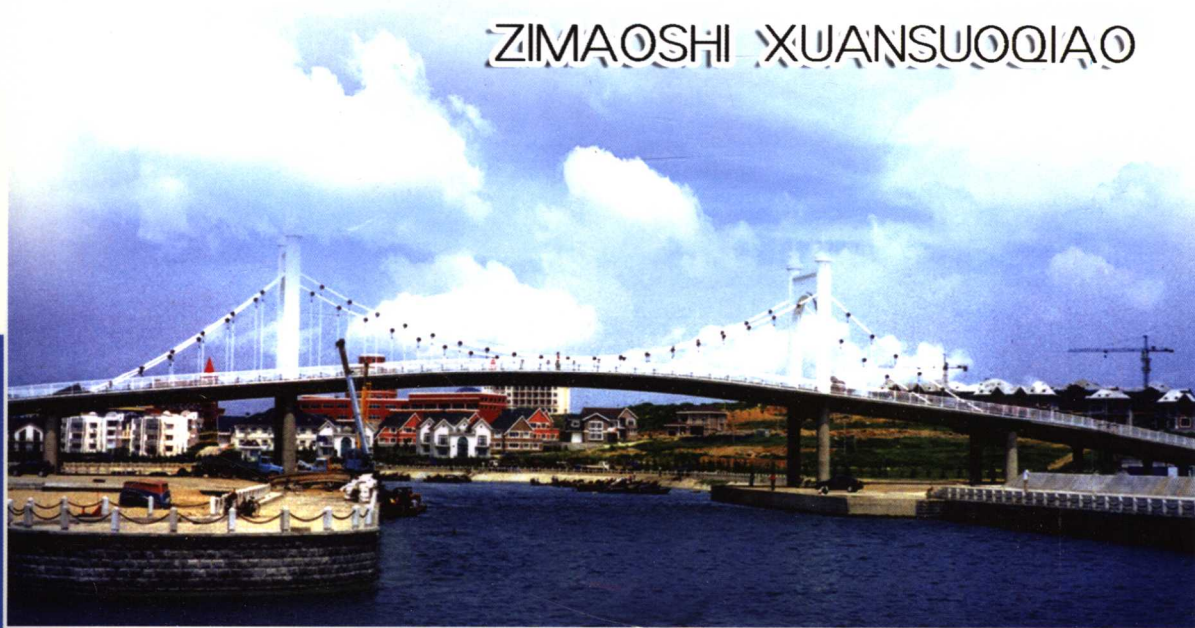


混凝土 自锚式悬索桥

HUNNINGTU

张哲著

ZIMAOSHI XUANSUOQIAO



人民交通出版社

China Communications Press

U448.25

5

混凝土 自锚式悬索桥

张哲 著



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书共分7章。第一章为绪论,主要探讨自锚式悬索桥的发展过程和主要特点,对迄今为止国内外所出现的各种自锚式悬索桥分别进行了阐述;第二章利用广义大位移变分原理分析了自锚式悬索桥的挠度理论和自由振动理论;第三、四章分别对混凝土自锚式悬索桥的静力行为和动力行为进行了论述;第五章着重对混凝土自锚式悬索桥的施工控制进行了深入地研究和分析;第六章的主要内容是将作者这几年所主持设计和施工监控的几座实桥进行了一些简单论述;最后一章则专门对模型试验进行了细致地阐述和探讨。

本书可供高校教师和研究生及桥梁设计、施工与管理部门的工程师们参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土自锚式悬索桥 / 张哲著. —北京: 人民交通出版社, 2005.10

ISBN 7-114-05811-X

I. 混… II. 张… III. 混凝土结构—悬索桥—桥梁工程 IV.U448.25

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第120077号

书 名: 混凝土自锚式悬索桥

著 作 者: 张 哲

责任编辑: 张征宇

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: 北京宝莲鸿图科技有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 11.75

字 数: 286 千

版 次: 2005年11月 第1版

印 次: 2005年11月 第1次印刷

书 号: ISBN7-114-05811-X

印 数: 0001~3000册

定 价: 24.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

自锚式悬索桥的特点是将主缆锚于梁的端部,省略了桥两端的二个或四个庞大的锚碇,从而可节省大量资金,同时还利于在地质条件恶劣、不适合于修建重力式锚碇的地方采用。国外在 20 世纪已经开始修建自锚式悬索桥,我国在 21 世纪之初也开始修建。国外修建者皆用钢梁。我国建成的几座较小跨径的自锚式悬索桥,也都采用钢梁。由于锚固于梁两端的主缆的庞大水平分力对梁体施加了很大的压力,对长于受拉却短于受压的材料——钢来说显然是不利的。大连理工大学张哲教授提出了混凝土自锚式悬索桥的概念,它使主缆水平分力变成对混凝土梁有利的免费预应力,而且混凝土梁的造价比钢梁低,因而可进一步节省投资。这种桥型和混凝土斜拉桥一样,由于比钢梁受力更合理,造价更经济,因而在我国及其他一些发展中国家更宜于推广采用。从 1998 年开始,张哲教授带领他的研究组就着手对这种新桥型的设计理论和施工控制进行了全面、深入的研究,取得了丰硕的成果,同时设计修建和施工监控了 5 座混凝土自锚式悬索桥,使这些理论成果在实际生产中得到了验证。去年夏季辽宁省抚顺市建成的主跨 160m 的抚顺万新大桥就是其中的一个卓越的实例。

