

国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA112509)

LIANYUNGANG YUNIZHI HAI'AN
SHENSHUI HANGDAO JIANSHE
LILUN YU SHIJIAN

主 编 沈雪松
副 主 编 高正荣 章卫胜
主编单位 连云港港30万吨级航道建设指挥部

连云港淤泥质海岸深水航道建设 理论与实践

(关键技术篇)



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

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目

连云港淤泥质海岸深水航道 建设理论与实践

Lianyungang Yunizhi Hai' an Shenshui Hangdao
Jianshe Lilun yu Shijian

(关键技术篇)

主 编 沈雪松

副 主 编 高正荣 章卫胜

主编单位 连云港港 30 万吨级航道建设指挥部



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

内 容 提 要

本书为《连云港淤泥质海岸深水航道建设理论与实践》的“关键技术篇”,由46篇优秀论文和3篇技术报告成果总结组成。内容涵盖了淤泥质海岸深水航道建设中的水动力特性、泥沙运动机理、现场监测与模拟技术、航道方案设计、环境影响以及筑堤新技术等方面的理论方法和实践经验。

本书可供从事深水航道建设的科研、设计及管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

连云港淤泥质海岸深水航道建设理论与实践. 关键技术篇 / 沈雪松主编. —北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.6

ISBN 978-7-114-13109-7

I. ①连… II. ①沈… III. ①淤泥质海岸—深水航道—设计—连云港市②淤泥质海岸—深水航道—工程技术—连云港市 IV. ①U612.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 129646 号

书 名:连云港淤泥质海岸深水航道建设理论与实践(关键技术篇)

著 作 者:沈雪松

责任编辑:丁 遥 李 娜 夏 迎

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:北京盛通印刷股份有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:32.75

字 数:797千

版 次:2016年6月 第1版

印 次:2016年6月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-13109-7

定 价:90.00元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

《连云港淤泥质海岸深水航道建设 理论与实践(关键技术篇)》

编写委员会

顾 问:张建云 丁军华 吴以桥 刘家驹 金 鏐

虞志英 顾 勇 罗肇森 马麟卿 马启南

主 任:沈雪松

副 主 任:高正荣 关云飞

委 员:(以姓氏笔画为序)

丁大志 马兴华 王志国 王金华

朱志夏 杨 华 杨程生 何 宁

张 玮 张金善 庞启秀 高祥宇

前 言

连云港是“一带一路”交汇点建设核心区和战略先导区、新亚欧大陆桥经济走廊东方起点,长江经济带发展、江苏沿海地区发展、国家东中西区域合作示范区等众多国家战略明确将连云港定位为综合交通枢纽,也是我国沿海主枢纽港之一。在沿海大开发和经济全球化背景下,连云港港正面临着新的发展机遇与挑战。连云港港是在我国典型淤泥质海岸上建设的“浅水深用”代表性港口。连云港港 30 万吨级航道建设工程位于开敞海域、淤泥质浅滩,大风天波浪影响强,海岸沉积环境复杂,滩浅坡缓,航道开挖里程长,航道挖深厚度大,土质和地基差,工程之复杂、技术难度之大是开敞海域淤泥质浅滩深水航道建设中少有的。

为了使科学技术能够更好地服务和指导工程建设与实践,连云港港 30 万吨级航道建设指挥部组织申报了国家高技术研究发展计划(863 计划)“开敞海域淤泥质浅滩深水航道建设关键技术研究”课题,并于 2012 年 4 月得到了科技部批复(2012AA112509)。课题开展了复杂条件下开敞海域淤泥质浅滩泥沙运动规律及航道回淤预报、浅滩深挖槽航道总体设计、疏浚土筑堤、复杂土质下航道疏浚等关键技术研究。经过多年的探索和实践,课题完成之际,也取得了丰硕的研究成果,其中包括省部级一等奖 2 项、三等奖 1 项;发明专利授权 7 项,实用新型专利授权 1 项,软件著作权 7 项;发表学术论文 55 篇;出版专著 2 部;完成研究报告 18 本;并培养了多名博士、硕士。淤泥质海岸、淤泥质与粉沙质过渡海岸浅滩深挖槽水沙特征及淤积预报关键研究成果对国内外类似港口航道建设具有重要的指导作用。随着“一带一路”国家战略给水运交通带来的机遇与挑战,在淤泥质海岸、淤泥质与粉沙质过渡海岸实现“浅水深用”的需求更加迫切,研究成果也将具有广阔的推广应用前景。

连云港港 30 万吨级航道建设指挥部组织参建各单位根据工程推进情况,将丰富的理论探索、前期研究和设计施工管理经验分别凝练成论文,按淤泥质海岸建港的理论与前期研究、深水航道的设计与施工以及关键研究成果三大板块,分别汇总成册,以奉献给读者。本篇为第三篇,即“关键技术篇”,主要根据 30 万吨级航道建设中的关键技术总结凝练而成。本书共收集报告总结、技术论文 49 篇,资料丰富翔实,内容全面,具有较高的学术水平和实用价值。

本书在编著过程中得到了交通运输部、江苏省交通运输厅以及长期参与连云港港口建设的广大科技工作者和工程建设者的大力支持,南京水利科学研究院为本书的编辑出版做了大量工作,各位顾问和编委对本书的编写提出了宝贵意见。同时,本书还得到了国家高技术研究发展计划(863 计划)的资助,在此一并表示衷心感谢!

