

第十二届中国海岸工程 学术讨论会论文集

中国 海洋工程学会 编



海洋出版社

第十二届中国海岸工程 学术讨论会论文集

DI-SHIER JIE ZHONGGUO HAI'AN GONGCHENG

XUESHU TAOLUNHUI LUNWENJI

中国 海洋工程学会 编

中国·昆明

2005年10月16日至10月19日

海洋出版社

内 容 简 介

第十二届中国海岸工程学术讨论会论文集主要内容有河口动力、演变及航道整治, 海岸动力、海岸泥沙及防浪建筑物, 近岸工程、工程技术及综合等。

图书在版编目(CIP)数据

第十二届中国海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, 2005.10
ISBN 7-5027-6456-9

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第113195号

主 编: 左其华
责任编辑: 阎 安
特邀编辑: 窦希萍 段子冰
责任校对: 孙 卉
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

2005年10月第1版 2005年10月南京第1次印刷

开本: 880×1230 1/16 印张: 56.5

字数: 1670千字 印数: 1~400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

软基上海岸工程建筑物的新型式	谢世楞, 等 (1)
风浪流共同作用下海岸泥沙输移和港口航道选择	罗肇森, 等 (7)
波浪作用下局部开孔沉箱内、外渗流场压力实验研究与数值计算	李玉成, 等 (17)
海岸带经济与生态协调发展管理模型及其应用	陶建华 (24)

河口动力、演变及航道整治

风浪作用下河口航道淤积的模拟	陆永军, 左利钦, 王红川, 李浩麟 (33)
粉沙质海岸航道淤积二维数学模型及其应用	张庆河, 夏 波, 张金凤, 杨 华 (40)
港域泥沙回淤计算分析	王义刚, 施春香, 闻云呈 (46)
河口潮位预报方法改进	吴 昕, 谭 亚 (50)
河口海岸数值模拟可视化系统	辛文杰, 陈志昌, 罗小峰 (54)
潮汐通道河口湾建港研究和实践	陆瑞兴 (59)
三维水流方程迭代求解时的不同步修正	陈雄波, 段子冰, 王 原 (62)
长江口深水航道治理工程一、二期工程泥沙回淤预报研究	窦希萍 (71)
长江口悬沙输运数值模拟	宋志尧, 孔 俊, 李瑞杰, 章卫胜 (77)
长江口三维水流数值模拟及流速相关性检验	于东生 (84)
南汇嘴控制工程及没冒沙生态水库数学模型计算研究	李提来, 高祥宇 (90)
上海国际航运中心洋山深水港区一期工程小洋山一横盖塘陆域形成工程三维潮流数学模型计算	谢 军 (98)
长江口南港河段底沙输沙试验	韩玉芳, 陈志昌, 王学兰 (102)
长江河口区上段河势近期演变	仇汉江, 蔡卫星, 黄志良 (106)
长江口北支建闸整治措施研究	夏益民, 徐 华 (113)
长江口入海泥沙扩散与沉积分布 ——兼论长江河口入海泥沙通量	吴华林, 王永红, 沈焕庭 (116)
长江口南港河床演变及南、北槽分流口稳定性分析	段子冰, 王义刚 (122)
长江口水沙通量的高频、高分辨率观测	汪亚平, 潘少明, H V Wang, 高建华, 杨 旸, 王爱军, 李占海, 吴 中 (127)
渭河来水来沙变化对下游河床演变分析	郭慧敏, 宋莉萱, 陈俊杰, 王大鹏 (136)
渭河下游防洪问题及治理对策	林秀芝, 伊晓燕, 王 平 (139)
刘家峡库区末端变动回水区航槽游荡型河道演变规律及整治原则	高亚军, 李国斌, 陆永军 (142)
黄河调水调沙对河口及其三角洲影响和评价	王开荣, 张永平, 茹玉英, 张启卫 (150)
黄河口河道演变规律新探	王万战, 张俊华 (154)
黄河口拦门沙的影响及其治理	李泽刚, 杨 明 (161)
黄河小北干流放淤与小浪底水库调度运用	李远发, 陈俊杰, 武彩萍, 王德昌 (166)
黄河下游河道数学模型介绍与验证	韩巧兰, 张厚军, 赵连军, 孙占盈, 王 英, 李广好 (169)
小浪底水库坝区扰动泥沙运行规律研究及扰沙方案计算	茹玉英, 张俊华, 陈大宏, 屈孟浩 (173)

瓯江口航道治理工程对策研究	赵良奎 (177)
“五场”模型在河口大型工程研究中的应用	
——以瓯江口温州浅滩围涂工程研究为例	李孟国, 蒋厚武, 吴以喜 (179)
曹娥江洪水特性及动床预报模型研究	朱军政, 唐子文 (187)
钱塘江河口治江缩窄后泥沙淤积成因分析	余 炯, 曹 颖 (192)
钱塘江河口治理后建港方案初步研究	韩海骞, 赵渭军, 李来武, 余祈文 (200)
溪口滩航道整治研究	李旺生 (205)
鸭绿江口航道治理研究	林天岩 (209)
鸭绿江下游与西水道治理探讨	杨 奇, 林天岩 (213)
珠江口伶仃洋整治开发对河势发展影响分析	许祥向, 丁晓瑛, 余顺超, 喻丰华 (216)
珠江口水沙数值模拟系统研究	张华庆, 沈 汉, 陈丽棠, 朱三华, 金 生 (222)
近三十年来磨刀门河口地貌动力数值模拟	包 芸, 吕海滨 (227)
灌河口航道工程和陈家港电厂码头二维潮流数学模型及泥沙淤积分析	高祥宇, 赵晓冬 (232)
东山大澳国家中心渔港工程水沙计算与分析	王小平, 冯卫兵, 孔 俊, 张红贵 (239)
京唐港外航道泥沙淤积试验研究	孙连成, 杨 华, 张庆河 (244)
莆田市木兰溪下游防洪工程数学模型计算	李国斌, 高亚军 (252)
澜沧江景洪大沙坝河段采沙及五级航道整治动床模型试验研究	
	吴宋仁, 唐安慧, 车寿川, 吴友仁, 马超锋 (258)
罗源湾滩槽演变及深水航道回淤研究	林国雄 (266)
设计引水不利年小北干流放淤模型试验研究	陈孝田, 罗立群, 赵新建, 王国栋, 吴国英 (270)
石浦港口门炸礁工程对港内影响研究	王义刚, 梁 亮, 王 震 (273)
人类活动引起复杂河网区主要水道低水位变化研究	
	陆永军, 贾良文, 莫思平, 罗宪林, 韩龙喜, 左利钦, 季荣耀 (277)
人类活动对闽江下游的影响研究	
——挖沙对分流比的影响	姚 静, 谭 亚, 陶建峰 (285)
丁坝坝头局部冲刷研究综述	邓绍云 (289)
浅析合适的丁坝间距	
	刘 燕, 江恩惠, 曹永涛, 张林忠, 张 清, 李军华, 万 强, 董其华 (292)
浅议河口与海岸的某些物理过程	金 鏐, 虞志英 (296)

海岸动力、海岸泥沙及防浪建筑物

波浪作用下无撑浮码头运动和受力状态试验研究	李京武 (311)
北部湾台风浪、风暴增水数值结果联合概率分析	沙文钰, 李淑君, 齐义泉 (320)
碎波带波高与周期联合分布核密度估计	陈子荣, 李志龙, 冯砚青, 李志强, 常瑞莲 (324)
求解 Boussinesq 方程无网格差分方法	王本龙, 刘 桦 (330)
沿岸流不稳定性运动实验研究	邹志利, 任春平, 金 红, 邱大洪, 孙鹤泉 (334)
一种新的浅水方程计算模式及其应用	孔 俊, 宋志尧, 张金善 (339)
非对称波状底床上泥沙输移探究	林 缅, 袁志达 (345)
不规则波近岸波浪场数值计算	张淑华, 王义刚 (350)
内波垂向结构的微分动力系统及其相图分析	叶春生, 沈国光 (357)
能量平衡方程式法求解不规则波波浪场的适用范围探讨	张淑华, 马晴晴, 韩满生 (362)
海岸平衡形态模型及其应用	李志龙, 陈子荣 (367)
大尺度气泡水下上升过程数值模拟	李绍武, 黄筱云 (372)
基于不确定性理论的风险分析法及其在防波堤设计中的应用	

