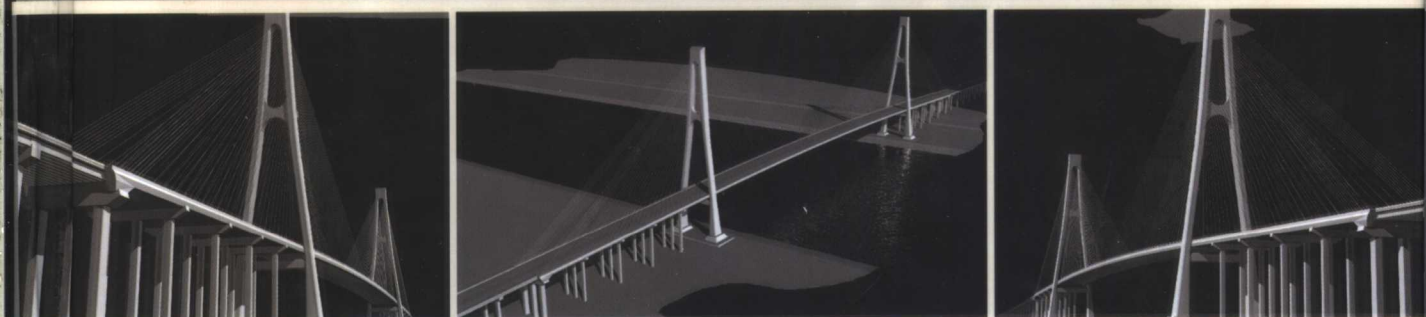


Cable-stayed Bridge Handbook



斜拉桥手册



人民交通出版社

China Communications Press

周孟波

刘自明

主 编

王邦楣

副主编

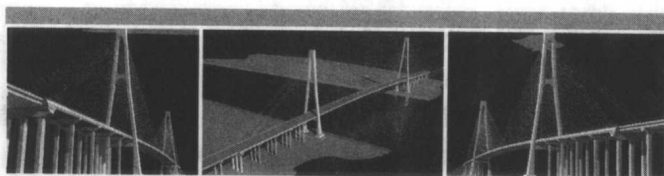
华北水利水电学院图书馆



209125338

U448.27-62
Z780

Cable-stayed Bridge Handbook



斜拉桥手册

周孟波 主编
刘自明 王邦楣 副主编



人民交通出版社
China Communications Press

912533

内 容 提 要

近 20 余年来,中国现代斜拉桥得到快速发展,已居世界领先水平。本书作者根据近些年来参加我国数座大跨径斜拉桥建设工程的实践经验,在其于 1992 年所编著出版的《斜拉桥》一书的基础上作了大量的增删与订正工作,删除了许多过时陈旧的内容,补充了近年来斜拉桥建设中的新技术、新工艺、新发展与新成就,写成了本书。

本书共 7 章,分别介绍了斜拉桥概论、斜拉桥结构、斜拉桥的计算分析、斜拉桥的设计与施工、斜拉桥试验、斜拉桥的管理养护与维修、斜拉桥实例等内容。

本书具有如下特点:

1. 取材新颖、素材丰富;内容涵盖斜拉桥的理论、设计、计算、施工、检测及养护维修等各方面。
 2. 资料翔实、插图众多;书后还附有大量国内外知名斜拉桥概况表、桥式图集。
 3. 内容实用、针对性强:本书几乎涉及到当今世界上所有知名的斜拉桥,具有很强的指导性和实用性。
- 本书可供桥梁设计、施工、科研人员,以及大专院校相关专业师生参考学习。

图书在版编目 (C I P) 数据

斜拉桥手册/周孟波主编. —北京:人民交通出版社,
2004.3
ISBN 7-114-04994-3

I. 斜… II. 周… III. 斜拉桥-桥梁工程-手册
IV. U448.27-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 017747 号

斜拉桥手册

周孟波 主编

刘自明 王邦楣 副主编

责任校对:张莹 责任印制:张恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010-64216602)

各地新华书店经销

北京交通印务实业公司印刷

开本:787×1092 1/16 印张:48 字数:1201 千字

2004 年 3 月 第 1 版

2004 年 3 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0 001—4 000 册 定价:76.00 元

ISBN 7-114-04994-3

斜拉桥手册

编委会

主 编：周孟波

副 主 编：刘自明 王邦楣

编写组成员：周孟波 刘自明 王邦楣 陈开利 林亚超

出版说明

近年来,我国桥梁建设取得了日新月异的发展。桥梁工程技术人员在取得巨大成绩的同时,也面临着一系列的建设技术难点、问题,如:跨江、跨海的大跨度桥梁设计与施工技术,斜拉桥、悬索桥建设技术,桥梁深水基础的关键技术等。而且,大量已建、新建桥梁在运营中必将面临着一系列的维修、养护、加固等技术问题。

