



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
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(2011BAG07B05)

离岸特长沉管隧道 防灾减灾关键技术

Key Technology of Disaster Prevention and Mitigation for
Offshore Extra-long Immersed Tunnels

蒋树屏 苏权科 等著
周健 陈越



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

内 容 提 要

本书以国家科技支撑计划项目“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术”之课题五子课题四为科技依托,以港珠澳海底特长沉管隧道的建设和运营为工程背景,首次系统论述了沉管隧道防灾减灾关键技术的研究方法、研究手段、研究结论及工程应用。介绍了以确保结构安全和运营安全为目的而研制的1:1足尺沉管实验隧道与管节结构高温燃烧两大试验平台的情况,以及沉管隧道内车辆燃烧、排烟、消防、报警、逃生、救援综合试验方法;分析了管节/接头结构体内温度场、损伤范围、承载力等耐火设计参数,以及不同热释放速率洞内空间温度场和烟雾场的扩散特征、热-力耦合作用下管节与节段和接头分别的力学行为;获得了洞内设备耐高温的安全位置和洞内人员避浓烟的逃生时间,以及侧向集中排烟控制方法等;还介绍了沉管隧道管节渗漏水智能红外监测技术。

本书通过对防灾减灾关键技术的研究,以合理的试验方案和正确的研究结论,确定港珠澳沉管隧道防灾标准,达到提升隧道防灾减灾效率、降低运营灾害损失的目的,对于沉管隧道防灾减灾方面的研究具有重要的指导意义和借鉴价值。

本书既是交通运输工程、土木工程、防灾减灾工程基础用书,又是隧道与地下工程、安全工程等专业用书,可供相关专业的设计工程师、运营管理者 and 研究人员参考,也可供高等院校相关专业教师从事教授工作和研究生从事研究活动参考。本书既是交通运输工程、土木工程、防灾减灾工程基础用书,也是隧道与地下工程、安全工程等专业用书,可供相关专业的设计工程师、运营管理者 and 研究人员参考,也可供高等院校相关专业教师从事教授工作和研究生从事研究活动参考。

Abstract

This book is based on Project 5 topic 4 of the key technology belongs to the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge (HK-ZH-M) Cross-sea Cluster Project construction of the National Science and the Technology Support Program, and takes the construction and operation of the long Hong Kong-Zhuhai-Macao submarine immersed tunnel as the engineering background. Firstly, this book systematically discussed the research methods, conclusions and the engineering applications of the key technologies for the immersed tunnel disaster prevention and mitigation for the first time. Secondly, this book introduced the situation of two large test platforms: 1:1 full-scale immersed tube experimental tunnel and high-temperature combustion of pipe joint structure. Both of the structures are developed to ensure the structural safety and operation safety. And it also introduced the comprehensive experiment methods for the vehicle burning, smoke exhausting, people escaping, fire control and rescue within the immersed tube tunnel. Thirdly, the temperature field, damage range, bearing capacity and other refractory design parameters of tubular joints were analyzed. The diffusion characteristics of the temperature field and the smoke field in the cavity with different heat release rates, mechanical behavior of pipe joints with segments or joints under thermo-mechanical coupling conditions were also analyzed in this book. What's more, the safe location of the equipment which is under the high temperature in the tunnel, the time of the people escaping from the thick smoke and the methods of controlling the lateral centralized smoke exhausting are obtained. Lastly, the intelligent infrared monitoring technology for water leakage of immersed tube tunnel joints is also introduced.

By researching on the key technologies of disaster prevention and mitigation, this book determined the disaster prevention standards of Hong Kong-Zhuhai-Macao immersed tube tunnel with reasonable test plans and correct research conclusions, and achieves the purpose of improving tunnel disaster prevention and mitigation efficiency and reducing operational disaster losses. It's worth referencing and being regarded as the guidance for the study of disaster prevention and reduction of immersed tube tunnel.

This book is not only a basic book for transportation engineering, civil engineering, disaster prevention and mitigation engineering, but also a professional book for tunnels, underground engineering, safety engineering, etc. It can be used by relevant professional design engineers, operation managers and researchers for high-level reference. Relevant professional teachers of colleges and universities are engaged in teaching work and graduate students engaged in research activities.

