



# 海岸动力环境与新型结构的水动力模拟分析方法

李华军 梁丙臣 刘勇 著



科学出版社

# 海岸动力环境与新型结构的水动力模拟分析方法

李华军 梁丙臣 刘 勇 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书主要围绕海岸区域的动力环境和新型海岸结构物的水动力模拟分析方法开展论述。书中介绍了用于台风波浪模拟的混合风场模型、不同设计波要素样本遴选与统计分析方法、海面与海底剪切应力及风暴潮漫滩过程中的波浪作用机制、基于亚网格的海岸动力环境数值模拟方法、海床冲淤演变连续过程的物理模型试验研究方法;介绍了新型透空消能式海岸结构物水动力分析的基础理论,阐述了匹配特征函数展开、多极子分析、速度势分解以及分区边界元分析方法,讨论了新型结构物的水动力特性。

本书可以为从事海岸工程、近海工程等领域的学者和工程师提供有益参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

海岸动力环境与新型结构的水动力模拟分析方法/李华军,梁丙臣,刘勇著. —北京:科学出版社,2017.3

ISBN 978-7-03-052195-8

I. ①海… II. ①李…②梁…③刘… III. ①海洋动力学-水动力学-数值模拟 IV. ①P731.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 051537 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:桂伟利  
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张:17 1/2

字数:353 000

定价:150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

我国大陆海岸线长 18000 多千米,沿海区域内拥有丰富的矿产、渔业、湿地、旅游等资源。码头、护岸、防波堤、人工岛、进海路、跨海桥隧等各类海岸工程是人类开发利用海岸带资源的重要基础设施。随着社会经济的发展,海岸带保护与可持续发展需求的不断增强,工程结构物的建设也从单一的安全性、功能性要求转向兼顾安全、环保、经济的新理念。

这对海岸动力环境的模拟分析以及海岸结构物的设计建造带来新挑战:一方面,波浪、水流等动力要素设计标准的确定,以及工程建设引起环境影响评价等,都需要对海岸区域动力环境的演变进行更加准确的模拟分析;另一方面,迫切需要研发满足环保要求的新型海岸结构,并发展相应的结构水动力分析方法。针对上述问题,十几年来,作者深入开展了海岸动力环境及新型结构水动力分析的研究,在海岸工程环境荷载确定、海岸动力环境演变精细化模拟以及新型海岸结构物水动力分析等方面取得了系统的研究成果,并在黄河三角洲滩浅海油气开发路岛工程、胶州湾湿地防护等二十余项工程中推广应用,取得了良好的工程应用效果。在此基础上,结合国内外相关研究,撰写完成本书,希望可以为从事相关工作的学者和工程师提供有益参考。

本书共 7 章。第 1 章介绍本书工作的研究背景;第 2 章介绍波浪数值后报与设计波要素推算方法;第 3 章介绍海岸区波浪、海流、泥沙相互作用理论及耦合模型的构建与应用案例;第 4 章介绍适用于滨海湿地的高精度亚网格动力环境数值模拟方法;第 5 章和第 6 章介绍各类新型透空消能式海岸结构物的水动力分析方法;第 7 章介绍海床冲刷演变的物理模型试验技术。

本书第 1 章由李华军撰写;第 2 章由李华军、梁丙臣、邵珠晓撰写;第 3 章由梁丙臣、李华军撰写;第 4 章由武国相、李华军、梁丙臣撰写;第 5 章和第 6 章由刘勇、李华军撰写;第 7 章由李华军、梁丙臣、王俊撰写。全书由李华军通稿、修订。

本书研究工作得到国家自然科学基金、973 计划以及多家工程单位的资助与支持,在此表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在不足之处,恳请读者给予批评指正。

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 海岸工程动力环境数值模拟与分析技术 .....	1
1.2 新型海岸结构物水动力分析方法与设计理论 .....	3
1.3 主要内容与章节 .....	5
参考文献 .....	6
第 2 章 基于台风浪后报数据的设计波高推算 .....	9
2.1 台风浪数值模拟 .....	10
2.1.1 再分析风场 .....	11
2.1.2 Holland 模型风场 .....	12
2.1.3 Blended 模型风场 .....	14
2.1.4 台风浪数值模拟 .....	14
2.2 设计波高推算 .....	18
2.2.1 概率分布函数 .....	19
2.2.2 POT 法分组 .....	19
2.2.3 POT 法取阈及 POT/GPD 推算 .....	20
2.2.4 AM/P-III 推算 .....	22
2.2.5 设计波高推算方法对比分析 .....	23
2.2.6 基于样本特性的阈选取准则 .....	24
参考文献 .....	26
第 3 章 多因素耦合作用下的海岸水动力数值模拟 .....	28
3.1 数值模拟基本理论 .....	28
3.1.1 海流运动基本理论 .....	29
3.1.2 泥沙运动基本理论 .....	47
3.2 波浪、海流与泥沙耦合作用分析 .....	53
3.2.1 波浪影响下的海面与海底剪切应力 .....	54
3.2.2 悬浮泥沙对水动力的衰减作用分析 .....	60
3.2.3 浪流耦合作用下的风暴潮漫水分析 .....	69
3.3 浪流沙耦合模式构建 .....	81
3.3.1 浪流沙模块耦合的实现 .....	81