由此,人民交通出版社特邀请中铁大桥局桥梁科学研究院有限公司(原中铁大桥局桥梁科学研究院)组织编写了一套开放式的《现代桥梁建设丛书》。本套丛书得到了该院历届领导的大力支持,同时,也得到了其上级单位——中铁大桥局集团的高度重视。本套丛书的编写人员,都是长期从事桥梁建设工作的专家学者。尤其值得一提的是,这些专家都是现在或者曾经在桥科院工作。他们将多年来积累的宝贵的设计、施工、检测、养护、维修经验,都尽数体现在本套丛书中,希望能给广大桥梁建设技术人员提供帮助。

其中,《悬索桥手册》、《斜拉桥手册》提供了大量翔实、可靠、新颖的资料、内容实用、针对性强,可以作为桥梁工程建设技术人员的案头工具书。《桥梁深水基础》、《大跨度桥梁设计与施工技术(2002)》提供了切实、有效的设计、施工方法、可操作性强,同时提供了大量建设实例,供读者对照使用。《桥梁工程检测手册》、《桥梁工程养护与维修手册》、《桥梁工程鉴定与加固手册》提供了丰富的数据供查阅,同时还有针对性很强的操作方法、注意事项,是成桥运营管理中重要的技术参考工具书。

本套丛书的编写人员现仍奋战在我国桥梁建设的各条战线上,他们将在工程实践中积累的宝贵经验,视情况择机修订本套丛书。希望广大读者提供建议或意见,以使本套丛书日臻完善,更好地服务于桥梁工程技术人员。

附:《现代桥梁建设丛书》书目

- | | | |
|-------------------------|-----------|---------|
| 1. 《大跨度桥梁设计与施工技术(2002)》 | 中铁大桥局集团主编 | 35.00 元 |
| 2. 《桥梁深水基础》 | 刘自明 主编 | 68.00 元 |
| 3. 《悬索桥手册》 | 周孟波 主编 | 76.00 元 |
| 4. 《斜拉桥手册》 | 周孟波 主编 | 76.00 元 |
| 5. 《桥梁工程检测手册》 | 刘自明 主编 | 78.00 元 |
| 6. 《桥梁工程养护与维修手册》 | 刘自明 主编 | (待出版) |
| 7. 《桥梁工程鉴定与加固手册》 | 陈开利 主编 | (待出版) |

人民交通出版社

2004 年 3 月 1 日

前言

QIANYAN

斜拉桥的构思,可追溯到 17 世纪。但受当时科学技术水平的限制,很长一段时间内没有获得发展,以至于到第二次世界大战后德国重新采用前,斜拉桥几乎被工程师们遗忘。

由于有限单元法等新的结构分析方法和电算技术的发展、模型试验技术水平的提高、高强优质新型钢材的出现、混凝土及预应力技术的飞跃进步等,才使斜拉桥在近 40 余年间获得很大的发展。

从 1956 年德国建成比歇瑙尔桥算起,至今国外建成的斜拉桥已近 300 座。其中,日本有 90 余座,占 30%;德国有近 30 座,占 10%;美国有近 25 座,占 8.3%。目前,在世界范围内,已建成的跨度超过 800m 的斜拉桥只有两座,大多数是在 250m 至 600 多 m 间。超过 800m 的,一座是日本 1999 年建成的多多罗大桥,其跨度组成为 $270 + 890 + 320$ m,主梁采用扁钢箱,箱高 2.7m,行车道宽 20m,它是迄今为止世界上主跨最大的斜拉桥;另一座是法国 1994 年建成的诺曼底桥,桥梁全长 2 141m,南北引桥长度分别为 547.75m 与 737.50m;跨越塞纳河的主孔跨度为 856m,这是一座混合梁斜拉桥,仅主孔中部 624m 采用高为 3.0m 的扁钢箱梁,其余皆为混凝土梁。

我国斜拉桥起步比国外约晚 20 年。1975 年建成的四川云阳桥,主跨仅 75.84m。而 2001 年建成的南京长江二桥,主跨已达 628m;其跨度组成为 $58.5 + 246.5 + 628.0 + 246.5 + 58.5$ m;主梁为高 3.5m 的钢箱梁,梁全宽 38.2m。截止到目前,我国已建成跨径大于 200m 的各类斜拉桥近 50 座,跨径超过 400m 的斜拉桥已有 18 座。在建的江苏苏州至南通的苏通长江大桥,其跨江部分为 7 跨连续钢箱梁斜拉桥,主跨达 1 088m,预计 2007 年建成。而计划中的上海崇明越江通道南港主孔斜拉桥方案,其主跨为 1 200m。所有这些均表明,经过 20 余年的追赶,我国斜拉桥建设终于达到国际领先水平。