自锚式悬索桥由于在缆端部锚固力介入了梁体的受力和变形因而整个桥体结构的静力和动力特性较之一般常规悬索桥有所不同而且更为复杂。国内外对这种桥型结构的详细分析研究甚为少见,张哲教授研究组的研究成果填补了国内外在这一方面的空白。现在把这些成果整理出版,将对推广这种新型桥梁起着很好的促进作用。

自锚式悬索桥一般需先在支架上建成主梁,然后才能安装缆索,因而要多花一些临时支架的费用。但由于它具有悬索桥的优美外形而无需修建两端庞大而昂贵的锚碇,因此在许多情况下通过技术、经济、景观的综合比较,它们仍有强大的竞争力。国内桥梁界选用这种桥型者越来越多,相信在其设计理论和施工方法等方面会越来越发展和丰富。

王伯惠

2005.8.25

混凝土自锚式悬索桥是指加劲梁由混凝土材料制造的自锚式悬索桥。由于主缆锚固在加劲梁两端,由主缆产生的水平力给混凝土加劲梁施加了预压力,使得混凝土加劲梁基本不需额外的配置预应力筋便可达到全预应力梁的效果,因而采用混凝土加劲梁制造的自锚式悬索桥经济且受力合理。

1998年江苏省徐州市欲在市区黄河故道上用较少的投资修建悬索桥,徐州市建委领导走访了多所高校和设计院寻求合适的悬索桥设计方案,作者当时拟出了混凝土自锚式悬索桥的方案,很好地满足了工程要求。2000年在大连市金湾桥的设计中作者提出了混凝土自锚式悬索桥的方案,也得到专家认同。自锚式悬索桥保留了传统的悬索桥桥型,以其优美的线条、错落有致的外形受到人们的喜爱,但由于本身结构的复杂性,国内外对其研究的资料和成果很少,特别是混凝土自锚式悬索桥的研究领域更是空白,作者所负责的大连理工大学桥梁工程研究所带领数名博士和硕士经过几年的科学研究与工程实践,独立研究设计了大连市金湾桥、抚顺市万新大桥、吉林兰旗松花江大桥等3座混凝土自锚式混凝土悬索桥,另外还承担了浙江金华康济桥、浙江江山北关大桥等几座自锚式悬索桥的施工监控工作。同济大学在设计宁波庆丰桥和湖南省交通规划勘察设计院在设计佛山平胜大桥时聘请了作者作为顾问参与了上述两座桥的设计咨询。几年来,作者在自锚式悬索桥尤其是混凝土自锚式悬索桥设计、施工监控、模型试验、成桥检测等方面都有一定的积累,其中有4名博士的论文研究内容均是混凝土自锚式悬索桥方面的。

鉴于国内自锚式悬索桥的发展情况,为了更加系统地介绍和推广这种桥型,作者认为,出版相关专著尤为重要,编写本书的动机也来源于此。

本书共分7章。第一章为绪论,主要探讨自锚式悬索桥的发展过程和主要特点,对迄今为止国内外所出现的各种自锚式悬索桥分别进行了阐述;第二章利用广义大位移变分原理分析了自锚式悬索桥的挠度理论和自由振动理论;第三、四章分别对混凝土自锚式悬索桥的静力行为和动力行为进行了论述;第五章着重对混凝土自锚式悬索桥的施工控制进行了深入地研究和分析;第六章的主要内容是将作者这几年所主持设计和施工监控的几座实桥进行了一些简单论述;最后一章则专门对模型试验进行了细致地阐述和探讨。

书中部分章节是以我的几位非常有才华的博士生邱文亮、石磊、刘春城、檀永刚的博士论文的有关内容为初稿改写而成的,特别是石磊博士协助作者进行了相关的资料收集及整理工作,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,编写时间仓促,加之本书编著尚属首次尝试,错漏和谬误在所难免,恳切希望读者提出宝贵意见。

•第一章 绪论•	1
第一节 自锚式悬索桥的发展概况	1
第二节 国外典型钢自锚式悬索桥	3
第三节 混凝土自锚式悬索桥的提出与发展概况	4
第四节 自锚式悬索桥的主要结构形式	5
第五节 自锚式悬索桥的主要构造及功能	5
第六节 自锚式悬索桥的特点及结论	6
第七节 混凝土自锚式悬索桥设计理论尚需解决的问题	8
参考文献	8
•第二章 混凝土自锚式悬索桥的设计理论分析•	10
第一节 悬索桥分析理论综述	10
第二节 混凝土自锚式悬索桥静力分析的挠度理论分析	12
第三节 混凝土自锚式悬索桥的自由振动理论分析	19
第四节 自锚式悬索桥非线性有限元分析方法	28
参考文献	36
•第三章 混凝土自锚式悬索桥的静力行为分析•	38
第一节 自锚式悬索桥的极限跨度分析	38
第二节 混凝土自锚式悬索桥极限承载力分析	47
第三节 自锚式悬索桥力学性能分析	57
第四节 自锚式悬索桥的随机静力分析	60
参考文献	63
•第四章 混凝土自锚式悬索桥动力行为研究•	64
第一节 混凝土自锚式悬索桥动力特性分析	64
第二节 结构参数变化对自锚式悬索桥动力特性的影响研究	67
第三节 混凝土自锚式悬索桥地震反应的时程分析法	70
第四节 混凝土自锚式悬索桥地震反应分析的反应谱法	79
第五节 多点激励混凝土自锚式悬索桥随机地震响应分析	89

