



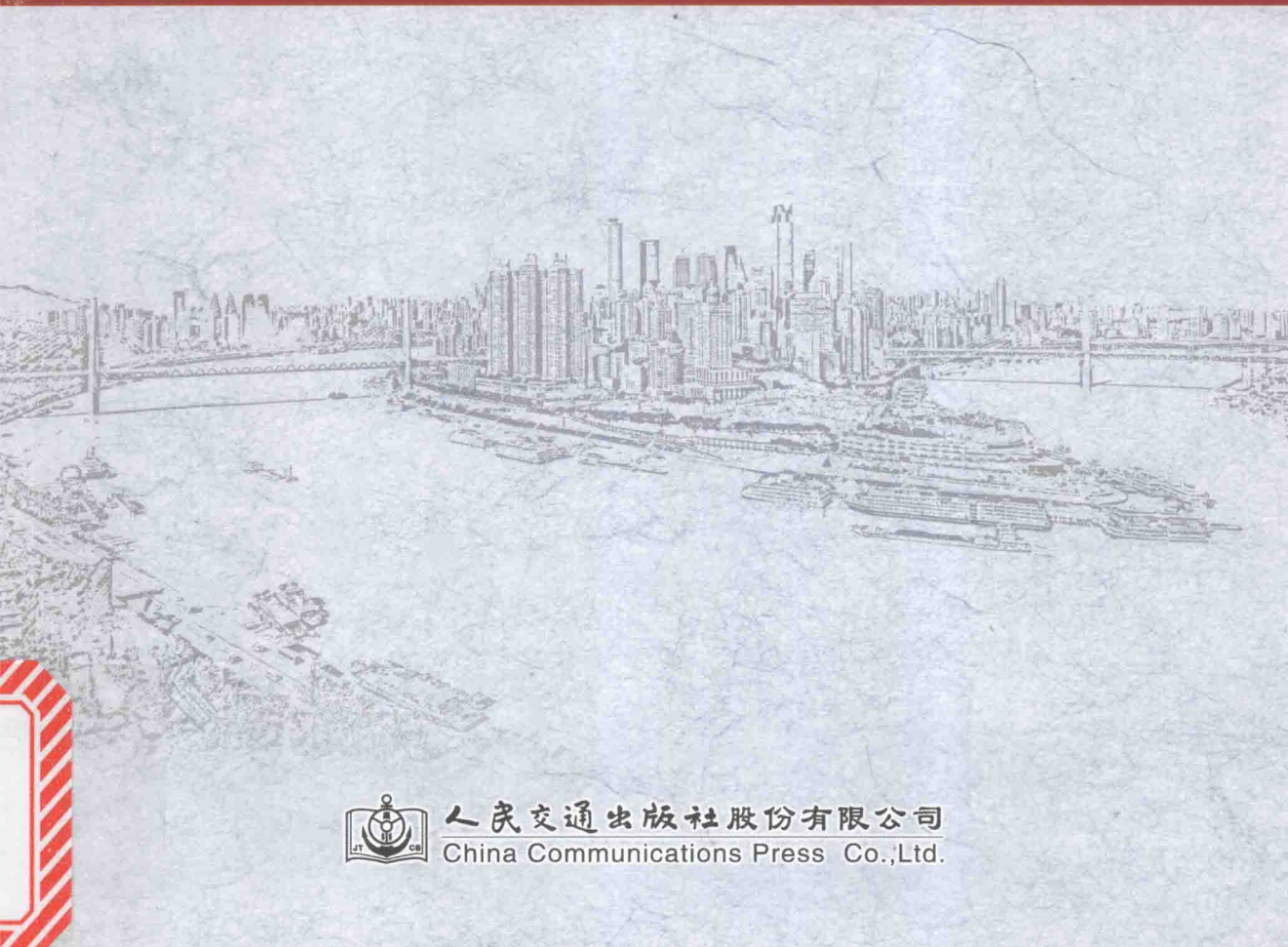
交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

王福敏 耿波 刘亢 著

大跨径公轨复合交通部分斜拉桥

Key Technologies of the Design of
Long-span Extradosed Bridges for
Combined Transport

