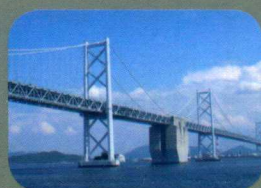


山东科技大学学术著作出版基金资助出版

Analysis on Load Effects and
Design Methods of Bridge
Superstructure under Combined
Action of Wind Wave and Current

桥梁上部结构 风浪流荷载效应分析与设计方法

张宪堂 高康宁 ◎ 著



人民交通出版社
China Communications Press

014055735

U448.19
05

山东科技大学学术著作出版基金资助出版

Analysis on Load Effects and
Design Methods of Bridge
Superstructure under Combined
Action of Wind Wave and Current

桥梁上部结构
风浪流荷载效应分析与设计方法

张宪堂 高康宁 © 著



北航

C1741235



人民交通出版社
China Communications Press

U448.19
05

014022732

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第282787号

内 容 提 要

本书主要研究风浪流对跨海桥梁及沿海结构的荷载效应。全书共分为8章,主要包括:风浪流特性及其对桥梁上部结构作用宏观机理,波浪计算理论基础,数值波浪水槽的数学原理与造波、消波方法,数值波浪水槽的建立及结果分析,波流对桥梁上部结构荷载效应分析,桥梁上部结构波浪力荷载效应分析,风浪流荷载作用下桥梁上部结构设计方法,桥梁抵抗风浪流作用的设计和构造措施等。

本书可供从事桥梁工程、防灾减灾工程及防护工程、船舶和海洋工程、港口及近海工程专业的高年级大学生和研究生阅读,亦可供从事桥梁工程、海岸工程、石油工程、军事工程等相关专业的工程技术人员参考。

Action of Wind Wave and Current

图书在版编目(CIP)数据

桥梁上部结构风浪流荷载效应分析与设计方法 / 张宪堂, 高康宁著. — 北京: 人民交通出版社, 2013. 12
ISBN 978-7-114-11032-0

I. ①桥… II. ①张… ②高… III. ①跨海峡桥—桥梁设计—风浪—荷载效应—研究 IV. ①U448.19

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 282787 号

书 名: 桥梁上部结构风浪流荷载效应分析与设计方法

著 作 者: 张宪堂 高康宁

责任编辑: 王 霞

出版发行: 人民交通出版社

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: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 10.5

字 数: 315 千

版 次: 2013 年 12 月 第 1 版

印 次: 2013 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11032-0

定 价: 42.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



前 言

台风(在大西洋和印度洋称为飓风)、暴雨洪水、风暴潮和风暴巨浪等灾害,是世界上很多国家最严重的自然灾害,全球自然灾害生命损失的60%是上述灾害造成的。其对海岸及近海工程的损毁愈演愈烈,尤其是对跨河海桥梁结构的毁坏,每年造成数千座桥梁损毁和垮塌,使交通受阻或中断,给救灾工作造成了巨大的困难。在我国,风暴潮、巨浪灾害随着全球环境恶化和海平面的上升对沿海地区的破坏越来越严重,潮水(浪)高度和发生频率也逐年增长;洪水暴发地区和频次不断增加,而且无规律可循。随着多座跨河海长桥的建成,巨浪和波流是导致跨河海长桥的损毁甚至破坏的主要因素。因此,利用数值模拟和物理试验研究长大桥跨结构系统在风浪流作用下的荷载效应机理,提高桥梁安全性和耐久性,控制灾害性破坏的发生,不但具有十分重要的理论价值和现实意义,更具有明确的应用前景。

目前工程波浪动力学的研究主要有两种趋势。一种趋势是随着国民经济的快速发展,对海洋开发的需求不断扩大,工程波浪动力学领域的研究也越来越引起科研院所和技术人员的重视。国内的波浪水槽实验室已由20世纪80年代初期的几家单位快速增加到现在的数十家。这些实验设施的建成必将有益于该领域研究整体水平的提高,但由于物理模型实验涉及知识复杂,受场地限制,需大幅度缩小比尺,而比尺效应又影响结果的精确度。此外,物理模型中一般使用水,并在重力场中进行实验,在复杂力学现象中只能满足一个力(或重力,或摩擦力)的相似,因而相似性受到限制。其实验结果能否正确反映工程实际状况,其精度能否满足研究和设计的要求,要取决于研究人员对实验的理解。另一种趋势是随着计算机技术的提高,数学模型在工程中得到越来越广泛的应用。数学模型是在一定边界初始条件下求解微分方程,具有很好的重复性,条件易于控制,可以长时间模拟过程,也便于改变边界条件,而物理模型就不是很容易。基于以上优点,数学模型在海岸工程建设中发挥着越来越大的作用。一些研究人员尤其是年轻的研究人员更倾向于数学模型中的数值计算。数值波浪水槽(numerical wave tank)技术就是建立在计算流体力学与数值计算方法基础上的一门交叉学科,其主要通过高性能计算机的数值计算来获得流场的数值解,从而达到解决工程问题的目的。数值波浪水槽技术的应用与计算机硬件的发展是密切相关的,特别是近年来个人电脑计算性能的飞速提高,有力促进了数值波浪水槽技术在工程领域的应用。目前在海洋、水利、船舶航运等方面有大量成功应用的实例。总之,波浪物理模型试验和波浪数值模拟是解决波浪等动力因素及其对建筑物相互作用问题的重要手段,不同情况、不同要求应选用不同的方法。



