

第十一届中国海岸工程学术讨论会暨
2003 年海峡两岸港口及海岸开发研讨会
论文集

中国海洋工程学会 编



海洋出版社

第十一届中国海岸工程学术讨论会暨 2003 年海峡两岸港口及海岸开发研讨会 论文集

DI-SHIYI JIE ZHONGGUO HAI'AN GONGCHENG XUESHU TAOLUNHUI JI 2003 NIAN

HAIXIA LIANG'AN GANGKOU JI HAI'AN KAIFA YANTAOHUI LUNWENJI

中国海洋工程学会 编

中国·三亚

2003 年 10 月 30 日至 11 月 2 日

海洋出版社

内 容 简 介

第十一届中国海岸工程学术讨论会暨 2003 年海峡两岸港口及海岸开发研讨会论文集主要内容有河口动力、演变及航道治理, 海岸动力、海岸泥沙、港口泥沙淤积及海涂围垦, 港口波浪及防浪建筑物, 海洋平台, 施工技术, 救捞技术, 港工建筑物的材料、结构及地基基础等。

图书在版编目 (CIP) 数据

第十一届中国海岸工程学术讨论会暨 2003 年海峡两岸港口及海岸开发研讨会论文集/中国海洋工程学会编. —北京: 海洋出版社, 2003.10

ISBN 7-5027-5979-4

I. 第… II. 中… III. ① 海港—港口工程—学术会议—文集 ② 海岸工程—学术会议—文集 IV. ① U65-53 ② P753-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 091538 号

主 编: 左其华

责任编辑: 杨海萍 张 荣

特邀编辑: 窦希萍 王 红 段子冰

责任校对: 葛九峰 吴永宁

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

2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月南京第 1 次印刷

开本: 880×1230 1/16 印张: 35

字数: 1050 千字 印数: 1~300 册

定价: 198.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

目 录

大会主题报告

关于波浪渗流力学.....	邱大洪 (1)
长江口深水航道治理工程中斜坡堤护面结构设计的探讨.....	范期锦 (13)

河口动力、演变及航道整治

风暴对长江河口冲淤影响的预测模型系统.....	丁平兴, 孔亚珍, 胡克林 (18)
潮汐河口水流挟沙力公式探讨.....	宋志尧, 孔 俊, 金 鹰, 童朝锋 (21)
长江口、杭州湾水动力数学模型研究.....	窦希萍, 李提来 (25)
关于导堤结构透水性对整治功能的影响.....	范期锦 (35)
上海国际航运中心洋山深水港区总体规划方案模型试验研究... 徐 啸, 余小建, 崔 峥, 毛 宁 (40)	
苏州工业园区华能电厂温排水数学模型研究.....	李提来 (45)
杭州湾、长江口潮致余流及其对物质输运作用的模拟研究.....	朱首贤, 朱建荣, 张文静 (55)
天津港深水航道泥沙淤积分析.....	孙连成, 蒋睢耀, 邛 志 (64)
长江口北槽河床沉积物的冲刷特性.....	黄咏烨, 李文正, 金 镠, 呼和敖德 (72)
基于 ADCP 的长江口流场分析.....	于东生, 田 淳 (80)
象山港水体交换能力数值研究.....	王长海 (85)
基于逆变张量的二、三维潮流模型.....	童朝锋, 严以新, 宋志尧 (91)
惠安外走马埭围垦工程对航道影响分析.....	王义刚, 李 洁, 谭 亚 (98)
稳定黄河河口入海流路的新思路.....	刘曙光, 郑永来, 李希宁, 程素斌 (103)
日照港煤码头航道浚深工程流场计算.....	曹宏生, 李瑞杰 (109)
西江下游百顷头至横山航道整治工程研究.....	莫思平, 杜德军, 罗肇森 (115)
减轻桥墩基础施工期局部冲刷试验研究.....	卢中一, 高正荣 (120)
崇海公路大桥潮流数值模拟计算与分析.....	曹民雄, 蔡国正, 唐存本, 周良平, 顾炳元 (126)
黄河三角洲面积增长的偏最小二乘回归分析.....	李谊纯, 高祥宇, 孙效功 (134)
大铲湾集装箱码头区开发方案研究.....	韩玉芳, 辛文杰, 朱伯荣, 王学兰 (138)
长江口动量系数计算与分析.....	章卫胜, 宋志尧, 孔 俊 (144)
河流的分流与汇流模式的应用研究.....	葛 亮, 严以新, 高 进 (149)
苏南运河镇江段淤积及发展趋势分析.....	管 宁, 韩乃斌, 孙宝林, 张力平, 姚坤兴, 唐玉仁 (153)
赣江市汉滩群浅滩演变及航道整治工程整治效果分析.....	刘晓东, 贺 平 (159)
赣江鸡心洲滩河床演变及航道整治工程的研究.....	贺 平, 刘晓东 (164)
长江口北支整治方案比较分析.....	陆 伟, 葛小军, 曹芙蓉, 黄志良 (168)
海南省乌场港泥沙回淤分析.....	龚文平, 云 光, 王道儒 (175)

海岸动力、海岸泥沙及防浪建筑物

随水污染物在波浪场中的扩散特征和扩散系数的实验研究.....	邱大洪, 张宁川, 孙鹤泉, 李广伟, 蒋 锋 (180)
透空式水平板波浪总上托力试验研究.....	周益人, 陈国平, 黄海龙, 王登婷 (187)
随机波浪对透空式建筑物上部结构冲击作用的数值模拟.....	任 冰, 王永学 (195)

