



“十二五”国家重点出版物出版规划项目
海岸河口工程研究论丛

二维畸形波

模拟方法及主要特征

崔 成 张宁川 著

SIMULATION METHODS AND
MAJOR CHARACTERISTICS OF
TWO-DIMENSIONAL FREAK WAVE



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



“十二五”国家重点出版物出版规划项目
海岸河口工程研究论丛

二维畸形波

模拟方法及主要特征

崔 成 张宁川 著

SIMULATION METHODS AND
MAJOR CHARACTERISTICS OF
TWO-DIMENSIONAL FREAK WAVE



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书是《海岸河口工程研究论丛》之一。本书介绍了根据组成波叠加原理数值模拟和物理模拟畸形波的方法,并分别在数值水槽和物理水槽中实现了畸形波的模拟。进一步通过分析数值模拟结果和物理试验结果研究了畸形波的生成、演变和传播规律,运动学和能量结构等基本内部结构特征,内、外部特征之间的相关关系及局部地形变化对畸形波基本特征的影响。

本书适合从事海岸河口、海洋波浪动力研究的科技人员和港口、海岸及近海、海洋工程专业高校学生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

二维畸形波模拟方法及主要特征 / 崔成, 张宁川著.

— 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015. 12

ISBN 978-7-114-12529-4

I. ①二… II. ①崔… ②张… III. ①波—数值模拟
—研究 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 243187 号

海岸河口工程研究论丛

书 名: 二维畸形波模拟方法及主要特征

著 作 者: 崔 成 张宁川

责任编辑: 韩亚楠 崔 建

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 720 × 960 1/16

印 张: 10.5

字 数: 190 千

版 次: 2015 年 12 月 第 1 版

印 次: 2015 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12529-4

定 价: 48.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

序

海岸、河口是陆海相互作用的集中地带,自然资源丰富,是经济发达、人口集居之地。以我国为例,我国大陆海岸线北起辽宁的鸭绿江口,南至广西的北仑河口,全长 18 000km;我国海岸带有大大小小的入海河流 1 500 余条,入海河流径流量占全国河川径流总量的 69.8%,其中流域面积广、径流大的河流主要有长江、黄河、珠江、钱塘江、瓯江等。海岸河口地区居住着全国 40% 左右的人口,创造了全国 60% 左右的国民经济产值,长三角、珠三角、环渤海等海岸河口地区是我国经济最为发达的地区,是我国的经济引擎。

人类在海岸河口地区从事经济开发的生产活动涉及很多的海岸河口工程,如建设港口、开挖航道、修建防波堤、围海造陆、保护滩涂、治理河口、建设人工岛、修建跨(河)海大桥、建造滨海火电厂和核电厂等等,为了使其经济、合理、可行,必须要对环境水动力泥沙条件有一详细的了解、研究和论证。人类与海岸河口工程打交道是永恒的主题和使命。

交通运输部天津水运工程科学研究院海岸河口工程研究中心的前身是天津港回淤研究站,是专门从事海岸河口工程水动力泥沙研究的专业研究队伍。致力于为港口航道(水运工程)建设和其他海岸河口工程等提供优质的技术咨询服务。多年来,海岸河口工程研究中心科研人员的足迹遍布我国大江南北及亚洲的印尼、马来西亚、菲律宾、缅甸、越南、柬埔寨、伊朗和非洲的几内亚等国家,研究范围基本覆盖了我国海岸线上大中型港口及各种海岸河口工程及亚洲、非洲一些国