.....	刘德辅, 逯义军, 李奉利, 荆 昆 (378)
砾石海滩在海岸防护中的作用	王爱军, 高 抒 (385)
沉箱式防波堤运动分析的一种概率方法	王元战, 唐照评, 董少伟 (391)
桥墩基础上波流研究	兰雅梅, 刘 桦, 薛雷平 (398)
作用于大圆筒结构上的波浪力数值模拟	杨艳增, 陈 兵 (402)
基于天气图的风场数值计算及风速修正	尹德军, 李 杰, 冯卫兵 (406)
削角王字块压顶斜坡堤特点及应用	孙精石, 陈汉宝, 王占英 (412)
固定复合式浪板对波浪反射率之研究	岳景云, 翁文凯 (416)
斜坡式防波堤堤心石动力特性试验研究	尹德军, 钟瑚穗, 刘 韬 (423)
开孔沉箱防波堤的波浪反射系数	朱大同 (428)
桩基透空堤消浪效果分析与探讨	杨宪章, 李文玉, 曲淑媛 (434)
桩式丁坝护滩保塘效果观测分析	赵渭军, 严 盛, 宣伟丽, 林炳尧 (439)
海浪资料的离散平滑方法	于定勇, 陈正寿, 柳 枝 (444)
直立堤上斜向和多向不规则波越浪量研究	赵凤亚, 俞聿修, 李晓亮, 鲁桂荣 (449)
中国近海潮波运动特征分析	章卫胜, 宋志尧, 张金善, 孔 俊 (455)
墩基防护材料最小稳定重量及护底块石失稳试验研究	卢中一, 高正荣, 黄建维 (462)
粤东后江湾近岸波浪要素变化特征分析	李志强, 陈子燊, 李志龙, 冯砚青 (468)
浙江省温州市苍南渔港潮流数值模拟计算及防波堤对港域淤积影响分析	
.....	王义刚, 蔡翠苏, 王 震 (473)
波浪作用下核电站海域防护断面稳定性研究	黄海龙, 王登婷, 张定安 (477)
9712 号热带风暴对渤海增水影响数值模拟	李艳芸, 李绍武 (481)
Derivation of tidal elevation at boundary grids with neural network	
.....	YU Xin-ying, HUANG Sheng-wei, LIU Jun-yong (487)
海南澄迈湾海域泥沙运动及岸线演变遥感分析	赵洪波, 杨树森 (491)
京唐港泥沙淤积及工程措施研究	孙林云, 刘建军, 孙 波, 韩 信 (494)
连云港港湾泥沙回淤分析研究	雷雪婷, 张 玮, 李国臣 (501)
抛坝促淤在海岛围垦中的应用	胡金春, 卢继清, 黄世昌 (506)
人工育滩的近岸补沙方法	孙 波, 孙林云, 陈雄波 (509)
上海南汇嘴岸滩演变及水体悬浮泥沙运动遥感研究	刘建军, 孙林云, 韩 信, 孙 波 (513)
上海临港产业区 5000 吨级码头详细规划潮汐水流物理模型试验研究	
.....	毛 宁, 范寅初, 徐 啸, 崔 峥, 余小建, 张 磊 (518)
设计潮位计算方法对比研究	黄 蕙, 董 霞 (522)
嵊泗县菜园镇金平小金鸡防波堤及围海造地工程对基湖沙滩影响研究	王义刚, 黄惠明, 林 祥 (526)
铁基湾围垦工程对潮流泥沙影响数值计算与分析	钱 进, 刘瑛琦, 朱素霞 (530)
岱山县衢山渔港护堤工程设计研究	王 震, 肖瑞安, 欧阳峰, 王云球 (534)
基于 DEM 的黄茅海滩槽演变分析	丁晓瑛, 许祥向, 余顺超, 喻丰华 (539)
基本遗传算法在围海规划中的应用研究	刘维东, 陈德春, 王志平 (544)

近岸工程

超大型浮体结构水弹性响应板模型分析	韩满生, 张淑华 (551)
飞机着陆期间浮式跑道瞬态水弹性分析	邱流潮, 刘 桦 (558)
海上结构物荷载分项系数的敏度分析	沈照伟, 金伟良, 李海波 (564)
简易海洋井口平台评估特性分析	孙政策, 林钟明, 陈瑞峰, 张继春 (568)
张力腿平台吸力式基础承载力有限元分析	林小静, 张建红, 孙国亮 (571)

拖曳声纳系统仿真运算研究	李英辉, 连 璘 (576)
均匀来流中圆柱涡激振动负附加质量	王 艺, 陈伟民 (582)
用梁模型定性分析超大型浮体水弹性响应的若干性质	张淑华, 胡金枝, 韩满生 (588)
正压冲固海洋平台地震瞬态响应分析	吴小俊, 王德禹 (595)
半潜式钻井船典型节点疲劳可靠性分析	张剑波, 张韶光, 肖 熙 (601)
渡驳门桥水动力特性数值研究	潘小强, 沈 庆, 袁 瑾, 陈徐均 (606)
浅海海底管线检测艇操纵性和运动仿真研究	张韶光, 张剑波, 肖 熙 (611)
船载勘探系统拖缆定位技术进展	杨 剑, 陈 峻, 何玮玮 (617)
Research on natural frequency and simplified model of jacket platforms in viscoelastic subgrade	JIANG Lin, ZHAO De-you (620)
The liquefaction and displacement of saturated sand under horizontal vibration loading by a cylinder	ZHANG Jin-lai, LU Xiao-bing, WANG Shu-yun, SHI Zhong-min (628)

工程技术及综合

我国潮汐能研发状况和展望	耿兆铨, 潘存鸿 (637)
潮汐发电技术研究现状与应用前景	李书恒, 朱大奎 (642)
弹性海床上裸露悬跨管道变形和内力分析	邢静忠, 柳春图, 段梦兰 (647)
使用自充填混凝土提升海岸结构物之质量	王和源, 李冠昱, 魏育超, 陈俊升 (654)
台州电厂煤码头腐蚀状况调查与分析	蔡伟成, 单国良, 蒋学军, 赵建华 (660)
厦门港某护岸工程砂基振冲密实处理	陈加庆 (666)
新材料新技术新工艺在长江口航道整治工程中的应用	陶 震 (669)
盐邵线航道工程中监理质量控制	韩冬平 (672)
渔港鱼货年卸港量的灰色对偶映射预测模型研究	陈德春, 毛丹红, 汪乐强 (675)
浙江临海红脚岩渔港船闸迭梁式钢闸门系统研究	陈德春, 刘 强, 汪乐强 (679)
真空预压联合碎石桩加固港口吹填堆场地基试验研究	丛 建, 曹永琅, 朱 成 (683)
加快丹东港出海航道建设振兴地方经济	王德成, 林天岩 (689)
镇海某化工码头钢管桩腐蚀状况调查与分析	李森林, 范卫国, 韩秀兰 (692)
海岸结构物指针生物之研究	郭一羽, 张铭榜, 施君翰 (695)
1997 年与 2002 年河口大型工程对长江口水体生境破碎化的影响比较研究	叶属峰, 刘 星, 黄秀清, 丁德文 (702)
On the cracks in saturated sand	LU Xiao-bin, S Y Wang, JIAO Bin-tian (708)
天津港北大防波堤围海造陆工程建设对生态环境和渔业资源影响	王志勇, 杨细根, 李皓菁 (714)
渔港景观美质评估研究	李丽雪 (719)
不同支座刚度对宽支座连续梁受力特性影响	吉 明, 陶桂兰, 陈奉琦 (724)
不同治河思想的碰撞	陈俊杰, 武彩萍, 郭慧敏, 汪大鹏 (727)
尺寸效应对基桩动测的影响	杨 杰, 沙晓东 (731)
大力发展临港产业经济建设东北东部现代化沿海港口城市	杜治明 (736)
低水头航运枢纽工程施工导流方案风险决策	金 凤, 黄贵标 (740)
调控城市生存环境大径量海水引入途径和方法	马 捷, 杜乐乐, 倪园芳 (746)
抓住有利时机加快丹东港航道及航标建设	季晓光 (750)
福建省长乐市外文武围海工程消险研究	陈德春, 王景灯, 汪乐强 (753)
钢筋混凝土锈蚀裂缝扩展影响因素敏感性分析研究	刘冠国, 沈德建, 吴胜兴 (758)
高压气囊搬运大型沉箱技术	廖玉珍 (761)
强夯法加固地基的分析研究	李建国, 吕秀杰 (766)

