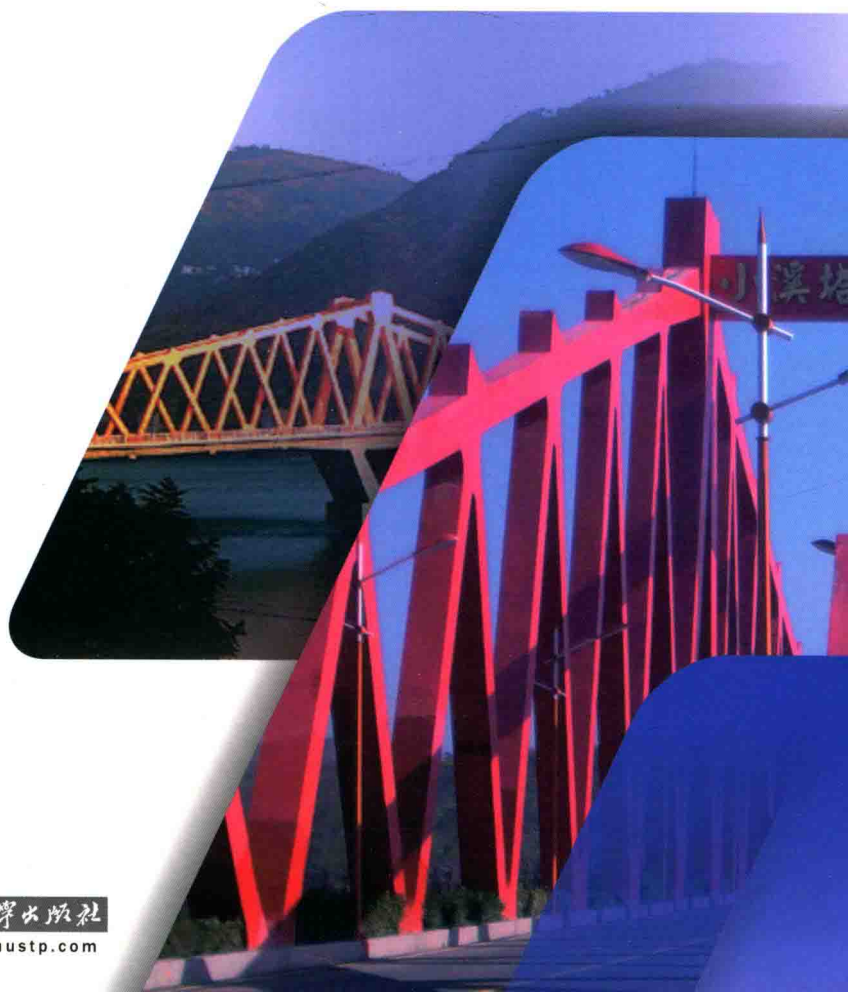


桥/梁/新/材/料/与/新/技/术/丛/书

CONCRETE STRUCTURE REINFORCED WITH COMPOSITES OF FIBER

预应力混凝土 斜拉桁架桥梁

金文成 郑文衡



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

桥梁新材料与新技术丛书

预应力混凝土斜拉桁架桥梁

金文成 郑文衡 著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书介绍一种兼有较大承载能力和跨越能力的工程结构——预应力混凝土斜拉桁架结构。它既具有斜拉桥的受力特点以及所采用斜拉桥先进的挂篮施工方法,又具有桁架自重较小的长处,并填补了 300 m 左右中等跨度桥梁的理论工程空白。其先进性在于主体构件是拉压杆,非受拉即受压,克服了梁式抗弯构件自重大且不适合较大跨度的弊端。这种结构的关键在于预应力拉张技术,桁架结点的受力分析,压杆的稳定、抗风抗震的动力学分析。本书着重介绍这方面的理论以及相应的研究型试验桥梁的施工工艺,是一本着重工程实践的专著。

本书的读者对象是土木工程领域的专业人员,亦可作为大学教师、博士及硕士研究生、本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

预应力混凝土斜拉桁架桥梁/金文成,郑文衡著. —武汉:华中科技大学出版社,2015.4
ISBN 978-7-5680-0812-9

I. ①预… II. ①金… ②郑… III. ①预应力混凝土桥-斜拉桥-桁架桥-研究 IV. ①U448.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 083705 号

预应力混凝土斜拉桁架桥梁

金文成 郑文衡 著

策划编辑:俞道凯

责任编辑:刘 勤

封面设计:范翠璇

责任校对:马燕红

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉鑫昶文化有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