3.3.2	海底冲淤演变模块 .....	81
3.3.3	波流耦合有效性分析 .....	83
3.4	浪流沙多因素耦合模式的应用案例 .....	87
3.4.1	黄河三角洲应用案例 .....	87
3.4.2	胜利油田 KD12 路岛工程应用案例 .....	94
	参考文献 .....	97
<b>第 4 章</b>	<b>滨海湿地动力过程的数值模拟分析 .....</b>	<b>103</b>
4.1	滨海盐沼湿地的亚网格水动力模型 .....	104
4.1.1	盐沼湿地水动力模拟研究背景 .....	104
4.1.2	亚网格模型的控制方程 .....	106
4.1.3	数值方法 .....	113
4.1.4	预存储方法 .....	121
4.1.5	初始条件和边界条件 .....	123
4.1.6	模型计算流程 .....	124
4.2	亚网格模型在滨海盐沼湿地中的应用 .....	124
4.2.1	理想潮沟-潮滩系统验证 .....	125
4.2.2	在布洛克布雷泽盐沼湿地的应用 .....	130
4.3	滨海盐沼湿地的生态-地貌耦合模拟 .....	137
4.3.1	亚网格水位、流速和泥沙浓度的重建方法 .....	138
4.3.2	亚网格悬沙输运方程的推导 .....	140
4.3.3	亚网格泥沙输运模型的建立 .....	143
4.3.4	植被-地貌演变耦合模型 .....	148
4.3.5	潮滩-盐沼湿地系统发育的数值模拟 .....	155
	参考文献 .....	161
<b>第 5 章</b>	<b>新型海岸结构物水动力解析研究 .....</b>	<b>164</b>
5.1	基本理论 .....	164
5.1.1	控制方程和边界条件 .....	164
5.1.2	多孔介质模型 .....	166
5.1.3	开孔薄板边界条件 .....	168
5.2	匹配特征函数展开法 .....	170
5.2.1	多孔堆石潜堤 .....	170
5.2.2	水平多孔板 .....	177
5.2.3	排桩堆石结构 .....	180
5.2.4	斜向波问题 .....	185
5.3	多极子展开分析 .....	187

---

5.3.1 正向波对半圆型开孔潜堤的作用 .....	187
5.3.2 斜向波对半圆型开孔潜堤的作用 .....	195
5.4 速度势分解技术 .....	201
5.4.1 出水多孔防波堤 .....	201
5.4.2 单层水平多孔板 .....	208
5.4.3 双层水平多孔板 .....	216
5.4.4 水平多孔板-堆石复合型潜堤 .....	223
5.4.5 斜向波问题 .....	227
参考文献 .....	229
<b>第 6 章 新型海岸结构物水动力数值分析 .....</b>	<b>233</b>
6.1 二维问题 .....	233
6.2 斜向波问题 .....	238
6.3 平面波问题 .....	242
参考文献 .....	249
<b>第 7 章 海床冲淤物理模型试验分析技术 .....</b>	<b>251</b>
7.1 模型试验设置 .....	251
7.2 推移质输沙率物理模型试验分析方法 .....	252
7.3 冲泻区地形演变的物理试验模拟与分析 .....	258
参考文献 .....	270



# 第 1 章 绪 论

我国拥有 18000 多千米大陆海岸线,沿海区域拥有丰富的矿产、渔业、湿地、旅游等资源,是经济与社会发展的重要区域。随着经济的发展,海洋资源开发利用与环境承载力之间的矛盾日益凸显,海岸带的可持续开发利用面临着严峻的挑战。

海岸带地处海陆交汇地带,陆地与海洋相互作用显著,动力条件复杂,波浪、潮流、风暴潮、径流等因素之间存在着强非线性耦合作用,海岸蚀退、淹没、结构物破坏等灾害频发。尤其是近年来,在全球气候变化的影响下,海洋灾害频次和强度有增加的趋势,严重威胁沿海地区的经济社会生活。此外,滨海湿地作为天然的海岸防护屏障和重要的生态环境系统,也在人类活动和海平面上升的影响下,变得愈发脆弱。