2016 年 4 月

目 录

第一部分 泥沙运动规律与模拟方法

复杂条件下开敞海域淤泥质浅滩泥沙运动规律及淤积预报技术研究

..... 沈雪松 高正荣 杨 华 朱志夏 张 玮 马兴华 高祥宇
庞启秀 熊 伟 卢中一 张 娜 齐庆辉 章卫胜(3)

(一)水动力特性

开敞海域浅滩深挖航槽中越槽水流分布的试验研究 高正荣 卢中一(61)
连云港环抱式防波堤口门航道横流计算研究 张 玮 张 婧 李 泽 钱 伟(72)
环抱式防波堤口门航道横流三维特性研究 张 玮 李 泽 刘 燃 钱 伟(79)
淤泥质海岸波生沿岸流特性研究 张 玮 许才广 钱 伟(90)
连云港徐圩海域潮流特征 庞启秀(99)

(二)泥沙运动机理

韦帕台风对连云港典型水域波能损耗及悬沙含沙量影响研究 杨 汜 张 玮(105)
大风浪期间淤泥质海岸实测含沙量影响因素研究 庞启秀 辛海霞(115)
淤泥质浅滩泥沙临界起动切应力剖面确定

..... 庞启秀 白玉川 杨 华 张瑞波 贾志博(125)

破碎波作用下淤泥含沙量分布试验研究 高祥宇 高正荣 窦希萍(133)

Study on sediment concentration distribution under breaking waves of muddy coast

..... Gao Xiangyu Dou Xiping Gao Zhengrong Ding Lei(139)

淤泥质海岸破波作用下水体挟沙能力研究 高正荣 杨程生 章卫胜(147)

连云港及邻近海域悬沙和表层沉积物交换研究 ... 刘 红 顾 勇 马兴华 金 鏐(153)

(三)现场监测与模拟技术

风浪期间及风后泥沙现场观测技术研究 庞启秀 辛海霞(162)

In-situ fluid mud motion investigation in channel after storm Pang Qixiu Zhang Ruiibo(170)

湍黏系数对浅滩海域三维风暴潮的影响 熊 伟 朱志夏 董 佳 齐庆辉(177)

基于 WRF 与 MIKE-SW 模式的连云港海域台风浪数值模拟

..... 齐庆辉 刘丽丽 朱志夏 张海文 陈允才 庞 亮(186)

“达维”台风作用下连云港海域台风浪数值模拟

..... 齐庆辉 朱志夏 王志国 熊 伟 陈允才 庞 亮(193)

浮泥沿航道流动的数值模拟 杨小宸 张庆河 赵洪波 张 娜(201)
 Application of discontinuous Galerkin method for two-dimensional suspended sediment transport
 Zhao Zhangyi(210)
 Numerical investigation of fluid mud motion using a three-dimensional hydrodynamic and two-dimen-
 sional fluid mud coupling model Yang Xiaochen Zhang Qinghe Hao Linnan(215)
 An integrated model for three-dimensional cohesive sediment transport in storm event and
 its application on Lianyungang Harbor, China
 Yang Xiaochen Zhang Qinghe Zhang Jinfeng Tan Feng
 Wu Yuru Zhang Na Yang Hua Pang Qixiu(232)
 Simulation of sedimentation in the channel of Lianyungang Harbor by using 3D sediment transport
 model of FVCOM Yan Bing Yang Hua Zhang Qinghe Wu Yuru(261)
 环抱式港区建设期泥沙回淤数值模拟研究 张 玮 钱 伟 李 泽 张 婧(270)
 淤泥质海岸新开挖航道潮流泥沙模拟研究 章卫胜 张金善 高正荣 王金华(277)
 连云港徐圩港区潮流泥沙物理模型试验研究 高正荣 黄晋鹏(284)
 Numerical simulation and deposition prediction for new developed deep waterway in silting shoals
 Gao Zhengrong Zhang Weisheng Jia Ningyi Zhang Jinshan(297)
 连云港海域大风天三维潮流、泥沙数值模拟——以“韦帕”台风为例
 谢 军 丁 琦 曹慧江 王大伟 贾雨少(305)

第二部分 航道设计理论与应用

(一) 航道总体设计研究

水沙研究在连云港深水航道工程设计中的应用
 马兴华 顾 勇 沈雪松 张 华 金雪英
 应 铭 刘 红 丁 琦 冯建军(317)
 淤泥质和粉沙质海岸分类标准深化研究 刘 红 马兴华 张 华 刘春嵘(338)
 基于最大横流累积频率的航道宽度设计方法 张 玮 李 泽(346)
 基于大型船舶实船观测的开敞海域浅滩深挖槽航道通航宽度研究
 郭冬冬 金雪英 曹恩广 程 鑫 车 军 马兴华(352)
 开敞海域淤泥质浅滩深挖槽航道边坡研究
 张建锋 王玉东 侯海伟 丁 琦 郭冬冬 马兴华(359)
 开敞海域淤泥质深水航道设计年回淤量计算方法研究与应用
 马兴华 应 铭 张 华 丁 琦(369)

