

# 基于实测资料的畸形波发生概率研究综述

王瑶, 郑金海, 陶爱峰, 陈波涛

(河海大学 港口海岸与近海工程学院 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 系统地回顾和总结了国内外在实测资料入手探讨畸形波发生概率的研究成果, 对比分析了有关实测资料及对应畸形波的特点, 评述了针对畸形波发生概率的研究进展, 指出了诸如所用畸形波定义不统一等该研究领域存在的共性问题, 提出了进一步基于实测资料开展畸形波发生概率研究的思路。

**关键词:** 畸形波; 实测资料; 发生概率

中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-6932(2013)02-0235-05

## Review of studies on the occurrence probability of freak waves based on the field data

WANG Yao, ZHENG Jin-hai, TAO Ai-feng, CHEN Bo-tao

(Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, College of Harbor Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** In this paper, studies on the occurrence probability of freak waves based on the field data were reviewed. The field data and the corresponding characteristics of freak waves were compared and analyzed at first. Then, the progress of the studies on the occurrence probability of freak waves was commented, and the common questions in this area such as the disunity of the definition of freak waves were pointed out. At last, some ideas and suggestions were proposed for further study.

**Keywords** freak waves; field data; occurrence probability

畸形波的概念最早由 Draper 于 1965 年提出, 用来指代一种波高极大、波峰尖陡、能量集中、破坏力强且通常是突然发生的表面重力波。随着近二十年来各种国际性专题学术会议的持续性举办, 越来越多的人开始关注畸形波现象, 围绕畸形波开展的研究工作也逐渐经历着从理论到实践逐步开展的 3 个阶段。第一个阶段重心在探讨畸形波发生机制及运动特性, 第二个阶段主要基于畸形波动力及运动特性的认知, 开展畸形波及其与结构物的实验研究, 第三个阶段旨在探讨特定海域畸形波的发生概率及预警预测技术。Akhmediev 等人 2011 首次专门提出了畸形波的预警信号问题, 也标志着与实际结合最为紧密的第三个阶段工作的正式开始。畸形波的预测预警研究离不

开对其发生概率的认知, 而从实测资料入手探讨畸形波的发生概率问题, 是最直接也是目前最可信的研究手段。因此, 有必要对该领域的现有研究成果做一次详细的归整和综述。

本文将从以下 4 个部分展开: 第一部分介绍针对畸形波开展研究的实测资料概况; 第二部分围绕畸形波的发生概率问题, 综述有关研究方法及成果; 第三个部分对现有研究思路及成果进行对比分析; 最后给出今后开展相关研究的建议和想法。

### 1 现有畸形波实测资料概况

畸形波的发生有着明显的随机性和偶然性, 难以开展专门针对畸形波的实测工作, 因此基于实测

收稿日期: 2012-06-19; 修订日期: 2012-10-11

基金项目: 国家自然科学基金 (41106001; 51137002; 51150110157); 江苏省自然科学基金 (BK2011026)。

作者简介: 王瑶 (1989-), 女, 硕士, 主要从事水波动力学研究。电子邮箱: wyeureka@sina.com。

通讯作者: 郑金海, 博士, 教授。电子邮箱: jhzheng@hhu.edu.cn。

资料开展畸形波的相关研究,目前还只能是常规波浪数据分析的一个副产品。畸形波发生时波高可能会迅速增大且历时较短,而常规波浪测量往往并非连续监测,通常都是每小时测量 20 min 左右,再加之畸形波波高可能会超过常规测量仪器的测量范围,还可能导致测量数据一段时间内失真,这些都使得该领域的研究变得非常困难。

最著名的畸形波观测资料是 Draupner 平台“新年波”的波面记录,图 1 中出了“新年波”的波形,由于其基本满足现有畸形波所有的参数化指标,很多学者都把新年波当做畸形波现实存在的一个客观证据,并将其作为畸形波的样本来研究和模拟。