海洋资源开发与生态环境保护是海岸带发展的两个重要方面。人类开发利用海洋资源的工程设施由最初单纯的被动式海岸防护结构,到码头、路岛工程、跨海桥隧等资源开发综合设施,再到人工沙滩、亲水型护岸、透空式进海路等环境友好型设施。结构形式也由单一满足安全与基本功能要求的不透水结构,发展为适用于环境敏感区的透空式亲水结构。随着人类海岸开发技术水平和对滨海亲水生活要求的提高,海岸工程建设不但对安全性和经济性提出了更高要求,也越来越关注工程对环境产生的负面影响。环境友好型海岸工程建设技术已成为学术研究和工程设计、施工的热点与难点。

综上所述,亟须发展安全、经济、环保的海岸工程建设技术,包括海岸动力环境模拟技术和新型结构物设计理论。前者既可为海岸结构物提供环境荷载设计标准,又能够预测工程实施对区域动力环境演变的影响,为工程建设的环境可行性分析提供依据。后者则需要利用前者所确定的环境荷载参数,结合理论分析、数值模拟与物理模型试验,进行结构的水动力特性与基础淘刷分析,为工程设计提供依据。围绕上述内容,国内外已有很多重要研究成果,但仍需进一步发展完善。本书在梳理前人研究成果的基础上,在海岸动力环境模拟分析方面,集中阐述了设计波要素的数值推算和浪、流、沙的相互作用机理及耦合模拟技术;在海岸工程结构设计方面,主要阐述新型透空式结构物的水动力分析和基础淘刷试验模拟技术。

## 1.1 海岸工程动力环境数值模拟与分析技术

海岸工程动力环境计算分析是海岸工程建设的关键前提,可以为工程设计提



供环境荷载设计标准,并可为工程可行性研究提供工程环境影响预测分析。

海岸区水深地形复杂,潮流、波浪、风暴潮、泥沙运动等不同时空尺度动力因素间的非线性耦合作用显著,海岸工程的水动力环境与海床冲淤演变数值模拟极为困难。

基于质量守恒和牛顿第二定律所得到的 Navier-Stokes 方程(简称 N-S 方程)是流体运动的基本方程。然而,完整的 N-S 方程求解起来十分复杂且耗时巨大。海岸环境中的多数流动问题,如潮波、风暴潮、海啸等,其垂向尺度(数米至数百米)远小于水平尺度(数百千米至数千千米),因此可归为“浅水流动”问题。在浅水流动中,静压假设成立,即认为在垂向上流体重力与垂向压强梯度力平衡,垂向加速度和其他作用力的垂向分量可忽略不计,自由水面仅为地点的函数。据此可将原始的 N-S 方程简化为静压方程。与原始 N-S 方程相比,该方程求解过程明显简化,计算速率也显著提升,可用于海岸区域大范围的水动力计算。

当垂向流速较小时,假设水平流速在垂直方向均匀分布,将 N-S 方程沿水深积分,则可以得到经典的浅水方程。浅水方程为平面二维模型,可以计算得到水面高度和水深平均流速;静压方程又称准三维方程,可以计算得到垂向流速和水平流速的垂向结构。静压方程和浅水方程是海岸工程领域中水动力模型的控制方程。

1973 年,Leendertse 等<sup>[1]</sup>首先开展了三维水流数值模拟的研究工作,提出了模拟三维水流的分层方法。Leendertse 在垂直方向采用固定分层法,在每层中沿水深积分使之成为二维问题,并用 ADI 格式进行数值离散。1985 年,赵士清<sup>[2]</sup>也提出了将水体空间在垂向上划分为若干层,将求解三维问题简化为求解一系列二维问题,各层之间通过内摩擦阻力来连接,这些数值模型是三维模型最初的基本特征和研究方法。后来,为了更好地模拟海底地形的变化,Philips 提出的垂向  $\sigma$  坐标变化被应用到河口与海岸三维模型中,亦称为垂向伸缩坐标系,这种垂直坐标系可以在不同的水深处进行均匀分层,而且岸边界的处理也变得极为方便。应用较为广泛的这类模型有普林斯顿大学的 POM 模型<sup>[3]</sup>、意大利的 TRIM3D 模型<sup>[4]</sup>、荷兰代尔夫特理工大学的 DELFT3D 模型<sup>[5]</sup>、美国威廉玛丽学院的 SCHISM 模型<sup>[6]</sup>、美国麻州大学研发的 FVCOM 模型<sup>[7]</sup>、ROMS 基础上发展的 COAWST 模型<sup>[8]</sup>、欧洲的水动力与生态耦合模型 COHERENS<sup>[9]</sup>等一系列海洋动力数值模型<sup>[10,11]</sup>。国内,海岸、河口数值模型发展和应用方面也做了很多有意义的工作<sup>[11~17]</sup>。

