

海滩碎波带波性质的统计对比分析^{*}

陈子[✉], 李志强, 李志龙, 曹健荣
(中山大学河口海岸研究所, 广东 广州 510275)

摘要: 利用台风影响下的海滩碎波带采集的两个测点的压力波资料从频域作了处理与计算, 对波谱形态特征、有效波高、峰值周期、有效波陡、波的群性因子、碎波谱的平衡域和长重力波要素等相应的波性质作了对比分析。

关键词: 碎波带; 碎波谱; 波性质; 长重力波

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2002)06-0086-05

海滩碎波带波动过程受到岸滩地形、潮汐水位变化的明显影响, 尤其在高波能背景条件下, 波动过程和地形演变是相互耦合在一起的, 从而使得波动结构十分复杂。尽管此波动过程呈现出强烈非线性特点, 但是把此随机过程视为由多个线性波叠加, 从频域描述其内部结构依然是一种十分有效的手段。鉴于大浪背景下的现场观测比较困难, 有关此方面的海滩碎波带波动特征的研究十分有限, 因此利用实际资料加以分析, 对于理论研究和海岸工程应用研究均具有实际意义。

1 研究地区海岸背景与海滩地形特征

研究地点位于粤东碣石湾口西侧一岬间海湾的海滩中段, 高大滩肩与陡滩面是海滩地形的主要特征, 碎波带由活动性砂坝—沟槽地形构成(图1)。

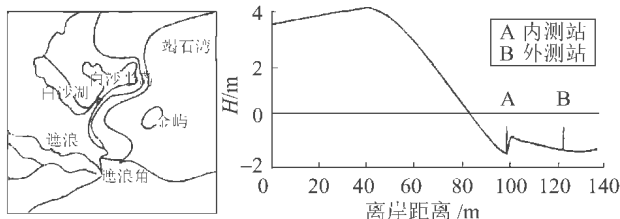


图1 研究区海滩位置

Fig. 1 Beach location of the study area

10 m 以浅的近岸带底坡约为 0.01, 2 m 以浅约为 0.15。海区深水波候基本特征为多变风浪与较稳定的 ESE 向涌浪叠加, 平均波高 1.2 m, 平均波周期 4.2 s。平均大潮差约为 1.1 m。现场观测期间遭遇 9713 号台风。该台风自 1997 年 8 月 20 日进入

南海北部后向西运动, 最低中心气压 975 hPa, 中心附近最大风速 30 m/s。22 日台风在越南登陆。20—22 日为大潮期, 受过境台风影响, 海岸增水作用十分明显。

2 资料收集与处理方法

在碎波带垂直岸线方向投放 2 个压力式测波仪, 分别位于沟槽(内测站 A)和水下砂坝顶面上(外测站 B), 二者相距 24 m。数据采集自 20 日 15 时起, 2 h 一次, 采样频率 4 Hz, 每次记录时间约为 17 min。观测后期因故障数据缺失, 本文分析仅采用前 24 次同步记录数据加以处理计算分析。

对波浪基本性质(如波高、周期、群性、谱宽)的描述可以从时域着手, 通过波面跨零(上跨零或下跨零)、波面四分位区间计算和光滑瞬时波能过程等方法得到。但出现的问题是, 在浅水破波带, 波的高频涡动作用强烈, 小的波动过程可能没有跨零, 统计波要素会出现较明显不一致性, 对波动时序加以傅里叶变换, 从频域对谱结构和波动性质加以计算, 可避免此问题。具体数据处理与计算方法如下:

(1) 消除潮汐水位变化和风暴增水影响, 对每次记录去除零漂。处理后部分波动时序见图 2。

(2) 采用 Welch 方法计算各记录的功率谱, 计算中对数据加以分段, 各段数据间 50% 重迭, 谱自由度为 32。另采用 Parzen 谱窗对原始谱加以光滑, 该谱窗可防止出现负谱值。为补偿水体引起的高频信号的衰减, 在计算有关波要素时将压力谱 $s_p(f)$ 订正为波面谱 $s(f)$:

^{*} 收稿日期: 2002-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40276030); 广东省自然科学基金资助项目(992039)