(二) 工程方案与环境影响

大型海岸工程对水流和泥沙运动的影响研究
 张 玮 刘 燃 钱 伟 李 泽 张 婧(378)
 连云港港区环抱式防波堤对航道回淤的影响 张 玮 肖天葆 庞 亮(387)
 淤泥质海岸环抱式港池口门布置方案研究
 丁军华 张金善 高正荣 章卫胜 俞竹青(396)
 新型桶式基础防波堤局部冲刷及防护试验研究 卢中一 高正荣(405)

连云港工程建设对周边海域地形影响分析
..... 刘 红 虞志英 张 华 卢立江 马兴华(416)

连云港港水质现状评价及主要污染物分析 王金华 章卫胜 高正荣 张金善(423)

连云港港旗台作业区及防波堤工程前后水体交换能力研究
..... 王金华 章卫胜 张金善 高正荣(430)

环抱式港池水体交换效果影响因素研究
..... 韩卫东 张 玮 陈 祯 刘博雅 曹 昊(439)

环抱式港池水体交换与改善措施研究 ... 张 玮 王国超 刘 燃 陈 祯 唐 磊(450)

第三部分 疏浚土筑堤新技术

疏浚土筑堤技术与应用实践 沈雪松 章为民 何 宁 高长胜 杨守华
周彦章 黄康理 朱群峰 关云飞(459)

大型疏浚土充填袋变形和受力分析
..... 何 宁 沈雪松 周彦章 朱群峰 黄康理 何 斌(480)

大型疏浚土充填袋筑堤技术研究
..... 何 宁 沈雪松 周彦章 杨守华 朱群峰 黄康理 高长胜(487)

分布式传感光纤测量疏浚土大型充填袋变形
..... 何 斌 汪璋淳 何 宁 钱亚俊 周彦章(495)

利用 GPR 探测充填袋结构的试验与研究 周荣官 朱群峰 黄康理 何 宁(502)

充填土袋堤变形与稳定离心模型试验研究
..... 王年香 顾行文 任国峰 高长胜 朱群峰(508)

复杂条件下开敞海域淤泥质浅滩泥沙运动规律及其预报技术研究

黄耀明¹ 周立强² 孙 宁³ 李国英⁴ 曹 伟⁵ 冯 强⁶ 潘中平⁷
王 强⁸ 陈 亮⁹ 李 强¹⁰ 李 强¹¹ 李 强¹² 李 强¹³

1. 浙江省水利厅 10 万吨级设计水深公港工程处 嘉兴 312016

2. 浙江省水利科学研究所 嘉兴 310023

3. 浙江省水利科学研究所 嘉兴 310023

4. 浙江省水利科学研究所 嘉兴 310023

5. 浙江省水利科学研究所 嘉兴 310023

第一部分

泥沙运动规律与模拟方法

复杂条件下开敞海域淤泥质浅滩泥沙运动规律及淤积预报技术研究

沈雪松¹ 高正荣² 杨 华³ 朱志夏⁴ 张 玮⁵ 马兴华⁶ 高祥宇²
庞启秀³ 熊 伟⁴ 卢中一² 张 娜³ 齐庆辉⁴ 章卫胜²

- (1. 连云港港 30 万吨级航道建设指挥部 连云港 222046;
2. 南京水利科学研究院 南京 210029;
3. 交通运输部天津水运工程科学研究所 天津 300456;
4. 江苏省交通规划设计院股份有限公司 南京 210014;
5. 河海大学港口海岸与近海工程学院 南京 210098;
6. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司 上海 200124)

摘 要:针对开敞海域淤泥质浅滩深水航道工程面临的波浪作用强、海岸沉积环境复杂等特性,开展了适应于开敞海域淤泥质浅滩泥沙运动规律及淤积预报技术研究。通过恒定流条件下越槽水流试验和波浪传播试验,进行了浅滩深挖航槽的水流结构分布和波浪跨槽传播特性研究;利用波浪水槽试验,根据波浪破碎条件下的动力特性和淤泥质底床的含沙量分布特征的试验结果,探讨了波高、周期、波陡等波浪要素对波浪破碎动力的影响和底床不同重度的淤泥在破波作用下的含沙量垂线和沿程分布特征;根据连云港港连云航道和徐圩航道不同建设阶段的水深测量和浮泥现场观测资料的分析结果,结合工程实际,对航道内泥沙回淤规律、浮泥形成与运动过程等关键问题进行了深入的试验研究,并进行了港口淤积原因、回淤数量、回淤强度分布和回淤层密实过程等基本规律的研究;应用物理模型和综合考虑台风、波浪、波生流、波流共同作用、黏性细颗粒泥沙特性的三维风—浪—流—泥沙数学模型进行了连云港海域浅滩深挖槽港池和航道的水动力和泥沙淤积过程模拟研究。上述研究成果为复杂条件下开敞海域淤泥质浅滩泥沙运动规律及淤积预报技术的研究,进一步提升了理论、试验和数值模拟的水平。

关键词:跨槽水流 波生流 浮泥运动 有效挟沙力 集成数学模型

1 引言

1.1 项目背景

我国拥有近 300 万 km² 的海域与 32 000 km 长的海岸线。海岸线分为大陆岸线与海岛岸线,其中大陆岸线为 18 000 km。北方起始于鸭绿江口,南方终点为北仑河口。大陆海岸按其组成物质特征可分为基岩海岸、沙质海岸、淤泥质海岸和生物海岸等类,我国的淤泥质海岸是大陆海岸的重要组成部分,长约 4 000 多公里,约占我国大陆海岸的 22%。淤泥质海岸主要是由极细的泥沙颗粒组成,粒径小于 0.05 mm。此类型海岸的岸线较平直,海滩宽广、岸坡极缓,坡率一般为 1/500 ~ 1/2 000,位于高潮位与低潮位之间的潮间带滩地宽广;通常,潮流除伴随风浪掀动泥沙外,还起输送泥沙的作用。在海底有混浊层,这种混浊层在渤海湾厚度可达 1 m

