



“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)

# 钢桥面板抗疲劳 关键技术

Key Technology for Anti-fatigue of  
Orthotropic Steel Bridge Deck

孟凡超 张清华 谢红兵 等 著  
张 梁 李军平



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  
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(2011BAG07B01)

# 钢桥面板抗疲劳 关键技术

Key Technology for Anti-fatigue of  
Orthotropic Steel Bridge Deck

孟凡超 张清华 谢红兵 等著  
张 梁 李军平



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

钢桥面板抗疲劳关键技术 / 孟凡超等著. — 北京 :  
人民交通出版社股份有限公司, 2018.3

ISBN 978-7-114-14617-6

I. ①钢… II. ①孟… III. ①钢桥—桥面板—疲劳理论—研究 IV. ①U448.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 057860 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: 钢桥面板抗疲劳关键技术

著 者: 孟凡超 张清华 谢红兵 张 梁 李军平等

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: 17.5

字 数: 350 千

版 次: 2018 年 3 月 第 1 版

印 次: 2018 年 3 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14617-6

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研究成果编写而成。首先综述了正交异性钢桥面板疲劳问题的研究现状和进展,然后重点介绍了钢桥疲劳问题的理论基础、疲劳性能评估方法、疲劳荷载确定、正交异性钢桥面板抗疲劳设计对策与关键制造技术的相关问题及其在港珠澳大桥中的应用,在此基础上阐述了港珠澳大桥钢箱梁正交异性钢桥面板疲劳模型试验结果,讨论了正交异性钢桥面板的质量验收标准。

本书可供桥梁设计、施工和管理人员使用,亦可供桥梁工程等相关专业的科研人员及高等院校师生参考使用。

### Abstract

The contents included in the book are based on research results of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Project, funded by National Science and Technology Support Plan. The present status and progress of research on the fatigue of orthotropic steel bridge deck is reviewed. Theoretical basis for fatigue problems of steel deck, fatigue resistance evaluation method, determination of fatigue load, countermeasures for anti-fatigue design and key fabrication technologies of orthotropic steel bridge deck are expounded. The application of key technologies on the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge is introduced. Research findings of the fatigue model test are provided and fabrication quality acceptance criteria of orthotropic steel bridge deck are discussed.

This book can be used by bridge engineers in design, construction and management. It is also available as references for researchers, teachers and students at college in relevant field.

## 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			

# 《钢桥面板抗疲劳关键技术》

## 编写组

组 长：孟凡超

副组长：张清华 谢红兵 张 梁 李军平

编写人员：卜一之 车 平 苏权科 魏云祥 张劲文

胡广瑞 方明山 高文博 苏宗贤 崔 闯

黄 云 杨绍林 王一莹 曹 志 王问笔

刘何亮 吴月峰 赵志刚 刘明虎 吴伟胜

张革军 周山水 张顺善 邓 科 李国亮

赵英策 张 鹏 常志军 文 锋 金秀男

于高志 刘治国 张剑峰 王志翔 裴雪峰

徐向军 刘 申 杨洪志 曹东威 张鸣功

朴 龙

# 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!

杨治莹

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。

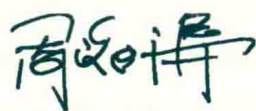
2010年9月,由科技部支持立项的“十二五”国家科技支撑计划“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术研究与应用示范”项目启动实施。国家科技支撑计划,以重大公益技术及产业共性技术研究开发与应用示范为重点,结合重大工程建设和重大装备开发,加强集成创新和引进消化吸收再创新,重点解决涉及全局性、跨行业、跨地区的重大技术问题,着力攻克一批关键技术,突破瓶颈制约,提升产业竞争力,为我国经济社会协调发展提供支撑。

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



2016年9月

# 前 言

## Foreword

正交异性钢桥面板作为 20 世纪中期桥梁工程领域具有里程碑意义的创新结构,其广泛应用有力地推动和促进了现代桥梁结构的发展。目前,全球范围内已建成了采用正交异性钢桥面板结构的各类桥梁超过 1 500 座。20 世纪 90 年代初我国高速公路建设进入了快速发展时期,建造了大量的大跨度公路钢箱梁桥。钢箱梁具有轻质高强、适用范围广、便于工厂化制造、施工速度快、整体性好等突出优点,在大跨度桥梁和城市桥梁中得到了广泛应用。我国大跨度公路桥梁中使用最多的梁体形式是扁平流线型钢箱梁,其桥面板通常采用正交异性钢桥面板结构。我国正交异性钢桥面板的应用较晚,但发展迅猛,正在运营和规划中采用该类型桥面板的桥梁已达 200 多座。我国对扁平流线型钢箱梁的受力特性、结构构造、制造施工积累了较多的经验,但对钢箱梁尤其是正交异性钢桥面板的结构疲劳问题认识还不够深刻、全面,疲劳问题仍是制约正交异性钢桥面板发展的关键症结所在。

