

大跨径

自锚式悬索桥

—广东佛山平胜大桥

佛山市路桥建设有限公司 编



人民交通出版社

China Communications Press

大跨径

自锚式悬索桥

——广东佛山平胜大桥

佛山市路桥建设有限公司 编



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

该书叙述并总结了目前世界已建成的最大的独塔单跨四索面混合梁自锚式悬索桥——广东佛山平胜大桥的工程建设、设计、科研、施工和监管的建设过程和建设经验。全书共分五篇 26 章。第一篇为建设管理,主要介绍桥型的选定和建设管理;第二篇为设计,主要介绍设计参数的选定、桥梁总体结构与计算以及施工方案的选定;第三篇为科研试验,主要介绍对该桥有关设计计算理论的研究、抗风、抗震和几项重要结构施工方案的研究试验;第四篇为施工,主要介绍索塔、锚跨、混凝土加劲梁、钢混结合段、钢箱梁制造安装顶推架设、缆吊系构件制造安装、全桥体系转换、防护涂装工程、钢桥面铺装;第五篇为工程监管,主要介绍该桥监理、监控、监督的特点。另在附录中还简要介绍了国内外部分自锚式悬索桥的有关资料。

该书内容客观、翔实,既有较为丰富的实践经验介绍,又有一定程度的理论阐述,可供从事交通基础设施建设的工程建设管理、设计、科研、监理、监控和监督的工程人员阅读使用,也可供大专院校桥梁工程及相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

大跨径自锚式悬索桥:广东佛山平胜大桥/佛山市路桥建设有限公司编. —北京:人民交通出版社,2008. 1
ISBN 978-7-114-06978-9

I. 大… II. 佛… III. 长跨桥:悬索桥—桥梁工程—佛山市 IV. U448. 25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 009914 号

书 名:大跨径自锚式悬索桥——广东佛山平胜大桥
著 作 者:佛山市路桥建设有限公司
责任编辑:刘永芬
出版发行:人民交通出版社
地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号
网 址:<http://www.ccpress.com.cn>
销售电话:(010)85285838,85285995
总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司
印 刷:北京宝莲鸿图科技有限公司
开 本:880×1230 1/16
印 张:28
字 数:880 千
插 页:2
版 次:2008 年 4 月 第 1 版
印 次:2008 年 4 月 第 1 次印刷
书 号:ISBN 978-7-114-06978-9
印 数:0001~2500 册
定 价:80.00 元
(如有印刷、装订质量问题,由本社负责调换)



编委会

BIANWEIHUI

主任委员:高荣堂

副主任委员:林灼杰 肖建伟 陈卫东

委员:(按姓氏笔画为序)

卢宁 刘旋云 庄奕忠 阮少萍 余泗海 李传习 李肇昌
陈永宏 周振华 周爱国 林创建 罗青 胡建华 徐风云
高峰 谢山海

编写组

BIANXIEZU

主编:周爱国

副主编:谢山海 刘陌生

主要编写人员:(按姓氏笔画为序)

马圭尧 王志生 邓刚 冯朝军 刘建 刘榕 向建军
宋凤立 张启桥 张贵明 李传习 杨飞跃 杨鹏程 罗国民
罗青 罗超群 柯红军 胡建华 梁国强 黄瀚添 温从松
谭钊洪 薄庆元