1992 年 2 月,科学技术文献出版社出版了我们铁道部大桥工程局桥梁科学研究所编著的《斜拉桥》一书。近些年来,我们参加了祖国几座大跨度斜拉桥的建设实践,对其有了进一步认识。现在撰写的《斜拉桥手册》是以原书为基础,但对原书作了大量删增和订正,删除了一些过时陈旧的内容,增写了近 10 年来国内外斜拉桥的新成就。其中第六章斜拉桥的管理养护与维修就是原书中没有的。

本书共计 7 章。第一章为斜拉桥概论,介绍斜拉桥的发展,并作了展望。第二章讲述

了斜拉桥结构,分别对桥塔、主梁、斜拉索及各部件间的比例等作了论述。第三章为斜拉桥的计算分析,讲述了设计构思与计算方法,对斜拉桥静力与动力作了分析,并介绍了有关软件,引入了计算分析实例。第四章为斜拉桥的设计与施工,分别对各类斜拉桥的有关内容作了讲述。第五章为斜拉桥试验,对有关的模型试验、风洞试验、抗震试验、斜缆疲劳和防护试验、施工监控、成桥检定等分别作了论述。第六章为斜拉桥的管理养护与维修,根据有关规范、标准的要求,结合斜拉桥的特点,对斜拉桥的养护维修提出了明确的要求,做出了可行的规定。第七章为斜拉桥实例,介绍了国内外有名的各类斜拉桥 49 座。附录中列举了国内外斜拉桥概况及桥式图集,书后提供了大量参考文献,可一并供读者阅读参考。

限于编著者水平,本书内容如有错误和不妥之处,恳请读者指正。

人民交通出版社的领导和编辑人员为本书的出版给予了热忱关怀,付出了辛勤劳动,谨此致谢。

作 者

2004 年元月于武汉

目 录

第一章 斜拉桥概论	1
第一节 斜拉桥的发展	1
一、概述	1
二、斜拉桥发展的原因	1
三、斜拉桥与悬索桥的比较和协调	2
四、发展概况	7
第二节 斜拉桥的动向与展望	10
一、斜拉桥的动向.....	10
二、今后展望.....	12
第二章 斜拉桥结构	26
第一节 主体结构	27
一、桥塔.....	27
二、主梁.....	31
三、斜拉索.....	37
第二节 各部构件间比例和其他结构	45
一、斜拉桥各部构件间的比例.....	45
二、其他结构.....	49
第三章 斜拉桥的计算分析	60
第一节 设计构思与计算方法	60
一、设计构思.....	60
二、计算方法.....	69
第二节 斜拉桥静力分析	77
一、平面杆件有限元分析斜拉桥.....	77
二、斜拉桥的活载内力计算.....	84
三、斜拉桥的恒载内力计算.....	88

四、温度变化在斜拉桥中产生的内力	93
五、混凝土收缩徐变二次内力计算	94
第三节 斜拉桥动力分析	95
一、竖向振动自振频率计算分析	96
二、横向振动(扭转振动)自振频率计算分析	104
三、斜拉桥振型分析	111
四、临界风速计算	112
第四节 斜拉桥计算分析的其他和软件	114
一、斜拉桥非线性分析	115
二、斜拉桥空间分析	117
三、斜拉桥局部分析	117
四、斜拉桥稳定分析	118
五、斜拉桥仿真分析	118
六、斜拉桥计算分析软件	120
第五节 斜拉桥计算分析实例	123
一、荆州长江大桥非线性仿真分析——成桥状态静力分析	123
二、武汉白沙洲桥抗震抗风分析	127
三、鄂黄长江公路大桥塔索锚固区局部应力分析	133
四、重庆大佛寺长江大桥稳定分析	137

第四章 斜拉桥的设计与施工 142

第一节 设计与施工概要	142
一、一般原则	142
二、钢斜拉桥	143
三、混凝土斜拉桥	145
四、几点讨论	148
五、钢斜拉桥设计与施工实例	155
六、混凝土斜拉桥设计与施工实例	167
第二节 结合梁斜拉桥和混合梁斜拉桥	176
一、结合梁斜拉桥	177
二、结合梁斜拉桥的特点	178
三、结合梁斜拉桥设计与施工实例	181
四、混合梁斜拉桥	193
五、混合梁斜拉桥的特点	194
六、混合梁斜拉桥设计与施工实例	196
第三节 铁路和公铁两用斜拉桥	208
一、关于铁路和公铁两用斜拉桥的列车荷载和行驶性能	208
二、预应力混凝土斜拉板(杆)铁路斜拉桥	215
三、预应力混凝土主梁柔性索铁路或公铁两用斜拉桥	223