不规则波与开孔沉箱相互作用.....	陈雪峰, 李玉成 (205)
规则波作用下近岸区直墙波浪力的试验模拟.....	王登婷, 左其华 (210)
床面特性对直立圆柱绕流的影响.....	薛雷平, 刘 桦, 刘海江 (216)
规则前进波列传递于三维波形底床的研究.....	陈阳益, 程嘉彦 (221)
前进波在同心圆底床及浅滩上之折射和波向线相交 Caustic 情形的解决.....	陈阳益 (227)
基于高阶 Boussinesq 方程的波流相互作用数值模拟.....	王本龙, 刘 桦 (234)
热带台风暴潮数值模拟研究中的热点问题.....	张金善, 陈永平, 张长宽 (239)
不同波浪传播数学模型精度的比较.....	张洪生, 朱良生, 尤云祥, 张 军 (247)
非线性波浪波面追踪的一种新模式.....	孙大鹏, 郭海滨, 李玉成 (257)
根据浮筒垂荡和纵、横摇测量数据分析波向谱的方法.....	刘同木, 李远林 (266)
用时变雷诺方程模拟孤立波与有台阶的半圆型防波堤的相互作用.....	刘长根, 陶建华 (272)
以缓坡方程式模拟波浪通过多孔介质结构物的波浪变形.....	许泰文, 林宏仁, 蔡金晏 (278)
缓坡方程在舟山沥港渔港波浪浅水变形数值计算中的应用.....	王义刚, 杨 东, 冯卫兵 (285)
温州中心渔港防波堤工程区平面二维潮流数学模拟及底床冲淤计算....	李孟国, 时 钟, 吴以喜 (289)
The inspection and evaluation of wharf structures.....	Lee, Hsien Hua (294)
多个弧形离岸堤波浪绕射之研究.....	岳景云, 曹登皓 (300)
砂质海床液化潜能平面分析.....	
——以台湾东北部海岸地区为例.....	简连贵, 张志新, 张耀显 (307)
底泥海抛扩散及地形变迁扩散模式.....	杨文衡 (313)
养滩海域漂沙浓度扩散的研究.....	钟英凤, 许泰文 (320)
孤东海区滩面蚀退研究.....	于定勇, 柳 枝, 张寒元 (326)
粉沙质海岸上开敞航道的淤积计算.....	孔令双, 焦桂英, 曹祖德 (331)
青岛近岸海洋环境条件极值组合初探.....	董 胜, 宁 萌, 曹丛华, 刘德辅 (338)
长江口水域波浪数值计算.....	王红川, 左其华, 潘军宁 (342)
不同波浪沿岸输沙公式之比较.....	李 杰, 冯卫兵 (347)
ComGIS 在海岸动力数值模拟处理中的应用.....	胡吉明, 李志文, 汪文强 (351)
伶仃洋龙穴岛港口岸线开发条件初探.....	辛文杰, 罗小峰, 钱明霞 (354)
嵊泗中心渔港综合治理工程防波堤堤前波动底流速的量测与分析.....	
.....	郑金海, 钟瑚穗, 过 达, 杨 越, 吴维登 (359)
渔港工程减淤措施初步研究.....	徐成伟, 董 壮, 郝嘉凌 (364)
遥感技术在滨海地区资源调查中的应用.....	
——以天津市滨海新区为例.....	刘建军, 孙林云, 周益人, 韩 信 (370)
江苏滩涂开发中的环境问题.....	韩进萍, 徐 敏 (377)
苏北辐射状沙洲淹没型潮汐汉道的初步研究.....	陆培东 (382)
江苏岸外条子泥沙洲潮盆体系的地貌发育.....	陈 君, 张忍顺 (387)
宁波港集装箱码头陆域围堤抗浪性能研究.....	黄海龙, 陈国平, 王 驰 (393)
大丰港 5000 吨级码头引堤堤头冲刷模型试验研究.....	赵晓冬, 王向明, 吴丽华 (398)
基于人工神经网络的潮位预报方法.....	黄才安, 王学兰 (402)
东南沿海设计波高分布律适用性分析.....	汪 艳, 冯卫兵 (404)
粤西水东湾近岸波候特征.....	陈子燊, 李志强, 陈 思 (408)
浙江省海塘台风毁坏成因分析.....	李寿星, 陈希海, 黄世昌 (413)

近岸工程、施工技术及其它

基于损伤修复后的海洋平台结构疲劳寿命评估.....	金伟良, 龚顺风 (419)
---------------------------	----------------

软土地基条件下大型圆筒海岸结构稳定性设计与计算..... 王元战, 华蕾娜 (426)

桶基受水平动载时饱和砂土地基的液化和变形数值模拟..... 张金来, 鲁晓兵, 王淑云, 张建红 (431)

冰与结构相互作用的一种自激振动模型..... 鲁晓兵, 王义华, 张金来, 张建红 (434)

基于人工神经网络系统的船撞桥概率估算方法..... 戴彤宇, 聂 武, 冯 峰, 刘伟力 (438)

养殖网箱试验中网衣相似准则的讨论..... 李玉成, 桂福坤, 张怀慧 (442)

植入式钢板组合体挡土墙的变形有限元分析..... 吴梦喜, 牛恩宗 (449)

大型平台模块海上整体安装..... 毕远涛 (454)

海工工程 GPS 远距离打桩定位系统..... 徐维钧, 倪建夏 (457)

两栖科技工程的研究与应用..... 万 卷, 张力群, 马海峰, 赵炳山 (462)

海洋能源利用进展..... 高祥帆, 游亚戈 (467)

地质雷达在围垦抛填工程中的应用..... 马洪蛟, 蔡 辉, 孙典红 (473)

吉林石材料应用于野溪护岸生态效益的研究..... 陈鸿辉 (476)

高性能水中混凝土于港湾工程品质管理的研究..... 王和源, 魏启玲 (480)

港湾混凝土应有的防蚀考虑..... 王和源, 林仁益, 钟志仁 (485)

港湾高性能混凝土耐久性设计与检测的研究..... 王和源, 钟志仁 (490)

我国海域勘界的理论与实践探索.....

——以江苏海域勘界为例..... 徐 敏, 刘 伟 (496)

深圳某码头工程位移沉降技术总结..... 夏松如 (502)

基于数据库和 OLE 技术的水流泥沙数据管理系统..... 郝嘉凌, 陆永军, 陈界仁 (506)

围海堵口水力计算软件的总体设计..... 陈德春, 王志平, 吴继伟 (511)

小塔山水库溢洪道消力池的消能防冲效果研究..... 洪大林, 王亦斌, 缪国斌, 张思和 (515)

表土自由水容量估算的两种方法..... 马进荣, 刘天成, 赵晓冬, 陈少明 (519)

“5、7”空难失事飞机搜寻打捞工程回顾..... 苘耀辉, 毕远涛 (523)

长江河口大型工程对生境破碎化影响的初步研究..... 叶属峰, 纪焕红, 曹 恋, 黄秀清 (528)

长江河口工程区小尺度生态环境状况及其保护..... 王金辉, 黄秀清, 彭立功, 程祥圣 (534)

关于江苏省船闸运行使用中存在的问题及对策..... 徐 斌 (539)

潜水及高压专业著作中容易混淆的一些概念..... 毛方琯 (543)

海洋工程科技论文中插图的处理方法..... 段子冰, 王 红 (546)

我国海洋工程领域重要科技学术期刊.....

——China Ocean Engineering 介绍..... 吴永宁, 杨 红 (549)

关于波浪渗流力学

邱大洪

(大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

1 研究的意义

我国拥有广阔的海域, 所属海域面积约占陆地总面积的三分之一, 海岸线全长 18 000 多公里, 并有 6 500 多个面积在 500 m^2 以上的岛屿。根据《联合国海洋法公约》, 我国所管辖的海域有近 $300 \times 10^4 \text{ km}^2$ (相当于我国陆地国土的 $1/3$)。在我国的这些海域和海岸带内, 港湾、渔业、水产养殖业、矿藏、波浪、潮汐能资源均甚丰富。但目前这些资源优势尚未转化为经济优势, 海洋环境条件也不尽如人意, 给海洋资源和人类健康带来威胁与危害。中国要解决好人口、资源和环境问题, 在 21 世纪中叶进入中等发达国家水平的一条重要出路就是走向海洋。但我国现阶段总体上海洋开发程度低, 并存在着对某些资源的浪费和环境的破坏。就沿海 15 m 等深线以内的 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$ 海和滩涂面积而言, 目前只利用了 5% 左右。因此我国下一世纪在海洋开发利用和海洋环境保护方面前景广阔、任务艰巨。