本书是作者近年来在桥梁遭受极端风—浪—流耦合作用方面研究成果的集中反映,内容共分8章。第1章主要介绍了桥梁上部结构波浪流荷载效应的研究现状和亟需解决的问题;第2章根据波浪的种类和特性,从宏观的角度提出了波浪流对桥梁上部结构的作用机理;第3章重点介绍了波浪计算理论基础,以使本书具有较好的系统性;第4章基于数值波浪水槽和VOF的数学原理,分析了其流场运算方法,揭示了数值波浪水槽造波与消波原理及方法;第5章选用ANSYS FLUENT软件,作为数值模拟波浪水槽的计算平台,通过基础理论与ANSYS FLUENT系列软件使用的结合,建立了数值波浪水槽,并以二维造波为例,分析了水槽条件对造波结果的影响,为研究桥梁主梁及相关构筑物所受波浪力和波流力,以及今后的波浪与海洋工程结构物作用的研究创造条件;第6章重点阐释了波流力(洪水)对不同形式的桥梁上部结构的荷载效应,利用数值波浪水槽对比分析了分别由经验公式、物理试验与数值模拟计算所得桥梁上部结构升阻力的情况,建立了波浪升阻力变化与淹没程度相关性;第7章以沿海(跨河)桥梁工程设计实验为基础,利用二维数值波浪水槽,基于双幅桥面主梁的波浪力作用机理,分析了不同淹没程度、不同水深、不同波浪条件下、不同主梁间距和不同主梁断面形式的上部结构整体与局部波浪荷载效应;第8章在理论分析的基础上,提出基于风浪流作用下的跨河海桥梁上部结构的荷载效应设计方法和相应的适用条件,并进行工程实例分析,以验证设计方法的正确性和合理性。最后,从桥梁设计和构造两方面提出了抵抗风浪流作用的有效措施。

本书由张宪堂全面组织和编排,并撰写了书中大部分内容;高康宁合作撰写了第4章和第7章中的部分章节等内容,并完成了书中的数值计算与整理工作。在本书有关内容的前期研究过程中,得到了同济大学陈艾荣教授、山东科技大学王来教授的悉心指导和帮助。多年来,两位教授无论在专业知识还是工作、生活方面都给予了作者无私的指导和帮助,在本书出版之际,谨向陈艾荣教授、王来教授表示衷心的感谢。另外,感谢研究生黄锦梅、王晨、王兆东和曹宏波等在本书撰写过程中提供的帮助。在本书在撰写过程中,引用了国内外同行公开发表的诸多研究成果与工作总结,在此一并表示感谢!

本书相关内容及出版得到了中国博士后科学基金资助项目(2012M521364,2013T60681)、山东省自然科学基金资助项目(ZR2013EEM023)、山东省高等学校科技计划项目(J11LE10, J10LE11)和山东科技大学学术著作出版基金的资助,特此致谢。

我们深知跨河海桥梁在风浪流作用下的荷载效应研究,难度极大,也非常复杂,需进行长期的深入研究,其在桥梁工程领域的应用还有大量的工作需要去完善。本书仅仅是作者在桥梁上部结构波浪流荷载效应方面的初步研究探索,受水平限制,书中错误和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

张宪堂 高康宁

2013年9月于青岛

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 桥梁结构风浪流荷载作用研究现状与进展	4
1.2.1 桥梁上部结构波流力荷载研究现状	4
1.2.2 桥梁上部结构波浪荷载理论计算研究现状	5
1.2.3 工程结构波浪荷载数值模拟研究现状	6
1.3 桥梁风浪流荷载效应中有待研究的问题	10
第2章 风浪流特性及其对桥梁上部结构作用宏观机理	11
2.1 波浪的种类及基本特性	11
2.1.1 波浪基本要素	11
2.1.2 波浪的分类	11
2.1.3 风浪和涌浪	12
2.1.4 地震海啸与风暴潮	14
2.1.5 近岸波	16
2.2 波流(洪水)对桥梁上部结构的作用机理	17
第3章 波浪计算理论基础	19
3.1 引言	19
3.2 波浪计算理论	20
3.2.1 波浪的流体动力基本方程及其边界条件	20
3.2.2 线性波理论	20
3.2.3 非线性波浪理论	23
3.2.4 各种波浪理论比较	31
3.3 随机波浪理论	33
3.3.1 随机波浪的概念	33
3.3.2 波浪谱	34
3.3.3 波浪谱种类	36