设计关键技术



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



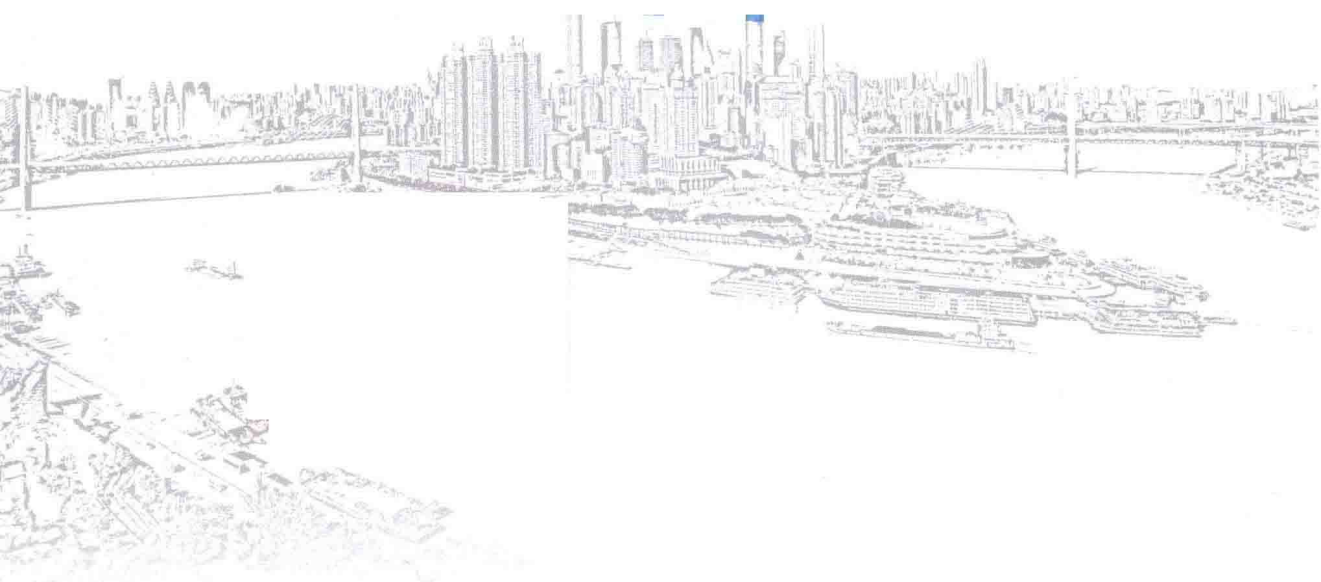
交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

王福敏 耿波 刘亢 著

大跨径公轨复合交通部分斜拉桥

Key Technologies of the Design of
Long-span Extradosed Bridges for
Combined Transport

设计关键技术



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

内 容 提 要

本书为“交通运输行业高层次人才培养项目著作书系”中的一本。本书主要针对公轨复合交通条件下大跨径部分斜拉桥这一复杂结构,结合主跨 445m 重庆东水门长江大桥和主跨 312m 千厮门嘉陵江大桥的工程实践,分别采用理论分析、数值计算、模型试验和实体工程验证等方法,对大跨径公轨复合交通部分斜拉桥设计关键技术进行介绍。内容包括:适用于公轨复合交通的单索面双桁片部分斜拉桥结构体系及其关键构造和 design 方法;由钢锚箱、侧拉板、剪力钉和横向预应力组合受力的新型索—塔锚固体系;单索面双桁片板桁结合主梁超大吨位斜拉索索梁锚固体系的受力机理;单索面双桁片板桁结合主梁设计及评价方法等。

本书可供从事大跨径桥梁工程设计和研究工作的技术人员参考,也可供高等院校土木工程专业在校师生学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

大跨径公轨复合交通部分斜拉桥设计关键技术 / 王福敏, 耿波, 刘亢著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.5

ISBN 978-7-114-13819-5

I. ①大… II. ①王… ②耿… ③刘… III. ①长跨桥—斜拉桥—桥梁设计 IV. ①U448.43 ②U448.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 104266 号