参考文献	108
·第五章 自锚式悬索桥施工控制分析·	110
第一节 自锚式悬索桥施工控制中的力学特性	110
第二节 混凝土自锚式悬索桥施工控制的目标、内容和方法	113
第三节 主缆线形控制	118
第四节 吊杆张拉前的施工控制分析	127
第五节 吊索张拉过程计算与控制研究	130
第六节 施工中的误差调整	145
第七节 小结	150
参考文献	151
·第六章 混凝土自锚式悬索桥的实桥设计及应用·	153
第一节 大连市金湾桥	153
第二节 抚顺市万新大桥	157
第三节 吉林兰旗松花江大桥	161
第四节 浙江金华康济桥	162
第五节 浙江江山北关大桥	165
第六节 总结	167
参考文献	167
·第七章 自锚式悬索桥的模型试验研究·	168
第一节 模型试验目的以及模型设计和制作	168
第二节 施工过程模拟试验	169
第三节 模型静载试验	172
第四节 模型动载试验	175
第五节 分析及结论	178
参考文献	179

绪 论

第一节 自锚式悬索桥的发展概况

悬索桥是跨越能力最强的桥型之一。传统的悬索桥一般跨度较大,其主要承重构件主缆都锚固在锚碇上,当跨度逐渐减小时,主缆锚固占全桥总造价的比例将不断加大,这样在某种情况下,传统的悬索桥的工程造价相应于其他形式的桥梁要高得多。如果将主缆直接锚固在加劲梁上,这样就取消了庞大的锚碇,从而变成了自锚式悬索桥,这为不方便建造锚碇的地方修建悬索桥提供了一种解决方法。自锚式悬索桥作为一种特殊的桥型,以其结构造型美观,经济性能好,对地形和地质状况适应性强等优点,越来越受到工程界的青睐,成为城市市区中小跨径桥梁极具竞争力的桥型,目前在国内外已有多座自锚式悬索桥建成。

19 世纪后半叶,奥地利工程师约瑟夫·朗金和美国的工程师查理斯·本德分别独立地构思出自锚式悬索桥的造型。本德在 1867 年申请了专利,朗金则于 1870 年在波兰建造了世界上首座小型铁路自锚式悬索桥。

到 20 世纪,自锚式悬索桥已经在德国兴起。1915 年,德国设计师在科隆的莱茵河上建造了第一座大型自锚式悬索桥——科隆-迪兹桥,当时主要是受地质条件的限制而使工程师们选择了这种桥型。这座桥主跨 185m,用木脚手架支撑钢梁直到主缆就位。虽然科隆-迪兹桥在 1945 年被毁,但原桥台上的钢箱梁仍保存至今。此后宾夕法尼亚的匹兹堡跨越阿勒格尼河的三座桥和在日本东京修建的清洲桥都受科隆-迪兹桥的影响。匹兹堡的三座悬索桥比科隆桥的跨径要短,但施工技术比科隆桥有了很大的进步。德国莱茵河上科隆-迪兹桥建成后的 25 年间又修建了 4 座悬索桥,最著名的是 1929 年建成的科隆-米尔海姆桥,主跨 315m。虽然该桥在 1945 年被毁,但它至今仍然保持着自锚式悬索桥的跨径记录。相继于 1990 年建成的日本此花大桥、1999 年建成的韩国永宗大桥,其跨度为 300m(如图 1-1,图 1-2,图 1-3 所示)。即



图 1-1 科隆-迪兹桥

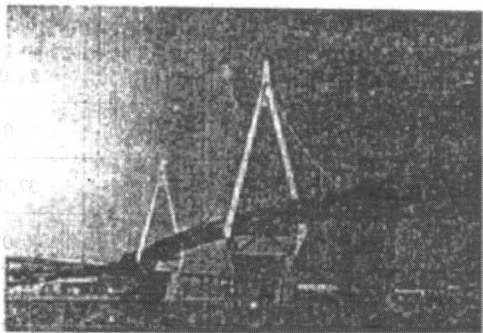


图 1-2 日本此花大桥

将建成的美国旧金山－奥克兰海湾新桥跨度为 385m;我国国内在建的佛山市平胜大桥跨度为 350m、长沙三汊矶湘江大桥跨度为 328m。上述自锚式悬索桥都是采用钢加劲梁做主梁(如表 1-1 所示)。