四、钢主梁或钢混凝土结合主梁的铁路或公铁两用斜拉桥	226
五、铁路斜拉桥设计与施工实例	233
六、公铁两用斜拉桥设计与施工实例	252
第四节 特殊形式斜拉桥	274
一、玻璃钢人行斜拉桥	274
二、S形曲线斜拉桥	278
三、转体施工斜塔斜拉桥	282
四、无背索斜塔斜拉桥	285
五、主跨装配式稀索体系斜拉桥	290
六、全焊空间桁架斜拉桥	294
七、并列组合斜拉桥	298
八、多塔单索面连续混合梁斜拉桥	302
九、悬吊斜拉桥	308
第五节 斜拉桥施工机械设备	315
一、索塔施工机械设备	315
二、主梁施工机械设备	324
三、斜拉索安装及设备	335
 第五章 斜拉桥试验	344
第一节 模型试验	344
一、整体模型试验	344
二、节段模型试验	352
三、光弹模型试验	361
第二节 风洞试验	363
一、斜拉桥风振	364
二、斜拉桥抗风考虑	365
三、风洞模型试验	368
第三节 抗震试验	376
一、斜拉桥在地震中的动力特性	377
二、斜拉桥抗震设计考虑	378
三、抗震试验	380
第四节 斜缆疲劳和防护试验	385
一、斜缆疲劳试验	385
二、斜缆防护试验	397
第五节 施工控制测试	402
一、施工控制测试的内容和方法	402
二、施工控制测试实例	408
第六节 静动载试验	416
一、铁路斜拉桥静动载试验	416

二、公路斜拉桥静动载试验	428
第六章 斜拉桥的管理养护与维修	441
第一节 斜拉桥管理养护的原则和内容	441
一、斜拉桥管理养护的原则	441
二、斜拉桥日常管理和经常检查	445
三、斜拉桥定期检查和特殊检查	449
第二节 斜拉桥技术状况检测、评定与承载力检定	457
一、斜拉桥技术状况检测	457
二、斜拉桥技术状况评定	459
三、斜拉桥承载力检定	462
第三节 斜拉桥的养护维修工作	465
一、斜拉桥主要结构经常检查与养护	466
二、混凝土结构常见缺陷修补处理维修	473
三、斜拉索及锚固处检查维修	489
四、斜拉桥防腐周期及易损件的更换维修	493
五、养护维修工作所需的设备仪器	496
六、斜拉桥换索工程	498
第七章 斜拉桥实例	505
第一节 国内斜拉桥例	505
一、南京长江二桥	505
二、武汉白沙洲桥	510
三、青州闽江桥	519
四、上海杨浦大桥	523
五、汕头岩石大桥	525
六、荆州长江公路大桥	529
七、鄂黄长江公路大桥	533
八、武汉军山大桥	538
九、香港汀九桥	542
十、重庆大佛寺长江大桥	550
十一、铜陵长江公路大桥	556
十二、润扬长江公路大桥北汊桥	559
十三、武汉长江二桥	563
十四、宜昌市夷陵长江大桥	565
十五、珠海淇澳大桥	568
十六、天津塘沽海河大桥	570
十七、红水河铁路斜拉桥	573

十八、芜湖长江大桥	575
十九、香港汲水门大桥	577
二十、安庆长江公路大桥	581
二十一、杭州湾大桥方案	584
二十二、南京长江第三大桥初步设计	586
二十三、苏通大桥主航道斜拉桥方案	593
二十四、上海崇明越江通道工程比较线全桥方案	602
二十五、伶仃西航道斜拉桥方案	607
二十六、昂船洲大桥斜拉桥方案	611
第二节 国外斜拉桥例	617
一、日本多多罗大桥	617
二、法国诺曼底桥	620
三、日本名港中大桥	629
四、挪威斯卡恩圣特桥	631
五、日本鹤见航道桥	633
六、日本生口桥	637
七、丹麦瑞典厄勒海峡桥	640
八、日本东神户航道桥	642
九、韩国四海大桥	646
十、加拿大安那西斯桥	648
十一、加尔各答胡格利河二桥	650
十二、泰国湄南河桥	652
十三、西班牙卢纳桥	654
十四、瑞典乌德瓦拉桥	657
十五、法国圣·纳泽尔桥	660
十六、苏伊士运河桥	661
十七、美国达姆岬桥	665
十八、悉尼格莱贝岛桥	668
十九、南斯拉夫萨瓦河桥	669
二十、基辅第聂伯河桥	675
二十一、波萨达斯—恩卡纳西翁桥	676
二十二、日本柜石岛·岩黑岛桥	678
二十三、白令海峡桥方案	682
附录一 国外斜拉桥概况表	686
附录二 国内斜拉桥概况表	694
附录三 斜拉桥桥式图集	697
参考文献	746

