破波带宽度^[1], 是造成海滩游客溺水^[4-6]和沙滩侵蚀^[7-9]的海洋灾害之一。裂流通常由破波带内波高的沿岸变化和平均水面升高的沿岸不均匀引起。导致沿岸波高和平均水面升高变化的因素有很多, 不同方向传播的波列形成的近岸交叉波浪场是其中的一个主要机制。产生近岸交叉波浪场的波浪传播过程有: (1) 远海不同风区产生的涌浪在近岸处的交汇; (2) 波浪在离岸自然岛屿或人工防波堤后的绕射; (3) 波浪在离岸浅滩、珊瑚潜礁或峡谷上的折射; (4) 波浪在自然海岸岬角或人工建筑物(如丁坝、航道挡沙堤等)附近的

反射^[10]。

Dalrymple^[11]首先提出了在开敞平坡海岸上具有相同频率的交叉波列会在破波带内外产生波高和平均水面升高的周期性变化并驱动一系列裂流系统单元。Dalrymple^[11]也利用线性理论计算了裂流的间隔。Wei 等^[12]利用光滑粒子流体力学三维模型 GPUSPH 更全面地研究了平坡海岸上交叉波产生的短峰波浪和破碎引起的裂流系统。他们观察到交叉波在不同的垂直岸断面位置会产生裂流和海底回流。由于腹点处波峰破碎分叉和波浪的非线性, 和线性理论的预报相比, 破波带外到海岸之间存在更多个环流单元。Kirby 和 Derakhti^[13]用 Boussinesq 方程模拟了沙坝海岸上交叉波破碎产生的裂流系统, 也发现岸边的裂流间隔为沙坝上裂流间隔的一半。Choi 和 Roh^[14]通过实验研究了在平面斜坡上交叉波浪流流相互作用、

收稿日期: 2023-02-10; 修订日期: 2023-06-10。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2601100); 国家自然科学基金项目(52201308, 51879033); 中国博士后科学基金项目(2022M720632); 中国辐射防护研究院平台开放基金项目; 中央高校基本科研业务费项目(3132023360, 3132023167)。

作者简介: 闫圣(1987-), 男, 辽宁省营口市人, 博士后, 主要从事海岸水动力学研究。E-mail: yansheng20210039@dlmu.edu.cn

* **通信作者:** 邹志利(1957-), 男, 教授, 主要从事海岸水动力和海岸动力地貌研究。E-mail: zlzou@dlut.edu.cn

波能耗散和破碎波峰两侧涡量对裂流强度的影响。Shin 等^[15]发现波浪经离岸的浅滩折射会在海岸处形成交叉波浪,其波高沿岸方向的变化导致了 Haeundae 海滩观测到的裂流系统。Long 和 Özkan-Haller^[16]发现加利福尼亚 La Jolla 海滩离岸处的水下峡谷边壁地形起伏引起了波高的沿岸变化并驱动了多个裂流。Zhang 等^[17]发现由退潮浅滩上的波浪折射导致的美国 Ocean 海滩上波浪交叉和裂流单元结构。Dalrymple 和 Lanan^[10]及王彦和邹志利^[18]通过实验观测了丁坝反射生成的交叉波浪场产生的裂流系统单元,但 Dalrymple 和 Lanan^[10]只测量了裂流的间隔,而王彦和邹志利^[18]仅给出了丁坝附近交叉波浪场节点 1 处裂流的水平流动和垂向流动特征。综上所述,现有的研究对开敞水域均匀交叉波浪场产生的裂流进行了较系统的研究,但对海岸建筑物附近的交叉波浪场引起的裂流系统特征的深入研究还没有见到。

本文重点关注的是海岸建筑物附近沿岸不均匀交叉波浪场所引起的裂流系统空间分布的特征,给出了建筑物反射波所导致的沿岸方向交叉波系统的波高和平均水位分布及其产生的裂流系统。该裂流系统由各交叉波节点处出现的裂流所构成,研究中对各节点裂流对应的环流单元的流动特征进行了分析,进而分析了各节点裂流在流量大小和流态上的不同及产生的原因。

2 实验方法

2.1 总体设置

实验在大连理工大学海岸及近海工程国家重点实验室的波浪水池中进行。波浪水池长 55 m,宽 34 m,深 0.7 m。水池的一端是由 70 块推板组成的推板式造波机,每块造波板宽 0.4 m。在水池的中央布置缓坡海岸模型,海岸模型的坡脚到造波板最近的距离为 9 m,如图 1a 所示。为了增加海岸模型的长度并便于生成斜向入射的波浪,海岸模型的沿岸方向与造波板成 30°角。海岸模型(除沙坝部分)的坡度 $\tan\alpha$ 为 1:40。在垂直岸方向上海岸模型总的宽度为 21 m,从坡脚到静水线的距离为 18 m,在静水线以上仍留有 3 m 宽度的波浪爬坡区。

为了模拟沙质海岸上波浪破碎区常见的沙坝地形,在海岸模型上设置一沿岸沙坝。沙坝具有高斯型横剖面,见图 1b。坝顶距静水线距离 x_{bar} 为 5 m,沙坝宽度为 2 m,坝顶高出海岸坡面的高度 A_{bar} 为 0.08 m,坝顶水深为 0.045 m。沙坝海岸上对应水深的表达式为 $h = x \tan\alpha - A_{\text{bar}} \exp[-(x - x_{\text{bar}})^2/0.3]$ 。

为了模拟丁坝和航道挡沙堤等海岸建筑物,在海岸一侧边缘上建有一垂直岸线的直墙丁坝。丁坝高 60 cm,宽 15 cm,长 25.69 m,从海岸上边缘延伸至坡脚以下 4.69 m。为了形成完全反射的波浪,丁坝用砖砌成,壁面为水泥面。波浪斜向入射到海岸,与丁坝成 30°角,因而可与丁坝反射波形成交叉波浪场(图 1c)。

海岸前方、后方和两侧的平底部分的水深为 0.45 m。在海岸前方的两侧设置与造波板垂直的一长一短两道导浪墙,短导浪墙向岸端终止于海岸的坡脚,长导浪墙向岸端与丁坝末端连接,两道导浪墙相距 25.2 m。坐标系原点位于静水线和丁坝的交点, x 轴在丁坝上,正方向指向离岸方向, y 轴在静水线上,正方向指向背离丁坝方向。

2.2 实验波况和波浪场测量

实验波浪包括周期为 1.5 s 的规则波和不规则波,本文仅给出规则波情况的结果。实验设置 3 个人射波高来研究不同入射波高对裂流系统的影响,入射波高的值见表 1。

在丁坝反射区内,入射波和丁坝反射波叠加形成交叉波浪场。在理论上,对于缓坡情况,叠加后的波面表达式可写为 $\eta = A \cos[(k \sin\theta)y] \cos[(k \sin\theta)x - \omega t]$ 。其中, A 、 k 、 θ 为当地的波幅、波数和波向角。由 Snell 折射定律可知,交叉波在向岸传播的过程中两个节点之间的间距 $[\pi/(k \sin\theta)]$ 保持为常数,即交叉波浪场的节点线和腹点线垂直于海岸。这样可将交叉波浪看作是波幅为 $A|\cos[(k \sin\theta)y]|$ 沿垂直于岸线方向传播的波浪,但其波幅在沿岸方向上呈周期性变化。