海洋开发利用首先必须依赖于海上工程设施。由于海洋的环境条件十分恶劣, 随着海洋开发利用的规模日趋复杂和庞大, 就要求人类对海洋环境条件的认识、工程设施的设计理论与建造技术等必须有很大的提高, 以期在保证安全可靠的前提下节约工程造价、缩短建设周期、减少维修工作和延长使用年限, 这必将给海岸和近海工程领域的发展带来前所未有的机遇与挑战。

随着国民经济的发展, 我国的海岸和近海工程将朝着大型化和深水区发展, 结构物所处的环境将更为恶劣, 工程造价大幅增长。目前, 我国主要关心的海上工程技术有: 深水养殖技术, 深水筑港技术, 深海油气田等矿藏开发技术等等。

近年来, 由于海上油田的不断发现, 世界各国都十分重视海上油气资源的开发利用。随着对海底管线、海洋钻井平台等海工建筑物需求的不断提高和大量兴建, 分析海上工程地基土的稳定性就显得特别重要。有些海上钻井平台、采油平台处在粉砂层或砂层上, 因风浪作用而引起地基的可能液化和破坏尤其应值得重视。1995 年胜利 3 号平台因地基砂土液化导致平台丧失工作能力, 被迫挪动井位, 损失巨大。国外早在 20 世纪 40 年代就对波浪周期荷载作用下的海床土体动力反应等一系列海洋土力学问题展开了研究, 但我国直到 20 世纪 70 年代随着渤海油田的开发才真正引起人们的重视。

由于沉积环境、组成成分及天然固结状态等条件的不同, 使得海洋土的物理特性及其工程特性与陆地土存在较大的差异。另外由于海洋土经受巨大自重及小波浪的长期作用和暴风巨浪或地震等非常环境荷载的瞬间作用, 使得海床土体处于复杂的应力状态。一方面, 循环的波浪荷载在海床表面上产生了往复的波浪水压力, 在这种循环波压力作用下, 正应力的偏差与剪应力及其组合而成的总偏差应力均在循环地变化着, 海床中土体的主应力轴发生了持续不断的旋转, 与陆地上地震条件下不考虑主应力轴旋转效应的地基情况相比, 主应力轴旋转使得海床的孔隙水压力增长特性及抗液化强度发生了显著的变化。另一方面, 陆地上场地或地基在地震作用下, 振动孔隙水压力是由于基岩地震动在上覆土层所引起的循环剪切应力所直接产生的, 同时由于地震历时极短, 往往土层可看作是不排水的, 因此孔隙水压力的不断累积可能导致了砂性土的液化。而在波浪作用下, 海床中超静孔隙水压力的上升乃至液化破坏是由循环的表面波压力直接作用所致, 液化是交变产生的, 海床中土体的循环压密与循环液化交替地进行, 显然其孔隙水压力产生与上升及液化的机理与地震情况完全不同。同时由于波浪作用时间往往较长, 作用期间土层发生了排水, 因此在海床动力分析中应该考虑部分排水效应。另外, 海洋建筑物与下覆海床地基及周围的流体是一个复杂的三维耦合体系, 波浪荷载不仅直接作用在海床表面上, 而且通过作用在结构上的波浪力间接地传递给下覆地基, 因此在海洋建筑物及其地基的分析与设计应该合理地考虑三者的相互作用效应, 从而这是结构力学、流体力学与土力学学科交叉综合点。

然而由于实验技术条件和认识水平的限制, 以往对于波浪荷载作用下海洋土的变形与强度特性的研究

仍然套用了陆地上对于一般场地与地基的试验方法与分析方法,没有充分地考虑海洋土的自身特点,也未能合理地计入波浪作用下海床的实际应力状态及其变形与破坏机理。

以上提到的在开发和利用海洋资源中所遇到的许多科学和技术问题,在这里不可能都加以一一探讨和叙述。这里将只对其中的一个重要问题,波浪对海床的作用,以及由此而引起的对建于其上的海工建筑物的作用进行探讨和论述。

2 主要研究内容

波浪在多孔介质内的渗流力学是近十多年来发展起来的一门新兴学科。但在水利和土木工程界对多孔介质内渗流的研究,则已有一百多年的历史,1856年,法国工程师达西(Herri Darcy)通过试验提出了线性渗透定律,即著名的达西定律,为渗流理论的发展奠定了基础。1889年,茹可夫斯基首先推导了渗流运动的微分方程式。此后,许多数学家、地下水动力学科学工作者和地质工作者对渗流数学模型、解析解法和数值解法进行了大量研究工作,取得了许多研究成果。

波浪在多孔介质内的渗流作用包括两方面,一是作为多孔介质的海床或人工抛石基础,在与之相接触的海工建筑物上作用有波浪渗流力,二是以多孔介质作为材料所建造的海工建筑物中的波浪渗流作用。上述的这些渗流作用比较复杂,它涉及波浪在可渗海床或多孔介质构成的基础或结构表面和内部的传播,和由此所引起的孔隙水压、渗流、孔隙水压的积累等现象,以及这些可渗结构对波浪的影响。

重力式结构是主要的海工建筑物之一。波浪荷载是其主要荷载,波浪在海床或基础内引起的渗流对建筑物的渗流力是极其重要的组成部分。近年来随着海岸和近海工程的迅速发展,提出了一些复杂的技术问题,其中很多是关于基础及基础破坏的问题。研究结果表明,基础的破坏可能是由于多孔介质海床或基础中波浪渗流引起的。动孔隙水压及其渗流可引起某些海上结构物周围基础的侵蚀,也可产生作用于结构物底部的浮托力和倾覆力矩。

海床的破坏一般有以下几种形式:滑移破坏、强度破坏、液化和侵蚀。而任何一种破坏形式都与海床中的孔隙水压力分布和积累有密切关系。饱和或未饱和的粉砂土、砂土在周期性波浪荷载的作用下,土微元的体积要缩小,由于孔隙水来不及排出,引起孔隙水压的增加。增加的孔隙水压一部分耗散掉,另一部分积累起来。这样,随着荷载周期数的增加,超孔隙水压不断积累增大,增大到一定程度,土体的有效荷载完全由孔隙水来承担,土体的有效应力为零,砂土便达到了初始液化。

波浪在海洋表面传播时,其对海上建筑物地基的作用可以分为两种:一是波浪力通过结构物传递到地基土体中,从而构成了所谓的“波浪—结构—地基”耦合相互作用系统,如海上采油平台,这一部分的动力稳定研究已有不少分析结果;另一种就是波浪作用在海床上引起的动力反应,即“波浪—地基土”耦合相互作用系统。

波浪与海床的相互作用对波浪场和海床内的渗流场、应力场和变形场都有着一定的影响,它能够引起波浪场的修正,同时波浪的传播也能够引起海床的变形、滑动和液化。这种相互作用趋于导致波浪的衰减和土的强度降低。当海床变软,糙度增大,这种相互作用影响的增强将更为明显。

