

波浪渗流力学

邱大洪 孙昭晨 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

华夏基金资助项目

波浪渗流力学

邱大洪 孙昭晨 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

波浪渗流力学/邱大洪,孙昭晨著. —北京:国防工业出版社,2006.5

ISBN 7-118-04326-5

I. 波... II. ①邱... ②孙... III. 波浪—渗流力学—研究 IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 010385 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8³/₄ 字数 220 千字

2006 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1 2000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

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则已有一百多年的历史。1856年,法国工程师达西(Heri 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。

波浪载荷是海上建筑物所受到的主要载荷。波浪对建筑物的作用主要有两方面:一是直接作用在建筑物上的波浪力;二是波浪在海床或基床内引起的渗流对建筑物与海床接触的边界上作用的波浪渗流力。前者已得到学术界广泛的研究,并给工程界提供了许多可以实用的计算方法;后者的研究在学术界是近二十余年才开始的,而在工程界则多采用根据判断而提出的经验计算方法,缺乏理论根据。

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,它涉及波浪在可渗结构上和内部的传播,引起的孔隙水压、渗流、孔隙水压的积累等现象,以及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。波浪载荷是其主要载荷,波浪在海床或基础内引起的渗流对建筑物的渗流力是其重要的组成部分。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。

对于这一较新而且重要的研究领域,目前还没有一部全面而系统的专著。作者及其课题组成员近十多年来一直进行波浪与多孔介质结构的相互作用研究,积累了一些经验。国外亦有一些有关成果面世。本书就是在总结国内外已有研究成果基础上,系统、全面地对波浪与多孔介质结构相互作用所涉及的理论、试验及其应用进行总结。

本书共分12章:第1章概论;第2章渗流本构关系和控制方程;第3章波浪作用下孔隙弹性海床的响应;第4章波浪在可渗海床上传播时的衰减;第5章波浪作用下海床的液化分析;第6章波浪作用下黏弹性海床的动力反应;第7章波浪作用下砂质弹塑性海床的动力反应;第8章考虑土骨架加速度效应的海床动力反应;第9章振动孔隙水压增长规律;第10章海底埋设管线上的波浪力;第11章作用于可渗弹性海床上的墩柱底面上的波浪力;第12章作用于防波堤上的波浪渗流。

本书所述大部分内容都是在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室完成的。感谢实验室同事们多年来的支持与合作,也感谢历届研究生所做的辛苦工作。在波浪与多孔介质相互研究方面曾多次获得国家自然科学基金委自然科学基金的资助,在此表示感谢。特别感谢华夏基金会对出版此书给予的资助。感谢本书的编辑孙严冰等对出版此书所做出的艰苦工作。

由于作者水平有限,书中难免存在不足和疏漏,敬请读者指教。

作者

2005年10月

主要符号说明

(按出现顺序)

U_0 : 表征单元体积

U_{0v} : 表征单元体积里的孔隙体积

U_{0s} : 表征单元体积里的固体骨架体积

n : 介质的孔隙率

S_0 : U_0 的表面积

K_f : 流体的压缩模量

β_f : 流体的压缩系数

p : 流体压力

ρ_f : 流体的密度

γ_f : 流体的比重

u : 流体质点在 x 方向的速度

v : 流体质点在 y 方向的速度

w : 流体质点在 z 方向的速度

σ_{xy} : 流体剪切应力

μ : 流体动力黏性系数

ν : 流体运动黏性系数

Q : 流体的流量

q : 比流量向量

$J = -\text{grad}\phi$: 水力梯度向量

k_s : 渗透系数

Re : 雷诺数

f : Fanning 摩阻系数

i : 水力坡降

α, β : 线性和紊动渗透系数
 C_0 : 渗流系数
 D_s : 等效特征粒径
 m_x, m_y, m_z : 从 x, y 和 z 方向流入单元体的流体质量
 ρ_s : 孔隙介质的密度
 β_s : 孔隙介质颗粒在孔隙流体压力作用下的压缩系数
 β_p : 孔隙介质颗粒在粒间应力作用下的压缩系数
 β'_i : 修正的孔隙流体压缩系数
 $\bar{\omega}$: 土骨架压缩系数
 $\bar{\sigma}$: 平均粒间应力 ($\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{kk}/3$)
 e : 土的体应变量
 w_i : 孔隙介质的平均速度
 σ_{ij} : 有效应力
 σ_i : 正应力
 τ_{ij} : 剪切应力
 f_i : 体积力
 ν : 泊松比
 ϵ_{ij} : 应变张量
 h : 水深
 d : 海床厚度
 S_r : 土介质的饱和度
 G : 土介质的剪切模量
 E : 土介质的弹性模量
 K : 土的压缩模量
 K_f : 孔隙水的压缩模量
 K'_f : 孔隙水相对压缩模量
 P_0 : 绝对孔隙水压
 p : 孔隙水压
 $\bar{p}$: 周期平均孔隙水压
 p_0 : 波浪在海床面上的动水压力幅值

