



海岸河口工程研究论丛

波流耦合下

淤泥质海岸水沙运动三维模拟

解鸣晓 著

THREE DIMENSIONAL NUMERICAL MODELING OF
THE HYDRODYNAMICS AND
SEDIMENT TRANSPORT FOR
MUDDY COASTS COUPLING WITH WAVES AND
TIDAL CURRENTS



人民交通出版社
China Communications Press



海岸河口工程研究论丛

波流耦合下

淤泥质海岸水沙运动三维模拟

解鸣晓 著

THREE DIMENSIONAL NUMERICAL MODELING OF
THE HYDRODYNAMICS AND
SEDIMENT TRANSPORT FOR
MUDDY COASTS COUPLING WITH WAVES AND
TIDAL CURRENTS



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书中采用理论建模结合思路辨证的技术路线,首先开发了考虑多种动力因子的波生近岸流三维计算模式,并采用大量试验数据进行测试。在模型基础上,研究了淤泥质海岸波流耦合下水动力泥沙运动规律。同时,提出淤泥质海岸水沙模拟中“结合过程和表现”的新思路,采用长时间尺度下水沙整体特征结合长期资料作为模型率定与验证基本原则。最后,提出强浪条件下“波浪掀沙、波流共同输沙”的概念。

本书可供海岸河口工程研究人员使用,也可供相关院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

波流耦合下淤泥质海岸水沙运动三维模拟 / 解鸣晓

著. — 北京:人民交通出版社, 2014. 5

ISBN 978-7-114-10594-4

I. ①波… II. ①解… III. ①淤泥质海岸—水沙运动—三维数值模拟 IV. ①TV148—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 314716 号

海岸河口工程研究论丛

书 名: 波流耦合下淤泥质海岸水沙运动三维模拟

著 作 者: 解鸣晓

责任编辑: 韩亚楠 崔 建

出版发行: 人民交通出版社

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: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 720×960 1/16

印 张: 10.5

字 数: 180 千

版 次: 2014 年 5 月 第 1 版

印 次: 2014 年 5 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10594-4

定 价: 45.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

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省的鸭绿江口,南至广西壮族自治区的北仑河口,全长 18000km;我国海岸带有大大小小的入海河流 1500 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、甌江等。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,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机构,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度尼西亚、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,尤其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专注于为大型的复杂的项目提供精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、河北黄骅港的治理研究、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,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

淤泥质海岸是我国海岸形态中的重要形式,业已存在许多重要港口。当前,港口建设处于高速发展时期,码头、航道工程走向外海,并有大型化趋势。然受近岸水深限制,“浅水深用”已成为海港建设中的重要战略。连云港地区位于典型的淤泥质海岸,拟建30万吨级深水航道工程为江苏省头号工程,意义重大。由于港口建设规模较大,近岸水深无法满足要求,港池与进港航道需自-3m至-5m浅滩直接浚深至超过-20m底高程,工程量与投资额均极为庞大。鉴于以上原因,如以连云港地区作为范例开展相关研究工作,不仅可为淤泥质海岸建设大型港口提供有力的科学依据,同时也是浅水深用的样板,其理论意义与工程意义均十分显著。

淤泥质海岸泥沙颗粒较细、富有粘性,并与波浪、潮流运动紧密联系,其水沙问题一直都是海岸工程研究中的重要课题。几十年来,国内外在对淤泥质海岸水沙运动的科研工作中积攒了大量的理论与工程经验。当前,数值模拟已成为研究海岸水沙运动规律的重要工具,但由于原型的复杂性和天然海洋动力中的统计、随机特征,也存在一些待解决的问题,值得进一步探讨。经思考,提出两点主要问题:

(1)波流耦合作用的详尽分析。潮流与波浪均是淤泥质海岸中的主要动力,在水沙运动模拟中,应同时考虑两者的贡献。以往在对淤泥质海岸波流共存的模拟中,多认为潮流是悬移泥沙运动的主要动力,而对波生流的影响缺少评价。然而在实际工程中,大浪条件下泥沙运动极为活跃,而恰在极端条件下,波生流的潜在影响达到最高。因此,全面评价淤泥质海岸波生流运动规律及其对水沙运动的影响程度便显得十分必要。

(2)泥沙运动模拟中的长、短尺度衔接。海洋中的各种动力因子均在不同的时间尺度上体现其特征。例如潮流、波浪运动为短尺度过程,而滩槽演变则为长尺度过程。如采用基于短尺度的模拟思路对长时间尺度现象,例如航道年际回淤进行研究,首先需要大量、冗长的计算时间;其次,短尺度过

程叠加于长尺度过程之上,将形成“尺度噪声”,干扰宏观规律;在现场水文测量的含沙量序列数据中,由于天然泥沙运动的统计特征和测量误差等,也可使得短尺度实测数据存在“资料噪声”。这些噪声可能给长尺度现象模拟埋下隐患,并对模型参数的率定和验证造成困难,是现有模拟思路中的难题。因此,如何寻找一种新的模拟理念,以便规避短尺度事件与资料所引起的噪声,充分发挥现有资料和模型的效用都是值得探讨的问题。

基于以上背景,书中采用理论建模结合思路辨证的技术路线,首先建立了波流耦合下的淤泥质海岸水沙运动三维模式,并在全面测试的基础上,充分评价了波流耦合下淤泥质海岸水流、泥沙的运动特性与规律,分析了波生流的影响规律与程度;此外,以淤泥质海岸水沙模拟的整体思路为对象,把握“尺度”概念,提出了一个同时结合物理本质和宏观规律的模拟理念。以连云港地区为算例,进行深入探讨。

本书主要创新点可归纳如下:

(1)在水动力原始方程中增加了三维波生流作用。引入三维波浪时均剩余动量、波生紊动及破波表面水滚作为波生流的主要驱动力;将 Larson-Kraus 波浪水平紊动公式拓展至三维;推导了考虑底坡、传递率和密度影响的破波水滚能量传输方程。利用实测资料验证了所建模式的适用性,推荐了相关参数取值。

(2)探讨了淤泥质海岸波生流运动规律,及其对潮流、泥沙运动的影响程度。指出淤泥质海岸波生流影响范围较沙质海岸更远,且底部离岸流现象不明显;在大浪条件下,近岸波生流速已与潮流流速达到相近权重,其水沙运动机理可表示为“波浪掀沙、波流共同输沙”。

(3)针对淤泥质海岸水沙运动模拟,提出了结合“过程”和“表现”的新思路。模拟中同时关心物理过程和宏观规律,着重把握时间尺度和长期观测数据。

(4)研究了淤泥质海岸长尺度水沙动力模拟中的代表潮和代表波浪选取原则。指出代表潮的选择应同时保证底床冲淤率及流态相似;代表波浪的选取应关注波高二次方(或波能)相似。

(5)提出了“特征含沙量”的概念。利用淤泥质海岸波浪条件与含沙量的良好对应关系,将长期水沙运动宏观规律联系起来;按时间尺度将特征含沙量分为长期特征含沙量与不同波浪等级下的特征含沙量两种。讨论了特



征含沙量的取值方式。

(6)建立了淤泥质海岸水沙模拟中有效性检验的新原则。采用长期特征含沙量配合年平均含沙量对模型进行率定,并利用分级波浪条件下的特征含沙量对模型进行验证。

Contents 目录

1	绪论	1
1.1	选题背景与研究意义	1
1.2	海岸水动力模拟技术综述	2
1.3	波流耦合作用研究进展	5
1.4	粘性泥沙运动模拟进展	8
1.5	海岸水沙模拟思路总结	12
1.6	存在的问题	15
1.7	研究工作	19
2	波流耦合下水沙运动三维模式建立	21
2.1	潮流计算模式	21
2.2	波生流计算模式建立	26
2.3	波流耦合下方程形式及求解技术	35
2.4	波浪计算模式介绍	37
2.5	粘性泥沙运动计算模式介绍	38
2.6	小结	41
3	波流耦合的水动力模式验证及敏感性分析	43
3.1	底部离岸流现象	44
3.2	沿岸流现象	50
3.3	裂流现象	53
3.4	堤后环流现象	54
3.5	模式分析与参数讨论	56
3.6	小结	63
4	连云港地区水沙条件概况	65
4.1	地理位置	65