为了得到反射区内交叉波浪场的波高和平均水面升高,实验用浪高仪对交叉波浪场各节腹点和节腹点之间的断面的波面升高进行了测量。实验使用了 46 个电容式浪高仪。浪高仪安装在垂直于海岸的 3 列测量架上,测量架由铝方管和其两端的三脚架组成。其中测量架 I 上有 18 个浪高仪,垂直岸方向的测量范围为 $x = 1 \sim 20$ m,测量架 II 和 III 上各有 14 个浪高仪,测量范围为 $x = 1 \sim 11$ m。在 $2 \text{ m} \leq x \leq 6 \text{ m}$ 之间浪高仪的布置较密,间距为 0.5 m,其目的是测量沙坝处波高的剧烈变化。

整个波浪场的测量需要通过多次在沿岸方向移动测量架来完成,每次利用三列测量架测量 3 个垂直岸方向的断面上的波面升高,重复测量 2~3 遍。为了获得反射区内外的波浪场,沿岸方向测量范围为 0.05~15 m。测点形成的列阵见图 2。浪高仪采样频率为 50 Hz,采样的长度为 655 s。

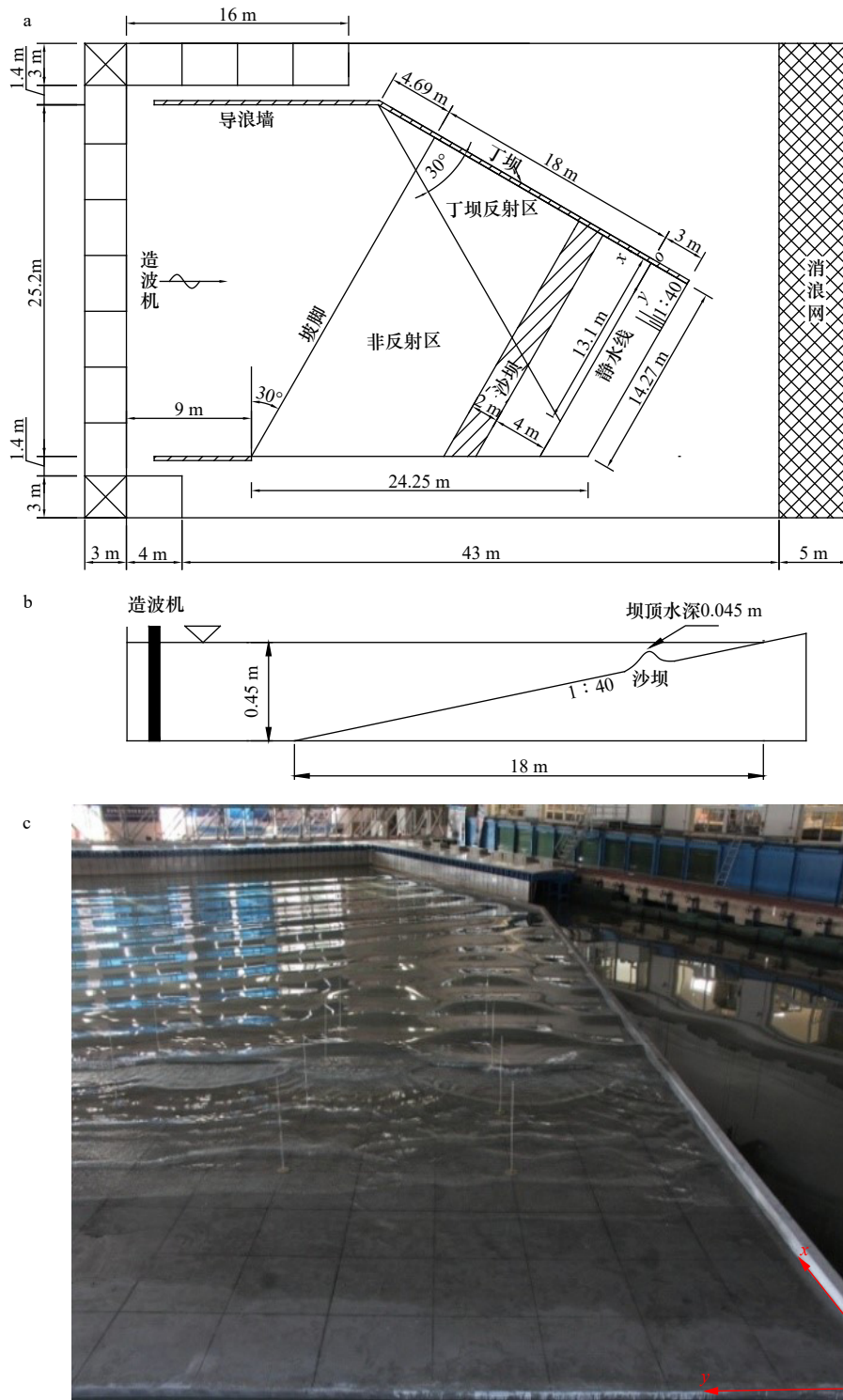


图1 沙坝海岸平面图(a)、剖面图(b)和丁坝附近交叉波浪场照片(c)

Fig. 1 Plan view of the barred beach (a), bottom profile the barred beach (b) and the photo of intersecting waves near the groin (c)

2.3 流场测量

为了获得丁坝反射区内形成的裂流系统的环流流场,实验在沙坝顶设置了平行于海岸的测量断面,在交叉波浪的各腹点处设置了垂直于海岸的测量断面。实验中采用了12个Nortek公司生产的多普勒声学点式流速仪(ADV)。流速仪安装在由圆管和三脚

架组成的测量架上。实验中流场的测量也需要通过多次在沿岸方向移动测量架来完成,每次将流速仪移动到相应的位置后,首先调整ADV的间距,探头的高度和方向,然后开始造波和采集数据。每次测量后待水面恢复平静,进行下一次造波,每个测量位置重复2~3次。

