



“十三五”国家重点图书出版规划项目
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护
特大型桥梁防灾减灾与安全控制技术丛书（一期）

Design Guidelines for Wind-Wave-Current
Coupling Action of Super-large Bridge

特大型桥梁 风-浪-流耦合作用设计指南

刘 高 张喜刚 陈上有 刘天成 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



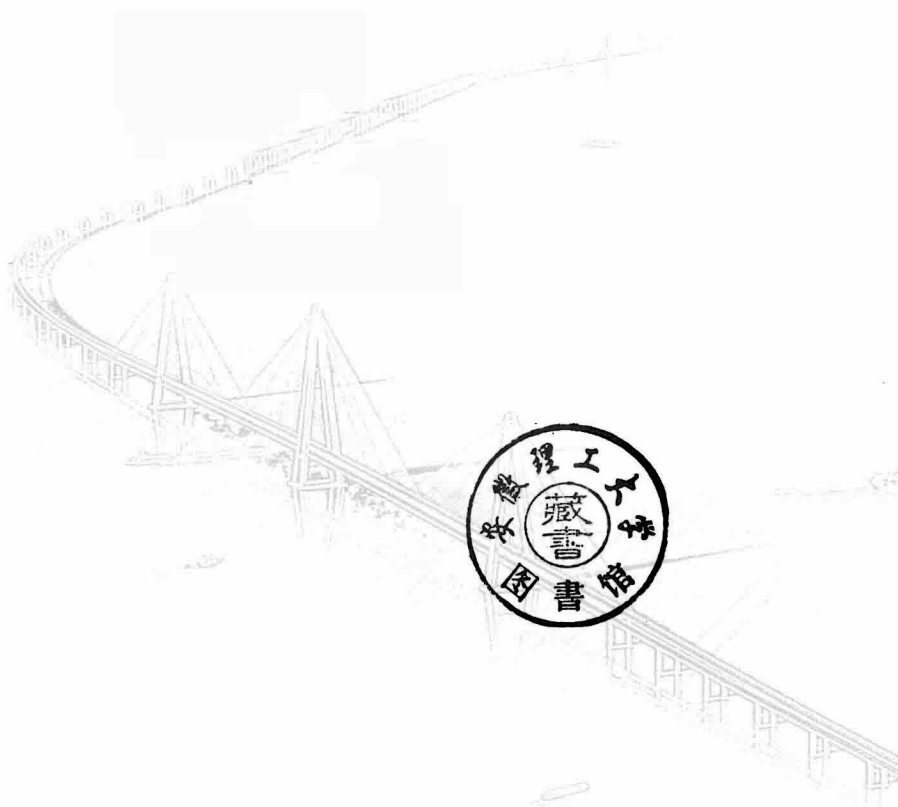
国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点图书出版规划项目
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护
特大型桥梁防灾减灾与安全控制技术丛书（一期）

Design Guidelines for Wind-Wave-Current
Coupling Action of Super-large Bridge

特大型桥梁 风-浪-流耦合作用设计指南

刘高 张喜刚 陈上有 刘天成 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

图书在版编目(CIP)数据

特大型桥梁风-浪-流耦合作用设计指南 / 刘高等著.

—北京:人民交通出版社股份有限公司, 2018.9

ISBN 978-7-114-14905-4

I. ①特… II. ①刘… III. ①跨海峡桥—风浪—耦合作用—桥梁设计—指南 IV. ①U448.192-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第161205号

“十三五”国家重点图书出版规划项目
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护
特大型桥梁防灾减灾与安全控制技术丛书(一期)

书 名:特大型桥梁风-浪-流耦合作用设计指南

著 者:刘 高 张喜刚 陈上有 刘天成

责任编辑:周 宇 周佳楠 黎小东

责任校对:尹 静

责任印制:张 凯

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

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:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京雅昌艺术印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:15.5

字 数:322千

版 次:2018年12月 第1版

印 次:2018年12月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-14905-4

定 价:100.00元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

交通运输科技丛书编审委员会

(委员排名不分先后)

