

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2016.01.006

# 韩国周边海域的畸形波概率分析

陶爱峰<sup>1,2</sup>, 武雨晴<sup>2</sup>, 王瑶<sup>2</sup>, 彭冀<sup>2</sup>, 齐可仁<sup>2</sup>

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为了加强对近海畸形波发生概率的认识, 利用2009年韩国周边海域9个测站的波浪资料, 在基于波压资料直接定义畸形波的基础上, 探讨韩国近海畸形波的发生概率及其与有效波压高、季节和水深等3个主要参数的关联特性。结果表明: 韩国近海畸形波发生概率与瑞利分布预测值相近, 且不随有效波压高、水深的大小而发生变化, 而畸形波频发时节随着测站地点的改变而改变。有效波压高、水深、季节与韩国近海畸形波的发生并无明显相关性。

**关键词:** 近海畸形波; 畸形波发生概率; 波压实测资料; 相关因素; 韩国周边海域

中图分类号: P731.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2016)01-0034-05

## Analysis of occurrence probability of freak waves in sea area around Korea

TAO Aifeng<sup>1,2</sup>, WU Yuqing<sup>2</sup>, WANG Yao<sup>2</sup>, PENG Ji<sup>2</sup>, QI Keren<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defense, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to enhance the understanding of the occurrence probability of freak waves in coastal areas, using wave data from nine stations in the sea area around Korea in 2009, the occurrence probability of freak waves in Korean coastal areas and the relations between the occurrence probability and three parameters, the effective wave pressure height, season, and water depth, were examined based on the definition of freak waves using wave pressure data. The results show that the occurrence probability of freak waves in Korean coastal areas is close to the predicted value of the Rayleigh distribution and does not vary with the effective wave pressure height and water depth, while the time of frequent occurrence of freak waves changes with the station location. There is no obvious correlation between the occurrence of freak waves in Korean coastal areas and the effective wave pressure height, water depth, and season.

**Key words:** freak wave in coastal areas; occurrence probability of freak wave; measured data of wave pressure; related factors; sea area around Korea

1965年 Draper<sup>[1]</sup>首次提出畸形波的概念, 将其描述为一种具有陡峭的、极大波峰的突发性巨浪。畸形波巨大的能量可以造成海上建筑物的损坏、船舶的折断、翻沉及海上人员的伤亡。随着对畸形波事故报道的增多, 这一现象也越来越引起学者的关注。

现场实测是畸形波诸多研究手段中最为直接的一种, 是其他研究方法的必要基础, 也是最难实施的一种, 因为畸形波的发生有着明显的随机性和偶然性<sup>[2]</sup>。目前有关畸形波的实测研究以外海居多<sup>[3-7]</sup>, 但近海畸形波的出现概率不可忽视。Didenkulova等<sup>[8]</sup>、Nikolkina等<sup>[9]</sup>将2005—2010年的畸形波发生地点进行分类, 其中2005年的9件畸形波事件中有6件发生在近海, 占总数的67%, 而2006—2010年媒体报道的

收稿日期: 2015-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(51579091, 41106001); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项(20145028412)

作者简介: 陶爱峰(1978—), 男, 山东茌平人, 副教授, 主要从事水波动力学研究。E-mail: aftao@hhu.edu.cn

畸形波事件中,近海畸形波的发生占总数的 50%。陶爱峰<sup>[10]</sup>发现 2005 年发生在中国近海的畸形波事件就有 6 件。2013 年台湾周边海域有 2 件畸形波袭击事件,并将岸边人员卷入大浪导致失踪<sup>[11]</sup>。由此可见,近海畸形波不容忽视。近年来,不断有学者开始关注近海畸形波的研究,对其波形类型及发生条件等均进行了一定程度的分析<sup>[12-14]</sup>。然而,由于畸形波实测资料较为缺乏,基于实测数据对近海畸形波的研究仍不够成熟。

韩国海洋科学与技术研究所(KIOST,原 KORDI)在韩国周边海域陆续设立了多个波浪连续观测站<sup>[15-16]</sup>,积累了大量波浪资料。这些宝贵的资料对于韩国的海洋开发与海岸防护都起到了重要作用,然而一直未见基于相关资料开展针对畸形波问题的研究成果。在 KIOST 李东永教授的支持与帮助下,本研究获得了韩国周边 9 个波浪观测站 2009 年的部分连续资料,并利用该资料首先开展了有关实测畸形波发生概率的研究。

