

新型桶式基础结构 关键技术研究

沈雪松 蔡正银 关云飞 著

非外借



科学出版社

新型模式教材结构

数学建模案例

张金海 编著 王明华 审



新型桶式基础结构关键技术研究

沈雪松 蔡正银 关云飞 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

桶式基础是一种新型港工结构物,可用于淤泥质海岸防波堤、护岸和码头接岸工程的建设,具有不需要对软土地基进行开挖换填处理、无需大量砂石料、对环境影响小且工程造价低、工期短、质量可控等优势。本书通过模型试验、数值仿真、理论研究、现场试验等方法,系统研究了新型桶式基础结构在负压下沉、波浪荷载和港侧回填等不同工况下的受力情况及位移和稳定破坏模式,揭示了波浪-桶式基础结构-地基之间的静动力相互作用规律。

本书可供从事防波堤及护岸结构研究的科研、教学与设计人员参考使用,对于淤泥质地区港工建筑物与地基共同作用研究具有重要的指导与参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

新型桶式基础结构关键技术研究 / 沈雪松, 蔡正银, 关云飞著. —北京: 科学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-03-051412-7

I. ①新… II. ①沈… ②蔡… ③关… III. ①防波堤-混凝土结构-研究 IV. ①U656.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 313384 号

责任编辑: 惠 雪 曾佳佳 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 张克忠 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社出版

北京黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张: 10 1/4

字数: 230 000

定价: 79.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

新时代建设“交通强国”的战略部署对加速推进港口、航道等水运基础设施提出了更高的要求。近年来,我国港口建设与维护水平取得了长足的发展,但随着港口规模与航道等级的提升、建设难度不断增加且环境保护意识逐渐增强,以往通过大量消耗砂石料等不可再生资源的粗放建设方式已不能适应新的要求,工程建设者和技术人员需贯彻创新、绿色的发展理念,提出经济合理、环境友好的工程建设方案。

在连云港港徐圩港区防波堤工程中,由于波浪条件复杂、地基软土层深厚、淤泥物理力学指标差,若采用传统的斜坡堤,抛石方量巨大、工程投资高且工期长。建设单位提出了一种单桶多隔仓桶式基础结构,具有不需要先进行软基加固处理、砂石料用量少、对环境影响小且工程造价低、工期短、质量可控等优势,可作为防波堤和岸壁结构使用。

《新型桶式基础结构关键技术研究》一书全面、系统地阐述了新型桶式基础的结构特征、典型工况及其关键技术问题。作者及其研究团队针对新型桶式基础结构开展了大量的离心模型试验、数值仿真分析、理论研究和现场试验工作,不仅系统分析了桶式基础结构在负压下沉、波浪作用和港侧回填等不同工况下的变形与位移规律、外力与内力特征,而且揭示了波浪-桶式基础结构-地基共同作用机理,建立了该结构抗滑、抗倾稳定计算方法,解决了新型桶式基础结构防波堤设计、施工中的关键技术问题,研究成果为新结构的工程示范和推广应用提供了强有力的技术支撑,目前在连云港港徐圩港区已经建成总长度超过 8km 的桶式结构直立式防波堤。

桶式基础结构关键技术研究提升了我国港口工程离心模拟技术、数值仿真技术和离岸深水结构监测技术水平,提升了水运行业的创新能力。同时,我们也应该看到,对于桶式基础结构仍有不少需要深入研究的地方,如结构下沉过程中的

挤土效应、下桶隔仓内部地基土如何发挥作用、港侧地基加固对桶体稳定性的影响等，期望研究团队深化研究、继续前行，不断总结和完善研究成果，将桶式基础结构应用于更多的水运和水利工程，为我国工程技术创新做出更大的贡献。



中国工程院院士

2017年10月

前 言

我国沿海从北到南广泛分布着淤泥质海岸带,如天津、连云港、宁波舟山、温州等地区。在淤泥质港区建设防波堤面临着地基软土层深厚、淤泥物理力学指标差、灵敏度高、难题,若采用传统的抛石斜坡堤、爆破挤淤堤等断面形式,不但防波堤工程量巨大、工期很长,还将面临砂石料等不可再生资源消耗多、对生态破坏大等环境风险。在连云港港徐圩港区建设中,建设者们践行创新、绿色的发展理念,创造性地提出了新型桶式基础防波堤结构,该结构具有不需要软基加固、砂石料用量少、对环境的影响小且工程造价低、工期短、质量可控等优势。通过优化断面尺度,桶式基础还可以作为岸壁结构使用。

