

第十三届中国海洋(岸)工程 学术讨论会论文集

中国海洋工程学会 编



海洋出版社

第十三届中国海洋（岸）工程 学术讨论会论文集

DI-SHISAN JIE ZHONGGUO HAIYANG(AN) GONGCHENG
XUESHU TAOLUNHUI LUNWENJI

中国 海洋工程学会 编

承办单位：南京水利科学研究院

协办单位：交通部港口航道泥沙工程重点实验室

中国·南京

2007年09月18日至09月20日

海洋出版社

内 容 简 介

第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集主要内容有深水和近海工程, 海岸工程, 河口动力、演变及航道整治以及综合技术等。

图书在版编目(CIP)数据

第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集/中国海洋工程学会编. —北京: 海洋出版社, 2007.09
ISBN 978-7-5027-6864-5

I.第… II.中… III.海洋工程—学术会议—文集 IV. P753-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第119289号

主 编: 左其华 窦希萍
责任编辑: 阎 安
特邀编辑: 段子冰 王 红 杨 红
责任校对: 孙 宁
责任印制: 刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

(100081 北京市海淀区大慧寺路8号)

南京河海大学印刷厂印刷 新华书店发行所经销

2007年9月第1版 2007年9月南京第1次印刷

开本: 880×1230 1/16 印张: 48

字数: 1570千字 印数: 1~700册

定价: 268元

海洋版图书印、装错误可随时退换

目 录

大会主题报告

海洋工程中极端环境事件的研究进展	李家春 (1)
沿海港口布局规划及“十一五”期发展重点	蒋 千 (6)
Recent advancement in modeling seafloor dissipative mechanism in shallow water	Philip L-F Liu (9)

深水和近海工程

海洋工程桩-桶基础的上拔位移分析与计算	刘文白, 邵玉娴, 王梦喻 (19)
Research on the Feasibility of Hybrid Approach for Prediction of Deepwater Platform Response	HU Zhiqiang (24)
多点系泊 FPSO 系泊结构局部强度研究	陈 震, 王 璞, 赵耕贤, 肖 熙 (34)
冰激柔性四桩柱结构振动的模型试验研究	黄 焱, 史庆增, 宋 安 (38)
软基上吸力式桶形基础的水平承载力分析	武 科, 栾茂田, 范庆来, 王志云 (43)
动载下桶基周围影响区范围和到达稳态的时间估算	鲁晓兵, 王 丽, 张旭辉, 王淑云 (48)
海洋平台在船舶撞击载荷作用下的动力响应	陈建民, 秦立成 (52)
自主水下作业系统精确控制与应用仿真	郭 莹, 徐国华, 徐筱龙, 肖治琥 (57)
Spud-can 基础贯入对固定平台基础影响	吴永初, 鲁晓兵, 陈海锋 (63)
深水平台上垂荡阻尼板的水动力特性实验研究	TAO Longbin (67)
漂浮平台及系缆在流场中的姿态仿真	孙善春, 吴 旌, 叶祥明, 郑新明 (74)
微动摆能源补充技术在海洋监测平台中的应用	张云海, 刘延平, 吴 旌, 杨 光 (79)
海洋浮动实时监测平台技术	张云海, 陈建军, 吴 旌, 闵强利 (84)
海南 24 平台导管架管节点焊接质量控制	任润卯, 马陈勇, 高学明 (87)
海洋钢结构的金属热喷涂	朱锡昶, 朱雅仙, 葛 燕, 李 岩 (90)
海洋内波现场测量技术研究	陈建军, 吴 旌, 张云海, 闵强利, 郭文生 (94)
圆柱系留体稳定性试验研究	闵强利, 张云海, 陈建军, 余湖清, 吴 旌 (97)
超声波外圆周向探伤方法在海洋油气和工程领域应用的技术探讨	张殿彬 (101)
水下垂直升降测量系统研究	吴 旌, 陈建军, 张云海, 郭文生, 余湖清 (104)
初探不同理论在计算管节点应力集中系数上的差异	邓合霞, 张益公 (108)
海底光缆抗震分析	刘爱文 (114)
海底管道改线连接技术的开发和应用	潘东民, 刘 楚 (120)
用 ANSYS 软件分析桩土相互作用	陈建民, 肖 花 (128)
火箭锚侵彻轨迹研究	张华昌, 吕兆华, 隋 华 (132)
五体船迎浪运动的非线性特性的理论与试验研究	贺俊松, 陈 震, 许劲松, 肖 熙 (138)
五体船兴波阻力特性的理论与试验研究	贺俊松, 陈 震, 肖 熙 (143)
海上风电场建设的现状分析与经验教训	邓院昌, 王铁强 (149)
我国海洋能利用工程的展望	阳连丰 (154)
潮流电站载体结构优化	刘文白, 徐伯海 (157)

