

文章编号:1005-0930(2023)01-0001-012 中图分类号:P73 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2023.01.001

叠加波浪场作用下裂流三维分布特征研究

王彦¹, 邹天宇¹, 邹志利², 刘忠波¹,
房克照², 王旭鹏³

(1.大连海事大学交通运输工程学院,辽宁 大连 116026;2.大连理工大学海岸及近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024;3.昌黎黄金海岸国家级自然保护区管理中心,河北 秦皇岛 066607)

摘要:明晰叠加波浪场作用下裂流三维分布特征,有助于全面深入开展海岸裂流的演化规律和致灾机理研究.为分析丁坝、沙坝和沟槽对裂流三维特征的影响,通过对沟槽内和槽外沙坝上两个不同节点位置 ADV 流速测量,实验研究了有槽沙坝海岸交叉叠加波浪的裂流垂向分布.结果表明:对沟槽内和沙坝上节点断面,裂流头区域表现为靠近水表面具有较大速度的表面流特征.而对于裂流颈位置则有不同,沙坝上的裂流垂向结构变化较大,沟槽内的裂流垂向数值较为均匀.沟槽内断面的裂流垂向分布符合对数分布规律.裂流沿岸速度分量表现为上大下小的规律,但对于不同周期略有不同.丁坝通过控制近岸环流系统而影响裂流沿岸速度分量的波动特征,导致沟槽内裂流的沿岸速度分量指向丁坝方向,对距离丁坝较远的沙坝上裂流的沿岸速度分量影响减弱.

关键词:裂流;垂向结构;叠加波浪;有槽沙坝;丁坝;节点

裂流是近岸海岸波浪破碎所导致的一种强而窄的离岸水流^[1],它会把游泳者带入离岸深水而溺水,是滨海游客的危险“杀手”,影响海岸安全.叠加波浪产生的瞬态裂流在自然界中具有较高危险性,且具有强烈的三维特性^[2].因此,为有效建立海滩裂流灾害预报模型,对叠加波浪产生的瞬态裂流在垂向上分布测量和变化规律的分析很有必要^[3].

裂流的生成机理较多,主要包括由沙坝、尖角海滩和潜礁等产生的地形控制裂流、边缘波、叠加波浪和波群等产生的波浪控制裂流^[4].已有的裂流研究大多是对水深平均流速分布^[5-6],而对于裂流垂向分布的研究还较少.Sasaki^[7]研究表明陡坡地形正向入射波浪生成边缘波所产生的裂流垂向分布沿水深分布较均匀.Wind 和 Vreugdenhil^[8]、Giger 等^[9]实验研究了沿岸流遇边墙而转向离岸方向生成裂流的垂向分布,表明裂流沿水深变化不大,从水底到水面呈轻微增加的趋势.对于正向波浪入射下有槽沙坝地形,Haas 和 Svendsen^[10]实验研究了沟槽中心线不同位置的裂流垂向分布特征,结果表明速度在沟槽区域呈均匀分布,而槽外离岸区域呈上大下小的表面流动特征.Drønen 等^[11]进行了半个

收稿日期:2021-02-10;修订日期:2021-11-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1407700);国家自然科学基金项目(51779022);海洋工程国家重点实验室(上海交通大学)开放基金资助(GKZD0100084)

作者简介:王彦(1982—),男,博士,讲师.E-mail:ywang0412@163.com

沟槽的沙坝地形水槽实验,结果表明速度分布在沟槽区域外速度垂向变化较大,在沟槽区域呈均匀分布.对于潜礁地形,Poort^[12]进行了暗礁海岸的裂流速度垂向分布特性实验,结果表明裂流垂向速度分布在暗礁附近沿水深趋于一致,而在远离暗礁处近水面处的流速更大.Choi和Roh^[13]研究了平衡剖面地形下伪叠加波浪产生的裂流实验,指出速度分布表面的裂流流速略高于水深中部的裂流流速.Sous等^[14]对丁坝附近的偏转裂流进行了现场观测研究,结果表明在裂流颈区域裂流沿水深呈均匀分布,在裂流头处出现明显变化,最大速度在表面附近.

以上研究结果表明对于不同生成机理产生的裂流垂向分布特征是不同的,特别是对于短峰波叠加波浪场生成的裂流垂向分布特征的研究更为缺乏,交叉叠加波浪又是近岸常见现象^[15-16].本文在有沟槽沙坝海岸交叉波浪生成裂流实验^[17]基础上,利用ADV测量了裂流流速最大值剖面处裂流流速沿水深的分布情况,深入分析丁坝反射形成的叠加波浪生成裂流的垂向分布和三维环流特征.

1 实验布置

1.1 实验地形

该实验在大连理工大学海岸及近海工程国家重点实验室的多功能水池(长55m,宽34m,深0.7m)进行,是在有槽沙坝海岸裂流水平测量实验^[17]基础上的垂向分布实验.图1为裂流垂向分布实验布置图,采用与造波机成 30° 角的1:40坡高斯型沙坝模型.沙坝中心距静水线5m,宽2m,坝顶水深0.045m.裂流沟槽在距离丁坝1~2m范围.叠加波浪由入射波和丁坝反射形成的反射波叠加而成(图1中阴影区),叠加后的波浪为垂直向岸传播的驻波,其在沿岸方向形成若干个腹点与节点,靠近丁坝的节点1和腹点1,以此类推,具体位置见表1.