随着数值计算方法的发展与解决实际问题的不同需求,河口海岸模型的数值方法也不尽相同。按照数值离散方法,可分为有限差分法、有限元法、有限体积法;按照网格形状,可分为矩形、三角形、多边形、曲线正交网格和混合网格;按照时间差分格式,可分为显式、隐式、半隐式等。针对激波、不连续流等问题,有 TVD 格式、Godunov 格式、间断伽辽金格式等;针对跨尺度问题,有非结构网格、动态自适应

应网格、多重网格和亚网格<sup>[18~20]</sup>等技术方法。这些数值方法的发展使得海岸模型的计算精度、计算效率获得了大幅的提高,在海岸工程领域的应用也更加广泛。

尽管经历了 40 余年的发展与完善,但是随着人们对海岸动力过程理解的深入和数值方法的发展,海岸动力环境模拟仍然是海岸工程领域的研究热点,尤其在多动力因素相互作用机制与耦合方法,以及多尺度问题的高精度、高效率模拟技术等方面。

在波浪设计标准的数值推算与分析方面,极端台风浪模拟主要使用再分析风场或者 Holland 台风模型风场。但波浪场模拟结果精度不高,尤其是台风路径附近。在波浪后报结果统计分析方面,样本选取和重现期推算多采用年极值法。该方法由于每年仅有一个极值,样本数据量不够大,单个样本数据发生的偶然性可显著影响长重现期波浪推算结果的稳定性和准确性。第 2 章以南海为研究区域,模拟后报了 40 年的极端波浪,深入研究设计波浪要素的统计分析方法,提出阈值法 (peak over threshold, POT) 中确定合理阈值的新方法。

海岸区波浪、海流、泥沙运动等多种动力因素耦合共存,对海岸动力过程的准确模拟形成了很大的挑战。针对上述问题,第 3 章探讨波浪影响下的表面风拖曳力与海底剪切应力、悬沙对湍流衰减作用以及风暴潮漫滩过程中的波浪作用机制。在此基础上,基于 COHERENS 模型,联合第三代波浪模型 SWAN,构建波浪、海流、泥沙耦合模型,并进一步介绍该模型的实际工程应用案例。

滨海湿地是海洋-陆地过渡区域的一种典型生态系统,其复杂的地貌形态和强烈的生态-地貌耦合过程使得传统海岸模型在该区域的应用面临着很多困难。第 4 章介绍了可以合理考虑尺度小于计算网格的微地形特征(如细窄潮沟)的亚网格水动力模型,并以此为基础建立了综合考虑水动力-泥沙输运-地貌演变-植被演化之间相互作用的滨海湿地生态-地貌耦合模型。

## 1.2 新型海岸结构物水动力分析方法与设计理论

海岸结构物是开发、利用和保护海岸带空间与矿产资源的重要基础设施,其结构型式复杂多样,根据不同功能可以归为两大类。一类是直接抵御波浪、风暴潮、海流等严酷的环境荷载,为海岸带、沿海基础设施、人类活动等提供掩护的海岸防护结构,主要包括海堤、护岸、防波堤等;另一类则是海上交通以及海岸带资源开发的依托设施,主要包括码头、人工岛、进海路、跨海桥隧等。关于各类海岸结构物的详细功能和分类可以参考美国的 *Coastal Engineering Manual*<sup>[21]</sup> 和我国的《海岸工程》<sup>[22]</sup> 等文献。各类海岸结构物的工程造价昂贵,一旦破坏,将造成巨大的人员伤亡、经济损失和环境破坏。新型海岸结构物研发及其安全设计、建造与运行维护技术,是目前海岸工程研究中的热点问题。