海岸工程

波浪与开孔沉箱结构相互作用的研究	李玉成 (165)
单向波对浪溅区三维结构物冲击作用的试验研究	任冰, 丁兆强, 王永学, 任效忠 (176)
非线性波沿斜面传播规律模拟	于国友, 刘志良, 苗青 (185)
沙坝不稳定运动实验研究	尹晶, 邹志利 (189)
波浪作用下降降式重力式网箱数值模拟研究	赵云鹏, 李玉成, 董国海, 桂福坤 (196)
内部带水平多孔板的局部开孔防波堤对波浪反射的理论研究	刘勇, 李玉成, 滕斌 (204)
梳式堤波浪反射系数近似计算	朱大同 (210)
双层开孔板沉箱防波堤的波浪反射系数	朱大同, 杨继华 (215)
半圆型防波堤可靠度分析	郗禄文, 吴进 (221)
波浪作用下海岸泥沙运动规律和模型相似律研究	夏益民, 段子冰, 徐华, 杜德军 (230)
波浪水池消波装置选型的试验研究	兰波, 缪泉明, 姚木林, 胡定健, 向旭 (238)
海啸在滩面上传播的数值模拟	潘存鸿, 于普兵, 鲁海燕 (242)
浙江沿海超强台风风暴潮灾害影响和对策研究	朱军政, 徐有成 (246)
日照海岸带极值增水统计规律的探讨	董胜, 李子涛, 宁进进, 王亮 (251)
华东海岸风暴潮最大增水变化特征的研究	徐汉兴 (256)
风对越浪量影响的研究进展及模型试验研究	耿卓, 李鹏, 王震, 王登婷 (264)
台风对海表温盐影响的模拟研究	李岩, 沙文钰 (270)
水声探测海浪破碎发生率的实验研究	李晶, 于定勇, 刘华兴 (275)
黄骅港波浪、潮流、泥沙的三维数值模拟及其骤淤机理的初步分析	赵群 (282)
桥墩对水流影响的二维数值模拟	鞠俊, 闻云呈 (288)
岸滩稳定性研究手段的综合应用	庞启秀, 杨华, 赵洪波, 闫新兴 (293)
防城港拦门沙航道 20 年 50 年重现期台风骤淤预报	罗肇森, 马进荣, 张晓艳 (297)
渤海湾三大港大风期骤淤和比较	罗肇森, 罗勇, 张晓艳 (305)
大陈中嘴避风港透空式防波堤设计研究	黄惠, 陈玲, 齐鲁尚 (312)
海安新港荔枝湾码头透空式防波堤整体防浪掩护试验研究	秦丰年, 陈德春 (315)
应用改进的椭圆型缓坡方程数值模拟波浪传播变形	祁锋, 曹宏生 (320)
基于一种快速粒子 level set 法的水动力模拟	黄筱云, 李绍武 (323)
基于最大熵原理的非 Rayleigh 海浪波高统计分布	张军, 葛勇, 陈航宇, 周喜武 (328)
台风作用下海滩剖面地形动力与侵蚀机制分析	陈子燊, 李志强, 王扬圣 (335)
天津港近海海域水流泥沙环境测验研究	孙连成, 赵洪波, 张娜 (341)
连云港新港址规划泥沙回淤论证和方案比选研究	高正荣, 张金善, 章卫胜 (346)
洋山深水港区一期工程施工期潮流及地形冲淤分析	余小建, 徐啸, 崔峥, 张磊 (351)
鳌山湾附近海域沉积物基本特征及影响因素	刘建强, 边淑华, 胡泽建, 吴碧君 (356)
胶州湾的沉积速率	汪亚平 (361)
江苏中部潮滩剖面的模拟	刘秀娟, 高抒 (370)
海南岛海岸侵蚀特征及主因分析	季荣耀, 罗宪林, 陆永军, 罗章仁 (378)
台湾浅滩的底形特征和沉积物输运	杜晓琴, 朱大勇, 邵浩 (382)
唐山港京唐港区挡沙堤三期方案对比研究	于泳, 孙波, 孙林云 (388)
黄河入海泥沙对黄骅港区影响分析	李泽刚, 王万战, 扬明 (392)
墩基防护中护底材料的稳定成型试验研究	卢中一, 高正荣, 张思和 (395)
福建省东壁岛围垦工程堵口水工模型试验研究	孙万通, 陈德春 (400)
江苏如东临海水库水源论证及水库调节计算	袁文秀, 杨树滩, 张明 (404)
Surfer 二次开发在海岸工程中的应用	王恺 (409)

围海堵口水力仿真模型中插值问题的探讨	毛国宇, 陈德春 (415)
厦门市大嶝岛避风坞工程设计研究	刘 峥, 陈德春 (419)

河口动力、演变及航道整治

模型变率影响的数学模型研究初探	窦希萍, 张新周, 曲红玲 (425)
新浏河沙及南沙头通道整治工程措施的研究	范期锦, 谈泽炜, 郑文燕 (433)
黄河河口演变规律及治理	王万战 (439)
珠江三角洲河网非恒定水沙数学模型研究	张华庆, 金 生, 沈汉堃, 朱三华 (445)
陈家港电厂航道疏浚悬浮物扩散数学模型研究	李褪来, 高祥宇, 杨 红, 曲红玲 (452)
基于遥感图像分析的永定新河口近年冲淤变化及趋势研究	孙林云, 朱 江, 刘建军 (461)
港口规划方案泊稳条件数值模拟	潘军宁, 王红川, 杨继华 (464)
大通至长江口洪水演算数值模拟	马进荣, 张晓艳, 张行南 (468)
瓯江河口水流挟沙力公式系数最佳确定	肖烈兵, 王义刚 (474)
江东大桥建设对钱塘江洪水的影响分析	鲁海燕, 史英标, 杨元平 (479)
二维潮流泥沙数值模拟在福姜沙河段深水航道治理工程中的应用	闻云呈, 夏云峰 (483)
二维水动力数值模型在珠江河口整体水动力模拟中的应用	包 芸, 刘 欢 (489)
珠江口虎门底边界层湍流结构观测分析	刘 欢, 包 芸 (494)
白茆小沙及徐六泾节点整治工程潮汐河工模型试验研究	杜德军, 夏云峰, 夏益民, 莫思平 (499)
河口区含沙量分布特征分析	陈慧锋, 赵晓冬 (504)
关于泥沙悬浮功的讨论	黄才安, 陈小秦 (510)
长江口细颗粒泥沙基本特性实验分析	周晶晶, 金 鹰, 冯卫兵 (515)
波浪数学模型试验中截短航道的选取方法研究	张 娜, 杨宪章, 郭 科, 刘子琪 (519)
宁德核电温排水扩散试验研究	赵晓冬, 陈慧锋, 毛佩郁 (524)
宁德大唐电厂二维温排水数值模拟	汤军健, 温生辉 (531)
华能营口电厂三期工程取排水泥沙及温排水数学模型试验研究	张 娜, 孙连成 (537)
清 8 出汉以来黄河口水下三角洲的演变研究	班 丽 (542)
里下河“四港”闸下水道淤积分析	闵凤阳 (547)
温州石化基地 30 万吨级航道选线研究	李孟国, 郑敬云, 庄小将, 李文丹 (555)
江水北调在线仿真模型研究	李褪来, 朱建英, 汪德耀 (559)
关于射阳河口双导堤方案与挖槽方案共同作用情况的研究	宋 睿 (567)
分汊河段整治初探——以扬中河段落成洲汊道为例	李春潮 (573)
广西浔江长洲枢纽回水长度变化规律研究	张明进, 张华庆, 张 玮 (579)
渭河下游场次洪水冲淤量确定方法探讨	杨丽丰, 陈雄波 (585)
泉州湾滩槽演变及深水航道的回淤研究	陈增焕, 余小建, 季荣耀 (589)
鸭绿江口航道整治的研究	林天岩 (595)
开发长江北支深水大港的战略构想	李洪斌 (599)
长江河口区南、北支会潮点初析	陆 洲, 陆凌宏, 陆 近, 黄志良 (605)
长江口北支航道整治工程设想	陈海勇, 郭海丰, 钱黎敏, 黄志良 (609)
围垦活动对河口生态系统影响的研究	滕 玲, 张金善, 章卫胜 (614)
京杭运河镇江段港口布局规划研究	黄 蕙, 齐鲁尚, 陈 玲 (620)
洪泽湖老子山船舶避风港工程设计研究	黄 维, 陈德春 (623)
洪泽湖 16 号标避风港工程设计研究	黄 蕙, 付先进, 顾军花 (626)
宝钢马迹山港扩建工程卸船码头嵌岩桩钢套管稳定性研究	毕学峰, 陈德春 (630)