杭州湾某化工泊位改造工程钢管桩牺牲阳极阴极保护 范卫国, 李森林, 韩秀兰 (771)

河口淡水资源利用的制约及对策 尤爱菊, 韩曾萃 (774)

厚壁筒疲劳断裂寿命的灵敏性分析 张 伟, 王慧萍, 李跃辉, 崔维成 (780)

环氧树脂涂层钢筋在钢筋混凝土结构中的应用 曹建中, 刘冠国 (783)

换填法垫层厚度优化设计 梅玉龙, 陶桂兰 (786)

近距离水下钻孔爆破的防护技术 伊左林, 田庆华 (790)

海洋工程中海底管道系统压力试验 曲 杰 (796)

气囊搬运技术在茂名港扩建中的应用 张有钦 (801)

气蚀对材料性能与组织结构的要求 张 萍, 王泽华, 林萍华 (805)

浅析海洋污染 张莉萍 (809)

浅析上海滩涂湿地保护与有序开发的关系 金忠贤, 沈 英, 武俊夏 (812)

青岛市港口资源分析 王海斌, 于定勇 (817)

软基处理方法优化选择及处理效果分析 于定勇, 熊丛博 (823)

美国农业面源污染控制最佳管理措施探讨 邱卫国, 王 超, 陈剑中, 唐 浩 (830)

下一代数字海洋工程集成 IT 解决方案核心内容 李元亚 (835)

泥沙重点实验室试验与测量系统 张定安, 蔡守允, 戴 杰, 程顺来 (841)

大会专题报告

创新——长江口深水航道治理工程成功之源 范期锦 (847)

洋山深水港区工程规划及建设 程泽坤 (865)

苏通大桥主塔墩冲刷防护工程关键技术研究 高正荣, 等 (873)

软基上海岸工程建筑物的新形式

谢世楞^{1,2}, 吴 进¹

(1. 交通部第一航务工程勘察设计院, 天津 300222; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 根据 20 世纪 90 年代以来, 我国在软土地基上建造港口防波堤和河口导堤等海岸建筑物的工程实践, 介绍几种新开发的结构型式, 主要包括在塑料排水板加固地基上的半圆型构件混合堤; 在加固地基上或采用橡胶阻滑板的半圆型沉箱混合堤; 空心方块斜坡堤以及筒型基础防波堤等。分析表明减少作用在建筑物上的波浪力、增加结构抗滑阻力、减轻结构自重、加速地基固结或足使荷载传入较深地基中, 均是设计软基上海岸建筑物合理和有效的原则。对于在波浪循环荷载作用下呈动力软化特性的地基土, 文中将探讨海岸建筑物整体稳定的实用分析方法。

关键词: 海岸建筑物; 软土地基; 结构型式

在 20 世纪末, 本文第一作者曾分别在文献[1、2]中对国外和国内防波堤结构型式的进展作过综述, 但内容较少针对适用于软土地基的型式。当前, 由于港口建设向外海、深水发展的趋势, 而且自然条件较优越的港址和海岸地带大都被开发, 海岸建筑物将面临水深、浪高、流急和地基软弱等严峻的自然条件^[3], 因此, 适时地总结软基上海岸工程结构型式发展的现状并展望前景将是很有必要的。

对于建造在淤泥或软黏土上的防波堤或河口导堤等类似建筑物, 传统的结构型式主要有两大类^[4]: 一类是对软土地基进行置换或适当加固处理后采用抛石斜坡堤, 包括人工块体护面的抛石斜坡堤; 另一类是采用桩式结构。

20 世纪 80 年代, 国内成功地实施了爆破排淤填石法来建造抛石斜坡堤。这项技术已较广泛地应用于海岸工程建筑物, 它属于软土置换法的一种特殊方式。

在我国已对插入式(或称沉入式)大圆筒结构开展过不少研究, 但迄今尚无应用于以波浪力为主要荷载的海岸建筑物的成功实例。

本文将主要介绍自 20 世纪 90 年代以来, 在我国开发应用的适宜于软土地基的海岸建筑物新形式:

- 1) 天津港北大防波堤工程采用的在塑料排水板加固地基上的半圆型构件混合堤。
- 2) 长江口深水航道治理工程北导堤采用的在塑料排水板加固地基上的半圆型沉箱混合堤。
- 3) 长江口深水航道治理工程北导堤采用的底面设置橡胶阻滑板的半圆型沉箱混合堤。
- 4) 长江口深水航道治理工程北导堤采用的随机安放空心方块斜坡堤。
- 5) 天津港北大防波堤试验段采用的筒型基础圆筒防波堤。

上述 1)~4)项均由交通部第一航务工程勘察设计院(以下简称一航院)开发和设计, 第 5)项主要由天津港(集团)有限公司和天津大学建筑工程学院研究开发。

1 软基上的新结构型式

1.1 半圆型构件混合堤

通常所谓的半圆型防波堤或半圆形防波堤, 是指堤身采用由半圆形拱圈和底板组成的预制钢筋混凝土构件的防波堤。为了与随后发展的堤身采用半圆形钢筋混凝土浮式沉箱的防波堤有所区别, 在本文中对这两种型式的防波堤分别称为半圆型构件混合堤和半圆型沉箱混合堤。

由于作用于半圆型构件上的波浪力较小, 结构自重轻, 且圆弧面上的波浪压力均通过圆心, 对堤身不产生倾覆力矩, 地基应力基本为均布状况, 因此坐落在抛石基床上的半圆型构件混合堤, 是一种适合于地基条件较差的海岸工程结构型式。在天津港南疆和长江口深水航道治理一期工程中采用的总长度超过 18.5 km 的半圆型构件混合堤, 对地基均未作加固处理^[5,6]。

但是随着海岸建筑物向外海、深水和地基软弱地区的发展, 对于半圆型构件混合堤这种轻型结构, 也不得不进一步采取适当的地基加固措施, 以满足地基承载力和整体稳定性的要求。

根据天津港总体布局规划, 需在现有北防波堤以北地区建造新的防波堤, 称为北大防波堤, 以满足新建泊位的防浪和防淤要求。北大防波堤由外堤和内堤组成, 将来可在内外堤圈成的水域范围内填筑 33 km² 的新陆域。北大防波堤的东外堤和南外堤采用半圆型构件混合堤的总长达 11.7 km。东外堤和南外堤处的海底泥面高程约在 -1.4 m 至 -2.2 m 之间。极端高水位 5.88 m 和设计高水位 4.30 m 时, 最大的 $H_{1\%}$ 分别为 4.7 m 和 3.8 m, $H_{1\%}$ 指波列中累积频率 1% 的波高, 对应的平均周期 $\bar{T} = 8.1$ s。堤底下淤泥土的天然重度 $\gamma = 16.4$ kN/m³, 含水量 $W = 62.7\%$, 孔隙比 $e = 1.71$, 快剪内摩擦角 $\phi = 0.0^\circ$, 黏聚力 $C = 10$ kPa, -4.0 m 至 -5.0 m 高程处十字板剪切强度 $C_u = 12.21$ kPa。由于地基土的力学指标太差, 不采取地基加固措施的结构断面不能