印 张:14.25

字 数:285 千字

版 次:2015 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:56.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

桥梁工程的历史,无论是在力学原理还是在工程艺术方面,一直都在不断地进入一个又一个至臻至美的境界。从古代的独木桥、木(石)板桥开始,经历了木质结构桥以及石拱桥等阶段。而石拱桥可以作为桥梁历史上的第一座里程碑:石拱桥时代。

然而桥梁科学的进步没有停止过。钢铁桁架桥奏响了钢铁时代的乐章,随后有悬索桥,桥梁历史上的技术革命因此展开了新的壮丽的一页,这是桥梁建造史的第二座里程碑:钢铁时代。

桥梁工程上的开拓与进取,总是与新技术、新材料的运用紧密联系的,桥梁技术与材料科学是推动桥梁科学发展的直接驱动力。本书系统化总结混凝土斜拉桁架桥的理论创意、技术要点与施工工艺。在材料方面,立足于预应力混凝土这种二次复合的材料;在技术上,开拓桁架结构这种合理的受力方式,主要构件只承受压力和拉力,而不承受弯矩和扭矩,是理想的受力方式。本书是“桥梁新材料与新技术”系列丛书的一员,这个系列着眼于当代桥梁科学的最新进展,并致力于推动桥梁科学不断开拓与进步。

近代出现的混凝土,一开始就在桥面铺装上显露出一定的优势,由于钢筋配筋技术的出现,混凝土很快成为受力构件,发挥其抗压能力强的优势;混凝土的可塑性也发挥了其他材料不可比拟的优势,由此造就了混凝土梁桥,其中包括空心板、箱梁、连续刚构等新型结构。从本质上说,混凝土是由砂、石与固结材料——水泥组成的复合材料,钢筋混凝土是钢筋与混凝土再次复合的结果,而预应力混凝土是这种复合材料最优化的结构。

在解决了风力动力学载荷的计算理论以后,斜拉桥在现代混凝土桥梁中占据了主导地位。其中也带动了钢铁桥梁的更新换代,在斜拉桥中,也有钢箱梁的斜拉结构。然而这一个阶段的主流,仍然是以混凝土结构为代表,以往用于悬索结构的钢铁桁架桥身,也趋向于用混凝土箱梁代替了,成为混凝土箱式桥身的悬索结构。

这是一个混凝土的时代,在这个时代里,古老的拱桥也被唤醒。混凝土拱桥流行于小跨度结构中。拱式结构,因为发挥了材料的抗压优势,具有十分强劲的竞争能力,由此衍生出许多拱桥的变化形态,如:斜腿刚架桥,是拱桥的变体;V形墩,又是斜腿刚架的变体。因此,预应力混凝土的梁式、拱式、斜拉与悬索结构成了一个时代的标志,这是第三座里程碑:混凝土的应用。开启了一个称为“复合材料时代”的新纪元。



桥梁建造历史上的混凝土时代,除了有混凝土梁体的斜拉桥、悬索桥以外,混凝土桁架结构及混凝土斜拉结构是它的另一个重要标志。预应力混凝土桥梁有两个局限,其一是梁桥的跨度有限,最大的连续刚构箱梁,其跨度为 40 m 左右;其二是混凝土本身适合做成拱式结构,而缺乏桁架结构的开发。另一方面,混凝土梁体配合钢铁的悬索或斜拉索结构,其刚度非常小,虽然有跨越能力强等优势,但是也有柔软方面的弱点。混凝土斜拉桁架桥就是在这种情况下应运而生的一种全新的结构,其刚度大,受力合理,最佳跨度在 300 m 左右,填补了小跨度桥梁(40 m 以下)与大跨度桥梁(1000 m 以上)之间的技术空白。