新型海岸结构物的发展与社会经济的发展以及工程建设水平的进步息息相关,特别是近二十年来,海岸带环境保护与可持续发展的需求日益强烈,海岸结构物由最初满足结构自身安全和基本功能的要求,发展为兼顾安全、环保、经济的新一代结构。Takahashi<sup>[23]</sup>曾以防波堤为例,阐述了传统海岸结构物的发展历程:从公元前 2000 年埃及亚历山大修建的早期堆石防波堤开始,防波堤结构经历了从斜坡式到直立式的发展历程,具体而言就是从缓坡堆石结构到陡坡结构,从高基床复合型结构到低基床直立式结构,从斜坡堆石防波堤到复合型防波堤。Allsop<sup>[24]</sup>详细梳理了英国直立式防波堤的发展历史。van der Meer<sup>[25]</sup>总结了传统斜坡堆石结构的概念设计方法,Goda<sup>[26]</sup>给出了直立式海岸结构物的工程设计方法,EurO-top<sup>[27]</sup>中则详细给出了各类海岸结构物的波浪爬高和越浪量计算方法。可以看出,对于传统的直立式和斜坡式海岸结构物,其工程设计理论比较完善,工程建造和运行维护技术也相对比较成熟。

为降低结构物承受的波浪等环境荷载,提高结构的安全性,同时降低工程建设对海岸环境的负面影响,新型透空消能式结构逐渐成为目前海岸结构物的发展趋势。20 世纪 60 年代,加拿大的 Jarlan<sup>[28]</sup>提出了开孔消能沉箱结构,就是将传统矩形沉箱的前墙开孔,波浪通过开孔墙进入消浪室消能,可以有效降低结构的波浪力、反射系数和越浪量。目前,矩形开孔沉箱结构已经在国内外各类工程中得到大量应用,取得了很好的工程效果。半圆型(开孔)沉箱则是另一种得到大量成功应用的新型海岸结构物。20 世纪 90 年代日本宫崎港最早修建了半圆型防波堤的工程试验段<sup>[29]</sup>,经过深入改进提高后,在我国天津港、长江口深水航道整治等工程中得到大量成功应用<sup>[30]</sup>。目前,我国《防波堤设计与施工规范》(JTS 154-1—2011)<sup>[31]</sup>已经在附录 H 和 J 中分别给出了矩形开孔沉箱和半圆型沉箱的波浪力工程计算方法。为满足现代海岸工程的发展需求,更多不同型式的透空消能式海岸结构物被开发应用于实际工程。例如,德国近年来注重采用亲和性的海岸防护型式,开发应用了移动式海堤、分离式挡浪墙等新型海岸结构物,工程应用效果显著<sup>[32]</sup>。我国东营胜利油田滩浅海地区的动力环境复杂,海床冲刷剧烈,生态环境脆弱,“海油陆采”工程需要修建人工岛和进海路,为最大限度降低环境影响,提高结构抗冲刷能力,研发了全直桩透空式进海路结构,达到了兼顾安全、环保、经济的工程应用效果。

为研发各类新型海岸结构物,提高工程设计、建设和运行维护水平,降低海上工程的安全风险与环境风险,亟须发展高效的新型海岸结构物水动力分析方法和工程设计理论。研究海岸结构物的水动力特性,基本研究手段包括理论分析、计算流体力学数值模拟和物理模型试验。随着计算机能力的不断提高,可以通过求解 N-S 方程,建立数值波浪水槽(池),模拟、分析波流与结构物的相互作用过程,陶建华<sup>[33]</sup>和 Lin<sup>[34]</sup>等在其论著中对计算流体力学数值模拟方法进行了详细介绍。特

别是近年 OpenFOAM 等开源计算流体力学模型得到广泛验证和应用,为新型海岸结构物提供了有效的数值模拟工具。与数值模拟不同,解析(理论)或半解析方法的分析过程简单,物理意义明确,通过合理的简化和数学描述,能够阐明结构物水动力特性的基本变化规律,可以为工程设计等提供有效指导。目前,国内还很少有论著专门阐述透空消能式海岸结构物水动力特性的解析和半解析分析方法,本书的第5章和第6章将专门针对该类问题进行深入介绍,选取典型的消能式海岸结构物,阐述该类问题的基本方程、数学描述方法以及水动力分析技术,并结合工程应用进行必要的算例分析与讨论。

海岸结构物的基础淘刷问题是工程建设中的重点研究内容之一,而动床物理模型试验是该问题的重要分析手段。但是,波浪水质点的往复运动,导致海床一直处于动态变化的过程。传统海床演变试验方法无法获取动态变化的床面,限制了海床冲淤的高精度试验分析,因此,对流场与床面无干扰的海床动态演变试验研究日益受到重视<sup>[35,36]</sup>。第7章主要以海床实时演变试验为依托,阐述视频观测分析技术,并介绍该方法在研究推移质输沙率及对冲泻区地形演变方面的应用。

### 1.3 主要内容与章节

本书论述海岸工程中水动力模拟与分析技术的新进展,主要涉及工程动力环境与设计要素的数值模拟、新型海岸结构物水动力分析与海床演变试验技术等两方面内容。本书共由七章组成,各章节主要内容如下:

第1章主要回顾海岸工程水动力模拟与分析技术的研究进展,介绍本书各章节的主要内容。

第2章主要针对海岸工程环境中设计波要素的数值后报与分析展开论述。本章提出混合风场模型,并以南海为例,模拟了40年台风浪。模拟结果显示,对于台风期间波浪,本章所提出的混合风场模拟结果更为精确。通过对比不同的样本选取方法,发现相对于年极值法,阈值法取样方法更符合样本自然的时间序列分布,在此基础上提出确定合理阈值的新方法。

第3章阐述波浪、海流、泥沙运动、冲淤演变等多因素耦合的水动力环境数值模型的构建方法。介绍模型的控制方程、数值离散方法等基本理论,阐明海岸区波浪、海流、泥沙等动力因素间耦合作用机理及其影响规律。最后,分别以黄河三角洲滨海区与胜利油田滩海采油的路岛工程作为区域海洋环境和海岸工程环境应用案例,介绍模型的工程应用。

第4章介绍适用于复杂滨海湿地系统的高精度亚网格环境动力数值模型,在其基础上耦合了植被阻力与动态演化模块、悬沙输运与地形演变模块,建立了湿地

演变的生态-地貌耦合模型。

第5章阐述透空消能式海岸结构物的解析研究方法。首先,介绍解析研究波浪对消能式海岸结构物作用的理论基础、基本控制方程和边界条件。然后,以多孔堆石潜堤、水平多孔板、排桩堆石结构为例,介绍匹配特征函数展开分析技术。随后,分别以正向波和斜向波作用下的半圆型开孔沉箱为例,介绍多极子展开分析方法。最后,以出水多孔防波堤、单层水平多孔板、双层水平多孔板、水平多孔板-堆石复合型潜堤为例,介绍速度势分解技术。在所有问题的分析中,均给出典型工况的计算结果,部分计算结果还与物理模型试验结果进行对比验证,并从工程应用角度出发进行必要的分析讨论。

第6章阐述透空消能式海岸结构物的水动力数值分析(半解析研究)技术,主要介绍如何利用分区边界元方法分析海岸结构物的水动力特性。分别以梯形多孔堆石潜堤、带倾斜角度多孔板、开孔沉箱为例,依次介绍立面二维问题(二维拉普拉斯方程)、斜向波问题(修正的亥姆霍兹方程)以及平面二维问题(亥姆霍兹方程)的分区边界元分析方法。详细介绍边界积分方程的离散求解过程,并结合算例分析,研究消能式海岸结构物的水动力特性。

第7章阐述海床冲刷演变过程的物理模型试验方法,分别论述沙纹运动规律和冲泻区推移质输沙规律。基于试验数据,将多普勒声学流速仪记录数据作为经验公式的输入条件,开展沙纹推移质输沙率对比研究。通过冲泻区泥沙运动研究,阐明波浪作用下的冲泻区泥沙运动规律。

## 参 考 文 献

- [1] Leendertse J J, Alexander R C, Liu S K. A three dimensional model for estuaries and coastal seas; Volume I, principles of computation. Santa Monica: Rand Corporation, 1973.
- [2] 赵士清. 长江口三维潮流的数值模拟. 水利水运研究, 1985, (1): 18—20.
- [3] Mellor G L. Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model [NJ 08544-0710]. Princeton: Princeton University, 1998.
- [4] Casulli V, Cattani E. Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow. Computers & Mathematics with Applications, 1994, 27(4): 99—112.
- [5] Treffers R B. Wave-drive longshore currents in the surf zone [Master Thesis]. Delft: Technische Universiteit Delft, 2008.
- [6] Zhang Y, Ye F, Stanev E V, et al. Seamless cross-scale modeling with SCHISM. Ocean Modelling, 2016, 102: 64—81.
- [7] Chen C, Liu H, Beardsley R C. An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: Application to coastal ocean and estuaries. Journal of Atmospheric