3.3.4 随机波浪场	40
第4章 数值波浪水槽原理	41
4.1 引言	41
4.2 数值波浪水槽的数学原理	42
4.2.1 波浪水槽基本控制方程	42
4.2.2 波浪水槽的边界条件	45
4.2.3 波浪水槽的初始条件	45
4.3 VOF 方法的数学原理	45
4.3.1 VOF 方法的控制方程	45
4.3.2 VOF 方法控制方程的离散	46
4.3.3 VOF 方法跟踪处理自由表面	51
4.4 数值波浪水槽流场运算方法	51
4.4.1 SIMPLE 算法介绍	52
4.4.2 SIMPLE 算法的改进(PISO 法)	55
4.5 造波与消波原理及方法	57
4.5.1 造波原理方法	57
4.5.2 消波原理方法	59
第5章 数值波浪水槽建立及结果分析	60
5.1 引言	60
5.2 数值造波过程实现	60
5.2.1 CFD 模型建立与网格划分	60
5.2.2 模型边界条件的确定和实现	63
5.2.3 模型气水分界自由液面的求解	66
5.3 二维波浪数值模拟及结果分析	66
5.3.1 线性波的数值模拟及结果分析	67
5.3.2 Stokes 波的数值模拟及结果分析	77
第6章 波流对桥梁上部结构荷载效应分析	81
6.1 波流对桥梁上部结构作用力理论分析	81
6.1.1 波流对桥梁上部结构水平作用力分析	81
6.1.2 波流对桥梁上部结构竖向作用力分析	83
6.2 不同淹没程度的板桥主梁波流力对比分析	84
6.2.1 实验室实验模型简介	84
6.2.2 数值模拟计算	85
6.2.3 计算结果与实验结果对比分析	86
6.3 梯形箱梁桥主梁波流力数值模拟分析	94
6.3.1 数值模型的建立	94



6.3.2 双幅桥面波流作用下的升阻力模拟计算	96
6.3.3 各种模型升阻力数据分析和比较	103
6.3.4 不同淹没程度对梯形箱梁升阻力的影响分析	105
6.4 波流升阻力变化与水流淹没程度相关性分析	109
第7章 桥梁上部结构波浪力荷载效应分析	110
7.1 引言	110
7.2 小尺度水平圆柱波浪荷载计算	110
7.2.1 Morison 公式计算简介	110
7.2.2 Kaplan 计算方法	111
7.3 大尺度平板结构波浪荷载计算	112
7.3.1 Kaplan 计算方法	112
7.3.2 平均压力法	113
7.3.3 修正压力法	114
7.4 桥梁上部结构波浪力荷载效应计算理论	114
7.4.1 波浪对桥面板的上托力计算	114
7.4.2 波浪对桥面板的侧压力计算	115
7.4.3 波浪对桥面板的下压力计算	116
7.5 物理模型试验研究	116
7.5.1 试验波浪要素计算	116
7.5.2 试验模型的建立	117
7.6 二维数值波浪水槽计算	117
7.6.1 几何建模	117
7.6.2 计算过程简介	118
7.7 理论数值计算与试验数据对比分析	123
7.7.1 不同桥面高程和不同设计水位对桥梁上部结构波浪力的影响	123
7.7.2 不同海底高程对桥梁上部结构波浪力的影响	125
7.7.3 两主梁间距对桥梁上部结构波浪力的影响	127
7.8 不同桥梁主梁断面形式对波浪力的影响分析	128
7.8.1 梯形箱梁断面波浪力计算分析	128
7.8.2 T 型梁桥断面波浪力计算分析	132
7.8.3 三种主梁断面波浪力对比分析	135
7.9 桥梁主梁局部波浪冲击力作用数值模拟与分析	136
7.9.1 桥梁主梁局部波浪冲击力作用数值模型建立	137
7.9.2 桥梁主梁局部波浪冲击力作用分析	137
第8章 风浪流荷载作用下桥梁上部结构设计方法	141
8.1 引言	141



8.2 桥梁上部结构波流荷载的估算方法及分析	141
8.2.1 波流作用力计算方法	141
8.2.2 特殊条件下阻力计算的修正	142
8.3 桥梁上部结构波浪荷载的估算方法及实例分析	144
8.3.1 波浪荷载估算方法	144
8.3.2 应用实例分析	146
8.4 桥梁上部结构抗风浪流措施	148
8.4.1 桥梁上部结构抗风浪流设计措施	148
8.4.2 桥梁上部结构抗风浪流构造措施	148
参考文献	149

第1章 绪 论

1.1 引言

2004年9月16日,飓风“伊万”伴随着时速达220km的风暴、24m高的巨浪,轮番冲击美国阿拉巴马海岸。其中最高一个巨浪的高度达27.7m,海底最大水流速度达到2.25m/s。飓风“伊万”给海洋基础设施和沿岸设施造成了极大的破坏,造成116人死亡,保险公司收到总计达280亿美元的赔偿申请。其中跨湖长桥 Lake Pontchartrain Causeway Bridge(约38.64km)在风和风暴潮、浪的作用下遭到了严重的破坏(Scott L. Douglass et al.,2006)(图1.1)。