作者怀着对方秦汉院士无限崇敬与怀念的心情,认真撰写本专著。方院士生前对本书的研究内容及出版计划给予了热情鼓励与亲切关怀。

书中涉及的部分内容,取材于湖北省科技厅立项的研究项目“预应力混凝土斜拉桁架结构关键技术研究”。作者感谢项目组副组长周昌栋教授、丁庆荣局长以及其他几十位项目参加人对该项目研究工作的支持。本书涉及工程实例——湖北秭归归州大桥,是作者主持设计和计算的科研依托工程,感谢该工程的监控单位——长安大学,以及长安大学黄平明教授的监控工作,感谢监理与成桥试验负责人华荣高工与张艳成高工;本书讨论的另一项工程实例是作者设计、计算的小溪塔大桥,感谢业主方技术负责人余宏林的支持与协助。对本书撰写和数据处理有帮助的人员有:黄古剑、张德平、邱锋、游亿财、董华东、黎述亮、怀臣子、白金增。在此一并致谢!

作 者

2015.3.10

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 斜拉桁架结构的研究现状和发展概况	(2)
1.3 混凝土斜拉桁架结构的意义	(7)
1.4 本书理论与技术的工程背景	(8)
1.5 本书的主要内容	(11)
第 2 章 斜拉桁架桥的桥型及结构体系	(13)
2.1 概述	(13)
2.2 斜拉桁架桥的桥型组成及形式	(13)
2.3 斜拉桁架桥的构造	(22)
2.4 斜拉桁架桥的结构体系	(27)
2.5 本章小结	(29)
第 3 章 斜拉桁架桥的结构特性分析	(31)
3.1 概述	(31)
3.2 整体受力分析	(31)
3.3 节点局部应力分析	(55)
3.4 与其他桥型的受力对比	(63)
3.5 斜拉桁架桥新形式——独塔斜拉桁架桥分析	(70)
3.6 小结	(79)
第 4 章 斜拉桁架桥的动力特性分析	(81)
4.1 概述	(81)
4.2 结构动力特性计算理论	(82)
4.3 动力学模型	(82)
4.4 动力特性分析	(84)
4.5 非线性振动分析	(95)
4.6 小结	(95)
第 5 章 斜拉桁架桥的施工	(96)
5.1 概述	(96)
5.2 悬臂拼装法	(97)
5.3 悬臂浇筑法	(107)
5.4 整体现浇施工	(114)



5.5	组合施工方法	(116)
5.6	小结	(116)
第6章	斜拉桁架桥的施工控制	(118)
6.1	概述	(118)
6.2	施工控制的目的、原则与方法	(118)
6.3	施工监控的主要内容	(119)
6.4	斜拉桁架桥施工控制的理论分析	(121)
6.5	实施斜拉桁架桥施工监控	(136)
6.6	小结	(141)
第7章	斜拉桁架桥的经济性分析及应用前景	(142)
7.1	斜拉桁架桥经济性分析	(142)
7.2	斜拉桁架桥的应用前景	(147)
7.3	小结	(150)
第8章	工程实例	(151)
8.1	工程实例之一——归州大桥	(151)
8.2	归州大桥总体设计	(151)
8.3	结构受力分析	(154)
8.4	室内试验研究	(182)
8.5	成桥荷载试验	(193)
8.6	工程实例之二——小溪塔大桥	(195)
8.7	小溪塔大桥总体设计	(196)
8.8	结构受力分析	(198)
8.9	施工阶段稳定性分析	(208)
8.10	成桥荷载试验	(212)
第9章	讨论与展望	(214)
参考文献		(217)

第 1 章 绪 论

1.1 引言

1955 年,联邦德国 DEMAG 公司在瑞典修建的主跨为 182.6 m 的斯特伦松德 (Stromsund) 桥是世界上第一座现代化斜拉桥。在随后的几十年里,斜拉桥有了迅速的发展和广泛的应用。目前最大斜拉桥主跨是俄罗斯横跨东博斯鲁斯海峡的俄罗斯岛大桥,其主跨 1104 m,2012 年 6 月建成通车。而世界第二大跨径斜拉桥——主跨 1088 m 的苏通长江大桥于 2008 年 4 月底通车,当时是世界第一大跨径大桥,保持纪录达四年之久。在超大跨径上,斜拉桥取得了极大的成功,其原因是结构受力合理,用料省,便于悬臂施工,外形美观。

