



“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
港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系
国家科技支撑计划资助项目(2011BAG07B03)

海上装配化桥梁墩台 建设关键技术

Key Construction Technology for
Piers and Caps of Assembled Cross-sea Bridge

孟凡超 苏权科 张 鸿 等 著
吴伟胜 田 唯



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

“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
港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系
国家科技支撑计划资助项目(2011BAG07B03)

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

海上装配化桥梁墩台 建设关键技术

Key Construction Technology for
Piers and Caps of Assembled Cross-sea Bridge

孟凡超 苏权科 张 鸿 等 著
吴伟胜 田 唯



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

海上装配化桥梁墩台建设关键技术 / 孟凡超等著

— 北京 : 人民交通出版社股份有限公司, 2018. 3

ISBN 978-7-114-14616-9

I. ①海… II. ①孟… III. ①跨海峡桥—桥梁结构—
墩台—桥梁施工 IV. ①U448.19

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 057871 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

港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系

国家科技支撑计划资助项目(2011BAG07B03)

书 名: 海上装配化桥梁墩台建设关键技术

著 作 者: 孟凡超 苏权科 张 鸿 吴伟胜 田 唯 等

责任编辑: 周 宇 牛家鸣 等

责任校对: 宿秀英

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: 17.75

字 数: 349 千

版 次: 2018 年 3 月 第 1 版

印 次: 2018 年 3 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14616-9

定 价: 120.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

内 容 提 要

本书主要依据港珠澳大桥国家科技支撑计划项目课题成果编写而成,综合论述了桥梁墩台预制安装技术发展现状、施工中所面临的技术问题;重点介绍了钢管复合桩承载性能及设计方法、基坑边坡开挖稳定和回淤量研究成果、钢管桩沉桩施工及精度控制关键技术、预制墩台吊装及精确定位施工技术、钢管复合桩与预制墩台之间的止水施工技术;系统论述了后浇孔混凝土关键施工工艺及质量控制;归纳总结了新技术在港珠澳大桥深水区非通航孔桥钢管复合桩、预制墩台建设中的应用。

本书主要供从事桥梁工程研究、设计、施工和管理的工程技术人员使用,亦可供桥梁工程等相关专业方向师生在教学与学习中参考使用。

Abstract

This book is mainly based on the project results of national science and technology supporting program about Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge (HZM Bridge). The development status of bridge prefabrication and installation techniques and the technical problems during construction are reviewed. The bearing performance and the design method of steel-tubular composite pile, the results of study on stability of side slope and silting amount of foundation ditch, the key technology of pile construction and precision control, the technology of lifting and precise positioning of the precast pier and the construction technology of sealing between the pile and the precast pier are expounded. The key construction technology and quality control measures of the post cast-in-place concrete are systematically discussed. The application of the above results in HZM Bridge is summarized.

This book is mainly used by engineers engaged in research, design, construction and management of bridge works, and can also be used for reference by teachers and students in related professional fields.

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

港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系

编审委员会

顾问：冯正霖
主任：周海涛
副主任：袁鹏 朱永灵

执行总编：苏权科

副总编：徐国平 时蓓玲 孟凡超 王胜年 柴瑞

委员：(按专业分组)

岛隧工程：	孙 钧	钱七虎	郑颖人	徐 光	王汝凯
	李永盛	陈韶章	刘千伟	麦远俭	白植悌
	林 鸣	杨光华	贺维国	陈 鸿	
桥梁工程：	项海帆	王景全	杨盛福	凤懋润	侯金龙
	陈冠雄	史永吉	李守善	邵长宇	张喜刚
	张起森	丁小军	章登精		
结构耐久性：	孙 伟	缪昌文	潘德强	邵新鹏	水中和
	丁建彤				
建设管理：	张劲泉	李爱民	钟建驰	曹文宏	万焕通
	牟学东	王富民	郑顺潮	林 强	胡 明
	李春风	汪水银			

《海上装配化桥梁墩台建设关键技术》

编 写 组

组 长：孟凡超 苏权科 张 鸿

副 组 长：吴伟胜 田 唯

编写人员：张永涛 马建林 陈儒发 刘建波 方明山
谢红兵 高文博 景 强 苏宗贤 刘明虎
张革军 张 梁 李 江 鲁华英 周山水
邓 科 李国亮 赵英策 吴启和 常志军
文 锋 金秀男 于高志 张 鹏 陈富强
仇正中 朱 浩 郑和辉 朴 龙 杨斌财
谭少华

总序

General Preface

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!