家的海岸河口工程,承担了许多国家级重大科技攻关项目和 863 项目,多项成果达到国际先进水平和国际领先水平并获国家及省部级科技进步奖。海岸河口工程研究中心对淤泥质海岸泥沙运动规律、粉沙质海岸泥沙运动规律和沙质海岸泥沙运动规律有深刻的认识,在淤泥质海岸适航水深应用技术、水动力泥沙模拟技术、悬沙及浅滩出露面积卫星遥感分析技术等方面无论在理论上还是在实践经验上均有很高的水平和独到的见解。中心的一代代专家们为大型复杂项目给出正确的技术论证和指导,使经优化论证的工程方案得以实施。如珠江口伶仃洋航道选线研究、上海洋山港选址及方案论证研究、河北黄骅港治理研究、江苏如东辐射沙洲西太阳沙人工岛可行性及建设方案论证、瓯江口温州浅滩围涂工程可行性研究、港珠澳大桥对珠江口港口航道影响研究论证、天津港各阶段建设回淤研究、田湾核电站取排水工程研究等等,事实证明这些工程是成功的。在积累的成熟技术基础上,主编了《淤泥质海港适航水深应用技术规范》、《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》、《海港水文规范》泥沙章节,参编《海港总体设计规范》和《核电厂海工构筑物设计规范》等。

本论丛是交通运输部天津水运工程科学研究所海岸河口工程研究中心老一辈和少一辈专家学者多年来的水动力泥沙理论研究成果、实用技术和实践经验的总结,内容丰富、水平先进、科学性强、技术实用、经验珍贵,涵盖了水动力泥沙理论研究,物理数学模型试验模拟技术研究,水沙研究新技术、水运工程建设、河口治理、人工岛开发建设实例介绍等海岸河口工程研究的方方面面,对从事本行业的技术人员学习和拓展思路具有很好的参考价值,是海岸河口工程研究领域的宝贵财富。

本人在交通运输部天津水运工程科学研究院工作 20 年

(1990~2009年),曾经是海岸河口工程研究中心的一员,我深得老一代专家的指导、同辈人的鼓励和青年人的支持,我深得严谨治学、求真务实氛围的熏陶,留恋之情与日俱增。今天,非常乐见同事们把他们丰富的研究成果、实践经验、成功的工程范例著书发表,分享给广大读者。相信本论丛的出版将会进一步丰富海岸河口水动力泥沙学科内容,对提高水动力泥沙研究水平,促使海岸河口工程研究再上新台阶有推动作用。希望海岸河口工程研究中心的专家们有更多的成果出版发行,使本论丛的内容越来越丰富,也使广大读者能大受裨益。

交通运输部科技司司长



2012年11月

前 言

畸形波是一种波高极大、持续时间很短、能量高度集中的灾难性波浪,能对船舶和海上工程结构等造成严重的危害。目前,其发生机理和生成概率等基本问题还没有统一的结论。由于破坏力大,发生前没有征兆,实测资料有限等方面原因,导致畸形波的研究还未建立成熟的体系。

本书详细介绍了畸形波生成、演化过程,内部结构及内、外部结构之间关系等方面的研究成果。

本书主要研究了以下三项内容。

(1)畸形波的生成、演化过程可归纳为:从连续大波(大波群)→深谷→准畸形波→畸形波→准畸形波→深谷→连续大波。在畸形波生成、演化过程中,最大波浪并不是一直以自由水面形态向前传播,会发生大波群与深谷相互转化、深谷与畸形波相互转化,相邻的波浪间能量和波面传播速度不同步使最大波发生“突变”。

(2)定量分析了畸形波与常规不规则波列中最大波在时频能量集中程度和能量集中区在时频域的分布范围方面的区别。畸形波的时频能量集中度与外部特征参数 α_1 、波峰陡度 η_c/L_p 具有显著的相关关系,与 α_2 、 α_3 、 α_4 没有明显的相关关系。显著的地形变化,可使得畸形波时频能量集中区在时域的分布范围减小,同时显著增加时频能量的高频成分,但对能量集中程度、时频能量集中区在频域的分布范围的

影响不显著。

(3) 广义波陡 ε^* 在 $0.03 \sim 0.4$ 范围内的畸形波波面传播速度可采用半经验、半理论的公式计算。

ε^* 在 $0.03 \sim 0.31$ 范围内, 畸形波的波面传播速度小于线性波的波面传播速度; ε^* 在 $0.03 \sim 0.4$ 范围内, 其波面传播速度小于 3 阶 Stokes 波的波面传播速度。