左右,在海州湾顶厚度达 0.5m 左右,因此在涨潮时底部泥沙都向岸推动一段距离,从而使海滩不断向外淤涨。泥质河口、海岸广泛分布于世界各地,在我国主要分布在滨海平原地区,如渤海湾西岸、莱州湾岸、辽东湾沿岸以及江苏、浙江、广东、福建等省的海岸。沿海平原地区是我国改革开放最早、经济发展最快的区域。其快速发展在很大程度上得益于这些地区临海,具有优越的交通运输条件。在淤泥质海岸上修建港口和开辟航道,泥沙问题不可避免。

淤泥质海岸的泥沙运动以悬移质为主,潮流和波浪是驱使泥沙运动的主要动力,泥沙运动呈现出“波浪掀沙、潮流输沙”的规律,通常天气条件下含沙量较低,但大风浪期间含沙量较高,对于港口航道的建设和维护影响较大。在开敞海域波浪自深海向岸传播过程中发生衰减。破波带外波浪衰减的主要原因是摩擦,破波带内则主要是破碎过程中的能量耗散。当水下滩坡坡率为 $1/1\ 000 \sim 1/1\ 500$ 时,破波带的宽度一般较宽。已有研究表明,在连云港海区波高小于 2m 的中小浪破波带的宽度在距岸 5km 范围内移动,波高大于 3m 的大浪,宽度则在 10km 左右。在淤泥质海岸建港口时,深水航道和深水泊位都要面对大范围浅滩。而在浅滩内波浪破碎时引起水体含沙量的变化对航道泥沙回淤必然有较大的影响,因此对缓坡上波浪破碎引起含沙量的变化的研究具有重要的意义。

连云港港 30 万吨级航道建设工程位于开敞海域、淤泥质浅滩(图 1)。大风天波浪影响强,海岸沉积环境复杂,滩浅坡缓、航道开挖里程长、航道挖深厚度大,土质和地基差,工程复杂、技术难度大,对航道建设的研究、设计和施工等提出了更新、更高的要求。为了使科学技术能够更好地服务和指导工程建设与实践,开展了国家高技术研究发展计划(863 计划)“开敞海域淤泥质浅滩深水航道建设关键技术研究”课题,主要针对浅滩深水航道波浪水流动力特性、泥沙运动规律及淤积预报技术、航道总体设计关键技术、疏浚土筑堤新技术、复杂条件下疏浚技术等内容开展研究,为我国在相关领域的学科发展和工程应用提供技术支撑。本课题为第一部分,旨在揭示开敞海域淤泥质浅滩及深挖槽航道的水动力特性、浮泥特性及其在深水航道中的运动机理,开敞海域淤泥质浅滩深挖槽航道的泥沙回淤规律,特别是大风天航道回淤规律,提出开敞海域淤泥质浅滩深挖槽航道泥沙回淤理论模式和泥沙回淤预报方法,完善波浪、水流作用下泥沙运动的挟沙能力表达式,提升开敞海域淤泥质浅滩泥沙运动及浅滩深挖槽航道泥沙回淤的模拟技术水平,为学科发展和工程应用提供技术支撑。研究内容包括:

(1) 开敞海域淤泥质浅滩及深挖槽航道水流与波浪特性研究

研究分析波生流的影响因素,研究其形成条件及强度;研究浅滩深挖槽的水流与波浪结构特征。揭示开敞海域淤泥质浅滩及深挖槽航道的水流与波浪特性。

(2) 淤泥质海岸泥沙运动机理研究

研究破波区波浪破碎的能量损失,结合破波区波浪衰变过程中波动水体近底层水流运动,初步探讨破波带水体紊动特性;分析波浪破碎条件下破波带水体紊动特性和破波带内水体含沙量分布特征,重点研究近底层泥沙运动特性和泥沙离、向岸运动特性。揭示开敞海域淤泥质浅滩及深挖槽航道的泥沙运动规律,特别是大风浪条件下航道回淤规律。