表 1 实验波况
Table 1 Wave parameters of experiment

波况	周期 T/s	入射波高 H_i/cm
RH1	1.5	2.61
RH2	1.5	4.16
RH3	1.5	5.87

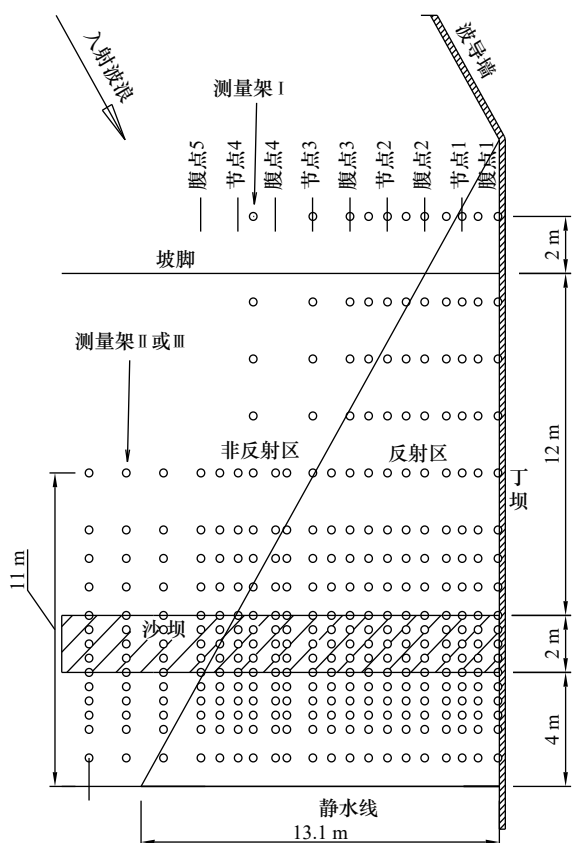


图 2 浪高仪测点位置

Fig. 2 Wave gauge sampling locations

图 3 给出了流速仪测点形成的阵列。为了研究反射区外的流动对反射区内裂流系统的影响,也对反射区外的流动进行了测量,坝顶断面测量范围为 $y = 0 \sim 14.1$ m。 $y = 0 \sim 7.2$ m 之间坝顶断面流场的周期性变化显著,因此流速仪的间距取为 0.15 m; $y = 7.2 \sim 14.1$ m 之间坝顶断面流场的周期性变化减弱,流速仪的间距取为 0.3 m。垂直于海岸的测量断面分别位于 $y = 2.73$ m (腹点 2)、5.46 m (腹点 3)、7.80 m、8.18 m (腹点 4)、9.0 m、10.20 m、10.91 m (腹点 5)、12 m、12.8 m、13.64 m。每个测量断面的测量范围为 $x = 0.2 \sim 4.6$ m,流速仪的间距为 0.4 m。为了测量节点 1 处裂流剖面的变化和形成的涡,在 $x = 4$ m、4.5 m、5.5 m、6 m 处增加平行于沙坝的测量断面,各测量断面的测量范围为 $y = 0.04 \sim 4.44$ m,流速仪的间距为 0.4 m。

实验中使用了固定杆侧视探头和下视线缆探头两种 ADV,侧式探头可以用于较小水深处流速的测量,而线缆探头可以用于较大水深处流速的测量。ADV 的采样点(探头前方 5 cm)位于距离底部当地水深 1/3 的位置,可以用来测量流速水深平均值。流速仪的流速测量范围为 ± 1 m/s,流速测量精度为测量值的 $\pm 0.5\% \pm 1$ mm/s。数据采集采用无线连接方式,即通过安装在两台电脑上的两个无线接收器进行流速数据实时接收,每台电脑的无线接收器接收 6 个 ADV 的数据。流速仪的采样频率为 100 Hz,每个位置进行 2~3 次测量,数据采集时间除个别组较长外,一般为 650 s。

2.4 实验数据处理

对于所有的实验组次,在造波机启动造波时开始采集数据,因此采集的数据中开始的部分受造波机初始启动的影响,求测量流速的时均值须将这一开始的

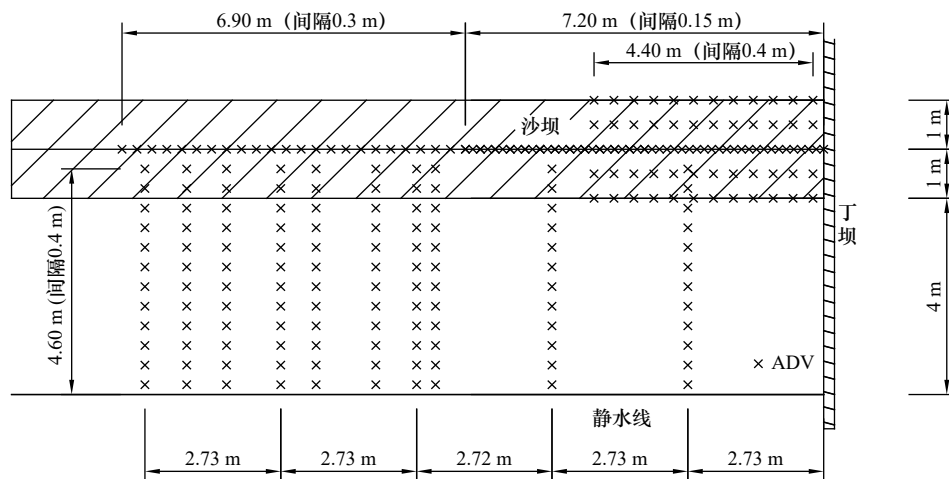


图 3 流速仪测点(x)位置

Fig. 3 ADV sampling locations (x)

测量部分去掉。因为沿岸流速在 150 s 后基本达到充分发展,所以做时间平均的时间序列取为 150 s 之后的时间序列。当破碎波中的气泡渗透到位于浅水中的 ADV 传感器的深度时,记录的速度时间序列中会出现毛刺,这些毛刺可由 Islam 和 Zhu^[19]开发的程序去除。波浪波高和平均波面升高也是截取 150 s 后的波面升高的数据来分析。波高通过上跨零点法确定,平均波面升高通过取时间平均值确定。

3 裂流系统波浪和流场特征

在以往裂流研究中,研究者们(Wei 等^[12], Kirby 和 Derakhti^[13])为了使研究理想化和简单化,通常考虑的是开敞水域的裂流系统,交叉波浪场沿岸变化是具

有周期性的。图 4 给出了通过数值求解波浪平均的水平二维近岸环流方程^[20]得到的开敞水域交叉波浪场产生的裂流系统的特征。图中的交叉波浪场由波高相同入射角度相反的两列入射波形成,其在沙坝上破碎后,会在沿岸方向驱动多个相互独立的裂流系统单元。在交叉波浪节点处存在离岸方向的裂流,在腹点处存在向岸方向的环流,并且各节腹点处的沿岸流速为 0,即单元之间没有流量的交换。对于结构物附近的裂流系统^[21],研究者们也很少考虑海岸建筑结构引起的反射对裂流系统的影响,没有研究在反射区内形成的裂流单元。本节将给出以丁坝作为全反射边界生成的交叉波浪场中裂流系统波浪和流场特征。

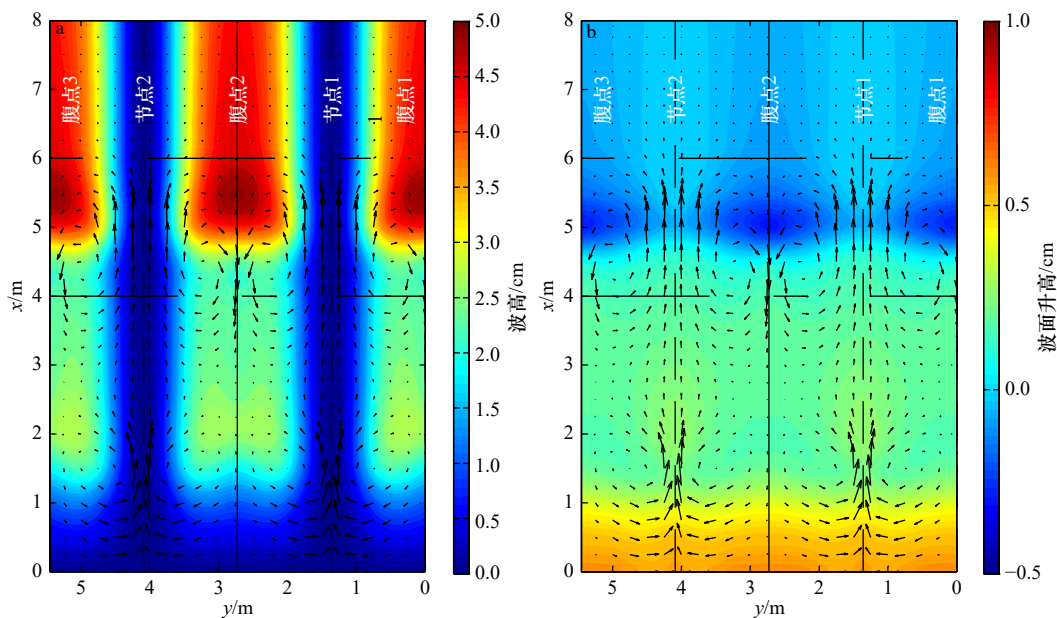


图 4 开敞水域交叉波浪场的波高(a)、平均波面升高(b)和裂流系统流场(箭头矢量)(规则波, $T=1.5$ s, $H_i=4$ cm)