综合技术

装配式海岸建筑工程技术——一种新型海岸工程结构的作用机理及应用	陈振新, 陈 泽 (635)
滩海油田进海路设计浅析	李 静 (640)
海洋固定平台过渡段安装技术分析	魏雄标, 高瑞力 (643)
微生物采油技术在海洋石油中的应用	宋文强, 马陈勇, 黎朋军 (648)
虚拟仪器技术在海洋观测中的应用	刘华兴, 于定勇, 李 晶 (651)
渤海湾滩海导管架式固定平台海上施工工艺浅析	王玉阳, 王 军, 肖 峰, 于长江 (656)
碳纤维加固海工结构钢筋混凝土板试验研究	王友元, 苏林王 (660)
水下焊接技术在海洋工程中的应用及发展趋势	马陈勇, 赵继文, 宋文强 (667)
钢板桩码头的腐蚀破坏检测	朱锡昶, 李 岩, 葛 燕, 胡冠军, 史儒雄, 麦 海 (671)
混凝土薄壁筒桩在浅滩工程中的应用及其缺陷预防	杨继华, 刘芯伍, 罗德宽 (676)
滩涂围垦海堤工程施工控制特点	杨继华 (679)
大型沉箱现场预制场的设计与施工	黄建阳, 杨意忠 (683)
四氢呋喃水合物沉积物力学性质研究	鲁晓兵, 王 丽, 王淑云, 赵 京, 王爱兰 (689)
深水码头陆域大厚度回填砂的振冲密实	伊左林, 刘美林 (693)
振冲—强夯综合法加固机理与工程应用	曹永华, 闫 伟 (696)
上海市金山城市沙滩水库堤坝防渗设计	阮龙飞 (700)
不同底质类型对卫星遥感提取水深信息精度的影响	杨顶田 (706)
浙江省临海市红脚岩渔港规划与渔港经济区建设研究	丁 洁, 陈德春 (710)
爆炸挤淤法在厦门闽台渔轮避风港南堤工程的应用	王东水 (714)
新型装载监测系统	刘烈晖, 刘国生, 李纪元, 张继潮, 韦纪军, 刘建红 (718)
远程水位(潮位)实时监测系统	刘国生, 刘烈晖 (724)
自航耙吸挖泥船装舱溢流模型试验	张 忱, 洪国军 (733)
内河港口集装箱装卸工艺方案的综合评判方法与应用	金 凤, 刘虎英, 欧阳飞 (738)
京杭运河淮安港港口吞吐量预测研究	董金凤, 陈德春 (742)
剪切速率对粉质粘土抗剪强度影响的分析	刘爱民, 梁爱华 (746)
灌注桩成孔施工中的泥浆稠度分析	刘凌云 (751)
透水模板在威海长会口跨海湾大桥的应用探讨	刘 竞, 邓德华, 张秋信, 赵腾龙 (754)
印尼 SES 项目中对桩基土壤资料的处理	石永敏, 张益公 (759)

海洋工程中极端环境事件的研究进展

李家春

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘要: 环境参数、结构响应始终是海洋平台设计中的核心科学问题。在全球变暖的背景下, 极端环境事件发生的频率和强度明显增加, 这对如何经济、安全、可靠地设计海洋工程结构, 避免灾难性事故发生是一个严峻的考验。综述学术界在畸形波的发生机制和描述、风暴下的巨浪预报和内潮波的产生与传播三方面的研究进展, 并提出未来需要解决的若干科学问题。

关键词: 极端环境事件; 畸形波; 风浪预报; 内潮波

由于经济快速发展, 对能源需求急剧增长。我国低渗和稠油油田占有相当比例, 依靠提高石油采收率仅能使年产量维持在 1 亿 8 千万吨左右, 远不能满足消费的需求, 到 2010 年进口总量将占年总需求量的 50%。然而, 我国海洋油气资源丰富, 储量达 275 亿吨, 开发海洋是应对石油资源不足, 确保我国能源安全的重要途径。我国海洋石油工业从 20 世纪 60~70 年代起步, 2005 年产量已达 4000 万吨, 并能自主开发水深 200~300 m 左右的油田, 拟设计 3000 m 水深半潜式平台。环境参数和结构响应始终是海洋工程中平台设计的核心科学问题。海洋深水区, 风急浪高, 极端环境事件常有发生, 并导致海洋结构物的倾覆、扭转、位移和破坏, 所以, 这是海洋工程的前沿课题。

近年来, 全球变暖的研究有了新的进展。2007 年, 国际政府间气候变化小组 (IPCC) 发布了第四次研究报告, 结论是: 全球变暖已是不争的事实, 人类活动的影响占主导地位。全球变暖的后果是扰动了地球的大气环流形势, 从而改变全球气候冷暖和降水分布, 还可能影响生物多样性。这种全局性的气候变化使随机事件变成一种非平稳的随机过程, 不仅其平均值发生改变, 同时方差也增大了, 因此, 极端环境事件的频率和强度也相应增加, 对它的研究是海洋工程的重大需求。

最近, 海洋工程的设计规范正在 ISO 的组织下, 在以往经验的基础上进行修订, 其中包括 API 和 DNV。设计规范中最不确定的因素就是随机发生的环境参数, 因此, 如果不考虑极端环境事件的因素, 就会使结构的安全与寿命得不到保证。

主要综述近年来人们最关心的海洋环境的三方面的极端事件 (即: 平静海况, 严峻海况和水面下的大波), 它们是: 畸形波的发生机制和描述、风暴下的巨浪预报和内潮波的产生与传播的研究进展。

1 畸形波的产生和描述

所谓“畸形波”(Freak)指的是在较平静的海况下偶尔发生的大波。一般说来, 其波高为有意义波高的 2 倍以上。由于波高大, 因此, 波浪载荷也急剧增加, 可导致结构破坏。人们认为, ringing 就是由畸形波激发的。

畸形波产生的原因有多种解释: 波-波或波-流相互作用: 如远方传来的涌浪叠加, 波浪与海流的逆向作用; 由于海底地形导致的波浪折射和聚焦: 当外海波浪传到等深线成凹形的浅水区时, 时有发生。有人认为畸形波是单峰大波, 我们认为用波群来解释和描述畸形波有一定合理性。所谓“波群”, 指的是连续发生的大波事件, 在窄谱的条件下, 可以由两个频率和波数相近的波叠加而成, 从而形成“波包”。以往的 Fourier 分析虽然可以得到各种频率成分所占能量的比例, 但是, 没有规定各种成分出现的先后次序。在波浪谱相同时, 有的可以出现波群, 有的则没有, 因此, 我们可以定义 groupness 来定量描述谱窗平均的波能时间序列偏离平均波能的方差:

$$GF = \frac{\sqrt{\frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} [E_s(t) - \overline{E_s}]^2 dt}}{\overline{E_s}}$$

$$E_s(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2(t+\tau) W(\tau) d\tau$$

$$W(\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{\tau}{T_p}, & |\tau| < T_p \\ 0, & |\tau| \geq T_p \end{cases}$$