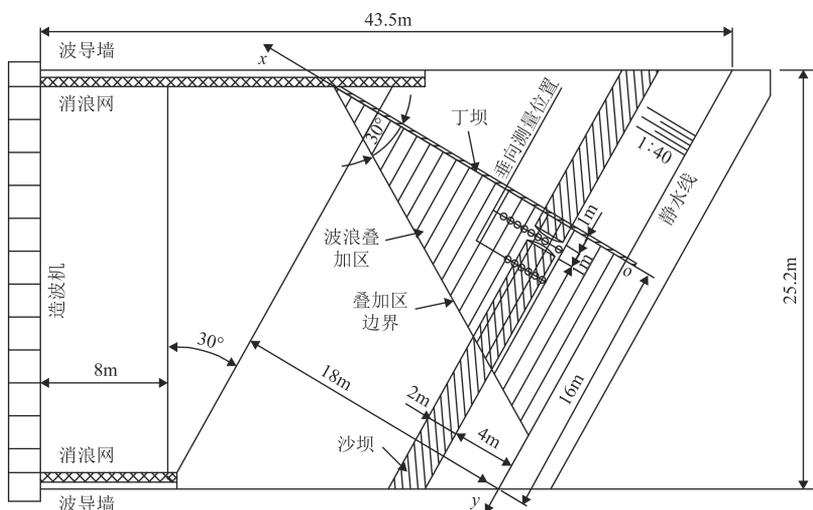


图1 裂流垂向分布实验布置

Fig.1 Experimental set-up

表1 实验波况表
Table 1 Test conditions

波况	波浪类型	波高/cm	周期/s	节点			腹点		
				1	2	3	1	2	3
SRT1H2	规则波	5.80	1.0						
SRT1H3	规则波	6.98	1.0	0.75	2.25	3.74	0	1.50	2.98
SIT1H2	不规则波	4.53	1.0						
SIT2H2	不规则波	4.84	1.5	1.41	4.14	6.87	0	2.73	5.46
SIT3H2	不规则波	4.68	2.0	1.94	5.82	9.70	0	3.88	7.76

注:波高为波浪叠加区外深水波高,规则波取平均波高,不规则波取均方根波高;节点、腹点位置为距丁坝距离,m.

1.2 测量方法

为了测量裂流垂向分布,需要将流速仪布置在沟槽中心线($y = 1.5\text{m}$)垂直岸线方向不同位置,各测量点距静水线的距离分别为4.0、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5和8.0m,如图2(a)所示.实验中为了减少ADV并排绑定造成测点水平距离过大,将采用3个软线ADV和2个直杆侧式ADV绑扎在1个可移动的测量架上,并使ADV的测量探头沿垂向位于不同高度,各波况具体测点分布如图2(b)所示.最底部的ADV1距离水底0.5cm.实验中共采用3组流速仪测量架以提高测量效率.表1所示为1:40坡有沟槽裂流垂向分布测量,这里仅选择5个波况,与有沟槽沙坝海岸裂流实验中的波况相对应.另外还给出波况SIT2H2在节点2的实验组次.实验数据采集时长为720s,速度采样频率为50Hz.

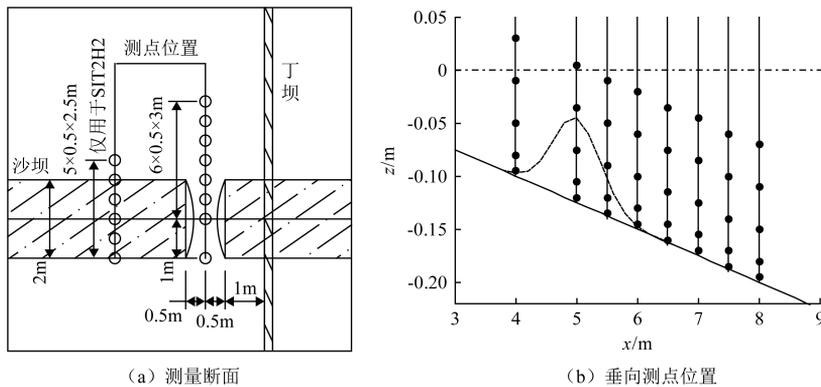


图2 测量断面和垂向测点位置图

Fig.2 Measuring sections and location of vertical measuring points

图3所示为波况SRT1H2在 $x = 5.5\text{m}$ 位置的5个ADV的时间历程线和0.05Hz低通滤波线,图3(a)、(b)分别为垂直岸线的离岸速度分量 u 和沿岸方向的裂流速度分量 v .由图3可以看出:各测点流速在0~200s呈现出速度值增加趋势,200s之后逐渐趋于稳定.由图3(a)纵向速度 u 的时间历程线可以明显看出,在350s之后出现了明显的波动,这表明裂流具有时变特征.本文的速度值取200s以后时间段的平均速度值,该长度的选取考虑到了裂流不稳定所引起的长周期摆动.