Fig. 4 The wave height (a) and mean wave surface elevation (b) of the intersecting waves and the velocity field (arrow vector) of rip current systems on an open coast (regular waves with $T=1.5$ s and $H_i=4$ cm)

实验中波浪场节腹点位置和理论节腹点位置基本符合,但由于丁坝反射生成的交叉波浪场各腹(节)点处的波高在垂直岸方向的变化并不相同。图 5 给出了各节腹点处波高和平均波面升高在垂直岸方向上的变化。从图中可以看出,离丁坝越远的腹点处,波浪在沙坝上破碎前波高越小,沙坝和海岸之间的平均波面升高也越小。由于丁坝反射生成的交叉波浪场区域呈三角形(图 6),其范围由丁坝的长度和波浪的入射角度决定。反射区、非反射区的交界线和丁坝的夹角与波浪的入射角相等,在本实验中为 30° 。交界线与沙坝顶沿线的交点距丁坝 10.21 m,与静水线的

交点距丁坝的距离为 13.1 m。在丁坝的反射区外只存在斜向入射的波浪,波高在沿岸方向基本保持沿岸均匀。

在丁坝反射区,波高沿岸变化的交叉波浪场在沙坝附近破碎驱动了有限个互不相同的裂流系统单元。裂流的位置由交叉波浪的节点控制,反射区内以裂流为中心形成了 4 个裂流单元(图 6)。反射区内各裂流单元坝顶裂流和向岸流最大值各不相同。以波况 RH2 为例,节点 1、2、3 处的裂流最大值(29.4 cm/s、28.4 cm/s、25.1 cm/s)随着与丁坝距离变大而减小,而第 4 个节点处的裂流最大值(31.2 cm/s)反而增大。腹

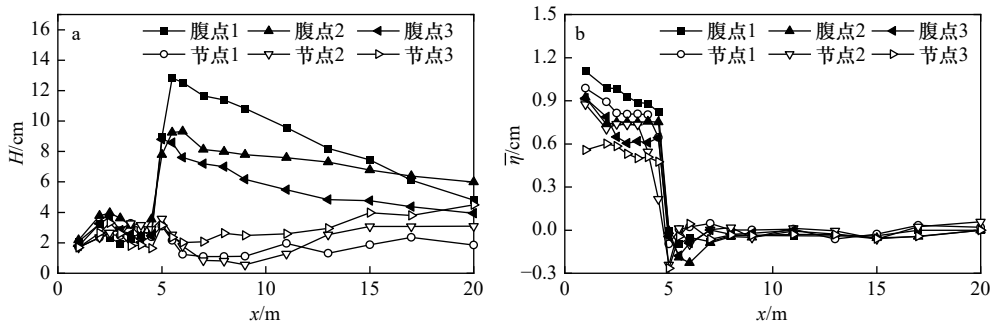


图 5 节腹点处波高(a)和增减水(b)(波况 RH2)
Fig. 5 Wave heights (a) and wave set-up (b) at nodes and antinodes for Case RH2

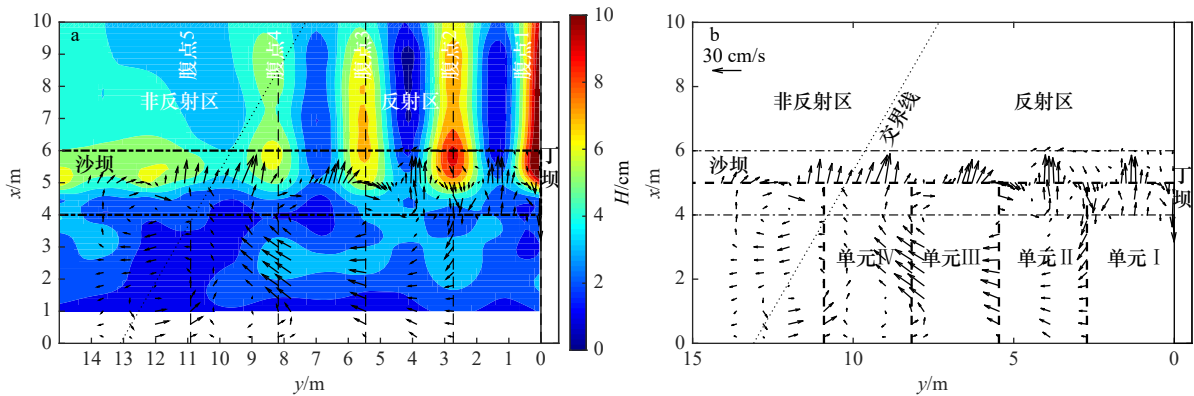


图 6 测量波高分布(a)和时均流场(b)(波况 RH2)
Fig. 6 The measured wave height (a) contours and mean flow fields (b) for Case RH2

点 1、2、3 处测量的向岸环流的最大值可达到附近裂流最大值的 1/3~1/2, 最大值(-13.3 cm/s、-9.3 cm/s、-7.4 cm/s)也随着距丁坝距离变大而变小。反射区交叉波浪场产生的裂流系统中在沙坝和海岸之间存在背离丁坝的沿岸流动, 这表明各个裂流单元之间存在着流量交换, 这和图 4 中开敞水域交叉波浪场产生的裂流系统不同。沿岸流动的最大值通常位于沙坝和岸线之间, 且在反射区内背离丁坝的沿岸流流动有增强的趋势(图 6)。

反射区外的斜向入射波浪在坝顶和岸线附近区域破碎驱动了沿岸流。同时反射区内的背离丁坝的流动会流向反射区外, 会和反射区外的沿岸流在反射区边缘处汇合。反射区内的流动会从沙坝和海岸的中间区域流出反射区, 其方向和沿岸流的方向相反, 使沙坝和海岸之间的沿岸流速剖面呈 S 型, 见图 7 中腹点 4 和腹点 5 处的速度剖面, 反射区交界处形成了较大的涡旋(图 6)。

与开敞水域交叉波浪引起流动的不同之处是, 反射区内沙坝和海岸之间存在背离丁坝的沿岸流动。其产生的原因可以通过 y 方向的动量方程来分析。假设流动已达平稳状态, 并忽略非线性项的影响,

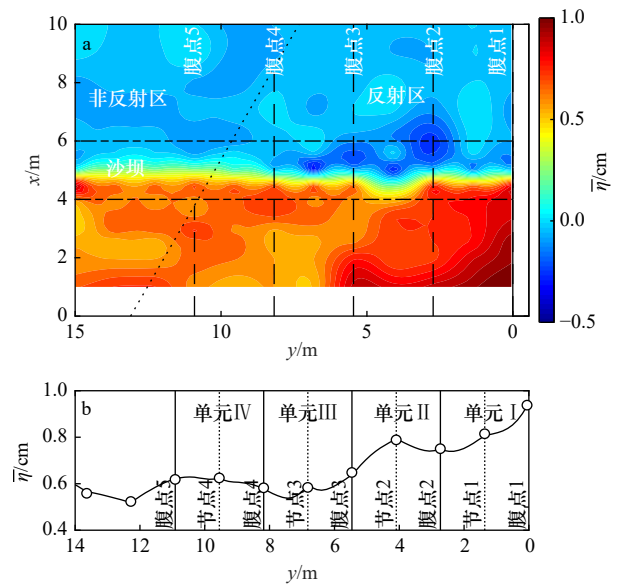


图 7 平均波面升高测量结果(a)和 $x = 2.5$ m 处平均水面沿岸方向的变化(b)(波况 RH2)