4.2	水动力特征	67
4.3	岸滩与泥沙特性	69
4.4	小结	74
5	淤泥质海岸波流耦合下流场特性	75
5.1	波浪场模拟及验证	75
5.2	潮流运动模拟及验证	79
5.3	波生流分布及影响规律	82
5.4	波生流场合理性分析	92
5.5	波流耦合下流场分布特征	96
5.6	小结	99
6	淤泥质海岸水沙运动模拟思路及应用	101
6.1	结合过程与表现的模拟思路	101
6.2	代表水动力的选择	103
6.3	特征含沙量概念的提出	111
6.4	年平均含沙量的应用	113
6.5	率定与验证思路	115
6.6	模型率定情况	116
6.7	模型验证情况	122
6.8	小结	126
7	淤泥质海岸波流耦合下泥沙运动规律	129
7.1	波生流对泥沙运动的影响规律	129
7.2	不同波向下泥沙运动特征	132
7.3	小结	135
8	结语	137
8.1	主要结论	137
8.2	工作展望	139
	参考文献	140

1 绪 论

1.1 选题背景与研究意义

淤泥质海岸是我国大陆海岸的重要组成部分,长 4000 多千米,约占岸线总长度的 22%,主要分布在辽东湾、渤海湾、莱州湾及黄海的苏北平原海岸等地。在淤泥质海岸上,业已存在许多重要港口,如天津新港、连云港港等。当前,随着“浅水深用”成为我国海港建设的重要战略,淤泥质海岸大型港口建设纷纷上马,同时许多已建于淤泥质海岸的老港口也相应扩建,形成的工程量与投资额均极为庞大。淤泥质海岸泥沙颗粒富有粘性、运动活跃,带来众多工程泥沙问题,其中最为常见的就是进港航道的回淤问题等。然而,无论是何种工程问题,都是在海洋动力与环境的大背景下,要研究这些问题,首先需要对淤泥质海岸的水沙运动特征进行全面把握。

在探索海洋的过程中,以数理方程为基础的数学模型在工程应用中发挥了重要作用。当前国内外基本所有的海岸工程建设中,都可以见到数学模型的影子。为了更好地模拟实际现象,几十年来国内外学者进行了持续研究,将模型的通用性和理论水平不断推上新台阶。尽可能完善模型理论、把握自然规律,使得数学模型更加真实有效地反映自然规律无疑是一个重要方向。

尽管如此,实际海洋是一个极度复杂、存在统计性和随机性的环境,波浪、潮流和泥沙运动时刻耦合,并具有各自的运动尺度。数学模型的基本理论来自我们对自然界的认识,从而认识的深度直接影响到模拟的效果。但是,人类对自然的认识总是分阶段的,无论何种理论均与实际条件存在或多或少的差异,特别是在对海岸粘性泥沙运动这一课题的研究中,理论本身就存在高度的不成熟性,至今仍处在一个以“定性”为主的探索阶段。尽管当前围绕这一课题存在大量理论,但是却难以统一。然而,在实际海岸工程中,往往又需要这些理论作为研究的背景,模拟结论也需要作为工程可行性的依据。因此,尽管数值模拟本身是一种理论或技术,但如何去应用数学模型,或者说如何在应用中更好地发挥现有数学模型的作用,更佳地