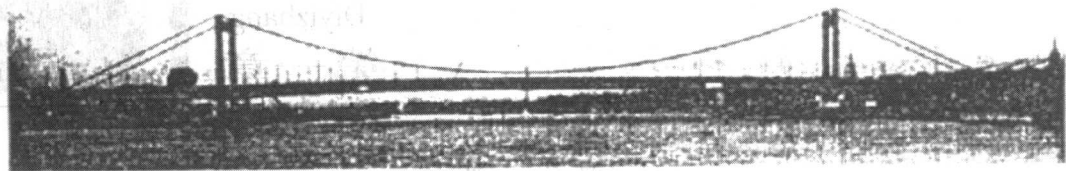


图 1-3 科隆－米尔海姆桥
部分已建和在建的自锚式悬索桥

表 1-1

名 称	地点	长 度(m)	矢跨比	主梁材料	建成年代
科隆－迪兹桥	德国	92.3 + 184.5 + 92.3	1:8.6	钢	1915
第七街桥	美国	67.5 + 134.8 + 67.5	1:8.1	钢	1926
清洲桥	日本	45.8 + 91.5 + 45.8	1:7.1	钢	1928
科隆－米尔海姆桥	德国	91.0 + 315.0 + 91.0	1:9.1	钢	1929
此花大桥	日本	120.0 + 300.0 + 120.0	1:6.0	钢	1990
永宗桥	韩国	125.0 + 300.0 + 125.0	1:5.0	钢	1999
丽泽桥	中国	25.0 + 70.0 + 25.0		钢	2001
苏州索山大桥	中国	33.0 + 90.0 + 33.0		钢	2003
吴淞江自锚式悬索桥	中国	25.0 + 70.0 + 25.0		钢	2005
天津西河桥	中国	58.0 + 115.0 + 58.0		钢	2004
长沙三汊矶湘江大桥	中国	132.0 + 328.0 + 132.0		钢	建造中
Sorok 岛桥	韩国	110.0 + 250.0 + 110.0	1:5.0	钢	建造中
旧金山－奥克兰海湾新桥	美国	385.0 + 180.0		钢	建造中
金华康济桥	中国	33.0 + 100.0 + 33.0		钢混叠合梁	2004
佛山平胜大桥	中国	5 × 40.0 + 30.0 + 350.0 + 30.0 + 29.6		钢混叠合梁	建造中
金石滩金湾桥	中国	24.0 + 60.0 + 24.0		混凝土	2002
抚顺新湖大桥	中国	70.0 + 160.0 + 70.0	1:6.0	混凝土	2004
永康溪心大桥	中国	37.0 + 90.0 + 37.0	1:6.0	混凝土	2005
北关大桥	中国	40.0 + 118.0 + 40.0	1:7.0	混凝土	2005
布尔哈通河局子街桥	中国	71.5 + 160.0 + 71.5	1:7.0	混凝土	建造中

第二节 国外典型钢自锚式悬索桥

1. 日本此花大桥

日本此花大桥建成于 1990 年,又名北港联络桥,如图 1-4 所示,是 1945 年以来修建的第一座自锚式公路悬索桥,也是世界上惟一的一座英国式自锚式悬索桥。该桥跨径布置为 120m + 300m + 120m,主梁为单箱三室钢箱梁,宽度 26.5m,梁高 3.17m,高跨比 1:95,矢跨比为 1:6,比一般悬索桥的矢跨比要大,这样可以减小主梁的轴力。该桥还是第一座单索面大跨径自锚式悬索桥,吊索做成倾斜状,桥塔为花瓶形。

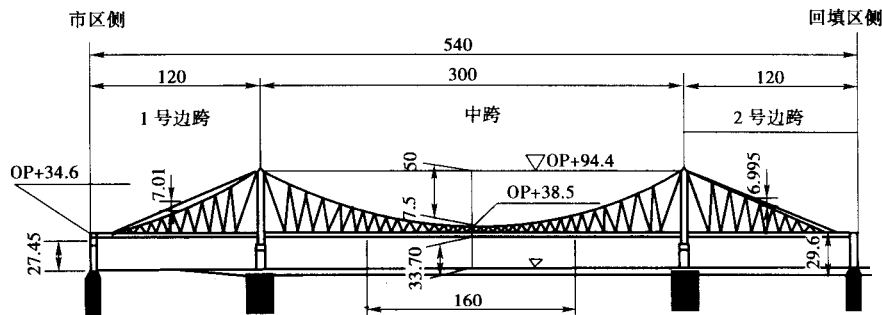


图 1-4 日本此花大桥(单位:m)

2. 韩国永宗大桥

韩国永宗大桥(图 1-5)位于韩国汉城仁川国际机场通往汉城区的高速公路上,是世界上第一座双层行车的公铁两用自锚式悬索桥,其结构造型和尺寸都与此花大桥很相似,但永宗大桥和此花大桥有 3 个主要不同点:①为了减小加劲梁中主缆产生的轴向力,主缆的垂度加大到 60m,矢跨比为 1:5;②永宗大桥采用 2 根主缆,从塔顶到加劲梁跨中呈空间三维曲线,加大了桥梁的横向稳定性;③加劲梁为 7m 高的桁架,上层为公路,下层为铁路,在没有主缆的情况下容易施工。

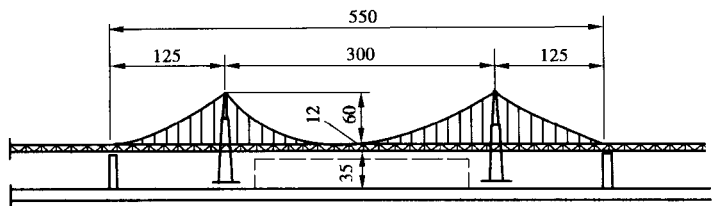


图 1-5 韩国的永宗大桥(单位:m)

3. 美国旧金山-奥克兰海湾新桥

原旧金山-奥克兰海湾桥东桥(钢桁架桥)在 1989 年由于里氏 7.1 级地震导致局部坍塌,因此决定重建。重建计划中包括 2 座自锚式悬索桥,一座单塔自锚式悬索桥(见图 1-6)和一座 3 跨双塔自锚式悬索桥。主航道处为单塔自锚式悬索桥,塔高 160m,由 4 根钢箱柱组成,沿高

度方向用剪力杆连接,主缆不跨越而是固定在单一的索鞍上,跨径为 $385\text{m} + 180\text{m}$,加劲梁为两个各向异性钢箱,横隔板间距 5m ,箱梁间用宽 10m 、高 2.5m 、间距 30m 的横梁连接,保证两箱在荷载,特别是风和地震荷载时的整体作用。该桥考虑 1500 年回归期的地震,建成后,将成为世界上跨径最大的自锚式悬索桥。