其中, $E_s(t)$ 是谱窗平均 (瞬时光滑) 的波能时间序列 (SIWEH), $W(\tau)$ 是 Bartlet 谱窗光滑函数, T_R 为时间序列记录长度, T_p 为谱峰周期。从它的物理意义来看, 表明该物理量可以很好地描述连续出现大波的波群现象^[9]。

如果这种波包是不稳定的, 就会使波高不断增加, 导致大波和波破碎。这就是著名的 Benjamin-Feir 不稳定性。在海上由于有风的存在, Bliven, Huang & Long^[2] 的实验认为风会抑制 B-F 不稳定性。然而, Li, Hui & Donelan^[10] 等进行理论分析, 导出了相应的非线性 Schrodinger 方程:

$$i \frac{\partial A}{\partial t} + \mu \frac{\partial^2 A}{\partial \xi^2} = q |A|^2 A$$

$$\xi = \varepsilon(x - c_g t), \quad \tau = \varepsilon^2 t$$

式中: ε 为波陡, c_g 为群速度。从 $\frac{1}{2} \omega a_0^2 k^2$ 无量纲化的侧带不稳定增长率, 研究有风条件下的稳定性, 发现: 在弱风时, B-F 不稳定性依然增长, 在强风时, B-J 不稳定性抑制, 并为加拿大风水槽实验证实。同时, 还表明下侧带的增长率大于上侧带的增长率, 不仅解释了成长过程中风浪谱峰下移现象, 而且, 在弱风条件下, 由于边带不稳定可以导致波群能量的集聚, 波群高度增加, 从而产生畸形波, 乃至发生波破碎。

畸形波是典型的非线性、非平稳过程, 因此, 不能用 Fourier 分析, 可以用小波分析和 Hilbert-Huang 变换进行数据分析。后者采用本征模函数 (IMF) 进行分解 (EMD), 可以很好地描述振幅和频率随时间变化的现象 (Huang et al.^[8])。可以用数值或实验方法产生畸形波, 并用时域分析计算结构的载荷 (董艳秋^[29])。

2 风暴下的巨浪预报

近年来, 灾难性的热带风暴时有发生, 如: 2005 年美国墨西哥湾的 Katrina 和 Rita 两个 5 级飓风导致新奥尔良淹没, 众多石油平台和输油管线破坏, 一度石油工业停产。在我国出现了强台风和超强台风的等级, 如: 2006 年南海的珍珠台风也对海洋工程设施造成严重威胁。

台风或飓风是发生在热带海域的大气漩涡, 由于其风速大, 并携带大量水汽, 可以造成严重灾害, 如: 结构破坏, 房屋倒塌, 风暴潮和暴雨造成洪水和滑坡、泥石流灾害。热带气旋发生在纬度 5 度以上的热带地区海面, 海面温度 26 度以上, 有上升流和强扰动。热带气旋预报最大困难是路径和强度突变 (Li et al.^[12], 陈联寿等^[17], Chan^[3]), 在全球变暖背景下, 热带气旋的强度是否增加和如何计算 50 年一遇的风速仍然是一个有争议的问题。

风浪预报已经从经验走向数值预报。除了由风区和风时预报风浪参数外, 已经出现第三代风浪谱预报模式 (Tucker & Pitt^[14]):

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\bar{U} + \bar{C}_g) \bullet \nabla F = N_{input} + N_{inter} + N_{dis}$$

其中, F 是风浪谱, U 是流速, $\bar{C}_g$ 是群速度, 右端项是风生浪的能量输入, 波波相互作用的能量交换和由于摩擦和破碎的能量耗散。

我们特别关注风暴下的风浪预报, 利用 WAM 模式模拟了 8909 台风浪的风场, 波高场和波谱场 (Li, Yi & Du^[11])。台风的压力场和风场取为:

$$p = p_\infty - \frac{P_\infty - P_c}{\sqrt{1 + C_f \left(\frac{r}{L(\theta)}\right)^2}}$$

$$v_\theta = (-fr + \sqrt{fr^2 + 4r \left|\frac{\partial p}{\partial r}\right|}) / \rho$$

$$v_r = -\frac{v_\theta \partial p / \partial \theta}{r \partial p / \partial r}$$

右边的源汇项为:

1) 波能增长率

$$\beta = \text{Max}\{0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} (28 \frac{U_*}{C} \cos \theta - 1)\} \omega$$

2) 底部摩擦:

$$S_{bf} = -c \frac{k}{\sinh 2kd} F$$

3) 波浪破碎

$$S_{br} = -c \bar{\omega} \left(\frac{\omega}{\bar{\omega}}\right)^n \left(\frac{\alpha}{\alpha_{pm}}\right)^m F$$

$$c = -3.33 \times 10^{-5}, m = n = 2.0, \alpha_{pm} = 4.57$$

最近, Tracey 等利用 SWAN 风浪预报模式分析了 Katrina 飓风引起的巨浪 (Tracey et al.^[13]), 它与 WAM 的区别是, 本模式用波作用量密度作为因变量, 可以应用于近岸区。同时, 风生浪能量输入与波耗散与前者不同。对于风能输入可以采用 Komen, Jassen 和修正 Jassen 模型, 非线性相互作用包括了四阶项, 耗散项包括了由于在表面产生白帽的能量消耗, 风速数据来自 NARR, GFS, FNL。模拟结果与 11 个 NBDC (国家浮标数据中心) 的观测比较表明: NARR 分辨率较高, 在峰值附近, NARR 低估风速值, FNL 和 GFS 高估风速值。用 NARR 数据给出较低的有意义波高和较小的平均周期。用修正的 Janssen 公式可以在 0.04-0.5Hz 频率范围内很好地预测有意义波高和平均周期。

预报模式中, 波浪破碎的参数化尚有改进余地。Banner^[1]最近研究波浪破碎是一种阈值过程, 当能量增长超过阈值就会发生破碎, 否则就是 recurrent 过程。他还获得了破浪耗散的公式为:

$$S_{br} = bc^5 / g \Lambda(c)$$

其中, c 为相速度, $\Lambda(c)$ 为白帽长度。

3 内潮波的产生与传播

大气中由于温度和水汽含量的不同, 海洋中则由于压力, 温度, 盐度的差异导致密度层结, 所以在海洋中有温跃层存在。在密度稳定分层的介质中, 会产生介质内部的体波, 称为内波。内波广泛存在于大气

和海洋中，对于介质的混合，能量和物质的输送，光波、声波的传播都会有影响。对于海洋工程而言，我们主要关注非线性长内波或内潮的产生与传播 (Helfrich & Melville^[7], Garrett & Kunze^[4])。由于它携带巨大的能量，可以导致海洋结构物的破坏。