满足地基承载力和整体稳定的要求,根据计算确定采取在地基中打设塑料排水板,以加速软土固结的措施。天津港北大防波堤工程东外堤的典型断面如图1所示。

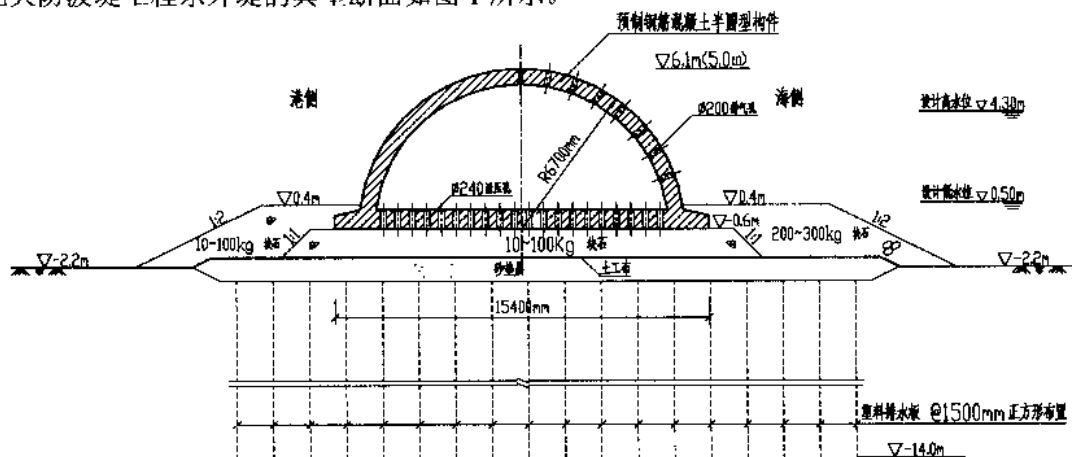


图1 加固地基上的半圆型构件混合堤

半圆型构件混合堤的设计堤顶高程为5.00 m,半圆型构件的半径 $R=6.7$ m,底宽15.4 m,纵长3.2 m。拱圈厚0.65 m,底板厚0.80 m。拱圈海侧开设有4排8 ϕ 200 mm的排气孔,底板开设有4排20 ϕ 240 mm的泄压孔。每个半圆型构件重181.7 t,由200 t起重船安放在抛石基床上。基床下为土工布及1.0 m厚的砂垫层,砂垫层下为间距1.5 m的塑料排水板,打至-14.0 m。根据计算,设计预留沉降量为1.1 m。施工期的2003年10月曾遭受接近设计波浪的大风浪袭击,半圆型构件混合堤的堤身稳定。

1.2 半圆型沉箱混合堤(一)

沉放在抛石基床上的各种型式沉箱结构是海岸和港口工程中建造防波堤和码头的常见型式。

沉箱结构本身的型式,除了传统的矩形沉箱外,已发展有圆筒沉箱、上部削角沉箱、梯形沉箱、开孔消浪沉箱以及双层圆筒开孔消浪沉箱等。

一航院在参加长江口深水航道治理工程二期工程整治建筑物结构设计方案竞赛中,对于北导堤的深水段,考虑到水深、浪大、工程量大、离陆上基地远以及工期短等条件,认为应以沉箱式混合堤为首选方案。另一方面,考虑了在长江口一期工程南导堤东段半圆型构件混合堤的设计和建造经验,进一步开发出了半圆型沉箱混合堤的新结构型式。

为了最终确定推荐半圆型沉箱结构,首先对相同设计条件下的矩形、梯形和半圆型沉箱方案进行了比较^[7]。选取长江口治理二期工程北导堤水底面高程为-4.0 m和-8.0 m的两个断面,代表较浅和较深的水深情况。利用日本合田良实的直立堤波压公式以及分别适用于梯形和半圆形结构的修正波压公式进行波浪力计算。不同型式沉箱的高度和底宽均相同,在同一水深条件下控制相同的抗滑安全系数,求得所需的稳定重量。若以 r 表示其他型式沉箱与半圆形沉箱稳定重量的比值,在较浅水深时,半圆形、前墙倾角 $\alpha=30^\circ$ 的梯形、 $\alpha=20^\circ$ 的梯形以及矩形沉箱的 r 值分别为1.0、1.10、1.25和1.46;而在较深水深时,此四个比值将为1.0、1.46、1.60和1.75。由此表明,在相同设计条件下以半圆形沉箱的稳定性为最好。而且不同型式沉箱稳定重量的差值,深水时比浅水时为大。因此半圆形沉箱更适用于水深较大的情况。

还应指出,在上述比较中,虽然控制抗滑安全系数相同,但由于波浪力对半圆形沉箱基本无倾覆力矩,地基应力均匀,而对矩形和梯形沉箱的基底应力接近三角形,对地基承载能力要求高,因此半圆形沉箱也更适用于地基软弱的情况。

根据设计方案比选结果,确定北导堤NIIB标段,即里程号N38+000至N46+600的8.6 km长的堤段,以及在此范围内的两座丁坝采用半圆型沉箱混合堤。NIIB标段水底面高程约在-6.4~-8.5 m之间。导堤和丁坝规定的设计波浪重现期为25 a,在设计高水位4.12 m时,NNE向的波浪要素为: $H_1\%$ 自6.32 m至7.68 m;平均周期 $\bar{T}$ 为7.76 s。

水底泥面下的土层分布情况大致为:泥面下第一层为砂质粉土或粉砂,厚度约为1.3~3.5 m。第二层为淤泥,厚度约2.0~4.1 m,该层土的含水量 $W=56.8\%$,快剪指标内摩擦角 $\phi=4.5^\circ$,粘聚力 $C=4.5$ kPa,固结快剪指标 $\phi=8^\circ$, $C=8$ kPa。第三层为淤泥质黏土。

设计的半圆型沉箱导堤,堤顶高程由总体设计确定为2.00 m,在高水位时属潜堤。每个钢筋混凝土浮式沉箱的纵长为19.94 m(安装长度20.00 m),最大重量约1180 t。与受起重能力限制,每个长度仅4~6 m的半圆型构件相比,整体性大为增加,且有利于在外海地区加快施工速度。由于沉箱结构可利用本身重量与箱内填砂重量共同来抗御波浪力,因此也比全部依靠钢筋混凝土自重的半圆型构件更为经济合理。

由于半圆型沉箱混合堤的结构较轻,当按常规试验的土壤力学指标核算时,可以不必采取特殊的地基加固措施,即能满足堤身整体稳定性的要求。但是随后对第二层淤泥土的动三轴试验表明,在模拟的波浪循环应力作用下,该淤泥土有明显的软化或强度弱化。在动三轴试验中要求对该层淤泥的土样,施加 1 000 次振动频率 f 为 0.13 Hz ($f=1/\bar{T}$, $\bar{T}$ 为设计波浪的平均周期) 的循环应力 σ_d , σ_d 经计算约为 8 kPa。试验得出土样在不固结不排水 (UU) 条件下的振后抗剪强度平均值为 5.32 kPa。与静三轴 UU 试验得出的平均抗剪强度相比,折减系数为 0.36。上样在固结不排水 (CU) 条件下的振后强度平均值为 21.6 kPa。当计算中采用淤泥土未固结前的动力折减强度指标后,将不能满足半圆型沉箱混合堤整体稳定性的要求。为此,设计确定采用在堤底下打设塑料排水板,以加速地基土固结的措施。在塑料排水板加固地基上的半圆型沉箱混合堤的典型断面如图 2 所示,安装沉箱时堤顶预留沉降量 1.4 m。