为实际工程提供指导是一种哲学。基于这一考虑,本书将模型理论开发和模型应用理念结合起来,并进行相应探讨。

1.2 海岸水动力模拟技术综述

潮流与波浪是海洋环境中的两个最基本和最重要的水动力因素。在海岸地区建设工程,均需评价潮流与波浪对工程建筑物的潜在影响。此外,水动力特征也是研究其他相关课题,例如泥沙运动、物质扩散等的基础。研究潮流与波浪的运动规律是海岸动力学中的两大主要分支。随着计算流体力学理论不断完善,对这两种基本动力的模拟也得到了迅速发展。以下将对主要研究结论进行综述。

1.2.1 潮流模拟综述

随着计算机性能的提升和理论的进步,潮流模拟经历了自一维至二维,再到当前三维模拟的发展阶段。应该讲,基于 Newton 第二定律的 Navier-Stokes 方程作为潮流模拟中控制方程的基本形式已得到国际范围内的承认。然而,由于原始形式的 Navier-Stokes 方程较为冗长,直接求解难度大,特别在考虑斜压效应时更加复杂。因此,国内外学者利用实际海岸地区的特征进行假设,提出一系列的近似和假定,初步解决了其中的一些难点,例如常见的垂向静压假设和斜压计算中的 Boussinesq 近似等。

海洋流动多处在紊流区间,从而对紊流的描述也是潮流模拟中的一个重要组成部分。经紊流时均的 Navier-Stokes 方程改写为 Reynolds 形式,在求解上不闭合,而需要引入紊流本身的运动方程。由于紊流发生在极小的时空尺度上,模拟中难以保证如此细致的网格分辨率,故在构建紊流模型时,我们更为关心时均效应,并将模型网格无法分辨的亚网格(sub-grid)过程以紊动粘性系数或扩散系数的方式进行参数化。根据海岸地区水平和垂向的尺度差异,通常在两个维度上采取不同的紊流模式。目前应用最为广泛的水平紊动模型是 Smagorinsky^[1] 基于大涡模拟(LES)提出的形式,认为紊动强度和网格尺度、流速梯度均有关。至于垂向紊动模型则存在采取经验拟合紊动系数和基于紊流闭合方程两种方式;其中前者主要有线性分布^[2]、指数分布^[3]、二次分布^[4]、对数分布^[5]、混合型分布^[6]以及幂级数配合最小二乘法^[7]等不同形式;后者主要存在零方程、一方程和二方程几种形式^[8]。在很长一段时期内,以 Rodi^[9]发展的基于紊动能量和传输长度的二阶 $k-\epsilon$ 闭合模型应用最为广泛。然而,Mellor 和 Yamada^[10]综述和评价了几种常见的紊流闭合模型,建议在海洋流动的模拟中采用 2.5 阶紊流闭合模型,从而成为近年来潮流模拟中的另一个主要模式。

当动量方程和紊流模式确定后,在具体的数值求解技术上,基于不同考虑,潮流数学模型的计算格式、网格配置等均呈百花齐放、丰富多彩的状态。在求解技术上,总体可分为有限差分法^[11]、有限单元法^[12]、有限体积法^[13]等,其中 Chen, C. J 亦曾提出有限分析法;在平面网格划分上可存在矩形网格、正交曲线网格,一般曲线网格和无结构网格;垂向网格划分上存在 z 坐标^[14-16]、 ρ 坐标^[17,18]、 σ 坐标^[19]、双 σ 坐标^[20,21] 和半谱模型^[22] 等几种形式。在网格变量配置中,可分为 A 网格、B 网格和 C 网格等几种基本形式,根据 Arakawa 和 Lamb^[23] 的讨论,在海洋运动控制方程的求解中 C 网格效果最佳。在动量方程求解时,又可包括模式分裂技术^[24,25]、半隐求解技术^[26,27]、分裂算子技术^[28] 等。