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

书 名: 大跨径公轨复合交通部分斜拉桥设计关键技术

著 者: 王福敏 耿 波 刘 亢

责任编辑: 潘艳霞 周 宇

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: 中国电影出版社印刷厂

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 12.25

插 页: 2

字 数: 272 千

版 次: 2017 年 5 月 第 1 版

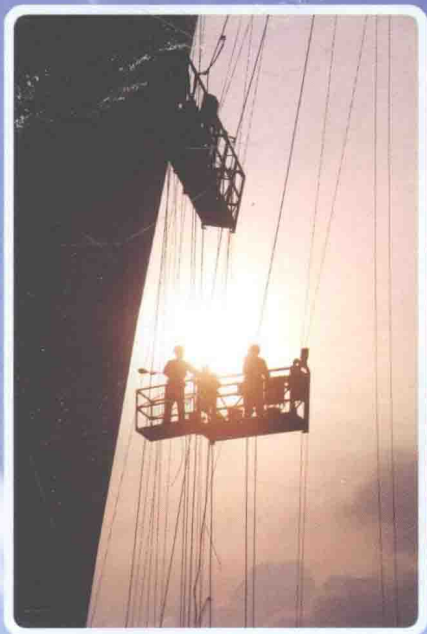
印 次: 2017 年 5 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13819-5

定 价: 75.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)





重庆东水门长江大桥南主塔涂装



重庆东水门长江大桥钢结构件的生产



千厮门嘉陵江大桥钢围堰内挖孔桩施工



重庆两江大桥全貌



重庆东水门长江大桥最重的一块桥面板(约70t)吊装



重庆东水门长江大桥最后一根合龙杆件吊装



重庆东水门长江大桥主塔封顶



重庆东水门长江大桥夜景



重庆东水门长江大桥建设工程纪实



千厮门嘉陵江大桥钢构件的生产



建设中的千厮门嘉陵江大桥



千厮门嘉陵江大桥主塔牛腿施工



千厮门嘉陵江大桥桥面板吊装



千厮门嘉陵江大桥主塔首节段浇筑



千厮门嘉陵江大桥钢桥面铺装

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系 编审委员会

主 任:杨传堂

副主任:戴东昌 周海涛 徐 光 王金付
陈瑞生(常务)

委 员:李良生 李作敏 韩 敏 王先进
石宝林 关昌余 沙爱民 吴 澎
杨万枫 张劲泉 张喜刚 郑健龙
唐伯明 蒋树屏 潘新祥 魏庆朝
孙 海



书系前言

Preface of Series

进入 21 世纪以来,党中央、国务院高度重视人才工作,提出人才资源是第一资源的战略思想,先后两次召开全国人才工作会议,围绕人才强国战略实施做出一系列重大决策部署。党的十八大着眼于全面建成小康社会的奋斗目标,提出要进一步深入实践人才强国战略,加快推动我国由人才大国迈向人才强国,将人才工作作为“全面提高党的建设科学化水平”八项任务之一。十八届三中全会强调指出,全面深化改革,需要有有力的组织保证和人才支撑。要建立集聚人才体制机制,择天下英才而用之。这些都充分体现了党中央、国务院对人才工作的高度重视,为人才成长发展进一步营造良好的政策和舆论环境,极大激发了人才干事创业的积极性。

国以才立,业以才兴。面对风云变幻的国际形势,综合国力竞争日趋激烈,我国在全面建成小康社会的历史进程中机遇和挑战并存,人才作为第一资源的特征和作用日益凸显。只有深入实施人才强国战略,确立国家人才竞争优势,充分发挥人才对国民经济和社会发展的重要支撑作用,才能在国际形势、国内条件深刻变化中赢得主动、赢得优势、赢得未来。

近年来,交通运输行业深入贯彻落实人才强交战略,围绕建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通的战略部署和中心任务,加大人才发展体制机制改革与政策创新力度,行业人才工作不断取得新进展,逐步形成了一支专业结构日趋合理、整体素质基本适应的人才队伍,为交通运输事业全面、协调、可持续发展提供了有力的人才保障与智力支持。

“交通青年科技英才”是交通运输行业优秀青年科技人才的代表群体,培养选拔“交通青年科技英才”是交通运输行业实施人才强交战略的“品牌工程”之一,1999 年至今已培养选拔 282 人。他们活跃在科研、生产、教学一线,奋发有为、锐意进取,取得了突出业绩,创造了显著效益,形成了一系列较高水平的科研成果。为加大行业高层次人才培养力度,“十二五”期间,交通运输部设立人才培养专项经费,重点资助包含“交通青年科技英才”在内的高层次人才。