第一章

斜拉桥概论

第一节 斜拉桥的发展

一、概述

斜拉桥型虽然很早就有,但近 40 余年才得到广为应用。这是因为 18 世纪初期,有几座这种形式的桥垮了,加之法国工程师纳维(Navier)调查事故原因后,得出悬索桥的形式较为理想的结论,致使斜拉桥形式长期得不到采用。

1938 年德国的迪辛格尔(F·Dischinger)对斜拉桥开始作新的研究,1949 年发表了他的研究成果,这对德国及世界都有所触动。

斜拉桥能很快发展的主要原因:

- (1)超静定结构理论分析的发展。
- (2)钢桥面板的发展。
- (3)钢筋混凝土预应力梁的发展。
- (4)钢索材料、制造、锚固方式和各种防腐工艺的发展。
- (5)模型试验和电子计算机计算技术的发展。

以上技术的发展,证明斜拉桥在许多方面比悬索桥优越。首先,斜拉桥型在刚性、经济性及架设方面都比悬索桥优越;其次,斜拉桥的最大优点是不需要像悬索桥那样笨重的钢索锚固装置;另外,为了获得长大桥良好的抗风稳定性,斜拉桥的主梁采用扁平断面,这种断面结构减震能力相当高,所以在抗风稳定性方面比悬索桥优越;最后,斜拉桥可以用钢索来抵抗主梁的扭转振动,而悬索桥必须以加劲梁抵抗扭矩,这也是悬索桥的不及之处。

二、斜拉桥发展的原因

斜拉桥发展的原因可综合如下:

(1)考虑挠曲影响的超静定结构计算理论发展很快。这种理论便于电子计算机计算。当其用于斜拉桥时不仅能正确进行结构设计计算,还能精确作出施工控制计算。

(2)考虑共同作用的轻型结构的发展。以前的桥面结构是在纵梁上铺设桥面板,而纵梁由联结于主梁的横梁支承着。因为是假定纵梁和横梁各自独立起作用,所以就必须有一个或两

个纵向联结系以承受横向力。这种上部结构形式对斜拉桥是不合适的。1936年德国采用正交异性板作为主梁的上翼缘和桥面系,但当时还未解决焊接的翘曲问题,后来由于焊接技术的进步,最主要的是自动焊接的进步,使正交异性板获得了成功。经过长期研究之后,现在正交异性板的设计计算及制造方法都达到了相当高的水平,给钢斜拉桥的发展创造了条件。这是因为正交异性板不但能作为主梁及横梁的上翼缘,而且能作为承受风力的横向杆件。这种使用正交异性板的桥梁比以往具有纵向联结系的结构具有更高的横向刚性。即使对长大的斜拉桥,为了平衡钢索的水平分力,也不需要额外增加钢料。

(3)上部结构是连续的。斜拉桥的上部结构在塔及跨中多是连续的。正因如此,即使地质条件不好,也可以采用斜拉桥这种连续梁结构。

(4)高强度钢索和高疲劳强度锚具的发展。斜拉桥的刚度主要决定于斜向钢索的刚度,而自由悬挂的钢索的端部位移,不但受钢索断面及钢索弹性模量的影响,还受垂度的影响。而考虑垂度的钢索的刚度与钢索应力的三次方成比例,所以斜拉桥的钢索必须使用高强度钢材。另一方面,斜拉桥由活荷载产生的应力变化比悬索桥大,由此看来发展具有高疲劳强度的锚具对斜拉桥是很必要的。

(5)模型试验技术的发展。由于斜拉桥是超静定次数较高的结构,且某些部位(如斜拉索的锚固区等)应力分布又较复杂,所以常常依靠各种静、动模型试验来探求其设计参数和验证设计的安全性,根据静力模型试验研究桥梁结构构件的大应力传递;根据动力模型试验和风洞试验摸索其动力特性及抗地震、抗风振的能力;根据疲劳试验,研究构件和锚固系统的疲劳强度;根据光弹模型试验决定锚固区的应力分布。