新型桶式基础防波堤的结构形式及其工作机理比大圆筒、吸力锚等传统直壁式离岸结构更为复杂,必须考虑波浪荷载-结构-地基土及回填土之间的共同作用,其结构设计、理论计算更加困难。本书通过模型试验、数值仿真、理论研究、现场试验等方法,系统研究了新型桶式基础结构在负压下沉、波浪荷载和港侧回填等不同工况下的受力情况及位移和稳定破坏模式,揭示了波浪-桶式基础结构-地基之间的静动力相互作用规律。

本书共分九章。第1章在总结防波堤的主要结构形式及近年来涌现的新型防波堤结构的基础上,介绍了新型桶式基础结构的结构特征及工程应用;第2章分析了桶式基础结构的四种典型工况及其受力特征,提出了新型桶式基础结构的研究内容与方法;第3章研制了复杂海洋环境下的桶式基础结构离心模型试验系统;第4章分析了桶式结构在下沉过程、波浪荷载和回填荷载作用下的离心模型试验结果,得出了下沉过程中的总阻力、侧壁摩阻力、下桶嵌入粉质黏土层的深度等重要设计参数,分析了结构在不同工况下的稳定破坏模式;第5章建立了考虑地基土弹塑性本构关系及桶土相互作用的三维数值仿真平台;第6章通过数值仿真,分析研究了波浪荷载和港侧不同材料回填后,桶式基础结构防波堤的受力及

结构的变形与稳定特性；第 7 章通过理论推导，提出了桶式结构土压力、摩阻力及转动中心确定方法和桶体抗倾与抗滑稳定性计算公式；第 8 章介绍了桶式基础结构防波堤现场试验内容及试验结构，验收了离心模型试验、数值计算及理论公式的可靠性。第 9 章进行了桶式基础结构关键技术研究的总结与展望。

全书由沈雪松、蔡正银、关云飞组织编写、修改并定稿，南京水利科学研究院徐光明、凌华、高长胜、黄英豪、曹永勇、任国峰等参与撰写了本书第 2~8 章的部分内容；连云港港 30 万吨级航道建设指挥部方利鹤、丁大志、庞亮、聂琴、陈允才参与了本书第 2 章、第 6 章、第 8 章的撰写。

全书由南京水利科学研究院与连云港港 30 万吨级航道建设指挥部联合撰写，书中相关研究内容得到了中交第三航务工程勘察设计院有限公司、中交第三航务工程局有限公司等单位的大力支持，连云港港 30 万吨级航道建设指挥部及南京水利科学研究院出版基金对本书的出版予以资助。在此，谨致以衷心的感谢！

由于桶式基础是一种新型的港工结构物，其计算理论、工作机理还有很多值得探讨的问题，有待更多的科研工作者开展深入的研究。由于作者水平有限，书中肯定存在许多不足之处，引用文献也可能存在挂一漏万的问题，恳请各位读者不吝斧正。

作 者

2016 年 12 月
于南京清凉山麓

目 录

序

前言

第 1 章	新型防波堤结构	1
1.1	防波堤的主要结构形式	1
1.2	适合软土地基的新型防波堤结构	4
1.3	桶式基础结构的提出	7
1.4	桶式基础结构的应用	8
第 2 章	桶式基础结构关键技术	11
2.1	桶式基础结构的四种工况	11
2.2	桶式基础结构受力分析	13
2.3	港工结构物与地基共同作用研究进展	16
2.3.1	模型试验研究进展	16
2.3.2	数值分析进展	19
2.3.3	理论研究进展	22
2.4	桶式基础结构关键技术研究内容与方法	23
第 3 章	桶式基础结构离心模型试验技术	25
3.1	土工离心试验	25
3.1.1	土工离心模型的基本原理	25
3.1.2	离心模型试验设备	26
3.1.3	相似律	27
3.2	模型制作及加载、测量系统	29
3.2.1	桶式基础结构离心模型制作	29
3.2.2	地基土层制备	31