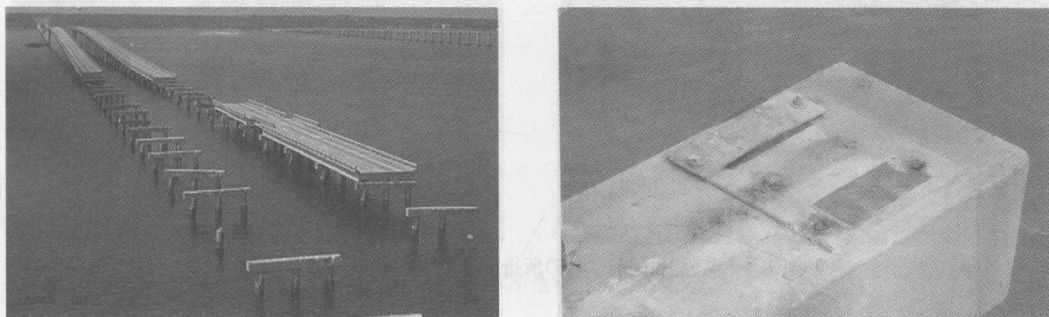


图1.1 飓风“伊万”(2004)所造成的桥梁破坏

2005年8月底,飓风 Katrina 冲击了阿拉巴马州、密西西比州和路易斯安那州的海岸,其破坏程度位列第四大飓风历史记录。飓风 Katrina 沿着墨西哥湾沿岸的中部造成了广泛的灾难性的破坏,超过25万人流离失所,超过1000人死于这场灾难,经济损失超过了1000亿美元(Graumann et al.,2005)。飓风还摧毁了墨西哥湾沿岸路易斯安那州、密西西比州和阿拉巴马州的工程基础设施(联邦紧急事务管理局,2006),各地的民用建筑和财产造成了大规模的破坏。公路桥梁也受到严重破坏,其中许多桥跨移位落梁,有些则被完全毁坏,不能再修复(图1.2~图1.5)。鉴于许多处桥梁结构破坏,因此大部分交通中断,即使能够通行的桥梁,车辆载重量也受到限制,给救灾工作造成了巨大的困难。这起灾难使各国学者集中注意到海洋和陆地之间平衡的脆弱性,美国专家学者开始转向沿海桥梁的毁坏机理研究,美国国家科学基金会拨出专项资金用于这项研究。灾害调查显示,中小跨径的桥梁和可开启桥梁遭受的破坏最严重,以 I-10 Twin Span 桥、US-90 Ocean Springs 桥和 US-90 Bay St. Louis 桥破坏最为典型(Scott L. Douglass et al.,2006)。

洪水对桥梁的损坏更是常见(图1.6),每年全球因洪水所造成损害的桥梁不计其数。随着全球气候环境条件的日益恶劣,全球每年都有许多国家和地区发生大规模的洪水、山洪等自然灾害,造成数千座桥梁损毁和垮塌。桥梁的损毁除桥梁本身破坏所造成的生命财产损失外,也同时阻断了救援的路线,间接损失更是高不可估。



图 1.2 飓风 Katrina(2005)所造成的桥梁破坏

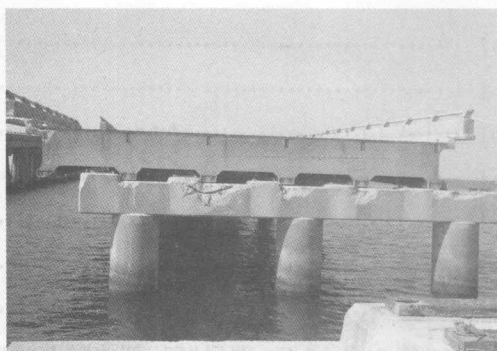


图 1.3 飓风 Katrina(2005)所造成的
I-10 Twin Spans 桥梁破坏



图 1.4 飓风 Katrina(2005)所造成的 I-10 桥梁支座处破坏

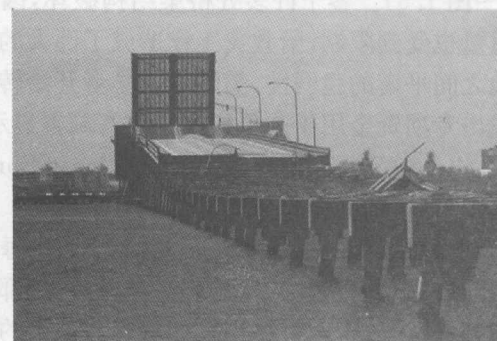


图 1.5 飓风 Katrina(2005)所造成的 I-10 和 US-90 号桥梁破坏



a)土耳其伊斯坦布尔洪水淹没桥梁



b)洪水将桥梁上部结构冲毁



c)德国洪水摧毁桥梁



d)洪水冲击桥梁主梁

图 1.6 洪水所造成的桥梁毁坏

在 20 世纪桥梁工程取得巨大成就的基础上,21 世纪的世界桥梁工程将进入建设跨河海联岛工程的新时期。在 21 世纪上半叶,已经规划多年的洲际跨海工程,如欧非直布罗陀海峡通道、欧亚博斯普鲁斯海峡第二通道以及欧美白令海峡工程将有可能付诸实现。在欧洲,英伦二岛、挪威沿海诸岛、德国和丹麦之间的费曼海峡以及意大利的墨西拿海峡也都正在或将要实施跨海工程建设。在亚洲,东北亚的日本和朝鲜有可能通过朝鲜海峡的跨海工程建设陆路通道。日本继本四联络线后还将实施“第二国土轴”计划,通过多座跨海(海峡和海湾)工程建设沿太平洋海岸的高速公路干线(项海帆,2000)。