编辑办公室:周爱国 谢山海 刘陌生 罗国民 谭钊洪 杨鹏程 关维溢
周建波

编审专家组:楼庄鸿 李霄萍



编审人员分工

BIANSHEN RENYUAN FENGONG

第一篇 建设管理

编写单位:佛山市路桥建设有限公司

编写人员:周爱国 谢山海 刘陌生 罗国民 谭钊洪 杨鹏程
关维溢 周建波

初审人员:编辑办公室成员

复审人员:编审专家组、编写组成员

终审人员:编委会成员

第二篇 设计

编写单位:湖南省交通规划勘察设计院

编写人员:胡建华 向建军 张贵明 廖建宏 刘 榕 崔建锋
王 甜 程丽娟 戴小冬 蒲怀仁

初审人员:编辑办公室成员

复审人员:编审专家组、编写组成员

终审人员:编委会成员

第三篇 科研试验

编写单位:湖南省交通规划勘察设计院

编写人员:胡建华 向建军 张贵明 廖建宏 刘 榕 崔建锋
王 甜 程丽娟 戴小冬 蒲怀仁

初审人员:编辑办公室成员

复审人员:编审专家组、编写组成员

终审人员:编委会成员

第四篇 施工

编写单位:中铁大桥局

佛山公路工程有限公司

中铁宝桥股份有限公司

编写人员:陈永宏 冯朝军 邓 刚 罗超群 杜官民 张启桥
王海峰 林永盛 陈成杰 梅 波 何则林 庄奕忠
黄阡添 马圭尧 梁国强 陈邦艺 温从松 王志生
王志翔 余团营

初审人员:编辑办公室成员

复审人员:编审专家组、编写组成员

终审人员:编委会成员

第五篇 工 程 监 管

编写单位:中国公路工程咨询监理总公司

长沙理工大学

佛山市交通工程质量监督站

编写人员:徐风云 薄庆元 宋凤立 高 峰 王 忠 梁 辉
张文斌 杨占军 张建桥 李传习 刘 建 柯红军
董创文 杨飞跃 罗 青 司徒毅 曾国东 王良波

初审人员:编辑办公室成员

复审人员:编审专家组、编写组成员

终审人员:编委会成员

附 录

编写单位:佛山市路桥建设有限公司

编写人员:周爱国 谢山海 刘陌生 罗国民 谭钊洪 杨鹏程
关维溢 周建波

初审人员:编辑办公室成员

复审人员:编审专家组、编写组成员

终审人员:编委会成员

序

XU

广东佛山平胜大桥的主桥是独塔单跨四索面混合梁自锚式悬索桥,主跨 350m,是目前世界上最大跨度的自锚式悬索桥。该桥工程量大、工期短、质量要求高、技术比较复杂。目前这种桥梁世界上建成的不多,跨度大多在 200m 以下。1929 年在德国建成的科隆—米尔海姆大桥,主跨 315m,跨越莱茵河,是当时世界最大跨度的自锚式悬索桥,可惜该桥在第二次世界大战中被毁。美国的匹兹堡市内,也修建了一系列的自锚式悬索桥,但跨度都较小。目前在建的美国旧金山—奥克兰海湾新桥,跨径 385m,与平胜大桥规模相似。

平胜大桥是佛山市“一环”城市快速干线最大的控制工程,是关系到全线能否按时建成通车投入运营的关键。平胜大桥工程重点在索塔基础、承台和塔身、横梁的施工,主桥主跨钢加劲梁的加工制造、工地拼装和顶推施工,以及悬索、吊杆的安装施工。自锚式悬索桥在形式上与地锚式悬索桥相似,但其受力和施工方法却有很大的不同,而且由于现成可借鉴的经验不多,在设计和施工中,许多问题需要攻关,例如主缆的锚固结构,钢与混凝土结合段的构造,钢箱梁顶推架设,钢混结合段和锚跨的施工技术,吊索张拉与全桥体系转换施工技术。各个参建单位和监督单位,在没有很多成功经验借鉴的情况下,解决了设计、施工中的这些难题,胜利建成此桥,取得了一系列可贵的经验。现在平胜大桥工程建设者们又将其经验汇集成书,并准备出版问世,这将对自锚式悬索桥建桥技术的进步起到很好的推动作用。从这个意义上讲,这是一本很有价值的技术参考书。为此,我支持并推荐它的出版。

邓文申

2008 年 3 月

前言

QIANYAN

悬索桥以其雄伟、壮观、跨越能力大而著称,是跨越宽大江河、海湾的首选桥型之一,如跨越近千米珠江口的广东虎门大桥,跨越滚滚长江的江苏江阴长江大桥等。一般的悬索桥其主要承重构件——主缆锚固在地层中,称之为地锚式悬索桥。如果主缆不是锚入地层,而是锚固在桥梁自身的加劲梁端部,依靠桥梁自身结构来平衡桥梁的拉力者,则称为自锚式悬索桥。