地震是作用于砂土的周期性荷载,关于地震引起的砂土液化问题,地震工作者已进行了大量研究,而且开展的较早。对于构成海床的土体,波浪是经常作用的周期性荷载,因此波浪荷载在海床中引起的一些问题也可以借鉴地震工作者的经验。但是,在一般情况下,海床及海工结构物与地基的动力响应、变化特征以及失稳方式与陆域上自由场及地基的形态有显著的区别。这主要是由波浪荷载的特性引起的。风浪引起的波浪荷载与地震荷载在幅值大小、频谱特性、持续时间及传递方式等方面具有很多不同之处,表1列出了它们的某些基本区别。

表 1 波浪荷载与地震荷载对土体作用的区别

	地震荷载	波浪荷载
荷载形式	循环剪应力	振荡波压力
输入地点	地基深处	海洋表面
输入方式	对土颗粒和孔隙水同时施加质量力	进入孔隙中的波压力施加在土颗粒表面
频率	0.5~5 Hz	0.05~0.2 Hz
持续时间	几十秒	几小时及几天
排水条件	近似不排水	部分排水
孔隙水压特征	单调累积	振荡孔隙水压+残余孔隙水压
液化现象	一次性发生	重复发生

事实上,波浪在海底土层中所引起的应力状态有其独特的性质,主要特点是土体单元的主应力轴周而复始的 180° 转,它会明显降低砂性土的强度,并影响孔隙水压的分布。而波浪具有频率低、幅值大、持续时间长的特点,因此其作用不可忽视。

同时,海洋土的成分、工程性质、天然固结状态都与陆地土之间存在着明显的差异。而由于海洋环境特殊,海底取土样极其困难而且昂贵,获得高质量的原状土样很不容易,对于无粘性土则尤其如此。土样受到的扰动主要来自以下三方面:(1) 土样从水下提出后,总应力突减,应力状态也由各向异性变为各向同性;(2) 取样时,波浪作用于取样器扰动土样。在运输过程及制备试样过程中,土样还可能受到振动与挤压;(3) 由于压力减小,土样中溶于水的气体释放出来,饱和度变化。这就要求在勘察与试验过程中尽量谨慎操作,最大可能地降低扰动程度。因此,目前国内对海洋土的动力试验研究,基本上是采用根据海洋勘测得到的土样数据,在实验室内自制土样来进行的。

总之,风浪作用期间地基土的变形和孔隙水压的反应是一个非常复杂的问题,其计算分析主要建立在对循环荷载下土的应力—应变—强度特性的认识以及对地基的稳定性、变形的动力分析基础上,它涉及到土的基本性质(强度、压缩性、超固结比、排水条件、基本参数随荷载循环次数的变化、惯性)等许多方面,因而到目前为止还没有一种被普遍接受的计算方法。然而,对问题的某些方面作些合理化的假定,发展一些具有一定精度,也包括一定不确定参数的分析方法是符合工程实际需要的。

对于海床水—土相互作用,中外学者已经做了不少研究,主要有两个方面。

2.1 不考虑在波浪连续作用下孔隙水压的积累,假设土体为弹性体或粘弹性体,对海底土层的运动场和超孔隙水压进行求解

其中,不同的学者采用了许多不同的假定。主要有以下几类:(a) 海床不透水,可压缩;(b) 海床由刚性的孔隙介质组成,流体不可压缩或可压缩;(c) 不可渗海床,骨架可变形;(d) 海床为孔隙介质,骨架可变形,流体可压缩。这种分类是根据问题的难易程度来分的。

Putnam(1949)假定海床是由各向同性、刚性不可压缩的多孔介质组成,孔隙水的运动满足 Darcy 定律,海底水平、海床均匀,首次研究了由可渗海床引起的粘性阻尼对表面波的影响,得出了有限深砂层中控制渗流压力的 Laplace 方程和求解能量消散函数的方程。

Reid 和 Kajiural^[1]发展了 Putnam 的近似方法,得出了达西定律能够很好地用于分析多孔介质内不稳定渗流运动问题的结论。同时,他们也指出了 Putnam 的问题,就是将波浪场和海床分离求解。

Moshagen 和 Torun^[2]基于孔隙流体可压缩的假定,研究了波浪引起的多孔介质中的渗流运动,他们发现在波浪引起的海床渗流分析中,如果考虑了孔隙流体的可压缩性,将会明显改变孔隙水压值的大小。

Yamamoto^[3]基于海床为可渗透和可变形、孔隙水可压缩的假定,采用 Biot 固结理论来研究波浪引起的有限或无限深海床的响应。为了验证理论结果,同时进行了模型试验,结果表明二者吻合很好。Yamamoto^[4]还针对成层的多相均匀土层,给出了解析解,并与试验进行了比较,得出了满意的结果。

Madsen^[5]基于海床为可渗和可压缩、土介质为各向异性的假定,对无限厚均匀海床得到了孔隙水压的解析解。

S Okusa^[6]认为土的非饱和性对波浪作用期间土的应力和超孔隙水压有很大影响,并针对非饱和土,采用一个孔压系数 B ,对无限厚海床求得解析解。

邓伟和顾小芸^[7]根据海底土层与海面波浪作用的机理推导出以粘弹性模型为基础的无限深海床在波

浪作用下的反应,其中应力应变关系采用了简单的伏格特线性模型。

Tsai 和 Lee^[8]采用土介质为均匀、各向同性的线弹性假定,基于 Biot 理论,求得了驻波作用下无限深海床中的孔隙水压力,并与实验进行了比较,基本相符。

Lin 和 Jeng^[9]对有限深度海床,考虑了不同水深处渗透率的不同,用有限元方法进行了求解。

2.2 考虑在波浪连续作用下土中孔隙水压的积累,对海床的液化和破坏进行分析

这方面国内外学者研究不多,所见文献和论文甚少,主要有:

Ishihara 和 Yamazaki^[10]认为土中荷载为双向振动,主应力大小不变、方向改变。通过实验确定土在 100 个周期的循环荷载作用下达到液化(双幅应变 5%)时的剪应力幅值对围压的比值,从而可以确定在斜坡上传播的波浪作用 100 个周期引起的液化深度。

陈仲颐和李向维^[11]采用一维太沙基理论和 Seed 反正弦模型进行了海底—波浪动力耦合求解,主要分以下三个步骤:

- 1) 利用应力计算程序 RESPON 在考虑海水—海底动力耦合以及土体非线性粘弹性情况下计算波浪引起的剪应力 τ_w ;
- 2) 在计及主应力旋转特性的液化曲线上查得液化周次;如果采用的是三轴试验曲线则要乘以某一软化系数予以修正;
- 3) 采用 Seed 反正弦模型计算封闭状态残余孔压 U_g 。