- and Oceanic Technology, 2003, 20(20): 159—186.
- [8] Warner J C, Armstrong B, He R, et al. Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean Modelling*, 2010, 35(3): 230—244.
- [9] Luyten P J. An analytical and numerical study of surface and bottom boundary layers with variable forcing and application to the North Sea. *Journal of Marine Systems*, 1996, 8 (3-4): 171—189.
- [10] Danmark Hydroinformatics Institution. MIKE powered by DHI. <http://www.mikepoweredbydhi.com/>[2016-6-9].
- [11] Marine and Environmental Technology Research Center. MOHID modelling water resources. <http://www.mohid.com/>[2016-6-9].
- [12] 孔令双. 河口、海岸波浪、潮流、泥沙数值模拟[博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2001.
- [13] 王厚杰. 黄河口悬浮泥沙输运三维数值模拟[博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2002.
- [14] 胡克林. 波流共同作用下长江口二维悬沙数值模拟[博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2002.
- [15] 诸裕良. 南黄海辐射状沙脊群动力特征研究[博士学位论文]. 南京: 河海大学, 2003.
- [16] 李孟国. 海岸河口水动力数值模拟研究及对泥沙运动研究的应用[博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2002.
- [17] Liang B, Li H, Lee D. Numerical study of three-dimensional suspended sediment transport in waves and currents. *Ocean Engineering*, 2007, 34(11-12): 1569—1583.
- [18] Defina A. Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas. *Water Resources Research*, 2000, 36(11): 3251—3264.
- [19] Volp N D, Prooijen B C, Stelling G S. A finite volume approach for shallow water flow accounting for high-resolution bathymetry and roughness data. *Water Resources Research*, 2013, 49(7): 4126—4135.
- [20] Wu G, Shi F, Kirby J T, et al. A pre-storage, subgrid model for simulating flooding and draining processes in salt marshes. *Coastal Engineering*, 2016, 108: 65—78.
- [21] United State Army of Engineers. Coastal Engineering Manual. <http://coastalengineering-manual.tpub.com/>[2003-2-1].
- [22] 严恺. 海岸工程. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [23] Takahashi S. Design of vertical breakwaters. Kanagawa: Port and Airport Research Institute, 2002.
- [24] Allsop W. Historical experience of vertical breakwaters (in the UK) // Proceedings of ICE Conference on Coasts, Marine Structures & Breakwaters, Edinburgh, 2009.
- [25] van der Meer J W. Conceptual design of rubble mound breakwaters. *Advanced in Coastal and Ocean Engineering*, 1995, 1: 221—315.
- [26] Goda Y. Random seas and design of maritime structures // Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 18. Hackensack: World Scientific Publishing Company, 2010.



- [27] van der Meer J W, Allsop W, Bruce T, et al. EurOtop II—Manual on wave overtopping of sea defences and related structures; An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. <http://www.overtopping-manual.com/manual.html>[2016-10-1].
- [28] Jarlan G E. A perforated vertical wall breakwater. *Dock and Harbour Authority*, 1961, 41 (486): 394—398.
- [29] Aburatani S, Koizuka T, Sasayama H, et al. Field test on a semi-circular caisson breakwater. *Coast Engineering*, 1996, 39(1): 59—78.
- [30] 谢世楞. 半圆形防波堤的设计和 research 进展. *中国工程科学*, 2000, 2(11): 35—39.
- [31] 中华人民共和国交通运输部第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤设计与施工规范 (JTS 154-1—2011). 北京: 人民交通出版社.
- [32] 郑金海, 冯向波, 陶爱峰, 等. 德国梅-前州和下萨克森州的海岸防护新理念与新型式 // 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2011: 1089—1095.
- [33] 陶建华. 水波的数值模拟. 天津: 天津大学出版社, 2005.
- [34] Lin P Z. *Numerical Modeling of Water Waves*. New York: Taylor & Francis Group, 2008.
- [35] Vousdoukas M I, Kirupakaramoorthy T, Oumeraci H, et al. The role of combined laser scanning and video techniques in monitoring wave-by-wave swash zone processes. *Coast Engineering*, 2014, 83(1): 150—165.
- [36] Yang Z, Li H, Liang B, et al. Laboratory experiment on the bed load sediment transport over a rippled bed. *Journal of Coastal Research*, 2016, 75: 497—501.



## 第 2 章 基于台风浪后报数据的设计波高推算

设计波高推算是确定海岸构筑物设防标准的主要工作之一,包括原始波高的产生和统计分析两部分内容。关于原始波高的产生,在有长期观测波高的工程区域,需要收集分析观测波高,推算得出具体工程位置处的波高作为原始波高。若工程区域没有观测波高,或者观测时长不能够满足设计波高推算的要求,则常常采纳经过验证的高质量后报波高作为重要的补充手段。本章以中国南海为研究海域,该海域台风盛行,1975~2014 年平均每年发生台风 10.3 次。考虑到设计波高推算所需的样本波高通常出现在台风期间,本章采用台风浪后报数据作为南海设计波高推算的原始数据。