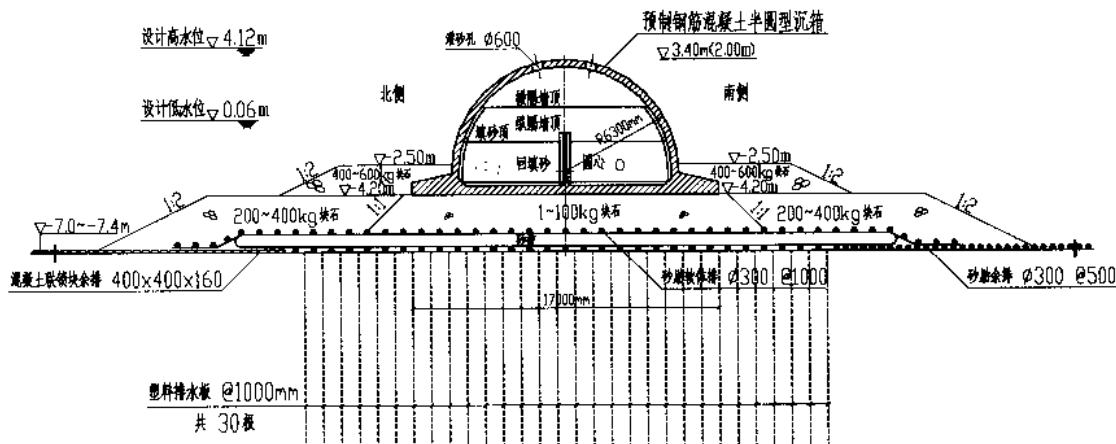


图 2 加固地基上的半圆型沉箱混合堤

半圆形沉箱的半径 $R=6.3$ m, 高 7.6 m, 底宽 17.0 m。拱圈厚 0.4 m, 底板厚 0.5 m。沉箱的两端有端板, 厚 0.3 m。沉箱内部有 1 道纵隔墙和 3 道横隔墙, 横隔墙厚 0.25 m, 纵隔墙厚 0.2 m。

1.3 半圆型沉箱混合堤 (二)

在 1.2 节中所述长江口治理二期工程北导堤 NIIB 标段中, 有 940 m 长的堤段, 在进行土壤动三轴试验证明第二层的淤泥土具有明显动力软化特性前, 已经抛有部分块石基床, 因此难以实施塑料排水板加固软基的方案。

由于半圆形沉箱的稳定性主要取决于抗滑稳定性, 而当作用在半圆形沉箱上的波浪力已定时, 抗滑稳定性又将主要取决于沉箱与抛石基床间的摩擦系数。通常钢筋混凝土沉箱与抛石基床间的摩擦系数 $\mu=0.60$, 若能提高 μ 值, 则在相同抗滑稳定条件下, 可以减轻沉箱结构包括箱内填砂的重量, 从而降低地基应力水平, 满足地基承载力和整体稳定性的要求。

参考日本采用橡胶阻滑板来提高建筑物与抛石基床间摩擦系数的经验, 设计提出了在半圆形沉箱底面设置橡胶阻滑板的新结构方案, 如图 3 所示。

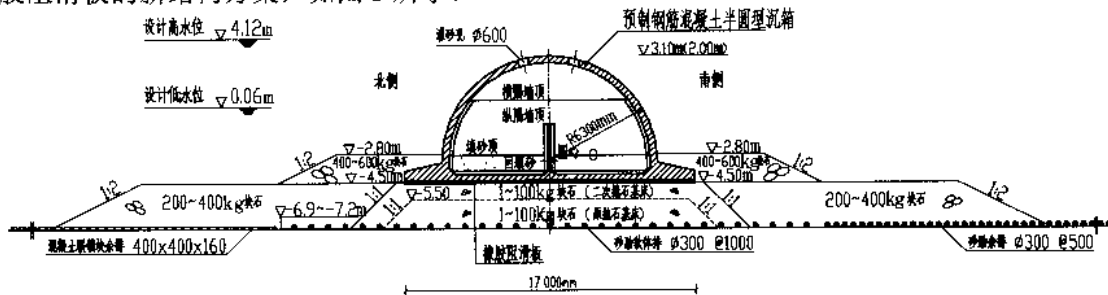


图 3 采用橡胶阻滑板的半圆型沉箱混合堤

橡胶阻滑板厚 30 mm, 在预制沉箱时固定在沉箱底板下。设计要求橡胶阻滑板与抛石基床间的摩擦系数 $\mu=0.75$ 。根据设计提出的技术要求, 国内橡胶产品厂商试制了橡胶阻滑板, 由天津大学建工学院进行摩擦系数试验, 一般 μ 值均可在 0.75~0.80。

1.4 空心方块斜坡堤

由软基上的建筑物应最大程度地减轻结构自重这一基本原则出发, 结合防波堤和导堤的功能和特点, 设想和开发了一种新型的空心方块斜坡堤^[8], 并将其作为长江口深水航道治理工程北导堤堤头部位软基段结构设计方案的征集中的一个应征方案。

北导堤堤头段长 2.6 km, 水底泥面高程约为 $-7.6 \sim -8.6$ m, 泥面下主要为物理力学指标差的淤泥质土壤。在软基段导堤结构方案征集中, 由多家设计单位提出了 20 个以上的应征方案, 包括在置换砂基上的人工块体护面抛石斜坡堤或人工块体护面的袋装砂堤心斜坡堤; 深层水泥拌和 (CDM) 地基上的半圆型沉箱混合堤; 沉入式钢筋混凝土大圆筒直立堤以及沉入式钢圆筒直立堤等。经过方案比选, 空心方块斜坡堤以其构思新颖, 自重轻适于软土地基, 施工方便适于外海作业, 造价合理, 稳定性好且风险性小等明显优点而被选用。

堤头段设计高水位 4.12 m 时, NNE 向的波浪要素为: $H_{1\%}=7.70$ m, 有效波高 $H_s=5.90$ m, $\bar{T}=7.76$ s。

堤头段的地质条件如下: 泥面下为厚度 3 m 左右呈流动和流塑状态的淤泥层, 含水量 $W=67.4\%$, 十字板抗剪强度 $C_u=3.12$ kPa。泥面下第二层为呈流塑状态的淤泥层, $W=57.0\%$, $C_u=12.0$ kPa。约在高程 -15 m 至 -17 m 以下为淤泥质黏土层。北导堤软基段的堤身断面如图 4 所示, 根据工程总体设计的要求, 导堤的堤顶高程为 2.00 m。堤身断面主要由随机安放空心方块填筑而成, 堤顶宽度采用为 6.9 m, 可基本满足堤顶有 3 块随机安放空心方块的尺度。堤身内外侧边坡的坡度采用 1:1.25, 边坡下方为水下抛石支撑棱体。

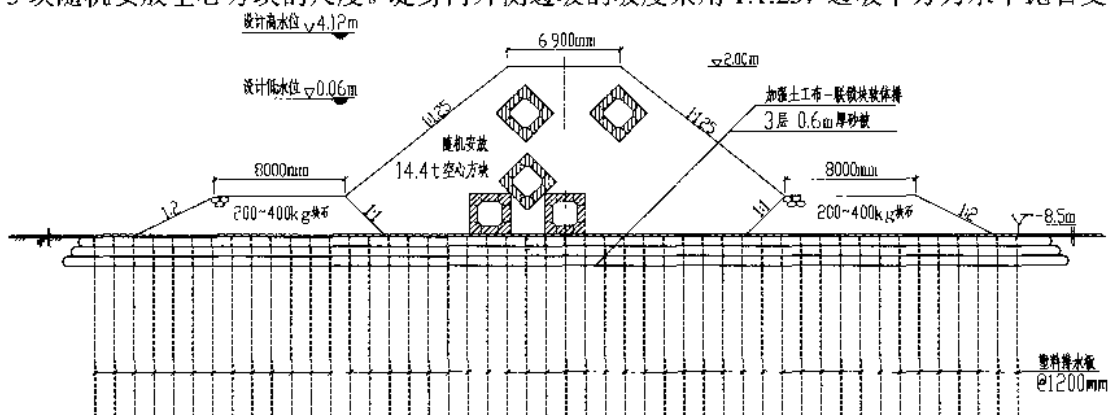


图 4 空心方块斜坡堤

空心方块的结构型式为钢筋混凝土空心立方体。设计边长为 2.4 和 2.5 m 的两种空心立方体, 其重量分别为 12.8 t 和 14.4 t, 提供水力模型试验作验证和比较。不规则波和规则波的试验表明, 在各种水位的设计波浪作用下, 重 12.8 t 块体的失稳率均小于 2%; 重 14.4 t 块体的失稳率为零。设计确定采用重量为 14.4 t 的空心立方体。C30 钢筋混凝土空心立方体的边长为 2.5 m, 从三个方向看均有 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 的方孔, 即相当立方体的 6 个面均由断面为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的 4 根方柱组成。空心立方体的空隙率 $P_1=63.3\%$ 。当随机安放空心立方体斜坡堤堤体的空隙率 $P_2=40\%$ 时, 可算得空心立方体堤体的水上和水下重度分别为 5.5 和 3.3 kN/m^3 , 即相当抛石堤相应重度的约 30%。