人民交通出版社以服务交通运输行业改革创新、促进交通科技成果推广应用、支持交通行业高端人才发展为目的,配合人才强交战略设立“交通运输行业

高层次人才培养项目著作书系”(以下简称“著作书系”)。该书系面向包括“交通青年科技英才”在内的交通运输行业高层次人才,旨在为行业人才培养搭建一个学术交流、成果展示和技术积累的平台,是推动加强交通运输人才队伍建设的重要载体,在推动科技创新、技术交流、加强高层次人才培养力度等方面均将起到积极作用。凡在“交通青年科技英才培养项目”和“交通运输部新世纪十百千人才培养项目”申请中获得资助的出版项目,均可列入“著作书系”。对于虽然未列入培养项目,但同样能代表行业水平的著作,经申请、评审后,也可酌情纳入“著作书系”。

高层次人才是创新驱动的核心要素,创新驱动是推动科学发展的不懈动力。希望“著作书系”能够充分发挥服务行业、服务社会、服务国家的积极作用,助力科技创新步伐,促进行业高层次人才特别是中青年人才健康快速成长,为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通做出不懈努力和突出贡献。

交通运输行业高层次人才培养项目
著作书系编审委员会
2014年3月

作者简介

Author Introduction



王福敏, 1962年生, 四川南溪人。研究员, 全国交通青年科技英才, 国务院特殊津贴专家, 全国优秀科技工作者, 全国勘察设计行业科技创新带头人, 中国公路学会第五届专家委员会委员, 重庆市设计大师, 重庆市学术带头人。现任招商局重庆交通科研设计院有限公司董事长、国家山区公路工程技术研究中心主任。

主持完成桥梁设计、咨询项目 30 多项, 省部级重大科研项目 10 余项, 主编了《公路斜拉桥设计规范》等 3 部规范。其中, 作为总负责人, 主持完成了重庆朝天门长江大桥工程可研、初设、施设及关键技术研究, 大桥主跨 552m, 居世界拱桥第一。在重庆两江大桥工程中, 以院总工程师身份兼任 BT 建设管理负责人、设计技术负责人和“公轨复合交通桥隧一体建设关键技术研究示范”研究课题总负责人, 提出了“山地城市复合交通公轨桥隧一体化设计”“以创意与创新为核心的桥梁技术美学”等设计思想。

先后获得中国公路学会科学技术一、二等奖 3 项; 重庆市科技进步一、二等奖各 1 项; 詹天佑奖 2 项, 国家优秀设计铜奖 2 项; 全国优秀设计行业一等奖 1 项; 省部级优秀设计一等奖多项。出版《曲线梁桥传递矩阵设计法与工程应用实践》等 4 部专著, 发表学术论文 85 篇, 获得国家专利 15 项。

前言

Foreword

重庆市是我国西部地区最早建设、开通城市轨道交通线路的城市。截至2016年10月,重庆轨道交通运营里程达202km,里程长度位居我国第五位(不含港澳台地区)、中西部第一位。预计到2020年,运营里程将近500km。

重庆市是一座典型的山地城市,地形起伏变化大,也是一座著名的江城,长江、嘉陵江穿城而过。跨江大桥成为了城市交通骨干网络的控制性节点,也构成了重庆“山、水、城、桥”的独特风貌。根据重庆市城市总体规划,远期规划合计820km的城市轨道交通线路将13次跨越长江和10次跨越嘉陵江,在重庆两江上方将建成23座城市轨道交通专用或与铁路交通、公路交通共用的桥梁。重庆将成为我国城市轨道交通领域桥梁类型和数量最多的城市。

重庆市轨道交通6号线是主城区轨道交通线网的重要组成部分,其上新街至大剧院段位于重庆中央商务区,穿越渝中半岛解放碑,南接弹子石、北连江北嘴,跨越长江、嘉陵江。为改善区域道路网络结构,完善综合交通,一次性解决城市道路交通和轨道交通的过江需求,2009年底,开工建设公轨复合交通的东水门长江大桥和千厮门嘉陵江大桥。