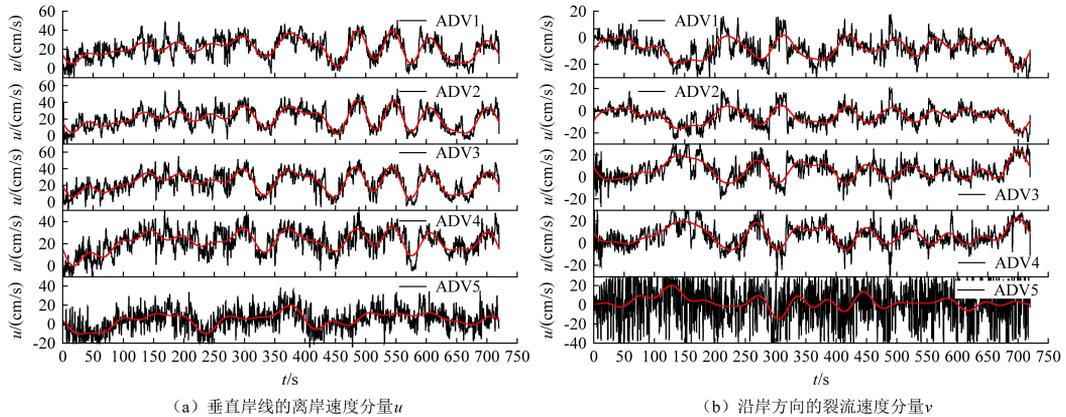


图3 波况 SRT1H2 时间历程线

Fig.3 Time series of case SRT1H2

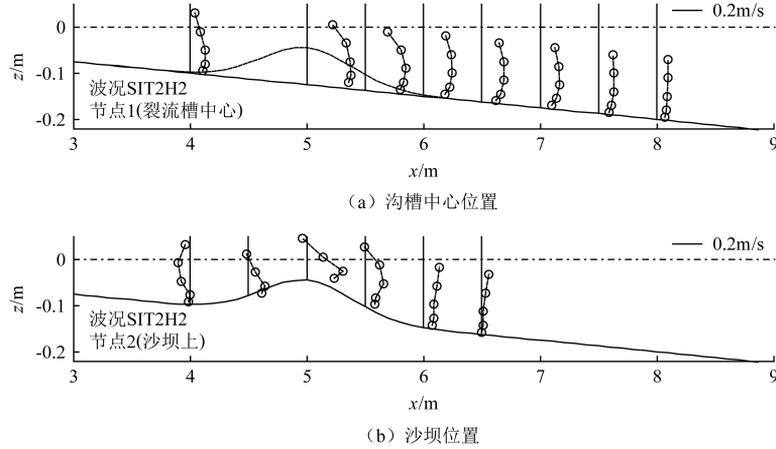
2 裂流垂向分布特征

本文主要研究各个测量断面上横向速度 v 、纵向速度 u 以及速度矢量沿水深的分布特征。在节点处纵向速度 u 呈现出离岸方向的称为裂流。首先讨论了不同水底地形(沟槽内和沙坝)离岸速度分量 u 垂向分布规律和区别,并以沟槽中心位置离岸速度分量 u 的变化规律及拟合结果进行分析。

2.1 不同水底地形情况纵向速度 u 分量特征

针对裂流沟槽的中心线位置的裂流垂向分布,分析了位于沟槽上游沙坝处节点位置的裂流垂向分布特征,波况 SIT2H2 的实验结果如图 4 所示。由图 4 可看出:位于沟槽中心位置的节点 1 处各位置($x=4\text{m}, 5\sim 8\text{m}$)的纵向速度 u 沿水深分布都呈现出离岸流动趋势,垂向分布呈现两端小中间大的趋势($x=7.5\text{m}, 8\text{m}$ 位置上部测点不够,未能测得靠近水面的流速),裂流垂直岸线方向的分布规律表现为:沙坝范围区域为裂流颈,离岸裂流速度值最大,这与文献[17]中有槽沙坝沟槽中心位置的水深平均裂流速度最大值位置相一致;沟槽的离岸区域为裂流头,随着离岸距离增大,流速 u 的数值逐渐减小,此处由于水表面未设置 ADV 测点,未得到裂流头位置离岸速度上部分布特征。

图 4(b)所示为节点 2(距离丁坝 3.95m 处)在垂直岸线方向的纵向速度 u 垂向分布结果,此处位置距离丁坝较远,可以近似看作平直沙坝地形裂流垂向分布情况。沙坝范围的纵向速度 u 垂向分布也呈现两端小中间大的趋势,与节点 1 位置类似;不同的是在沙坝离岸侧位置($x=6, 6.5\text{m}$)垂向变化呈现出表面流速大的规律,并未出现上部小的趋势。裂流速度 u 的纵向分布规律表现为:在沙坝向岸侧位置($x=4\text{m}$)离岸速度 u 方向以向岸为主,说明此处并没有离岸裂流出现,呈现出明显的沿岸流特征;裂流沿离岸方向区域相对节点 1(沟槽内)小很多。裂流颈仍位于沙坝范围区域,在沙坝峰($x=5\text{m}$)的流速明显大于沙坝峰两侧位置,离岸裂流速度值最大,到沙坝离岸位置($x=6.5\text{m}$)离岸裂流速度就变得很小。这与文献[6]中平直沙坝水深平均裂流离线变化规律相一致,这说明沙坝的存在对离岸方向的裂流速度分量变化影响较大。

图4 沟槽中心和沙坝位置裂流垂直岸线分量 u 垂向分布测量结果Fig.4 Vertical distributions of cross-shore velocity u for different topography

2.2 沟槽中心位置离岸速度分量 u 分布规律及拟合

裂流垂向分布沿水深呈现一定的规律,采用对数拟合和指数拟合方法对裂流垂向分布进行了数据拟合,此部分内容详见文献[18].所采用的对数流速分布公式

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z+h}{z_a}\right) \quad (1)$$

式中: z 为以静水面为原点的垂向坐标; h 为静水水深; z_a 为表观粗糙度; u_* 为摩阻流速; κ 为卡门常数.为了便于采用曲线拟合,可将式(1)改写为

$$\ln(z+h) = a + b\bar{u}(z) \quad (2)$$

式中: $a = \ln z_a$; $b = \kappa/u_*$; 参数 a 和 b 通过对实验数据进行曲线拟合确定.指数拟合表达式

$$\frac{\bar{u}}{U} = (1+m) \left(\frac{z+h}{h}\right)^m \quad (3)$$

Dyer^[19] 给出了指数 m 的取值范围为 $1/7 \sim 1/10$.对该实验拟合发现取 $m = 1/7$ 适合于大部分情况,但对于靠近沙坝外侧的 $1 \sim 2$ 个剖面取 $m = 2$ 是适合的(见图5中波况 SRT1H3),因为这些剖面的速度从水底到水面呈增大趋势,具体细节见文献[18].