然而,对于 300 m 以下的跨度范围,斜拉桥显得不经济。一方面,克服巨大的技术难度,投入很大的施工成本,而收益仅仅是 300 m 左右的跨越能力;另一方面,连续梁、T 构等桥型工艺成熟,但其受力方式是梁式承载,材料用量大,自重效应大,跨越能力有限,在 150 m 以上跨度很少应用;而钢铁桁架梁虽然受力合理,材料用量小,跨度大,但仅限于钢铁结构。一种吸收了斜拉桥的大跨度优势,兼具混凝土梁的刚性特征和便于维护的特征,又具有桁架结构轻盈美观的长处,适用于中型跨度,具有较大承载能力的斜拉桁架结构应运而生。随着斜拉桁架 T 构、斜拉桁架连续梁、斜拉桁架连续刚构三种桥型的建设,在我国桥梁科学中已逐步形成了一个全新的结构体系——斜拉桁架预应力混凝土结构。

斜拉桁架预应力混凝土结构的特点是以预应力混凝土刚性拉杆代替斜拉桥柔性钢索。充分发挥刚度较低的预应力钢绞线的作用,通过预应力技术,形成刚度高的预应力混凝土受拉杆件,由此形成的桁架结构,相对柔性钢索的斜拉桥而言,其刚度高。另外,斜拉桁架结构有贯穿始终的直线型上弦拉杆,因此具有斜拉桥适应较大跨度的优势。国外在 20 世纪 80 年代初开始研究并实践这一结构类型,认为斜拉桁架结构对于发展大跨度预应力混凝土桥梁很有潜力。

斜拉桁架桥相对于其他常规桥型有其独特之处。桁架结构是由拉压杆组装而成,与梁桥相比,后者承重构件主要受弯,而前者具有更合理的传力途径,杆件断面上应力分布均匀,能更好地发挥材料的性能。相比于斜拉桥,斜拉桁架桥更能发挥预应力混凝土的优势,刚度高,节省预应力钢材的用量。原因在于:斜拉桥结构中的承重构件斜拉索为柔性钢索,为了增加结构竖向刚度,需要增大拉索的截面;为



了避免拉索过早疲劳破坏,需要限制钢索的张拉应力(一般不超过 $0.4f_{pk}$, 其中 f_{pk} 是抗拉标准强度值)。而斜拉桁架体系的斜拉索埋于混凝土中,通过对混凝土施加预应力而实现斜拉作用,预压应力混凝土杆件具有刚度高和抗疲劳的优点,故斜拉桁架中的钢束预应力张拉控制值可增加到 $0.75f_{pk}$,减少了材料用量,取得良好的经济效益。

斜拉桁架桥一般是下承式,它的建筑高度较低,上弦杆的张力对下弦杆具有体外预应力作用,因此具有矮塔斜拉桥的优点。较低的建筑高度减小了引线工程量;合理的受力方式导致上部结构用料省、自重轻,对地基承载力的要求低;在施工工艺上,该结构施工方法灵活,悬臂施工工艺中独立部件大多是杆形部件,可以化整为零,单个杆件质量小,对施工设备要求低。其在适用性、安全性、经济性、观赏性等方面,与其他桥型相比具有较强的竞争力。

1.2 斜拉桁架结构的研究现状和发展概况

1.2.1 国内发展概况

我国在 1986 年建成的第一座斜拉桁架桥——浙江长兴县的港口大桥,这是一座试验桥,由同济大学桥梁教研室、浙江省交通厅设计院、湖州市交通局、长兴县交通局组成的设计小组设计。之后,我国又出现了十几座斜拉桁架桥,苏南运河(京杭运河苏南段)上所建的桥尤其瞩目:1994 年 11 月,该运河上第一座斜拉桁架桥——横林东桥建成;之后在该运河上又先后建成了四座斜拉桁架桥,即硕放大桥、新安南桥、向化一号桥和煤石桥。表 1-1 列举了国内主要的斜拉桁架桥。以下是部分桥梁的基本数据。

1. 港口大桥

位于浙江长兴的港口大桥,其跨径布置为 $(30+70+30)$ m,全长 137.78 m,单悬臂加挂梁的斜拉桁架体系桥梁,边跨计算跨径为 28 m,中跨悬臂长度为 30.54 m,挂梁长 8.92 m,主桥桥墩为钻孔桩双柱式墩。