随着国民经济的发展和西部大开发战略计划的实施,我国正在进行贯穿南北、横穿东西的干线公路网的建设,在完成五纵七横主干公路网建设的同时也已开始跨海工程的前期工作。目前在建或已完成的沿海高速公路干线涉及五个大型跨海工程项目,依次跨越渤海海峡、胶州湾、长江口、杭州湾、珠江口伶仃洋和琼州海峡(项海帆,2000;周念先,等,2001)。这五个跨海工程中修建主跨超过 2000m 的悬索桥和主跨超过 1000m 的斜拉桥,这些桥梁建设项目都属于特大型工程项目(项海帆,1998)。

上述美国的桥梁之所以发生如此重大的损毁,除了不可抗因素外,主要原因就在于对跨河海桥跨结构系统在极端风浪流共同作用下的荷载特性还未充分认识清楚,不能采取有效的抵抗措施来预防。在我国,风暴潮、巨浪灾害随着全球环境恶化和海平面的上升对沿海地区的破坏越来越严重,潮水(浪)高度和发生频率也逐年增长。洪水暴发地区和频次不断增加,而且无



规律可循。随着多座跨河海长桥的建成,巨浪和波流对跨河海长桥的破坏程度也呈上升趋势。从许多破坏桥梁中抽象出来的这个科学问题给我们以启示,研究跨河海长大桥跨结构系统在风浪流作用下的荷载效应机理,对提高桥梁安全性和耐久性,控制灾害性破坏的发生,不但具有十分重要的理论价值和现实意义,而且具有明确的应用前景。

风暴潮、浪和洪水导致水面升高,呈起伏波动状态,直接影响到桥下及周围气流特性,从而改变桥梁的升力、阻力系数等。对于通航桥跨或桥下净空高度较高的桥跨会因为其下表面及周围气流特性的改变,导致其空气的静、动力特性也随着改变。对于桥下净空高度较低的桥跨可能会直接受到水流巨浪的冲击作用,将整个桥梁断面包裹在一个气液流场中,同时由于桥下空气受到急剧压缩致使升力突然增大,最终导致桥梁被摧毁。所以研究“空气(风)—浪流—桥梁(气体—液体—固体)”三者间的相互作用机理是本书的基本出发点,也是目前一门新的边缘学科——水面空气动力学的研究范畴之一。

1.2 桥梁结构风浪流荷载作用研究现状与进展

1.2.1 桥梁上部结构波流力荷载研究现状

在发生洪水或巨浪时,跨河或者跨海桥梁会部分或全部淹没在水中,桥梁上部结构会遭受到巨大的波浪流力冲击。一并考虑波浪流发生的概率信息,正确估计波浪流作用在桥梁结构上的外部荷载大小,对桥梁结构设计和评估其破坏程度具有重要的意义。

目前,自由流体表面和工程结构之间的相互作用主要集中在圆柱体和流场畸变两方面的研究(Turgut et al., 1978; Hunt et al., 1981; 邱大洪, 1981; 李玉成, 等, 1986; Armand et al., 1987; Clement, 1991; 宫成, 等, 1990; 康海贵, 等, 1990; Isaacson et al., 1993; 姚熊亮, 等, 1994; 1995; 1997; 1997; Arntsen, 1996; 呼和敖德, 等, 1998; Sundar et al., 1999; Hoyt et al., 2000; Zhu et al., 2000; 黄国兴, 2002; 杨冠声, 等, 2002; 芮光六, 等, 2004; Falrinsen et al., 2005)。结构形状对于结果的影响程度只能用于有限的设计范围内。Tainsh 研究了当桥梁部分或者全部被水流淹没时作用于四跨或三跨梁桥主梁上的作用力(Tainsh, 1965)。其研究表明,在实验室水槽试验中,结构放置高度要保证能够忽略沟槽底板的影响。在忽略沿桥梁表面剪应力作用的情况下,作用于桥梁上的力可以通过放置于水槽中心的主梁的压力分布计算出来。假设当雷诺数 $1 \times 10^4 < Re_c < 5 \times 10^6$ 时试验值真实有效,根据佛劳德相似律可以建立模拟桥梁原型的全桥模型试验。Denson(1982)介绍了三种不同类型的梁板桥在部分和全部淹没情形下的阻力、升力和动量系数的实验研究。他研究了桥梁佛劳德数和力学系数的相关性,利用桥梁上部结构总高度和沿水流方向的宽度计算出了桥梁的阻力系数和升力系数,并且作为各自工况的特征长度。同时分析了动量系数,并得出了大量的试验数据,但是没有提供与这些数据物理意义相关的解释。Tainsh(1965)和 Denson(1982)均假定这些参数与雷诺数无关进行了研究。研究表明:矩形截面的柱体在无限的均匀流中这种自相似假定是合理的(Blevins, 1984),至少证明了不同形状物体在无限的自由表面均匀流中这种自相似假定是合理的。Naudascher 和 Medlarz(1983)直接利用测力器测量了作用在梁桥模型上的总阻力。他们考虑了以下因素在平均时间内对于部分淹没桥梁的波流力荷载作用的影响:①梁的数量和轮轴距