为了对拟合精度进行评估,使用了均方根误差

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_{mi} - x_{ci}}{x_{mi}}\right)^2} \quad (4)$$

式中: N 为波浪波谷以下流速测点的总数; i 为流速测点数; x_{mi} 为第 i 个位置处平均流速的测量结果; x_{ci} 为第 i 个位置处平均流速的拟合结果.

图5所示为垂向分布实验结果的对数拟合(除波况 SRT1H3 在 $x = 7.5, 8\text{m}$ 位置采用的 $m = 2$ 的指数拟合).由图5可以看出:裂流流速在 $x = 8.0\text{m}$ 处仍有数值,且沿水深具有一定的分布规律.在沟槽内的测量断面($x = 4 \sim 7\text{m}$)的裂流垂向分布呈现下大上小的趋势,最大值在距水底第2、第3个测量点.在离岸较远的断面($x = 7.5, 8\text{m}$)纵向流速 u 的垂向分布呈下小上大的趋势,但由于这两个断面的最上测点距静水面分别为 5.75cm 和 7cm ,

没有测量出断面沿水深的整个速度分布,不能准确判断裂流沿水深的分布情况.图5结果表明对数拟合对所有测量断面垂向分布能给出较准确的结果.

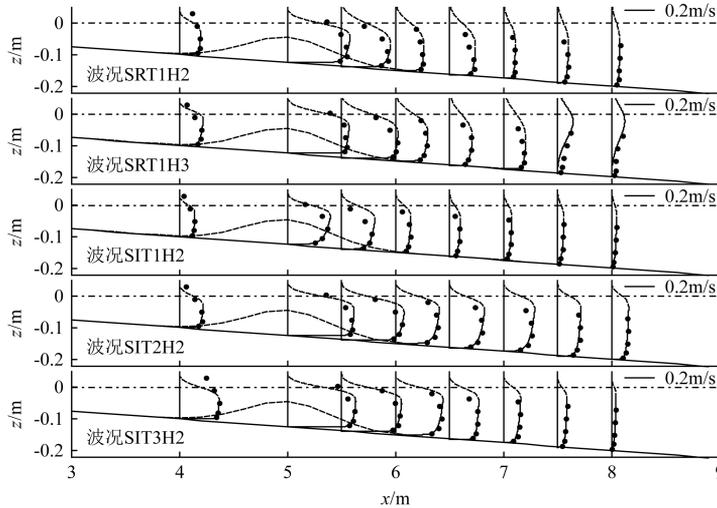


图5 沟槽中心线位置裂流垂直岸线分量 u 垂向分布测量结果与拟合
Fig.5 Vertical distributions and logarithmic fitted profile of cross-shore velocity u

表2所示为对数分布和指数分布的拟合误差 σ_e 计算结果,由表2可知,对数拟合与实验结果较为符合 (σ_e 较小),表明对数分布能较好地描述裂流垂向分布.除波况SIT1H2、SIT3H2的 $x=8.0\text{m}$ (σ_e 为0.136和0.283)之外,其他测量断面的误差 σ_e 均小于0.1.总体表明在沟槽附近对数拟合结果与实验结果较为符合.

3 裂流三维特征和影响因素

影响裂流三维流动的因素主要包括丁坝、波浪节腹点与沟槽中心线的相对位置(即周期).

3.1 裂流速度矢量特征

为了更好地说明裂流的矢量特征,绘制出波况SIT2H2的沿水深的水平速度矢量分布图(图6).图中离岸速度分量 u 正向指向离岸;沿岸速度分量 v 正向指向上游; z/h 为距水底距离的无量纲化, z 为测点距水底距离, h 为测量断面水深. u 、 v 分别为在 $(u, z/h)$ 和 $(v, z/h)$ 面上投影出速度 u 和 v 的值,这样便于观察.

由图6可以看出,有槽沙坝海岸的流体流动特征表现为沿沟槽中心的离岸射流形式的裂流,其沿岸速度分量 v 的数值约为沿岸速度分量 u 的 $1/5$,仅大波高波况SRT1H3的沿岸速度分量 v 的数值偏大,但仍小于垂直岸线速度分量 u (此处未给出矢量图).由此可见在沟槽中心线各测量断面速度以纵向速度为主,沿岸方向的速度值相对较小.裂流离岸速度分量 u 沿水深变化规律呈中间大两头小,随着离岸距离的增大,速度 u 先增大后减小,峰值在沟槽 $x=5.0\text{m}$ 位置.有槽沙坝海岸沿沟槽中心裂流流动的三维特征主要体现在横纵向两速度分量沿水深明显变化,尤其是沿岸速度分量 v 沿水深既有数值大小差异,还

存在速度矢量由水底到水面左右摆动现象.这一摆动在沿裂流流动方向的各测量垂线上也存在较大不同和变化,这充分表现出裂流流动三维分布的复杂特征.