两座跨江大桥采用双层桥面,公路交通在上,轨道交通在下。处于下层桥面的轨道交通净空尺寸大,进而主梁梁高大、刚度大。设计者充分利用公轨复合交通下的这一结构特点,创新性地设计出了单索面稀索体系部分斜拉桥,增强了江面景观通透性,避免了双索面视角交叉对景色的分割,具有很好的景观协调性;同时主梁材料的充分使用也降低了工程造价。方案集安全、适用、经济、美观于一身。

由于东水门长江大桥和千厮门嘉陵江大桥均为公轨两用部分斜拉桥,且跨径为目前国内外公轨复合交通部分斜拉桥的最大跨径,设计中采用的新型设计理念、新型结构体系以及新型构造形式,均对传统设计提出了新的挑战。

在设计中,分别采用理论分析、数值计算、模型试验和实体工程验证等方法,创造性地提出了外置式索塔锚固钢锚箱、单索面条件下板桁结合桥面板,以及钢横梁跨中设置索梁锚固结构、大吨位混凝土牛腿等关键构造,并开展了公轨复合

交通条件下的风车桥耦合振动分析。形成了大跨径公轨复合交通部分斜拉桥设计关键技术,包括:提出了适用于公轨复合交通的单索面双桁片部分斜拉桥结构体系,及其关键构造及设计方法;研制了由钢锚箱、侧拉板、剪力钉和横向预应力组合受力的新型索—塔锚固体系;揭示了单索面双桁片板桁结合主梁超大吨位斜拉索索梁锚固体系的受力机理;建立了单索面双桁片板桁结合主梁设计及评价方法等。

大跨径公轨复合交通部分斜拉桥设计关键技术有力地支撑了重庆东水门长江大桥和千厮门嘉陵江大桥的建设,大大减少了钢结构用量,改进了大桥索塔锚固区结构、索梁锚固区结构、大吨位混凝土牛腿的施工,节约工程造价 2300 多万元,缩短施工工期 94 天。

2014 年 3 月,东水门长江大桥建成通车;2015 年 4 月,千厮门嘉陵江大桥建成通车。通车至今,公路及轨道交通运营状况良好。东水门长江大桥荣获 2015 年度“全国市政金杯示范工程”和 2015 年度重庆市优秀设计一等奖,重庆市市政工程金杯奖;千厮门嘉陵江大桥荣获 2015 年度英国工程师协会卓越工程提名奖和 2016 年度重庆市优秀设计一等奖、重庆市市政工程金杯奖。两座跨江大桥获得首届“重庆市十大最美桥梁”荣誉称号。

为了系统地总结在该项目中形成的大跨径公轨复合交通部分斜拉桥设计关键技术,记录在该设计中所采用的科学有效的方法、措施,完善我国公轨复合交通桥梁设计理论,为今后同类型桥梁的建设提供技术支撑,特著本书。

感谢项目组成员王丰华、安永日、袁佩、尚军年、张长青、魏思斯、李嵩林、张茜、刘勋、陈忆前、常国强等为本项目付出的辛勤劳动!

本书编写过程中,得到了工程建设业主单位重庆全通工程建设管理有限公司的鼎力支持,同时也得到了西南交通大学、中南大学、中铁大桥局集团武汉桥梁科学研究院有限公司、中铁大桥局八公司和中铁宝桥集团有限公司的大力协助,在此一并表示感谢!

最后,向招商局重庆交通科研设计院有限公司参与本书编写和技术审核的专家、同事表示感谢!



