

斜拉桥设计

Design of Cable Stayed Bridges



刘士林 王似舜 主编
顾安邦 徐岳 杨炳成 主审



人民交通出版社
China Communications Press

DESIGN OF CABLE STAYED BRIDGES

斜拉桥设计

刘士林 王似舜 主编
顾安邦 徐岳 杨炳成 主审

人民交通出版社

2006年6月北京

内 容 提 要

本书按照最新的公路桥梁设计规范,系统归纳总结了当前国内外斜拉桥设计方面的实践经验,在内容安排上以斜拉桥桥型的产生、发展及设计理论为基础,以我国目前常用的斜拉桥施工方法为主导,并以工程实例为主线,详细介绍了各类斜拉桥的构思、设计方法与步骤,对斜拉桥动力分析、施工控制等内容也做了较为详细的介绍。附录编辑了国内外斜拉桥基本资料及主要斜拉桥一览表,供设计时参考。

本书主要供桥梁设计人员使用,桥梁科研及大中专院校桥梁方向师生亦可参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

斜拉桥设计/刘士林,王似舜主编. —北京:人民交通出版社,2006.6

ISBN 7-114-06035-1

I.斜... II.①刘...②王... III.斜拉桥-设计
IV.U448.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 059656 号

书 名:斜拉桥设计

著 作 者:刘士林 王似舜

责任编辑:曲 乐

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.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)85285838,85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京凯通印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:36.75

插 页:1

字 数:928 千

版 次:2006 年 11 月 第 1 版

印 次:2006 年 11 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-114-06035-1

定 价:95.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前言

QIAN YAN

世界上第一座现代斜拉桥(瑞典 Stroemsund 桥)1955 年在德国工程师狄辛格的帮助下建成,同年,莱昂哈特设计了杜塞尔多夫跨越莱茵河的北桥(North 桥,1957 年建成)和塞道胡斯(Theodor Heuss 桥)。我国自 1977 年建成重庆云阳桥以来,已建成各种斜拉桥 200 余座,是世界上斜拉桥最多的国家。世界前 50 座跨径最大的斜拉桥中,中国占半数以上。

进入 20 世纪 90 年代以来,斜拉桥结构得到了十分迅速的发展,其跨径已经进入以前悬索桥适用的特大跨径范围内。结构分析的进步对于大跨径斜拉桥的发展起到了关键的推动作用。斜拉桥以其结构受力性能好、跨越能力强、结构造型多姿多彩、抗震能力强及施工方法成熟等特点,在桥梁工程中得到了越来越多的应用。

在大量工程实践的基础上,国内专家、学者不断地总结经验,出版了大量的斜拉桥专著和文献,但缺少较为实用的设计实例和设计手册,使从事桥梁设计工作的技术人员在设计斜拉桥时,在熟悉相关规范的基础上,常常感到缺乏较系统的参考资料;在正确应用斜拉桥基本设计理论及有关桥梁设计软件,尤其是把设计结构计算成果转化为施工图纸等方面存在着各种各样的问题。继桥梁设计丛书——《斜拉桥》出版之后,应广大读者的要求,2002 年由人民交通出版社组织国内知名专家开始本书的编写,并经多次专家会的审查修改,今天终于与广大读者见面了。我们真诚地期望本书的出版能够解决这些问题,并能满足读者的需求。本书的编写对于系统总结我国斜拉桥设计方面所取得的成果,吸收利用国外先进设计理论与技术将起重要作用,也是广大工程设计人员期盼的。

组织出版《斜拉桥设计》,旨在为广大桥梁设计者提供一本全面系统且可供实际操作的技术性工具书。本书的读者对象主要是广大桥梁设计者,兼顾科研人员和大中专院校师生。

本书按最新的公路桥梁设计规范编写,并注意从总体上反映国内设计的先进水平,体现先进性。

本书在编写时注意做到理论与实用兼备,既介绍国内外关于斜拉桥方面新的理论与发展动态,又介绍实际设计过程中总结出的先进经验;同时辅以丰富的实

例,供设计人员使用学习参考,对于监控、施工、养护维修也有一定的参考价值。本书对于诸如桥梁概念设计、景观设计的相关内容也作了相应介绍。

本书从设计角度来阐述施工相关内容及对施工的具体要求,并以此指导施工。

本书在内容安排上以斜拉桥桥型的产生、发展及设计理论为基础,以我国目前常用的斜拉桥施工方法为主导,并以工程实例为主线,详细介绍各类斜拉桥的构思、设计方法与步骤,施工及管理维修。为便于读者对斜拉桥有一全面完整的了解,本书对斜拉桥动力分析、施工控制等做了较为详细的介绍,并编辑了国内外斜拉桥基本资料 and 一览表,供设计参考。