(3) 开敞海域淤泥质浅滩深挖槽航道泥沙回淤规律研究

现场观测和室内模拟试验;研究浮泥在深水航道中的运动机理、大风天气下破波区泥沙运动机理、波生流的运动特征及其对泥沙运动的影响。

(4) 浅滩深挖槽航道泥沙回淤理论模式和泥沙回淤预报方法研究

研究实测潮流、波浪、泥沙和航道回淤相关关系,应用破波区泥沙试验的相关研究资料,构

建波浪、水流作用下泥沙运动的挟沙能力表达式,提出开敞海域淤泥质浅滩深挖槽航道泥沙回淤理论模式和泥沙回淤预报方法。

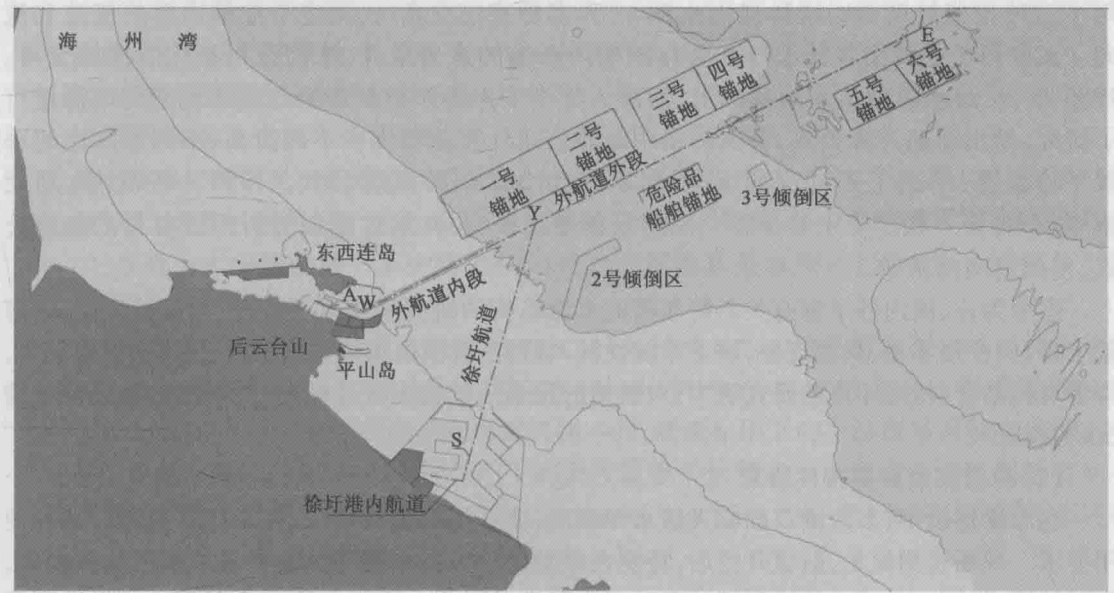


图1 连云港港30万吨级航道工程示意图

(5) 浅滩深挖槽航道的泥沙回淤模拟技术研究

利用物理模型研究航道的水流结构、泥沙回淤过程;改进风暴潮、台风浪和破波作用下泥沙数学模型,研究浅滩深挖槽航道的泥沙回淤;研究浮泥、破波与风暴潮对航道回淤的影响,重点研究破波对航道回淤的影响,开发浅滩深挖槽航道的泥沙回淤模拟技术。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 浅滩深水航道水流与波浪特性研究

(1) 跨槽水流研究

20 世纪 70 年代初期,英国 WALLINGFORD 水力学研究所为了确定小角度斜跨航槽的流速变化,对斜跨宽浅挖槽水流进行了室内试验研究。通过试验得出如下结论:随挖槽深度和交角的增大,挖槽内流速的折减都趋于增大;挖槽下游水流速度渐渐恢复到上游的数值。20 世纪 70 年代中期,WALLINGFORD 研究所再次进行小尺度的模型试验研究。该试验研究虽扩大了交角 α 的范围,但重点放在研究挖槽流场的整体特性方面:即对沿水深方向的垂线平均流速 $\bar{u}_2$ 和流向 β_2 进行研究。1979 年,法国 CHATOU(夏都)水力学实验室着手进行斜跨挖槽水流问题的模型试验,研究的目的是证实数学模型能否计算三维紊动流速。试验指出:挖槽上游流速均匀,水流平行水槽轴线;行近挖槽时,水流偏转趋向垂直挖槽轴线;在挖槽上边坡脚水流折射后趋向平行挖槽轴线。在挖槽下边坡,水流开始重新调整。1985 年,荷兰 DELFT 水力学实验室 Boer 等学者为了建立挖槽内泥沙冲淤模拟的数学模型^[1-2],对斜跨挖槽水流结构进行了较详细的研究。试验结果表明,斜向入射水流折向趋于平行挖槽,流速大小和方向迅速变化。底部剪切应力方向与垂线平均水流方向不一致。Boer 等学者的物模试验研究不仅考虑了不同交角 α 、不同水深 h_1 和不同边坡 m ,而且试验结果用图表与各种数值计算进行了比较。该项研究工作具有一定的深度和广度。

1986 年,南京水利科学研究院罗肇森^[3]在进行挖槽回淤计算时对水流跨槽的实际流向

变化规律做了研究,并给出相应公式。公式所表述的规律在小角度 α 时基本符合实际情况。1984年,河海大学对连云港外海航道进行了清水和浑水的模型试验^[4-5]。清水试验采用了三种挖槽尺度 Δh 、四种滩面水深 h_1 和多种挖槽交角 α ,测定了挖槽内外的流速和流向。试验目的是找出各种水流方向在挖槽内产生的水力条件,从而分析最佳的挖槽交角。1986年,在清水模型试验的基础上,河海大学李安中等学者对斜跨挖槽水流变化规律进行了研究,给出流速计算公式,首次提出用经验公式计算挖槽内在不同交角、不同水深比的垂线平均流速,给出了不同交角 α 、不同水深比 $\Delta h/h_1$ 的流速公式。1990~1993年,刘光臣^[6]、李青云^[7]和李安中等学者^[8]采用水槽继续研究,并通过量纲分析得出各自的经验公式,使研究向前推进。