成书之际, 感谢恩师张宁川教授的悉心指导, 也要感谢单位领导、同事和家人的帮助和支持。

由于作者水平有限, 书中不当之处在所难免, 敬请读者不吝赐教。

作 者
2015 年 7 月

目 录

1 绪论	1
1.1 畸形波研究进展概述	1
1.2 本书主要研究内容与思路	20
2 畸形波模拟	23
2.1 畸形波物理模拟	23
2.2 畸形波数值模拟	27
2.3 本章小结	44
3 畸形波生成、演化过程分析	45
3.1 天然实测畸形波列的复演	45
3.2 天然实测畸形波的生成、演化过程及分析	48
3.3 数值模拟畸形波生成、演化过程及分析	58
3.4 本章小结	69
4 畸形波波面传播速度	70
4.1 波面传播速度物理模型试验	70
4.2 有限水深条件下畸形波传播速度	79
4.3 深水条件下畸形波传播速度	81
4.4 畸形波与三阶 Stokes 波波面传播速度的对比分析	85
4.5 本章小结	86
5 畸形波生成、演化过程中特征大波的时频能量结构	88
5.1 小波方法简介	88
5.2 畸形波生成、演化过程中特征大波的时频能量结构特征	90
5.3 异常大波与常规大波时频能量特征的比较	102
5.4 广义畸形波时频能量集中度与波面特征参数的关系	105
5.5 本章小结	106

6 畸形波的内部结构	107
6.1 作为研究对象的畸形波.....	107
6.2 速度场基本特征.....	109
6.3 加速度场基本特征.....	114
6.4 动能、势能和能量流速率	118
6.5 畸形波外部与内部结构参数关系之探讨.....	119
6.6 本章小结.....	124
7 斜坡和曲线地形对畸形波生成及内外部结构的影响	125
7.1 非平底地形及模拟组别.....	125
7.2 地形对畸形波生成的影响.....	128
7.3 地形对畸形波外部特征的影响.....	130
7.4 地形对畸形波内部结构的影响.....	134
7.5 本章小结.....	146
8 结论	148
参考文献	150

1 绪 论

1.1 畸形波研究进展概述

随着全球人口数量迅速增长,对资源需求不断增加,陆地上的资源已经难以满足人类生产和生活的需要。海洋作为一个巨大的资源宝库,蕴藏着丰富的矿产资源、生物资源、水资源、能源(如波能、潮汐能、温差能等)和空间资源等,它已经成为人类发展经济并从事相应科学技术开发活动的重要领域。人类对海洋的开发和利用正不断地向深水化和多元化方向发展,发展的速度空前迅猛。开发和利用海洋,要依赖船舶、海上工程结构和设施,因此需要全面和深刻地了解和认识海洋动力环境。波浪是最重要的海洋动力环境条件之一。人类对波浪的研究由来已久,经历了从线性到非线性和从规则波浪到不规则波浪(随机波浪)的研究进程。然而波浪是一种非常复杂的物理现象,人类对它的研究尚有不足,还需要进一步的补充和完善,尤其是像畸形波这类特殊的波浪。

关于畸形波的研究最早可追溯到 20 世纪 60 年代。通过总结海洋中的巨浪现象,Draper 于 1965 年最早提出了畸形波的概念^[1]。畸形波(freak wave)是一种包含在随机波列当中的单个异常大波浪,具有明显的非线性特征,持续时间短,能量集中,破坏力惊人。相关资料和研究成果显示,它广泛存在于世界各大海域,会在察觉不到预兆的情况下,突然地出现在海面上,在它发生的前后还经常伴随着海中深洞(hole in the sea)和连续大波(three sisters)等异常波浪现象的发生^[2-5]。由于具有这些特征,使得畸形波像海洋中的恶魔一样,对人类的生活、航行的船舶和海上工程结构等造成严重威胁。此类大浪除了被称作畸形波(freak wave)以外,还被称作异常波(exceptional wave, abnormal wave)、极端波(extreme wave)、巨浪(giant wave)、杀人波(killer wave)、怪波(monster wave)、凶波(vicious wave, rogue wave)、水墙(walls of water)、疯狗波(rabid-dog wave)和海角巨浪(cape roller)等^[6-8]。从这些名称可以看出,畸形波是一种极度危险的波浪。近几十年来,畸形波引发人身、船舶和海上工程事故的报道日益增加,人们对它的关注也越来越多。相关部门和组织还分别设立了专门的研究项目(Max Wave Project),组织了专门的研讨会(Rogue Waves Workshop)。