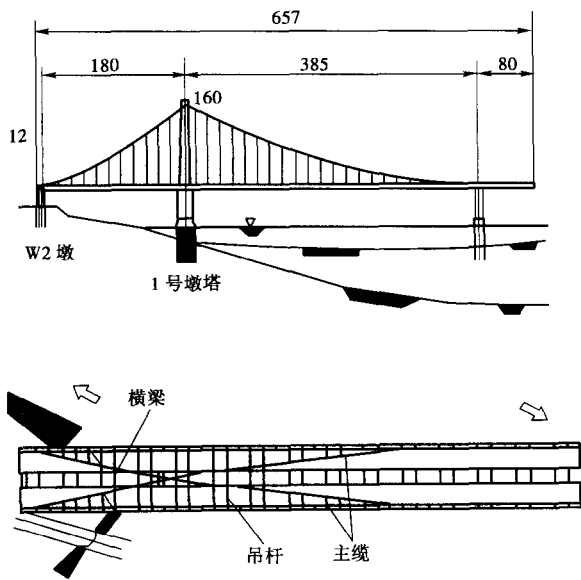


图 1-6 美国旧金山-奥克兰海湾新桥(单位:m)

4. 其他自锚式悬索桥

Sorok 岛桥是韩国 Geogeum 岛连接本土的桥梁,跨径布置为 $110\text{m} + 250\text{m} + 110\text{m}$,矢跨比为 1:5,塔为花瓶型,采用单索面,此桥已开工。爱沙尼亚 Muhu 岛桥(推荐方案)跨径布置为 $200\text{m} + 480\text{m} + 200\text{m}$,矢跨比为 1:8,加劲梁为钢箱梁,高跨比 1:400,桥塔为 H 形。1996 年哥本哈根的国际桥梁和结构协会(IABSE)学术会议论文集中,J.F.Klein 介绍了一种自锚式悬索桥的比较方案,跨径布置为 $303\text{m} + 950\text{m} + 303\text{m}$,采用单主缆,主跨跨中约 200m 长的主缆在梁体内部,与梁固结,使结构具有很高的刚度,索夹处设有锚固装置,所以主缆截面沿桥梁是可变化的,这样可大大节省主缆造价。

第三节 混凝土自锚式悬索桥的提出与发展概况

1998 年在徐州黄河故道复兴路桥设计中,大连理工大学张哲教授首次提出采用混凝土主梁的自锚式悬索桥方案,对混凝土自锚式悬索桥的受力性能进行了开创性的研究。2001 年,他主持设计了大连金石滩金湾桥。该桥为主跨 60m 的混凝土自锚式悬索桥,钢筋混凝土主梁采用边主梁形式。该桥于 2002 年 6 月建成通车,从而填补了这个领域的空白。张哲教授在总结金湾桥成功经验后,于 2002 年设计了抚顺市万新大桥,该桥为主跨 160m 的混凝土自锚式悬索桥,桥宽 41m,主梁采用单箱五室钢筋混凝土箱梁,该桥于 2003 年 5 月开工,2004 年 7 月建成,成为目前世界上已建成和在建的混凝土自锚式悬索桥中跨度最大的。目前建成和在建的混凝土自锚式悬索桥还有永康溪心桥、江山北关桥等。

第四节 自锚式悬索桥的主要结构形式

自锚式悬索桥由于主梁要承受主缆传递的压力,所以必须做成加劲梁的形式。已建成的自锚式悬索桥的形式主要可分为:

1. 美式自锚式悬索桥

其基本特征是采用竖直吊杆,并采用钢桁架作为加劲梁。采用钢桁架的自锚式悬索桥的加劲梁是连续的,以承受主缆传递的压力。加劲梁可做成双层的,供公铁两用,如韩国的永宗悬索桥(图 1-5)。采用钢桁架还可通过增加加劲梁的高度来保证桥梁有足够的刚度。美式的现代悬索桥形式应用广泛,大多地锚式悬索桥都采用美式的,如美国的金门大桥、维拉扎诺海峡大桥、日本的明石海峡大桥等。在自锚式悬索桥中采用美式的直吊杆和钢桁梁的也很多,如韩国的永宗大桥。

2. 英式自锚式悬索桥

20 世纪 60 年代英国提出的新型悬索桥突破了悬索桥的传统形式,这种新型悬索桥的基本特征是采用三角形的斜吊杆和刚度较小的流线形扁平翼状钢箱梁作为加劲梁,桥塔处没有伸缩缝,用钢筋混凝土代替钢桥塔,有的还将主缆和加劲梁在跨中固结。其优点是钢箱梁可减轻恒载,因而减小了主缆截面,降低了钢材用量。钢箱梁抗扭刚度大,受到横向的风力小,有利于抗风,并大大减小了桥塔所承受的横向力,缺点是三角形布置的斜吊杆在吊点处的结构复杂。在自锚式悬索桥中,日本的此花大桥是世界上惟一一座英国式的自锚式悬索桥。

3. 其他类型自锚式悬索桥

其他类型自锚式悬索桥采用了竖直吊杆和流线形箱梁作为加劲梁,加劲梁的材料可采用钢材或钢筋混凝土材料。现在的钢筋混凝土自锚式悬索桥都采用这种形式,如万新大桥等。钢结构的自锚式悬索桥除有双层通车要求的采用较多外,还有很多桥梁也采用这种形式,如美国旧金山-奥克兰海湾新桥。在国内,根据国情一般采用钢筋混凝土材料更经济。采用钢筋混凝土材料的加劲梁和钢材的相比有独特的优点:钢结构由于要承受主缆传递的压力,为防止钢结构的压屈,必须在关键部位增加构件或加大尺寸,这就使造价增加,而采用钢筋混凝土材料则较经济,由于混凝土是受压材料,所以比钢结构更适于承压。钢筋混凝土材料一般做成箱梁截面,使其有足够的抗扭刚度。