## 1 数据介绍

韩国位于东北亚朝鲜半岛南部,三面环海,西南部濒临黄海,东南部紧邻朝鲜海峡,东边则是日本海。韩国海洋科学与技术研究所在韩国周边海域陆续设立了多个波浪观测站,本文所用数据来源于这 9 个波浪观测站 2009 年的实测数据,观测站位置坐标见表 1。测量仪器采用水下波压计(WTG-128M),埋设在距海底 50 cm 处,设置采样频率为 2 Hz。每个测站数据时间长度见表 1 最右侧一列所示。由于原始波压数据是每 0.5 s 一个信号的连续性资料,平均每组数据达到 2 000 万~3 000 万个,为了方便计算及以后的分析比较,将数据按 30 d 为一个单位进行分组,为了保证数据样本的数量及海浪的平稳性,选择 30 min 一组来对数据进行进一步的分组,并以 0.003 3 Hz(5 min)为截止频率,运用 FIR 高通滤波器滤除潮波等长周期波,只保留短周期表面重力波信息。

表 1 韩国周边海域 9 个波浪观测站经纬度及数据测量时间

Table 1 Latitudes and longitudes and measurement times at nine wave stations in sea area around Korea

序号	测站名	经度	纬度	测量时间/月
1	Anmado	126°05'17.7"E	35°23'47.8"N	10
2	Baerueongdo	124°37'33.1"E	37°59'08.7"N	6
3	Biyangdo	126°12'19.0"E	33°24'25.8"N	1
4	Hongdo	128°42'45.7"E	35°04'03.0"N	12
5	Ilhyangcho	124°35'34.3"E	33°56'30.1"N	9
6	Kangrung	128°55'43.2"E	37°47'50.8"N	9
7	Malipo	126°07'57.0"E	36°47'06.1"N	7
8	Sorido	127°48'14.2"E	34°28'54.0"N	10
9	Wandolcho	129°44'04.6"E	36°42'58.0"N	9

目前关于畸形波的定义尚未统一,本文沿用畸形波最常用的判定方法,即当一个单波的波高  $H$  大于同组资料有效波高  $H_s$  的 2 倍时,将该单波定义为畸形波<sup>[17]</sup>。本文分析的基础资料是原始的波浪压力信号,波浪压力信号虽然可以转为波面信号,但转换过程中会存在混淆误差等诸多问题<sup>[18-19]</sup>。考虑到本文只是关注畸形波的发生概率,而波高与一个周期内波压的变化是成正比的,若将一个周期内波压最大值与最小值的波压差定义为波压高  $H_p$ ,同时定义与  $H_s$  类似的有效波压高  $H_{ps}$ ,则有  $H/H_s = H_p/H_{ps}$ 。由此可见,可由波压数据直接定义畸形波,并进一步开展畸形波概率分析工作。该做法不仅大幅度简化了数据分析的复杂程度,还提高了对原始数据质量的保持性。

## 2 畸形波发生概率分析

根据以上定义,以  $H_p/H_{ps} \geq 2$  为判定依据,搜索遍历本文掌握的所有实测数据,对各站进行独立统计,得到各站的畸形波发生概率(畸形波个数与波浪总个数的比值),结果如下: Anmado 测站畸形波发生概率为 0.023%; Baerueongdo 测站畸形波发生概率最大,约为 0.042 3%; Biyangdo 测站、Hongdo 测站畸形波发生概

率分别为 0.0215%、0.0223%；Ilhyangcho 测站畸形波发生概率最小，约为 0.0196%；Kangrung 测站、Malipo 测站、Sorido 测站、Wandolcho 测站畸形波发生概率值相差不大，分别为 0.0246%、0.0228%、0.0222%、0.0208%。从这 9 个测站的畸形波发生概率计算结果可以看出，除 Baerueongdo 测站畸形波发生概率达到了 0.0423% 外，其余各测站概率均低于瑞利分布预测值(0.0333%)<sup>[20]</sup>。

对比前人的研究成果，韩国周边海域的畸形波发生概率远小于南大西洋坎普斯海湾(3.7%)<sup>[21]</sup>和印度洋莫塞尔贝(3.1%)<sup>[22]</sup>的畸形波发生概率，与北海区域(0.0290%)<sup>[23]</sup>的畸形波发生概率较为接近，大于我国台湾周边海域(龙洞 0.0060%，台东 0.0109%)<sup>[2]</sup>和江苏海域<sup>[24]</sup>的畸形波发生概率。