由于长江口地区淤泥土的动力强度弱化特性, 因此对其北导堤软基段的空心方块导堤采取了塑料排水板加速地基固结的措施。对于大部分建造在软粘土上的空心方块斜坡堤, 由于其自重仅为抛石斜坡堤的 30% 左右, 可以预料不必采取特殊的软基加固措施即可满足整体稳定性要求。

1.5 筒型基础圆筒防波堤

为了适应天津港近年来大规模建造防波堤等海岸建筑物的需求, 天津港 (集团) 有限公司和天津大学建工学院共同研究开发了一种适用于软土地基的插入式箱筒型基础防波堤的新结构型式^[9]。

插入式箱筒型基础防波堤结构, 主要由插入到软土地基中的无底方箱或圆筒型基础结构以及上部防波堤结构两部分组成。这种新型结构的特点是无需抛石基床而将上部荷载直接传入较深地基中。研究表明, 当箱筒型基础采取宽而相对浅的形式时, 基本可用一般刚性基础的设计方法进行计算。对于箱型基础, 箱内可设置隔墙; 对于筒型基础, 在建筑物的横断面上可设置 2 个圆筒。上部防波结构可为直立墙、直立圆筒或类似半圆型防波堤的平卧半圆筒等各种型式。上部结构通过箱筒型基础顶部的顶板与基础部分连成整体。上部结构与箱筒型基础可整体预制, 也可分别预制再安装连成一体。

插入式筒型基础圆筒防波堤试验工程, 于 2003 年开始建造于天津港北大防波堤工程的东外堤南端的延长线上, 设计总长度为 68.0 m。当地海底泥面高程约为 $-2.2 \sim -2.5$ m。设计高水位时重现期 50a 的设计波浪为 $H_{1\%}=4.1$ m, $\bar{T}=8.1$ s。

海底泥面下为淤泥和淤泥质粘土, 厚约 10~11.5 m, 其下为粉质粘土和粉土。淤泥土的含水量 $W=62.7\%$, 快剪指标 $\phi=0.0^\circ$, $C=10.0$ kPa, 固结快剪指标 $\phi=13.8^\circ$, $C=9.0$ kPa。

试验工程由 3 组长度为 22.0 m 的结构段组成。每个结构段有 4 个插入式圆筒, 在横断面上为 2 个圆筒如图 5 所示。4 个圆筒通过筒顶的盖板以及筒间的竖向连接墙连成整体。试验工程的 3 个结构段中, 有 2 个结构段采用钢筋混凝土圆筒基础, 另一结构段为钢筒基础。

在每组筒型基础结构的盖板上,沿堤的纵轴线排列 2 个外径为 10.5 m 的直立钢筋混凝土圆筒作为防波结构。

施工时,每组筒型基础结构包括 4 个圆筒、筒顶盖板和筒间连接墙,先在半潜驳上组装连为一体。由半潜驳将基础结构运至下水海域,通过半潜驳下潜使基础结构下水。再在基础结构的筒内充气,并浮运至现场。在现场定位后,通过在筒内排气和抽水,使基础结构下沉。最后是安装上部圆筒,并与基础结构连接成整体。

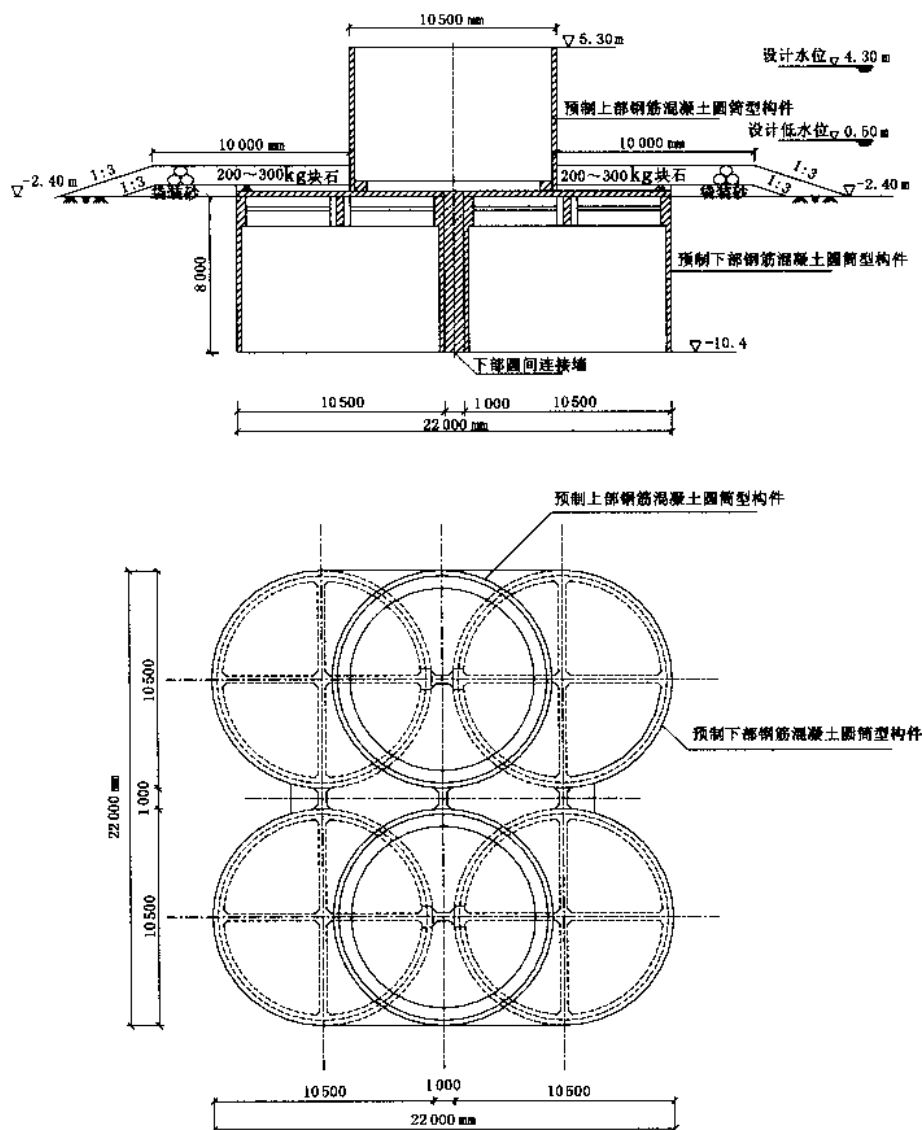


图 5 筒型基础圆筒防波堤

2 动力软化地基稳定性分析方法的探讨

在工程界,对地震荷载作用下砂性土的液化问题比较重视,但是对波浪重复荷载作用下软粘土的软化或强度弱化问题却研究得很少。由于在长江口治理二期工程发现了整治建筑物地基中的淤泥土存在动力软化现象,因此在设计中必须解决抗地基土软化的工程措施以及相应的分析计算方法。相关的研究确定应进行土壤的动三轴试验,以分析地基土动强度降低的规律。而为了开展土壤的动三轴试验首先必须提出符合工程实际情况的试验要求和规定。