顾问：陈健 周伟 成平 姜明宝

主任：庞松

副主任：洪晓枫 袁鹏

委员：石宝林 张劲泉 赵之忠 关昌余 张华庆

郑健龙 沙爱民 唐伯明 孙玉清 费维军

王炜 孙立军 蒋树屏 韩敏 张喜刚

吴澎 刘怀汉 汪双杰 廖朝华 金凌

李爱民 曹迪 田俊峰 苏权科 严云福

序

科技是国家强盛之基,创新是民族进步之魂。中华民族正处在全面建成小康社会的决胜阶段,比以往任何时候都更加需要强大的科技创新力量。党的十八大以来,以习近平同志为总书记的党中央作出了实施创新驱动发展战略的重大部署。党的十八届五中全会提出必须牢固树立并切实贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,进一步发挥科技创新在全面创新中的引领作用。在最近召开的全国科技创新大会上,习近平总书记指出要在我国发展新的历史起点上,把科技创新摆在更加重要的位置,吹响了建设世界科技强国的号角。大会强调,实现“两个一百年”奋斗目标,实现中华民族伟大复兴的中国梦,必须坚持走中国特色自主创新道路,面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求。这是党中央综合分析国内外大势、立足我国发展全局提出的重大战略目标和战略部署,为加快推进我国科技创新指明了战略方向。

科技创新为我国交通运输事业发展提供了不竭的动力。交通运输部党组坚决贯彻落实中央战略部署,将科技创新摆在交通运输现代化建设全局的突出位置,坚持面向需求、面向世界、面向未来,把智慧交通建设作为主战场,深入实施创新驱动发展战略,以科技创新引领交通运输的全面创新。通过全行业广大科研工作者长期不懈的努力,交通运输科技创新取得了重大进展与突出成效,在黄金水道能力提升、跨海集群工程建设、沥青路面新材料、智能化水面溢油处置、饱和潜水成套技术等方面取得了一系列具有国际领先水平的重大成果,培养了一批高素质的科技创新人才,支撑了行业持续快速发展。同时,通过科技示范工程、科技成果推广计划、专项行动计划、科技成果推广目录等,推广应用了千余项科研成果,有力促进了科研向现实生产力转化。组织出版“交通运输建设科技丛书”,是推进科技成果公开、加强科技成果推广应用的一项重要举措。“十二五”期间,该丛书共出版72册,全部列入“十二五”国家重点图书出版规划项目,其中12册获得国家出版基金支

持,6册获中华优秀出版物奖图书提名奖,行业影响力和社会知名度不断扩大,逐渐成为交通运输高端学术交流和科技成果公开的重要平台。

“十三五”时期,交通运输改革发展任务更加艰巨繁重,政策制定、基础设施建设、运输管理等领域更加迫切需要科技创新提供有力支撑。为适应形势变化的需要,在以往工作的基础上,我们将组织出版“交通运输科技丛书”,其覆盖内容由建设技术扩展到交通运输科学技术各领域,汇集交通运输行业高水平的学术专著,及时集中展示交通运输重大科技成果,将对提升交通运输决策管理水平、促进高层次学术交流、技术传播和专业人才培养发挥积极作用。

当前,全党全国各族人民正在为全面建成小康社会、实现中华民族伟大复兴的中国梦而团结奋斗。交通运输肩负着经济社会发展先行官的政治使命和重大任务,并力争在第二个百年目标实现之前建成世界交通强国,我们迫切需要以科技创新推动转型升级。创新的事业呼唤创新的人才。希望广大科技工作者牢牢抓住科技创新的重要历史机遇,紧密结合交通运输发展的中心任务,锐意进取、锐意创新,以科技创新的丰硕成果为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通贡献新的更大的力量!

杨治堯

2016年6月24日

前 言

21 世纪以来,世界桥梁建设进入了跨海连岛工程的新时期。我国相继建成了东海大桥、杭州湾大桥、青岛海湾大桥等跨海大桥。目前,港珠澳大桥已建成通车,大连湾跨海大桥、六横跨海大桥、深中通道工程已开工建设,跨越琼州海峡、渤海海峡的巨型跨海通道工程正在规划研究。在国际上,世界各国也都在加快规划研究规模宏伟的跨越海湾、连接岛屿与大陆的跨海交通工程,如跨越直布罗陀海峡、挪威沿海诸岛、印度尼西亚巽他海峡等的跨海通道工程。