### 3 畸形波发生概率与各因素的关系

为了进一步探讨畸形波特性、发生机制及预防问题，有必要先对畸形波发生概率与各因素之间的相关性进行分析，在此选择了 3 个主要参数进行分析。一是有效波压高，由于该参数能基本代表波场全域信息，基于该参数与畸形波发生概率的分析，可以获知畸形波发生与波浪场强弱的关系；二是季节，该参数与畸形波发生概率的关系，可以为畸形波防灾减灾提供最直接的依据；三是水深，该参数与畸形波的关系是后续继续探讨畸形波发生机制的关键，因为相对水深是各种水波非线性机制发生与否的关键条件。

#### 3.1 与有效波压高的关系

以 Anmado 测站为例，图 1 是该测站 30 d 内每 30 min 畸形波发生个数与有效波压高的关系。图中竖直线表示的是 30 d 内每 30 min 的畸形波个数，而虚线则代表的是每 30 min 内有效波压高的大小。

图 1 结果表明：在韩国周边海域畸形波发生的概率与有效波压高的关系不显著；无论某时段内波浪的有效波压高是大还是小，都有可能发生畸形波。

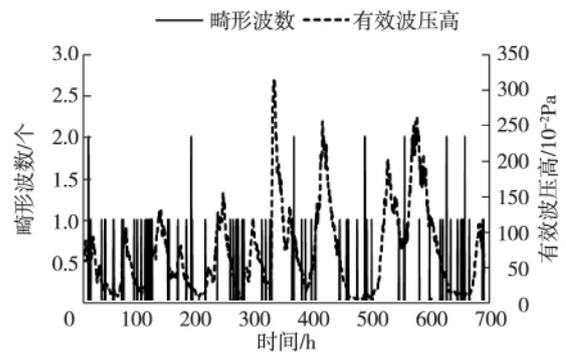


图 1 Anmado 测站畸形波个数与有效波压高的关系  
Fig. 1 Relationship between number of freak waves and effective wave pressure height at Anmado Station

#### 3.2 与季节的关系

由于 Biyangdo 测站只有近 1 个月的波压资料，数据较少，故没有考虑该测站。在后文中讨论畸形波与水深的关系时也未把该测站统计进来。其余 8 个测站畸形波发生概率与月份的关系见图 2。由于各测站的测量起止时间及总时间长短不同，所以图中横坐标的标注也不尽相同。

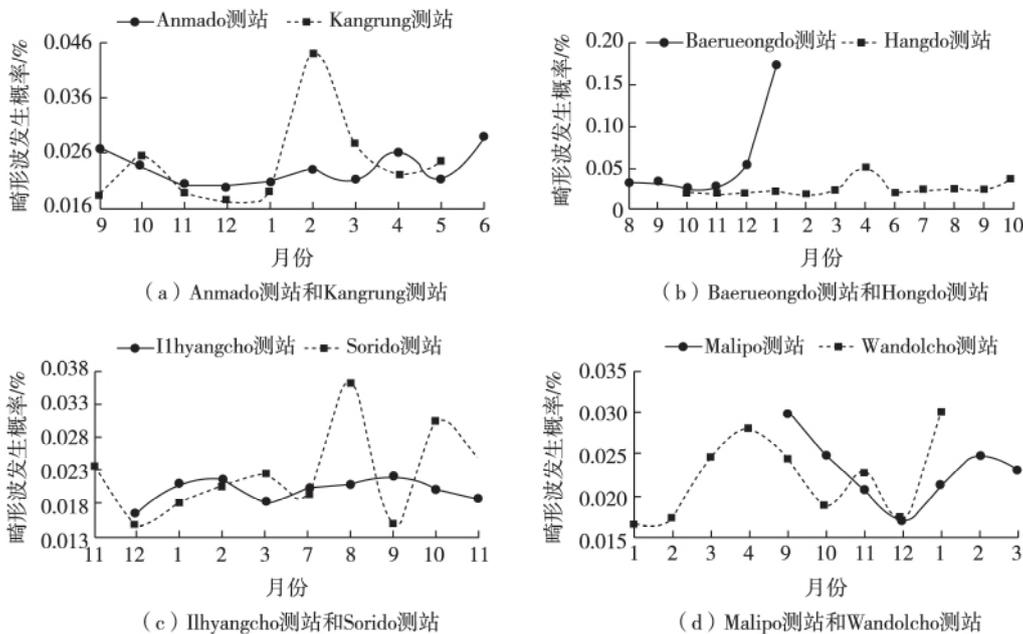


图 2 韩国周边海域 8 个测站畸形波发生概率与月份的关系

Fig. 2 Relationship between occurrence probability of freak waves and month at eight stations in sea area around Korea