构造和受力特点决定了正交异性钢桥面板结构疲劳问题较为突出,且疲劳开裂等病害一旦出现,修复困难,并将直接影响桥梁结构的运营质量和耐久性,甚至导致工程事故的发生。长期以来,疲劳问题作为最重要的核心研究课题之一,贯穿了正交异性钢桥面板应用和发展的全过程。国内外学者及工程技术人员就正交异性钢桥面板的疲劳问题进行了理论及试验研究,但涉及理论研究、试验研究、抗疲劳设计方法、关键制造技术及技术标准的系统性研究仍较为欠缺,相关理论及关键技术成果仍滞后于正交异性钢桥面板的应用和发展,亟须就关键课题开展深入系统的研究,以期为正交异性钢桥面板钢箱梁的发展提供理论和技术支撑。

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对四大挑战,即建设管理的挑战、工程技术的挑战、施工安全的挑战和环境保护的挑战。

港珠澳大桥作为我国首座采用“大型化、工厂化、标准化、装配化”施工方案的

海上超长桥梁,连续钢箱梁作为其主梁的主要形式,其设计使用寿命为120年。围绕港珠澳大桥高质量长寿命这一核心目标,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——连续钢箱梁正交异性钢桥面板抗疲劳性能关键技术”的研究,在钢箱梁结构抗疲劳机理、设计方法、结构模型试验、制造技术及工艺等方面对正交异性钢桥面板的疲劳问题开展了较为系统的研究,取得的主要创新成果包括:提出了基于荷载谱、构造细节、制造工艺、检验标准和试验验证的长寿命正交异性钢桥面板抗疲劳系统解决方法;研发了钢箱梁正交异性钢桥面板单元制造关键技术,突破了钢箱梁U肋与桥面板焊接熔深控制及检测的技术瓶颈;建立了钢箱梁单元制造自动化、智能化生产线。这些科技成果在大桥建造中得到了全面成功的应用。

港珠澳大桥正交异性钢桥面板及连续钢箱梁结构的总体制造精度达到了毫米级,制造过程中完全杜绝了火工矫正。本书是根据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——连续钢箱梁正交异性钢桥面板抗疲劳性能关键技术”的研究成果编写而成,本书的研究成果反映了正交异性钢桥面板的发展水平和发展趋势,其成果为港珠澳大桥建造提供了直接支撑,并可为同类型桥梁建设提供参考和借鉴。

工程实践证明,正交异性钢桥面板的疲劳性能主要受疲劳荷载标准(应计入超载系数)、制造质量水平、结构构造合理性、应力水平与集中程度、钢材强度等级及品质等因素控制;一般来讲,构造细节设计越合理、应力水平与集中程度越低、顶板与U肋的焊缝熔透率和各部位受力焊缝熔透率越高、制造加工精度越高、钢材强度等级与品质越高,钢箱梁桥面板抗疲劳的性能就越优越。

由于时间仓促且水平有限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正和交流探讨。

作者

2016年8月

# 目 录

## Contents

第1章 绪论 .....	1
1.1 国内外技术与应用现状 .....	1
1.1.1 正交异性钢桥面板疲劳问题的提出 .....	1
1.1.2 正交异性钢桥面板疲劳问题的研究现状 .....	3
1.2 关键技术的提出与分析 .....	9
1.2.1 正交异性钢桥面板疲劳病害 .....	9
1.2.2 正交异性钢桥面板疲劳成因 .....	10
1.2.3 关键技术的提出 .....	12
1.3 主要技术成果 .....	12
本章参考文献 .....	13
第2章 理论基础 .....	15
2.1 疲劳损伤理论 .....	15
2.1.1 钢桥疲劳损伤机理 .....	15
2.1.2 疲劳累积损伤理论及其计算模型 .....	17
2.2 钢桥疲劳计算方法 .....	23
2.2.1 抗疲劳设计原理 .....	23
2.2.2 荷载谱与应力谱 .....	29
2.2.3 抗疲劳设计的常用方法 .....	31
2.3 正交异性钢桥面板疲劳性能评估方法 .....	32
2.3.1 常用的疲劳评估方法 .....	33
2.3.2 国内外规范的相关规定 .....	38
2.3.3 港珠澳大桥正交异性钢桥面板所采用的疲劳评估方法 .....	48
2.4 小结 .....	51
本章参考文献 .....	52
第3章 正交异性钢桥面板疲劳荷载 .....	54
3.1 交通荷载调研 .....	54