第五节 自锚式悬索桥的主要构造及功能

悬索桥是由主缆、加劲梁、主塔、鞍座、锚固构造、吊索等构件构成的柔性悬吊组合体系。成桥后,主要由主缆和主塔承受结构的自重,结构共同承受外荷载作用,受力按刚度分配。

主缆:主缆是悬索桥的主要承重构件,除承受自身恒载外,缆索本身通过索夹和吊索承受活载和加劲梁(包括桥面系)的恒载。除此以外主缆还承担一部分横向风荷载,并将它传递到桥塔顶部。主缆不仅可以通过自身弹性变形,而且可以通过其几何形状的改变来影响体系平衡,表现出大位移非线性的力学特征,这是悬索桥区别于其他桥梁结构的重要特征之一。主缆

在恒载作用下具有很大的初始张拉力,对后续结构形状提供强大的“重力刚度”,这是悬索桥跨径得以不断增大、加劲梁高跨比得以减小的根本原因。

吊索:吊索也称吊杆,是联系加劲梁和主缆的纽带,是将活载和加劲梁的恒载传递到主缆的构件,承受轴向拉力。吊索内恒载轴力的大小,既决定了主缆在成桥状态的真实索形,也决定了加劲梁的恒载弯矩,是研究悬索桥成桥状态的关键。通常吊索的布置形式有垂直的和倾斜的两种,上端通过索夹和主缆相连,下端锚固在加劲梁上。

加劲梁:加劲梁是悬索桥保证车辆行驶、提供结构刚度的二次结构,主要功能是提供桥面支承和防止桥面发生过大的挠曲变形和扭曲变形。加劲梁是承受风荷载和其他横向水平力的主要构件。大跨度悬索桥由于自重的限制,加劲梁均为钢结构,一般采用钢桁架形式和钢箱梁形式。钢筋混凝土材料的加劲梁由于自重大,限制了跨径的大小。

桥塔:桥塔是支承主缆的重要构件。悬索桥的活载和恒载(包括桥面、加劲梁、吊索、主缆及其附属构件如鞍座和索夹等的重力)以及加劲梁支承在塔身上的反力,都将通过桥塔传递到下部的塔墩和基础,桥塔同时还受到风力和地震力的作用。桥塔的高度主要由矢跨比确定。桥塔可采用钢结构,也可采用混凝土结构。由于主塔水平抗推刚度相对较小,塔顶水平位移主要由中、边跨主缆平衡条件决定,因而,塔内弯矩大小取决于塔的弯曲刚度。

主索鞍:主索鞍在主塔上,用来支承和固定主缆,通过它可以使主缆的拉力以垂直力和不平衡力的方式均匀地传递到塔顶。

散索鞍:散索鞍位于主缆锚固处,其作用是将主缆的索股散开,分别锚固在锚固区的锚块上。散索鞍一般应用在跨度较大的自锚式悬索桥中。由于跨度较大的悬索桥其主缆传递到主梁上的压力很大,所以必须将主缆散开分别锚固。散索鞍一般前段和主缆固定,后段散开。为了不使散索鞍承受主缆的拉力,可通过橡胶支座和螺栓将其安装在主梁上,使其允许发生一定的剪切变形。

转索鞍:转索鞍的作用是改变主缆的方向。当采用通长主缆,在梁端环绕通过时,可通过转索鞍来实现。采用这种索鞍时,不需要锚固构造,加劲梁端部尺寸也相对较小,当锚固处受洪水位的限制时采用这种形式可以尽量避免锚固构造受水的侵蚀,但这种方式会增加主缆的用量。

锚固构造:自锚式悬索桥的主缆锚固在主梁上,因此锚固构造也可认为是庞大的端横梁。

第六节 自锚式悬索桥的特点及结论

一、自锚式悬索桥和地锚式悬索桥的共同特点

(1)主缆是几何可变体,只承受拉力作用。主缆除通过自身的弹性变形和几何形状的改变来影响体系的平衡。所以悬索桥的平衡应建立在变形后的状态上。

(2)主缆在初始恒载作用下,具有较大的初拉力,使主缆保持着一定的几何形状。当外荷载作用时,缆索发生几何形状的改变。初拉力对在外荷载作用下产生的位移存在着抗力,它和位移有关,反映出缆索的几何非线性的特性。

(3)改变主缆的垂跨比将影响结构的受力和刚度。垂跨比增大,则主缆的拉力减小,刚度减小,恒、活载作用产生的挠度增大。

(4)如果悬索桥的跨度越大,则加劲梁所受的竖向活载的影响越小,竖向活载引起的变形

也越小。

(5)跨径增大时,增大加劲梁的抗弯刚度对减小悬索桥竖向变形的作用不大,这是因为竖向变形是悬索桥整体变形的结果。加劲梁的挠度受到主缆变形的影响,跨度增大时加劲梁在承受竖向荷载方面的功能逐渐减小到只能将活荷载传递给主缆,其自身刚度的贡献较小。这一点和其他桥型中主要构件截面面积总是随着跨径的增大而显著增大不同。

(6)边跨的不同形式对悬索桥有很大的影响,通常悬索桥边跨与中跨跨径之比对悬索桥的挠度和内力有影响,当边跨与中跨跨径比减小时,其中跨的跨中和 $L/4$ 处的挠度和弯矩值减小,而主缆拉力有所增加。