的影响;②桥梁的高度;③水流和桥轴线的角度。Malavasi 和 Alberto(2003)对矩形截面的桥梁断面进行了量化的动水力荷载实验。针对多种淹没形式和桥梁断面弗劳德数测量了作用在障碍物上的时变动水荷载。并对实验结果进行了分析,讨论了桥梁断面弗劳德数以及几何因素对平均作用力系数(阻力、升力、力矩系数)的影响(Malavasi et al., 2003)。石雪飞讨论了箱形截面漫水桥设计中应考虑的水力荷载,包括浮力、等效静水力和由箱内外水头差引起的动态浮力等。利用离散涡的流场数值方法给出了底板开孔的漫水箱梁桥各种水力荷载的计算方法,以及相应的荷载组合方法(石雪飞,等,2004)。刘珍在小流速假设下,将速度势进行摄动展开,边界条件分解为双物体假设下的零阶波陡稳定问题和一阶波陡下的不稳定波浪问题。采用时域高阶边界元法研究了定常流对规则波与任意形状结构物作用的波面升高、一阶激振力和二阶慢漂力随波数的变化关系以及圆柱周围波幅的分布曲线,并与已有频域结果和时域结果对比验证了所建模型的准确性(刘珍,等,2010;Zhen Liu et al., 2010)。

1.2.2 桥梁上部结构波浪荷载理论计算研究现状

在跨海桥梁工程中,桥梁上部结构位于或低于浪溅区的结构物的安全与波浪冲击作用关系极大。若这些桥梁的上部结构底高程较低,在恶劣海况下当大波浪在其面板下面通过并与之接触时,面板下面除了作用有强度变化较缓慢的波压力外,在波峰刚接触到面板时尚存在着历时很短但强度极大的砰击压力,这种极强砰击荷载会引起结构物的整个上部结构失稳或造成局部破坏。另外在波浪离开上部结构底面时,面板底面受到的波浪负压力作用对混凝土结构的耐久性也是一个很大的威胁。砰击荷载的预报一直是船舶制造十分重视的一种荷载(Ochi et al., 1962; 1973; Stavovy et al., 1976)。近二十年来在海岸和近海工程设计中越来越受到重视,已形成一个新兴课题(Dalton et al., 1976; Miller et al., 1977; Campbell et al., 1980; Isaacson et al., 1993; Falinsen et al., 2005),但是在桥梁结构上的应用研究还鲜有文献叙述。

波浪冲击过程的机理极其复杂,涉及波浪的强非线性、瞬时效应、流体黏性、湍流、水气掺混等因素,至今仍是海岸工程领域没有解决的困难课题之一。国内外有关波浪对浪溅区结构物砰击作用的研究工作大都以试验研究为主。实际海上工程结构设计中冲击荷载的确定通常是采用依据大量试验得到的经验公式或针对具体工程进行物理模型试验。

在目前已发表的文献中,关于波浪对小尺度水平圆柱冲击问题的研究,基本上是采用半理论半经验的方法,一般是理论研究给出冲击力的表达式,再通过物理模型试验确定冲击系数。其理论研究的基本假设为流体无旋,不可压缩,且圆柱尺度与波浪尺度相比非常小,入射波的表面局部平坦。其理论表达式采用与 Morrison 方程相近的形式。冲击力的表达式被简化为 $F_i = 0.5 C_s \rho U^2 D l$, C_s 定义为冲击系数,其理论值等于 π (Kaplan et al., 1976; Falinsen et al., 1977; Turgut Sarpkaya, 1978);当考虑冲击对水面的扰动影响时, C_s 等于 2π (Armand et al., 1986);而由试验研究得到的冲击系数 C_s 离散程度很大,从 1.0 到 7.79 不等 (Kaplan et al., 1976; Falinsen et al., 1977; Turgut Sarpkaya, 1978; Armand et al., 1986; Dalton et al., 1976; Miller, 1977; Campbell et al., 1980; Isaacson et al., 1993)。这些研究结果虽然给出了冲击力的范围,但由于各人所得到的冲击系数离散性太大,因此在实际工程中这些结果的应用受到了很大的限制。



大尺度水平平板结构的冲击问题,近年来引起越来越多的关注。一个典型的例子就是北海 Ekofisk 油田的平台,近年来由于海底沉陷作用的影响,造成 Ekofisk 平台上部结构的净空不足,当大波波峰淹没平台时,会对平台产生很大的冲击力(Kaplan, 1992; Kaplan et al., 1995)。N. Suchithra(1995)沿用小尺度水平圆柱冲击问题的处理方式给出了冲击力的简化表达式,通过物理模型试验得到了水平平板的冲击系数(Suchithra et al., 1995)。当入射波为规则波时, N. Suchithra 给出的冲击系数范围为 2.5~10.2;当入射波为畸形波时, N. Suchithra 给出的冲击系数范围为 8.7~10.2。在水平平板冲击问题的理论研究方面, Kaplan 亦采用与处理小尺度水平圆柱相近的方法,给出了作用在水平平板上的冲击力的公式(Kaplan, 1992; Kaplan et al., 1995)。但是对于大尺度水平平板结构的冲击问题,波浪自由面形状的影响不可忽略,并且由于冲击时波浪破碎和变形的影响,以及冲击时在平板底部和波浪自由面间形成的可压缩的空气槽的影响,使得大尺度水平平板的冲击问题与小尺度水平圆柱的冲击问题性质差别很大,因此用推广小尺度圆柱冲击问题的处理方法来研究大尺度平板结构的冲击问题存在着很大的缺陷。王永学等(1999)通过一系列波浪水槽试验,对不同波浪参数,不同相对净空,不同结构物尺度等情形的规则波冲击问题进行了试验研究。试验结果表明:即使在入射波为规则波情形下,波浪冲击压力峰值亦具有随机性;对于线性波和非线性波,冲击压力峰值的最大值出现在不同的相对净空处;相对净空对于负冲击压力的分布没有显著影响等(王永学,等,1999)。