从图 2 可以看出:畸形波发生概率与季节的关系没有一个统一的变化规律。Anmado 测站 4 月、6 月、9 月畸形波发生概率较大,12 月发生的概率最低;Kangrung 测站在 2 月畸形波发生的概率最大;Baerueongdo 测站 1 月份畸形波概率最大,其他月份相对来说比较平均;Hongdo 测站在 4 月最容易发生畸形波;Ilhyangcho 测站与 Anmado 测站类似,也是 12 月发生畸形波的概率最低;Sorido 测站在 8 月最容易发生畸形波;Malipo 测站与 Ilhyangcho 测站、Anmado 测站一样,12 月发生畸形波的概率最低;Wandolcho 测站在 1 月和 4 月相对来说比较容易发生畸形波。由图 2 可见,几乎每个测站冬季(12 月)都是畸形波发生概率最低的季节。然而,在我国台湾的东北海岸,冬季却为畸形波的多发季节。通过对韩国周边海域 8 个测站畸形波发生概率的研究,发现在韩国邻近黄海的近海测站,包括 Anmado 测站、Ilhyangcho 测站和 Malipo 测站,畸形波在 9 月发生的概率最大,而 12 月则是畸形波发生最少的月份。在邻近日本海的近海测站,包括 Hongdo 测站和 Wandolcho 测站等,畸形波在 4 月份发生的概率最大,而在 12 月、1 月、2 月(即冬季)畸形波却不易发生。所用韩国波浪观测资料表明,畸形波的发生概率与季节虽存在一定的联系,但这种联系并不明显,且随着地点的改变而发生变化。

### 3.3 与水深的关系

由每个测站的波压平均值可以换算得到各测站的平均水深,计算结果见表 2(表中同时给出了对应各测站畸形波的发生概率)。

表 2 韩国周边海域 8 个测站的平均水深  
Table 2 Average wave depths of eight stations in sea area around Korea

序号	测站名	畸形波发生概率/%	平均水深/m	序号	测站名	畸形波发生概率/%	平均水深/m
1	Anmado	0.0230	12.21	5	Kangrung	0.0246	14.89
2	Baerueongdo	0.0423	15.24	6	Malipo	0.0228	7.79
3	Hongdo	0.0223	21.89	7	Sorido	0.0222	15.51
4	Ilhyangcho	0.0196	16.87	8	Wandolcho	0.0208	15.23

在水深最浅的 Malipo 测站,畸形波的发生概率为 0.0228%;在水深最深的 Hongdo 测站,畸形波的发生概率为 0.0223%。由此可见畸形波发生概率相差不大,但由于各站水深在 7~22 m 之间变化,水深相差不大,并不像台湾周边海域的实测资料分析中<sup>[2]</sup>,龙洞(30 m 水深)和台东外洋(5000 m 水深)2 处海域的水深之间存在明显差异,所以从仅有的 8 个韩国周边海域波浪观测站测得的畸形波发生概率与水深数据,还不能充分说明该海域畸形波发生概率是否与水深之间存在一定的相关性。

## 4 结 论

基于韩国周边海域 9 个波浪观测站 2009 年的连续波压实测资料,对近海实测畸形波发生概率及相关特性开展研究。考虑到波压数据特点及研究对象的特殊性,提出通过实测波压值直接定义畸形波现象的方法。分析结果表明,韩国近海畸形波发生概率与瑞利分布预测值相近,且畸形波发生与否和有效波压高及水深之间的关系不明显。从现有实测结果看,韩国周边靠近黄海的海域在 9 月最容易发生畸形波,在 12 月相对来说不容易发生畸形波;在靠近日本海的近海海域,冬季不容易发生畸形波,春季的 4 月则是畸形波频发时节。以上结果表明该海域畸形波的发生似乎与季节无明显的相关性。