杨伟光

2016年6月24日

序

Preface

2003年,港珠澳大桥工程研究启动。2009年,为应对由美国次贷危机引发的全球金融危机,保持粤、港、澳三地经济社会稳定,中央政府决定加快推进港珠澳大桥建设。港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域,东接香港特别行政区,西接广东省珠海市和澳门特别行政区,是“一国两制”框架下粤、港、澳三地合作建设的重大交通基础设施工程。港珠澳大桥建设规模宏大,建设条件复杂,工程技术难度、生态保护要求很高。

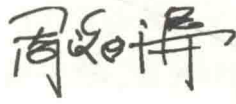
2010年9月,由科技部支持立项的“十二五”国家科技支撑计划“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与示范”项目启动实施。国家科技支撑计划,以重大公益技术及产业共性技术研究开发与应用示范为重点,结合重大工程建设和重大装备开发,加强集成创新和引进消化吸收再创新,重点解决涉及全局性、跨行业、跨地区的重大技术问题,着力攻克一批关键技术,突破瓶颈制约,提升产业竞争力,为我国经济社会协调发展提供支撑。

港珠澳大桥国家科技支撑计划项目共设五个课题,包含隧道、人工岛、桥梁、混凝土结构耐久性和建设管理等方面的研究内容,既是港珠澳大桥在建设过程中急需解决的技术难题,又是交通运输行业建设未来发展需要突破的技术瓶颈,其研究成果不但能为港珠澳大桥建设提供技术支撑,还可为规划研究中的深圳至中山通道、渤海湾通道、琼州海峡通道等重大工程提供技术储备。

2015年底,国家科技支撑计划项目顺利通过了科技部验收。在此基础上,港珠澳大桥管理局结合生产实践,进一步组织相关研究单位对以国家科技支撑计划项目为主的研究成果进行了深化梳理,总结形成了“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系”。书系被纳入了“交通运输科技丛书”,由人民交通出版社股份有限公司组织出版,以期更好地面向读者,进一步推进科技成果公开,进一步加强科技成果交流。

值此书系出版之际,祝愿广大交通运输科技工作者和建设者秉承优良传统,按照党的十八大报告“科技创新是提高社会生产力和综合国力的战略支撑,必须摆在国家发展全局的核心位置”的要求,努力提高科技创新能力,努力推进交通运输行业转型升级,为实现“人便于行、货畅其流”的梦想,为实现中华民族伟大复兴而努力!

港珠澳大桥国家科技支撑计划项目领导小组组长
本书系编审委员会主任



2016 年 9 月

前言

Foreword

20 世纪 90 年代初,我国高速公路建设进入了快速发展时期,20 世纪末跨海桥梁工程的建设也日益兴起。我国早期的跨海桥梁基本上采用现浇施工,之后随着技术及装备水平的提高,预制安装施工方法逐步得到使用。构件预制安装的施工工艺,在国外大跨桥梁建设中屡见不鲜,尤其是在跨海桥梁建设中更是如此,集中体现了桥梁建设的新技术。目前,我国已建成的跨海桥梁有杭州湾跨海大桥、上海东海大桥、舟山连岛工程金塘大桥、青岛海湾大桥等;连接三地的港珠澳大桥正在紧锣密鼓的建设中,未来的渤海湾通道、琼州海峡通道、台湾海峡通道等也处于前期规划阶段。由于跨海桥梁建设条件的复杂性和高标准的技术要求,为提升我国超大型海上桥梁以及土木工程技术发展,不断研发海上装配化桥梁建造技术意义重大、刻不容缓。

港珠澳大桥工程的特殊区位、建设条件、质量要求和多重功能,决定了它将面临四大挑战,即建设管理的挑战、工程技术的挑战、施工安全的挑战 and 环境保护的挑战。

建设管理的挑战:港珠澳大桥作为我国在珠江口修建的第一条超级跨海通道,在“一国两制”基本国策下,粤港澳地区的管理机制、建设理念、投资比重等方面存在重大差异,同时由于利益多元化、标准规范多元化、功能多重性、规模巨型化等特性,使得港珠澳大桥的建设管理面临重大挑战。