沈瑞福^[12]等人认识到了波浪在海床内土体中引起的动应力特点是动应力幅恒定,动应力方向连续旋转。并用双向振动的动力扭剪仪实现这种加载方式,着重研究这种加载条件下土体中孔隙水压力的发展规律。通过对系统试验资料的回归分析,将孔隙水压表示为振动次数的函数或者是广义剪应变的函数。最后通过计算示例说明利用孔隙水压公式判断海床土体在波浪荷载作用下发生破坏的可能性,并用常规动扭剪试验资料作对比,说明不考虑动应力旋转可能带来的差别。

Kouki Zen 和 Hiroyuki Yamazaki^[13]通过试验发现,① 海床中的超孔隙水压是由波浪场底部的压力引起的;② 波动超孔隙水压对有效应力的变化很明显;③ 即使在一个波周期中,砂土的液化和被击实都可能交替发生;④ 在超孔隙水压的形成机理中,波浪引起的液化与地震引起的完全不同。

M S Rahman 和 W Y Jaber^[14]采用一维太沙基理论及 Seed 孔隙水压发展公式来分析在斜坡上传播的波浪在斜坡底部海床中引起的孔隙水压,使用数值方法并计及孔隙水压的扩散来求解。

已有研究主要存在以下几个问题:

- 1) 将波浪场与渗流场作为两个独立的问题进行研究,没有考虑水—土边界的连续性条件,即采用了海底不透水假定。在一定条件下,这个假定引起的误差不大,但是在诸如浅水波、波浪长距离传播以及海床土体渗透性较大等情况下,此假定导致的误差将会增大。
- 2) 没有考虑波浪场的衰减。由于海床的可渗透性,波浪场的一部分能量将传入海床中,波浪场的能量将随行程逐渐减小,由此导致波高随行程逐渐降低,因此必须考虑波浪场和海床的耦合作用。
- 3) 超孔隙水压的累积模式多数采用地震运动引起的超孔隙水压累积模式,直接引用了周期性循环剪切荷载作用下的超孔隙水压累积值,没有考虑同时存在的正应力循环作用。
- 4) 没有同时考虑振荡孔隙水压与残余孔隙水压,上述的“2.1”中只考虑了振荡孔隙水压,而上述的“2.2”中只考虑了残余孔隙水压。
- 5) 孔隙介质内的非线性渗流问题。

这些将是今后我们在波浪渗流力学中要着重研究的重要课题。

3 波浪渗流对重力式圆柱墩的作用

重力式结构是主要的海工建筑物之一。波浪荷载是其主要荷载,波浪在海床或基础内引起的渗流对建筑物作用的渗流力是极其重要的组成部分。近年来随着海岸和近海工程的迅速发展,提出了一些复杂的技

术问题, 其中很多是关于基础及基础破坏的问题。研究表明, 某些基础的破坏可能是由于多孔介质海床或基础中波浪的渗流所引起的。动孔隙水压及其渗流可引起某些海上结构物周围基础的侵蚀, 也可产生作用于结构物底部的浮托力和倾覆力矩。

为了介绍可渗、弹性海床上结构物底面上的波浪浮托力的一些基本规律, 本章针对最简单的结构形式——大尺度圆柱墩, 介绍作者等人近年来的一些研究成果。

所研究的问题如图 1 所示, 其中 d 是静水深, h 是海床厚度, R 是墩柱半径, 该墩柱直接立于弹性海床上。

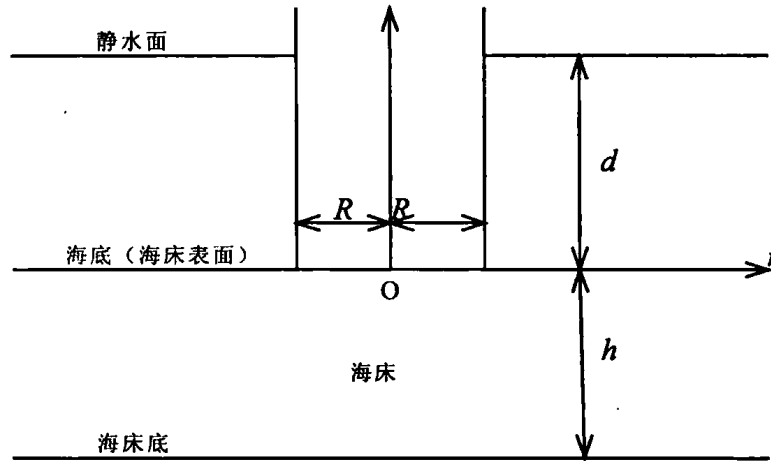


图 1 大尺度圆柱墩

控制方程可采用解耦的孔隙水压方程^[15]

$$\nabla^2 p = C_s \frac{\partial p}{\partial t}$$

式中: C_s 为影响多孔介质海洋土变形的综合特性系数, 其表达式为

$$C_s = \frac{\gamma_f}{k_s} \left(n\beta_f + \frac{1}{G} \frac{1-2\nu}{2-2\nu} \right)$$

式中: γ_f 、 β_f 为孔隙水的比重和压缩系数, k_s 、 n 为多孔介质海洋土的渗透系数和孔隙率, G 、 ν 为多孔介质海洋土的剪切模量和泊松比。

在求解波浪场时, 通常都假定海底是一个不可渗透的边界。由于波浪在海底处的水质点速度一般来说比海床内的渗流速度大得多, 因而有理由认为这是一个合理的假定。由波浪场中求得的海底波压力是求解渗流场的一个具有良好近似程度的边界条件。

$$p = p_w, \quad z = 0, \quad r > R$$

其中, p_w 为波浪引起的海底上的动水压力。

由于前面已假定墩柱底面上和海床底部为不透水的, 因而存在以下二个边界条件:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad z = 0, \quad r < R$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad z = -h$$

在以上三个边界条件下求解控制方程, 可得作用于墩柱底面上任一点的波浪渗流压力 p 以及墩柱底面

上总的波浪浮托力 F_z 和关于 y 轴的倾覆力矩 M_y 。它们的表达式为

$$p = \frac{\gamma_f H}{2ch\lambda d} \operatorname{Re} \left[e^{-i\alpha x} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} J_m(k_{2n} r) \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \cos m\theta \right]$$

$$F_z = \frac{\gamma_f H \pi R^2}{2ch\lambda d} \operatorname{Re} \left[2e^{-i\alpha x} \sum_{n=0}^{\infty} A_{0n} \frac{J_1(k_{2n} R)}{k_{2n} R} \right]$$

$$M_y = \frac{\gamma_f H \pi R^3}{2ch\lambda d} \operatorname{Re} \left[e^{-i\alpha x} \sum_0^{\infty} A_{1n} \frac{J_2(k_{2n} R)}{k_{2n} R} \right]$$