全书共分十二章。其中前言和第一章由中交第一公路勘察设计研究院刘士林编写,主要介绍斜拉桥的发展概况、结构特点、设计主要工作及流程等基本情况;第二章和第三章由中交第一公路勘察设计研究院王似舜编写,主要介绍斜拉桥的结构体系及其选择、总体设计原则及主要内容;第四章由中交第一公路勘察设计研究院冯云成编写,介绍斜拉桥静力计算理论及内力计算方法;第五章由西安瑞通路桥科技有限公司许宏元、牛宏编写,介绍斜拉桥动力特性计算、抗震及抗风设计计算方法;第六章由中交第一公路勘察设计研究院王兴达和长安大学刘健新教授编写,主要介绍斜拉桥拉索类型、主要材料及设计参数、拉索构造及计算方法、拉索减振系统及拉索施工方法;第七章由中交第一公路勘察设计研究院吴永昌编写,主要介绍斜拉桥索塔分类、材料、设计参数、结构分析及主要施工方法;第八章由中交第一公路勘察设计研究院李雅娟、彭志苗编写,介绍斜拉桥主梁分类、主要材料及设计参数、结构分析计算及主要施工方法;第九章由中交第一公路勘察设计研究院冯云成编写,介绍斜拉桥桥面铺装、护栏、排水、伸缩缝及支座等公用构造;第十章由长安大学刘健新、和丕壮教授编写,介绍斜拉桥景观设计的原则和内容;第十一章由重庆交通学院向中富教授编写,介绍斜拉桥维修养护、健康检测、施工及运营控制设计等内容;第十二章为设计实例。其中混凝土斜拉桥和钢斜拉桥分别由中交第一公路勘察设计研究院彭志苗和王兴达编写;钢—混凝土结合梁斜拉桥和钢—混凝土混合梁斜拉桥由中铁大桥勘测设计院有限公司石建华、徐恭义编写;附录为斜拉桥基本资料及主要斜拉桥一览表,由中交第一公路勘察设计研究院梁智涛、倪顺龙编写。全书由刘士林、王似舜统稿并主编,重庆交通大学顾安邦教授及长安大学徐岳、杨炳成教授主审。

本书由中交第一公路勘察设计研究院资助编写,并得到了许多专家的指导和帮助,人民交通出版社韩敏总编辑、沈鸿雁副编审给予了大力支持,在此一并表示感谢。

限于编者水平,资料搜集整理很难全面,不足之处恳请读者批评指正。来函请寄中交第一公路勘察设计研究院。

联系电话:029-88322888(88323113)

作 者

2006年6月

MULU

目录

第一章 概论	1
第一节 斜拉桥发展概况	1
第二节 斜拉桥特点	5
第三节 斜拉桥的分类及适用范围	8
第四节 斜拉桥设计主要工作内容及流程	11
第二章 斜拉桥总体设计	29
第一节 设计原则	29
第二节 结构体系选择	32
第三节 总体布置	36
第四节 施工方法简介	43
第三章 斜拉桥的结构体系	47
第一节 按主梁的受力状态划分体系	47
第二节 按拉索的锚固形式划分体系	51
第三节 按拉索的刚度划分体系	54
第四节 按索塔的数量划分体系	61
第五节 协作体系	67
第四章 斜拉桥静力计算	77
第一节 设计计算理论	77
第二节 静力计算	78
第三节 施工阶段计算	101
第四节 空间分析	107
第五节 空间稳定性分析	113
第五章 斜拉桥动力计算	118
第一节 概述	118
第二节 动力特性计算	119
第三节 抗震设计计算	123
第四节 抗风设计计算	131

第六章 斜拉桥拉索设计	145
第一节 拉索布置.....	145
第二节 主要材料及设计参数.....	149
第三节 斜拉索锚固系统.....	163
第四节 斜拉索构造及计算.....	175
第五节 斜拉索的防护.....	177
第六节 斜拉索的振动及减振.....	180
第七节 施工方法.....	195
第七章 斜拉桥索塔设计	205
第一节 索塔分类.....	205
第二节 主要材料及设计参数.....	208
第三节 混凝土塔.....	209
第四节 钢塔.....	212
第五节 结构分析计算.....	216
第六节 主要施工方法.....	225
第八章 斜拉桥主梁设计	238
第一节 主梁的结构特点及分类.....	238
第二节 主要材料及设计参数.....	239
第三节 主梁截面形式和构造特点.....	241
第四节 结构分析计算.....	267
第五节 主梁主要施工方法.....	289
第九章 附属工程设计	304
第一节 桥面铺装.....	304
第二节 桥梁护栏.....	309
第三节 桥面排水.....	316
第四节 桥梁伸缩缝.....	319
第五节 桥梁支座及限位装置.....	324
第六节 交通工程.....	329
第七节 其他附属设施.....	331
第十章 斜拉桥美学设计	338
第一节 桥梁美学设计基本法则及斜拉桥的美学特征.....	338
第二节 斜拉桥的美学设计.....	342
第三节 斜拉桥的景观设计.....	351
第十一章 斜拉桥工程控制设计	354
第一节 工程控制的必要性.....	354
第二节 工程控制的相关规定.....	356
第三节 工程控制方案设计.....	357
第四节 工程控制内容及方法.....	359
第五节 桥梁工程控制方案设计示例简介.....	371
第六节 常用监测设备、仪器、元件.....	382