频繁露滩处的动边界处理也是潮流模拟中的热点问题,目前对动边界的处理包括干湿网格判断法^[29]、冻结法^[30]、切滩法^[31]、窄缝法^[32]、线边界法^[33] 和开挖法^[34] 等,此外,史峰岩^[35]、Xie 等人^[36] 和 Oey^[37] 等也分别根据不同考虑对动边界的处理进行了研究。

根据以上综述的不同方程假设、紊流模型、求解模式和网格配置,在对潮流运动的三维模拟中,当前已存在大量较为成熟、通用的数值模式和软件包,其中较为著名的包括 Princeton 大学开发的 POM 模式^[38]、Blumberg^[39] 开发并经朱建荣^[40] 改进的 ECOM - Si 模式,Chen 等人^[41] 开发的 FVCOM 模式,Shchepetkin 和 McWilliams^[42] 开发的 ROMS 模式等,不一而足。商业软件则主要包括荷兰 Delft 水力学开发的 DELFT3D、丹麦水力学所 DHI 研发的 MIKE3 以及美国的 SMS - RMA10 等。

在几十年的理论和实际工程考验中,各家模式均发挥了可喜的效果,并广泛应用于海岸工程的流场研究中。应该说,在潮流问题上,各家模式和软件的模拟结果无量级上的差异。综上所述,由于基本方程的形式和各种方程求解理论已接近成熟,潮流运动模拟发展的方向当前多数集中在紊流模拟、边界层问题、动边界问题和计算网格配置方案等细部问题中,以使得计算流场精度得到进一步提高。

1.2.2 波浪模拟综述

经归纳,当前对波浪现象的模拟主要存在三种主流模式,分别为缓坡方程模式、能量守恒和能量谱模式以及 Boussinesq 方程模式。

(1) 缓坡方程模式。在假设缓变水深的基础上 ($\nabla h/kh \ll 1$; 其中 h, k 分别代表水深和波数), Berkhoff^[43] 推导了缓坡方程的椭圆形式 (Eplitic MS), 然而该形式直接求解时需在波长范围内至少布置 8 个计算节点, 难以适用于求解域范围较大的算例; 此外, Berkhoff 形式中也未考虑底摩阻、波浪破碎和波流相互作用等物理现象。因此, 许多学者进一步引入了其他假定, 以改进缓坡方程的形式。改进工作主

要包括两个方向,第一是方程形式简化:Kirby 和 Dalrymple^[44]采用抛物近似的方式简化了缓坡方程,被称为抛物缓坡方程(Parabolic MS);Copeland^[45]提出双曲近似的缓坡方程形式(Hyperbolic MS);Ebersole^[46]也提出了改良后的缓坡方程形式等不同形式。第二是方程推广:Booji^[47]在缓坡方程中考虑了底摩阻的影响;Kirby^[48]利用小波展开理论将缓坡方程推广至适应陡变地形的条件。此外,国内学者冯卫兵^[49]、吴中^[50]也利用各种理论对缓坡方程进行了推广,使得缓坡方程可以应用于反射、绕射等波浪现象的模拟中。

(2)能量守恒和能量谱模式。实际海洋中波浪多以不规则波形态传播,此外对于海岸工程,往往不需要关注波浪的传播具体过程和质点运动轨迹,而多只关心波浪的高度、周期和方向等主要参数。基于以上考虑,在模拟中以基于波浪频谱的能量守恒原则,发展了一系列的模型。在近岸地区,能谱模型可以将表面风能输入^[51,52]、白浪耗散^[53]、波浪破碎^[54]、波浪间相互作用^[55]等现象以源汇项的形式综合考虑。在国外波浪模式中,对波浪频谱的描述多采用 JONSWAP 谱和 P-M 谱,而在国内也有学者考虑了文圣常谱。