1.1.1 畸形波定义

依据目击者的直接描述、现场观测记录和相关的文献报告等资料,学者们总结出畸形波的基本特征如下:

- (1) 持续时间短。
- (2) 波高极大且明显高于相邻的波浪。
- (3) 波峰尖瘦,波谷平坦,呈现出明显的峰—谷不对称特征,部分畸形波的波峰还呈现出一定程度的水平不对称特征。
- (4) 发生前没有明显的预兆,在恶劣海况或平静的海况背景下均可能发生。
- (5) 遍布世界各大海域,在深水或浅水条件下均可能发生。
- (6) 畸形波并非是一种独立的异常波浪现象,在畸形波发生前后,经常伴随着深谷和连续大波等异常波浪现象。

为了方便研究,Klitting 和 Sand(1987)^[9]通过量化畸形波外部特征,给出了畸形波的定义:①该波浪的波高 H_0 大于或等于包含该波浪波列的有效波高 H_s 的 2 倍,记为: $\alpha_1 = H_0/H_s \geq 2$;②该波浪的波高 H_0 大于或等于与该波浪相邻波浪波高的 2 倍,记为: $\alpha_2 = H_0/H_{-1} \geq 2$ 和 $\alpha_3 = H_0/H_{+1} \geq 2$;③该波浪的波峰 η_0 大于或等于该波浪波高的 0.65 倍,记为: $\alpha_4 = \eta_0/H_0 \geq 0.65$ 。

该定义不仅考虑了畸形波的外部特征,还考虑了它与相邻波浪之间的关系,被较多学者所接受。图 1.1 给出了满足该定义的畸形波示意图。图 1.2 给出了在北海的阿尔文(Alwyn)海域采集到的畸形波实例^[10-11]。还有部分学者认为,当波浪的波高满足 $H_0/H_s \geq 2$ 或 2.2 时,即可认为是畸形波^[12-17]。

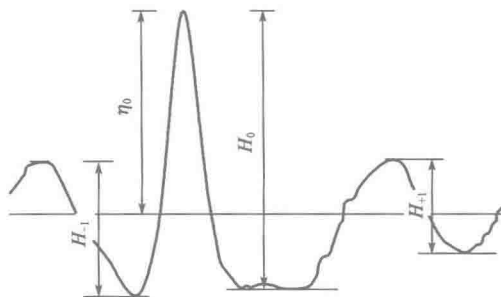


图 1.1 畸形波示意图

从上述情况可以看出,畸形波的定义尚未完全统一认识。本书中采用了 Klitting 和 Sand(1987)给出的畸形波定义。另外,现有的畸形波定义均是从畸形波几何特征的角度给出,不包含畸形波内部结构方面的信息。本书后文中尝

试从内部结构的角给出畸形波的定义。

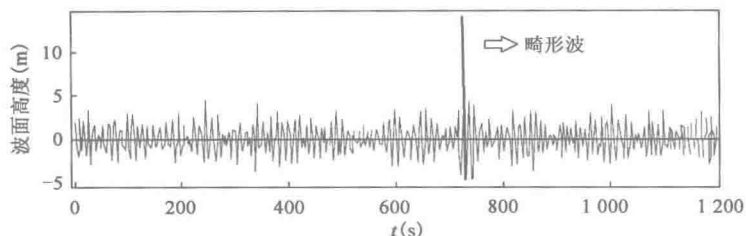


图 1.2 北海采集到的畸形波实例

1.1.2 畸形波事故和观测

近几十年来,畸形波引发了大量的人身、工程及船舶事故,受到了广泛的关注。图 1.3 给出了 1968 ~ 1994 年间畸形波袭击轮船失事的情况统计^[2]。从图 1.3 中可以看出,畸形波的发生海域几乎覆盖了全球所有大洋,它不仅在开阔的深水海域肆虐,在近岸的浅水海域也同样经常发生。