第十二章 斜拉桥设计实例..... 392

第一节 混凝土斜拉桥..... 392

第二节 钢斜拉桥..... 428

第三节 钢—混凝土组合梁斜拉桥..... 469

第四节 钢—混凝土混合梁斜拉桥..... 498

附录 A 斜拉桥材料..... 521

附录 B 斜拉桥施工常用机械、设备 533

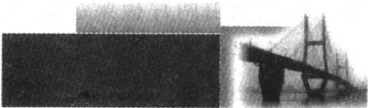
附录 C 国内外主要斜拉桥一览表 535

附录 D 彩图..... 553

参考文献..... 577

第一章

概 论



第一节 斜拉桥发展概况

斜拉桥是一种由塔、梁、索三种基本构件组成的组合桥梁结构体系。很早以前,人们就掌握了从塔架上悬吊斜拉索来支承桥面的知识。

斜拉桥这种桥型在世界范围内应用从 20 世纪 70 年代开始,90 年代迅速发展,其跨径已经进入以前只有悬索桥适用的特大跨径范围。结构分析的进步、高强材料和施工方法以及防腐技术的发展,对于大跨径斜拉桥的发展起到了关键的作用。

斜拉桥跨径记录在 20 世纪 70 年代和 80 年代变化不大,但从 90 年代开始世界记录不断被刷新,见表 1-1。

斜拉桥跨径世界记录 表 1-1

序 号	桥 名	国 家	完 成 年 份	跨 径 (m)
1	Stroemsund 桥	瑞典	1955	182
2	杜塞尔多夫北桥	德国	1957	260
3	科隆 Severin 桥	德国	1959	302
4	杜塞尔多夫 Knie 桥	德国	1969	320
5	Duisbury-Neueukamp 桥	德国	1970	350
6	Saint-Nazaire 桥	法国	1975	404
7	Luna 桥	西班牙	1984	440
8	安娜西斯桥	加拿大	1986	465
9	Skarnsundet 桥	挪威	1991	530

续上表

序 号	桥 名	国 家	完 成 年 份	跨 径 (m)
10	杨浦大桥	中国	1993	602
11	诺曼底桥	法国	1995	856
12	多多罗桥	日本	1998	890
13	香港昂船洲桥	中国	在建	1018
14	苏通大桥	中国	在建	1088

第一座现代斜拉桥是在瑞典建成的 Stroemsund 桥,跨径组成为 $74.7\text{m}+182.0\text{m}+74.7\text{m}$,主梁由两片板梁组成,门形框架塔,拉索呈辐射形布置。

1957 年德国杜塞尔多夫建成的跨越莱茵河的杜塞尔多夫北桥为一钢斜拉桥,其跨径组成为 $108\text{m}+260\text{m}+108\text{m}$,钢主梁高 3.12m ;钢塔高 41m ,横向不设横梁;拉索呈竖琴形布置,索距 36m 。

1959 年德国科隆建成的 Severin 桥,主跨 302m ,"A"形塔,拉索呈放射形布置;桥面为漂浮体系。1962 年委内瑞拉建成的马拉开波桥为第一座混凝土斜拉桥,主跨径 235m ,是带挂孔的悬臂体系,为独塔斜拉桥提供了范例。

随着电子计算机的应用,20 世纪 60 年代开始采用密索(索多而间距小)体系的斜拉桥,从而避免了疏索体系斜拉桥主梁重且配筋多的缺点。1967 年前德意志联邦共和国在波恩建成的弗瑞德里西—埃伯特桥,主跨 280m ,是单索面的密索体系,使得锚固点的集中力减小,且易于悬臂施工,这种构思为其后许多斜拉桥做出了典范。

1969 年德国杜塞尔多夫建成的 Knie 桥,主孔跨径 320m ,无横系梁索塔,拉索竖琴形布置,主孔主梁采用钢结构,边孔为混凝土梁。

法国 1975 年修建的 Saint-Nazaire 桥,跨径组成为 $158\text{m}+404\text{m}+158\text{m}$,主梁采用正交各向异性箱梁桥面;"A"形索塔;拉索呈放射形布置。

西班牙 1984 年修建的 Luna 桥,主跨 440m ,为采用预应力混凝土桥面、双塔双索面扇形布置拉索的混凝土斜拉桥。

1986 年在加拿大温哥华修建的安娜西斯桥,主跨 465m ,为双塔双索面扇形布置的钢—混凝土组合梁斜拉桥。主梁采用两个"I"形钢梁及钢筋混凝土板桥面组成。

挪威 1992 年修建的 Skarnsundet 桥,主跨 530m ,采用预应力混凝土主梁,是当今跨径最大的混凝土斜拉桥。

法国 1995 年修建的诺曼底桥,主跨 856m ,是一座钢—混凝土混合结构斜拉桥,引桥采用混凝土结构而主跨中部则采用正交各向异性钢箱梁。与此设计相似,日本多多罗桥 1998 年把跨径记录提高到 890m 。

诺曼底桥和多多罗桥第一次把斜拉桥带入悬索桥独占的特大跨径领域。但是这种进步并非偶然。我们绝不会忘记德国修建的主要的单塔斜拉桥。1959 年建成的跨径 302m 的科隆 Severin 桥;1969 年建成的跨径 320m 的杜塞尔多夫 Knie 桥;1979 年建成的跨径 368m 的杜塞尔多夫 Flehe 桥,证明了可以修建跨径 $600\sim 700\text{m}$ 双塔斜拉桥。