3.2.3	离心试验加载系统	33
3.2.4	离心试验模型测量系统	37
3.2.5	试验程序	38
第 4 章	不同工况下桶式基础结构离心模型试验	40
4.1	下沉过程桶式结构受力特性试验研究	40
4.1.1	试验方案	40
4.1.2	下沉过程桶体受力分析	41
4.1.3	下沉过程中的贯入阻力	43
4.1.4	侧壁摩擦力特性	44
4.1.5	负压下沉过程中桶体关键部位的应力变化	45
4.2	波浪荷载作用下桶式基础受力特性试验研究	47
4.2.1	试验方案	47
4.2.2	水平荷载作用下桶式基础防波堤的性状	48
4.2.3	循环往复波浪力作用下桶式基础防波堤的性状	54
4.2.4	防波堤运行阶段桶式基础结构防波堤的变位性状小结	58
4.3	回填荷载作用下桶体受力特性试验	59
4.3.1	试验方案	59
4.3.2	港侧吹填淤泥后的桶体变形稳定性状	60
4.3.3	港侧回填袋装砂后的桶体变形稳定性状	64
4.3.4	桶式基础防波堤位移变形模式和稳定破坏模式	67
4.4	离心模型试验小结	68
第 5 章	桶式基础结构与地基共同作用数值仿真平台	70
5.1	ABAQUS 有限元软件介绍	70
5.2	南水模型在 ABAQUS 中的实现	71
5.2.1	土体双屈服面弹塑性模型——南水模型	71
5.2.2	南水模型计算程序的开发	74
5.3	桶式结构与地基土接触模拟	77

5.3.1	结构物与土体接触的力学描述	77
5.3.2	接触力学算法	79
5.4	本章小结	80
第 6 章	桶式基础结构与地基共同作用数值计算	81
6.1	桶式基础结构有限元计算模型	81
6.1.1	数值模型的建立	81
6.1.2	地基与桶体结构接触的模拟	82
6.1.3	计算参数的确定	83
6.1.4	地基初始应力场的模拟	84
6.2	波浪荷载作用下桶式基础防波堤数值计算结果	85
6.2.1	桶式基础结构变位控制点的选取	85
6.2.2	极限波浪荷载作用下桶式结构防波堤与地基土的变形	86
6.2.3	不同波浪荷载作用下桶式结构防波堤的变位分析	88
6.3	港侧回填情况下防波堤的变形与稳定	91
6.3.1	回填淤泥情况下结构与地基共同作用有限元分析结果	91
6.3.2	回填砂情况下波浪-结构-地基共同作用有限元分析结果	93
6.4	本章小结	96
第 7 章	桶式基础结构防波堤与地基共同作用分析	97
7.1	桶式结构桶壁土压力分析	97
7.1.1	桶壁土压力分析点	97
7.1.2	桶壁土压力沿竖向分布	98
7.1.3	桶壁土压力沿环向分布	100
7.2	桶式结构桶体摩阻力分析	102
7.2.1	摩阻力分析点	102
7.2.2	下桶外侧桶壁摩阻力	103
7.2.3	桶体端阻力分析	105
7.3	桶式基础结构的转动中心	105

7.3.1	转动中心与土压力及稳定性的关系	105
7.3.2	影响转动中心位置的因素分析	106
7.3.3	桶体转动中心的确定	109
7.4	桶式基础结构稳定性解析分析	110
7.4.1	极限状态下桶体结构受力	110
7.4.2	土压力计算公式	111
7.4.3	摩阻力计算公式	115
7.4.4	桶体稳定性计算公式	116
7.5	本章小结	119
第 8 章	桶式基础结构现场试验	121
8.1	现场试验内容	121
8.2	负压下沉过程中桶体结构现场测试	123
8.2.1	负压下沉中桶体位移	123
8.2.2	负压下沉中桶体受力	124
8.2.3	负压下沉中桶体内力	130
8.2.4	负压下沉中桶体结构与地基相互作用	137
8.3	波浪荷载作用下桶体结构现场测试	139
8.3.1	波浪作用下的桶壁总土压力	139
8.3.2	波浪作用下的桶壁有效应力和超静孔隙水压力	141
8.4	本章小结	144
第 9 章	结论与展望	146
9.1	主要结论	146
9.2	展望	147
参考文献		149
索引		153