2. 洪塘大桥

洪塘大桥位于福州市,建成于 1990 年,全长 1849.5 m。主桥为下承式斜拉桁架 T 构,其跨径布置为 $(60+120+60)$ m。桁架计算高度为 15 m,为跨径的 $1/8$ 。桁架总高度为 18.14 m,桁架节间距为 10.50 m。桥型实景照片如图 1-1 所示。

3. 其他已建成同类桥梁

在经历了初期的试验与探索后,在国内又陆续修建了其他同类型的桥梁,如河南省沈丘县沈丘大桥(见图 1-2)、江苏省无锡市南门硕放大桥(见图 1-3)、京九铁

表 1-1 国内主要斜拉桁架桥技术参数表

地点	桥名	结构形式	跨度组合/m	跨度比	高跨比	节间距/m	桥宽/m	建成年份	荷载等级	施工方法
浙江长兴	港口大桥	斜拉桁架 T 构	30+70+30	0.43	1/8.75	—	净—7	1986 年	汽-20,挂 100	—
福州市洪塘镇	洪塘大桥	斜拉桁架 T 构	60+120+60	0.5	1/8	10.5	净—9+2×0.75	1990 年	汽-20,挂 100	悬拼
河南省周口市	沈丘大桥	斜拉桁架悬臂梁	44.6+105+44.6	0.43	1/8.1	7.5	净—12.5+2×1.5	1991 年	公路桥	悬拼
福建水口电站	水口闽江大桥	斜拉桁架连续刚构	84.5+160+84.5	0.53	—	—	—	1996 年	公路桥	—
山东省临清市	卫运河大桥	斜拉桁架连续梁桥	32.5+85+32.5	0.38	—	6.5	净—8.9	1994 年	双线铁路桥	支架拼装
江苏无锡	横林东桥	斜拉桁架 T 构	25+60+25	0.42	—	—	净—5+2×0.5	1994 年	人行桥	—
苏州望亭镇	望亭桥	斜拉桁架悬臂梁	25+60+25	0.42	—	—	净—5+2×0.5	1995 年	人行桥	—
江苏无锡	新安南桥	斜拉桁架连续刚构	30+60+30	0.50	1/9.2	8.5	净—5+2×0.5	1995 年	汽-10	组合
江苏无锡	硕放大桥	斜拉桁架连续梁桥	45+70+45	0.64	1/7	5~8	净—7+2×1.0	1995 年	汽-20,挂 100	组合
苏州望亭镇	工农桥	斜拉桁架悬臂梁	25+60+25	0.43	—	—	净—5+2×0.25	—	人行桥	组合
江苏无锡	向化一号桥	斜拉桁架悬臂梁	22.8+55+22.8	0.41	1/9.2	5.5	净—7	1995 年	汽-20,挂 100	—
江苏无锡	煤石桥	斜拉桁架悬臂梁	22.8+55+22.8	0.41	—	—	净—4.5+2×0.5	1995 年	专用桥梁	组合
江苏邳州	邳州高架桥	斜拉桁架连续梁桥	43.4+76+43.4	0.57	—	不规则	净—12+2×1.0	2001 年	汽-20,挂 100	支架现浇
湖北秭归	归州大桥	斜拉桁架连续刚构	79.45+140+79.45	0.57	1/8	10.5	净—7+2×0.75	2006 年	汽-20,挂 100	悬拼
湖北宜昌	小溪塔大桥	斜拉桁架连续刚构	85.5+173+85.5	0.49	1/7.76	10	净—9+2×1.5	在建	城-A	悬浇