(6)新结构形式的发展。斜拉桥最早发展于德国,而且以钢斜拉桥为主。钢斜拉桥上部结构的恒载最轻,而上部结构的恒载对斜拉桥总的造价是比较敏感的,因为它会影响斜拉索、索塔及基础的截面尺寸。但上部结构的恒载对其本身的造价不一定有很大的影响,除非跨度特别大。因为由于钢结构恒载较轻,所能节省的造价很容易被其他一些因素抵消,这些因素对上部钢结构是不利的。因而在继后发展的法国、西班牙、意大利、瑞士、美国、南美和我国都倾向于修建混凝土斜拉桥。所以,在世界范围内,混凝土斜拉桥要比钢斜拉桥晚一步。但从发展的观点看,混凝土斜拉桥的最大跨度还是要比钢斜拉桥小,所以就又发展了钢与混凝土同时采用的结合梁斜拉桥和混合梁斜拉桥等新型结构,日本和欧洲一些国家在这方面作了大量工作。继之,我国在斜拉桥新结构方面也作了发展。

三、斜拉桥与悬索桥的比较和协调

国外,对近代悬索桥及斜拉桥进行了比较。结果表明,在很多方面斜拉桥比悬索桥优越。莱翁哈特(Leonhardt. F.)和蔡尔奈尔(Zellner. W.)曾在“关于跨度大于600m的悬索桥和斜拉桥的对比”(《国际桥协论文集》第32卷,1972年)一文中指出:就刚度讲,悬索桥比斜拉桥差;就缆索用钢量讲,悬索桥用量也较多。

一般来说,斜拉桥的优点如下:

(1)斜拉桥的活载挠度比悬索桥小。当由于集中荷载引起的挠度均在容许值范围时,斜拉桥主梁所需的变曲刚度可以比悬索桥小。

(2)假定塔高度相同时,斜拉桥的钢索重量比悬索桥小30%~50%。

(3)对于钢斜拉桥来说,由于钢索拉力的水平分力所引起的主梁钢重的增加,虽然对于跨

度为 300m 以上的斜拉桥是有影响的。但即使跨度在 1 400m 以上,随着钢重增加而增加的费用,比悬索桥的钢索锚固费还要便宜。这是因为钢桥面板是由最小板厚所决定的,它对承受活荷载弯矩是有富余的,因此,它还可以承受轴向力。

(4) 不论用何种方法架设斜拉桥都比悬索桥方便,节省费用。

(5) 斜拉桥属于高次超静定结构,其结构的刚度好,只要有一个较好的主梁断面,就可以得到较好的抗风稳定性。还因为有斜缆索的斜拉桥,尤其是密索体系斜拉桥,索能很快干扰主梁的振动,以使整个超静定结构减震,防止危险振动的形成。而悬索桥则较容易形成大振幅的共振状态,因此,斜拉桥的主梁不需要很大的抗扭刚度。

斜拉桥有一些明显的优点,这是肯定的。但是,斜拉桥与悬索桥相比,哪一种优点多,应该是由一定的前提条件来决定的,不能一概而论。从现有各式桥的跨度纪录看,斜拉桥目前已达到 890m;1998 年日本建成的明石海峡桥又达 1 990m。而悬索桥早在 1931 年就已经达到 1 067m(美国的华盛顿桥),1985 年英国建成的恒比尔桥已达到 1 410m。此外,有人认为,在特大跨度范围内,就材料用量讲,悬索桥的梁和塔要比斜拉桥的梁和塔节省得多。虽然悬索桥的主缆耗钢量多,但因主缆是由高强度钢丝所制成的受拉件,容许应力高,截面应力均匀,其承载的效率也就比那由结构钢所制成的梁和塔为高。这样,悬索桥用的料也不一定比斜拉桥多。故何种桥型用料较省,还需定量分析。下面将对斜拉桥和悬索桥跨越效率的比较及斜拉桥和悬索桥的竞争和协调两个方面作以简介。其目的在于:虽然本书是向读者介绍斜拉桥,但并不一味地想否定悬索桥。而且今后发展方向也显示:两种桥型的协作体系极具发展潜力。

(一) 斜拉桥和悬索桥跨越效率的比较

斜拉桥和悬索桥两种桥型在跨越效率方面的比较,就是在跨越距离已定的前提下比较何种桥型用料最省。为简单化,假定仅桥面主跨受均布荷载,主梁截面的局部弯曲刚度相同且不受锚具的影响,同时,忽略气动弹性耦合效应、非线性动力影响等因素。

1. 结构效率(材料用量)分析

1) 悬索桥

悬索桥主缆形状是抛物线形,其几何尺寸见图 1-1。其中, h 为桥塔位于桥面以上的高度, q 为荷载集度, s 为吊杆的水平间距。显然,每根吊杆作用 F 主缆的拉力 $T_v = sq$, 见图 1-2。