本章以 12 个站位的实测风速数据为基准,探讨 ERA-Interim 风场(再分析风场)和 Holland 模型风场(参数模型风场)的特点,给出上述两种风场的应用范围。结合 ERA-Interim 风场和 Holland 模型风场的优势,提出混合模型风场(Blended 模型风场)。Blended 模型风速较 ERA-Interim 风速和 Holland 模型风速与实测风速吻合更好,故 Blended 模型更适合于模拟南海海域台风期间的风场。以上述三种风场为驱动,我们模拟了 40 年南海海域台风期间的波浪场。结果显示,以 Blended 模型风场为驱动的 SWAN(Blended-SWAN)模型结果更加精确,能准确地模拟台风影响范围内的波浪场。Blended-SWAN 模型的台风浪峰值精度高于其余两种模型,提高了设计波高推算的可靠性。

原始波高的统计分析是指在理想的原始波高基础上采样,利用概率分布函数匹配样本,进而获得不同重现期波高的推算方法。本章选用阈值法(POT)和年极值法(annual maxima, AM)进行台风浪后报数据取样。分别采用广义帕累托分布(generalized Pareto distribution, GPD)和皮尔逊 III 型(Pearson-III, 简称 P-III)分布来匹配阈值法样本和年极值法样本。结果显示, POT/GPD 方式的推算结果都小于 AM/P-III 方式的推算结果。考虑到 POT 法和 AM 法的区别和联系以及 POT 法对本章原始波高的适用性, POT/GPD 方式作为不同重现期设计波高的推算方式更为合理,尤其是在推算 50 年以上重现期的设计波高时,其优势更加明显。鉴于阈值法的阈值确定过程中存在判断难度,图解合理的阈值时存在较大的人为因素,本章以样本分析为基础,提出新的阈值选取准则,以降低阈值确定的难度。

## 2.1 台风浪数值模拟

本节以 9 场台风期间的 12 个站位实测数据为基准,分析了 ERA-Interim 风场、Holland 模型风场和 Blended 模型风场以及它们驱动的台风浪场对南海海域的适用性。因 1# (121.9233°E, 24.8469°N)和 2# (120.5361°E, 26.3769°N)浮标经历了 2013 年 7 号台风“苏力”(7 月 8 日 8:00~14 日 8:00)的整个过程,选取其为代表进行具体分析。结合 12 个站位的实测数据,给出了 ERA-Interim 风场和 Holland 模型风场的适用范围限定值 R1 和 R2,如图 2.1 所示,它们依据台风中心至浮标点的距离,将整个台风中心轨迹分成了区间 A1、A2、A3、A4 和 A5。图 2.1 中,菱形代表台风中心位置,竖直线代表不同风场的适用边界(外侧两竖直线: ERA-Interim 风场的适用边界,内侧两竖直线: Holland 模型风场的适用边界)。

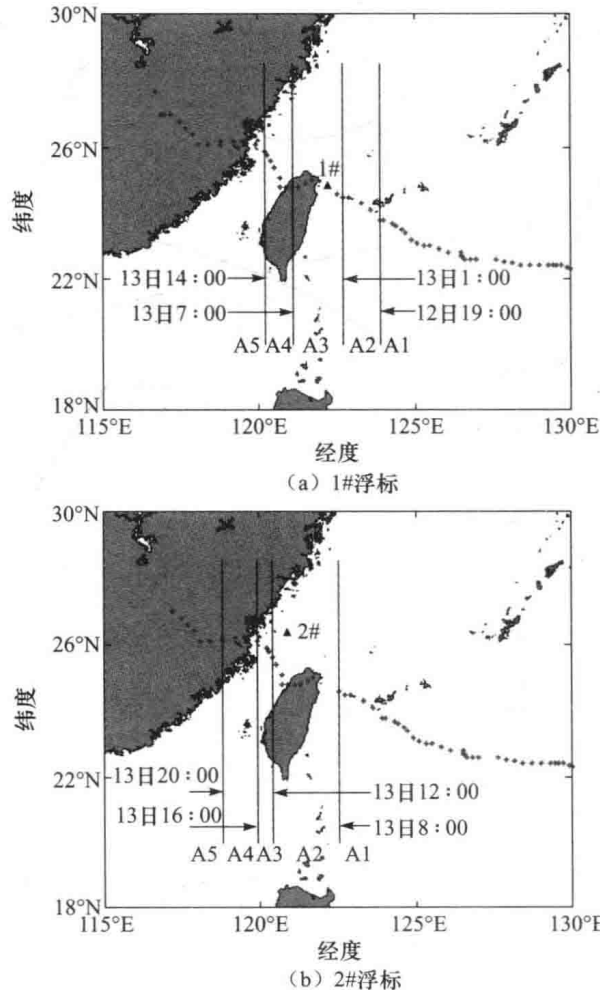


图 2.1 相对于 1# 和 2# 浮标的台风路径图