第1章 新型防波堤结构

防波堤是人工掩护的沿海港口重要组成部分,起到防御波浪侵袭、保障港区水域平稳、防止港池淤积和波浪冲蚀岸线等作用,按断面形式,可分为斜坡堤、直墙堤和混合堤。本章详细介绍了防波堤的主要结构形式,尤其是适合软土地基的新型防波堤结构。针对淤泥质港区软土深厚、水深条件差、波浪条件复杂等建设困难,提出了多隔仓混凝土新型桶式基础防波堤结构,该结构具有无需软基处理、施工方便、质量和进度可控、工程造价低、环境友好等优势,具有广阔的推广和应用前景。

1.1 防波堤的主要结构形式

防波堤是为了阻断波浪的冲击、维护港池、维持水面平稳以保护港口免受恶劣天气影响,以便船舶安全停泊和作业的水工建筑物。在砂质和淤泥质海岸,兼有阻挡沿岸因水流而形成的泥沙向港内流入,减轻港内淤积的作用;在有冰冻的海域还可以阻止大量流冰进入港内,防止堵塞;部分防波堤还可以兼作码头岸壁。

防波堤的结构一般可分为重型和轻型两类:前者是传统和常用的结构形式,包括斜坡堤、直立堤和混合堤等;后者是近数十年来发展起来的,根据波能集中于表层的特点,结合工程的特殊需要而研究出来的各种轻型防波堤,如透空堤、浮堤、喷气堤等^[1-3]。

1. 重型防波堤

重型防波堤包括斜坡式防波堤、直立式防波堤和混合式防波堤等几种,如图1.1所示。

斜坡式防波堤是一种较常用的传统防波堤形式,按材料大致可分为抛石防波堤、混凝土块体堆筑或护面斜坡堤。抛石防波堤有不分级堤和分级堤两种,其中

不分级堤利用开采出来的大小不等的块石，不经分选，随意抛填，其优点是堤身密实，沉降均匀，施工简单，缺点是块石质量轻，容易受波浪冲击破坏，后期维修费用高，因此，逐渐被分级堤代替。分级堤是根据堤身各部位作用的不同采用不同质量的块石，一般将较小的块石放在堤心和堤身下部，大的块石放在堤面和堤顶，其优点是石料利用合理，稳定性提高，便于有计划地采石，缺点是石料的来源和数量不易保证，其适用条件是水深浅、地基土软、石料丰富、设计波高小于3m。当波浪较大、缺乏石料时，可考虑采用混凝土块体堆筑斜坡堤，其优点是块体质量大（最大可达60~80t），稳定性好，抗波浪荷载能力大，缺点是需要大型起重设备，水泥用量大，费用高。混凝土块体护面堤是采用人工预制的栅栏板块体、扭王字块体、四足锥形块体等作为斜坡堤的护面结构，可抵御较大的风浪。从上述斜坡式防波堤的特点中可以看出，采用传统的斜坡式防波堤，首先要求材料来源丰富，另外，当水深较深，波浪荷载较大时，斜坡堤断面尺寸显著增大，工程造价急剧上升。