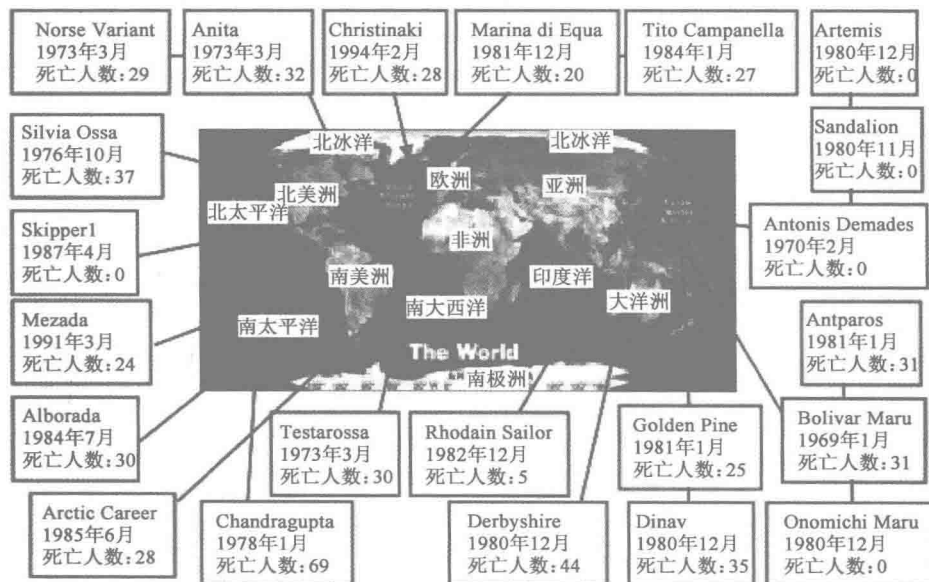


图 1.3 1968 ~ 1994 年间巨轮遭遇畸形波的情况统计

1) 畸形波事故

1952 年以来,在印度洋的南非海岸,至少有 12 艘轮船因遭遇畸形波而发生

事故。1969~1994年间,在太平洋和大西洋海域共有22艘巨型轮船由于畸形波的袭击在大海中沉没,事故中有525人丧生^[2]。

1974年5月17日,挪威籍油轮 Wilstar 号,在南非德班海域附近,遭受到畸形波的袭击,船体外部结构严重受损。该海域有著名的阿古拉斯海流(沿着非洲南部东岸向西南方向流动的印度洋洋流)经过^[18]。

1985年4月27日,苏联的一艘油轮,在南非东南海域遭遇了一次畸形波的袭击,一名在前甲板上工作的水手被巨浪卷入海中导致丧命^[8]。

1995年2月,巡洋舰 Queen Elizabeth II 号,在北大西洋的台风天气中,遭遇了一个29m高的巨浪,船体被损坏,庆幸的是事故中并无人员伤亡。据该船船长回忆,当时船体发生了两次令人难以置信的“颤抖”,似乎经历了两次连续大浪的袭击^[19]。

2002年11月20日,在西班牙西北部的 Galicia 海域,Prestige 号油轮遭遇畸形波,发生了严重的损坏(图1.4)^[20]。



图1.4 沉没的 Prestige 号油轮

2005年1月27日,在距阿拉斯加阿留申群岛中 Adak 岛南端650mile(1mile = 1609.344m)海域,一艘巡航船遭遇了一次15m巨浪的袭击,巨浪不仅损坏了巡航船的控制系统,还造成了两名船员受伤。尽管没有关于当天波浪状况的详细信息,但是在风暴期间,该海域的有效波高最大值约为7.2m。大约两周后(2月14日)另一艘巡航船在地中海遭遇风暴,被15m的巨浪损坏,当天该海域的最大有效波高仅2.4m。4月16日,从巴哈马群岛开往纽约的船,在途中遭遇21m高的巨浪受损,被迫停下来紧急抢修,波浪淹没了船舱,造成乘客受伤,该海域当天的最大有效波高约为4m^[4]。