斜拉桥在我国的发展开始于 1975 年重庆市云阳县跨径 76m 的预应力混凝土斜拉桥。

1982 年在山东省建成济南黄河大桥,其主跨 220m ,为双塔双索面扇形布置拉索的混凝土斜拉桥,采用悬臂现浇混凝土施工工艺。

1991 年上海建成的南浦大桥,主跨 423m,为双塔双索面扇形拉索布置的组合梁斜拉桥。1993 年上海建成的杨浦桥,主跨 602m,为双塔双索面扇形拉索布置的组合梁斜拉桥。主梁采用箱形主梁和工字形横梁以及混凝土桥面板组成的复合式断面;为提供结构抗风能力,采用钻石形索塔。

1997 香港汀九桥为三塔四索面组合梁斜拉桥。跨径组成为 127m+448m+475m+127m。

1998 年建成的广东汕头礮石桥为双塔双索面混合梁桥,主跨 518m。2000 年建成的武汉白沙洲大桥为主跨 618m 的双塔双索面混合梁桥。

2001 年建成通车的南京长江第二大桥南汊桥,主跨达 628m,为双塔双索面扇形布置拉索斜拉桥,主梁采用钢箱断面,环氧沥青桥面铺装。

2000 年建成的湖南岳阳洞庭湖多塔斜拉桥,主桥跨径组成为 130m+2×310m+130m,三塔斜拉桥,主梁采用肋板式断面,飘浮体系,拉索为扇形双斜面索,索塔采用钻石形空心塔。

2002 年建成的湖北荆州市荆沙长江大桥为主跨 500m 的双塔双索面扇形布置拉索的预应力混凝土斜拉桥,主梁采用预应力混凝土肋板结构,主塔为 H 形预应力混凝土结构。

2005 年建成通车的南京长江第三大桥,主桥跨径组成为 63 m +257m+648m+257m+63 m,双塔双索面钢斜拉桥,主梁采用钢箱断面,飘浮体系,索塔采用“人”字形曲线钢塔。

截止到目前,我国已建跨径大于 200m 的各种类型斜拉桥已有 70 余座,跨径超过 400m 的斜拉桥有 30 座,充分表明中国的斜拉桥建设水平已进入世界先进水平。

然而,斜拉桥设计中仍存在值得探讨的地方:如对于中等跨径和大跨径桥梁采用更为柔性的桥面;把介于体外预应力混凝土箱梁和斜拉桥之间的桥梁定义为部分斜拉桥的概念以及多跨斜拉桥的设计;吊拉组合体系和斜拉拱桥组合体系设计等。

至于将来的发展,很清楚,跨径大于诺曼底桥和多多罗桥的更大跨径的斜拉桥(大于 1000m)正在修建。对于如此大跨径(大于 1000m)的斜拉桥工程的设计目前已完成了两项,分别为香港昂船洲大桥(1018m)和苏通大桥(主跨 1088m)。从现今的技术水平看,1700m 或更大跨径的斜拉桥的建设是可行的。

今后斜拉桥的发展趋势主要在如下几个方面。

1. 桥面轻巧化

近年来,斜拉桥在朝拉索造价减少、桥面系重力减小、结构更趋于轻巧和更为柔性的方向发展。对双索面而言,为方便施工宜采用 Π 形断面。当跨径在 500~600m 以下预应力混凝土桥面是经济的(取决于桥位条件,如风效应)。组合梁的概念 1980 年由德国学者莱昂哈特提出,其基本思想是用混凝土桥面板代替造价昂贵的正交异性钢板。杨浦桥即是此类桥梁成功的范例。对于组合梁跨径可达 800m。设计中应充分考虑混凝土板与钢梁之间的徐变、收缩应力重分配,慎重选择徐变系数。混合梁斜拉桥早在 1969 年前德意志联邦共和国 Knie 桥上成功采用,武汉白沙洲大桥、诺曼底大桥和多多罗桥均采用这种构造形式,即中孔(或中孔的一部分)采用钢梁构造,边孔(或加上中孔的一部分)采用混凝土构造。这种桥型适应于特大跨度的斜拉桥。具体设计要慎重研究钢混接头构造和地基沉降问题。正交各向异性箱梁斜拉桥由于其制造质量易于保障,安装方便、快捷,近年来采用较多,如南京长江二桥南汊大桥、安庆长江大桥等。此类桥型适应于特大跨度斜拉桥。

2. 部分斜拉桥

斜拉桥的拉索由于应力变幅相对较大,设计计算中的容许应力仅取钢丝抗拉标准强度的 40%,安全系数为 2.5。而部分斜拉桥(又称矮塔斜拉桥)主梁的高跨比值较一般斜拉桥大,介

于斜拉桥与连续梁之间,这说明部分斜拉桥的整体刚度主要由梁体提供,拉索的刚度仅起加强作用,因而拉索应力变幅较小,设计计算中的容许应力与一般梁体内的预应力索相同,可取钢丝抗拉强度的 60%(即 $0.60f_{pk}$),安全系数为 1.7。