对于无限深的可压缩海床^[16] ($h \rightarrow \infty$), 其边界条件为

$$p = p_w, \quad z = 0, \quad r > R,$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad z = 0, \quad r < R,$$

$$p \rightarrow 0, \quad z \rightarrow -\infty$$

此时, 作用于墩柱底面上任一点的波浪渗流压力 p 以及墩柱底面上总的波浪浮托力 F_z 和关于 y 轴的倾覆力矩 M_y 为

$$p = \operatorname{Re} \left[\frac{i\pi H}{2} \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos n\theta \int_0^{\infty} \sqrt{\frac{\mu}{2k_p}} \frac{\mu - k_p}{\mu^2 + k_p^2} k_\mu H_n^{(1)'}(k_\mu R) J_n(k_\mu r) \times \cos \mu z d\mu \right]$$

$$\frac{F_z}{\pi R^2} = \operatorname{Re} \left[-2\pi i C_0 \int_0^{\infty} \sqrt{\frac{\mu}{2k_p}} \frac{\mu - k_p}{\mu^2 + k_p^2} H_1^{(1)'}(k_\mu R) \times J_1(k_\mu R) d\mu \right]$$

$$\frac{M_y}{\pi R^3} = \operatorname{Re} \left[i\pi C_1 \int_0^{\infty} \sqrt{\frac{\mu}{2k_p}} \frac{\mu - k_p}{\mu^2 + k_p^2} H_1^{(1)'}(k_\mu R) \times J_2(k_\mu R) d\mu \right]$$

$$\text{式中: } C_n = \frac{\gamma_f H}{\pi ch\lambda d} \frac{\delta_n i^{n+1}}{(\lambda R) H_n^{(1)'}(\lambda R)}, \quad k_p = \sqrt{\lambda^2 - i\omega C_s}, \quad k_\mu = \sqrt{i\omega C_s - \mu^2}.$$

在海岸和近海工程中, 为了改善软土地基的承载能力, 常在建筑物底部设置抛石基床, 如图 2 所示。一方面, 抛石基床可以把墩柱在外力作用下给予基础的较大作用力, 通过基床分布到更大面积的地基上, 以减小对地基的作用力和提高基础的承载能力; 另一方面, 可以在施工时提供一个足够平整的表面来沉放墩柱, 同时还可以防止建筑物使用期间墩柱周围的海底被冲刷。在波浪作用下, 抛石基床内部将形成一个渗流场, 从而给墩柱底面上一个波浪浮托力和倾覆力矩。这些力和力矩是设计该类建筑物时的一个重要的外荷载:

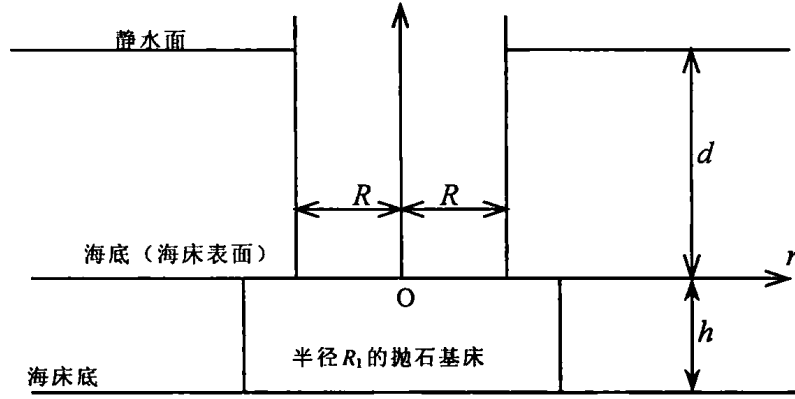


图 2 抛石基床

由于抛石基床内的渗流是非线性的, 将其进行线性化处理后, 可得抛石基床内渗流在极坐标下的控制方程如下^[17]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial p}{\partial \bar{r}} + \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \bar{\theta}^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial \bar{z}^2} = 0$$

$$\text{式中: } \bar{z} = z / \sqrt{\varepsilon_z}, \quad \bar{r} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} = \sqrt{\frac{x^2}{\varepsilon_x} + \frac{y^2}{\varepsilon_y}} = r \sqrt{\frac{\cos^2 \theta}{\varepsilon_x} + \frac{\sin^2 \theta}{\varepsilon_y}}, \quad \bar{\theta} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}} \text{tg} \theta \right),$$

$$\varepsilon_k = \frac{1}{f_k - iS}, \quad f_k \text{ 为 } k \text{ 分量方向的无量纲非线性渗流阻力系数。} S = 1 + \frac{1-n}{n} C_m, \quad n \text{ 为抛石基床的孔隙率,}$$

C_m 为抛石基床中颗粒的视附加质量系数^[18]。

其余部分海床内的渗流控制方程如前。在相应的边界条件下, 求解这二个控制方程, 可得墩柱底面上任一点的波浪渗流压力 p 以及墩柱底面上总的波浪浮托力 F_z 和关于 y 轴的倾覆力矩 M_y 的表达式为

$$p = \frac{\gamma_f H}{2ch\lambda d} e^{-i\alpha x} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} C_{mn} I_m(k_{2n} \sqrt{\varepsilon_z} \bar{r}) \cos m\bar{\theta}$$

$$F_z = \frac{\gamma_f H}{2ch\lambda d} \text{Re} \left\{ e^{-i\alpha x} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N C_{mn} \int_0^R \int_0^{2\pi} I_m(k_{2n} \sqrt{\varepsilon_z} \bar{r}) \cos m\bar{\theta} r dr d\theta \right\}$$

$$M_y = \frac{\gamma_f H}{2ch\lambda d} \text{Re} \left\{ e^{-i\alpha x} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N C_{mn} \int_0^R \int_0^{2\pi} I_m(k_{2n} \sqrt{\varepsilon_z} \bar{r}) \cos m\bar{\theta} \cos \theta r^2 dr d\theta \right\}$$

式中: $k_{2n} = \frac{n\pi}{h}$, I_m 为 m 阶第一类变型贝塞尔函数, C_{mn} 为待定系数, 。

在浅水区, 波长与水深之比 (L/d) 较大, 因而用线性波面方程来描述波面形状常引起较大的误差, 需要研究由于波浪的非线性对波浪力的影响。此时宜采用椭圆余弦波理论来描述波浪形态, 以求得圆柱墩底面的波浪浮托力和倾覆力矩^[19-20]。

此时, 墩柱底部的渗流压力由下式确定

$$\frac{p}{\gamma_f H} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} B_{mnj} \cos \left(\frac{j\pi z}{h} \right) J_m(f_{nj} r) \cos m\theta \cdot e^{-i\alpha x}$$

其中, $f_{nj} = \sqrt{in\omega C_s - \left(\frac{j\pi}{h}\right)^2}$, B_{mnj} 为待定系数, 由匹配条件确定。