自锚式悬索桥的发展尽管已有一百多年,但相对而言,仍是一种较为新颖的桥型,20世纪初在欧洲平原的莱茵河、莫斯科河上曾建造过多座轻型、单行道的自锚式悬索桥。二次世界大战后,由于斜拉桥的兴起,加上自锚式悬索桥的设计计算理论和工具不完善,以及战后经济属于恢复时期,所以很长的一段时间内,世界上很少再修建这种桥梁。20世纪末,由于经济大发展和城市建设的需要,自锚式悬索桥又逐渐兴建起来。自锚式悬索桥不但有悬索桥雄伟、壮观、跨越能力大的优点,还有以下几个方面的显著特点:自锚式悬索桥的主缆是锚固在桥梁自身的加劲梁端部,而不需要建造巨大的锚碇,并使加劲梁(如果是钢筋混凝土梁)获得免费的预压应力;不需要在河流两岸开挖大量的土方,有利于保护环境,特别在城区修建这种桥梁可减少房屋拆迁和环境的破坏,从而节省投资;自锚式悬索桥具有多方面的灵活性,首先是孔跨布置灵活,可以设计为双塔三跨桥、双塔单跨桥,也可以修成独塔单跨桥或独塔双跨桥,其次是材料选用具有多样性,加劲梁可以用钢梁,也可以用钢筋混凝土梁,梁的形式可以是箱梁也可以是桁架,其三是缆索布置形式灵活,主缆可以是单缆,也可以是双缆或四缆,主缆吊索可设在同一垂直索面上,也可以布成空间索面;自锚式悬索桥具有传统悬索桥的美观外形,在城市和旅游景观区建造可起到“一桥一景”美化环境的作用。根据自锚式悬索桥的结构力学特性和目前所采用的材料和基本施工方法(先架梁后架主缆),比较适宜的跨径为100~400m,一般认为钢加劲梁的自锚式悬索桥跨径在350m以下具有较强的综合竞争力。

目前国外已建典型的自锚式悬索桥有16座,跨径大多在300m内。美国旧金山—奥克兰海湾新桥跨径已达385m,因种种原因推迟到2006年才动工,目前正在建设中。21世纪以来,在我国沿海经济发达地区也开始修建这种桥梁,

国内典型的自锚式悬索桥已多达 23 座,多数是混凝土加劲梁,跨径不足 200m。自锚式悬索桥在我国兴起较晚,但发展较快,其中较为突出的代表就是广东佛山平胜大桥。

平胜大桥是佛山“一环”的控制性工程,位于南海、顺德两区交界处 K7+700~K11+700 段,跨越市中心城区黄金水道(东平水道),全长 2 247.84m,由北岸引桥、主桥和南岸引桥组成。由于佛山市地质构造属平原河网软土地带,市内已建成多座桥梁,而且形式多样,有 T 形刚构、连续刚构、钢桁架拱桥、混凝土拱桥、斜拉桥。平胜大桥作为佛山“一环”工程的地标建筑,其主桥的桥型经过多方论证,决定采用自锚式悬索桥,也就是本书要介绍的这座桥梁。

平胜大桥于 2004 年 3 月下旬组织施工进场,4 月 4 日正式开工,于 2006 年 11 月 18 日建成通车,平胜大桥主桥是一座独塔四索面混合梁自锚式悬索桥,桥长 680.20m,主跨 350m,是目前世界上跨径最大的独塔自锚式悬索桥。该桥的设计和施工技术含量高、难度大,通过工程实践,攻克了大跨度自锚式悬索桥的重要设计理论和计算方法的难题,成功地解决了主缆的锚固结构、钢与混凝土结合段的构造等大跨径自锚式悬索桥一些关键部位的结构设计,并且掌握了大跨径自锚式悬索桥钢箱梁顶推架设、全桥体系转换等新的一整套施工方法,累计取得了五项配套技术共 33 项重要成果。