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

编写人员：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			

《离岸特长沉管隧道防灾减灾关键技术》

编 写 组

组 长：蒋树屏 苏权科
副 组 长：周 健 陈 越
组 员：田 堃 谢耀华 徐 湃 郭 军 韩 直
白云 陈大飞 林 志 刘 帅 柴 瑞
付立家 陈建忠 陈晓利 涂 耘 丁 浩
王小军 刘 伟 姬为宇 苏宗贤 李星平
方 磊 张恩情 张祝永 张于平 曹更任
付石峰 闫 禹 徐晓扉

总序

General Preface

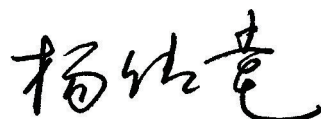
科技是国家强盛之基,创新是民族进步之魂。中华民族正处在全面建成小康社会的决胜阶段,比以往任何时候都更加需要强大的科技创新力量。党的十八大以来,以习近平同志为总书记的党中央作出了实施创新驱动发展战略的重大部署。党的十八届五中全会提出必须牢固树立并切实贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,进一步发挥科技创新在全面创新中的引领作用。在最近召开的全国科技创新大会上,习近平总书记指出要在我国发展新的历史起点上,把科技创新摆在更加重要的位置,吹响了建设世界科技强国的号角。大会强调,实现“两个一百年”奋斗目标,实现中华民族伟大复兴的中国梦,必须坚持走中国特色自主创新道路,面向世界科技前沿、面向经济主战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



2016年6月24日

序 一

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。

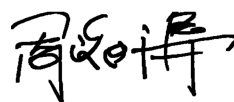
2010年9月,由科技部支持立项的“十二五”国家科技支撑计划“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术研究与应用示范”项目启动实施。国家科技支撑计划,以重大公益技术及产业共性技术研究开发与应用示范为重点,结合重大工程建设和重大装备开发,加强集成创新和引进消化吸收再创新,重点解决涉及全局性、跨行业、跨地区的重大技术问题,着力攻克一批关键技术,突破瓶颈制约,提升产业竞争力,为我国经济社会协调发展提供支撑。

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

A handwritten signature in black ink, appearing to read '周知平' (Zhou Zhongping).

2016年9月

序 二

Preface

港珠澳大桥是粤港澳大湾区的重要交通基础设施,是世界级的重大工程。它的建成将对珠江口及海湾区的经济发展做出重要贡献。

港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域,是连接香港特别行政区、广东省珠海市、澳门特别行政区的大型跨海通道,全长约 55km,包括:海中主体工程、香港界内跨海桥梁、香港口岸、珠澳口岸、香港连接线、珠海连接线及澳门连接桥。其主体工程为粤港分界线至珠澳口岸之间区段,总长 29.6km,其中桥梁长 22.9km,沉管隧道长 6.7km(沉管段 5 664m),用于桥隧转换的东西人工岛各长 625m。

近年来,时有公路隧道发生火灾事故,造成重大损失。从防灾减灾角度讲,港珠澳沉管隧道具有三个特点:其一,接头多。由于隧道为六车道+中央管廊的大断面,单体重量大,故沉管采取节段式,即隧道由 33 个 180m 长的管节+合拢处最终接头组成,每个管节由 8 个 22.5m 长的节段构成,众多接头及构造耐火灾高温和防渗水的要求高。其二,交通量大。隧道设计交通量为 90 000pcu/d,设计车速 100km/h,正常行车约为 4min 行程,为车辆连续流型,火灾时温度场、烟雾场对隧道交通环境和驾乘人员的危害大。其三,逃生救援组织难度大。隧址位于外海,最大水深 45m,两端连接的东西人工岛分别约为 10 万 m²,其水深约 10m,岛上设施多,面积狭小,用于逃生救援的面积有限,在水域环境条件下的隧道防灾减灾难度大。这些对建设者和管理者都是巨大的挑战。

为了攻克海底沉管隧道防灾减灾技术难题,在国家科技支撑计划项目“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术研究及示范”的统一安排下,蒋树屏、苏权科等 30 多位科研人员独立承担了“离岸特长沉管隧道建设防灾减灾关键技术”研究子课题。该课题针对港珠澳大桥沉管隧道防灾减灾关键技术需求,结合沉管公路隧道防火灾特点,在大量的足尺模型试验和数值分析基础上,开展了一系列关键技术研究,取得 8 项创新性成果:①在国内外首次构建了 1:1 足尺沉管隧道防灾减灾综合