对墩柱底部的渗流压力进行积分, 可得作用于墩柱底面上总的波浪浮托力 F_z 和关于 y 轴的倾覆力矩

M_y 为

$$\bar{F}_z = \frac{F_z}{2\pi\gamma_f R^2 H} = \begin{cases} \operatorname{Re} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} B_{0nj} \frac{J_1(f_{nj}R)}{f_{nj}R} e^{-in\omega t} \right] & , f_{nj} \neq 0 \\ 2 \cdot \operatorname{Re} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} B_{0nj} e^{-in\omega t} \right] & , f_{nj} = 0 \end{cases}$$

$$\bar{M}_y = \frac{M_y}{\pi\gamma_f R^3 H} = \begin{cases} \operatorname{Re} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} B_{1nj} \frac{J_2(f_{nj}R)}{f_{nj}R} e^{-in\omega t} \right] & , f_{nj} \neq 0 \\ 0 & , f_{nj} = 0 \end{cases}$$

在实际海面上, 波浪都是不规则的, 不规则波可以用波面谱 $S_{\eta\eta}(\omega)$ 来表示。在工程中, 常用的波谱模型是 Longuet-Higgins 模型, 它是由一组无限系列的线性规则波的线性组合所组成的。各个组成波的波高不等, 频率不同, 且具有不同的随机初相, 其不规则性就由这个随机初相来体现。

我国现行海港水文规范中, 列出了对波面谱 $S_{\eta\eta}(\omega)$ 的计算公式, 这里就不一一列出了。

当不规则波的波谱采用 Longuet-Higgins 模型时, 在波面高度与波浪引起的渗流压力之间, 波面高度与墩柱底面上的波浪浮托力和倾覆力矩之间都存在着线性关系^[21-22]。因此, 渗流压力谱 $S_{pp}(\omega)$, 渗流压力引起的波浪浮托力谱 $S_{FF}(\omega)$ 和倾覆力矩谱 $S_{MM}(\omega)$ 都可以利用它们各自的传递函数, 根据波面谱 $S_{\eta\eta}(\omega)$ 来求得, 它们的表达式如下:

$$S_{pp}(\omega) = |T_{np}(\omega)|^2 S_{\eta\eta}(\omega)$$

$$S_{FF}(\omega) = |T_{nF}(\omega)|^2 S_{\eta\eta}(\omega)$$

$$S_{MM}(\omega) = |T_{nM}(\omega)|^2 S_{\eta\eta}(\omega)$$

以上各式中传递函数的表达式分别为

$$|T_{np}(\omega)| = \frac{|p_2|}{|\eta|} = \frac{\gamma_f}{ch\lambda d} \left| \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} J_m(k_{2n}r) \cos m\theta \right|$$

$$|T_{nF}(\omega)| = \frac{|F_z|}{|\eta|} = \frac{2\gamma_f \pi R^2}{ch\lambda d} \left| \sum_{n=0}^{\infty} A_{0n} \frac{J_1(k_{2n}R)}{k_{2n}R} \right|$$

$$|T_{\eta M}(\omega)| = \frac{|M_y|}{|\eta|} = \frac{\gamma_f \pi R^3}{\text{ch} \lambda d} \left| \sum_{n=0}^{\infty} A_{1n} \frac{J_2(k_{2n} R)}{k_{2n} R} \right|$$

4 波浪渗流对重力式直墙防波堤的作用

港口建设中为了保持港内水域水面平稳, 提供码头前船舶靠泊需要的泊稳条件, 港内水域常常需要建造防波堤来加以围护。重力式直墙防波堤是常用的结构型式, 这种结构的稳定性除了取决于其自身重量和海浪冲击力外, 墙身底面上的波浪渗流压力也是影响其稳定性的重要因素。这个波浪渗流压力, 一方面给直墙防波堤以一个向上的浮托力, 减消了墙身重力对稳定性的部分作用, 另一方面还会对建筑物产生一个倒向港内的倾覆力矩, 其量值有时与海浪冲击力矩相当, 渗流力是建筑物设计中不可忽视的荷载^[23-24]。

图 3 所示分别为一坐在无限厚和有限厚海床上半宽为 b 的重力式直墙防波堤, 海水深度为 d , 对于有限厚海床, 其厚度为 h , 海床为匀质, 刚度和渗透性均各向同性的土介质, 其渗流满足达西定律。

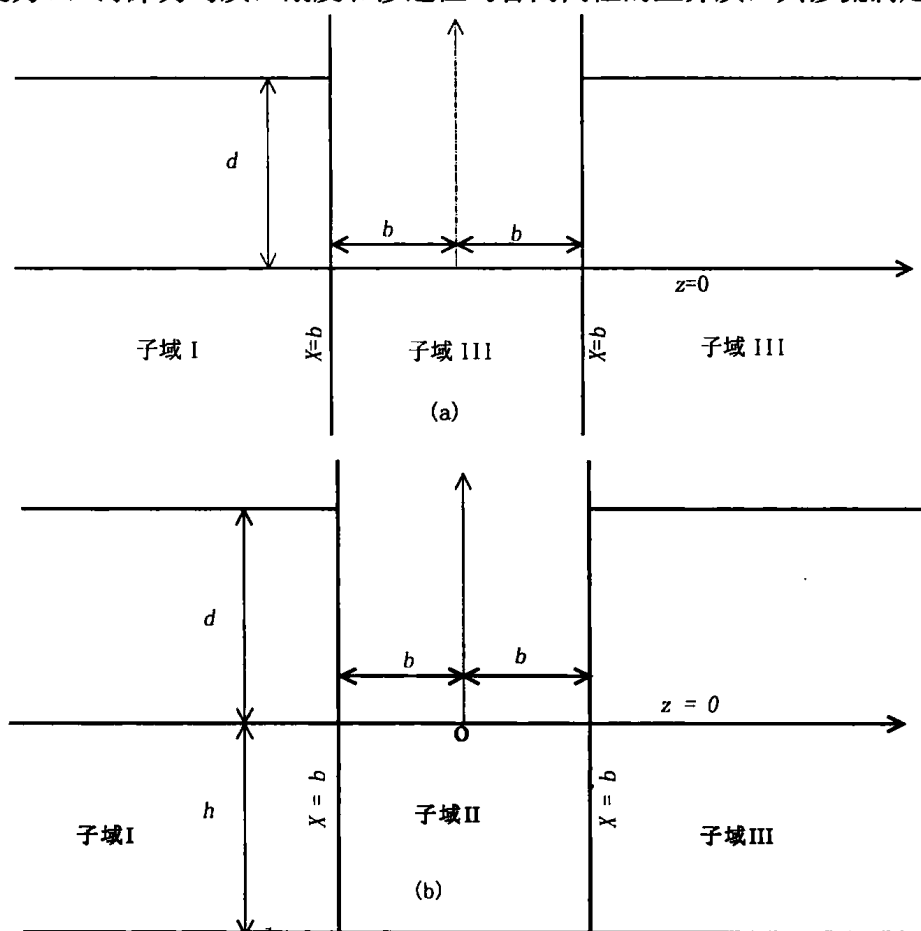


图 3 重力式直墙防波堤

渗流压力控制方程仍为

$$\nabla^2 p = C_s \frac{\partial p}{\partial t}$$

如果仅考虑波浪垂直于防波堤入射的情况, 则所求解的问题是二维的。设渗流压力的稳态解为 $P = p(x, z)e^{-i\omega t}$, ω 为入射波的圆频率, 渗流压力的空间分量 $p(x, z)$ 满足方程

$$\nabla^2 p = -i\omega C_s p$$

对于无限厚海床, 边界条件为

在 $z = 0$, $x \leq -b$ 的海床表面上, $p = p_w(x)$;