表2 裂流垂向分布对数拟合系数(a,b)和指数拟合误差 σ_e
Table 2 Logarithmic fitting results (a, b) and power-law fitting error σ_e

实验波况	x/m	H_{rms}/m	对数分布			指数分布			
			a	b	σ_e	m	σ_e	m	σ_e
SRT1H2	4.0	0.043	-22.89	163.68	0.010	1/10	0.107	1/7	0.150
	5.0	0.050	-18.39	43.45	0.032	1/10	0.124	1/7	0.171
	5.5	0.081	-15.26	43.84	0.045	1/10	0.211	1/7	0.253
	6.0	0.086	-22.32	118.66	0.037	1/10	0.188	1/7	0.236
	6.5	0.089	-16.33	91.57	0.041	1/10	0.241	1/7	0.287
	7.0	0.086	-15.40	189.26	0.056	1/10	0.155	1/7	0.199
	7.5	0.092	-10.35	126.24	0.062	1/10	0.175	1/7	0.209
	8.0	0.092	-10.91	180.97	0.045	1/10	0.076	1/7	0.053
SRT1H3	4.0	0.034	-12.63	72.87	0.030	1/10	0.125	1/7	0.161
	5.0	0.050	-32.03	82.73	0.029	1/10	0.133	1/7	0.181
	5.5	0.069	-29.81	82.95	0.004	1/10	0.194	1/7	0.239
	6.0	0.081	-13.40	57.68	0.001	1/10	0.099	1/7	0.149
	6.5	0.100	-10.95	63.18	0.011	1/10	0.147	1/7	0.191
	7.0	0.110	-16.01	104.46	0.027	1/10	0.220	1/7	0.269
	7.5	0.111	-7.29	118.13	0.004	1/10	0.976	1/7	0.812
	8.0	0.115	-9.35	224.47	0.052	1/10	0.729	1/7	0.604
SIT1H2	4.0	0.032	-19.40	186.57	0.003	1/10	0.136	1/7	0.175
	5.0	0.043	-10.23	31.28	0.006	1/10	0.079	1/7	0.098
	5.5	0.05	-10.75	43.05	0.019	1/10	0.232	1/7	0.268
	6.0	0.050	-11.14	98.56	0.067	1/10	0.175	1/7	0.206
	6.5	0.054	-8.84	105.72	0.061	1/10	0.154	1/7	0.169
	7.0	0.055	-7.26	108.87	0.054	1/10	0.249	1/7	0.189
	7.5	0.057	-6.09	109.71	0.092	1/10	0.803	1/7	0.664
	8.0	0.057	-5.91	136.07	0.136	1/10	0.917	1/7	0.762
SIT2H2	4.0	0.040	-13.68	78.50	0.052	1/10	0.142	1/7	0.178
	5.0	0.045	-37.81	91.31	0.020	1/10	0.148	1/7	0.195
	5.5	0.051	-19.28	46.23	0.001	1/10	0.183	1/7	0.227
	6.0	0.049	-13.27	43.12	0.042	1/10	0.094	1/7	0.133
	6.5	0.049	-10.04	38.76	0.038	1/10	0.096	1/7	0.107
	7.0	0.047	-9.26	39.88	0.056	1/10	0.121	1/7	0.126
	7.5	0.045	-11.94	73.39	0.054	1/10	0.057	1/7	0.086
	8.0	0.043	-12.40	106.34	0.030	1/10	0.039	1/7	0.070
SIT3H2	4.0	0.046	-31.22	122.37	0.001	1/10	0.109	1/7	0.152
	5.0	0.046	-31.76	73.78	0.005	1/10	0.132	1/7	0.179
	5.5	0.048	-22.50	57.55	0.007	1/10	0.156	1/7	0.204
	6.0	0.042	-15.23	47.17	0.038	1/10	0.098	1/7	0.141
	6.5	0.044	-18.38	95.58	0.019	1/10	0.147	1/7	0.188
	7.0	0.042	-9.44	74.58	0.094	1/10	0.100	1/7	0.099
	7.5	0.042	-8.89	126.46	0.042	1/10	0.139	1/7	0.075
	8.0	0.037	-5.37	133.88	0.283	1/10	4.724	1/7	4.139

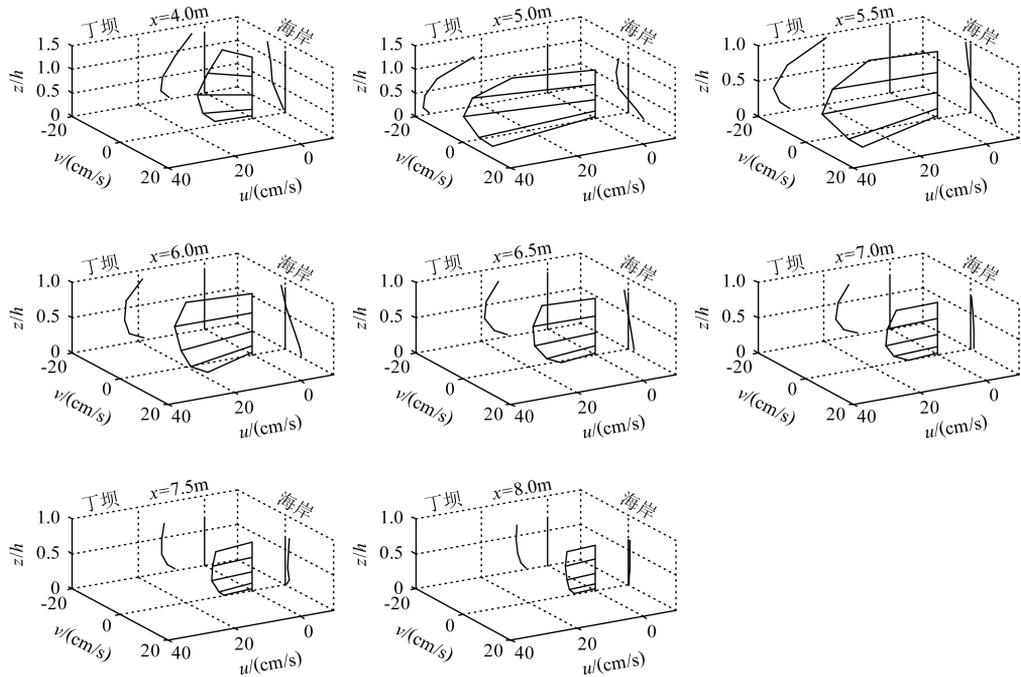


图6 沟槽中心裂流垂向分布速度矢量及 u 、 v 投影 (波况 SIT2H2)