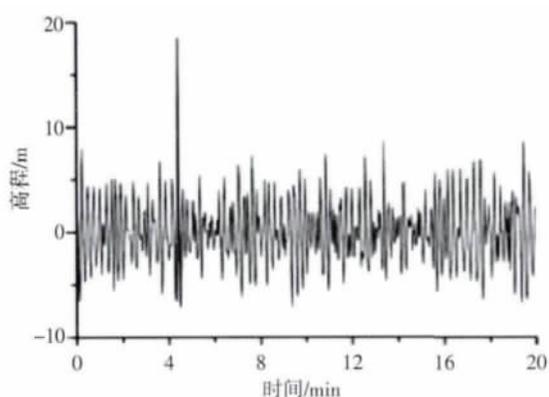


图 1 北海 Draupner 平台观测到的“新年波”波形

之后,人们对畸形波的重视程度迅速提高,越来越多的研究人员开始关注对于现有或者历史波浪数据中畸形波资料的捕捉和探讨,有关研究成果也不断出现。整理前人研究成果发现,目前为止围绕实测资料中的畸形波特性及发生概率的研究主要集中在 5 个海域,分别是大西洋、印度洋、北海、日本海以及中国台湾的周边海域,下面对五处海域的数据特点分别概述。

### 1.1 大西洋

1995 年,英国游轮 Queen Elizabeth II 在北大西洋的一场风暴中经历了 30 m 高的异常浪。2000 年,在北大西洋中部,两艘大型挪威散装船 M/S “Norse Variant” 和 M/S “Anita” 一起消失了。Kjeldsen (2001) 根据当时的气象资料对这两起海难进行了研究,指出 Anita 很可能是被异常浪击沉的。而在几乎没有海流经过的南大西洋,曾经连续发生两次险情,两艘遇险船 Bremen 和 Caledonian Star 分别于 2001 年 2-3 月的同一星期内遭遇了 30 m

高的海浪袭击。

在南大西洋巴西里约热内卢州的东北海岸的 Campos 海湾,运用传统浮标技术采集到一批波浪数据。浮标置于 Campos 海湾的两处相近的深水点(1 000 m 深),1991 年 3 月至 1993 年 3 月浮标置于第一点,1994 年 1 月至 1995 年 6 月置于第二点。可供分析的数据共有 7 457 个时间序列,采样频率为 1 Hz,每 3 小时测量 17.067 min。Pinho 等人(2004)对这一批实测数据资料进行了处理和分析。

### 1.2 印度洋

南非的东南海域有西南方向的 Agulhas 海流经过,并经受来自东北方向的强风影响。1968 年,利比亚油轮 World Glory 在经过南非近岸海域时遭遇了突发巨浪。1980 年,油轮 Esso Languedoc 在德班海域附近遭遇了 30 m 高甚至更高的突发海浪。据海洋学家统计,这一海区 10 m 多高的海浪屡见不鲜,6~7 m 高的海浪每年大约有 110 天,其余时间的浪高一般也在 2 m 以上。Lavrenov (1998) 收集了这里关于畸形波的记录,并初步分析了畸形波的成因。

在南非 Mossel 海湾离岸的一处位于南印度洋中的天然气采集平台,运用 Marex 雷达波浪观测仪获取了一批波浪测量的数据。测点置于水下 100 m,且与 Agulhas 海流同向。采样频率为 2 Hz,每小时 20 min 一组进行观测。Liu 等(2008)对这一批波浪数据进行了处理和分析,研究该海域畸形波发生的概率。

### 1.3 北海

北海是畸形波出现较为频繁的海区之一。这里没有明显的海流经过,Sand 等人在 1969-1985 年观测到 9 个畸形波的记录,发现这里畸形波波高和有效波高的最大比值为 3。1995 年 1 月 1 日 15 时 20 分在北海 Draupner 石油平台记录到波高为 25.6 m 的“新年波”,时长 1 200 s 的观测记录显示当时的有效波高是 11.92 m,波峰高度高达 18.4 m。

在北海地区的 14 个剧烈风暴期间曾经采集到长达约 793 h 的极值波的波面高程数据,共有约 354 000 个单独的波浪。原始数据是从 3 个采样频率为 5 Hz 的 Thorn 电磁干扰红外激光高度计采集得来,仪器分别安装在北 Alwyn 的一处固定的钢结构石油天然气平台的三个角上。原始数据每组波面高