作者简介: 陈子[✉](1952 出生), 男, 教授; E-mail: eesczs@zsu.edu.cn

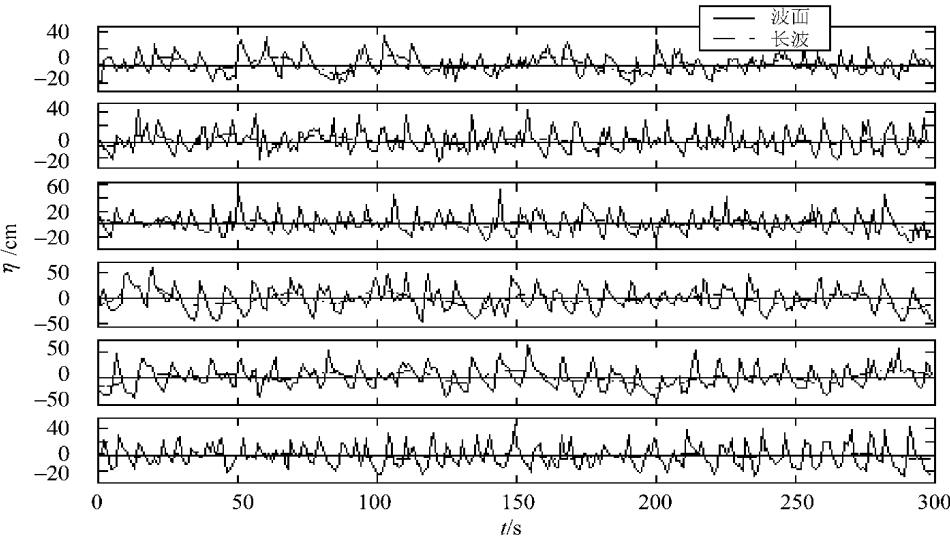


图 2 部分记录的波面和长重力信号

Fig. 2 Some wave records and infragravity wave signals

$$s(f)=\frac{\cosh ^2(k d)}{\cosh ^2(d-z)} s_p(f) \quad(1)$$

$$K_a=\frac{\left|\int_0^{\infty} s(f) \exp (i 2 \pi f T_z) d f\right|}{m_0} \quad(6)$$

采用的订正截止频率^[1]为 $f_{\max }=\frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{\pi z}}$,
式中, z 为仪器水中深度, d 是水深。

(3) 计算 0~4 阶谱矩 $m_p=\int_0^{\infty} f_p s(f) d f$

由此得到有效波高 $H_{m 0}=4 \sqrt{m_0} \quad(2)$

平均周期 $T_z=\sqrt{m_0 / m_2} \quad(3)$

谱宽度参数 $\epsilon=\sqrt{1-\frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad(4)$

显著波陡^[2] $s_s=\frac{2 \pi H_{m 0} / g T_z^2}{\tanh \left(k_z d\right)} \quad(5)$

群性参量^[3]

谱尖度参量 $Q_p=\frac{2}{m_0} \int_0^{\infty} f \cdot s^2(f) d f \quad(7)$

式中, k_z 为由平均周期计算的波数。

(4) 采用 FFT 滤波方法, 滤去各记录中高于 0.04 Hz 的重力波部分, 余者作为长重力波部分, 同样由频谱和谱矩计算得到长重力波的有效波高 $H_{m 0}$ 和平均周期 $T_{l z}$ 。

3 谱特征与波性质分析

有关波性质计算结果见表 1, 两测波站各记录的频谱见图 3。以下就频谱结构与主要参量加以对比分析。

表 1 两测波站计算的波性质

Tab. 1 Computed wave properties for two stations

时间	内测站 A							外测站 B						
	$H_{m 0}$	T_z	s_s	K_a	ϵ	Q_p	d / m	$H_{m 0}$	T_z	s_s	K_a	ϵ	Q_p	d / m
20: 15	0.396	18.286	0.143	0.230	0.779	0.722	0.468	0.411	9.143	0.059	0.258	0.751	0.874	0.469
20: 17	0.424	9.846	0.062	0.146	0.763	0.888	1.066	0.591	8.258	0.084	0.197	0.639	0.999	0.829
20: 19	0.488	8.258	0.066	0.094	0.779	0.818	1.186	0.559	8.258	0.069	0.187	0.657	1.050	0.956
20: 21	0.653	8.828	0.101	0.242	0.597	1.020	1.561	0.725	8.258	0.114	0.248	0.570	1.014	1.391
20: 23	0.720	8.828	0.125	0.219	0.602	1.094	1.668	0.757	8.000	0.113	0.223	0.557	1.019	1.514
21: 01	0.694	8.258	0.105	0.213	0.603	0.979	1.609	0.727	7.529	0.101	0.293	0.588	1.021	1.459
21: 03	0.493	8.000	0.063	0.114	0.804	0.804	1.206	0.543	13.474	0.095	0.293	0.763	0.835	1.006
21: 05	0.740	7.314	0.116	0.274	0.530	1.193	1.750	0.815	7.758	0.111	0.207	0.596	0.971	1.562
21: 07	0.891	8.000	0.116	0.164	0.618	1.004	1.946	0.904	8.000	0.111	0.172	0.605	0.957	1.742
21: 09	1.034	9.143	0.130	0.171	0.660	1.006	2.304	1.195	8.533	0.167	0.279	0.594	1.111	2.112
21: 11	1.100	9.481	0.143	0.153	0.735	0.969	2.283	1.069	8.533	0.135	0.129	0.615	0.971	2.703
21: 13	1.012	10.240	0.138	0.066	0.740	0.795	2.261	1.129	8.000	0.152	0.207	0.618	1.157	2.699