国内学者对透空式建筑物面板的波浪上托力提出的估算方法主要有两种。一种是平均压力法(原交通部第一航务工程勘察设计院, 1975),计算上部结构底面波浪力压强时按原始波高来考虑。此方法对波浪冲击压力按静压力作用处理,波浪动力效应通过乘以一常数项来考虑,不能正确反映冲击压力的大小及分布的变化规律。另一种方法是压力修正法(过达,等, 1980),是河海大学通过对离岸透空式桩基码头进行的试验研究提出的,计算上部结构底面波浪力压强时考虑波浪的变化规律。这种方法对于结构简单的窄平板式上部结构,能较正确地反映出波浪冲击压力大小和分布的变化规律,但是当波高较大,建筑物太低时,由此法得到的计算值明显大于试验值(宋初,等, 1997;李炎保,等, 1997)。

以上研究成果都是以规则波的冲击作用为研究对象的, Murray 等(1997)以随机波列中某一特定组成波为入射波进行了波浪冲击试验,和以具有相同波峰和周期的规则波为入射波的试验结果相比较,结果表明二者的冲击特性没有明显差别。由于随机波列的波浪特性和其中某一特定组成波的波浪特性差别很大, Murray 等的研究结果实质上仍然是属于规则波的冲击问题(Murray et al., 1997)。

从目前发表的文献来看,随机波浪的冲击问题,尤其是对于具有不同结构形式的桥梁主梁的随机波浪冲击问题,几乎还是空白。为了更准确地预测波浪的冲击荷载,深入认识波浪冲击机理,需要进一步开展随机波浪冲击问题的水动力特性以及冲击压力在空间上和时间上的分布特性等方面的研究工作。

1.2.3 工程结构波浪荷载数值模拟研究现状

波浪物理模型试验和波浪数值模拟试验是解决波浪等动力因素及其对建筑物相互作用问题的重要手段,对于不同情况、不同要求应选用不同的方法。



物理模型试验受场地限制,需大幅度缩小比例尺,由于比例尺效应而影响结果的精确度。此外,物理模型中一般使用水并在重力场中进行试验,在复杂力学现象中只能满足一个力(重力或摩擦力)的相似,因而相似性受到限制。数学模型是在一定边界初始条件下求解微分方程,具有很好的重复性,条件易于控制,可以长时间模拟过程,也便于改变边界条件,而物理模型就不是很容易。由于以上优点,数学模型在海岸工程建设中发挥着越来越大的作用。目前,国外一些著名的水力实验室,如荷兰的 DELFT、丹麦的 DHI、英国的 HR 等的数值计算已可代替 50%~80% 的物理模型试验,国内的中国船舶科学研究中心,上海交通大学、大连理工大学、天津大学等也正致力于这方面的研究(Boo,1993;Boo et al.,1994;Boo et al.,2002;任冰,2003),并已取得了一定的成果。

由于波浪荷载是海岸工程结构物最主要和最经常的自然荷载,因此准确地得出波浪对各类结构物的作用力一直受到人们的普遍重视。当物理现象的机理和规律比较清楚,数值方法较准确,经实践证明能反映问题本质时,数值模拟较物理模型试验具有方便、快捷和经济等优点。首先是数值模拟耗费人力、物力少,工期短,对工程设计方案可以进行多方案比较;其次是可以进行较大范围的数值模拟,特别适用于海岸工程。尤其是随着当今计算机技术的飞速发展,使得计算机容量越来越大、速度越来越快,数值模拟已逐渐成为研究波浪冲击问题的一种重要方法。

波浪数值模拟试验经过多年的发展,越来越多地应用于波浪及其与建筑物作用的模拟。它具有不受模型比例尺的限制、省时和费用少的特点,常在工程规划、可行性研究和方案比较中采用。在外海波要素的确定以及波浪从深水到浅水的传播变形的研究方面,因涉及较大范围多种因素的影响,只能采用数值模拟的方法。此外,对工程规模小,边界等条件较简单,数值模拟结果可以满足要求时,一般也采用数值模拟。目前,适用于含有自由表面的、二维不可压缩黏性流体非定常运动的流体体积法(VOF)被用来研究波浪的冲击问题(Hirt et al.,1981;Bogdan Iwanowski. et al.,2002;黄银水,2003)。王永学应用经过改进的 VOF 方法,对不同波浪参数、结构物尺度、结构物与静水面距离等情形进行了数值计算,得到规则波冲击压力的主要特征有:波浪冲击压力幅值表现出明显的随机性;波浪离开结构物底面时,结构物受到负压作用;建筑物底面离静水面高度对冲击压力有较大的影响等(王永学,等,1999)。