Fig. 7 The measured mean wave surface elevation (a) and the alongshore variations of mean water level (b) at $x = 2.5$ m for Case RH2

○: 测量值; —: 插值后的曲线
○: Measured data; —: interpolated curves

y 方向的动量方程可简化为

$$-\rho g(h+\bar{\eta})\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} - \frac{2\rho C_f u_0 V}{\pi} = 0, \quad (1)$$

式中, ρ 为水的密度; g 为重力加速度; h 为静水水深; $\bar{\eta}$ 为平均波面升高; S_{yy} 为 y 方向的辐射应力; C_f 为底摩擦系数; u_0 为波浪速度幅值; V 为沿岸方向的平均速度。在近岸处,波浪的方向近似垂直于海岸, y 方向的辐射应力 S_{yy} 可表达为

$$S_{yy} \approx \frac{1}{2}E = \frac{1}{16}\rho g H^2, \quad (2)$$

式中, H 为当地波高。从图5a和图6a中可以看出,波浪破碎前波高沿岸变化明显,各腹点处的波高随着距丁坝的距离增大而减小,波浪在沙坝上发生剧烈的破碎后受水深控制波高,但仍存在一些变化。图7a给出了平均波面升高空间分布的测量结果,该结果由垂

直断面布置的浪高仪通过在波浪周期上时间平均得到。图7b也给出了图7a中 $x=2.5$ m处平均水面沿岸方向的变化。从这两个图中可以看出,随着与丁坝距离的增加,在沙坝和海岸之间的平均水面升高逐渐降低,因此沿岸方向压力梯度的方向背离丁坝,这驱动了背离丁坝的沿岸流动的形成。为了进一步定量地说明背离丁坝沿岸流动的形成,图8中也给出了数值计算的结果。计算数值求解了波浪平均的水平二维近岸环流控制方程^[20],离岸处($x=10.5$ m)的波高边界条件取为实测波高。沙坝和海岸之间计算的沿岸方向速度 V 的方向背离丁坝,计算结果和实验结果在大小上仍存在一些偏差,原因可能来自于计算质量输移流量的线性表达式的精度。

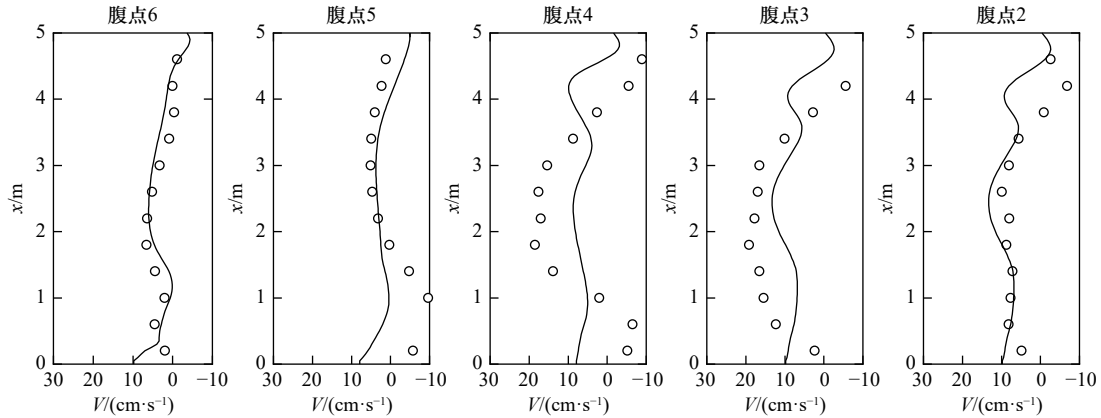


图8 垂直岸测量断面测量(圆点)和计算(实线)沿岸方向流速 V 剖面(波况RH2)

Fig. 8 The measured (circles) and calculated (lines) profiles of alongshore current V along the cross-shore sections (Case RH2)

4 裂流单元流量平衡分析

在以前的研究中,研究者们(Aagaard等^[22], Brander和Short^[23], Haller等^[24])通常考虑的是开敞水域不受边界影响的裂流系统,其特征是各裂流单元之间是相互独立的,即它们之间没有流量的交换,因此通常认为裂流的流量与随正向入射波浪流向海岸的质量输移流和水滚流量基本相等。从上一节的分析中可以看出,反射区内的裂流系统中有背离丁坝的流动穿过各个单元的侧面,表明各个裂流单元之间存在流量交换,因此将出现不同于开敞水域交叉波浪场中的裂流单元流量平衡机制,即裂流的流量因单元间侧向流动的存在不再和坝顶向岸方向流入裂流单元的流量相等。

为了定量研究反射区内的裂流系统中新的裂流流量平衡机制,首先要准确确定裂流系统中各组成成分的量值,这可通过考察裂流单元上的流量是否平衡

来实现。这里把反射区沙坝和海岸之间的流场以各节点处的裂流为中心划分为若干个单元,如图6b所示。各单元的四面由坝顶断面、岸线和与裂流相邻的两个腹点断面围成。在各个单元内,流动应满足连续方程:

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial(h+\bar{\eta})U}{\partial x} + \frac{\partial(h+\bar{\eta})V}{\partial y} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

式中, U 和 V 是 x 、 y 方向流速仪测量的时均流速; q_x 和 q_y 为 x 、 y 方向的Stokes质量输移流和水滚流量之和。对于平均流动, $\partial \bar{\eta} / \partial t \approx 0$, 单元侧面上进出流量之和应该为0。

在岸线和丁坝断面处进出单元的流量为0。腹点断面处单元间侧向流的流量 Q_i 可通过流速仪测得的沿岸流速乘以相应断面面积来计算,即

$$Q_i = \sum_{i=1}^n V_i(h_i + \bar{\eta}_i)\Delta x_i. \quad (4)$$

将沙坝和岸线之间的距离分为 n 个小段,其中每

小段长度 $\Delta x_i = 0.01 \text{ m}$, 每段上的速度 V_i 和水深 $(h_i + \bar{\eta}_i)$ 通过实测值插值得到。在坝顶断面处, 由 ADV 测量得到的流量也按上面方法计算, 其中节点处的裂流流量为

$$Q_{rip} = \sum_{i=1}^{n_1} U_i^+(h_i + \bar{\eta}_i) \Delta y_i \quad (5)$$

腹点处向岸环流流量为

$$Q_{on} = \sum_{i=1}^{n_2} U_i^-(h_i + \bar{\eta}_i) \Delta y_i \quad (6)$$

式中, $\Delta y_i = 0.01 \text{ m}$, n_1 和 n_2 分别为裂流和向岸流所占的段数, 每段上的裂流流速 U_i^+ 、向岸环流流速 U_i^- 和平均波面升高 $\bar{\eta}_i$ 也通过坝顶实测值插值得到。 U^+ 和 U^- 分别代表沿岸不同位置处测量得到的 U 的正值(离岸方向)和负值(向岸方向)部分。

在坝顶处还有不能通过流速仪测量给出的流入单元的 Stokes 质量输移流和水滚流量。这里通过水槽实验^[25]得到的计算表达式来计算这两者的流量, 即通过测量的坝顶波高 H_{bar} 来计算 Stokes 质量输移流流量

$$Q_s = \sum_{i=1}^n (q_s)_i \Delta y_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{g H_{bar}^2}{16 \sqrt{gh}} \right)_i \Delta y_i \quad (7)$$

利用破碎点处波高 H_b 来计算坝顶处水滚流量^[25]

$$Q_r = \sum_{i=1}^n (q_r)_i \Delta y_i = \sum_{i=1}^n \left[-0.006 + 4.44 \frac{H_b h_{bar}}{T} - 413.2 \left(\frac{H_b h_{bar}}{T} \right)^2 \right]_i \Delta y_i \quad (8)$$