程历时 20 min，一共有 2 381 组。Stansell (2004) 对这批数据进行了研究，分析了北海实测极端波浪的分布及其波峰、波谷高度的情况。

#### 1.4 日本海

日本东部的西太平洋和日本海是传统的天然渔场，海底地形复杂，暗礁岛屿密布。1980 年，英国轮船 MVDerbyshire (船长 295 m) 在日本海岸失踪，船上 44 人无人生还。各种迹象表明，这艘轮船 MVDerbyshire 丧生于巨浪之中的可能性很大。

Yasuda (1997) 曾利用日本气象局 (JMS) 测量的环日本海的波浪数据，对该海域畸形波发生的概率进行了研究。该次测量一共设有 9 个测站，海面高程是由安置在距海底 50 m、距海岸 1–2 km 的超声波浪测量仪所观测得到的。

1986–1990 年期间，日本运输部船舶运输研究协会在距 Yura 渔港 3 km 处，利用超声波仪器对海浪进行了测量。测量水深为 43 m，采样频率为 1 Hz，共得到 5 组数据，每组数据包含 20–40 个波浪以上的连续记录。Mori 等人 (2002) 研究了这一批波浪数据，从中发现了多个畸形波。

#### 1.5 中国台湾周边海域

台湾四周海岸几乎每年都有畸形波发生的记录，冬季以台湾东北角海岸发生的次数最多，夏季时西南海岸发生较频繁，当地常称此种突发性伤人怪浪为“疯狗浪”。许明光 (1993)、庄姿君 (1995)、陈正宏 (1999) 等曾收集 1954 年至 1998 年间共 140 笔有关异常浪事件的报道，因异常浪事件而被摧毁的船只达 35 艘，死亡人数 343 人以上。1996 年，台湾对其周边海域设定了海洋监测系统，CHIEN 等人 (2002) 从当时整年的现场实测波浪数据库中的 4 565 个波记录中获得了 175 个畸形波。

1997–2009 年，台湾中央气象局设立的浮标站获取了一批波浪数据，数据的形式是加速度，应用小波转换可以反算出水位变化时序列。Tseng (2011) 对龙洞及台东外洋浮标数据进行了具体的分析，从海洋实测资料中研究畸形波发生的概率。

## 2 畸形波特点及发生概率

对于不同地区所采集到的波浪数据，研究者采用的分析手段也不尽相同。首先，由于畸形波的定义还不统一，因此没有完全确定的判定标准，目前

常以超过畸形波发生海域有效波高的两倍作为其定义。最大波高与有效波高的比值仍是一个具有争议的参数，有学者指出应该使用 2.2 作为两者的比值，更有研究者认为这个参数应该更大。

#### 2.1 畸形波定义

Klinting 和 Sand (1987) 认为畸形波的判定条件有 3 点：1、波高大于有效波高的 2 倍；2、波高大于其相邻波浪波高的 2 倍；3、波峰高度大于 0.65 倍的有效波高。Kjeldsen (1990) 认为波高大于 2 倍有效波高的单波为畸形波，即： $H > 2H_s$ ，其中  $H$  为畸形波波高， $H_s$  为有效波高。Kharif (2003) 认为，在一般情况下，只要波浪的波高与有效波高的比值超过一定的范围 (2–2.2) 就可认为该波浪为畸形波，在高斯假定的条件下， $H > 2H_s$  可作为畸形波的判定标准。各国研究者所使用的判定依据见表 1。

表 1 各海域波浪数据研究方法统计

海域	判定依据	备注
大西洋	$H/H_s \geq 2$	上 (下) 跨零点法分开讨论
印度洋	$H/H_s > 2$	考虑比率更高的情况
北海	$H/H_s > 2$	/
日本海	$H/H_s > 2, H > 10 \text{ m}$	讨论畸形波与极值波
	$H/H_s > 2, H > 10 \text{ m}$	/
台湾周边海域	$H/H_s > 2$ ①, $H_s > 1 \text{ m}$ ②	上 (下) 跨零点法分开讨论，式①、式②两种条件讨论