2017 年 3 月于重庆



目 录

Contents

1	概述	1
1.1	部分斜拉桥	1
1.2	部分斜拉桥关键技术的研究现状	4
1.3	两江大桥公轨复合交通部分斜拉桥设计关键技术	14
2	重庆两江大桥建设条件与设计指标	19
2.1	工程概况	19
2.2	建设条件	21
2.3	设计要求	26
3	公轨复合交通部分斜拉桥合理受力体系	38
3.1	部分斜拉桥的力学特点	38
3.2	有限元模型建立	39
3.3	结构设计参数敏感性分析	41
3.4	部分斜拉桥静力及动力响应要求	51
3.5	部分斜拉桥合理受力体系的参数范围	55
4	单索面部分斜拉桥板桁组合体系传力机理	56
4.1	主要研究内容	56
4.2	板桁结合桥面板精细化有限元数值分析	56
4.3	实桥测试试验	68
4.4	部分斜拉桥板桁组合体系传力机理	83
5	超大吨位索力作用下索塔锚固区外置式钢锚箱结构传力机理	84
5.1	主要研究内容	84
5.2	索塔锚固区有限元数值模拟	86
5.3	索塔锚固区足尺模型试验	100
5.4	索塔锚固区外置式钢锚箱结构传力机理	117
6	超大吨位索力作用下索梁锚固形式	119
6.1	主要研究内容	119
6.2	索梁锚固区有限元数值模拟	119
6.3	索梁锚固区疲劳模型试验	123
6.4	索梁锚固形式及其受力特性	134

7 超大吨位支座牛腿结构受力特点	136
7.1 牛腿构造及关注重点	136
7.2 东水门大桥主塔牛腿段有限元分析	137
7.3 千厮门大桥主塔牛腿段有限元分析	142
7.4 超大吨位支座牛腿结构受力特点	148
8 公轨复合交通部分斜拉桥动力特性及车桥耦振	149
8.1 主要研究内容	149
8.2 桥梁动力特性分析	149
8.3 车桥耦合振动分析	151
8.4 部分斜拉桥动力特性及舒适度	172
9 总结与思考	173
9.1 公轨复合交通部分斜拉桥设计关键技术的创新意义	173
9.2 公轨复合交通部分斜拉桥设计关键技术的应用价值	174
9.3 思考	174
参考文献	176

1 概 述

随着我国国民经济和人民生活水平的快速提高,一些大型城市的交通状况逐渐暴露出了较多问题。对于城市来说,道路路线的改变、扩宽等工程不仅需要很大的经济投入,而且还会在一定的时间段上影响人们的正常生活,尤其是在人口密集的大型城市。于是,人们开始把注意力投向了城市轨道交通的建设,据此来解决问题,满足人们正常生活的需求。

重庆轨道交通6号线是主城区轨道交通线网的重要组成部分,其上新街至大剧院段位于重庆中央商务区,穿越渝中半岛解放碑,南接弹子石、北连江北嘴,跨越长江、嘉陵江。为改善区域道路网络结构,完善综合交通,一次性解决城市道路交通和轨道交通的过江需求,2009年底,开工建设重庆东水门长江大桥和千厮门嘉陵江大桥(简称“两江大桥”)。

在山地城市环境下,两江大桥工程将路、轨、桥、隧集中于整个工程全长仅约2.8km的范围内,特别是公轨两种交通方式在空间、荷载、效应、需求等多个方面相互叠加和影响,制约了工程在桥位、接线方式、路线通过方式、桥隧断面、桥型方案、结构受力、安全与美观等的选择,构成了公轨复合交通。

同时,重庆东水门长江大桥(简称“东水门长江大桥”或“东水门大桥”)和千厮门嘉陵江大桥(简称“千厮门大桥”)均为公轨两用部分斜拉桥,且跨径为目前国内外公轨复合交通部分斜拉桥的最大跨径,两江大桥在设计中采用的新型设计理念、新型结构体系以及新型构造形式,均对传统设计提出了新的挑战。

1.1 部分斜拉桥

1.1.1 国外建设概况

1988年,一位名叫 Jacques Mathivat 的工程师在设计某高架桥方案时首次提出了部分斜拉桥这一概念,并命名之为“Extra-dosed PC bridge”,可以将其翻译为“超剂量预应力混凝土梁桥”。1990年,一位名叫 Antonie Naama 的德国工程师引入了组合体外预应力索桥的概念,就是将一部分体外预应力索伸出主梁,并在墩顶处的主梁上将其锚固。上述这两种方案具有很大的相似性。