一般说来，由于密度差小于水表面上大气和水的密度差，因此，恢复力小，只要有小的扰动，就能掀起“轩然大波”。它的周期长，频率低，波长长。内波的特征频率为 Vasala-Brunt 频率，对于连续分层的介质，内波有不同的模态，群速度与相速度方向正交。

南海北部，东沙群岛是内波的频发地区 (方欣华，杜涛^[18])。按照南海的地形，在东部菲律宾以北，台湾岛以南，有巴士、巴林唐和巴布延海峡，那里的海底有一高耸的海脊。当每天潮汐发生往复运动时，就会产生内波。我们用有限体积法计算势流方程，自由面和固壁条件依旧，两侧采用辐射条件。模拟结果表明，在潮汐发生往复运动时，确实可以产生内波和孤立波群，主要参数，如：波幅，波速，最大流速。单峰历时等与实际观察一致 (见表 1)。

表 1 内波计算和实测结果比较

	模拟值	观测值
最大波幅/m	110	100
单峰历时/min	18	18.3
波速/(m·s ⁻¹)	1.81	1.9
最大流速/(m·s ⁻¹)	0.9	0.9

为了估计远离海峡的内波参数，我们进一步计算了内波在不平地形上的传播和演化过程。主要的方程采用推广的 KdV 方程：

$$\eta_t + c_0 \eta_x + c_1 \eta \eta_x + 3c_5 \eta^2 \eta_x + c_2 \eta_{(3x)} + \gamma \eta + f \eta |\eta| - \frac{1}{2} \varepsilon \eta_{(2x)} = 0$$

通过改变系数分析了非线性，高阶非线性，频散，变浅，摩擦和耗散等因素的影响，确定了这些系数的可能范围，进一步模拟了南海和苏禄海内波的传播，发现在东沙群岛以东洋面，内波波幅可达 100m 以上，而在东沙群岛以西，内波波幅一般衰减为 70m 量级，大致符合观测事实。

为了计算内波载荷，我们首先分析内波流场的特征是：界面上下存在速度剪切，并为观测事实证实；流场的水平速度相对均匀，并远大于垂向速度；根据水深比，波形可以发生下凹和上凸的转换等。相对于内波波长而言，海洋结构物可以视为小尺度物体，因此，Morison 公式适用，并且由于 Kc 数大，相当于单向流的情况，粘性力占主导地位 (Cheng & Li^[5])。我们计算了 Spar 和半潜式平台的结果，表明与表面波相比，内波载荷是不可忽视的 (Zhang & Li^[16])。

4 结 语

本文综述了海洋工程中极端环境事件的研究进展：用波群的观点来认识和描述畸形波，研究在风暴条件下的巨浪预报方法，分析在我国南海内潮发生和传播的规律。对于在风、浪、流作用下结构的流动载荷和动力响应，包括：ringing 激振，Mathieu 型不稳定和涡激振动 (VIV) 等流固耦合问题，在工程设计时必须予以关注。通过工程界、力学界、海洋界等科学家的共同努力，人类必将深化对环境、结构及其相互作用的认识，从而设计出经济、安全、可靠的海洋工程设施，为增加我国海洋石油天然气生产做出贡献。

致谢：对国家 863 项目 2006AA09A103-4 和中国科学院创新项目 KJCX-YW-L02 的资助以及袁玉堂，范平，张会琴承担的相关计算工作表示感谢。

参考文献：

- 1 Banner M L. Recent progress on understanding and modeling ocean wave breaking, in New Trends in Fluid Mechanics Research. eds. Zhuang FG & Li JC, 2007:16-22.
- 2 Bliven I F et al. Experimental study on the influence of wind on sideband instability. J Fluid Mech.,

- 1986, 162:237-250.
- 3 Chan JCL. The physics of tropical cyclone motion. *Ann. Fluid Mech.*, 2005, 37: 99-128.
- 4 Garrett C, Kunze E. Internal tide generation in the deep ocean. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 2007, 39:57-87.
- 5 Cheng Y L, Li J C, An L S. Stokes 5th order waves and its action on cylindric pipes. *Proc. of ISOPE*. 2006, 3:459-466.
- 6 Global Ocean Associates. Oceanic internal waves and solitons. 2002.
- 7 Helfrich K R, Melville W K. Long nonlinear internal waves. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 2006, 38:395-425.
- 8 Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1999, 31:417-458.
- 9 Kao J C, Lin J M. Computer simulation of ocean wave grouping. *Proc. of the 7th Congress of APRD-IAHR*. 1990: 339-343.
- 10 Li J C, Hui W H, Donelan M. Effects of velocity shear on the stability of surface deep water wave train. in *Nonlinear Water Waves*, Springer, 1988:213-220.
- 11 Li J C, et al. On typhoon wave evolution, in *Tropical cyclone disasters*, in *Tropical Cyclone Disasters*. eds. By Lighthill J, Zheng Z M. 1992:393-403.
- 12 Li J C, Kwok Y K, Fung JCH. Vortex dynamics in the studies of looping in tropical cyclone tracks. *Fluid Dynamics Res.*, 1997, 21:57-71.
- 13 Tracey T, et al. Analysis of high seas generated by Hurricane Katrina. *Proc. ISOPE 2007*, (3):1777-1784.
- 14 Tucker M J, Pitt E G. *Waves in Ocean Engineering*. Elsevier, 2001:329-376.
- 15 Veritas D N, et al. New DNV recommended practice DNV-RP-C205: environmental conditions and environmental loads. *Proc. of ISOPE*, 2006, 3:48-53.
- 16 Zhang H Q, Li J C. Wave loading on floating platforms by internal solitary waves. in *New Trends in Fluid Mechanics Research*. eds. Zhuang F G, Li J C. 2007:304-307.
- 17 陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤, 王继志. 热带气旋动力学引论. 北京: 气象出版社, 2002.
- 18 方欣华, 杜涛. 海洋内波基础和中国海内波. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.
- 29 董艳秋. 深海采油平台波浪载荷及响应. 天津: 天津大学出版社, 2005.