有关波浪的统计，大多数研究者采用了上 (下) 跨零点法，由于这两种方法的误差，有部分研究者对两者都分布进行了计算及讨论。

#### 2.2 畸形波发生概率

根据经典波浪理论，在线性高斯波面的假定下，波高分布具有瑞利分布的形式。按照瑞利分布的统计结果， $H \geq 2H_s$  的情形大约在 3 000 个波浪中才会出现一次。各海域畸形波发生概率及与瑞利分布的比较见表 2。

表 2 各海域畸形波发生概率及与瑞利分布比较统计表

海域	畸形波发生概率	与瑞利分布比较 (0.033 %)
大西洋	3.7 %	高于
印度洋	3.1 %	高于
北海	0.029 %	波峰高度高于/波谷高度低于
日本海	/	太平洋一侧符合/日本海一侧低于
	/	波峰、波峰振幅异于/波高一一致
台湾周边海域	龙洞 0.006 %/ 台东 0.010 9 %	低于

大西洋的波浪数据，运用下跨零点法，发现有

108个波浪满足 $H/H_s \geq 2$ 的条件,上跨零点法则有197个满足该条件,其中,有28个波浪具有相同的最大波高。因此综合考虑这两种方法的结果,从这7457组波浪数据中,一共获得276组畸形波的个案。畸形波发生的概率为3.7%,大于瑞利分布。

而通过对印度洋波浪数据的分析,发现在1998–2003的这6年中的50359个波浪中,满足 $H/H_s > 2$ 的波浪共有1563个,发生概率约为3.1%,比南大西洋的3.7%的概率略低。但研究发现存在两者比率位于4.5至21.3之间的波浪,因此研究者将畸形波的定义进行重新修改。将两者比率满足 $2 < H/H_s < 4$ 的波浪称之为“典型畸形波”,而将比率大于4或者更高的波浪称为“非寻常畸形波”。

在北海的波浪数据中,于354000个波浪中发现有104个畸形波。极端波峰高度发生的概率比瑞利分布大,而极端波谷高度发生的概率则高于瑞利分布。结论指出,常用的瑞利分布对畸形波现象的预测值较实际偏低,建议使用广义帕累托分布研究,包括畸形波在内的极端波浪特征值分布。

日本海9个观测点的波浪数据显示,太平洋一侧畸形波的发生概率基本符合瑞利分布,而近日本海一侧的畸形波发生概率则低于瑞利分布。

通过对日本海第二组观测数据的分析,得到了至少有14次波高超过10m的畸形波事件,畸形波波高和有效波高的比值最大可达2.67。数据还显示畸形波的波峰、波峰振幅的分布异于瑞利分布,而波高分布则倾向于和瑞利分布一致。

对台湾周边海域的波浪数据分析表明,龙洞地区符合式①的畸形波共有603个,台东则有67个,其概率皆约为 $1.4 \times 10^{-4}$ 。而危害性畸形波,即同时符合式①及式②的异常波浪,于龙洞共找到262个,发生概率为 $0.6 \times 10^{-4}$ ;台东外洋共找到51个,发生概率为 $1.09 \times 10^{-4}$ ,比龙洞高出了80%。两者发生的概率都低于瑞利分布的预测值。

### 3 基于实测资料的畸形波研究成果对比分析

对比上述5个海域的实测数据计算出的畸形波发生概率,发现结果大相径庭。大西洋、印度洋,计算表明畸形波发生概率较大,远远高于瑞利分布的预测概率。而北海、日本海及台湾海峡的波浪数据则显示,当地畸形波发生的概率较小,小于瑞利

分布。导致各国学者结论差异性的原因分析如下:

首先,由于实测资料是从不同的海域采集得来,各地的气象、地形等因素均存在较大差别,比如台湾的数据龙洞水深30m,水深较浅,而台东外洋浮标水深5000m,是深水海域,而且台东外洋海域大波浪较多,当地畸形波的发生概率较高的原因可能与大波浪有关,亦有可能和水深有关。且有部分数据是采集自风暴期间(如北海区域),而其他地区并不是单独采集风暴期间数据,所以数据本身就具有一定的差异性。