迄今为止,国内外学者有关斜跨航槽的水流结构的研究呈现以下特征:角度较宽泛、内容较丰富,但存在零星、局部现象,缺乏系统性深入研究;数值模拟计算偏多,物理模型试验偏少,两者有机结合、相互印证的研究更少;对航槽的深水浅挖情况关注较多,对航槽的浅滩深挖情况研究甚少。

(2) 跨槽波浪传播特性研究

在海港建设中,多数港口面临天然水深偏浅,要开挖航道或增深,拓宽原有航道以达到使用要求。现场观测显示,航道开挖后,特别在滩槽比较大的情况下引起海床地形的陡然变化,会对越槽水流分布、波浪传播和泥沙运动产生明显的影响。1987年中交一航院在烟台港西港池二期工程设计中发现,在正向口门条件下航道与强浪向夹角很小,航道对波浪的折射作用非常明显。1991年在大连港大窑湾散粮码头工程设计中,同样发现航道对波浪有较强的折射作用。此后,陆续发现了多项航道对波浪传播产生较大影响的工程,其中有些对工程有利,有些则对工程产生不利影响。因为由航道引起的波浪折射作用,一方面使航道内波浪急剧衰减,使进入港内的波能减少,有利于港内的泊稳条件,降低码头的设计波要素;另一方面在航道的边坡及边滩上出现波能集中,并可能进一步影响防波堤的安全稳定。随着港口向大型化发展,航道水深与滩上地形水深之比越来越大,波浪折射越发明显,如何趋利避害,成为工程设计与研究的实际问题。

关于航道对波浪的折射作用,目前已有较多的研究。早在20世纪70年代中期,国外学者J. A. Zwamborn和G. Grieve就在物理模型中进行过航道走向对南非Richards湾中一深水港波浪影响的试验,取得了相应成果。

我国在20世纪90年代初起开展这方面的研究。1992年赵智帮^[9]发表论文讨论“关于航道对波浪的作用”。1995年李玉成^[10]结合范例工程采用不规则波的缓坡方程研究了航道的折射作用,并探讨了改善措施。1996年左其华^[11]应用抛物线性波浪折、绕射联合计算波浪数学模型研究航道对波浪传播的影响。1997年吴达开应用抛物线波浪数学模型,结合方向谱研究了黄骅港一期工程的航道波浪问题。1997年张永刚^[12]采用Boussinesq方程波浪数学模型结合实际工程研究了航道对波浪的影响。2000年龙文采用线性水波的折射理论和非线性浅水波的数值模拟方法研究了航道、港池度波浪的折射作用,并分析了珠海港护岸破坏的实例。2001年赵智帮等^[13]就烟台港西港池工程、大连港大窑湾散粮码头工程和天津新港四港池工程的工程实例,利用原型观测、物理模型试验验证数学模型试验,最终用数学模型完成大量组次的试验,从中得出较为系统的成果。2002年李思源^[14]采用Boussinesq方程波浪数学模型探讨了减少航道外波浪集聚的方法。陈汉宝等^[15-16]结合工程问题采用Boussinesq方程波浪数模对航道对多方向波传播影响进行了研究,得出不同入射角、不同方向集中度的波浪对航道作用

的差别。

1.2.2 波浪及破波作用下泥沙运动研究

波浪作用下泥沙的输移研究是建立在悬沙浓度沿水深分布研究的基础上。对于波浪作用下含沙量分布的研究成果较多,主要集中在以下两个方面:

(1)构造或选择合适的扩散系数模型;

(2)某一高度上的参考浓度预测。

关于波浪作用下泥沙扩散系数的研究,大致有以下四种:

(1)取为常数。虽然过于简化,但在没有准确的表达式之前,不少人宁愿采用这种形式。

(2)处理为水深的函数。不少学者认为泥沙扩散系数是水深的函数,如本间仁和川的方法。

(3)与水流紊动扩散系数建立相关的方法。认为最简单的方法是假定泥沙垂向扩散系数与水流动量交换中的涡动黏滞系数之间存在一个比例因子,可以借助涡动黏滞系数表达式^[17]。Van Rijn^[18]认为紊动的来源和形成机制不同,波浪作用下的泥沙混掺系数在水体上半部与下半部是不同的,提出波浪共同作用下的泥沙混掺系数模式为水流有关的扩散系数和与波浪有关的扩散系数平方和的平方根。Grasmeijer 和 Van Rijn(2001 年)研究认为^[19],上述研究成果能很好地适用于破波带的破波情况。

(4)通过扩散系数模型确定。近年黄明政^[20]和严冰^[21]等分别借鉴 You 和 Wilkison 在波浪作用下边界层内的扩散系数模型和 Kos'yan 在边界层外主流区内的扩散系数模型,推求研讨了波流共同作用下的泥沙扩散系数。

以上结果主要针对波浪或波流作用下的泥沙扩散系数,对于破波作用下泥沙扩散系数,日本学者 Shibayama^[22-23]认为,由于破波紊动的影响改变了浓度剖面形态,不再是指数型浓度(分布)剖面,因而在破波的情况下,不能再像非破波带那样将扩散系数假设为常数。1989 年 Okayasn 根据试验结果提出,水流涡动黏滞系数 ϵ 呈线性分布,是破波带能量消散率(D_B)的函数。Van Rijn 也在波流共同作用下扩散系数的基础上进行了改进,提出破波作用下的泥沙混掺系数模式。