平胜大桥的建成通车,凝聚了参建单位的心血和智慧,是全体建设者辛勤劳动和无私奉献的结晶。平胜大桥建设期间,全国桥梁学术会议多次在工地现场召开,桥梁界有关专家亲临工地现场进行方案评审和技术指导,提出了很多宝贵意见和建议。省、市政府及交通主管部门领导经常亲临平胜大桥工地视察指导,并指示不仅要把平胜大桥建设成精品工程,为人民造福,而且要总结好建设经验,争取实现经济和社会效益双丰收。这对我们加强工程建设、做好建设经验总结工作具有十分重要的指导意义。

为更好地总结平胜大桥成功经验,丰富我国正在兴起的大跨径自锚式悬索桥建桥技术宝库,使我国桥梁界同行更好地了解认识、应用这种桥梁,业主单位早在工程建设过程中就开始筹划平胜大桥技术总结与出书工作,2006 年 12 月 22 日,业主单位组织设计、施工、监理、监控、监督等单位有关人员召开了《大跨径自锚式悬索桥——广东佛山平胜大桥》第一次编写工作会议,正式启动大桥建设经验总结的编写工作。业主单位编写小组和各参建单位有关人员经过近一年的辛勤工作和呕心力作,本书终于得以脱稿并出版。

本书分五篇 26 章叙述平胜大桥的工程建设、设计、科研、施工、监管情况。本书力图内容翔实,全面客观地总结平胜大桥实践经验,因而对工程实施过程中发生的关键性技术问题都做了比较详细的介绍。

第一篇为建设管理篇,内容包括工程概况、建设管理共两章,着重介绍了桥型的选定和建设管理模式探索、工程技术质量管理与科技攻关总体情况。业主单位针对平胜大桥项

目的实际情况,在管理组织模式中积极创新探索以“工程指挥部+项目法人+项目咨询”的 HPC 模式,结合传统模式的特点,在项目建设的不同阶段,采取了各种措施保证大桥建设的顺利实施,提出了“专业化集中管理”、“集中财力办大事”、“质量为大,安全为先”、“小机构,大社会”等建设管理理念。

第二篇为设计篇,包括结构设计、有关设计的几项重要技术问题的分析计算与结果、两项重要施工方案的设计与研讨共三章,着重介绍了设计单位对有关设计参数的分析与选定、桥梁总体结构设计、分析计算与结果,以及顶推架设钢箱梁、体系转换两项关键性施工方案的选定等。

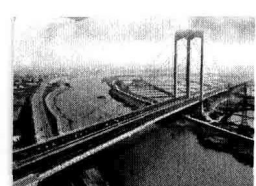
第三篇为科研试验篇,包括自锚式悬索桥静力性能研究,动力特性研究,抗风性能试验研究,抗震关键技术设计,施工过程模型试验研究,钢—混凝土结合段 PBL 键与接头形式的试验研究,钢加劲梁局部稳定保障的技术研究,吊索锚箱设计、试验研究共八章,着重介绍了科研单位对该桥有关设计计算理论的研究、抗风、抗震和几项重要结构施工方案的研究试验,另外对新型 PBL 剪力键性能研究亦做了较为详细的介绍。

第四篇为施工篇,包括施工概况、索塔施工、锚跨施工、混凝土加劲梁与钢混结合段施工、钢加劲梁的制造、钢箱梁安装与架设、猫道及缆吊系统构件的制造与安装、吊索张拉与全桥体系转换、防护涂装工程、钢桥面环氧沥青混凝土铺装施工共十章,着重介绍了每道关键分项工序的施工规程,内容详尽,操作性强,施工单位对大体积混凝土配合比优化设计、浇筑、温控及水化热监控,对临时墩、钢导梁的施工,钢箱梁制造以及顶推实施过程中线形与失稳监控、纠偏措施,全桥体系转换注意事项等都有独特的体会。

第五篇为工程监管篇,包括施工监理、施工监控、工程质量监督共三章,着重介绍了监理单位对三大控制、各分项工程施工监理要点,监控单位对钢加劲梁顶推、缆吊系统的施工监控,以及桥面铺装和成桥阶段的监控与效果,施工监控取得的重要成果,监督单位对工程质量监督的程序和内容,重要部位的质量检测,特定环节、关键工序的质量监督,交工技术状态检测,平胜大桥验收荷载试验的特点。