试验平台,开发了沉管隧道运营火灾、通风排烟、火灾报警、消防减灾、逃生救援等综合试验系统和试验技术。②开发了沉管隧道管节与接头构件高温耐火试验系统,得到了管节、节段与接头结构体内温度场,给出了火灾作用下沉管隧道结构损伤范围及承载力,提出了管节与接头耐火保护构造及设计参数。③获得了不同火源热释放速率及纵向风速下的洞内温度三维分布和烟气扩散的层高、前沿、下缘等流态特征;提出了隧道机电设施的耐温安全范围,以及烟气扩散对逃生救援的影响范围和时间。④建立了基于排烟阀开启角度、排烟口开启组合的沉管隧道侧向集中排烟的优化控制方法,提出了不同纵坡下的排烟组织方式。⑤建立了多元风险因素的沉管隧道安全等级体系及防灾设施配置标准,提出了沉管隧道防灾设施优化配置方案。⑥建立了感温式火灾自动报警系统热辐射定位方法,得到了隧道环境噪声温度范围,提出了差温报警阈值。⑦在实体隧道开展了真实火灾场景下人员疏散逃生试验,得到了人员疏散时间和逃生速度,确定了隧道火灾人员逃生安全系数。⑧研发了沉管隧道接头渗漏水智能红外监测系统。

综上所述,我认为:该研究成果总体上达到国际先进水平,其中沉管隧道火灾防治的试验平台、试验方法及其试验成果以及节段和管节接头的防火技术方面达到国际领先水平;以上成果在港珠澳大桥工程设计方案中得到了采用,其中,多项成果填补了海底沉管隧道火灾防治技术的空白;该成果不仅对港珠澳沉管隧道提供了科技支撑,对其他沉管隧道的防灾减灾技术问题也有重要借鉴意义。

研究组为了模拟海洋环境,将1:1足尺试验隧道及设施置于海边;为了提高火灾场景的真实性,采用多台多种真车燃烧和人员逃生;为了考察燃烧时火光、烟态和喷淋的逼真效果,并有利于环保,将试验时间全部安排在深夜。他们对科研的严谨态度和敬业精神给我留下深刻印象。

港珠澳大桥继2016年9月主体桥梁贯通后,海底沉管隧道也于2017年7月顺利贯通。在这重要时刻,作者将“离岸特长沉管隧道建设防灾减灾关键技术”研究成果撰著成书正式出版,深表欣慰,乐意作序。在此,我向为该隧道研究与建设付出辛勤工作的所有同行和同志们表示祝贺!

中国工程院院士 

2017年9月

前 言

Foreword

港珠澳大桥是跨越伶仃洋海域,连接香港、珠海、澳门的大型跨海通道,是国家高速公路网规划中珠江三角洲地区环线的组成部分和跨越伶仃洋海域的关键性工程。港珠澳大桥是由隧、岛、桥组成的跨海交通集群工程,其主体工程采用隧桥组合方案,穿越伶仃西航道和铜鼓航道段约 6.7km 采用沉管隧道方案。该隧道为世界最大规模的节段式沉管隧道,确保结构安全和运营安全是该隧道的关键技术之一。为此,作者等按国家科技支撑计划项目的要求,系统而深入开展了离岸特长沉管隧道防灾减灾关键技术研究,获得 20 项研究成果。本书将这些研究成果归纳、整理成册,在多位专家、学者的支持下,经编辑人员的辛苦努力,终于和读者见面了。

公路隧道面临交通事故、火灾、水害、危险品车辆爆炸、恐怖活动、地震等多种灾害的威胁,据近年来大量隧道工程及其运营案例调查,由交通事故引起的车辆燃烧是对隧道结构安全和运营安全的主要威胁。本书重点介绍此类灾害防治关键技术的研究成果,以及沉管隧道管节接头渗漏水监测技术有关研究成果。

本书主要针对沉管隧道防灾减灾关键技术在研究过程中的研究手段、研究方法、研究结论和成果运用等多方面,汇集了港珠澳大桥海底沉管隧道结构防火、通风排烟、安全设施配置、防灾救援、防水灾监测等关键技术的最新研究成果。书中提出的理论、方法和技术已在港珠澳大桥跨海集群工程中得以示范应用和实践,具有创新性、实用性和可操作性,代表了我国离岸特长沉管隧道防灾减灾领域的前沿技术水平。