注：“—”表示资料不详。

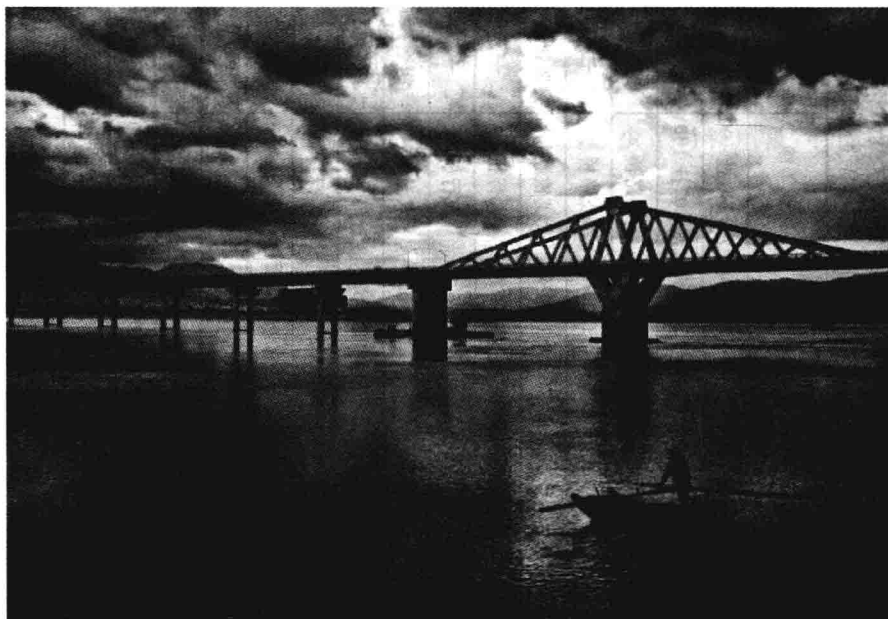


图 1-1 洪塘大桥实景(摘自中铁大桥局电子版《桥梁建设报》)

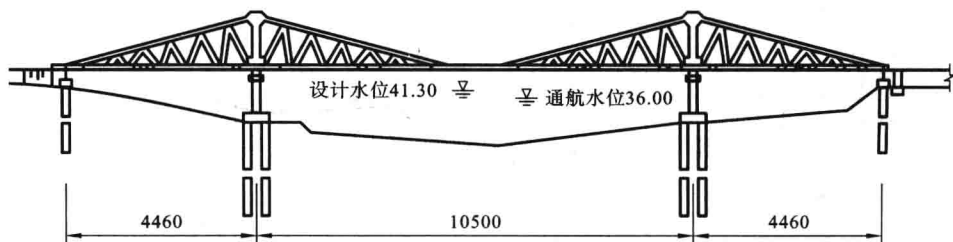


图 1-2 沈丘大桥布置(单位:cm)

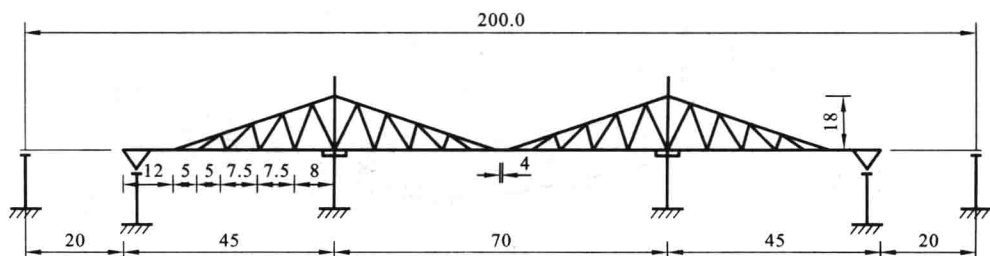


图 1-3 硕放大桥主桥布置(单位:m)

路卫运河特大桥(见图 1-4)、京杭运河邳州高架桥(见图 1-5)以及福建水口闽江大桥(见图 1-6)等。

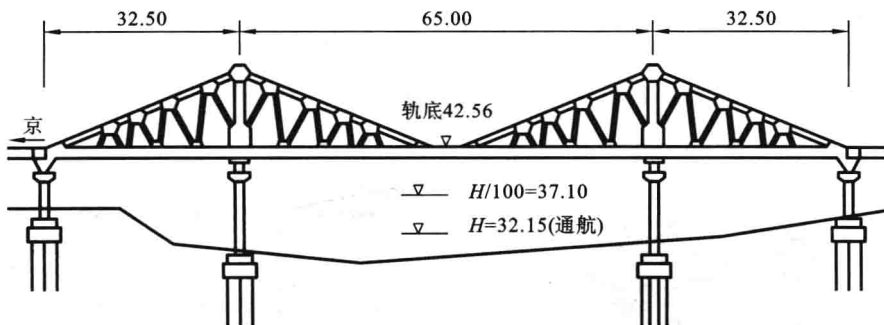


图 1-4 卫运河桥主桥布置 (单位:m)