本书附录中还简要介绍了国内外部分自锚式悬索桥的有关资料,着重列举了日本此花大桥、韩国永宗大悬索桥、美国旧金山—奥克兰海湾新桥、江苏苏州索山桥、辽宁抚顺万新大桥、海盐塘桥——主缆锚固定在塔顶的自锚式悬索桥、天津富民海河桥几座有特色的自锚式悬索桥。

本书编写工作得到了平胜大桥各参建单位和参建人员的大力支持,许多同志在紧张繁忙的工作之余,抽出宝贵的业余时间,挑灯写作。本书由楼庄鸿、李霄萍两位桥梁专家审稿把关,借此机会,向他们及他们的家属表示崇高的敬意和衷心的感谢。



本书的编写和出版,得到了各级、各部门领导及桥梁界有关专家的支持与鼓励,也得到了人民交通出版社的大力支持,在此,一并向他们表示诚挚的谢意。

由于长大跨径的自锚式悬索桥技术比较复杂,涉及专业门类多,本书只重点介绍其具有特点的新技术、新工艺和主要科研的攻关内容。平胜大桥属于大跨径自锚式悬索桥的起步工程,许多问题虽然都得到成功的实践,但其理念和经验还是初步的,加上参与编写的人员较多,而且受到时间和能力的限制,书中不可避免地存在疏漏,甚至错误,本书不尽如人意之处在所难免,敬请读者谅解。

编 者

2008 年 3 月

目 录

第一篇 建设管理

第一章 工程概况	3
第一节 概述	3
第二节 主桥桥型方案的选定	6
第三节 工程建设的基本情况	9
第二章 建设管理	11
第一节 建设管理模式	11
第二节 工程进度与造价管理	19
第三节 工程质量管理	21
第四节 工程技术管理与科技攻关	21
第五节 档案管理	23

第二篇 设 计

第一章 结构设计	29
第一节 有关参数的分析与确定	29
第二节 结构设计	32
第二章 有关设计的几个重要技术问题的分析计算与结果	50
第一节 体系整体稳定和极限承载力的分析计算	50
第二节 主要结构参数及静、动力计算主要结果	53
第三节 钢混结合的设计与计算	54
第三章 两项重要施工方案的设计与研讨	58
第一节 适应顶推架设钢箱梁构造设计	58
第二节 自锚式悬索桥体系转换施工方案探讨	63

第三篇 科 研 试 验

第一章 自锚式悬索桥静力性能研究	79
第一节 结构参数变化对静力性能的影响	79
第二节 自锚式悬索桥结构理论分析与试验研究	84
第三节 平胜大桥全桥的整体稳定和极限承载力模型试验	88
第二章 自锚式悬索桥动力特性研究	92
第三章 平胜大桥抗风性能试验研究	95
第四章 平胜大桥抗震关键技术设计	102
第五章 平胜大桥施工过程中模型试验研究	113
第六章 钢—混凝土结合段 PBL 键与接头形式的试验研究	117