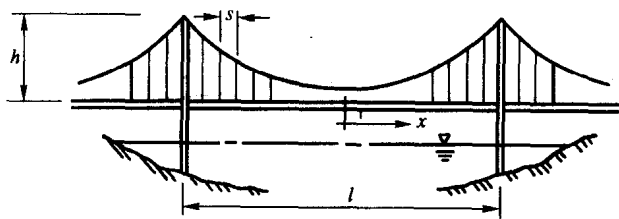


图 1-1 悬索桥简化几何构形图

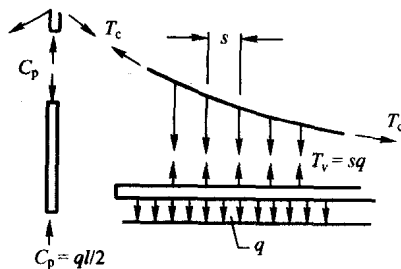


图 1-2 悬索桥主梁受均布荷载的图示

考虑主缆和桥面围线的面积承受集度为 q 的荷载,则吊杆的用钢量为

$$V_y = \frac{1}{3} \times \frac{hl \times q}{\sigma_t} \quad (1-1)$$

式中: σ_t ——钢的抗拉强度。

主缆的水平力分量为 $ql^2/(8h)$, 在距离跨中 x 处, 主缆所受拉力为:

$$T_c(x) = \frac{ql^2}{8h} \left[1 + \left(\frac{8hx}{l^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1-2)$$

则主缆的用钢量为:

$$\begin{aligned} V_c &= \int_{-l/2}^{l/2} A(x) ds = \int_{-l/2}^{l/2} [T_c(x)/\sigma_t] ds \\ &= \frac{ql^3}{8h\sigma_t} \left[1 + \frac{16}{3} (h/l)^2 \right] \end{aligned} \quad (1-3)$$

对悬索桥的桥塔, 只考虑桥面以上部分 (因桥面以下部分相同)。设桥塔抗压强度为 σ_c , 则桥塔用钢量为:

$$V_P = 2 \times \frac{C_P}{\sigma_c} \times h = \frac{qlh}{\sigma_c} \quad (1-4)$$

式中: $C_P = ql/2$ ——中跨荷载对桥塔产生的压力作用。

因此, 悬索桥的主要用钢量为:

$$V_{su} = \frac{qhl}{\sigma_t} \left\{ \frac{1}{3} + \left[\frac{2}{3} + \frac{1}{8} \left(\frac{l}{h} \right)^2 \right] + \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \right\} \quad (1-5)$$

2) 斜拉桥

斜拉桥的简化几何构形见图 1-3, 其受力分析图见图 1-4。

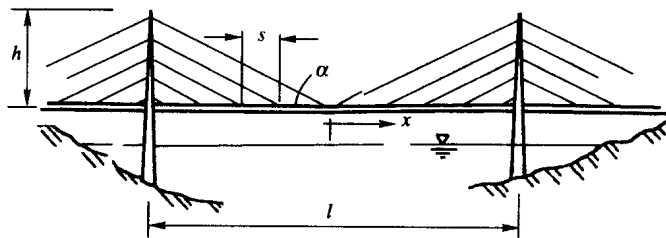


图 1-3 斜拉桥简化几何构形图

由受力分析图可以看出, 每根斜拉索中拉力为 $T_i = qs/\sin\alpha$ 。因此, 拉索的用钢量为:

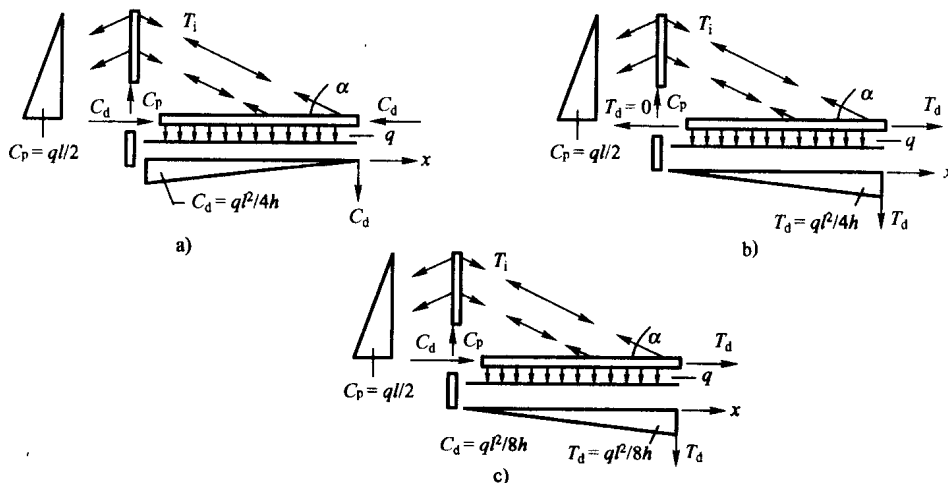


图 1-4 斜拉桥主梁受垂直均布荷载和各种纵向力的图示

a) 水平向受压时; b) 水平向受拉时; c) 水平向受拉、压混合时

$$V_i = \frac{1}{2}(hl) \times \frac{q}{\sigma_t \sin^2 \alpha} \quad (1-6)$$

斜拉桥的主梁用钢量分析不同于悬索桥的是斜拉索产生了水平分力。图 1-4a)的分析方法假定压力在桥塔处为最大值 $c_d = ql^2/4h$ 。该方法的优点是桥梁中跨和边跨呈自平衡体系,不需要考虑外部水平力的作用,但该方法的缺点是涉及到屈曲问题;图 1-4b)则假设主梁受拉力作用,该方法的优点是不考虑屈曲问题,但缺点是在边跨支承外端需考虑大小为 $ql^2/4h$ 的外部作用力问题;比较折衷的方法是采用图 1-4c)的分析模式,虽然该图式在边跨支承处仍有 $ql^2/8h$ 的水平分力,但该力与悬索桥主缆所要求的类似。因此,同样不考虑这部分水平拉力所导致的材料用量,主梁用钢量可表示为:

$$\text{拉力部分:} \quad T_d = \frac{ql^2}{8h} \left(1 - 4 \frac{x}{l}\right), 0 < |x| < \frac{l}{4} \quad (1-7)$$

$$\text{压力部分:} \quad C_d = \frac{ql^2}{8h} \left(4 \frac{x}{l} - 1\right), \frac{l}{4} < |x| < \frac{l}{2} \quad (1-8)$$

$$\text{总用钢量:} \quad V_d = \frac{ql^2}{32h} \left(\frac{1}{\sigma_t} + \frac{1}{\sigma_c}\right) \quad (1-9)$$

$$\text{桥塔的用钢量:} \quad V_P = 2 \times \frac{ql}{4\sigma_c} h = \frac{qlh}{2\sigma_c} \quad (1-10)$$

则,斜拉桥的主要用钢量为:

$$V_{st} = \frac{qhl}{\sigma_t} \left[\frac{1}{2\sin^2 \alpha} + \frac{1}{32} \left(\frac{l}{h}\right)^2 \left(1 + \frac{\sigma_t}{\sigma_c}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_c}\right) \right] \quad (1-11)$$

2. 效率比较

通过以上分析,可知悬索桥和斜拉桥的主要用钢量可由式(1-5)和式(1-11)分别得出。

假设 $\sigma_c/\sigma_t = 2/3$, 则有:

$$V_{su} = \frac{qhl}{\sigma_t} \left[\frac{5}{2} + \frac{1}{8} \left(\frac{l}{h}\right)^2 \right] \quad (1-12)$$

$$\begin{aligned} V_{st} &= \frac{qhl}{\sigma_t} \left[\frac{1}{2\sin^2 \alpha} + \frac{3}{4} + \frac{5}{64} \left(\frac{l}{h}\right)^2 \right] \\ &= \frac{qhl}{\sigma_t} \left[\frac{5}{4} + \frac{13}{64} \left(\frac{l}{h}\right)^2 \right] \end{aligned} \quad (1-13)$$

令 $l/h = x$, 有:

$$\frac{V_{su}}{V_{st}} = 1 + \frac{80 - 5x^2}{80 + 13x^2} \quad (1-14)$$

显然, $x = l/h < 4$ 时,斜拉桥用钢量少;而 $l/h > 4$ 时,悬索桥用钢量较少。

另一方面,有:

$$\left[\frac{V_{su}\sigma_t}{ql^2} \right]_{\min} = 1.118, \quad \text{当 } h = 0.2236l \quad (1-15)$$

$$\left[\frac{V_{st}\sigma_t}{ql^2} \right]_{\min} = 1.008, \quad \text{当 } h = 0.4031l \quad (1-16)$$

并可绘出斜拉桥和悬索桥跨越效率比较曲线,见图 1-5。

以上分析表明:若桥塔高度无限制,斜拉桥用钢量较少,且塔高 $h = 0.4031l$ 时跨越效率最高;如果塔高被限制不超过 $0.25l$,则悬索桥用钢量较省,且塔高 $h = 0.2236l$ 时跨越效率最高。