Fig.6 Velocity vectors with projections of cross-shore and longshore currents (case SIT2H2)

3.2 丁坝对沿岸速度分量 v 的影响

三维流动的显著特征是受到丁坝的影响,它对离岸速度分量 u 的垂直分布影响不大,但对沿岸速度分量 v 影响较明显,这里选取 1.0s 周期波况来讨论.在沟槽向岸侧的入口测点($x=4.0\text{m}$)的沿岸速度分量 v 沿水深均指向丁坝,这是因为沟槽两侧沙坝上波浪较早破碎,使得沙坝向岸侧形成补偿流,对沟槽进行流量补给,测量断面距离丁坝较近(1.5m),丁坝附近的环流流动会受到反射波影响,丁坝侧的较小质量输移流使得沿岸补偿流也较小,从而导致在沟槽向岸侧更容易形成指向丁坝的水流.此测量位置沿岸水流流速总体表现为上大下小的规律.在水深最上侧测点的水流流速略小,但仍大于水深底部的流速,这使得流速沿水深呈中部大两头小的变化趋势.

对于沟槽内断面($x=5.0\sim 6.0\text{m}$)沿岸速度分量 v 沿水深不一致,呈现螺旋状分布,水表面指向丁坝,水底处背离丁坝,且二者速度值相差较大.沟槽离岸断面($x=6.5\sim 8.0\text{m}$)沿岸水平流速 v 也呈现类似的螺旋状分布,速度值偏小.大波高波况 SRT1H3 在断面($x=7.5\text{m}, 8.0\text{m}$)沿岸速度分量 v 方向均背离丁坝,这表明裂流沿岸方向摆动特性的出现范围随入射波高增大而增大.

对于周期 1.0s 波况在水深最上侧测点的水流流速略小,但仍大于水深底部的流速,这使得流速沿水深呈中部大两边小的趋势.沿水深的下侧测点裂流强度随入射波高而增强,主要表现为沿岸速度分量 v 的增大,离岸速度分量 u 增量不大,这是因为随着入射波高的增大,波流相互作用的影响变得明显,使得裂流在离岸方向速度增量并未与波高增量成正比,而在沿岸方向上出现较大偏转.

3.3 周期对沿岸速度分量 v 的影响

周期决定了节腹点的位置.周期 1.0s 波况的腹点 2 位置正位于沟槽中心线处(图 7),在不考虑丁坝影响的情况下,叠加波浪场相对于沟槽中心线位置是对称的,形成的裂流也应该以沟槽中心线对称,可以认为沟槽对沿岸速度分量 v 的左右摆动情况无影响.周期 1.0s 情况下沿岸速度分量 v 的垂向分布只受到丁坝的影响.周期 1.5s 波况的节点 2($y=1.41\text{m}$)靠近沟槽中心线($y=1.5\text{m}$),周期 2.0s 波况的节点 2($y=1.94\text{m}$)位于沟槽边缘附近,与沟槽中心相距稍远.周期 1.5s 和 2.0s 情况下,沿岸速度分量 v 的垂向分布受到节腹点和丁坝的共同影响.

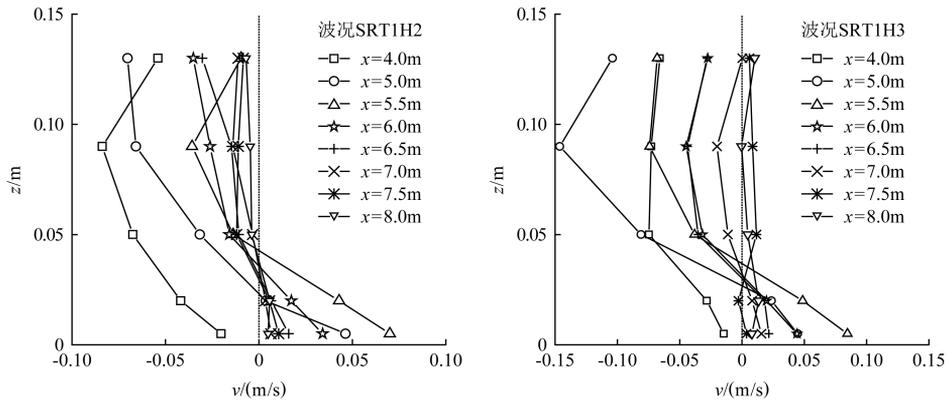


图 7 相同周期(1.0s)裂流沿岸速度分量 v 垂向分布

Fig.7 Vertical distributions of longshore velocity v for $T=1.0\text{s}$

对于周期 1.5s 和 2.0s 波况(图 8),沟槽入口测点($x=4.0\text{m}$)沿岸分量 v 变化规律与 1.0s 周期波况一致,这是因为此处为沟槽的向岸侧,沟槽的影响强于不同周期节腹点的影响(见文献[17]),而对于其他测点情况受周期影响较大.对于周期 1.5s 波况,在沙坝区域内的断面($x=5.0\sim 6.5\text{m}$)沿岸速度分量 v 方向在水深上层指向丁坝、水深下层背离丁坝,而在沙坝离岸侧的断面($x=7.0\text{m}, 7.5\text{m}, 8.0\text{m}$)沿岸速度分量 v 数值较小,方向为背离