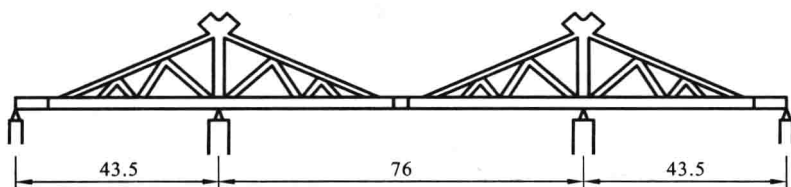


图 1-5 邳州高架桥主桥布置 (单位:m)



图 1-6 福建水口闽江大桥实景

本书第一作者在湖北宜昌地区主持设计了两座预应力混凝土斜拉桁架桥,分别是秭归县归州大桥(原名卡子湾大桥)(见图 1-7)和宜昌市夷陵区小溪塔大桥



图 1-7 归州大桥全景



(见图 1-8),这两座桥是这种桥型研究的依托工程,相比以往的斜拉桁架桥在设计思想和施工工艺方面均有较大突破,其墩高且跨度大,主跨分别为 140 m 和 173 m,其中小溪塔大桥主跨径目前居同类桥梁第一位。



图 1-8 小溪塔大桥实景

1.2.2 国外发展概况

20 世纪 70 年代后期,瑞士、日本在斜拉桥大量建设的基础上,开始了对刚性斜拉杆(板)桥的研究。由于斜拉索采用钢材存在防锈、抗疲劳、振动控制等方面的问题以及刚度相对偏低的缺点,国外专家学者用预应力混凝土斜拉板(杆)代替斜拉索,以改善斜拉桥的性能,称为斜拉板(杆)桥。如于 1981 年建成的主跨为 174 m 的瑞士甘特尔桥(见图 1-9)、主跨为 (103.4+108.6) m 的日本名取川桥(四

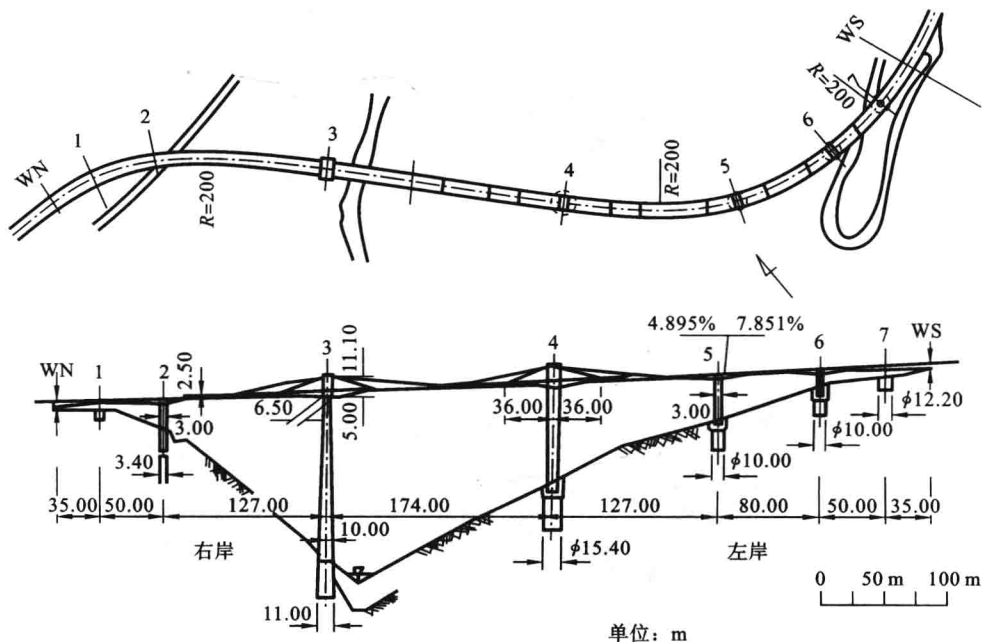


图 1-9 瑞士甘特尔桥

塔斜拉板桥,见图 1-10)和主跨为 177 m 的日本小本川桥(见图 1-11)等。国外的斜拉杆(板)桥构造简单,通常由几根板式构件代替拉索,和国内同类桥型相比,属该类桥型的雏形,是斜拉桁架桥的早期形式。