在某些情况下,如设计成预应力混凝土连续梁则梁体截面过大而有些勉强,如设计成正规的斜拉桥则不太经济,此时可考虑采用预应力混凝土连续梁与预应力混凝土斜拉桥之间的过渡形式,即预应力混凝土部分斜拉桥。比较典型的实例是日本木曾川桥。该桥为五跨连续、单索面混合梁部分斜拉桥,跨径组成为 $160\text{m}+3\times 275\text{m}+160\text{m}$,桥面以上塔高仅 30m。另一著名实例是 2001 年建成的中国安徽芜湖长江大桥,此桥为公铁两用桥梁,跨径组成为 $180\text{m}+312\text{m}+180\text{m}$,桥面以上塔高 35m。此桥以强大的双层桥面钢桁梁为主,以部分斜拉的索为辅,成功地解决了杆件内力和挠度过大的问题。

3. 多塔斜拉桥

近来越来越多的采用多塔斜拉桥。早期的此类结构是由 Ricardo Morandi 设计的马拉开波桥。其结构概念很清楚:即一系列具有足够刚度的索塔、预应力混凝土桁架斜拉索悬臂支撑筒支挂梁。此概念仍适用于多跨斜拉桥。因为在斜拉悬臂和筒支悬臂梁间的连接是自由的,而且刚性索塔很容易平衡分布在整跨一侧或另一侧时活载产生的效应。

按照此概念近期又建有一桥即跨越 Rion 和 Antirion 之间的 Patras 海湾大桥。此桥由 GTM-Dumez 设计,四个巨大的近海结构由基础沉箱和桥墩组成,每一桥墩将支撑斜拉悬臂,悬臂间设筒支梁,能有效抵抗剧烈的地震并可适应活动断层可能的移动。

必须提及最近特殊设计的两座桥梁:由 Jose Luis Cancio Martins 设计的澳门桥有两个连续斜拉跨,但中间设置双塔,如同典型的两跨斜拉桥工作;由 Jorg Schlaich 设计的青马桥有三个索塔,中塔的稳定由很长的拉索提供,其一端锚于中塔顶,另一端锚固于边塔的桥面位置处。

后者的处理方式按我们的观点看并不十分简洁,但对于如此长桥,如此大的工程带来的实际问题还没有别的解决方法,即如何有效的建设系列长斜拉桥?

当斜拉桥单跨荷载时,相应的拉索产生重要的拉力变化并把相邻的索塔向荷载处拉,如果索塔的变形较大,锚固于同一索塔和相邻跨径的后拉索产生上举相邻跨径的趋势,因此产生较大的弯矩和相应变形,其方向取决于荷载跨的布置。

显然,我们必须在某处增加刚度;或在桥墩和索塔处,使得弯矩在其间可以传递;或在桥面系中增加刚度。这两种处理方法在已竣工的两项工程中得到验证。

第一项工程是 Millau 高架桥,1989 年至 1993 年建成。初步设计确定为七塔斜拉桥,六个主跨各长 320m,桥梁总长 2500m。在 Rene Walther 咨询后,取消了中间伸缩缝,并决定把桥面连于桥墩上。桥面很高,索塔刚性连接于桥面系。考虑到纵向膨胀与收缩,墩的两端在纵向由两根柱子组成,每柱顶端设线性固定支座,以获得较大柔性。中间主墩 240m 高,刚性连接于桥面系,已经证明其具有足够刚度以保持稳定。为了限制变形和弯矩,桥面高取 5.5m。

1993 年至 1994 年, Jean-Francois Klein, Pierre Moia 和同事们,在跨越日内瓦湖桥上提出采用略有不同的方案:箱梁高度较小,取 3.5m。然而,索塔则更为强大,且与墩完全刚接。基于同样的理由,墩由两个独立柱组成。

4. 塔的发展方向

早期斜拉桥桥塔多采用钢结构,近年来则越来越多地采用混凝土塔结构。倒“Y”形或钻石形塔可使梁体获得较高扭转自振频率以提高其临界颤振风速。大跨径斜拉桥多采用这两种类型索塔。

5. 拉索发展方向

随着桥梁跨径增大,拉索垂度也越大,索刚度随之降低,因此需考虑设置辅助索。拉索防护材料现多采用 PE 材料外包有色 PU 材料防护。近年来已成功采用具有四层防护(环氧涂层、单根钢绞线 HDPE 护套、防腐油或石蜡及其组合物、整根拉索 HDPE 护套)的环氧涂层钢绞线拉索,拉索服务年限增长。真正解决拉索防护问题,需要在设计时考虑换索的可能性。在卡门涡流作用下,特别在风雨交加的情况下,应采用高阻尼材料或工程措施抑制风振和雨振。

6. 结构分析发展方向

在大跨径斜拉桥结构分析中,必须考虑由于初始内力存在所引起的内力增长,从而带来稳定安全度降低的问题。应考虑进行结构非线性分析和模拟施工、安装、运营过程结构仿真分析。

7. 与其他桥型协作产生新体系

斜拉桥与其他桥型结合相互间有许多优势可以互补,是斜拉桥技术又一重要发展领域。斜拉桥与连续梁、连续刚构、拱桥、悬索桥等的协作产生新的桥型,从而可以解决某些特殊的需求。

第二节 斜拉桥特点

一、斜拉桥基本承载构件

斜拉桥是一种由三种基本承载构件,即梁(桥面)、塔和两端分别锚固在塔和梁上的拉索共同承载的结构体系(图 1-1)。为了阐明涉及多领域的斜拉桥,将其桥型的基本承载构件按拉索、主梁和索塔分别加以叙述。实际设计时三者是密不可分的。三种基本承载构件以不同的方式影响总体结构的性能。三部分的不同变化和相互组合,可以构成在力学和美学上各具特点的桥型。