对于地基土壤的动三轴试验,其主要参数有:

- 1) 试验土样的周围压力 σ_3 , 由各代表深度的上覆土层压力确定。
- 2) 试验土样的轴向静应力 σ_j , σ_j 相当波浪循环荷载作用前建筑物自重在地基土壤内引起的静应力。
- 3) 试验土样的轴向循环应力 σ_d , σ_d 相当波浪循环荷载作用下在地基土壤内引起的附加动应力。考虑到实际海浪的波列中波高大小不一的情况, σ_d 应合理分级。
- 4) 振动频率 f , f 应与作用波浪的周期相应。
- 5) 振动次数 n , n 应与作用波浪的历时相应。

对于如何确定波浪作用下的循环应力 σ_d 及其分级要求, 在国内外相关的规范和书籍中均无规定。因此设计中主要根据不规则波高分布规律以及循环应力对土壤软化作用的可能影响, 提出以下规定。

不规则波列中不同累积频率的波高引起的循环动应力值是不同的。根据交通部行业标准《海港水文规范(JTJ213-98)》中给出的有限水深中的波高分布关系, 选用不同累积频率的波高 $H_{1\%}$ 、 $H_{3\%}$ 、 $H_{5\%}$ 、 $H_{8\%}$ 和 $H_{13\%}$ 等。将各级波高以有效波高 $H_s = H_{13\%}$ 的倍数来表示, 计算各级波高在总波数(如 1 000 个波)中的出现个数。

考虑波列中的小波对地基土壤的软化将不起主要作用, 且由于在试验前对土的应力与应变的关系等尚不清楚, 因此按照海岸工程中通常以 H_s 代表波浪对建筑物作用最低有效值的假定, 试验中不计低于 H_s 的小波的作用。为此需调整 H_s 及以上各级大波的作用个数。然后根据上述波浪状况, 计算得出地基土壤动三轴试验中各层土的分级的循环应力 σ_d 值及相应的作用次数。

对长江口治理工程淤泥土的动三轴 UU 和 CU 试验主要成果已在 1.2 节中给出。为了配合在地基中打设塑料排水板、分期加载的工程措施, 又补充进行了模拟分期加载固结条件下的动三轴试验。试验土样先在相当于抛石基床和上覆土层的荷载条件下达到 85% 的固结度, 再施加相当于结构自重引起的静应力和波浪荷载作用引起的循环动应力。测得的振后不排水强度平均为 17.2 kPa, 与静三轴试验结果相比, 强度折减系数为 0.57。

由于目前国内外尚无成熟的基于波浪—结构—地基相互作用的动力分析方法, 为了解决工程实际问题, 设计研究采用基于动三轴试验得出的地基土振后强度指标的实用的准动力分析方法, 即土壤的抗剪强度采用已考虑波浪动力作用软化后的指标, 而地基承载力和整体稳定核算仍采用常规的静力方法。

以图 2、3、4 所示长江口治理二期工程的 3 个导堤设计断面为例, 对于淤泥土的振后强度分别按下述情况选用:

1) 对于抛石基床荷载, 采用动三轴 UU 试验的结果, 即不排水强度 $C_u = 5.32$ kPa。

2) 对于采取塑料排水板措施后的导堤设计断面, 采用考虑基床荷载固结 85% 的动三轴试验结果, 即不排水强度 $C_u = 17.2$ kPa。

按照上述实用的地基稳定性分析方法设计的长江口治理二期工程的半圆型沉箱结构导堤断面, 已经过 2004 年台风波浪作用的考验, 初步证明了抗地基软化的工程措施以及相应计算方法的合理性。

3 结 语

根据近年来我国在软土地基建造海岸建筑物的工程实践, 本文介绍了 5 种新开发的结构型式。采用半圆型构件或半圆型沉箱结构, 可有效地减少作用在建筑物上的波浪力。在半圆型沉箱的底面设置橡胶阻滑板, 则可通过提高结构与抛石基床间的摩擦系数来增加结构的抗滑阻力。无论是减少作用力或是增加抗力, 均可达到减轻结构自重满足地基稳定性的要求。空心方块斜坡堤的设计更是充分体现了在软基上的建筑物应最大程度地减轻结构自重这一基本原则。在半圆型构件或半圆型沉箱海岸建筑物的地基中打设塑料排水板, 以加速软土的固结, 在天津港和长江口治理工程中均已通过大风浪袭击的考验, 证明是一种合理和有效的措施。新型的插入式筒型基础防波堤是将波浪荷载直接传入较深地基中, 通过试验工程已初步表明这种型式具有较好的发展前景。

通过工程实例, 总结得出的设计软基上海岸建筑物的合理和有效的原则, 即减少波浪力; 增加结构抗滑阻力; 减轻结构自重; 加速地基固结或是使上部荷载直接传入较深的地基中等, 可供进一步发展软基上海岸工程结构的参考。

参考文献:

- 1 谢世楞. 海港防波堤工程的发展趋势. 见: 第九届全国海岸工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 1999. 1—11.
- 2 谢世楞. 90 年代我国防波堤设计进展. 水运工程, 1999, (10): 11—17.
- 3 谢世楞. 海洋经济发展中的港口工程产业. 见: 交通部第一届专家委员会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2004. 139—141.
- 4 谢世楞. 防波堤工程. 见: 严恺主编: 海港工程. 北京: 海洋出版社, 1996. 329—419.
- 5 谢世楞. 半圆形防波堤的设计和研究进展. 中国工程科学, 2000, 2(11): 35—39.
- 6 Xie S L. Design of semi-circular breakwaters and estuary jetties. Proc. XXIX IAHR Congress, Theme E.
- 7 谢善文. 不同型式沉箱混合堤的比较. 港工技术, 1999, (4): 4—6.
- 8 谢世楞, 谢善文, 吴进等. 软基上的空心方块斜坡堤. 海洋工程, 2004, (4): 1—6.
- 9 李 伟. 箱型吸力基础防波堤结构探讨. 港工技术, 2001 (增刊): 75—77.

风浪流共同作用下海岸泥沙输移和港口航道选择

罗肇森, 张晓艳

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 航道开挖后悬沙的淤积国内外已有若干半理论半经验的公式计算, 唯独骤淤的公式尚少。根据风浪掀沙、潮流输沙的原理, 参考窦国仁推导底沙输沙率的方法, 作者推导出风浪流(包括风吹流)共同作用下近底泥沙输沙率的计算公式。另外, 根据工作中的实践, 研究了浮泥挟沙力和浮泥输沙的两种计算模式。采用风浪预报、浅水波折射的概化模型, 预测建港地区及航道侧边的波要素; 结合输沙公式可计算得大风期航道的骤淤量。经黄骅港两年大风骤淤量的验证, 计算值与实测结果符合较好。风浪流的输沙与泥沙的起动速度、沉降速度关系密切。计算表明: 在相同风浪流的动力条件下, 0.015~0.05 mm范围内的粉砂质海岸淤积最多; 小于0.015 mm的淤泥质海岸以及大于0.05 mm的砂质海岸淤积都较少。公式的计算证明了建国数十年来在淤泥质海岸(天津新港 $d=0.005$ mm, 连云港 $d=0.0039$ mm)以及砂质海岸(湛江、防城、水东、洋浦、湄州湾等粤、闽两省的港口)开挖成功; 反之, 在粉砂质海岸, 如黄骅港、京唐港则开挖后淤积严重。文中引用两个例子, 作为粉砂质海岸航道减淤措施的建议。根据风浪流作用下大风期的骤淤, 结合以往的经验, 提出了航道走向及选港的建议。