λ : 波数
 ω : 波浪圆频率
 D : 波高衰减系数
 H : 波高
 p_f : 土体破坏时的孔隙水压
 p_c : 残余孔隙水压
 Φ'_d : 动载荷下的有效内摩擦角
 N : 循环周数
 N_1 : 引起液化的循环周数
 C_v : 固结系数
 τ : 剪切应力幅值
 K_c : 固结应力比
 f_s : 源项, 表示在单位时间、单位孔隙介质体积(包括孔隙)内产生的总的孔隙水压
 k_{ij} : 土的渗透系数
 k_0 : 土侧压系数
 η_v : 体黏滞系数
 η_d : 偏黏滞系数
 s_{ij} : 偏应力
 e_{ij} : 偏应变
 d_p : 管线埋置深度
 F_h 、 F_v : 力的水平分量和垂直分量
 M_y : 力矩
 p_i : 入射波压
 p_d : 绕射波压
 b : 重力式直墙防波堤的半宽
 φ : 势函数
 ψ : 流函数
 $F(x, y, z)$: 流体体积函数
 V : 渗流速度向量

R : 渗流阻力向量

C_m : 附加质量系数

f_k : 等效渗流阻力系数

$S_{\eta\eta}(f)$: 波浪谱

$S_{pp}(f)$: 波浪渗流压力谱

$S_{FF}(f)$: 波浪浮托力谱

$S_{MM}(f)$: 波浪倾覆力矩谱

$T_{\eta p}$: 波浪渗流压力传递函数

$T_{\eta F}$: 波浪浮托力传递函数

$T_{\eta M}$: 波浪倾覆力矩谱传递函数

目 录

第1章 概论	1
1.1 海洋开发利用的研究	1
1.2 波浪渗流力学研究的内容	3
参考文献	10
第2章 渗流本构关系和控制方程	12
2.1 多孔介质的概念	12
2.2 流体的物理性质	13
2.3 达西定律	16
2.3.1 达西定律的表达式	16
2.3.2 广义达西定律	19
2.3.3 达西定律的适用范围	19
2.3.4 非达西渗流	22
2.4 Biot 固结理论	26
2.5 Biot 固结理论的简化	31
参考文献	34
第3章 波浪作用下孔隙弹性海床的响应	35
3.1 基本理论	36
3.1.1 基本方程	37
3.1.2 边界条件	38
3.2 无限深海床情形的解析解	40
3.2.1 完全饱和海床	43
3.2.2 不完全饱和和密实砂性海床	44
3.3 有限深海床情形的解析解	45
3.4 计算结果的分析	47

参考文献	52
第4章 波浪在可渗海床上传播时的衰减	54
4.1 基本方程和边界条件	54
4.1.1 基本假定	54
4.1.2 基本方程	55
4.1.3 边界条件	56
4.2 控制方程的解	57
4.3 波浪在可渗海床上传播时波高的衰减	61
4.4 海床土层中位移场和应力场	65
4.4.1 海底土层中位移场情况	65
4.4.2 海底土层中应力场情况	68
参考文献	75
第5章 波浪作用下海床的液化分析	76
5.1 概述	76
5.2 由于瞬态波动孔隙水压导致海床液化可能性的分析	77
5.3 由于周期性波浪作用导致孔隙水压积累而产生液化可能性的分析	82
5.3.1 推进波作用下孔隙水压的积累和液化	83
5.3.2 液化海床中管线的沉浮	93
参考文献	97
第6章 波浪作用下黏弹性海床的动力反应	99
6.1 二维广义动力 Biot 固结方程的有限元列式及数值解法	99
6.1.1 边值问题的有限元列式	99
6.1.2 数值求解方法	103
6.2 数值计算结果的验证	104
6.3 土的流变性对海床动力反应的影响	106
参考文献	111
第7章 波浪作用下砂质弹塑性海床的动力反应	113
7.1 $u-U$ 形式的广义动力 Biot 固结理论的有限元	

列式与数值解法	114
7.2 亚塑性边界面模型	117
参考文献	123
第8章 考虑土骨架加速度效应的海床动力反应	125
8.1 广义动力 Biot 固结方程的有限元列式及数值 解法	126
8.1.1 边值问题的控制方程及有限元列式	126
8.1.2 数值求解方法	129
8.2 数值计算结果的验证	130
8.3 加速度项对海床动力反应的影响	132
8.4 渗透系数变化的成层海床的动力反应	134
参考文献	137
第9章 振动孔隙水压增长规律	139
9.1 土中振动孔隙水压变化机理	139
9.2 振动孔隙水压增长的计算模型	141
9.3 波浪作用下的振动孔隙水压研究	144
9.3.1 设备组成及其主要性能	147
9.3.2 技术参数确定	148
9.3.3 初步试验结果	153
9.4 有限厚海床在波浪作用下的孔隙水压变化	156
9.4.1 概述	156
9.4.2 采用的计算模型	157
9.4.3 土二维动力固结方程的建立	157
9.4.4 方程组的离散	160
9.4.5 动力固结方程的有限元分析	163
9.4.6 边界条件	166
9.4.7 初始条件	167
9.4.8 算例分析	168
参考文献	169
第10章 海底埋设管线上的波浪力	171
10.1 海底埋设管线上的波浪力	172