1994年建成的小田原港桥可称为首座部分斜拉桥,其跨径布置为 $74.00\text{m} + 122.00\text{m} + 74.00\text{m}$,桥宽为 13.00m ,塔、梁、墩三者相互固结,拉索直接锚固在主梁上。日本于2000年成功修建了四塔部分斜拉桥——土狩大桥,其跨径形式为 $94.00\text{m} + 3 \times 140.00\text{m} + 94.00\text{m}$,塔梁固结。该桥第一次使用能够将反力进行分散的叠合橡胶支座,这有利于对支座的应变进行后期调整,同时也使得支座变形得以消除。2001年,日本成功修建木曾川桥,跨径为 $160.00\text{m} + 3 \times 275.00\text{m} + 160.00\text{m}$ 。同一年,成功修建的揖斐川桥,跨径为 $154.00\text{m} + 4 \times 271.50\text{m} + 127.00\text{m}$,两座桥均为多塔单索面部分斜拉桥,主梁形式为箱梁,属于混凝土和钢材的组合桥梁结构。日本于2004年建成通车的日见桥的主梁,第一次采用波形钢腹板以及

体外预应力,不但能够使材料性能得以充分利用,而且使得结构自重大大减小。1994~2005 年近 10 年的时间中,共有 27 座部分斜拉桥在日本建成。桥梁跨径也逐渐变大,从最初的 122.00m 至后期的 275.00m。桥宽从最初的 13.00m 至后期的 33.00m。主梁形式从初期的预应力混凝土到后期的结合梁或钢混合梁结构,极大地丰富了桥梁类型和适用范围,为部分斜拉桥的发展做出了较大贡献。菲律宾建设的麦克坦大桥主跨为 185.00m,桥面宽度为 21.00m;老挝修建的巴色桥主跨为 143.00m,桥宽为 11.80m;美国的首座全长为 308.70m 的部分斜拉桥于 2006 年修建成功,该桥的主跨径为 157.00m。国外部分斜拉桥的概要见表 1.1.1。

国外部分斜拉桥概要

表 1.1.1

序号	桥 梁 名 称	所属国家	通车年份	主跨径布置形式(m)	用 途
1	小田原港桥	日本	1994	74.00 + 122.00 + 74.00	跨越海湾
2	屋代南桥	日本	1995	65.00 + 105.00 + 105.00 + 65.00	跨越公路
3	冲原桥	日本	1997	66.00 + 180.00 + 77.00	跨越湖泊
4	蟹沢大桥	日本	1997	100.00 + 180.00 + 77.00	机场附近
5	Saint. Remy. de. Maurienne Bridge	法国	1997	48.50 + 52.50	跨越公路
6	Sunniberg Bridge	瑞士	1998	59.00 + 128.00 + 140.00 + 134.00	跨越山谷
7	唐柜新桥	日本	1998	75.00 + 140.00 + 70.00	跨越山谷
8	谷川桥	日本	1998	93.50 + 58.50	跨越河流
9	第二曼达桥	菲律宾	1999	112.50 + 185.00 + 112.50	跨越海湾
10	JR 新川高架桥(铁)	日本	1999	52.00 + 59.00	跨越公路
11	Pakse 桥	老挝	2000	123.00 + 143.00 + 91.50	跨越河流
12	土狩大桥	日本	2000	94.00 + 3 × 140.00 + 94.00	跨越河流
13	またきな大桥	日本	2000	90.00 + 110.00	跨越湖泊
14	佐敷大桥	日本	2000	61.50 + 105.00 + 61.50	跨越江湖
15	Suriagegawa Dum Bridge	日本	2000	84.20	跨越公路
16	雪沢三号桥	日本	2000	70.30 + 71.00	跨越山谷
17	中の池桥	日本	2000	60.60	跨越山谷
18	都田川桥	日本	2000	134.00 + 134.00	跨越山谷
19	保津桥	日本	2001	76.00 + 100.00 + 76.00	跨越山谷
20	揖斐川桥	日本	2001	154.00 + 4 × 271.50 + 157.00	跨越河流
21	Kiso 大桥	日本	2002	160.00 + 3 × 275.00 + 160.00	跨越河流
22	新川大桥	日本	2002	130.00	跨越河流
23	深浦大桥	日本	2002	90.00	跨越海湾
24	New Koror. Babeldaop Bridge	帕劳	2002	82.50 + 247.00 + 82.50	跨越海湾
25	新名西桥	日本	2003	88.50 + 122.40 + 81.20	跨越河流
26	日见桥	日本	2003	92.50 + 180.00 + 92.50	跨越山谷
27	望乡大桥	日本	2003	100.00 + 200.00 + 100.00	跨越河流