关键词: 近底泥沙; 浮泥; 悬沙; 航道骤淤; 风浪流作用; 港口航道

1 风浪流共同作用下近底泥沙输移的基本计算模式

1.1 风、浪、流对泥沙作用机理及底沙的输沙率

开敞的海岸, 受波浪作用后, 当波浪的最大轨道速度 $U_{\max}$ 大于泥沙的起动流速 U_c 时, 泥沙将被移动和掀扬, 但波浪的轨道速度 U_b 几乎是封闭的, 故泥沙只在原地上扬和下沉; 使泥沙前进的是波浪的传质速度 U_t , 另外潮流流速 U_s 、风吹流速 U_w 也起到输沙的作用, 故应该是 U_t 、 U_s 、 U_w 的合成速度 V_m 起输沙作用, 它们的合成方向是泥沙输移的方向。

在水流作用下, 窦国仁研究过底沙输沙率, 得出底沙输沙率公式^[1]。参考此方法, 令 d 为泥沙粒径, H 为水深。单位时间单位面积上波动水流具有的能量为

$$E_b = K \gamma H U_b^3 \quad (1)$$

当 $U_{\max} > U_c$ 时, 泥沙能够移动。现讨论某一床面, 其中具有 n_1 颗泥沙, 面积为 $\frac{n_1}{m} \frac{\pi}{4} d^2$ (m 为沙粒平面密实

系数), 如果从讨论的床面上移走 n_2 颗泥沙, 跳离床面的速度为 U_s , 则

$$K \gamma H (U_{b \max} - U_c) \frac{n_1}{m} \frac{\pi}{4} d^2 = n_2 \frac{\pi}{6} d^3 (\gamma_s - \gamma) U_s \quad (2)$$

当底沙正常输移时, 即床面上不发生冲刷和淤积时, 单位时间从床面上冲起的泥沙数量应等于同时间落在床面上的泥沙数量, 即

$$n_2 U_s = n_3 \omega \quad (3)$$

式中: n_3 为讨论范围内床面上运动的泥沙颗粒; ω 为泥沙颗粒的沉降速度。底沙掀动以后, 由波浪的传质速度、潮流速度和风吹流速的合成速度 V_m 输移泥沙, 以 $K_1 V_m$ 表示其输移速度, 则底沙单宽的输沙量为:

$$q_{sb} = \gamma_s \frac{n_3}{n_1} \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\pi}{6} d^3 K_1 V_m \quad (4)$$

联解式(2)、式(3)求出 n_s , 代入式(4)得

$$q_{sb} = KK_1 \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{giH(U_{b\max} - U_c)V_m}{g\omega} \quad (5)$$

式中: i 为能坡, 其值为 U_c'/CH 。进一步化简后得:

$$q_{sb} = \frac{K_b}{c_0^2} \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} (U_{b\max} - U_c) \frac{U_b^2 V_m}{g\omega} \quad (6)$$

式中: K_b 为综合系数; $c_0 = C/\sqrt{g}$, (C 为 Chezy 系数)。

当 V_m 方向与计算区域(例如航道)有一夹角时, q_{sb} 式子右边应乘上 $\sin \theta$ (θ 为 V_m 与航道的夹角)

$$q'_{sb} = q_{sb} \sin \theta \quad (7)$$

1.2 输沙公式中有关数值的计算

考虑到我国泥沙计算中常用平均流速^[2, 3], 故下面的有关参数均按平均值计算。

1.2.1 波浪的轨道速度

半周期内, 按时间平均及垂线平均计的波浪轨道速度的平均值为:

$$U_b = \frac{2h}{T} \left[1 + 4.263 \left(\frac{H}{L} \right)^{1.692} \right] \frac{1}{\sinh \frac{2\pi H}{L}} \quad (8)$$

$$U_{b\max} = 1.57 U_b \quad (9)$$

1.2.2 波浪的传质速度

一个波周期内质点的平均漂移速度或物质输移速度为:

$$\bar{U}_t = \frac{1}{2} \pi^2 \delta^2 C \frac{\eta}{\sinh^2(kH)} \quad (10)$$

$$\eta = 1 + 57.04 (H/L)^{2.2} \quad (11)$$

1.2.3 输沙系数 K_b

K_b 与泥沙的粒径大小有关, 经多次实践, 可用下面的经验公式近似计算

$$K_b = (0.12 \sim 0.18) d^{0.765} \quad (12)$$

K_b 在 0.05~0.10 之间, 并且 $K_b + K_s = 0.10$, K_s 为计算悬沙回淤时使用的系数, 悬沙的淤积应乘上 $K/0.10$ 的系数。

1.2.4 泥沙的起动流速和沉降速度

泥沙起动流速 U 和泥沙沉降速度 ω 以使用武汉大学水利电力学院公式^[4]较好, 适应于粗细沙, 也便于程序计算或数值试验。

当 $d < 0.03 \text{ mm}$ 时, 在含盐的水流中, 泥沙发生絮凝, 需用泥沙的絮凝沉降速度, 根据作者的研究, 可由下式计算^[5]:

$$\omega_f = 0.097 \cdot 4d^{0.18} \quad (13)$$

式中: d 的单位为 mm; ω_f 的单位为 cm/s。

1.2.5 合成速度 V_m

采用

$$\vec{V}_m = \vec{U}_d + \vec{U}_t + \vec{U}_w \quad (14)$$

U_c 使用海港水文规范公式

$$U_c = 0.03W \quad (15)$$

式中: W 为风速 (m/s), U_c 为潮流速度, 一般取涨潮流的平均值。根据黄骅港外航道的计算经验^[3], 当 U_c 、 U_s 、 U_w 在航道不同侧时, $\bar{U}_d$ 、 $\bar{U}_t$ 、 $\bar{U}_w$ 会互相抵消。实际上, 三项中, 每一项都对输沙都有作用, 故实际计算时, 应取:

$$V_m = |U_d| + |U_t| + |U_w| \quad (16)$$

1.2.6 不同泥沙粒径的适用范围

1) 公式 (6) 适用于 $d_{50} > 0.01 \text{ mm}$ 的粉砂质海岸和砂质海岸, 当泥沙粒径为 $0.125 \text{ mm} > d > 0.03 \text{ mm}$ 时一般界定为粉砂质海岸^[7], 其起动流速小, 沉降速度也小, 故输沙量特大, 公式 (6) 反映了这种情况。

2) 当 $0.007 \text{ mm} < d_{50} < 0.01 \text{ mm}$ 时, 也可按式 (6) 计算, 但 ω 采用式 (13) 计算值; 当 $d_{50} < 0.007 \text{ mm}$ 时, 则按浮泥计算。

2 风浪流共同作用下浮泥的输移

2.1 浮泥的挟沙力

大风天悬沙的挟沙力与水流流速、水深及海底的泥沙重度有关, 根据 20 世纪 50 年代新港的实测资料, 重新整理后得到:

$$S = 0.296\gamma_s \left(\frac{\gamma}{\gamma_w} \right)^{12.8} \frac{V^2}{gH}$$

(17)

式中: S 为平均含沙量 (kg/m^3); H 为水深 (m); V 为流速 (m/s); γ_s 为淤泥的湿重度 (t/m^3); γ_s 、 γ 分别为泥沙颗粒的重度和水的重度, 在有风吹流及波浪流时

$$V = |U_b| + |U_w|$$

(18)

若无风天时平均含沙量为 S_1 , 风天时按上式计算为 S_2 , 则风天的计算含沙量为

$$S_m = S_1 + S_2 + 2\sqrt{S_1 S_2} \quad (19)$$

2.2 浮泥的输沙率

2.2.1 浮泥输沙率公式

令波动轨道速度 U_b , 作用于单位面积上浮泥的冲刷率为 E , 则相当于单位水体的挟沙量为

$$S_f = E/U_b H$$

(20)

在波浪传质速度 U_c 、风吹流速度及潮流速度的合成速度 V_m 作用下, 单位宽度的输沙率为

$$q_{sf} = V_m H E / U_b H = V_m E / U_b$$

(21)

又

$$E = M_c \left(\frac{U_{b\max}^2}{U_c^2} - 1 \right) \quad (22)$$

当输沙方向与航道有夹角时