沿海港口布局规划及“十一五”期发展重点

蒋 千

(中华人民共和国交通部, 北京 100000)

沿海港口是国民经济发展的晴雨表, 改革开放以来, 港口吞吐量一直呈快速增长之势, 特别是进入 21 世纪以来, 沿海港口吞吐量增速更是飞速发展。上世纪 80 年代, 沿海港口吞吐量年均增速 8.2%, 由改革初期的 2.6 亿吨增长到 1990 年的 5.7 亿吨, 平均每年增加约 3000 万吨; 90 年代港口吞吐量年均增长速度 9.6%, 2000 年达到 14.2 亿吨, 平均每年增长约 68500 万吨; 进入 21 世纪, 港口吞吐量年均增速 18.9%, 2005 年达到 33.8 亿吨, 平均每年增长约 4 亿吨。同期外贸吞吐量增速也由 8.7%、12.5% 上升到新世纪的 19.1%, 2005 年达到 13.2 亿吨, 占港口吞吐量的 39%。

分析港口发展历程, 我国港口的发展离不开国家的改革开放, 离不开全国经济社会的发展, 我们紧紧抓住了全球经济发展和产业结构调整机遇, 更多地融入到世界经济发展的大环境中。改革初期, 国家在百废待兴中, 在加快恢复发展国民经济的同时, 我们抓住发达国家产业升级, 劳动密集型产业向外转移的机遇, 利用我国丰富的劳动力资源亟待释放, 经济发展缺乏资金的现实和改革开放的政策优先发展了沿海以加工业为主的外向型经济, 由此带动了沿海港口大发展热潮。改革开放使我国经济社会以任何国家从未有的速度在发展, 上世纪 90 年代后期, 我国经济经过相当的积累进入重化工业阶段, 抓住发达国家产业的又一次转移, 工业化的进程开始加快, 能源、原材料的需求带来港口吞吐量的加快发展。进入 21 世纪, 我国进入了全面建设小康社会和加快实现现代化的新阶段, 同时经济全球化的进程加快, 中国在更大范围、更深层次、更广的领域参与全球经济活动, 由此带动沿海港口吞吐量的更快发展。详细分析近年来港口吞吐量的增长原因。

1 港口吞吐量增长的因素

1.1 工业化进程加快, 重化工业发展拉动港口吞吐量增长

虽然 1995 年和 2005 年第二产业占 GDP 的比重都为 48% 左右, 但 2005 年第二产业产出的 GDP 比 1995 年增长了 5.8 万亿元。1995 年轻重工业比为 47: 53, 2005 年调整为 39: 61, 重工业快速发展带动了煤炭、原油、铁矿石等大宗能源、原材料等物资吞吐量的增长。

1.2 对外贸易的快速发展带动沿海港口吞吐量增长

我国的对外贸易一直在加快发展中, 进入 21 世纪外贸进出口额更是以 24.56% 的年均速度增长; 上世纪 90 年代以来我国利用外资规模不断扩大, 2005 年达 603 亿美元, 外资投入主要集中在沿海地区, 占全国的 87% 左右; 外资投入以加工制造业为主, 占外资投入的 70% 左右; 2005 年我国加工贸易额达 6905 亿美元, 占外贸进出口总额的 48.6%, 与 2000 年相比, 年均增长 24.6%。上述因素带动港口外贸吞吐量的增长, 同时加工贸易推动外贸集装箱吞吐量的增长。

1.3 区域经济发展及区域间交流带动港口吞吐量增长

我国幅员辽阔, 地区间经济发展水平和经济结构差异大, 北方地区是全国能源、原材料生产基地, 而华东和华南沿海地区经济发达, 资源匮乏, 加工工业密集。南北间经济互补性强, 海运成为“北煤南运”、“北油南运”等物资流通的重要通道。2005 年沿海港口吞吐量中内贸煤炭、石油和内贸集装箱吞吐量占总吞吐量的 31%。

1.4 主要产业发展带动吞吐量增长

煤炭、石化、冶金、基本建设等是目前重化工业发展阶段的主要产业, 如煤炭需求由 2000 年的 12.5 亿吨, 增至 2005 年的 21.1 亿吨; 原油加工由 2000 年的 2.24 亿吨增长到 2005 年的 2.86 亿吨, 而原油产量维持在 1.6—1.8 亿吨, 外贸进口原油不断增加; 钢产量由 2000 年的 1.29 亿吨增长到 2005 年的 3.52 亿吨, 国内铁矿石开采量难以满足需要, 外贸进口铁矿石快速增长; 我国的基本建设投资由 2000 年的亿元增长到 2005 年的亿元, 基本建设需要的钢材、水泥、砂石料等大量依靠水上运输, 是港口吞吐量快速

增长的原因之一。

2 未来港口面临的发展形势

2.1 全面建设小康社会和实现工业化要求沿海港口加快发展

党的十六大提出了全面建设小康社会的宏伟目标,2004年我国人均GDP已超过1000美元。参照国际经验,当人均GDP为1000~4000美元时进入工业化进程加快发展的时期,重化工业将成为经济增长的主要动力,对能源、原材料和工业品等的运输需求巨大,要求沿海港口继续扩大规模、提高效率、完善功能,以满足国民经济和对外贸易发展的需要。

2.2 参与国际经济技术合作与竞争,提高国际竞争力

全面参与经济全球化将使全球配置资源的冶金、石化等基础产业沿海地区布局,面向国际市场的加工工业也将进一步在沿海地区发展,以降低运输成本,提高国际市场竞争力。这些不仅要求沿海港口要满足外贸运输量快速增长的需要,同时要适应国际海上运输专业化、大型化的发展要求,进一步加快规模化、集约化港区和大型专业化码头的建设。

2.3 国家区域经济发展重大战略的实施要求发挥沿海港口优势

党中央提出的东部地区率先基本实现现代化、振兴东北地区等老工业基地和西部大开发等重大区域经济发展战略,要求沿海港口率先发展,从数量和质量两方面满足区域经济发展对海上运输的需求;东部地区率先实现现代化能够更好地带动中部地区崛起和西部地区大开发,沿海港口的快速发展也将为中西部发展外向型经济和连接国外市场提供条件。

2.4 发展综合运输体系,促进现代物流发展

沿海港口是综合运输大通道的节点,也是国内、国际交往的重要枢纽,主要港口的发展建设将促进综合运输大通道的形成。在全球范围内降低物流成本已成为提高产品竞争力的重要手段,参与国际竞争必须加快以港口为节点的现代物流的发展。

2.5 提高资源利用率,实现港口的可持续发展

资源不足是沿海港口今后发展的主要制约因素之一,要求沿海港口转变粗放型发展模式,走集约化发展道路,并利用科技进步提高港口资源的利用率,提高港口发展的现代化水平,实现可持续发展。

3 全国沿海港口布局规划

全国沿海港口布局规划的指导思想是:以科学发展观为指导,围绕全面建设小康社会的宏伟目标,着力提升沿海港口的现代化水平和国际竞争力,充分发挥沿海港口在国民经济发展中的基础性作用,并与其它运输方式共同构建布局合理、衔接顺畅、重点突出的现代综合运输体系。在这一指导思想下,规划过程中进行了十个专题论证,通过不同的角度研究沿海港口的合理布局。