其次,研究结果与波浪测量的方法,包括使用的仪器、所放置的位置、测量时间等等都与最终的计算结果有着密切的关系。上述5个海域,有些海域使用浮标进行波浪测量,有些使用雷达、红外激光、超声波等高科技产品进行观测。因此数据的可靠性也互不相同。

再则,如表1中所列出的,各研究者所使用的畸形波判定依据也不一致,分析数据时并没有一个统一的标准。在今后的研究中,应该制定一个规范化的畸形波判定准则,使得各国研究者都可以依照此标准进行分析研究。

除上述原因之外,研究者所使用的统计分析方法也从很大程度上决定了波浪数据处理的结果。波浪数据分析前,须先将波浪时序列分割成许多个别的波浪,目前各学者常常采用上(下)跨零点法来定义一个波浪时间序列的最大波高及有效波高。但由于这两种方法切割出来的波浪并不相同,因此要考虑上跨零点法(波高是波峰到波谷)及下跨零点法(波高是波谷到波峰)处理数据的差异。

## 4 结语

虽然目前人们已经发现畸形波广泛存在于很多海域,但由于畸形波存在时间短及发生的不确定性,大多文献中的记录均是对某一点的时域观测,缺少完整的畸形波发生记录,因此畸形波的发生概率高或低仍尚不明确。考虑到畸形波可能带来工程事故和海上船舶灾难,人们对这种威胁性极大的波浪的认识必须有很大的提高,从而可以准确地预测和减少这种自然灾害的发生和造成的损失。因此,要想分析各海域畸形波发生的概率,还需要更多、更详细的观测数据。

目前在国际上, 针对畸形波现象, 主要是通过布置各种波浪测量仪器来对畸形波进行观测。优点是实用性很强, 如“MaxWave”所做, 为海洋工作人员先做一份畸形波易发区域图集, 再根据所测水位、波高、地形、水温、洋流等参数对畸形波产生机理进行探讨, 针对性强。缺点是耗时耗力, 没有强大的资金支持很难完成, 而且畸形波的到来会带来很大的损害, 无论是对测量仪器还是实测人员。

由于畸形波现象的特殊性, 测量仪器所得是否能够反映畸形波的本质, 或者说所测数据的真实性也一直是一个讨论的重点, 特别是随着各种卫星资料的综合应用, 数据真实性问题更加突出。Janssen (2006) 曾就两颗常用卫星 ERS 和 Envisat 的工作机理, 对合成孔径雷达 (SAR) 影像数据的真实性进行分析, 指出 SAR 目前无法获取能够反映真实海面非线性的数据, 因此通过 SAR 数据得出的畸形波发生概率不足以令人信服, 因此在本文中也未列举出卫星数据, 仍只对传统测量手法得出的数据成果进行了综述。

总而言之, 设法获取能够反映畸形波现象本质的第一手资料, 已经为越来越多的研究人员或组织所重视。和畸形波有关的各种数据及统计结果也在逐渐增多, 但畸形波的定义还未统一, 各种数据及结果的出现同时伴随着各种不同的观点。