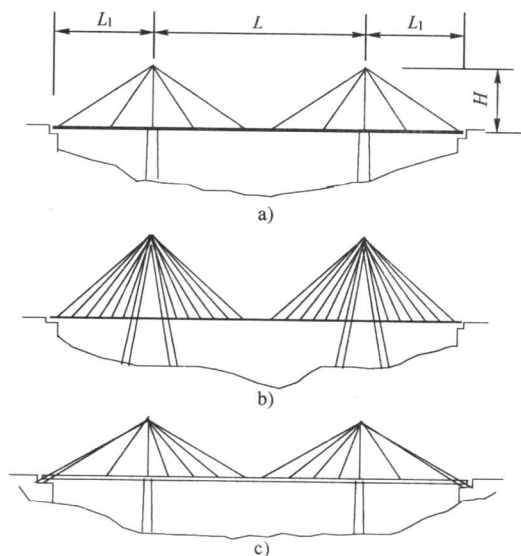


图 1-1 斜拉桥基本承载构件

a) 主梁刚度很大; b) 索塔刚度很大; c) 拉索控制结构稳定

二、斜拉桥设计及施工特点

与其他体系桥梁相比,由于拉索的支承,斜拉桥主梁具有跨越能力大、梁的建筑高度小和借助拉索的预应力对主梁内力进行调整等特点。从斜拉桥构成特点知,其主梁、拉索、索塔及纵横联结系共同受力,形成一空间结构体系。同时斜拉桥是高次超静定结构,须利用电子计算机进行结构分析和结构计算。

(一)一般结构分析

对于中、小跨径斜拉桥,可将其整个结构视为弹性平面框架进行结构分析。其中钢束弹性模量按 Earnst 公式取有效弹性模量。对于较大跨径斜拉桥,由于构件变形较大,采用微小变形的一次理论和叠加原理已不够精确,需采用有限变形理论进行结构分析,以考虑结构的非线性特性。梁、塔的非线性来自结构变形,拉索的非线性影响主要来自拉索的垂度。一般来说,非线性影响使得梁、塔、索内力均有所增大。如从天津永和桥(主跨 260m)设计中进行的线性和非线性分析的结果看,非线性影响使索力增大 1%~2%,轴力增大 2%~5%,弯矩增大 5%~10%;又如从南京长江第二大桥南汊斜拉桥(主跨 628m)计算结果看,非线性影响使梁、塔恒载弯矩增大均小于 5%,塔顶水平位移增幅较大,达到了 15%。为提高设计和施工精度,有必要进行非线性分析。

(二)空气动力及抗震分析

1. 动力特性计算

要确定斜拉桥的自振特性,包括振型和频率计算,计算方法、模型和计算模态可按《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01—2004)进行。

2. 空气动力稳定分析

斜拉桥一般具有良好的刚度,扭转与竖向弯曲频率之比较大。一般应先估算临界风速,临界风速应不小于设计风速的 1.2 倍。否则应采取提高结构空气动力稳定措施,如增加塔梁刚度、改善截面外形,拉索采用螺旋或条形凸纹,设置阻尼器等措施,提高临界风速。斜拉桥的颤振、驰振临界风速应按《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01—2004)计算,并根据颤振安全等级确定是否进行风洞试验。

3. 抗震分析

采用我国抗震规范的有关规定进行。在地震分析中应注意纵横向地震力的叠加。

(三)收缩及徐变分析

混凝土收缩、徐变对斜拉桥这种高次超静定结构会产生很大的影响,在设计时应予以考虑。为计算收缩、徐变内力随时间重分布,可将钢和混凝土分解为独立的杆单元,用收缩、徐变程序进行分析。例如分析组合梁时可将钢梁和混凝土桥面视为两个不同编号的杆件,二者之间用刚度无穷大的杆件连接,这样就可算出收缩、徐变随时间变化的内力。分阶段施工时,混凝土龄期的差别,对收缩、徐变内力也是有影响的。混凝土徐变计算按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)附录进行。

(四)稳定分析

在方案设计和初步设计阶段,可采用常规的稳定分析方法分别考虑主塔和主梁的面内稳定和面外稳定;在技术设计和施工图设计阶段,应根据不同的桥型结构和不同的工况状态,考虑整体稳定和局部稳定。

斜拉桥稳定分析中,应计入斜拉索垂度的影响,用空间有限元法进行分析。结构体系第一类稳定,即弹性屈曲的结构稳定安全系数应不小于4,第二类稳定,即计入几何非线性与材料非线性影响的稳定安全系数应大于2.5。

(五)疲劳验算

钢结构斜拉桥均应进行疲劳应力验算,可按《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》(JTJ 025—86)及《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)进行。

(六)桥面板联合应力及锚固区应力分析

在横断面上,由总体计算的弯矩按桥规有效宽度规定计算,可以算出应力沿横向变化值,而车辆局部荷载的应力也沿横向变化,二者峰值正好错开,应在同一点上叠加,取叠加后最大值作为控制值,再选择最不利应力组合与最不利的收缩、徐变应力叠加,得出断面最不利的应力值。