工程技术的挑战:港珠澳大桥桥位处地质条件复杂,所处海域风浪条件严酷,是我国最繁忙的多向航运交通水域,同时,120 年的设计寿命要求,决定了港珠澳大桥的设计和建设面临前所未有的工程技术挑战。突破设计和施工技术理念,针对重大理论和工程技术问题开展深入系统的研究,形成成套关键技术,对于直接支撑港珠澳大桥建设,提升我国海上桥梁设计和施工技术水平,具有重要意义。

施工安全的挑战:港珠澳大桥地处台风区,每年有 2~3 次台风袭击,大桥施工

又属外海作业。5年期间,大量现场施工作业人员及机具船舶的安全、一般海浪及涌浪条件下的正常作业与施工安全,以及珠江口伶仃洋海域十分繁忙的多向航运交通,都面临巨大的挑战。

环境保护的挑战:港珠澳大桥位于珠江口伶仃洋海域,该海域属海洋水文及防洪敏感区,也是我国珍稀海洋动物白海豚的自然保护区。将大桥施工期间所属海域环境的负面影响降至最低、将全桥的总阻水比控制在10%以内,是港珠澳大桥设计和建设的重要研究课题。

为了应对上述四大挑战,确保港珠澳大桥建设的高品质、120年寿命、安全、环保等目标的实现,大力推进了海上装配化桥梁建造技术的研发和应用,实施了“大型化、工厂化、标准化、装配化”的创新建设理念。港珠澳大桥的建成,既能体现我国跨海桥梁装配化施工技术新高度,又能极大地提升我国长大跨海桥梁建造水平。

围绕港珠澳大桥高品质、长寿命这一核心目标,特别立项开展了国家科技支撑计划项目(课题编号:2011BAG07B03)“海上装配化桥梁建设关键技术——埋床法全预制海上桥梁墩台建设关键技术”的研究。针对在伶仃洋海域环境下港珠澳大桥深水区非通航孔桥墩台预制、安装的施工特点,研究工作重点解决了预制墩台施工过程中所面临的技术问题;研究取得的科技成果在大桥建造中得到了全面成功的应用。研究取得的主要创新成果包括:系统开展了考虑泥皮、防腐涂层及剪力环影响因素的大直径钢管复合桩承载性能和变形特征研究,揭示了大直径钢管复合桩受力与变形机理;提出了大直径钢管复合桩构造及设计方法;研发了工具式沉桩系统,实现了垂直度1/400的沉桩精度;提出了海上装配化桥梁全预制构件制造与安装精度控制标准;提出了基于模具定位件的墩台竖向预制匹配方法;研发了工具式墩台定位安装系统和柔性分离式止水系统;研制了全预制墩台安装专用 $\phi 75\text{mm}$ 全螺纹高强钢筋预应力系统;形成了复杂海洋环境深水埋床法全预制墩台吊装、定位、止水和连接的安装成套关键技术。

本书根据上述研究成果编写而成。全书共分8章,第1章对桥梁墩台预制安装技术发展现状、施工中所面临的技术问题和主要研究成果进行了综述;第2章从钢管复合桩整体受力机理入手,采用数值分析和模型试验相结合的方法对钢管复合桩承载性能进行研究,并提出了相应的设计方法;第3章介绍了基坑边坡开挖稳定和回淤量研究成果,具体涉及边坡开挖坡比、基坑超挖量等方面;第4章介绍了钢管桩沉桩施工及精度控制关键技术,包括精度控制标准分析、精度保障控制措

施、工艺试验验证等方面;第5章重点阐述了预制墩台吊装及精确定位施工技术,主要包括吊装作业窗口分析、吊装及精确定位系统、吊装全过程数值分析、吊装施工工艺等内容;第6章着重介绍了钢管复合桩与预制墩台之间的止水施工技术,从胶囊法整体式止水系统和分离式止水系统两种不同体系止水工艺进行了诠释;第7章系统论述了后浇孔混凝土关键施工工艺及质量控制,包括混凝土配制技术、质量控制措施等内容;第8章总结了新技术在港珠澳大桥深水区非通航孔桥钢管复合桩、预制墩台建设中的应用。

工程实践证明,为了实现长大海上桥梁建设的长寿命、高品质、更安全、更环保目标,必须提升跨海大桥建设的工业化水平。推行“大型化、工厂化、标准化、装配化”的施工方案是一条必要的途径,这是提升我国桥梁建设技术实力和管理水平的手段,也是我国桥梁建设团队“走出去”并参加国际竞争的重要条件。