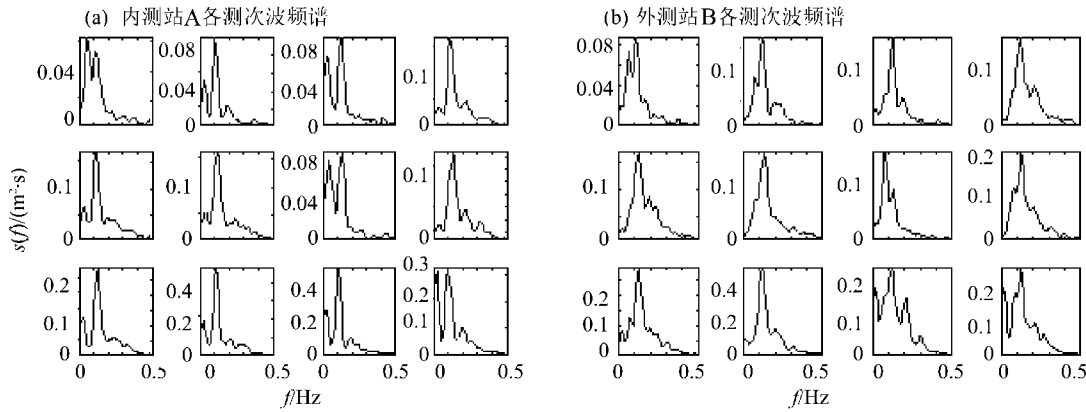


图 3 各记录频谱图

Fig. 3 Wave spectra for every wave records

3.1 谱形基本特征

尽管在谱计算中采用较大的自由度，得到的谱较光滑，但谱的主要结构依然十分清晰。图 3 显示，各个记录均存在多峰振荡过程，峰频两侧均存在着能量峰值，其中内测站长重力振荡明显强于外测站。存在着多峰表明可能存在着强的波一波非线性相互作用。有关研究^[4]指出，有限水深和浅水区波一波非线性相互作用以 3 个子波相互作用为主，能量主要从峰频向高频一侧转移。根据实际资料计算结果来看，各个记录的谱低频长重力与谱的峰频或高频侧谱峰间广泛存在着倍频、多倍频和差频关系。因此，峰频能量有可能存在向高、低频端转移的过程，组成波间的非线性相互作用由于潮汐水位调制和波动与岸滩地形的相互作用而进一步复杂化，对此问题的深入分析有待另文探讨。

显而易见的是，能量在全频域分散使得谱宽度参量变大，同时谱尖度减小，就比较而言，外测站谱宽度参量小于内测站，表明了波向岸传播的过程，能量进一步分散趋势。

3.2 波高、峰值周期和波陡

波高 H_{m0} 的变化过程具有 2 个特征：一是随台风影响的加强而迅速增大；二是潮汐水位变化对波高的调制作用也十分明显。由表 1 可见，两测站波高总体上随时间是增大的，但随着水位增高，水深加大，可直接影响底摩擦耗能，并可能导致波破碎的几率减小。外测站水深大于内测站，尽管两测站相距仅 24 m，但外测站波高基本上大于内测站，与以上所述不无联系。由谱得到峰值周期 T_p 来看，各次记录显示出 T_p 向岸有所加大，即同一观测时段，向岸传播过程谱峰进一步向低频移动。由于没有同步流速测量资料，两测站是否存在不等量多谱勒频移作用无法加以判别。

计算的显著波陡说明碎波区逼近极限波陡 0.120~0.142，部分测次 s_s 值大于临界值，反映了水深对波陡的控制作用，内测站 s_s 大于外测站值也主要和水深有关。