根据全国沿海各港口在我国社会经济、综合交通、中大物资运输等发挥的不同的作用,通过专家决策系统分析论证,总体上将沿海港口划分为三个层次:主要港口、地区性重要港口和一般港口。主要港口是综合运输骨干网络的重要枢纽和能源、外贸及战略性物资的集散中枢,是沿海港口中层次最高、辐射面最广、功能完善的港口。地区性重要港口是对地区经济发展及对外开放发挥重要作用的港口,并对周边地区经济社会发展和对外交往有一定的辐射作用的港口。其他港口为一般港口。

针对当前对经济社会、对外贸易有重大影响的煤炭、外贸进口原油、外贸进口铁矿石、集装箱、粮食等货物,综合考虑腹地经济发展需求,港口资源及建设、经营条件,内陆运输的可能方案,国际海上运输船舶专业化、大型化、经营联盟化等因素,将影响运输费用、质量、时间等因素作为一个整体进行系统论证,在此基础上在全国沿海布局了大型专业化码头。

我国幅员辽阔,沿海地区南北经济差异较大,港口在各地区发挥的作用有所差异,本次规划在上述研究基础上,重点对各主要区域进行港口布局规划。

环渤海地区沿海港口的经济腹地矿产资源丰富、是我国的重工业及粮食生产基地,港湾优越、综合运输网发达。辽宁沿海港口以大连东北亚国际航运中心和营口港为主,包括丹东、锦州等港口形成的港口群将以集装箱、原油、铁矿石外贸进口运输为主。京津冀沿海港口以天津北方国际航运中心和秦皇岛港为主,

包括唐山、黄骅等港组成的港口群,是我国北煤南运的煤炭主要下水港,同时为集装箱、外贸进口原油、铁矿石运输服务。山东沿海港口以青岛、烟台、日照港为主,包括威海、东营等港口形成的港口群,主要为集装箱、外贸进口原油、铁矿石和北煤南运的煤炭下水运输为主。

长江三角洲地区经济发达、资源短缺,长江贯穿我国经济、资源梯度布局的东中西地区,沿海港口通过长江航运辐射深远。依托上海国际航运中心,以上海、宁波、连云港为主,充分发挥舟山、温州、南京、镇江、南通、苏州等港口作用,与沿海和长江南京以下港口一道,服务长江三角洲和长江沿线地区经济发展需要。沿海港口以能源、原材料输入和集装箱运输为主。

东南沿海地区隔海峡与台湾省相望,区内资源短缺、内陆交通欠发达,沿海港口以厦门、福州为主,包括泉州、莆田、漳州等港组成的港口群,以能源、原材料调入,集装箱及陆岛运输、海峡间对台客货运输为主。

珠江三角洲地区毗邻港澳,是我国改革开放的排头兵,资源短缺、外向型加工业发达,集装箱运输繁荣,能源、原材料运输需求旺盛。在巩固香港国际航运中心地位的同时,形成以广州、深圳、珠海、汕头港为主,相应发展汕尾、惠州、虎门、茂名、阳江等港口的布局。以集装箱、能源、原材料、粮食等调入为主,发展商品汽车、及客运。

西南沿海地区背靠资源丰富的西南地区,以湛江、防城、海口港为主,北海、钦州、洋浦、三亚等港口组成的港口群,在资源输出和向西部地区的经济辐射中作用突出。

4 “十一五”建设规划的指导思想、目标及重点

4.1 发展目标

根据全面建设小康社会公路、水路交通发展目标要求,到2010年沿海港口通过能力与吞吐量之比达到1:1。20万吨级以上原油和铁矿石接卸码头的布局和能力适应外贸进口原油和铁矿石运输的需要;集装箱干线港规模化港区基本形成;沿海港口航道条件大幅度改善;保税、加工、现代物流和临港工业等多种功能进一步拓展;管理水平、装备水平、服务水平等进一步提高,为港口现代化奠定基础。

4.2 建设重点

“十一五”期重点建设沿海主要港口和集装箱、外贸进口铁矿石、外贸原油和煤炭四大运输系统专业化码头;加大港口技术改造力度,提高港口的有效供给能力;积极推动老港区的功能调整,适应专业化、大型化、集约化的运输发展要求;大力提高港口公用设施服务水平,改善主要出海口航道及主要港口航道的通航条件;相应发展地区性重要港口,适度建设地方中小港口,继续改善岛屿交通条件。

重点建设沿海25个主要港口,以大型、专业化的集装箱、煤炭、石油、铁矿石、粮食等码头布局建设为主。重点建设上海国际航运中心(上海、宁波、苏州)、大连、天津、青岛、厦门、深圳、广州等集装箱干线港大型集装箱码头,以新建和改造相结合,相应建设支线港和喂给港;通过新建、改造提高北方秦皇岛、京唐港(王滩、曹妃甸港区)、天津港、黄骅港、日照港等煤炭装船港能力,除沿海主要耗煤企业自建码头外,提高长江三角洲和珠江三角洲公用煤炭码头转运能力;大连、天津、青岛、宁波、舟山、泉州、惠州、湛江、钦州、洋浦等港布局建设20万吨以上原油接卸码头;大连、营口、京唐、天津、烟台、青岛、日照、连云港、舟山、防城等港口布局建设20万吨级以上矿石码头,长江口内上海、苏州、南通等港口建设、改造接卸减载直达船的矿石码头。

重点建设长江口深水航道治理三期工程,广州港出海航道二、三期工程,深圳港铜鼓航道工程,并提高大连、天津、营口、青岛、连云港、厦门、湛江、防城港等主要港口航道的等级。

继续完善1000人以上岛屿的交通码头和接线公路建设,重点安排5000人以上岛屿的滚装码头和部分1000人以下岛屿陆岛交通码头及接线公路的建设。

Recent advancement in modeling seafloor dissipative mechanism in shallow water

Philip L-F Liu

(School of Civil and Environmental Engineering Cornell University Ithaca, NY 14853, USA)

Introduction

On the continental shelf and in the coastal zone, wind waves interact with sea floor and a number of dynamic processes take place. Bathymetric variations can affect both the direction of wave propagation and the spatial variation of wave heights, which is commonly known as wave refraction, diffraction and scattering. Irregular (random) bathymetry changes can also enhance wave reflection (e.g. Mei and Li 2004).

Interaction between ocean waves and sea floor can also leads to energy dissipation. Over a rigid seabed, shear flows inside a laminar or turbulent boundary layer contribute to significant wave attenuation over a distance of tens and hundreds wavelengths of propagation. If the sea floor is composed of sediments, a variety of dissipation mechanisms associated with the sediment rheology play important roles in enhancing wave damping and in modifying wave characteristics. For instance, the effects of percolation might become important if sea floor sediments consist of coarse sand or shingle. With finer sediment grain sizes, the sea bottom becomes deformable under wave loading and the effects of poro-elasticity need to be considered in estimating energy dissipation. When the sea bottom is silt or mud, the physical processes become more complex. Depending on the density of the mud, some may behave like a viscous fluid, while the others behave as visco-elastic materials or visco-plastic materials. Based on the viscosimetric measurements of mud samples, Krone (1963) reported that for concentration (by weight) between 10 to 110 g/L, mud along the east and west coast of the United States behaves like a Bingham plastic. Similar mud beds have been reported in many coasts, rivers, estuaries, around the world (Healy et al. 2001, Shermet and Stone 2003).