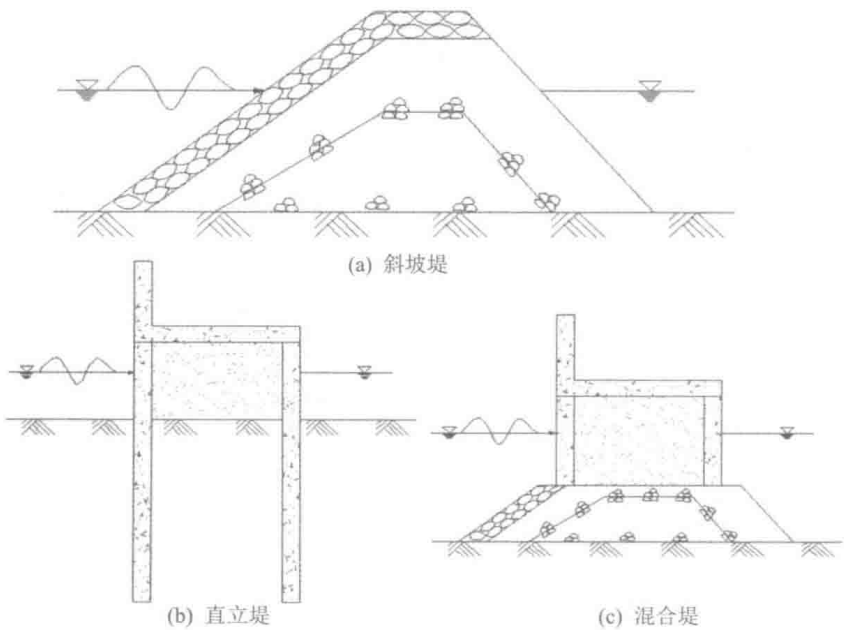


图 1.1 防波堤主要结构形式

直立式防波堤可分为重力式防波堤和桩式防波堤。重力式防波堤堤身结构可

以根据具体条件设计成多种形式,靠防波堤结构自重保持稳定,结构耐久性较好,后期维护成本较低,由于堤身多采用混凝土结构,可不受开采石料的限制,适用于石料缺乏、水深较大、波浪荷载较大及地基条件较好的区域,其缺点一是对地基不均匀沉降敏感,对地基承载力要求高,二是在堤身前的迎浪侧消波效果差。桩式防波堤一般由钢板桩或大型管桩构成连续墙身,板桩墙之间或墙后填充块石,其强度与耐久性均较差,适用于地基土条件差、波浪荷载不大的情况。

混合式防波堤为下部抛石结构、上部直墙结构,是斜坡式和直立式相结合的形式。其优点是适用于较深水域,由于下部抛石,对地基土质条件要求不是很高,而且下部抛石的类型多样,消波效果也较好,缺点是仍需要较多的石料,对下部抛石沉降要求严格。

特殊形式防波堤是利用波能在水中的分布,并为克服传统防波堤带来的种种不利因素而采用的一些特殊形式的防波堤,这些防波堤一般适用于波浪荷载较小的区域。

2. 轻型防波堤

传统形式的防波堤(直立式和斜坡式)在材料的使用上和波能的分布规律完全不相适应。如斜坡式防波堤,在波能最集中的地方使用了最少的材料,而在波能最小的地方却耗费了大量的材料,且随着工程水域深度的增加,工程造价剧增,施工也变得十分困难。根据波浪理论的研究和试验表明,波浪的能量集中在水体表层,水面以下三倍波高的水深范围内集中了全部波能的98%。

轻型防波堤正是利用波能分布集中在水体表层的特点,克服传统防波堤材料利用率低、能耗高所带来的种种不利因素而采用的一些特殊结构形式的防波堤,如桩基透空式防波堤、浮式防波堤、气压式防波堤等。

桩基透空式防波堤适用于水深较大、地基承载能力较差而波浪作用不是十分强烈的水域。它容许部分波浪能量随同水体通过堤身传到堤后,因此,相比实体堤其堤身承受的波浪作用力相应减小,对周围动力环境的影响也有所减少。桩基透空式在我国已经具有成功的应用经验,它的施工方案与高桩码头一样,施工条

件成熟, 难度低, 施工船机少; 速度快, 工期相对较短, 可大量节省砂石材料用量; 靠港内一侧可作码头用, 靠泊船舶, 使用期港区的回淤量比实心堤少。

浮式防波堤是由金属、钢筋混凝土和塑料材料制造的浮式构件及锚泊系统组成的防浪设施, 具有质量轻、结构简单、造价低廉、安置方便、对地基的要求不高等优点。此外, 还有很强的海水交换能力, 不破坏水域的整体性和生态环境, 不改变水流和泥沙运动条件等特点。