3.3 波的群性

波群是波浪重要研究内容之一，其中关于群性已有多种定义：①Funke 等^[5]由光滑化瞬时波能历程（SIWEH），进而提出的波群性因子 G_F 是从时域定义的，计算方法相对复杂，而且因在采用 Bartlett 滞后窗对瞬时波能加以光滑时，涉及到平滑的周期，此对计算结果影响很大，并可出现远大于 1 的情况；②赵锰等^[6]利用波面的 Hilbert 变换得到波包，进而由波包谱与波面谱的零阶矩比值定义波群因子；③List^[7]根据对波面的低通滤波得到波包线来定义波群因子，但滤波截止频率的选择成为一有争议的问题；④俞聿修^[8]在分析了前述方法基础上，利用 Hilbert 变换得到波包，避免了此问题；⑤Tucker^[9]提出的计算方法（见式 6）则利用协方差函数和功率谱互为傅里叶变换对的性质，从频域加以定义，该式与 Funke 等公式异曲同工，但计算十分简便，且群性因子小于 1，易于比较。

对除方法③外的其他方法皆作了计算比较。结果表明：方法①得到群性因子相差很大，个别出现远大于 1 的结果；方法②得到的群性因子介于 0.55~0.65；方法④得到的群性因子介于 0.633~0.737。从实际环境分析来看，这些数值偏大，可能与公式基础为窄谱、波面符合正态分布有关。由方法⑤得到的群性因子介于 0.066~0.293 间（见表 1），外测站群性因子 K_s 大于内测站，比较客观地反映了波群在破波带传播过程中因破波群性遭受破坏变弱的结果。

3.4 谱的平衡域

碎波带谱的平衡域反映了谱的高频部分在破波

类型与水深等制约下的能量消长变化结果。Kitaigorodskii 等和 Thornton 利用量纲分析分别从动力学和运动学方面得到破波谱的平衡域具有标度关系^[9]： $s(f) \sim f^{-\beta}$ 。吴克俭等^[10] 则从海浪能量的外观分布，证明了 n 阶外观谱平衡域指数上界为 -3 。在利用实际资料分析时，存在着选择平衡域低频界限的实际困难。

因实际观测数据自身和计算方法选择等多个原因，绝大多数情况不存在谱峰高频侧的 2 倍峰频的次峰。作为一简单处理与初步分析，以谱峰频为平衡域下界，对 2 测站所有记录谱值拟合结果，内、外测站 β 值分别为 2.68 和 2.52。此说明，①碎波带波能通过破波与波一波非线性相互作用，使得谱峰能量减小，降低了平衡域的斜率， β 值可低于理论值；② β 值满足关系式： $\beta = 2H + 1 = 5 - 2D$ 。式中， H 为 Hurst 数 ($0 \leq H \leq 1$)， D 为分维数，显示平衡域标度具有自仿射分形结构^[11]，分维数 D 为大于 1 的分数。

3.5 长重力分量

长重力波运动对岸滩特征地形的形成、泥沙输移、海岸侵蚀作用和海岸工程建设都是重要的。对耗散型 (dissipative) 海滩，风暴作用期间，长重力频带含沙量可数倍于入射波频带含沙量，向海输运可导致海岸严重侵蚀，因而受到广泛关注。两测站各个记录计算长重力要素见表 2。

从计算结果来看，同测次比较， H_{m0} 一般大于 H_{m0}/β ，甚至可高达 $H_{m0}/2$ 以上，内测站 H_{m0}/β 大于外测站相应值，长重力能向岸呈增大趋势，由此说明向岸传播过程，波能进一步向低频端转移。但长重力振荡平均周期 T_{Lz} 向岸则有所减小。对碎波带向海侧的近岸带长重力波能的分析表明也存在着此变化过程^[12]。

4 主要结果

利用大浪背景条件下在海滩碎波带测量的压力波资料，本文从频域计算着手对波动有关特征作了初步分析，得到的一些看法如下：

- (1) 此碎波带波的频谱多峰特征显著。在高低频带均存在着能量峰值，组成波之间存在着频率联系表明波能在全频域的转移，因而谱的宽度加大、尖度变小；
- (2) 波能的耗散使得在向岸传播过程入射波频域能量减小，波高减低，波高变化受到潮汐水位变化的调制。向岸峰值周期有所增大。波陡处于极限值附近，向岸继续增大；
- (3) 由 Tucker 公式计算得到的波群性因子可较