参考点浓度的确定方面,最早传统方法采用推移质输沙率进行反推。后来, Nielsen^[24-26]提出了半经验半理论公式,Green 比较两种常用的不同原理的参考浓度计算公式,认为 Nielsen 给出的参考浓度公式有更好的精确解。荷兰学者 Van Rijn^[27-29],也提出波流作用下的参考点浓度计算公式。国内周益人根据实验结果首先得到波浪作用下参考点含沙量经验公式^[29]。

此外,陈德昌、金鏐等^[30]在研究连云港海域大风浪作用下的含沙量时,认为破波带内含沙量(悬浮泥沙所做的功)主要取决于波能的紊动损耗,从波高的统计分布等出发,按波能法概念提出了破波带内水体含沙量横向分布表达式;破波带外被视为无数泥沙扩散线源的叠加,由此建立破波带外水体含沙量横向分布的表达式。杨汜和张玮^[31]基于陈德昌和金鏐理论,运用连云港淤泥质海岸在台风浪期间的实测资料进行分析,通过实测资料验证了波能功率沿程损耗和水体悬沙垂向悬浮功率之间的时间对应关系。以破波带波能功率沿程损耗来代替波能沿程损耗,更能切实反映破波区含沙量变化滞后于波高变化过程的实际情况。这种理论分析结合现场实测资料的方法,使人们对现场风浪作用下淤泥质海岸含沙量分布的认识得到进一步深入。

1.2.3 航道泥沙回淤模式研究

航道泥沙回淤模式研究主要有两种模式。其一为基于不平衡输沙方程的床面冲淤模式。

模式中体现床面泥沙和水体泥沙交换的处理主要有挟沙力模式和切应力模式两种。前一种方法关键点在于挟沙力和沉降概率(也称恢复饱和系数);后一种方法关键在于临界起动切应力和淤积切应力以及床面冲刷率的确定。其二为概化的半经验、半理论公式。

关于风浪和水流作用下海岸泥沙挟沙力(也叫平均含沙量),国内有很多研究成果。刘家驹^[32]选择不受河流影响的近岸海区(泥沙主要来自近岸海区本身),通过分析认为近岸海区浅水体含沙量与风吹流、波浪和潮流密切相关,同时也与泥沙沉速和水深等因素有关,通过因次分析,将风吹流、波浪和潮流以弗氏数的形式体现,得到泥质海岸含沙量计算公式。近期刘家驹将上述淤泥质海岸平均含沙量计算式拓展至淤泥质海岸和粉沙质海岸大潮破波的情况^[33]。窦国仁^[34]依据能量平衡原理,将潮流和波浪用于悬浮泥沙的能量相加,从而导出潮流和波浪共同作用下的挟沙能力公式,系数由实测资料确定。曹祖德^[35]依据能量平衡原理,通过波流共同作用下床面切应变化,导出波流共同作用下的挟沙能力公式。曹文洪和张启舜^[36]根据紊流猝发的时空尺度得到波浪和潮流作用下床面泥沙上扬通量,然后根据连续律,建立了平衡近底含沙量的理论表达式,进而根据波浪掀沙、潮流输沙的模式,推导得出了考虑床面附近泥沙交换机理的波流共同作用下的挟沙能力公式。曹文洪^[37]从床面附近泥沙颗粒的运动特征出发,分析波浪作用下床面泥沙扬起的动力学机制,得到波浪掀沙公式。罗肇森^[38]根据波动水流能量原理,参考窦国仁推导底沙输沙量的方法,推导出波浪、潮流和风吹流共同作用下的底沙输沙量(包括推移质和部分悬移质输沙)计算式。乐培久和杨细根根据能量叠加原理也得到了波流共同作用下的挟沙能力公式。目前各家所提波流共同作用下的平均含沙量公式都是适用于非破波区的。近来刘家驹还把波流作用下的平均含沙量关系拓展到破波区含沙量计算,但破波流速是否就能代表粉沙质海岸台风浪期崩破型破波区的平均流速,还有待进一步论证。

在航道泥沙回淤经验公式预报方面,印度 Poona 中央水力动力研究所 C. V. Gole 等人^[39]针对印度港口开挖航道存在泥沙回淤的问题,将无黏性泥沙的淤积模式加以移植和改造,提出了淤泥质港口港池和航道泥沙回淤预报公式,用淤积系数 K 表示实际回淤量与进入工程区域有效沙量的比值, K 值先由现有的港口实例资料估算。20 世纪 80 年代初,南京水利科学研究院刘家驹等^[40-41]第一次在国内提出淤泥质海岸航道、港池回淤计算方法,经过 10 年的应用检验和修订,已于 1990 年经“全国水运工程标准技术委员会”(现名“中国工程建设标准化协会水运工程委员会”)审定,作为规范在国内试行。刘家驹研究指出:淤泥质海岸的悬移质泥沙在航道内引起的淤积为浑水横越航道造成的淤积和顺沿航道流动造成的淤积两者之和。英国 Wallingford 水工试验所 A. J. M. Harrison, M. W. Owen^[42]认为当潮流流速对河床产生的切应力 τ 超过某个特定值,即临界冲刷切应力时,床沙发生冲刷,推导了考虑潮汐周期性变化的航道淤积公式。金鏐^[43]根据近期诸多学者对黏性泥沙运动规律的研究成果,认为,淤泥质海岸人工挖槽的回淤,是浅滩沉积物在波浪作用下悬浮进入水体,在随潮流迁移过程中经过挖槽,因潮流动力局部降低而落淤的结果。将淤泥质海岸近岸带水体含沙量分成两部分进行计算:在破波带内,将含沙量与破波带内的波浪要素建立关系;在破波带外,则可将某点的含沙量视作破波带内顺岸排列的无数线源对该点的贡献的叠加。这些公式建立在一定的理论推导基础上,其包含的经验系数依赖于验证资料,虽然公式对于复杂的动力条件进行了概化,但由于其计算相对简单,便于操作,在实际工作中得到广泛应用。