桥梁建设从内陆走向外海,面临着深水、强风、巨浪、急流等恶劣海洋环境的严峻挑战。在海洋环境中,强风、巨浪、海流之间具有强烈的耦合性,产生的动力荷载已成为跨海桥梁的主要控制性荷载。尤其是跨海特大型桥梁,随着跨径的增大,桥梁结构自身刚度越来越小,阻尼越来越低,强风、巨浪、海流激发的动力荷载效应十分显著,风-浪-流耦合将对桥梁结构产生巨大的动力破坏作用。

桥梁风-浪-流耦合作用是复杂的气-液-固耦合作用问题。目前,国内外还没有针对桥梁风-浪-流耦合作用的学术专著和设计标准。在传统桥梁设计中,没有考虑强风、巨浪、海流之间的耦合特性,没有考虑风-浪-流耦合作用与桥梁结构之间的动力耦合效应,通常只考虑风自身的静力和动力作用效应,波浪和海流则作为静力荷载进行单独考虑。因此,如何准确描述风-浪-流耦合场及其对桥梁结构的动力效应是跨海特大型桥梁设计必须研究解决的重大技术难题。

“十一五”期间,在对跨海特大型桥梁风-浪-流耦合作用的技术需求和发展情况进行调研分析的基础上,作者提出并负责完成了国家 863 计划课题“台风浪耦合作用下跨海峡桥梁动力模拟及防灾减灾技术(2007AA11Z101)”,在世界范围内首次开展了跨海桥梁台风-波浪耦合作用问题的探索性研究,形成了桥梁台风-波浪耦合作用的试验模拟技术、数值模拟技术和防灾减灾技术方面的一些初步研究成

果。“十二五”期间,交通运输部将“特大型桥梁防灾减灾与安全控制技术(2011318494001)”列为交通运输“十二五”重大科技专项之首,作者负责该重大科技专项之项目二“特大型桥梁风-浪-流耦合作用研究(2011318494150)”。进入“十三五”时期,在科技部立项的国家重点研发计划“涉水重大基础设施安全保障技术研究与工程示范(2018YFC0809600)”中,作者负责课题四“风浪流耦合及撞击作用下超大跨桥梁致灾机理与安全防控技术(2018YFC0809604)”的研究工作,经过针对风-浪-流耦合作用关键科学问题的多年努力攻关,在深水海洋环境中风-浪-流耦合场现场观测技术及数值模拟技术、风-浪-流耦合场设计参数极值联合概率模型、风-浪-流耦合作用下桥梁三维弹性模型试验模拟技术、风-浪-流耦合作用下桥梁设计方法及数值模拟技术、风-浪-流耦合作用下桥梁振动控制技术、桥梁风-浪-流耦合作用设计指南等方面取得了创新性成果,为港珠澳大桥、深中通道工程提供了技术支撑,为琼州海峡跨海工程等外海跨海桥梁工程建设提供了重要技术储备。交通运输部组织的专家鉴定后认为:“项目形成了具有原创性的研究成果,达到了国际领先水平”。科学技术部和交通运输部对上述科技项目的资助,作者表示衷心的感谢!

作者在系统总结上述科技项目研究成果的基础上,结合重大工程实践,并吸收、借鉴国内外相关工程技术标准的成功经验,编制本指南,以期桥梁结构在风-浪-流耦合作用下的设计达到安全可靠、技术先进、经济合理。本指南共12章,第1章为总则;第2章为术语和符号;第3章为桥梁风-浪-流耦合作用设计目标等级,以及风-浪-流耦合作用与其他作用的组合方法和设计流程;第4章为风-浪-流耦合场观测和分析的相关规定;第5章为风-浪-流耦合场设计参数取值的相关规定;第6章为风-浪-流耦合作用荷载取值的相关规定;第7章和第8章分别为风-浪-流耦合作用静力效应验算和动力效应验算的相关规定;第9章为风-浪-流耦合场试验模拟;第10章为桥梁风-浪-流耦合作用振动控制措施相关规定;第11章为桥梁风-浪-流耦合作用监测与评估相关规定;第12章为本指南用词说明。正文条文后还附有翔实的条文说明,这些条文说明或为正文相关条文提供参考,或介绍正文条文的理论方法背景。