好地反映出碎波带因波浪破碎过程群性明显变小的特征；

(4) 初步分析发现谱的平衡域指数可低于理论值，并可能显示出自仿射分形的特征，但对此需要作进一步的探讨；

(5) 大浪背景下，碎波带长重力波动作用相当强烈，而且此作用向岸趋于增大。

表 2 长重力波要素计算值

Tab. 2 Computed infragravity wave characteristics for all records

测次	内测站		外测站	
	H_{m0}/m	T_{Lz}/s	H_{m0}/m	T_{Lz}/s
1	0.15	49.8	0.10	45.2
2	0.28	45.6	0.12	56.0
3	0.19	39.2	0.14	47.1
4	0.15	41.8	0.11	54.0
5	0.16	41.4	0.12	50.8
6	0.16	41.0	0.10	43.6
7	0.21	41.0	0.14	50.0
8	0.16	40.0	0.10	42.9
9	0.28	43.0	0.21	48.4
10	0.35	42.0	0.27	64.9
11	0.41	46.1	0.35	52.0
12	0.40	44.5	0.34	51.4

参考文献:

[1] HUTT J A, BLACK K P. Vertical attenuation of wave induced pressure[J]. Proc Pacific Coasts and Ports'97, 1997, 2: 965—970.

[2] 李玉成. 波浪在浅水区变形及破碎[J]. 海洋学报, 1997, 19(3): 111—118.

[3] TUCKER M J. Recommended standard for wave data sampling and near real-time processing[J]. Ocean Eng, 1993, 20 (5): 459—474.

[4] ELGAR S, HERBERS T H C, CHANDRAN V, et al. Higher-order spectral analysis of nonlinear ocean surface gravity waves [J]. J Geophys Res, 1995, 100: 4977—4983.

[5] FUNKE R, MANSARD E P D. On the synthesis of realistic sea states in a laboratory flume[J]. Proc 12th Inter Conf on Coastal Eng, 1980, 3: 2974—2991.

[6] 赵猛, 徐德伦, 楼顺里. Hilbert 变换在波群统计中应用 [J]. 海洋学报, 1990, 12(3): 284—297.

[7] LIST J H. Wave groupiness in the nearshore[J]. Coastal Eng, 1991, 15: 475—496.

[8] 俞聿修, 桂满海. 海浪的群性及主要特征参数[J]. 海洋工程, 1998, 16(3): 9—21.

[9] 文圣常, 余宙文. 海洋理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1984.

[10] 吴克俭, 宋金宝, 孙孚. 海浪外观谱及其平衡域[J] . 海洋学报, 1998, 20(1): 21—24.

[11] 陈 . 分形几何与地球科学(续 5)[J] . 华南地震, 1995, 15(4): 83—87.

[12] 陈子 , 欧素英, 戴志军, 等. 岬间海湾滨面带波浪结构和外观统计特征[J] . 海洋通报, 2001, 20(3): 1—7.

Statistical Analysis and Comparison on Wave Properties in a Beach surf Zone

CHEN Zi shen, LI Zhi qiang, LI Zhi tong, CAO Jian rong

(Institute of Estuarine and Coastal Studies, Sun Yat sen(Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The characteristics including wave spectral shapes, significant wave heights, spectral peak periods, significant wave steeps, wave groupiness factors, surf spectral equilibrium ranges and infragravity waves were computed using the data of wave pressure measured at two stations in a beach surf zone under the typhoon impact and processing the data in frequency domain. The wave properties were compared and analyzed between two stations.

Key words: surf zone; surf spectra; wave properties; infragravity waves

(上接第 85 页)

Propagation of the Complex Cracks in Rocks Without Water Pressure

TANG Lian sheng¹, ZHANG Peng chen², WANG Yang¹

(1. Department of Earth Sciences, Sun Yat sen(Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China;

2. Guangzhou Urban Plan and Reconnaissance and Design Research Institute, Guangzhou 510060, China)

Abstract: The theory of maximum surrounding primary stress is applied to the study of the stress intensity factor and the propagation orientation of the complex cracks in rocks under different external stress, considering the effect of chemical damage and water pressure. It is revealed that Mode I crack propagates along this crack surface and has not branches of the crack, while the propagation orientation of Mode II crack is angled 70. 5° to the crack. The crack under simple extension propagates along the vertical plane of the orientation of the crack, and the crack under simple compression propagates gradually along the orientation of the crack. The propagation orientation of the crack under twin stress depends not only on the crack angle, but also on the external stress and σ_3/σ_1 .

Key words: rocks; crack; propagation; stress intensity factor