## 参 考 文 献

- Chien H, Kao C C. 2002. On the characteristics of observed coastal freak waves. *Coastal Engineering* 44(04): 309–319.
- Dipena K. 2003. Rogue waves in real sea. *Outside magazine* 4: 31–35.
- ESA (European Space Agency). 2004. Ship-sinking monster waves revealed by ESA satellites. 36–40.
- Handsen D. 2001. For Sea Monster. *Good Old Boat Magazine* 12(1): 50–51.
- Haver S, Andersen O J. 2000. Freak wave rare realizations of a typical populations or typical realizations of a rare population. *Proc. of the 10th IOPE*. Seattle, 123–130.
- Haver S. 2003. Freak ways event at draupner jacket januar I 1995. PTT-KU-MA, 1–7.
- Kharif C, Pelinovsky E. 2003. Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon. *Euro. J. Mech. B/Fluids* 22: 603–634.
- Kjeldsen P. 2000. A sudden disaster—in Extreme Waves. *Proceedings of Rogue Waves*, 11: 56–60.
- Kjeldsen S P. 1990. Breaking waves. *Water Wave Kinematics* (A. Torum and O. T. Gudmestad). Kluwer, 178: 453–473.
- Klinting P S. 1987. Analysis of prototype freak waves. *Coastal Hydrodynam*, ASCE 618–632.
- Lavrenov I V. 1998. The wave energy concentration at the Agulhas current of South Africa. *Natural Hazards* 17: 117–127.
- Lavrenov I V. 1998. The wave energy concentration at the Agulhas current off South Africa. *Nature Hazards* 17: 117–127.
- Lawton G. 2001. *New Scientist magazine*, 170 (2297): 3–5.
- Leng-Hsuan Tseng, Fuh Shiang, Chang, et al. 2011. Probability of Ocean Freak Wave Occurrence. The 5th EAWoME—East Asian Workshop on Marine Environments.
- Liu P C, Pinho U F. 2004. Freak waves—more frequent than rare! *Annales Geophysicae* 22: 1839–1842.
- Mori N, Liu P C, Yasuda T. 2002. Analysis of freak wave measurements in the sea of Japan. *Ocean Engineering* 29: 1399–1414.
- Nobuhito Mori, Paul C Liu, Takashi Yasuda. 2002. Analysis of freak wave measurements in the Sea of Japan. *Ocean Engineering* 29: 1399–1414.
- Paul C Liu, Keith R MacHuchon, Chin H Wu. 2004. Exploring Rogue Waves from Observations in South Indian Ocean. 1–10.
- Paul Stansell. 2005. Distributions of extreme wave crest and trough heights measured in the North Sea. *Ocean Engineering* 32: 1015–1036.
- Peter Janssen, Werner Alpers. 2006. Why SAR wave mode data of ERS and Envisat are inadequate for giving the probability of occurrence of freak waves. *Frascati, Italy Proceedings of SEASAR* 23–25.
- Smith R. 1976. Giant waves. *Fluid. Mech.* 77(3): 417–431.
- Takashi Yasuda, Member, ASCE, Nobuhito Mori. 1997. Occurrence properties of giant freak waves in sea area around Japan. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*.
- Trulsen K, Dysthe K. 1997. Freak waves—a three dimensional wave simulation. *Proc. 21st Symposium Naval Hydrodynamics* 55–558.
- Uggo Ferreira de Pinho, Liu Paul C, Carlos Eduardo Parente Ribeiro. 2004. Freak Waves at Campos Basin, Brazil. *Campos. Geofizika* 21: 53–67.
- Vigor J. 2000. Planning for an unplanned inversion. *Good Old Boat Magazine* 3(6): 6–8.
- Yasuda T, Mori N. 1998. Occurrence properties of giant freak waves in sea area around Japan. *Oceanographic Literature Review* 45(1): 28.
- 陈正宏. 1999. 疯狗浪原因初探. *台湾成功大学* 5–10.
- 高璞, 汪留松, 赵西增. 2007. 畸形波特性研究. *中国港湾建设* 6: 152–158.
- 裴玉国. 2007. 畸形波的生成及基本特性研究. *大连理工大学*.
- 裴玉国, 张宁川, 张运秋. 2006. 畸形波数值模拟和定点生成. *海洋工程* 24–4.
- 陶爱峰. 2007. 深水波列演变及畸形波生成机制之数值探讨. *河海大学*.
- 许明光, 曾俊超, 高家俊. 1993. 台湾地区疯狗浪之调查及成因初探. *第十五届海洋工程研讨会论文集* 527–536.
- 曾蕊璇, 董东璟, 陶爱峰, 等. 2011. 海洋实测资料中异常波浪特性之研究. *第 33 届海洋工程研讨会论文集*, 151–156.
- 赵西增. 2008. 畸形波的实验研究和数值模拟. *大连理工大学*.
- 庄姿君. 1995. 疯狗浪调查. *台湾海洋大学* 23–48.

(本文编辑: 郭箬)