10.1.1	控制方程和边界条件	172
10.1.2	问题的解	175
10.2	浅水区海底埋设管线上的波浪力	185
10.2.1	一阶近似椭圆余弦波理论	186
10.2.2	一阶近似椭圆余弦波的渗流压力解	188
	参考文献	192
第 11 章	作用于可渗弹性海床上的圆柱墩底面上的波浪力 ..	193
11.1	边值问题	194
11.1.1	假设	194
11.1.2	控制方程	195
11.2	线性波作用下的圆柱墩底面上的波浪浮托力	195
11.2.1	边界条件	195
11.2.2	内、外域问题	196
11.2.3	内、外域波浪渗流压力解	197
11.2.4	线性波作用下墩柱底面上的波浪浮托力和波浪 倾覆力矩	200
11.2.5	无限深可压缩海床上圆柱墩波浪渗流压力解 析解	201
11.2.6	抛石基床上圆柱墩底面上的波浪浮托力	204
11.3	浅水区非线性波作用下墩柱底面上的波浪浮 托力	221
11.3.1	圆柱墩周围海床面上的波浪渗流压力	221
11.3.2	墩柱底面上的波浪浮托力和波浪倾覆力矩	222
11.4	不规则波作用下墩柱底面上的波浪浮托力	225
11.4.1	不规则波作用下墩柱底面上的波浪浮托力和波浪 倾覆力矩	225
11.4.2	不规则波在抛石基床中的渗流对墩柱的作用	229
	参考文献	235
第 12 章	作用于防波堤上的波浪渗流	237
12.1	作用于重力式直墙防波堤底面上的波浪浮托力 和波浪倾覆力矩	238
12.1.1	无限厚海床上直墙式防波堤底面上的波浪浮托力	

和波浪倾覆力矩	239
12.1.2 有限厚海床上直墙式防波堤底面上的波浪浮托力 和波浪倾覆力矩	242
12.1.3 抛石基床上直墙式防波堤底面上的波浪浮托力和 波浪倾覆力矩	245
12.1.4 直墙式防波堤后由于堤底海床渗透所引起的 波动	248
12.2 作用在斜坡式防波堤上的波浪渗流力	250
12.2.1 外部流场	251
12.2.2 内部流场	253
12.2.3 数值模型与物理模型试验结果的比较	255
12.3 波浪和斜坡式潜堤的相互作用	256
参考文献	262

第 1 章 概 论

我国拥有广阔的海域,海岸线全长 18000km 以上,并有 6500 多个面积在 500m^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 万 km^2 (相当于我国陆地国土面积的 $1/3$)。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、潮汐能等各种资源均十分丰富。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的开发程度较低,并存在对某些资源的浪费和环境的破坏。就沿海 15m 等深线以内的 13 万 km^2 浅海和滩涂面积而言,目前只利用了 5% 左右。因此我国本世纪在海洋开发利用和海洋环境保护方面的前景广阔、任务艰巨。

1.1 海洋开发利用的研究

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,就要求人们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和环境协调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上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,我国的海岸和近海上程将朝着大型化和深水发展,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,深海油气田和其他资源等矿藏的开发技术等等。

近年来,由于海上油气田的不断发现,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、海洋钻井平台等海上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年胜利油田的胜利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年代就对波浪周期载荷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和工程特性与陆地土的这些特性存在着较大的差异。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载荷的瞬间作用,使得海床中的土体处于一个复杂的应力状态。一方面,循环的波浪载荷在海床表面上产生了往复的波浪水压力,在这种循环波浪压力作用下,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,这将引起海床中土体内主应力轴持续不断的旋转,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,主应力轴的旋转使得海床的孔隙水压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,振动孔隙水压是由于基岩地震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,因此孔隙水压的不断累积可能会导致砂质土体的液化。而在波浪作用下,海床中土体内的超静孔隙水压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,海床中土体的压密和液化循环交替地进行,显然其孔隙水压的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,因此在海床的动力分析中应该考虑部分排水效应。另外,海洋

建筑物与下覆的海床地基及周围的流体是一个复杂的三维耦合体系,波浪载荷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中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的交叉综合点。

然而由于试验技术条件和认识水平的限制,以往对于波浪载荷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技术问题,在本书中不可能都加以探讨和叙述。本书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上建筑物的作用进行探讨和论述。

1.2 波浪渗流力学研究的内容

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的渗流的研究,已有一百多年的历史。1856年,法国工程师达西(Heri Darcy)通过试验提出了线性渗透定律,即著名的达西定律,它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们对渗流的数学模型、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。

一、波浪对海床与海上建筑物的影响

波浪在多孔介质内的渗流对海上建筑物的作用包括两方面:一是作为多孔介质的海床或人工抛石基础,在与之相接触的海上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上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