还有研究者从平面二维或垂向二维角度对航道淤积进行了数值模拟研究。结合连云港回淤资料,应铭、张华等^[44]基于台风期间的实测资料分析了 15 万吨航道的淤积,认为台风对

15 万吨航道的回淤影响不大,航道出现台风骤淤的可能性不大。张玮、谢鸣晓、李醒等^[45-46]基于 7 万吨与 15 万吨航道的泥沙回淤观测资料,研究并预测了航道回淤,指出相关参数及其相互影响,徐圩港区口门流态优化及其建议。高正荣等^[47]基于物理模型研究了深开挖航道的流态变化和可能的泥沙回淤。

2 淤泥质浅滩及深挖槽航道水流与波浪特性

2.1 淤泥质浅滩及深挖槽航道水流试验研究

2.1.1 模型概况及仪器设备

试验在往复流宽水槽中进行。该水槽总长 48m,净宽 10m,高 1.5m。水槽一端为两台大功率的往复流泵,另一端为旋转式翻板尾门和摇摆式造波装置,通过自动执行潮位过程和流量过程的计算机控制生潮系统和进出流系统,可在宽水槽内形成双向涨落潮流。事先在宽水槽内率定好波要素,试验时调试好水流流速,根据相应波要素产生规则波,形成波流动力。水槽的外缘为回水通道,与水库连通构成进出水循环回路,见图 2。

2.1.2 试验组次

水流交角、航槽边坡和底宽因素影响的具体试验组次见表 1~表 3。

试验组次 (研究交角影响,边坡坡率均为 1:7) 表 1

组次	交角 (°)	高潮位 (m)	床面高程 (m)	槽底高程 (m)	最大水深 (m)	控制流速 (m/s)	组次	交角 (°)	高潮位 (m)	床面高程 (m)	槽底高程 (m)	最大水深 (m)	控制流速 (m/s)
1	15	+3.2	-5.0	-13.3	16.5	0.70	21	45	+3.2	-5.0	-13.3	16.5	0.70
2	15	+3.2	-5.0	-13.3	16.5	1.00	22	45	+3.2	-5.0	-13.3	16.5	1.00
3	15	+3.2	-5.0	-13.3	16.5	1.50	23	45	+3.2	-5.0	-13.3	16.5	1.50
4	15	+7.2	-5.0	-13.3	20.5	0.70	24	45	+7.2	-5.0	-13.3	20.5	0.70
5	15	+7.2	-5.0	-13.3	20.5	1.00	25	45	+7.2	-5.0	-13.3	20.5	1.00
6	15	+7.2	-5.0	-13.3	20.5	1.50	26	45	+7.2	-5.0	-13.3	20.5	1.50
7	15	+3.2	-5.0	-22.5	25.7	0.70	27	45	+3.2	-5.0	-22.5	25.7	0.70
8	15	+3.2	-5.0	-22.5	25.7	1.00	28	45	+3.2	-5.0	-22.5	25.7	1.00
9	15	+3.2	-5.0	-22.5	25.7	1.50	29	45	+3.2	-5.0	-22.5	25.7	1.50
10	15	+7.2	-5.0	-22.5	29.7	1.50	30	45	+7.2	-5.0	-22.5	29.7	1.50
11	30	+3.2	-5.0	-13.3	16.5	0.70	31	90	+3.2	-5.0	-13.3	16.5	0.70
12	30	+3.2	-5.0	-13.3	16.5	1.00	32	90	+3.2	-5.0	-13.3	16.5	1.00
13	30	+3.2	-5.0	-13.3	16.5	1.50	33	90	+3.2	-5.0	-13.3	16.5	1.50
14	30	+7.2	-5.0	-13.3	20.5	0.70	34	90	+7.2	-5.0	-13.3	20.5	0.70
15	30	+7.2	-5.0	-13.3	20.5	1.00	35	90	+7.2	-5.0	-13.3	20.5	1.00
16	30	+7.2	-5.0	-13.3	20.5	1.50	36	90	+7.2	-5.0	-13.3	20.5	1.50
17	30	+3.2	-5.0	-22.5	25.7	0.70	37	90	+3.2	-5.0	-22.5	25.7	0.70
18	30	+3.2	-5.0	-22.5	25.7	1.00	38	90	+3.2	-5.0	-22.5	25.7	1.00
19	30	+3.2	-5.0	-22.5	25.7	1.50	39	90	+3.2	-5.0	-22.5	25.7	1.50
20	30	+7.2	-5.0	-22.5	29.7	1.50	40	90	+7.2	-5.0	-22.5	29.7	1.50