由于时间仓促且水平有限,书中不妥之处望读者批评指正。

作 者

2016年9月

目 录

Contents

第1章 绪论	1
1.1 国内外技术与应用现状	2
1.1.1 国外研究与应用现状	2
1.1.2 国内研究与应用现状	6
1.2 关键技术的提出与分析	10
1.2.1 埋床式基础原型设计及受力机理研究	10
1.2.2 基坑施工期边坡稳定及回淤	11
1.2.3 预制墩台精确定位及安装技术	11
1.2.4 预制承台与钢管复合桩连接施工技术	12
1.3 主要技术成果	12
本章参考文献	14
第2章 大直径钢管复合桩整体受力机理	16
2.1 概述	16
2.2 埋床式基础承载力及变形特性的数值分析	16
2.2.1 数值分析模型简介	16
2.2.2 压弯剪试验数值分析研究	18
2.2.3 推出试验数值分析研究	27
2.2.4 剪力环不同截面形式对钢管复合桩影响分析	30
2.2.5 桩与承台连接节点数值分析研究	32
2.3 埋床式基础模型试验研究	44
2.3.1 钢管复合桩承载力试验	44
2.3.2 钢管复合桩与预制承台连接构造受力性能试验	53
2.4 埋床式基础承载性能及设计方法研究	65
2.4.1 竖向承载力计算方法	65
2.4.2 水平荷载作用下承载性能研究	67

2.4.3 钢管复合桩设计计算方法建议..... 72

2.5 小结..... 74

本章参考文献 75

第3章 基坑边坡稳定及回淤量 77

3.1 概述..... 77

3.2 基坑开挖边坡比..... 78

3.2.1 边坡稳定数值分析..... 78

3.2.2 边坡稳定监测..... 83

3.3 基坑超挖量..... 90

3.3.1 基坑回淤理论..... 90

3.3.2 基坑原位回淤观测 100

3.4 小结 107

本章参考文献..... 107

第4章 钢管桩沉放施工与控制关键技术 109

4.1 概述 109

4.2 钢管桩沉放施工精度控制标准分析 110

4.2.1 桩、承台及墩身施工允许偏差..... 110

4.2.2 钢管桩(钢护筒)施打精度统计分析 110

4.2.3 预制墩台安装精度分析 111

4.2.4 预制墩台安装对承台预留孔孔径的需求分析 112

4.2.5 钢管桩沉桩精度控制标准 116

4.3 钢管桩施工精度保障措施研究 117

4.3.1 工具式导向沉桩系统研发 117

4.3.2 工具式导向沉桩系统数值计算分析 120

4.4 钢管桩施工工艺及现场验证 126

4.4.1 钢管桩施工工艺 126

4.4.2 钢管桩施工过程中的试验检测 127

4.5 小结 134

本章参考文献..... 134

第5章 预制墩台吊装及精确定位施工关键技术 135

5.1 概述 135

5.2 吊装窗口作业分析 136

5.2.1 模型建立 136

5.2.2	浮吊及吊物系统运动频域	136
5.2.3	浮吊及吊物系统运动时域	137
5.2.4	全年有效吊装作业时间	139
5.3	预制墩台吊装及精确定位系统	142
5.3.1	机械系统	142
5.3.2	液压系统	143
5.3.3	电控系统	145
5.3.4	结构校核	147
5.4	墩台吊装全过程计算分析	149
5.4.1	作用荷载分析	149
5.4.2	预制墩台悬挂状态下减振方案分析	154
5.4.3	预制墩台体系转换完成后整体稳定性分析	160
5.5	预制墩台吊装施工工艺研究	163
5.5.1	总体施工工艺	163
5.5.2	主要施工方法	164
5.6	预制墩台吊装工艺试验	173
5.6.1	窗口选择及吊装过程	173
5.6.2	悬吊系统精确调位过程	174
5.6.3	墩台安装期监测	174
5.7	小结	181
	本章参考文献	182
第6章	预制墩台与桩间止水技术	183
6.1	概述	183
6.2	胶囊法整体式止水系统	184
6.2.1	工作原理	184
6.2.2	方案设计	185
6.2.3	止水室内试验	187
6.3	胶囊法分离式止水系统	190
6.3.1	工作原理	190
6.3.2	方案设计	190
6.3.3	计算分析	194
6.3.4	止水室内试验	197
6.3.5	止水工艺试验及优化	197