在本指南的撰写过程中,本人负责全书的统稿、定稿和第1、2、3、6、7、8章的编写,张喜刚教授级高工负责第1、2、3、6章部分内容的编写,陈上有高级工程师负责第4、5、10章和附录的编写,刘天成教授级高工负责第9、11章的编写,程潜高级工程师

负责第4、5、7、8章部分内容的编写。参加本书内容相关研究的还有陈汉宝研究员、郭安薪教授、吴宏波教授级高工、周道成副教授、刘海源副研究员、耿宝磊副研究员、柏晓东博士、王昆鹏博士等,在此对他们为本指南相关内容研究所做出的贡献表示感谢!韩冬冬博士、杨海洋博士参加书稿的校对工作,在此表示感谢!

本指南的编写过程中,得到了我的导师项海帆院士、林家浩教授的鼓励和支持,得到了国际桥协原主席K H Ostenfeld先生、钟万勰院士、王景全院士、欧进萍院士、陈政清院士、周绪红院士、赖远明院士、李守善设计大师、孟凡超设计大师、交通运输部原总工程师周海涛教授级高工、侯金龙教授级高工、张劲泉研究员、苏权科研究员、张鸿教授级高工、宋神友教授级高工、周世忠教授级高工、徐国平教授级高工、陈艾荣教授、李惠教授、周志勇教授等的大力支持,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平所限,时间仓促,书中不当之处在所难免,敬请读者多提宝贵意见。



2018年11月

目 录

1	总则	1
2	术语和符号	3
2.1	术语	3
2.2	符号	6
3	风-浪-流耦合作用设计基本原则	19
3.1	一般规定	19
3.2	风-浪-流耦合作用设计目标等级	20
3.3	风-浪-流耦合作用与其他作用组合	21
3.4	风-浪-流耦合作用设计流程	24
4	风-浪-流耦合场观测和分析	27
4.1	一般规定	27
4.2	风-浪-流耦合场观测站点布设	28
4.3	风-浪-流耦合场观测仪器	31
4.4	风-浪-流耦合场观测数据采集和分析	33
5	风-浪-流耦合场设计参数	39
5.1	一般规定	39
5.2	风-浪-流耦合场设计参数分析方法	40
5.3	设计风参数	42
5.4	设计波浪参数	46
5.5	设计水流参数	50
5.6	设计水位参数	50
5.7	浮运沉放施工窗口期设计参数	51
6	风-浪-流耦合作用荷载	53
6.1	一般规定	53

6.2	风荷载	53
6.3	浪-流耦合作用荷载	62
6.4	静力等效荷载及其作用效应	78
7	风-浪-流耦合作用静力效应验算	82
7.1	一般规定	82
7.2	静力稳定性验算	82
7.3	静力承载力验算	87
7.4	正常使用极限状态验算	92
8	风-浪-流耦合作用动力效应验算	95
8.1	一般规定	95
8.2	动力稳定性验算	95
8.3	动力承载力验算	102
8.4	正常使用极限状态验算	104
9	试验模拟	110
9.1	一般规定	110
9.2	风-浪-流耦合场模拟	112
9.3	基础浪-流耦合荷载测试试验	114
9.4	桥梁弹性模型试验	115
9.5	预制基础浮运和沉放过程弹性模型试验	119
9.6	桥梁海啸作用模型试验	120
10	风-浪-流耦合作用振动控制	123
10.1	一般规定	123
10.2	结构控制措施	123
10.3	气动/水动控制措施	125
10.4	机械措施	130
11	桥梁风-浪-流耦合作用监测与评估	132
11.1	一般规定	132
11.2	桥梁风-浪-流耦合作用监测	132
11.3	桥梁风-浪-流耦合作用评估	133
12	本指南用词说明	135
附录 A	全国沿海、海岛及海峡百年一遇基本风速	136
附录 B	风-浪-流耦合场数值模拟分析	139
B.1	一般规定	139