3.1.1	公路桥梁标准荷载谱调研	54
3.1.2	港珠澳大桥交通荷载调研	59
3.2	港珠澳大桥标准疲劳车辆荷载的确定	61
3.2.1	分析模型的建立	61
3.2.2	标准疲劳车辆荷载模型	67
3.3	小结	79
	本章参考文献	80
<b>第4章</b>	<b>正交异性钢桥面板抗疲劳设计</b>	<b>81</b>
4.1	抗疲劳设计对策及关键部位设计方案	81
4.1.1	抗疲劳设计对策	81
4.1.2	关键部位设计方案	87
4.2	正交异性钢桥面板构造细节的疲劳性能理论	89
4.2.1	横隔板(横肋板)弧形开口部位的疲劳性能	89
4.2.2	横隔板(横肋板)与U肋焊缝部位的疲劳性能	89
4.2.3	U肋与顶板焊缝的疲劳性能	90
4.2.4	U肋纵向对接部位疲劳性能	91
4.3	重要设计参数对于关键疲劳易损部位疲劳性能的影响	91
4.3.1	横隔板(横肋板)弧形开口形状及其对该部位疲劳性能的影响	95
4.3.2	顶板厚度	97
4.3.3	U肋设计参数	98
4.3.4	横隔板(横肋板)设计参数	99
4.4	港珠澳大桥正交异性钢桥面板的抗疲劳设计	101
4.4.1	U肋开孔形状的抗疲劳设计	101
4.4.2	U肋与顶板焊缝抗疲劳设计	102
4.4.3	U肋连接方式的抗疲劳设计	104
4.5	小结	105
	本章参考文献	106
<b>第5章</b>	<b>正交异性钢桥面板单元合理构造及制造工艺</b>	<b>108</b>
5.1	正交异性钢桥面板单元构造	108
5.1.1	钢桥面板构造	108
5.1.2	横隔板构造	112
5.1.3	钢桥面板现场连接	113
5.2	正交异性钢桥面板单元制造工艺	115

5.2.1	纵肋及面板加工 .....	115
5.2.2	钢桥面板组装 .....	119
5.2.3	钢桥面板焊接 .....	122
5.2.4	现场施工技术 .....	131
5.2.5	制造细节施工技术 .....	135
5.3	小结 .....	137
	本章参考文献 .....	137
<b>第6章</b>	<b>正交异性钢桥面板的疲劳模型验证试验 .....</b>	<b>139</b>
6.1	正交异性钢桥面板疲劳易损部位有限元仿真分析 .....	139
6.1.1	有限元仿真分析模型 .....	139
6.1.2	标准疲劳车辆加载位置 .....	142
6.1.3	理论分析与计算 .....	145
6.2	正交异性钢桥面板试件模型试验 .....	149
6.2.1	试验模型设计 .....	149
6.2.2	试验模型制作 .....	156
6.2.3	试验模型的加载与测试 .....	156
6.2.4	主要试验结果 .....	170
6.3	正交异性钢桥面板大型足尺节段模型疲劳验证试验 .....	182
6.3.1	试验模型设计 .....	183
6.3.2	试验模型制作 .....	195
6.3.3	试验模型的加载与测试 .....	195
6.3.4	主要试验结果 .....	203
6.4	小结 .....	217
	本章参考文献 .....	218
<b>第7章</b>	<b>钢箱梁正交异性钢桥面板质量验收标准 .....</b>	<b>219</b>
7.1	国内外现行正交异性钢桥面板质量验收标准对比分析 .....	219
7.1.1	原材料 .....	219
7.1.2	零件机加工 .....	221
7.1.3	零件矫正及弯曲 .....	222
7.1.4	组装 .....	223
7.1.5	焊接 .....	224
7.1.6	正交异性钢桥面板允许偏差 .....	231
7.1.7	高强度螺栓连接 .....	231



7.2 正交异性桥面板质量验收标准 .....	232
7.2.1 材料及材料管理 .....	232
7.2.2 零件制造 .....	233
7.2.3 组装 .....	237
7.2.4 焊接 .....	239
7.2.5 焊接检验 .....	242
7.2.6 矫正 .....	245
7.2.7 包装、存放与运输 .....	246
7.3 小结 .....	246
本章参考文献 .....	247
<b>第8章 工程应用</b> .....	<b>248</b>
8.1 工程简介 .....	248
8.1.1 工程概况 .....	248
8.1.2 工程特点和难点 .....	250
8.2 新技术在工程中的应用 .....	251
8.2.1 动态应变测量和采集技术 .....	251
8.2.2 基于光纤技术的动态应变测量 .....	252
8.2.3 焊缝质量和裂纹现代无损检测技术 .....	253
8.2.4 试件模型和足尺节段模型相结合的疲劳试验研究 .....	255
8.2.5 采用正交试验法进行抗疲劳设计的优化 .....	256
本章参考文献 .....	258
索引 .....	260