浮式防波堤主要用于水深大而波浪小的水域, 或是没有必要修建坐底防波堤和水深及基床条件差而修建坐底防波堤十分困难的水域。当所掩护的水域要求有良好的水质交换条件时, 浮式防波堤是一种较优的结构形式。例如在具有较好避风条件的天然深水港湾建造深水码头, 为了预防常年主导风浪的影响, 可以在合适的区域设置少量的浮式防波堤以达到更佳的避风抗浪效果。浮式防波堤可以用于掩护水产养殖设施、人工海水浴场等水域以取得节省投资和保持良好水质交换的双重效果, 海上工程的施工现场可以用浮式防波堤来进行临时性掩护, 以增加施工作业天数, 缩短工期, 提高效益。浮式防波堤一般分为浮箱式防波堤、浮筒式防波堤、浮筏式防波堤和其他类型浮式防波堤。

气压式防波堤分为喷气堤和射水堤, 一般适用于施工、维修等临时性工程, 两者都易于搬移, 耗电量大, 易发生锈蚀和生物附着, 这类轻型防波堤对长波的掩护效果较差, 都有结构单薄、易于损坏、维护要求高等弱点, 在实际应用中还存在不少具体问题。

1.2 适合软土地基的新型防波堤结构

近年来随着我国航运事业的发展和港口经济的繁荣, 很多港口已趋饱和, 必须开辟新港区。同时, 自然条件优越的港址通常已被开发, 不得不面对深水区域、大波浪荷载和软土地基等复杂的自然条件。若在上述复杂条件下建造传统防波堤, 需要先对软土地基进行加固处理且消耗大量的砂石料, 工程造价将会大大提高。为此, 近年来陆续开发了几种适用于淤泥质地基的新型防波堤结构, 如半圆形结

构、大圆筒结构、箱筒型结构等。

1. 半圆形结构^[4]

半圆形防波堤是由半圆形拱圈和底板组成的新型防波堤结构,如图 1.2 所示。与传统重力式防波堤相比,作用于半圆形防波堤上的波浪荷载较小,作用方向通过圆心,对堤身不产生倾覆力矩,且该结构质量比传统重力式防波堤结构轻,适应于软土地基。

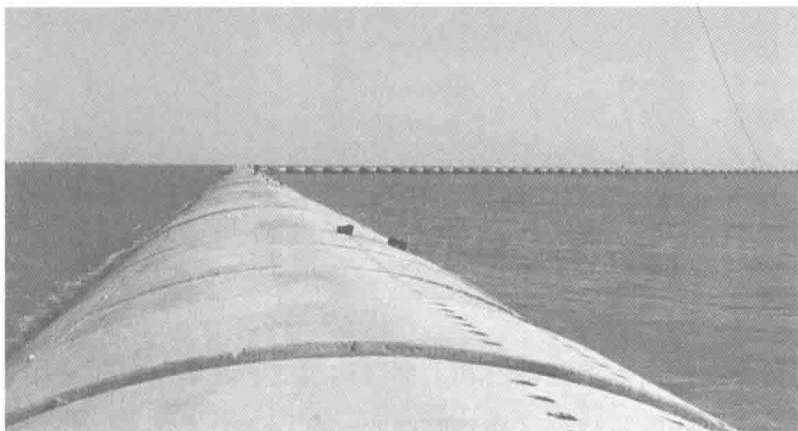


图 1.2 半圆形结构防波堤

在天津港北大防波堤和长江口深水航道整治工程中采用了半圆形结构,取得了较好的效果,但该结构也存在尚未解决的问题,如某工程采用的半圆形导流堤在一次寒潮波浪作用下发生了过量沉降与滑移。

2. 沉入式大圆筒结构^[5]

沉入式大圆筒防波堤结构是无底、无盖的薄壁圆柱壳结构,断面如图 1.3 所示。该结构适用于深水软土地基,具有结构形式简单、施工方便快捷、砂石材料用量省等优点,在港珠澳大桥隧道人工岛等大型工程中得到成功应用。

虽然国内外对大圆筒防波堤结构的设计与施工开展了很多研究工作,但是大圆筒结构在实际工程中仍存在不少问题,如结构尺寸较大,需要配备大型起重、运输、安装设备,施工时需合适的波浪潮流条件,结构下沉方法及施工工艺有待提高。大圆筒结构与土相互作用机理十分复杂,目前尚无规范可循,由于该结构