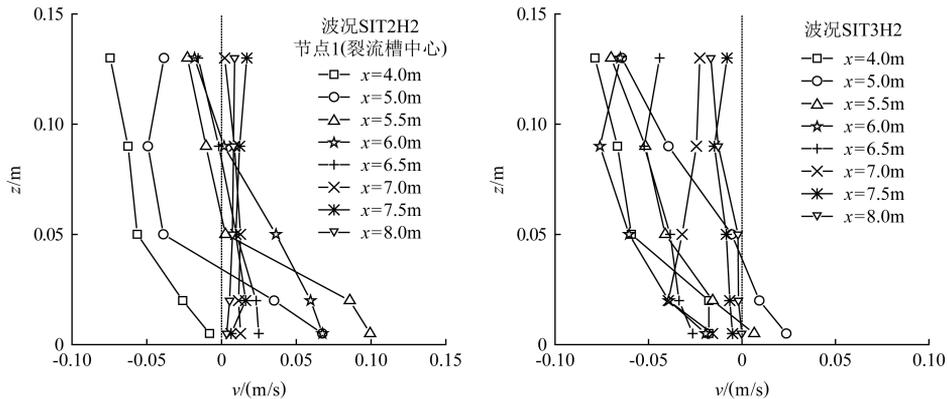


图 8 不同周期(1.5s, 2.0s)裂流沿岸速度分量 v 垂向分布

Fig.8 Vertical distributions of v component for $T=1.5\text{s}$ and 2.0s

丁坝.对于周期 2.0s 波况(波况 SIT3H2),除 $x=5.0\text{m}$ 之外断面的沿岸速度分量 v 方向沿水深均背离丁坝,越接近水底速度值越小.裂流沿岸速度分量的方向主要受到环流系统的影响,受周期控制的节腹点位置与沟槽位置影响.对于周期 1.5s 和 2.0s 波况裂流沿岸速度分量沿水深呈上大下小的变化趋势.

3.4 不同水底地形情况横向速度 v 分量特征

图 9 所示为波况 SIT2H2 节点 1(沟槽内)和节点 2(沙坝上)的沿岸速度分量 v 的变化规律.由图 9 可以看出,在节点 2 位置沿岸速度分量 v 的数值较大,最大值达到 0.2m/s .在沙坝向岸侧位置($x=4\text{m}$)沿岸速度分量 v 的数值大于其离岸速度分量 u ,表明此处尚未形成裂流,而是由上游腹点位置向节点 2 的沿岸补偿流.在 $x=4.5\text{m}$ 位置沿岸速度分量 v 的数值明显变小,垂向均值约为其离岸速度分量 u 的 $1/4$,这表明此处已形成离岸裂流.在沙坝峰($x=5\text{m}$)位置由于水深较小,形成了较大的纵向速度 u (即裂流),沿岸速度分量 v 则指向丁坝.在沙坝峰的向岸侧位置($x=4\text{m}, 4.5\text{m}, 5\text{m}$)沿岸速度分量 v 均指向丁坝方向.而在沙坝峰的离岸侧位置($x=5.5\text{m}, 6\text{m}, 6.5\text{m}$)沿岸速度分量 v 均呈现旋转趋势,上部指向丁坝而下部背离方向.节点 2 处沿岸速度分量 v 总体呈现出指向丁坝方向,这是因为节点 2 距离丁坝较远,裂流颈在沙坝地形上,受反射波的影响弱于入射波,流体沿岸方向流动表现为由上游指向下游的丁坝方向沿岸流的特征.

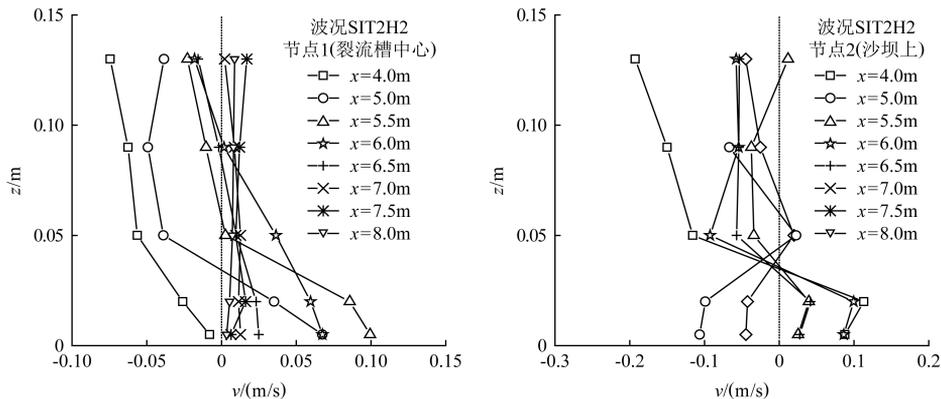


图 9 不同节点沿岸速度分量 v 垂向分布

Fig.9 Vertical distributions of longshore velocity v for different nodes

4 结论

为研究叠加波浪场的裂流流速的三维特性,给出了沟槽内和沙坝上的裂流流速的沿岸分量和离岸分量的垂向分布特征,分析了速度矢量的分布规律,并考察了这种特性的稳定性.得出结论如下:

(1) 裂流离岸速度分量垂向变化规律.裂流颈范围表现为两端小中间大,裂流头表现为靠近水表面具有较大速度的表面流特征.裂流颈分为沙坝和沟槽两种地形,沟槽中心线位置的裂流垂向结构较为均匀,而沙坝上的裂流垂向结构变化较大,表现为两端小中间大.沟槽中心线位置的裂流拟合分析结果表明裂流垂向分布符合对数分布规律,但对于大

波高 SRT2H3 的离岸较远测点 ($x=7.5\text{m}, 8.0\text{m}$) 需要采用指数分布;