2005年8月26日,在南非的 Kalk 海湾,两名游客在防波堤上被巨浪卷走,该巨浪波高超过9m,该海域近岸处的有效波高约为4.5m(图1.5)。有资料显示,1996年4月21日,该海域也发生过类似的畸形波伤人事件,3人被卷入海中,仅1人获救^[4]。



图 1.5 在 Kalk 湾一次超过 9m 高的畸形波将 2 个人从防波堤上卷入海中

2005 年 9 月 14 日,在黑海的 Blue 湾,距岸边 40 ~ 50m 处(水深为 2 ~ 3m),一艘航行的船只遭遇了波高约为两倍特征波高的破碎波浪^[4]。

2005 年 10 月 26 日,在巴哈马群岛沿岸的海域一个 3.7m 高的波浪摧毁了最少 100 户房屋并使一个 15 个月大的孩子丧命,当天该海域沿岸处的有效波高仅为 1.2m^[4]。

2006 年 11 月 11 日,42 000t 油轮 FR8 Venture 号在通过位于苏格兰东北端的朋特兰湾时,被 30m 高巨浪袭击,造成 2 名船员死亡,1 人重伤,船舶损坏,当天该海域有效波高达 6m^[5]。

2007 年 5 月 24 日,Jaya Baru 号渔船在印度尼西亚海域,被 6m 高波浪吞噬,造成 11 人死亡^[5]。

2007 年 12 月 4 日,一艘美国海岸巡逻船在加利福尼亚的摩洛湾执行任务时,被突然出现的大浪打翻^[21]。

2008 年 2 月,Riverdance 号渡轮从北爱尔兰开往希舍母的途中,遭遇了畸形波的袭击,船体被严重损坏,事故中有 3 人死亡。据大白鲨基金主席 Mariette Hopley 讲述,当时海面非常平静,这个大波不知是从何而来^[22]。

2008 年 3 月,一个 7m 高的巨浪,突然出现在西班牙西北部的拉科鲁尼亚港的岸边,冲走了岸上的汽车和行人。同年 5 月,一个高 5m 的大浪袭击了韩国西部海岸,造成 9 人死亡,14 人受伤^[23]。

2010 年 3 月,塞浦路斯籍游船 Louis Majesty 号在经过马赛港附近时,连续遭到三个约 7.9m 高的大浪袭击,事故中有 2 人死亡,6 人受伤^[24]。

2010 年 12 月 7 日,邮轮 Clelia II 号在南极洲附近海域的 Drake 海峡遭遇 9m 大浪袭击,造成船舶失去动力和通信能力,1 人受伤,当天该海域有效波高为 3.5m^[5]。

2010年12月30日,超级邮轮 Aegean Angel 号在大西洋百慕大海域遭遇畸形波,造成船舶损坏,2人死亡,1人受伤^[5]。

由此可见,畸形波在世界各大海域(无论是在近岸的浅水水域还是在开阔的深水水域)均可能发生,给人类带来严重的危害和巨大的损失。

2) 畸形波观测

根据定义,可以直接从波面实测记录中统计出畸形波的基本情况,作为开展相关研究工作的基础资料。较为常见的观测方法是通过在船舶或海洋平台等海上结构物上布置水面波动采集设备,进行长时间的波浪采集来捕获畸形波。由于畸形波的发生时间和位置不确定,发生前征兆不易察觉,持续时间较为短暂,破坏力较强,因此该方法获得畸形波的效率并不理想。

随着人造卫星技术的发展,利用人造卫星技术采集大范围波浪场信息来获得畸形波实测记录成为畸形波观测较为高效的途径。

1986年9月~1990年7月,日本交通部船舶研究院在距离日本海 Yura 渔港 3km 处采集了连续的波浪记录。Mori (2002) 等^[25-26]通过对该组观测数据的分析发现,其中至少有 14 个波高超过 10m 的畸形波,其中波高与有效波高的比值最大可达 2.67。