(3) Boussinesq 方程模式。Boussinesq 于 1872 年直接基于 Navier-Stokes 原始方程形式,给出了一维 Boussinesq 方程形式。理论中以水动力平衡理论考虑垂向加速度,描述了波浪运动中质点的运动轨迹。Peregrine^[56]将 Boussinesq 方程进一步发展至二维形式。经典的 Boussinesq 方程具有弱色散关系,在求解时最大水深和深水波长之比 $d/L_0 \leq 0.22$,因此仅适用于浅水地区。针对近岸波浪,波长较小且周期仅在秒的量级,从而网格布置必须在单个波长达到 8 个节点以上。为了尽可能降低苛刻的计算条件,多年来许多学者尝试利用各种理论对 Boussinesq 方程进行简化或改进,提出了各种方程形式和求解方案。其中具有代表性的包括 Abbott 等人^[57], McCowan^[58], Madsen 等人^[59], Madsen 和 Sorensen^[60], Nwogu^[61], Gobbi 和 Kirby^[62]与朱良生^[63]等。

在当前的波浪模拟技术条件下,很难寻找到一种可以既保证大范围精度,又能保证局部波浪变形精度的数学模式,而均是在不同简化条件下才能实现。无论是基于何种理论和考虑,各种波浪模式均不能达到完全的通用性,因此均有限制条件和应用范围,需要在计算中根据具体研究对象选择模型。在实际工程应用中,多首先采用缓坡方程模式或能谱模式计算大范围波浪场参数并提供相应的局部边界条件,而在存在建筑物的港内细部波浪模拟时采用以上边界换用 Boussinesq 模式进行求解,这样既可以节省计算时间,又可以在一定程度上保证精度。

基于不同的波浪理论,当前也存在许多应用较为广泛的软件包和计算模式,例如缓坡方程模式中有 DHI 开发的 MIKE-EMS、MIKE-PMS;能谱模式有 Delft 水力



学所开发的 SWAN 和 DHI 开发的 MIKE - NSW、MIKE - SW; Boussinesq 模式中的 MIKE - BW; 此外 Kirby 和 Dalrymple^[64] 在缓坡方程基础上结合非线性绕射方程, 开发了 REF/DIF 模式等。

1.3 波流耦合作用研究进展

在初级阶段的海岸动力研究中, 多数将潮流和波浪在模拟中分离讨论。然而, 实际海洋中的波浪和潮流是一个同时存在, 并完全耦合的整体, 其中波浪的存在影响了潮流的运动规律, 而潮流的存在又会反馈于波浪的生成和传播。因此, 在海岸工程中, 特别是波浪和潮流同等重要的浅水地区, 简单地分离波流便显得粗糙。

从流体力学角度来说, 潮波本身亦可视为波长极大、周期极长的另一种波动形态。因此采用直接求解完备形式的 Navier - Stokes 方程可从理论上根本解决这一耦合问题。然而在数值模拟中, 潮流和波浪无论在时间上, 还是空间上尺度都相差甚远, 受制于当前的计算条件, 在海岸工程水动力模拟中无法保证如此分辨率的网格所带来的计算耗时。因此, 当前的模拟手段中, 多数采用“半耦合”的思路, 并提出“波流相互作用”的概念。随着人们重视程度的提升, 这一课题已成为近年来国内外研究的一个热点。

1.3.1 波浪对潮流运动的影响

潮流的运动尺度与波浪相比非常大, 因此在实际模拟中, 可以潮流运动方程作为载体, 而将波浪的影响以波周期平均的动量形式嵌入水动力控制方程中加以表征。根据当前研究结果, 波浪对水体的运动的影响以三种形式为主:

(1) 波生时均剩余动量。Longuet - Higgins^[65] 指出波浪周期平均动水压与静水压的差值将带来时均动量的梯度。从而引起剩余动量的净传输, 并定义为这种波生动量为波浪辐射应力 (radiation stress), 并推导了水深平均意义下的辐射应力表达式, 在理论上解释了近岸增减水 (set up/down)、沿岸流 (longshore current) 和裂流 (rip current) 等平面波生流现象。从本质上来讲, 辐射应力的物理含义是波生时均剩余动量, 但应指出, 经典的辐射应力是沿水深积分后得到的, 因此只能应用于二维模式中。在三维模式中, 在对这一理论认识不深刻的时期, 只能简单假设波生时均剩余动量在垂向分布均匀, 然而, 由于波浪质点运动轨迹在垂向并不相等, 一般来说表面质点振幅较大而底部较小, 因此时均剩余动量在垂向上应有其特殊的分布规律, 并且这种垂向不均匀分布对近岸波生流, 尤其是底部离岸流 (undertow) 的形成也有较大影响。因此, 研究波生时均剩余动量的垂向分布成为当前海洋科

学中的前沿课题。

采用不同推导方式和不同的认识角度,近年来国内外许多学者分别提出理论计算时均剩余动量的垂向分布。归纳起来,主要包括 Groeneweg 和 Klopman^[66] 与 Arduin 等人^[67] 的广义 Lagrangian 平均 (GLM) 法, Mellor^[68,69] 的垂向映射法, McWilliams 等人^[70] 的涡街作用力法, Xia 等人^[71] 与 Newberger 和 Allen^[72] 的 Eulerian 平均法, Zhang^[73] 的垂向动量方程简化法等。此外,针对近岸浅水波浪条件, Zheng^[74] 在二阶 Stokes 波理论下进一步推导了波生剩余动量分布及其随时空的发展过程, Svendsen 等人^[75] 利用椭圆余弦波理论结合追踪波面法, Wang 等人^[76] 应用高阶波理论亦分别推导了相应的表达式。然而,对时均剩余动量的研究目前仍停留在理论分析阶段,从而呈现百花齐放的状态,虽然几种垂向表达式的沿深度积分均与 Longuet - Higgins 辐射应力形式相同,但其垂向分布形态并不一致,甚至在某些水深区域数值截然相反^[77]。

鉴于三维时均剩余动量的研究进展,许多学者亦尝试将其引入潮流运动方程中。在基于 Lagrangian 法的公式中,波浪动量项往往以隐式形式表达,从而较难耦合。因此,基于 Euler 法的理论得到更为广泛的应用。Xie 等人^[78] 将 Xia^[71] 公式引入 POM 模式;吴相忠^[77] 和谢媛媛^[79] 分别将 Zhang^[73] 公式引入 ELCIRC 和 COHERENS 模式;Warner 等人^[80] 也将 Mellor^[69] 公式应用于 ROMS 模式中。但是,在以上模式中,均未有效结合实测数据对波生流模式进行全面的论证,是实践的空白。

(2) 破波引起的表面水滚。根据 Longuet - Higgins 的时均剩余动量理论,破波点附近应是增减水 (set - up, set - down) 和波生流分布曲线的转点位置。然而,大量观测数据显示,这一转折点,包括最大减水点和沿岸流的峰值位置并非出现在破波点,而是出现在破波带以内一定距离。这就使得经典的时均剩余动量概念在描述这一现象时存在限制。为了解决这一问题, Svendsen^[81,82] 指出在破波点以内,波浪形态产生变化,特别是波面弯曲出现崩破波 (spiller) 和卷破波 (plunger) 等现象,这种表面的卷曲使得动量在表面产生传递,从而是一个必要的动力现象。

因此, Svendsen^[81] 由此提出表面水滚的概念 (surface roller), 并认为破波带内出现的水滚会对表层水体产生作用,从而使得增水点和沿岸流峰值位置均向岸线方向推移。为了描述这一现象, Duncan^[83], Okayasu 等人^[84] 和 Englund^[85] 分别采用经验关系对表面水滚进行评价; Dally 和 Brown^[86] 首次利用能量守恒关系建立了一个描述水滚发展的传输方程; Tajima 和 Madsen^[87] 与 Goda^[88] 分别修正了 Dally - Brown 方程,修正了耗散项,并考虑了不均匀底坡对能量损耗的贡献。