锚固区应力宜采用有限单元法进行分析。如果是十分关键部位,可考虑做模型试验(如南京长江第二大桥南汊桥进行的耳板式索梁锚固模型试验及索塔上塔柱模型施工工艺试验等)或光弹分析检验。

(七)施工阶段计算

在斜拉桥的实际施工过程中,由于各种结构参数不可避免地与设计值存在差异,加上施工荷载等因素的不确定性,导致施工产生结构内力和变位结果必然与设计预期存在偏差,这类偏差如不进行调整,则不仅会影响到成桥后桥梁的运营效果,而且会危及施工中结构的安全。施工控制的目的是确保斜拉桥施工的安全、快捷并尽量使成桥后的结构内力、线形与设计预期相符合。施工控制分析可采用卡尔曼滤波法、最小二乘误差控制法、无应力状态控制法等实用控制方法。这些方法的实质都是基于对施工反馈数据的误差分析,通过计算和施工手段对结构的目标状态和施工的实施状态进行控制调整,达到合理的成桥状态。

1. 施工阶段的划分及计算

根据所采用的施工顺序,计算简图应与施工阶段的划分一致,结构在施工阶段应计算斜拉索索力、结构内力、截面应力、支座反力、水平位移、竖向位移、转角,必要时应考虑非线性影响。

2. 体系转换计算

斜拉桥施工过程中的临时支座(墩)安装和拆卸、悬臂施工挂篮和合龙施工挂篮的安装和拆卸、临时斜拉索转为永久斜拉索、满堂支架施工斜拉索的初张拉等,均应进行体系转换计算。

3. 合龙施工计算

包括边跨和中跨合龙,应考虑合龙温度效应计算和合龙施工荷载效应计算。

4. 不平衡荷载计算

斜拉桥施工过程中应考虑悬臂施工的不平衡荷载作用。不平衡荷载主要包括斜拉桥主梁悬臂两端施工不同步产生的不平衡自重、主梁悬臂施工两端临时施工荷载不同、混凝土主梁两端模板成型大小不同产生的不平衡自重、不平衡索力作用产生的效应以及主梁悬臂施工过程中一端挂篮脱落等。

5. 施工阶段的抗风验算

索塔浇筑完成,施工模板尚未拆卸,应对该状态按结构受风力作用进行静力验算。

6. 临时墩计算

在斜拉桥施工过程中,需要增强结构抗风能力时,可在边跨或中跨不影响通航的范围内设置临时墩。临时墩按常规计算方法,且参与施工过程中的全部计算,按拉压杆件计算。在有漂

浮物的河流,应考虑漂浮物的撞击计算。

(八)预拱度分析

预拱度值按结构自重力和 $1/2$ 活荷载频遇值计算的长期挠度值之和采用。主梁为混凝土或预应力混凝土的斜拉桥,永久作用挠度应考虑斜拉索松弛及混凝土收缩徐变产生的竖向挠度的影响。主梁混凝土收缩、徐变计算时间为合龙成桥后不少于《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)的规定时间。主梁为结合梁的,预拱度计算的永久作用挠度为斜拉索松弛及混凝土收缩徐变产生的竖向挠度之和。桥面板为现浇混凝土时,桥面板混凝土收缩徐变计算时间为不少于三年;桥面板为预制混凝土时,桥面板混凝土收缩徐变计算时间可为三年。主梁为钢箱梁的,预拱度计算的永久作用挠度为斜拉索松弛值。主梁为复合梁的,按不同的主梁材料分别考虑边、中跨的预拱度。

(九)斜拉桥施工特点

经过 20 多年的发展,目前中国斜拉桥的施工技术已日趋成熟且越来越完善。

1. 主梁施工

主梁除钢主梁和组合梁采用工厂加工制造,现场起吊拼装形成外,预应力混凝土主梁大多采用挂篮现浇或支架现浇,少数也有采用预制拼装法完成。挂篮悬浇法由于其造价较低,且主梁线形易于控制采用较为广泛。在我国,挂篮悬浇从后支点发展到前支点(也称“牵索式挂篮”),从小节距发展到大节距,从轻型发展到超轻型,从节段施工周期 15 天发展到最快 4 天。牵索式挂篮的采用提高了挂篮承载能力,施工速度加快。

2. 索塔及索塔基础施工

目前中国斜拉桥索塔无论采用 H 形、倒 Y 形,还是钻石形,均采用钢筋混凝土结构。钢筋混凝土索塔的形成,主要取决于支架与模板工艺。近年来大多采用简易支架或无支架施工法。索塔施工模板相继出现了滑模、提模、翻模及爬模工艺。其中爬模造价较低,浇筑节段高可达 $6\sim 9\text{m}$,施工速度快,外观较光滑。

斜拉桥因其跨径较大使得主塔墩基础竖向荷载相应较大,基础工程相对较大。索塔基础一般采用桩基础、钢围堰、沉井或围堰加桩基础。

3. 拉索施工

(1)拉索的加工。拉索一般采用热挤 PE 防护法在工厂或现场加工。拉索锚头有热铸与冷铸两种,大多采用冷铸锚头。拉索大多系整束集中防护、张拉,但也有个别采用平行钢绞线分束防护与张拉。