B.2	风场模型	139
B.3	波浪场模型	141
B.4	风暴潮模型	142
B.5	风-浪-流耦合场数值模型	143
附录 C	多维极值联合概率模型	144
C.1	一般规定	144
C.2	多元极值理论	144
C.3	Copula 函数理论	146
C.4	复合极值理论	147
附录 D	波浪谱模型	150
D.1	文圣常谱	150
D.2	改进 JONSWAP 谱	152
D.3	双峰谱模型	153
附录 E	设计水位的统计和计算方法	155
附录 F	波浪在水流作用下的变形计算	158
附录 G	小尺度桩(柱)波浪荷载	161
G.1	基本规定	161
G.2	小尺度桩(柱)波浪荷载	161
附录 H	大直径圆柱体波浪荷载	164
H.1	单个圆柱体	164
H.2	多个圆柱体组成的群墩	166
附录 J	大尺度圆端形断面和矩形倒角断面基础波浪荷载	171
J.1	圆端形断面波浪荷载系数	171
J.2	矩形倒角断面波浪荷载系数	180
附录 K	基于线性绕射理论计算大尺度结构浪-流耦合作用荷载	190
K.1	控制方程及边界条件	190
K.2	边界离散与数值求解	192
K.3	波浪激振力和辐射力	192
K.4	有流速条件下的边界条件修正	193
K.5	浪-流耦合作用下的波浪激振力和辐射力	194
附录 L	水流荷载	195
附录 M	数值风洞和数值水槽模拟	198
M.1	一般规定	198

M.2	数值风洞模拟	198
M.3	数值水槽模拟	200
附录 N	桥面板底部波浪浮托力	207
N.1	一般规定	207
N.2	正向规则波作用	207
N.3	正向不规则波作用	209
附录 P	风-浪-流耦合作用下桥梁结构振动分析方法	212
附录 Q	车-桥-风-浪-流耦合系统振动分析方法	221
附录 R	风场、波浪场、流场试验模拟方法	226
R.1	风场模拟	226
R.2	波浪场模拟	228
R.3	流场模拟	229
参考文献	231

1 总 则

1.0.1 为使桥梁结构在风-浪-流耦合作用下的设计做到安全可靠、技术先进、经济合理,编制本指南。

条文说明

随着桥梁建设从内陆走向外海,桥梁建设面临着深水、强风、急流、巨浪等恶劣海洋环境的严峻挑战。

对于跨海桥梁而言,作用在结构上的风、波浪、海流之间具有强烈的耦合性。海洋波浪通常主要包括风浪和涌浪,其中风浪是指在风力的直接作用下形成的波浪;当风停止,或当波浪离开风区时,这时的波浪便称为涌浪。此外,由于波浪运动导致海面上下起伏并随时间变化,改变了气液界面的粗糙度,因此,波浪运动也将反过来引起风场的变化。波浪和海流之间也具有耦合性,两者相遇时,它们之间的相互作用将影响各自的传播特性,即波浪将发生变形和折射,同时水流的流速分布也将发生变化。

跨海大桥由于刚度低、阻尼小,在风的作用下,桥梁结构可能会发生涡激振动、抖振、驰振,甚至可能诱发气动失稳;在波浪和水流作用下,特别是在波浪卓越周期与桥梁振动周期接近的情况下,将会引起桥梁结构发生大幅共振。因此,在风-浪-流耦合场中,桥梁结构可能会出现大幅振动,甚至可能遭受毁灭性破坏。

可见,风、波浪、海流之间的耦合作用及其与桥梁结构之间的耦合作用同时发生,并交织在一起,是复杂的气-液-固耦合作用问题,这给跨海桥梁设计带来了很大的技术挑战。

在传统跨海桥梁设计中,通过计算分析或模型试验分别确定桥梁结构在风、波浪、海流单因素作用下的效应,然后再进行叠加,没有合理考虑风、波浪、海流之间的耦合相关性。而且,通常采用刚性模型试验方法确定桥梁结构在波浪、海流作用下的响应,严重低估了波浪、海流对桥梁结构的动力作用效应,而这一动力作用效应对深水海域的桥梁结构可能会造成致命的损伤。