二、自锚式悬索桥的优点和缺点

1. 优点

(1)不需要修建大体积的锚碇,所以特别适用于地质条件很差的地区。

(2)因受地形限制小,可结合地形灵活布置,既可做成双塔三跨的悬索桥,也可做成单塔双跨的悬索桥。

(3)对于钢筋混凝土材料的加劲梁由于需要承受主缆传递的压力,刚度会提高,节省了大量预应力构造及器具,同时也克服了钢材料在较大轴向压力下容易压屈的缺点。

(4)采用混凝土材料可克服以往自锚式悬索桥用钢量大,后期维护费用高的缺点,能取得很好的经济效益和社会效益。

(5)保留了传统悬索桥的外形,在中小跨径上是很有竞争力的方案。

(6)由于采用的钢筋混凝土材料造价较低,而桥梁结构合理,外形美观,所以不局限于在地基很差、锚碇修建困难的地区采用。

(7)由于混凝土材料的主梁刚度比钢结构的主梁刚度大,所以混凝土材料的自锚式悬索桥非线性的影响比钢结构的要小。

2. 缺点

(1)由于主缆直接锚固在加劲梁上,梁承受了很大的轴向力,为此需加大梁的截面,对于钢结构的加劲梁则造价明显增加,对于混凝土结构的则增加了主梁自重,从而使主缆钢材用量增加,所以采用这两种材料跨径都会受到限制。

(2)施工步骤受到了限制。必须在主梁、主塔做好之后再吊装主缆,安装吊索,因此需要搭建大量临时支架以安装主梁。所以自锚式悬索桥若跨径增大,其额外的施工费用就会增多。

(3)锚固区局部受力复杂。

(4)相对地锚式而言,由于主缆非线性的影响,使得吊杆张拉时施工控制更加复杂。

(5)由于加劲梁除承受主缆传递的压力外,还承受主缆拉力的竖向分力,所以应尽量减少主缆锚固处与主梁的夹角。因此不应采用直背索。

三、关于自锚式悬索桥的一些结论

1.通过国内的工程实践证明,钢筋混凝土自锚式悬索桥在中小跨径上是一种既经济又美观的桥型,结构的刚度也相对较大,对于中小跨径的公路桥梁和人行桥都适合建造。

2.对于钢筋混凝土结构的自锚式悬索桥,锚固区的设计是一个关键环节,它不但影响结构

的整体工作性能,也影响桥梁的经济效益和美观要求,应给予足够的重视。

3. 自锚式悬索桥主缆的锚固形式是与地锚式最大的不同之处,根据受力大小和锚固区构造要求的不同,可采取直接锚固、散开锚固和环绕式锚固等不同方式。

4. 由于主缆非线性的影响而使吊索张拉时的施工控制变得尤为关键。

5. 加劲梁采用钢材造价较贵,并且钢结构容易在轴力作用下压屈。而采用钢筋混凝土材料恰好可以克服这两个缺点。

第七节 混凝土自锚式悬索桥设计理论尚需解决的问题

虽然自锚式悬索桥与地锚式悬索桥在形式上的差别仅是将主缆的锚固从地上的锚碇移到加劲梁端部,但结构的受力和施工方法因此发生了极大的变化,使得仅受弯矩的加劲梁成为受强大轴向压力的压弯构件,加劲梁和主缆的施工顺序完全相反。目前,无论是在静力、动力特性的理论研究方面,还是在设计和施工监控方面,人们对地锚式悬索桥的研究已非常成熟和完善,相关的研究论文和成果很多。但是对于自锚式悬索桥的研究,目前可检索到的文献资料很少,人们对自锚式悬索桥在理论和实践上的认识还不够全面。鉴于国内自锚式悬索桥的迅速发展和被大量设计采用以及研究方面的滞后,本书拟在混凝土自锚式悬索桥的分析理论、静力行为、动力行为、施工控制、模型试验等方面进行研究和探讨。

参考文献

- 1 悬索桥.铁道部大桥工程局桥梁科学研究所[M].北京:科学技术文献出版社,1996,10.
- 2 雷俊卿,郑明珠等.悬索桥设计[M].北京:人民交通出版社,2002.1.
- 3 钱冬生,陈仁福.大跨度悬索桥的设计与施工[M].西南交通大学出版社,1999.
- 4 张哲,窦鹏,石磊,刘春城.混凝土自锚式悬索桥的发展综述[J].世界桥梁,2003.
- 5 林荫岳译.世界上第一座自锚体系斜吊杆悬索桥—日本此花大桥[J].国外桥梁,1993.
- 6 M. Kamei, T. Maruyama, H. Tanaka, Japan. Konohana Bridge, Japan. 国际桥协(IABSE) Structural Engineering International SEI Vol. 2, No. 1, 1992.
- 7 严国敏译.韩国永宗悬索桥.国外公路[J],1998.
- 8 C. Y. Cho, S. W. Lee, S. Y. Park, M. Lee, Korea. Yongjong Self - anchored Suspension Bridge. 国际桥协(IABSE) Structural Engineering International SEI Vol. 11, No. 1, 2001.
- 9 H. Gil, C. Cho, Korea. Yongjong Grand Suspension Bridge. 国际桥协(IABSE) Structural Engineering International SEI Vol. 8, No. 2, 1998.
- 10 John A. Ochsendorf, David P. Villington. Self - anchored suspension bridges[J]. Journal of bridge engineering, August 1999.
- 11 颜娟译.自锚式悬索桥.国外桥梁[J],2002.
- 12 楼庄鸿,严文彪.自锚式悬索桥[A].中国公路学会桥梁和结构工程学会 2002 年全国桥梁学术会议论文集,2002,10.
- 13 楼庄鸿译.自锚式悬索桥.中外公路[J],2002.
- 14 金石滩金湾大桥施工图设计.大连理工大学土木建筑设计研究院桥梁研究所,2002,12.