Extreme wave energy dissipation rates due to seafloor effects have been reported in the literature (e.g. Forristall and Reece 1985). Gade (1958) reported that there is a location in the Gulf of Mexico, where the attenuation of ocean surface wave due to mud floor is so great that fishing boats routinely use it as an emergency harbor for protection during storms. The most impressive field observations include the following the two reports: 1. Off the coast of Surinam, more than 90% of incident wave energy is dissipated across the 20 km wide shallow mudflats (Wells and Coleman 1981); and 2. Off the coast of India, 95% of wave energy is dissipated across 1.1 km wide mudbanks (Mathew 1992).

Within the framework of linear water wave theory, theoretical formulae for wave attenuation rate and the modified dispersion relationship of simple harmonic progressive waves are available if the sea floor properties and rheology can be specified a priori (e.g. Liu 1973; Dalrymple and Liu 1978; Yamamoto et al. 1978; MacPherson 1980; Mei and Liu 1987; Wen and Liu 1998; Ng 2000; Liu and Chan 2007). These formulae have been employed in wave evolution (phase-averaged) models, such as the WAM model (e.g. Komen et al. 1994) and the SWAN model (Booij et al. 1999). Recently, using the SWAN model, Winterwerp et al. (2007) investigated the wave attenuation in the Guyana coastal system that is characterized by very thick deposits of Amazon mud. The damping rate obtained from Gade (1958)'s two-layer model was used in their SWAN model. They reported that the model predicted significant wave attenuation and the computed changes in wave energy spectrum qualitatively agreed with measurements in Surinam. We remark here that while some of the theoretical results, e.g. percolation and poro-elastic theories, have been validated with experimental results, others have not. The lack of adequate facilities and instruments for measurements is one of the most important reasons for this shortcoming.

In shallow water, waves are usually nonlinear and possibly dispersive. Linear wave theory is no longer adequate. In recent years, Boussinesq-type (phase-resolving) models have been extensively developed as practical wave dynamic models in both intermediate and shallow water (i.e., from the continental shelf to the surf zone) (e.g. Wei and Kirby 1995, Lynett and Liu 2004). The phase-resolving feature of the Boussinesq-type models is essential in better understanding and predicting nearshore processes (Mei and Liu 1993). On the other hand, very little work has been done in formulating the sea floor dissipative effects within the framework of Boussinesq-type equations. Very recently Kaihatu et al. (2007, in press) presented a parabolic frequency domain model in which the effects of a viscous muddy seafloor were included by adopting the dispersion relationship (damping rate and frequency shift) for each harmonic component was included. The dispersion relationship in their model was based on Ng's (2000) work for a linear, simple harmonic wave with the assumption that the muddy seabed is very thin.

Although the frequency-domain models are useful, they require the periodicity spatially and temporally, which could be limiting in many cases.

To advance the predictive skills of wave models in the coastal regions where the sea floor are made of fine sediments, mud or other dissipative materials, it is essential to fill the knowledge gap in understanding the sea bottom dissipative processes under transient wave loadings. Once these mechanisms are properly described and understood, they need to be included in the Boussinesq-type wave models.

Boussinesq equations and bottom boundary layer

Based on the potential flow theory, the classical Boussinesq equations are well known and can be expressed in dimensionless form as (Peregrine 1967):

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla(H\bar{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \varepsilon \bar{u} \nabla \bar{u} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla H - \frac{\mu^2}{3} \nabla \nabla \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \right) = O(\mu^4) \quad (2)$$

where H is the total water depth, $\bar{u}$ the depth averaged horizontal velocity vector, ε and μ^2 are the small parameters representing the weak nonlinearity and frequency dispersion, respectively. It is well known that the continuity equation, (1), is exact and the momentum equation, (2), is derived with the assumption that $O(\varepsilon) = O(\mu^2)$. The classical Boussinesq equations have been expanded to include higher order nonlinearity and frequency dispersion (e.g. Liu 1994, Kirby et al. 1998).

To include the effects of sea floor dissipative mechanisms, the dynamic coupling between wave motions in the water column and the sea floor dynamics need to be considered. The present engineering practice, however, is to parameterize dissipative sea floor mechanisms and introduce a bottom friction-like term in the momentum equation, (2). For example, in the case of the dissipative effects caused by a bottom boundary layer, the traditional approach is to add a bottom-shear-stress term in the momentum equation. The bottom-shear-stress term is then modeled as a function of the free stream velocity, $\bar{u}$, (i.e. quadratic law). However, using a rigorous perturbation analysis, Liu and Orfila (2004) demonstrated that the leading order effects of a laminar boundary layer appear as a convolution integral in the continuity equation, (1), i.e.,

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla(H\bar{u}) = \frac{\alpha}{\varepsilon \sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{\nabla \bar{u}}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad (3)$$

where α^{-2} denotes the Reynolds number based on the phase velocity and wavelength. The right hand side term represents the boundary layer displacement effects. Furthermore, the bottom stress can be written analytically as:

$$\tau_b = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{\nabla(\partial \bar{u} / \partial \tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad (4)$$

According to (4), the bottom shear stress is a convolution integral, which is more weighted by the influence of the present time. It is also noted that the bottom shear stress is affected by the acceleration. It is clear that the frictional effect not only is out of phase with the free stream velocity but also has memory. Using (3) and (2), Liu et al. (2006) calculated the attenuation of a solitary wave and found good agreement with laboratory measurements. More recently, using the Particle Imaging Velocimetry (PIV) the author and his associates has measured the velocity inside the bottom laminar boundary layer under a solitary wave (Liu et al. 2007). As shown in Figure 1, the experimental data validates the theory. The bottom shear stress changes sign as the free stream velocity starts to decelerate. This also suggests that flow reversal occurs as the deceleration increases (see Figure 2), which might lead to flow separation and turbulence for high Reynolds number flows.

Additional experiments have been performed in the U-tube facility at Technical University of Denmark to investigate the incipient and evolution of turbulent boundary layer under a solitary wave (Sumer, TUD personal communication 2007). The preliminary data show that as the Reynolds number increases, shear instability occurs during the flow reversal phase and vorticity tubes are observed. As the Reynolds number is further increased, turbulent fluctuations are recorded during the deceleration phase. The bottom shear stress was also measured. The phase lag between the bottom shear stress and the free stream velocity is smaller than that for the laminar boundary layer, reducing from 45° to about 10° . An adequate theory is needed to describe the entire processes.