2002 年,Iwanowski. et al. 以应用 Kaplan 等人(Kaplan,1992)的方法求解 Airy 波的计算结果为基准,把应用 VOF 方法的二维模型 FSWL-2D 和三维模型 FLOW-3D 的数值计算结果与之进行了比较(Bogdan Iwanowski. et al.,2002)。Iwanowski 等计算中的入射波浪类型分别为五阶 Stokes 波和 Airy 波。比较结果表明:采用 FLOW-3D 模型求解五阶 Stokes 波得到的竖向力计算结果和 Kaplan 求解 Airy 波的竖向力计算结果吻合较好。而采用 FSWL-2D 模型求解 Airy 波和 5 阶 Stokes 波的计算结果以及采用 FLOW-3D 模型入射波浪类型为 Airy 波的数值计算结果普遍大于应用 Kaplan 等人的方法得到的 Airy 波的计算结果(Bogdan Iwanowski. et al.,2002)。

但是当所研究的波浪问题较为复杂,对其变化机理尚未有充分认识时,数值模拟的控制方程、边界条件等需作近似处理,波浪数值模拟又显现出一定的局限性。特别是分析波浪对防波堤和较为复杂的建筑物的作用等问题时,建立数值模拟控制方程仍十分困难。近年来对兴建的大型港口工程、核电站取水工程及跨海桥梁、轮渡等工程中的波浪问题,进行了数值模拟和



物理模型试验。在规划和可行性研究中采用数值模拟,对工程方案的进一步优化、确定和修改设计方案时,采用物理模型试验。本书结合已有实验和现场量测,利用数值模拟来进行分析比较,进一步阐明跨河海桥梁结构在波浪流作用下的荷载效应及气—液—固三相耦合作用机理,以得出更为合理的跨河海桥梁设计参数,用以指导工程设计。

当然,数学模型也有不足和局限性。首先是对复杂物理现象提出一个准确的数学模型不是所有问题都能够做到的。在问题机理尚未完全确定以前,数学模型很难准确化,如破碎波的掺气、海气交界的掺混、淤泥和粉沙的运动规律等。其次是数学模型建立后数值方法离散时需要进行稳定性、收敛性分析,现有的分析方法都仅对线性方程有效,对非线性方程还没有完善的理论,对计算中的一些伪物理效应如数值色散和数值耗散的控制还有待深入(任冰,2003)。计算过程中有时还有一定的技巧性,因此为了验证结果还必须与物理模型试验甚至原型观测进行校核。第三是数值模拟本身还受到计算机条件的限制。例如流体流动现象中关键的湍流问题,由于计算机速度和容量的限制,湍流的直接模拟还未达到实用阶段,因而需要用各种湍流模型来封闭时均流体力学方程。另外湍流模型中仍有不少经验系数需要确定。总之在强调数值模拟的优越性时还必须看到其局限性,把它放在适当位置。它与理论分析、物理模型试验相辅相成,都是解决问题的重要手段。

近年发展起来的“复合模型”是一个很好的发展方向。一是理论分析和数学模型相结合。对一个物理问题尽可能的用解析结果减小数值计算的工作量。如复杂格林函数法,经过推导出找出满足某些边界条件的格林函数,使边界积分的工作量大大减少,就是一个很好的例子。另一类复合模型是数学模型试验和物理模型试验相结合,即先用数学模型进行大范围的计算,再利用计算结果作为局部物理模型试验的边界条件。这样可以使一些必须进行物理模型试验的问题局限于小范围内进行,使物理模型试验的比尺不会缩小太多,这是一种经济高效的方法。

对于波浪荷载的计算,人们提出了各种各样的计算方法,其中最著名的是有 Morison 等在 1950 年提出的计算公式。Morison 方程形式简单,便于工程应用,是目前海岸工程设计中计算波浪荷载的最常用的方法。但是,Morison 方程的应用有一个限制条件:物体的尺度相对于波长必须是较小的,即小尺度问题,以保证入射波在物体周围基本上是未受扰动的(黄祥鹿,等,2003)。而当物体较大时,即大尺度问题,这一点是不能保证的。入射波将在物体附近产生明显的畸变,即产生绕射现象。随着大型结构物在海岸工程的广泛应用,绕射问题的解决显得越来越重要。目前,国内外在波浪对大尺度物体作用力方面有较多的研究。当波浪高度相对于波长较小时,可用线性理论使问题进一步简化。迄今为止,线性理论的发展已经比较成熟,对于海岸工程中大量大直径圆柱可以很方便地求解。当波幅或波陡很大时,必须考虑非线性问题。目前,对非线性问题的处理,就数学方法而论,主要有摄动法、边界元法和直接进行数值求解(主要用有限元法或有限差分法)。

摄动法是求解近似分析解的最重要手段,可求得比较简单又准确的近似分析解,比较容易看到每个物理参数对解的影响。如果限于入射波陡比较小,则可用摄动法近似处理非线性问题,但一直限于二阶近似。国内外有不少研究工作,主要集中在研究二阶波浪力。Hunt 等就无限水深中垂直圆柱的情况得到了驻波型的二阶绕射势解(Hunt,1981)。周清甫用自由面上分布点源的方法提出了一种解,但事实上只适用于无限水深的情况(周清甫,1984)。陶建华等提出了有限水深满足非其次表面边界条件的格林函数,计算了大尺度物体二阶波浪荷