“十二五”交通运输重大科技专项“特大型桥梁防灾减灾与安全控制技术”之项目二“特大型桥梁风-浪-流耦合作用研究”,针对我国跨海特大型桥梁面临的深水、强风、急流、巨浪等复杂建设条件,面向我国未来特大型桥梁工程建设需求,在特大型桥梁风-浪-流耦合作用的现场观测、数据提取、模型试验、数值模拟、作用模型及设计参数等关键技术问题上取得了重要成果。

在系统总结重大专项研究成果的基础上,同时吸收、借鉴国内外相关工程技术标准的成功经验,编制本指南。

1.0.2 本指南适用于跨越海湾、海峡的桥梁结构设计,其他环境类型的结构物设计可参考使用。

条文说明

本指南主要适用对象为遭受风、波浪、海流等环境作用的跨海桥梁,包括梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥和临时栈桥等。

1.0.3 桥梁的风-浪-流耦合作用设计除应参考本指南的要求外,尚应符合国家和行业现行有关标准规范的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 风-浪-流耦合作用 wind-wave-current coupling action

风-浪-流耦合作用包含风、波浪、海流之间的耦合作用及其与桥梁结构之间的耦合作用两个方面。

2.1.2 风-浪-流耦合场 wind-wave-current coupling field

风场、波浪场和海流场之间相互作用而形成的环境场。

2.1.3 台风 typhoon

热带气旋的一个类别。在气象学上,按世界气象组织定义:热带气旋中心持续风速达到12级(即32m/s或以上)称为飓风或台风。

2.1.4 风浪 wind wave

风直接作用下产生的风成波浪。

2.1.5 涌浪 swell

离开源地向远处传播的波浪或风已平息、减弱、改变方向后剩下的波浪,又称“涌”或“长浪”。

2.1.6 规则波 regular wave

波列中波形和波要素都相同的波浪。

2.1.7 不规则波 irregular wave

波列中波形和波要素呈随机分布的波浪。

2.1.8 风攻角 wind attack angle

风的主流方向与桥轴线的垂直水平线在竖直方向的夹角。

2.1.9 风偏角 wind yaw angle

风的主流方向与桥轴线的垂直水平线在水平方向的夹角。

2.1.10 风谱 wind spectrum

风的能量相对于频率的分布。

2.1.11 波高 wave height

波面上相邻两个下跨或上跨零点间波谷底至波峰顶之间的垂直距离。

2.1.12 波向 wave direction

波浪传来的方向。

2.1.13 波浪谱 wave spectrum

波浪的能量相对于频率的分布。

2.1.14 多维极值联合概率模型 multivariate extreme value joint probability model

描述多个参数极值(如风速、波高和流速等参数极值)之间相关性的概率模型。

2.1.15 重现期 return period

在多次试验中,某一事件重复出现的平均时间间隔,或称平均重现期间隔期。

2.1.16 基本风速 basic wind speed

开阔平坦地面或海平面以上 10m 高度处,设计重现期 10min 的平均年最大风速。

2.1.17 设计基准风速 design standard wind speed

在基本风速基础上,考虑局部地表粗糙度影响,桥梁结构或结构构件基准高度处设计重现期 10min 的平均年最大风速。

2.1.18 地表粗糙度 terrain roughness

反映大气边界层中地表起伏或地物高矮疏密的程度。

2.1.19 静阵风系数 static gust factor

考虑地表粗糙度、风荷载加载长度和结构构件离地面高度等因素的阵风系数。

2.1.20 累积频率 accumulative frequency

将潮位、波高等水文变量按大小顺序排序,划分若干区间,分别求出各区间的频率值,再逐区间加以累积,得到的一系列频率累积值。

2.1.21 有效波高 significant wave height

按波高大小次序排列后,取前面 1/3 波的波高的平均值。

2.1.22 平均波高 mean wave height

波列中所有波浪波高的平均值。

2.1.23 有效周期 significant wave period

按波高大小次序排列后,取前面 1/3 波的波周期的平均值。

2.1.24 平均周期 mean wave period

波列中所有波浪波周期的平均值。

2.1.25 风海流 wind-driven current

由风的切应力作用于海面产生的水流。

2.1.26 潮流 tide-driven current

由潮汐引起的水的流动。

2.1.27 设计潮位 design tide level

包括设计水位和极端水位。其中,设计水位是指结构物在正常使用条件下的高、低水位,