本书主要内容紧扣交通运输行业的发展思路,符合交通运输业的优先发展主题,是我国交通基础设施建设重点跨越、支撑发展、引领未来的重要体现,结合跨境交通基础设施建设的特点,通过对防灾减灾方面关键技术研究,以科学的试验方案与正确的研究结论,确定港珠澳沉管隧道工程的防灾标准,大幅度提升本项目的

防灾减灾效率,最大限度地降低各种突发事件所造成的损失,确保跨境工程运营安全、高效。全书共分8章,第1章介绍了公路隧道建设的基本概况,并且指出公路隧道火灾带来的严重后果及其发生的原因;第2章阐述了防灾减灾研究的主要方法和手段;第3章介绍了沉管隧道火灾场景,同时进行了火灾试验,得到了不同火源热释放速率及纵向风速下的洞内温度三维分布和烟气流态特征;第4章提出了港珠澳海底沉管隧道设计火灾场景和管节结构及接头耐火保护技术建议方案;建立了热弹性力学条件下的管节结构三维热-力耦合分析方法,获得了有/无防火隔热措施下结构内的高温梯度范围与损伤深度,以及管节接头与节段接头在火灾下的抗错断性能;第5章建立了沉管隧道侧向集中排烟最优排烟效率控制方法,提出了不同纵坡下的排烟组织方式;第6章建立了基于多元风险因素的沉管隧道安全等级划分方法,并给出沉管隧道安全等级划分及设施配置标准,建立了感温式火灾自动报警系统热辐射定位方法,得到了隧道环境噪声温度范围,提出了差温报警阈值;第7章提出了差温报警阈值;首次在实体隧道开展了真实火灾场景下人员疏散逃生试验,得到了人员疏散时间和逃生速度,确定了隧道火灾人员逃生安全系数,提出了港珠澳海底沉管隧道不同交通工况下的人员疏散安全度与应急救援预案;第8章阐释沉管隧道接头渗漏水智能红外监测系统,通过物联网技术实现监测、预警系统一体化工作,达到沉管隧道渗漏监测系统“早发现,早治理”的目标。

本书由招商局重庆交通科研设计院有限公司牵头,会同港珠澳大桥管理局、同济大学和重庆交通大学,依托国家科技支撑计划“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与示范”项目中“离岸特长沉管隧道防灾减灾关键技术研究”的成果撰著而成。参加该研究的人员除作者外,还有郭军、韩直、白云、陈大飞、林志、谢耀华、柴瑞、刘帅、徐湃、曹更任、付立家、陈建忠、陈晓利、涂耘、田堃、刘伟、姬为宇、王小军、苏宗贤、李星平、方磊、张恩情、闫禹、张祝永、张于平、付石峰、徐晓扉等。对以上人员所做出的贡献表示感谢!

限于撰著人员的水平,本书可能存在错误或不足,敬请读者批评指正。

作 者

2017年7月

目 录

Contents

第 1 章 绪论	1
1.1 隧道建设概况	1
1.2 国内外隧道火灾事故分析	4
1.2.1 隧道火灾事故案例	5
1.2.2 隧道火灾发生概率	7
1.2.3 隧道火灾的危害性	7
1.2.4 隧道火灾发生原因	10
1.2.5 隧道火灾的特点	10
1.3 离岸特长沉管隧道工程特点	11
1.3.1 工程基本概况	12
1.3.2 工程特点	12
1.3.3 研究目标、内容和成果	15
第 2 章 沉管隧道防灾减灾研究方法	16
2.1 隧道防灾减灾研究方法	17
2.1.1 数值模拟	18
2.1.2 物理试验	28
2.1.3 隧道火灾场景设计	32
2.2 沉管隧道火灾综合试验系统	34
2.2.1 模型隧道试验平台建设	34
2.2.2 试验火源燃烧特性的测定	52
2.2.3 试验操作流程	70
2.3 隧道结构高温燃烧炉试验系统	71
2.3.1 天然气系统	71
2.3.2 高温试验炉系统	71
2.3.3 测温系统	72