(2) 裂流沿岸速度分量总体表现为上大下小的规律,但对于不同波况略有不同.对于周期 1.0s 波况在水深最上侧测点的水流流速略小,但仍大于水深底部的流速,这使得流速沿水深呈中部大两边小的趋势;对于周期 1.5s 和 2.0s 波况裂流沿岸速度分量沿水深呈现上大下小的趋势;

(3) 裂流沿岸速度分量沿垂直岸线方向存在左右波动的特性.沿岸速度分量会随波高增大而增大,方向主要是由环流流动控制的,在沟槽入口处呈现的偏向丁坝方向的特性是由于丁坝处的波浪反射引起环流流动的不对称.沙坝上的节点 2 处沿岸速度分量 v 总体呈现出指向丁坝方向,这是因为此处距离丁坝较远,反射波的影响弱于入射波,且无沟槽的影响.

参 考 文 献

- [1] Dalrymple R A, Macmahon J H, Reniers A J H M, et al. Rip currents [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2011, 43: 551-581
- [2] 张弛, 王义刚, 郑金海. 波生流垂向结构研究综述 [J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 739-746
Zhang Chi, Wang Yigang, Zheng Jinhai. Review of the vertical structure of wave-induced currents [J]. Shuixue Jinzhan/Advances in Water Science, 2009, 20(5): 739-746
- [3] 王彦, 邹志利. 海岸裂流的研究进展及其展望 [J]. 海洋学报, 2014, 36(5): 170-176
Wang Yan, Zou Zhili. Progress and prospect of rip currents [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(5): 170-176
- [4] Castelle B, Scott T, Brander R W, et al. Rip current types, circulation and hazard [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 163: 1-21
- [5] 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
- [6] 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, 2015, 26(1): 123-129
Wang Yan, Zou Zhili. Experimental study of rip currents by intersecting wave on barred beach [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(1): 123-129
- [7] Sasaki M. Velocity profiles in nearshore circulation current [J]. Coastal Engineering in Japan, 1985, 28(1): 125-136
- [8] Wind H G, Vreugdenhil C B. Rip-current generation near structures [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 171: 459-476
- [9] Giger M, Dracos T, Jirka G H. Entrainment and mixing in plane turbulent jets in shallow water [J]. Journal of Hydraulic Research, 1991, 29(5): 615-642
- [10] Haas K A, Svendsen I A. Laboratory measurements of the vertical structure of rip currents [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2002, 107(C5): 15-1-15-19
- [11] Drønen N, Karunaratna H, Fredsoe J, et al. An experimental study of rip channel flow [J]. Coastal Engineering, 2002, 45(3-4): 223-238
- [12] Poort M. Rip currents: A laboratory study of a rip current in the presence of a submerged reef [D]. TU Delft; Delft University of Technology, 2007
- [13] Choi J, Roh M. A laboratory experiment of rip currents between the ends of breaking wave crests. [J]. Coastal Engineering, 2021, 164: 103812
- [14] Sous D, Castelle B, Mouragues A, et al. Field measurements of a high-energy headland deflection rip current: Tidal modulation, very low frequency pulsation and vertical structure [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(7): 534
- [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] 王彦, 邹志利. 叠加波浪有槽缓坡沙坝地形裂流试验 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(6): 1166-1173
Wang Yan, Zou Zhili. Experimental study of rip currents by intersecting wave on barred beach of mild slopes with rip channel [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(6): 1166-1173

- [17] 王彦,张振伟,邹志利,等.有槽沙坝海岸交叉波浪作用下裂流特征[J].水科学进展,2019,30(5):760-768
Wang Yan,Zhang Zhenwei,Zou Zhili, et al.Rip currents by intersecting wave on barred beach with rip channel[J].
Advances in Water Science,2019,30(5):760-768
- [18] 王彦.沙坝海岸沿岸流和裂流特征研究[D].大连:大连理工大学,2018
Wang Yan.Study on the longshore currents and rip currents on barred beaches[D].Dalian:Dalian University of
Technology,2018
- [19] Dyer K R.Current velocity profiles in a tidal channel[J].Geophysical Journal International,1971,22(2):153-161

Three-dimensional Distribution Characteristics of Rip Currents Generated by Intersecting Waves

WANG Yan¹, ZOU Tianyu¹, ZOU Zhili², LIU Zhongbo¹,
FANG Kezhao², WANG Xupeng³

(1.College of Transportation Engineering,Dalian Maritime University,Dalian 116026,China;2.State Key Laboratory of
Coastal and Offshore Engineering,Dalian University of Technology,Dalian 116024,China;3.Changli Gold Coast National
Nature Reserve,Qinhuangdao 066607,China)

Abstract

The study of three-dimensional distribution of rip currents by intersecting waves is helpful to the comprehensive study of evolution laws and disaster mechanisms. To better analyze the influence of groin, sandbar and rip channel on the three-dimensional distribution of rip currents, an experimental study on vertical structure of rip currents generated by intersecting waves over barred beaches with rip channels was conducted at two different nodes in rip channel and on the sandbar. The results show that offshore from the sandbar the rip current velocities were much stronger at the surface than near the bottom. The vertical structure of rip currents was found to vary from depth-uniform in rip channel and strongly depth-varying on the sandbar. The results show that the vertical structure of rip currents is in accordance with the logarithmic distribution law. The nearshore circulation system and the fluctuation characteristics of the longshore velocity component of the rip currents by the groin, which results in that the longshore velocity component of rip currents in the rip channel points to the direction of the groin, and weakens the influence on longshore velocity component of rip currents on the sand bar far away from the groin.

Keywords: rip currents; vertical structure; intersecting wave; barred beaches with rip channel; groin; node