在 $z=0$, $-b < x < b$ 的堤身底面上, $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$;

在 $z=0$, $x \geq b$ 的海床表面上, $p = 0$;

在 $z \rightarrow \infty$ 的海床深处, $p \rightarrow 0$ 。

其中, $p_w(x)$ 是堤前海底面上的波浪压力 (空间分量), 如采用线性波浪理论, 可由下式表达

$$p_w(x) = \frac{i\gamma_f H}{\text{ch}\lambda d} \cos \lambda(x+b), \quad (x \leq -b)$$

在以上边界条件下, 求解渗流方程, 可得作用于直墙底面上的波浪渗流压力^[24] 为

$$p = -\frac{i\gamma_f H}{\text{ch}\lambda d} \int_0^\infty \sqrt{\frac{\mu}{2k_p}} \frac{\mu - k_p}{\mu^2 + k_p^2} \exp[-k_\mu(x+b)] \cos \mu z d\mu$$

式中, $k_p = \sqrt{\lambda^2 - i\omega C_s}$, $k_\mu = \sqrt{\mu^2 - i\omega C_s}$

于是, 可得作用于无限厚海床上直墙式防波堤底面上的波浪浮托力和倾覆力矩的计算公式为

$$F_z = \text{Re} \left\{ -\frac{i\gamma_f H}{\text{ch}\lambda d} \int_0^\infty \sqrt{\frac{\mu}{2k_p}} \frac{\mu - k_p}{\mu^2 + k_p^2} \frac{1}{k_\mu} (1 - e^{-2k_\mu b}) d\mu \right\}$$

$$M_y = \text{Re} \left\{ \frac{i\gamma_f H}{\text{ch}\lambda d} \int_0^\infty \sqrt{\frac{\mu}{2k_p}} \frac{\mu - k_p}{\mu^2 + k_p^2} \frac{1}{k_\mu} \left[\left(b + \frac{1}{k_\mu} \right) e^{-2k_\mu b} + \left(b - \frac{1}{k_\mu} \right) \right] d\mu \right\}$$

对于有限厚海床, 边界条件为

在 $z=0$, $x \leq -b$ 的海床表面上, $p = p_w(x)$;

在 $z=0$, $-b < x < b$ 的堤身底面上, $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$;

在 $z=0$, $x \geq b$ 的海床表面上, $p = 0$;

在 $z=-h$ 海床底面上, $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$ 。

在以上边界条件下, 求解渗流方程, 可得作用于直墙底面上的波浪渗流压力为

$$p = \text{Re} \sum_{n=1}^N [C_{2n} \exp(k_{s2,n}x) + D_{2n} \exp(-k_{s2,n}x)]$$

式中: $k_{s2,n} = \sqrt{k_{2n}^2 - i\omega C_s}$, $k_{2n} = (n-1)\frac{\pi}{h}$ 。

于是, 可得作用于有限厚海床上直墙式防波堤底面上的波浪浮托力和倾覆力矩的计算公式为

$$F_z = \text{Re} \left\{ 2 \sum_{n=1}^N \frac{C_{2n} + D_{2n}}{k_{s2,n}} \sinh(k_{s2,n}b) \right\}$$

$$M_y = \operatorname{Re} \left\{ 2 \sum_{n=1}^N \frac{C_{2n} + D_{2n}}{(k_{s2,n})^2} [\sinh(k_{s2,n}b) - k_{s2,n}b \cosh(k_{s2,n}b)] \right\}$$

5 结 语

以上对有关波浪渗流力学的研究意义, 主要研究内容, 以及对圆柱墩和重力式直墙防波堤的一些研究成果作了简单的介绍。由于这个问题对海岸、近海和海洋工程建设十分重要, 这里只提出了一些值得注意和研究的课题, 供对此感兴趣的同志参考。

参考文献:

- 1 Reid RO, Kajiura K. On the damping of gravity waves over a permeable sea bed. Transaction, American Geophysical Union, 1957, 38(5).
- 2 Moshagen H, Torun A. Wave induced pressure in permeable seabed. Proc. A.S.C.E., J. Waterways, Harbors & Coastal Engineering 101, 1975, 49-57.
- 3 Yamamoto T, Koning H L, Sellmeier H, Hijun E.V. On the response of a poro-elastic bed to water waves. Journal of Fluid Mechanics, 1978, 193-206.
- 4 Yamamoto T. Wave-induced pore pressures and effective stresses in inhomogeneous seabed foundations. Ocean engineering 8, 1981, 1-16.
- 5 Madsen OS. Wave-induced pore pressures and effective stresses in a porous bed. Geotechnique 28, 1978, 4:377-393.
- 6 S Okusa. Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments. Geotechnique 35, 1985, 4:517-532.
- 7 邓伟, 顾小芸. 粘弹性海底土层在波浪作用下的反应. 第五届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集. 1994, 275-281.
- 8 Tsai CP, Lee TL. Standing wave induced pore pressures in a porous seabed. Ocean Engineering., 1995, 22(6):505-517.
- 9 Lin YS, Jeng DS. The effects of variable permeability on the wave-induced seabed response. Ocean Engineering., 1997, 24:623-643.
- 10 Ishihara K, Yamazaki A. Analysis of wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand, soils and foundations, 1984, 24(3):85-100.
- 11 陈仲颐, 李向维. 波浪引起的饱和土体残余孔压计算. 中国土木工程学会第五届土力学及基础工程学术会议论文选集. 中国建筑工业出版社, 1990.
- 12 沈瑞福, 王洪瑾, 等. 动主应力旋转下砂土孔隙水压力发展及海床稳定性判断. 岩土工程学报, 1994, 16(3).
- 13 Kouki Z, Yamazaki H. Mechanism of wave-induced liquefaction and densification in seabed. Soil and Foundations, 1990, 30(4):90-104.
- 14 Rahman M S, Jaber W Y. A simplified drained analysis for wave-induced liquefaction in ocean floor sands. Soil and Foundation, 1986, 26(3):57-68.
- 15 孙昭晨, 邱大洪. 作用于可渗可压缩海床上的墩柱底部上的波浪力. 海洋学报, 1989, 11(3).
- 16 邹志利, 邱大洪. 无限深可压缩海床上圆墩柱波浪渗流压力解析解. 海洋学报, 1993, 15(3).
- 17 邱大洪, 陈键. 抛石基床上圆柱墩底部的波浪浮托力. 海洋学报, 1994, 16(1).
- 18 邱大洪, 李黎. Experimental Study on the Permeability of Rubble Materials Used in Coastal Structures. SOSC'94, China, 1994.
- 19 孙昭晨, 邱大洪. Nonlinear Wave Force on the Bottom of A Circular Cylinder in Shallow Water. ISOPE'91, UK,