式中, h_{bar} 为坝顶水深; T 为波浪周期。当插值得到的 $q_r < 0$, 取 $q_r = 0$ 。因为破碎点波高较小时 ($H_b \leq 4.5 \text{ cm}$)

时, 波浪刚开始破碎, 水滚还没有形成。图 9 给出了坝顶波高和破碎点处最大波高的沿岸变化。图 10b 中也标出了各节腹点处测量的破碎点位置。图 10a 和图 10b 中分别给出了由图 9 中波高计算得到的坝顶 Stokes 质量输移流和水滚流量。图中虚线也给出了以前研究中通常采用的计算式 $q_s = H_{bar}^2 / 8 \sqrt{gh}$ 和 $q_r = 0.9 H_{bar}^2 / T$ (如 MacMahan 等^[26]) 的计算结果。 $q_s = H_{bar}^2 / 8 \sqrt{gh}$ 没有考虑坝顶处波浪的强非线性的影响, $q_r = 0.9 H_{bar}^2 / T$ 不能全面考虑坝顶节腹点处的水滚处于的不同发展阶段。从图中看出由这两个计算式得到的流量与式(7)和式(8)得到的结果相比明显偏大。

图 11 给出了波况 RH2 各裂流单元上流量成分直方图。流量成分包括裂流流量、向岸环流流量、单元左侧面的流量、单元右侧面的流量、Stokes 质量输移流流量和水滚流量。图中正的流量为流出单元的流量, 负的流量为代表流入单元的流量。每个单元图中右上角给出了进出流量的和 $\bar{Q} = Q_{on} + Q_s + Q_r + Q_{rip} + \Delta Q_i$, 可以看出各单元进出流量可以实现平衡。所产生的误差来自于流速分布和破碎波高的测量精度, 最大误差 \bar{Q} / Q_{rip} 小于 13.6%。这说明了流量分析全面考虑了裂流系统中的各个重要组成部分并准确确定了各部分的量值。特别是分析中给出了以前研究中没有考虑的侧向流流量和节腹点处于不同发展阶段的水滚流量对裂流系统流量平衡实现的贡献。

从图中还可以看出不同单元上侧向流动对裂流系统中裂流流量的影响。在反射区的裂流系统中, 对于靠近丁坝的单元, 单元间侧向流动的存在会使裂流的流量减少; 对于靠近反射区交界处的单元, 单元间侧向流动的存在会使裂流的流量增加。和丁坝相邻

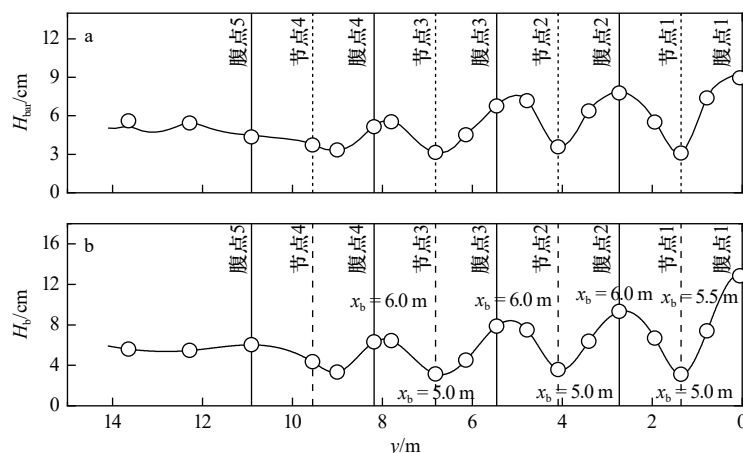


图 9 坝顶波高 H_{bar} (a) 和破碎点处波高 H_b (b) 沿岸变化 (波况 RH2)

Fig. 9 The alongshore variation of wave height at bar crest (a) and maximum wave height at breaking point (b) (Case RH2)

○: 测量值; —: 插值后的曲线。b 中也标出了各节、腹点测量的破碎点位置 x_b

○: Measured data; —: interpolated curves. The locations of breaking point x_b at the node and anti-node lines are also given in b

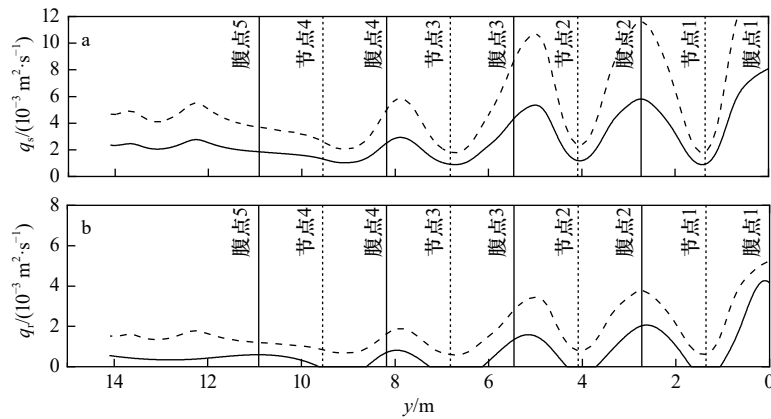


图 10 Stokes 质量输移流单宽流量 q_s (a) 和水滚单宽流量 q_r (b) 沿岸变化(波况 RH2)

Fig. 10 The alongshore variations of Stokes drift flux q_s (a) and surface roller volume flux q_r (b) (Case RH2)

—: 通过水槽实验得到的计算式; ---: 以前研究中通常采用的计算式^[26]
 —: The expressions from the experiment; ---: the usually used expressions^[26]