1995年1月1日,在位于北海挪威海域的 Draupner 采油平台附近,采集到一组包含畸形波的波面记录,时长为 20min,约 100 个波浪^[27]。该畸形波被业内视为较为经典的畸形波记录,被称为“新年波”,见图 1.6。

Skourup (1997) 等^[28]分析了北海中部丹麦海域超过 12 年的波浪观测记录,从中统计出大于 400 个畸形波的波峰与波高的比值为 0.69,这个特征超出了高斯(Gaussian)波的范畴。

Wolfram (2001) 等^[29]分析了 1994~1998 年间在北海阿尔文(Alwyn)海域采集到的畸形波记录,指出这些波浪中有 50% 的波浪波陡大于有效波陡,波高大于 2.3 倍的有效波高,发生在这些畸形波之前和之后的波浪的波高与有效波高相差不多,波陡大约是有有效波陡的一半。

Chien 等(2002)^[30]从中国台湾周边海域采集到 4 500 个波浪记录,从中统计出 175 个近岸畸形波。

Liu 和 Pinho (2004)^[31]从 1991~1995 年间在南大西洋坎普斯湾 1 000m 水深处采集的波浪观测记录中(共有 7 457 个波列),统计出 276 个波列包含畸形波。

在北海北部 Shetland 岛以东 100mile 的北 Alwyn 海域(水深 130m)发生的 14 次风暴中,采集到了 793h 的波面实测记录(约 354 000 个波)。Stansell (2004)^[10-11]通过分析该组实测记录,统计出 104 个畸形波。上述实测记录中有

两个经典异常波浪(畸形波和深谷),见图 1.7、图 1.8。由于其代表性,该实测记录中的畸形波被称为“北海畸形波”,深谷被称为“北海深谷”。

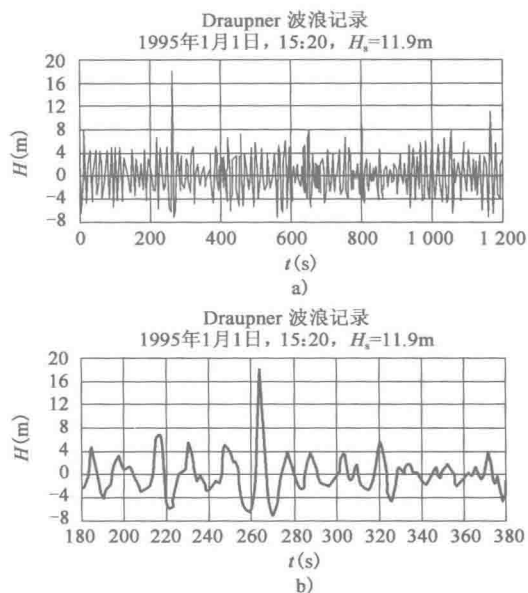


图 1.6 1995 年 1 月 1 日在 Draupner 采油平台附近采集的畸形波记录(新年波)

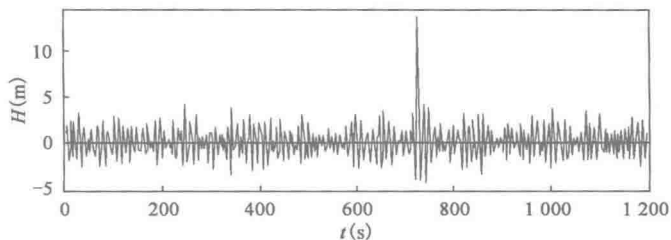


图 1.7 北海采集到的畸形波(北海畸形波)

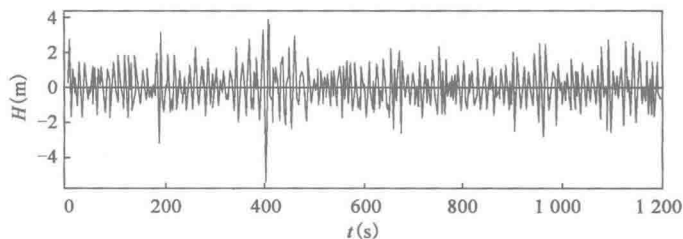


图 1.8 北海采集到的深谷(北海深谷)