第七章 自锚式悬索桥钢加劲梁局部稳定保障的技术研究·····	128
第八章 自锚式悬索桥吊索锚箱设计、试验研究·····	136

第四篇 施 工

第一章 平胜大桥主桥工程施工概况·····	145
第二章 索塔施工·····	151
第一节 工程概况·····	151
第二节 塔柱、下横梁、上横梁、装饰墙施工·····	153
第三章 锚跨施工·····	164
第一节 工程概况·····	164
第二节 索股锚固体的施工·····	166
第三节 锚跨上部混凝土的浇筑·····	173
第四章 混凝土加劲梁与钢混结合段的施工·····	191
第一节 混凝土加劲梁的施工·····	191
第二节 钢混结合段施工·····	195
第五章 钢加劲梁的制造·····	205
第一节 工程概况·····	205
第二节 制造准备·····	208
第三节 钢箱梁板单元制造·····	220
第四节 钢箱梁节段组拼与焊接·····	225
第五节 钢箱梁梁段运输·····	233
第六章 钢箱梁安装与架设·····	235
第一节 概述·····	235
第二节 钢箱梁安装与架设施工场地布置·····	236
第三节 钢箱梁节段间的焊接·····	247
第四节 顶推实施·····	250
第五节 钢箱梁合龙·····	256
第七章 猫道及缆吊系统构件的制造与安装·····	264
第一节 猫道设计与架设·····	264
第二节 缆吊系统主要构件的制造与安装·····	268
第八章 吊索张拉与全桥体系转换·····	281
第一节 概述·····	281
第二节 前期技术准备·····	283
第三节 吊索张拉作业实施·····	287
第四节 吊索张拉方案一的分析、计算和成果·····	292
第九章 防护涂装工程·····	302
第一节 概述·····	302
第二节 平胜大桥钢箱梁的防护·····	307
第三节 平胜大桥主缆、索夹、吊索及其附件防护·····	314
第四节 平胜大桥主桥混凝土工程防护·····	322
第十章 钢桥面环氧沥青混凝土铺装施工·····	325
第一节 工程概况·····	325
第二节 施工·····	327



第五篇 工程监管

第一章 施工监理	339
第一节 概述.....	339
第二节 工程“三大”控制.....	341
第三节 钢箱梁制造、安装和架设的监理	345
第四节 索塔、锚跨与钢混结合段施工监理	348
第五节 缆吊系构件的制造安装监理要点.....	350
第六节 钢桥面铺装监理工作要点.....	354
第二章 施工监控	359
第一节 钢加劲梁顶推施工监控.....	359
第二节 缆吊系统施工监控.....	362
第三节 桥面铺装和成桥阶段的监控及效果.....	378
第四节 施工监控取得的重要成果.....	380
第三章 工程质量监督	381
第一节 工程质量监督的程序和内容.....	381
第二节 重要部位的质量检测.....	384
第三节 特定环节、关键工序的质量监督	390
第四节 平胜大桥桥梁交工技术状态检测.....	393
第五节 平胜大桥验收荷载试验.....	395
第六节 平胜大桥主桥交工检测结论及建议.....	411
附录	413
参考文献	431

第一篇 建设管理

JIAN SHE GUAN LI



第一章

工程概况

第一节 概 述

一、工程地理位置与简况

2003年广东佛山行政区规划调整完成后,全市正在按照建设“产业强市、文化名城、现代化大城市”和“富裕和谐佛山”的目标进行各项大型基础设施规划建设。根据佛山市路网规划,佛山干线公路网规划为“五纵九横二环”。为强化佛山与广州的交通联系,加强各区及组团间的沟通,佛山市政府决定在佛山市规划建设一条城际快速干线环路(简称“一环”),将周边经济发达地区连接起来,这对促进佛山市社会经济快速、全面发展,加速广佛都市圈的形成具有十分重要的意义。和顺至北滘公路主干线为佛山一环的重要组成部分(简称佛山一环东路),起于顺德北滘镇,向北进入南海境内的和顺镇与广和大桥相接,该路段全长36.33km,设计标准如表1-1-1所示。本项目已于2006年11月18日建成通车。

佛山市一环东路主要技术标准一览表

表 1-1-1

序 号	项 目	主 路	辅 路
1	公路等级	一级公路兼城市快速路	城市主干线
2	路线长度(km)	36.33	
3	红线宽度(m)	114~120	
4	计算行车速度(km/h)	100	50
5	路基宽度(m)	43.0	2×18
6	车行道宽度(m)	2×(3.5+3×3.75)	2×(3.5+2×3.75)
7	中间带宽度(m)	6.0	6.0
8	硬路肩宽度(m)	2×3.00	
9	土路肩宽度(m)		0.5
10	路拱横坡(%)	2	2
11	路基设计洪水频率	1/100	
12	平曲线最小半径(m)	一般值 700;极限值 400	一般值 200;极限值 100
13	平曲线不设超高最小半径(m)	4 000	400
14	平曲线不设缓和曲线最小半径(m)	4 000	700
15	平曲线间最小直线长度(m)	同向 600,反向 200	同向 300,反向 100
16	最大超高横坡度(%)	8	4
17	最小停车视距(m)	160	60