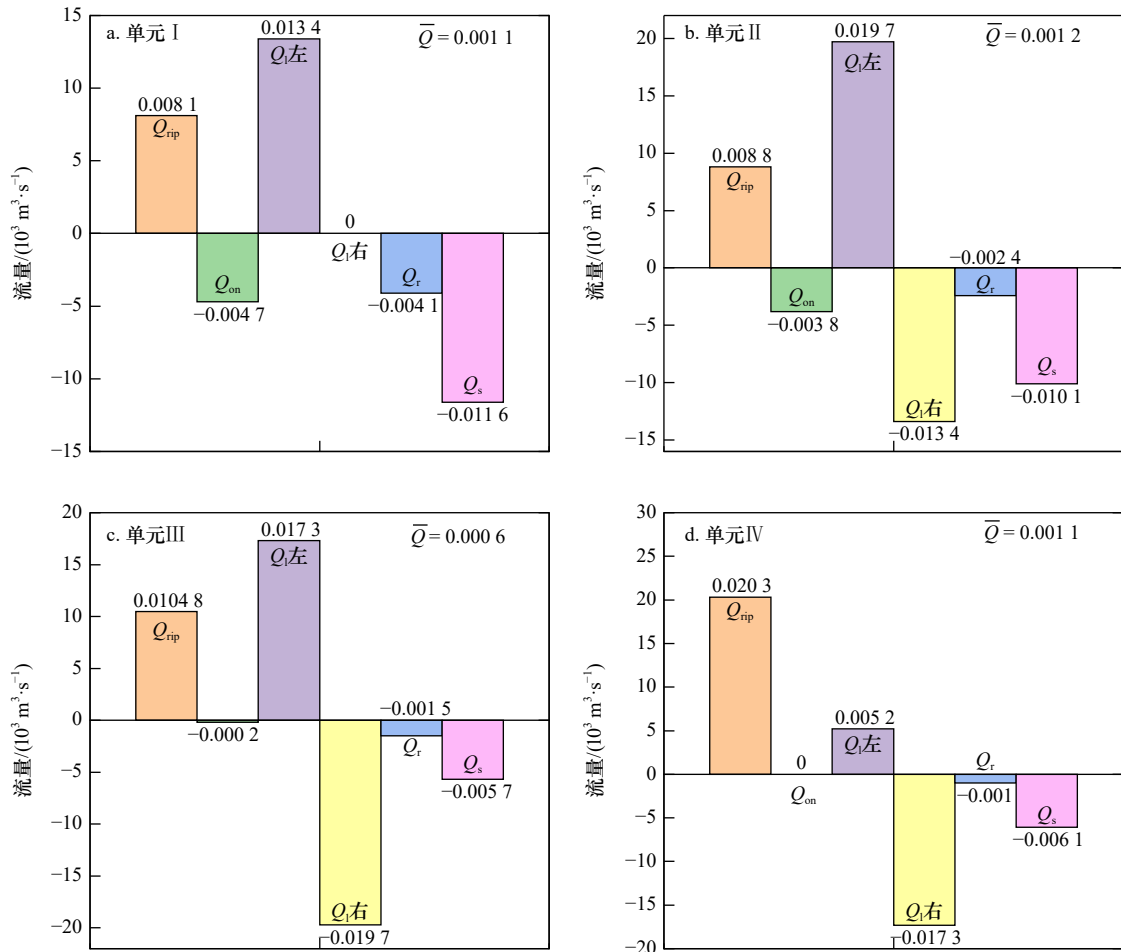


图 11 各裂流单元上流量成分直方图(波况 RH2)

Fig. 11 The histogram of flow transport for each rip current unit (Case RH2)

Q_{rip} : 裂流流量; Q_{on} : 向岸环流流量; Q_r : 侧向流流量; Q_r : 水滚流量; Q_s : Stokes 质量输移流流量

Q_{rip} : rip current transport; Q_{on} : onshore Eulerian transport; Q_r : lateral current transport; Q_r : surface roller transport; Q_s : Stokes mass transport

的单元 I 中向岸的欧拉环流流量 Q_{on} 、水滚流量 Q_r 、Stokes 质量输移流流量 Q_s 为流入单元的流量, 它们的

和约为裂流流量 Q_{rip} 的 2.5 倍(图 12), 这是因为单元 I 左侧面的侧向流带走了大部分(约 62%)流入单元的

流量,使通过裂流回沙坝外侧离岸区域的流量减少。单元 II 中因为腹点 2 处的波高小于腹点 1 处的波高,使得水滚流量和 Stokes 质量输移流流量都较单元 I 减少,从坝顶的流入单元 II 的总流量约为裂流流量的 1.85 倍(图 12),说明侧向流也带走了部分坝顶处流入的流量。在单元 II 右侧面,从单元 I 中流出的侧向流流量进入单元 II,而在单元 II 左侧面,随侧向流流出的流量大约为右侧面流量的 3/2(图 11b)。单元 III 中,从坝顶上流入单元的总流量约为裂流流量的 70%(图 12)。从左侧面处流出的流量略小于右侧面处流入的流量(图 11c),即在单元 III 中,侧向流没有带走坝顶处流入的流量,反而和其一一起通过裂流排回沙坝外离岸区域。单元 IV 位于反射区的交界处,从坝顶上流入单元的总流量约为裂流流量的 35%(图 12)。单元 IV 的显著特点是受到反射区外沿岸流动的影响,表现为单元左侧面近岸部分由反射区外流入的沿岸流与沙坝和岸线之间流出的沿岸流流量互相抵消,使左侧面处流出的流量很少。这样从右侧面流入的流量就和坝顶处流入的流量一起通过裂流流向沙坝处离岸区域,使得单元 IV 的裂流流量明显大于单元 I、II、III 中的裂流流量。从以上的分析中可以看出,在反射区的裂流系统中,对于靠近丁坝的单元,单元间侧向流的存在使裂流的流量减少。这一影响和单元距离丁坝的距离有关,单元距离丁坝的距离越远,侧向流和裂流流量之比越小。

图 13 中给出了各单元向岸流量、侧向流流量与

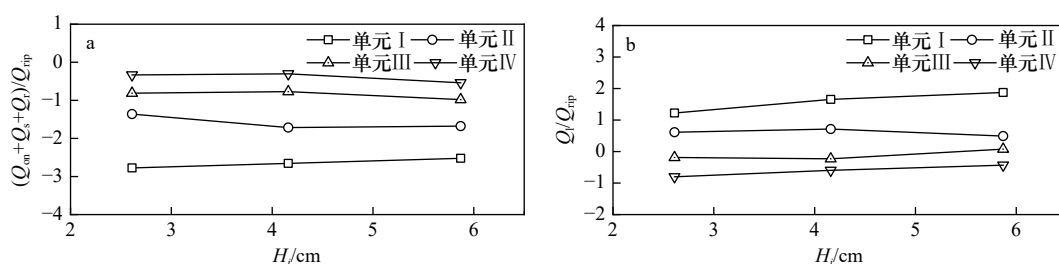


图 13 各单元坝顶流入单元的流量(a)、侧向流流量(b)与裂流流量之比随波高的变化

Fig. 13 The ratio of the transports into the units (a) on the bar crest and lateral transport (b) to rip current transport for each unit vs. incident wave height

5 结论

本研究通过物理模型实验给出了海岸建筑物附近交叉波浪场引起的裂流系统的特征。实验是在具有丁坝结构的沙坝海岸上进行的,由于设置丁坝为全反射边界,所以波浪场为交叉波浪场,该波浪场仅出现在反射区内,反射区外是斜向入射波浪和其产生的

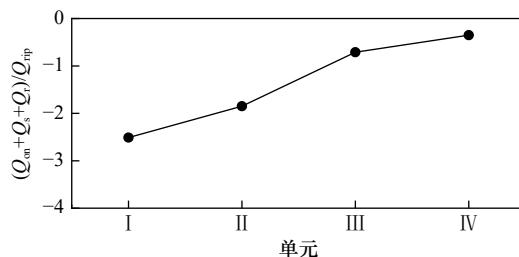


图 12 各单元上坝顶处流入单元流量和裂流流量之比(波况 RH2)

Fig. 12 The ratio of the onshore transport on the bar crest to that of rip current (Case RH2)

裂流流量之比随波高的变化。对于所有波高情况,从图中可以看出,丁坝附近的单元 I 和单元 II 裂流流量都小于从坝顶流入的流量(stokes 质量输移流,水滚流量和向岸环流流量)。对于单元 I,随着波高的增加从坝顶流入的流量和裂流流量之比从 2.88 下降到 2.50。对于单元 II,随着波高的增加从坝顶流入的流量和裂流流量之比从 1.36 增加到 1.67。对于不同入射波高,单元 III 和 IV 裂流流量都大于从坝顶流入的流量(Stokes 质量输移流,水滚流量和向岸环流流量)。单元 III 两者比例变化范围为 0.77 到 0.97,单元 IV 两者比例的变化范围为 0.30 到 0.53。从图中可以看出,向岸环流流量、Stokes 质量输移流流量和水滚流量三者之和与裂流流量之比变化不大(图 13a),各单元侧向流对裂流的贡献变化不大(图 13b),说明各单元侧向流流量对裂流的不同贡献主要取决于单元和丁坝的相对位置。

沿岸流。模型实验对以上波浪场和流场进行了波高、平均波面升高和速度分布的测量,分析了裂流系统各单元流量平衡机制。研究所得到的主要结论如下:

(1) 海岸建筑物附近交叉波浪场引起的裂流系统与对应的开敞水域交叉波浪场裂流系统的不同特征。在海岸建筑物的反射区内交叉波浪在沙坝上破

碎驱动了有限个裂流系统单元。反射区内的交叉波浪在各节腹点处的波高和平均波面升高在沿岸方向不一致,二者在背离丁坝方向上呈现递减变化趋势。这引起了沙坝和海岸之间的背离丁坝方向的沿岸流动,即导致了各裂流单元之间存在着流量的交换。

(2)单元间侧向流流量交换形成了对裂流流量的新的贡献(区别于开敞水域情况)。这一贡献的定量分析是通过分析各裂流单元流量平衡来实现的。靠近丁坝的两个单元中侧向流流动带走了部分坝顶处流入单元的流量,使裂流的流量减少。靠近反射区交界处的裂流单元受反射区外的流动影响,部分侧向流流动和坝顶向岸流入的流量一起通过裂流流回沙坝

离岸区域,使裂流流量增大。

(3)对于不同的波高情况,向岸环流流量、Stokes质量输移流流量和水滚流量三者之和与裂流流量之比变化不大,各单元侧向流对裂流的贡献变化不大,说明各单元侧向流流量对裂流的不同贡献主要取决于单元和丁坝的相对位置。

本研究中模型实验选择了与海岸垂直的直墙丁坝来模拟海岸建筑物,在实际中海岸建筑物的结构、形式和布置方式多样,海岸建筑物不同反射系数、孔隙率、长度和与海岸的夹角都会对附近的交叉波浪场和裂流流场产生影响,今后的有关研究可针对这些影响因素来开展工作。

参考文献:

- [1] Castelle B, Scott T, Brander R W, et al. Rip current types, circulation and hazard[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 163: 1–21.
- [2] McCarroll R J, Brander R W, Turner I L, et al. Lagrangian observations of circulation on an embayed beach with headland rip currents[J]. *Marine Geology*, 2014, 355: 173–188.
- [3] MacMahan J H, Thornton E B, Reniers A J H M. Rip current review[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 53(2/3): 191–208.
- [4] Brewster B C, Gould R. Comment on “Rip current related drowning deaths and rescues in Australia 2004–2011” by Brighton et al. (2013)[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14(8): 2203–2204.
- [5] Short A D, Hogan C L. Rip currents and beach hazards: their impact on public safety and implications for coastal management[J]. *Journal of Coastal Research*, 1994(12): 197–209.
- [6] Woodward E, Beaumont E, Russell P, et al. Analysis of rip current incidents and victim demographics in the UK[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 65(10065): 850–855.
- [7] Gallop S L, Bryan K R, Coco G, et al. Storm-driven changes in rip channel patterns on an embayed beach[J]. *Geomorphology*, 2011, 127(3/4): 179–188.
- [8] Thornton E B, MacMahan J, Sallenger Jr A H. Rip currents, mega-cusps, and eroding dunes[J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1/4): 151–167.
- [9] Loureiro C, Ferreira Ó, Cooper J A G. Extreme erosion on high-energy embayed beaches: influence of megarips and storm grouping[J]. *Geomorphology*, 2012, 139–140: 155–171.
- [10] Dalrymple R A, Lanan G A. Beach cusps formed by intersecting waves[J]. *GSA Bulletin*, 1976, 87(1): 57–60.
- [11] Dalrymple R A. A mechanism for rip current generation on an open coast[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(24): 3485–3487.
- [12] Wei Zhangping, Dalrymple R A, Xu Munan, et al. Short-crested waves in the surf zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(5): 4143–4162.
- [13] Kirby J T, Derakhti M. Short-crested wave breaking[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2019, 73: 100–111.
- [14] Choi J, Roh M. A laboratory experiment of rip currents between the ends of breaking wave crests[J]. *Coastal Engineering*, 2021, 164: 103812.
- [15] Shin C H, Noh H K, Yoon S B, et al. Understanding of rip current generation mechanism at Haeundae Beach of Korea: honeycomb waves[J]. *Journal of Coastal Research*, 2014, 72(S1): 11–15.
- [16] Long J W, Özkan-Haller H T. Offshore controls on nearshore rip currents[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C12): C12007.
- [17] Zhang Yu, Shi Fengyan, Kirby J T, et al. Phase-resolved modeling of wave interference and its effects on nearshore circulation in a large ebb shoal-beach system[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(10): e2022JC018623.
- [18] 王彦, 邹志利. 平直沙坝海岸叠加波浪的裂流试验[J]. *水科学进展*, 2023, 26(1): 123–129.
Wang Yan, Zou Zhili. Experimental study of rip currents by intersecting wave on barred beach[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 26(1): 123–129.
- [19] Islam M R, Zhu D Z. Kernel density-based algorithm for despiking ADV data[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(7): 785–793.
- [20] Bruneau N, Bonneton P, Castelle B, et al. Modeling rip current circulations and vorticity in a high-energy mesotidal-macrotidal environment[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C7): C07026.
- [21] Scott T, Austin M, Masselink G, et al. Dynamics of rip currents associated with groynes——field measurements, modelling and implica-

- tions for beach safety[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 107: 53–69.
- [22] Aagaard T, Greenwood B, Nielsen J. Mean currents and sediment transport in a rip channel[J]. *Marine Geology*, 1997, 140(1/2): 25–45.
- [23] Brander R W, Short A D. Morphodynamics of a large-scale rip current system at Muriwai Beach, New Zealand[J]. *Marine Geology*, 2000, 165(1/4): 27–39.
- [24] Haller M C, Dalrymple R A, Svendsen I A. Experimental study of nearshore dynamics on a barred beach with rip channels[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 107(C6): 14-1–14-21.
- [25] 闫圣. 缓坡海岸沿岸流和边界控制裂流系统特征研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
Yan Sheng. Study on the features of longshore currents on mild beaches and boundary rip current systems[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [26] MacMahan J H, Thornton E B, Stanton T P, et al. RIPEX: observations of a rip current system[J]. *Marine Geology*, 2005, 218(1/4): 113–134.

Experimental studies of rip current systems induced by the intersecting waves near a groin

Yan Sheng^{1,2,3}, Zou Zhili², Xu Jie², Chang Chengshu², You Zaijin^{1,3}, Wang Dong⁴

(1. *College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China*; 2. *State Key Laboratory of Coastal and Off-shore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*; 3. *Center for Ports and Maritime Safety, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China*; 4. *College of Environmental Sciences and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China*)

Abstract: Rip currents are narrow and concentrated seaward-directed flows and play an important role on coastal morphodynamics, mass transport and swimmer safety. As the intersecting wave field caused by wave reflection of coastal structures is not uniform alongshore, the flow characteristics and spatial distribution of rip currents are different from those of uniform intersecting waves on an open coast. The reflection of waves on cross-shore coastal structures will lead to longshore standing waves, and rip currents will occur in the area of standing wave nodes because of the small wave height, which is one of the generation mechanisms for rip currents. In this study, the characteristics of rip current systems near a coastal structure on a barred beach are given by a laboratory experiment. The influence of the longshore variation of wave height on the flow balance of each rip current unit is discussed. The results showed that the existence of structure drives a longshore current away from the structure and causes the water exchange between each rip current unit. The lateral currents between rip current units are found to make contributions to the rip current transport of each rip current unit and the contributions mainly depend on the relative position of the unit to the structure.

Key words: rip current system; intersecting waves; barred beach; coastal structures; physical experiments