- 15 J.F.Klein. 瑞士日内瓦湖上的新型悬索桥方案. 哥本哈根 IABSE 学术会议论文集[C], 1996.
- 16 高小云 译. 日本 Konohana 桥. 国外公路[J], 1993.
- 17 Kim, Ho - Kyung, Lee, Myenong - Jae, etc. Non - linear shape - finding analysis of a self anchored suspension bridges[J]. Engineering Structures ,2002.
- 18 甘科,李东平,孙剑飞等. 广西桂林丽君桥主缆、吊杆安装施工技术[J]. 建筑施工, 2002 (3), 221 ~ 223.
- 19 张元凯,肖汝诚等. 自锚式悬索桥设计[J]. 桥梁建设, 2002.
- 20 张元凯,肖汝诚等. 自锚式悬索桥概念设计[J]. 公路, 2002.
- 21 张哲,石磊,刘春城. 延吉市布尔哈通河局子街桥设计[J]. 华东公路, 2003.
- 22 延吉市布尔哈通河局子街桥施工图设计. 大连理工大学土木建筑设计研究院桥梁研究所, 2002, 12.
- 23 兰旗松花江大桥施工图设计. 大连理工大学土木建筑设计研究院桥梁研究所, 2002. 8.
- 24 河北巨力悬索桥施工图设计. 大连理工大学土木建筑设计研究院桥梁研究所, 2002. 10.
- 25 抚顺市前甸大桥施工图设计. 大连理工大学土木建筑设计研究院桥梁研究所, 2002. 12.
- 26 陈仁福. 大跨度悬索桥理论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1994.
- 27 小西一郎. 刚桥[M]. 戴振藩译. 北京: 中国铁道出版社, 1981.
- 28 石磊,张哲,刘春城等. 混凝土自锚式悬索桥设计及其力学性能分析[J]. 大连理工大学学报, 2003.
- 29 张哲,石磊,刘春城等. 混凝土自锚式悬索桥结构内力分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003.
- 30 石磊. 混凝土自锚式悬索桥设计理论研究[J]. 大连理工大学博士论文, 2003.
- 31 刘春城. 混凝土自锚式悬索桥三维地震反应研究[J]. 大连理工大学博士论文, 2004.
- 32 邱文亮. 自锚式悬索桥非线性分析与试验研究[J]. 大连理工大学博士论文, 2004.

混凝土自锚式悬索桥的设计理论分析

第一节 悬索桥分析理论综述

悬索桥是一种传统的桥梁结构形式,由于它的跨越能力在各种桥梁结构形式中最大,故一直是大跨和特大跨桥梁的主要形式。悬索桥通常由承重缆索、支承缆索的索塔、锚固缆索的锚碇、直接承受交通荷载的加劲梁以及将加劲梁和主缆联系在一起的吊杆组成,因而在理论上悬索桥应是索和梁的组合结构体系。但因悬索桥的跨度一般很大,加劲梁的刚度在全桥刚度中所占的比例很小,故在受力本质上悬索桥属于柔性索悬挂体系,它在外荷载作用下将产生相当大的变形,如按小变形理论进行线性分析,将不能反映实际结构的受力。因此,大跨度悬索桥的分析必须计入内力与结构变形的影响,否则将引起较大的误差。悬索桥在竖向荷载下的计算是悬索桥设计计算中最重要的内容,是主要构件设计的最重要依据。悬索桥在竖向荷载下的分析理论发展过程体现了人们对悬索桥结构特性的认识越来越正确,期间经历了弹性理论、挠度理论和有限位移理论三个阶段,由此构成了近代悬索桥的理论基础。

一、弹性理论

弹性理论是对悬索桥进行结构分析的第一理论,它统治了悬索桥设计大约一个世纪,此前悬索桥还没有任何力学分析方法。1823年,法国的 Navier 发表无加劲悬索桥计算理论,在经过 1858 年 Rankine 等的弹性理论的发展后,最后由 D. B. Steinman 整理成为后来习用的标准理论形式。采用弹性理论作悬索桥结构分析时,(如图 2-1 所示),对结构作了如下假定:

(1)假定主缆无弯曲刚度,只承受拉力,不承受弯矩,水平均布的恒载 q 使主缆的几何形状为二次抛物线,而且恒载完全由主缆承担。当一段活载作用在桥上时,主缆的几何形状及长度假定保持不变。

(2)加劲梁全桥为等截面,抗弯刚度 EI 沿梁长不变。

(3)将布置很密的吊索按形成“膜”来考虑,并假定吊索长度不因活载而伸长。这样,在活载 p 作用下,沿主缆各点的竖向挠度就和沿梁各相应点的挠度一样。

按照上述的假定,可以求得加劲梁任意截面的活载弯矩 M 有下面关系:

$$M = M_p^0 - H_p y \quad (2-1)$$

式中: H_p ——活载产生的主缆拉力的水平分力;

M_p^0 ——相应简支梁的活载弯矩。

弹性理论用普通结构力学即可求解,计算方便,至今仍在跨度小于 200m 的悬索桥设计中