### 参考文献:

- [1] DRAPER L. 'Freak' ocean waves[J]. Weather, 1966, 21(1): 2-4.
- [2] 王瑶,郑金海,陶爱峰,等. 基于实测资料的畸形波发生概率研究综述[J]. 海洋通报, 2013, 32(2): 235-239. (WANG Yao, ZHENG Jinhai, TAO Aifeng, et al. Review of studies on the occurrence probability of freak waves based on the field data [J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(2): 235-239. (in Chinese))
- [3] LAVRENOV I V. The wave energy concentration at the Agulhas current off South Africa[J]. Natural Hazards, 1998, 17(2): 117-127.
- [4] STANSELL P. Distributions of freak wave heights measured in the North Sea[J]. Applied Ocean Research, 2004, 26(1): 35-48.

- [5] SMITH R. Giant waves [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1976, 77(3): 417-431.
- [6] MORI N, LIU P C, YASUDA T. Analysis of freak wave measurements in the sea of Japan [J]. *Ocean Engineering*, 2002, 29(11): 1399-1414.
- [7] MORI N, ONORATO M, JASSEN P. On the extreme statistics of long-crested deep water waves: theory and experiments [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C9): 1978-2012.
- [8] DIDENKULOVA I I, SLUNYAEV A V, PELINOVSKY E N, et al. Freak waves in 2005 [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2006, 6(6): 1007-1015.
- [9] NIKOLKINA I, DIDENKULOVA I. Rogue waves in 2006—2010 [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2011, 11(11): 2913-2924.
- [10] 陶爱峰. 深水波列演变及畸形波生成机制之数值探讨 [D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [11] LIU P C. Brief communication: freak wave occurrences in 2013 [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2014, 2(11): 7017-7025.
- [12] CHIEN H, KAO C C, CHUANG L Z H. On the characteristics of observed coastal freak waves [J]. *Coastal Engineering*, 2002, 44(4): 301-319.
- [13] DIDENKULOVA I, ANDERSON C. Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2010, 10(9): 2021-2029.
- [14] GLEJIN J, KUMAR V S, NAIR T M B, et al. Freak waves off Ratnagiri, west coast of India [J]. *Indian Journal of Marine Sciences*, 2014, 43(7): 7-10.
- [15] JEONG W M, OH S H, RYU K H, et al. Multi-station observation of the high swell along the east coast of Korea [C]//TAN S K, HUANG Z H. *Proceedings of the 5th International Conference on Asian and Pacific Coasts*. Singapore: World Scientific, 2009: 13-16.
- [16] OH S H, JEONG W M. Characteristics of high waves observed at multiple stations along the east coast of Korea [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2013, 13(12): 3503-3514.
- [17] KJELDSEN S P. *Breaking waves* [M]. Springer Netherlands, 1990: 453-473.
- [18] LEE D Y, WANG Hsiang. Measurement of surface waves from subsurface gage [J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 1984, 1(19): 271-286.
- [19] ESCHER J, SCHLURMANN T. On the recovery of the free surface from the pressure within periodic traveling water waves [J]. *Journal of Nonlinear Mathematical Physics*, 2008, 15(Sup2): 50-57.
- [20] 裴玉国, 张宁川, 张运秋. 畸形波数值模拟和定点生成 [J]. *海洋工程*, 2006, 24(4): 20-24. (PEI Yuguo, ZHANG Ningchuan, ZHANG Yunqiu. Numerical simulation of freak waves and its generation at a certain location [J]. *The Ocean Engineering*, 2006, 24(4): 20-24. (in Chinese))
- [21] PINHO U F, LIU P C, RIBEIRO C E P. Freak waves at Campos Basin, Brazil [J]. *Geofizika*, 2004, 21: 53-67.
- [22] LIU P C, MACHUCHON K R, WU C H. Exploring rogue waves from observations in south Indian Ocean [C]//Rogue Waves 2004. Brest, France: Proceedings of a Workshop, 2004: 40-49.
- [23] STANSELL P. Distributions of extreme wave, crest and trough heights measured in the North Sea [J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(8): 1015-1036.
- [24] WANG Yao, TAO Aifeng, ZHENG Jinhai, et al. A preliminary investigation of rogue waves off the Jiangsu coast, China [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2014, 14(9): 2521-2527.