(2)斜拉索的张挂、牵引与张拉。随着斜拉桥跨径增大,拉索长度和重量也随之增大,其张挂、牵引及张拉的力度与难度随之增大,一般采用放盘法自下而上牵引到位或采用整盘吊装上梁然后牵引上塔。

第三节 斜拉桥的分类及适用范围

一、斜拉桥的分类

由于斜拉桥的基本构件特征和结构形式的不同,演变出了形形色色的斜拉桥桥型。

(1)按主梁的受力状态可分为飘浮体系、支承体系、塔梁固结体系和刚构体系(详见第二章)。飘浮体系为塔墩固结,塔梁分离,主梁除两端有支承外,其余全部为拉索悬吊的多跨弹性

支承的单跨梁(如上海杨浦大桥、重庆长江二桥);支承体系即塔墩固结、塔梁分离。主梁在墩、塔处均设有支座,为具有多点弹性支承的三跨连续梁。对所有墩上支座均不约束纵向位移的称为半飘浮体系(如广州珠江黄埔大桥);塔梁固结体系即塔梁固结并支承在墩上,梁的内力和挠度同主梁与塔柱的弯曲刚度比值有关。这种体系的连续梁支座至少有一个为纵向固定(如法国的勃鲁东那桥、上海的浏港桥);刚构体系为梁塔墩互为固结,形成跨度内具有多点弹性支承的刚构(如广州海印桥)。另外还有边跨斜拉索锚固在地锚上的地锚体系(如湖北鄖阳汉江桥)和在斜拉桥主跨跨中设置挂孔(如四川三台涪江桥)或剪力铰(西班牙 Luna 桥)形成的“T”构体系。

(2)按主梁材料分类有钢斜拉桥,如广州珠江黄埔大桥,即主梁与桥面均为钢结构的斜拉桥;混凝土斜拉桥,如宿淮高速公路五河口大桥,主梁为混凝土或预应力混凝土的斜拉桥;结合梁斜拉桥,如上海南浦大桥,主梁为钢结构,桥面为混凝土结构,主梁与桥面组合共同承载的斜拉桥;混合梁斜拉桥,如武汉白沙洲长江大桥,边跨的一部分或全部采用混凝土梁,主梁的大部分或全部采用钢梁或组合梁;钢管混凝土斜拉桥,如广东南海紫洞大桥等。

(3)按索的特征分类有双索面(如德国 Severin 桥)、单索面(如德国 North Eibe 桥);稀索体系(如委内瑞拉 Maracaibo 桥)、密索体系(如美国 P-K 桥)以及无背索体系(如西班牙 Alamilo 桥)。

(4)按拉索的锚固体系分有自锚(如五河口斜拉桥)、地锚(如鄖阳汉江大桥)、部分地锚(如日本松山桥,一端自锚、一端地锚)。

(5)按塔数分有独塔(如广州珠江黄埔大桥)、双塔(如宿淮高速公路五河口大桥)、三塔(如湖南岳阳洞庭湖大桥)、四塔(如希腊 Rion-Antirion 桥)、五塔(如日本梶斐川桥)、六塔(如委内瑞拉 Maracaibo 桥)和七塔(如法国 Millau 桥)等。

(6)按塔形分有门形、独柱形、钻石形、A 形、H 形、倒 V 形、倒 Y 形等,还有斜塔(如澳大利亚 Batman 桥)、矮塔(如日本木曾川桥)、折线形塔(如荷兰 Erasmus 桥)、曲线形塔(如中国南京长江三桥、墨西哥 Coatzacoalcas 桥)等多种类型。

(7)按塔的材料分有混凝土索塔、钢索塔(如南京长江第三大桥采用曲线形钢索塔)。

(8)按组合体系分有由斜拉桥与其他桥型组合产生的一些混合体系桥型,如吊拉组合体系桥(贵州乌江大桥)、斜拉板桥(瑞士 Ganter 桥)、斜拉拱桥(马来西亚 Putrajaya 桥)等。

二、斜拉桥的适用范围

各种体系的斜拉桥由于各自优缺点不同,其适用范围有所不同。飘浮体系主要优点是两跨布载时,塔柱处主梁无负弯矩峰值,温度及收缩徐变内力较小,变形和内力变化平缓;地震时允许全梁纵向摆动,成为长周期运动,从而吸震消能。缺点是悬臂施工时塔柱处主梁需临时固结,以抵抗施工中不平衡弯矩和纵向剪力(如美国的 Pasco-Kennewick 桥和我国的天津永和桥、上海杨浦大桥等),因而飘浮体系适用于跨度较大、索距较密或有抗震要求的地区修建的斜拉桥。支承体系的主梁在塔墩上设置支承,为具有多点弹性支承的三跨连续梁。优点是较经济美观,缺点是两跨布载时,塔柱处主梁有负弯矩尖峰,温度、收缩及徐变内力较大。设有固定支座的支承体系仅适用于跨度较小的斜拉桥。半飘浮体系基本同漂浮体系,但在所有墩、塔处,梁下均设纵向滑动支座,在经济和减小纵向漂移方面有一定好处,属支承体系的一种,也是目前采用最多的一种结构体系(如主跨 383m 的广州珠江黄埔大桥);塔梁固结体系特点是塔