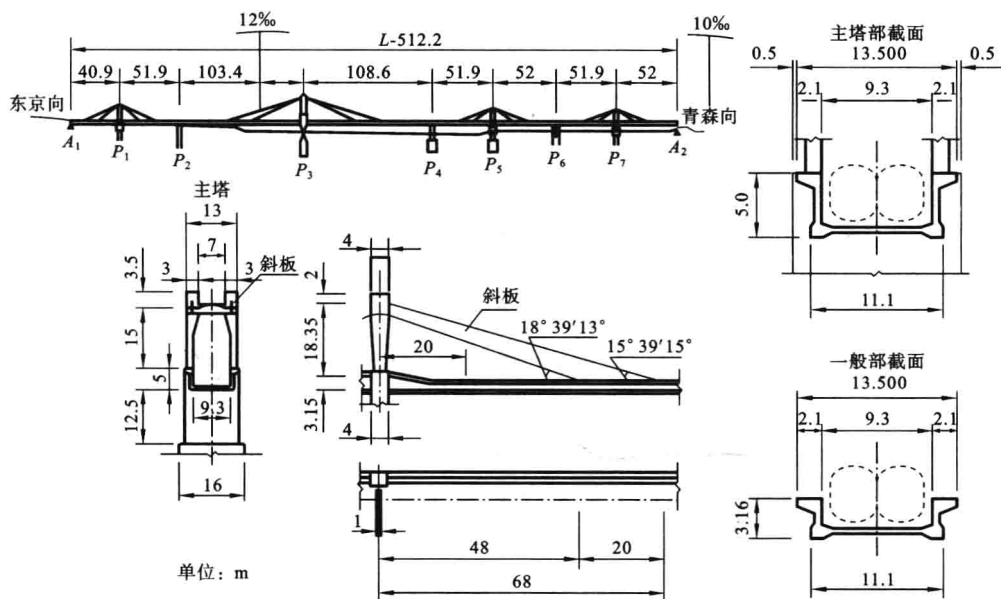


图 1-10 日本名取川桥

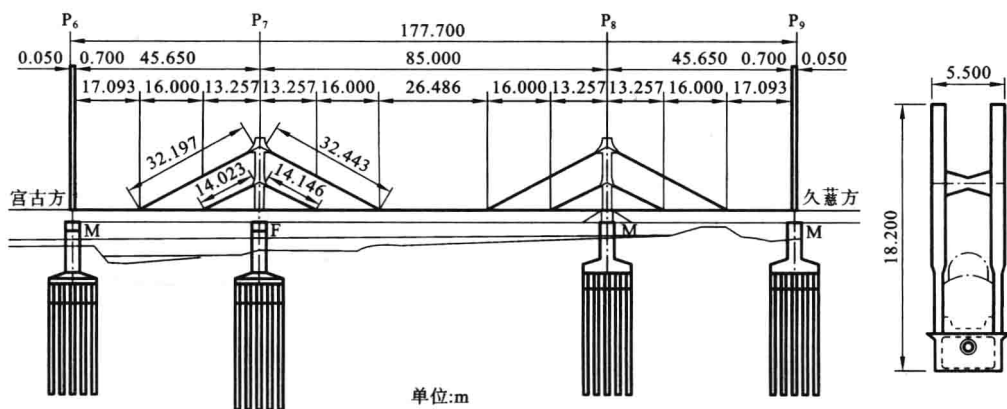


图 1-11 日本小本川桥(图中文字为日文)

1.3 混凝土斜拉桁架结构的意义

预应力混凝土梁式桥,因自重过大制约了它向大跨度方面的发展。开拓预



预应力混凝土结构应用范围,适应桥梁大跨度发展的需要,一直是桥梁工程界的重要研究课题。国外在这方面的突破,在于用桁式体系代替梁式体系。本书的目的在于探讨这种新型大跨度预应力混凝土桥梁的受力特点、构造处理措施、总体设计参数和施工工艺等关键技术,从而推动斜拉桁架的理论由探索阶段走向成熟阶段。

我国此前没有广泛采用斜拉桁架结构,主要原因是没有透彻研究此类桥梁的上述关键问题,缺少可靠的计算理论来确保结构安全。这种安全要求贯穿从施工到营运的各阶段,并遍及各种工况的安全性要求。本书从上述几个关键问题着手,介绍我们对此类桥梁结构的理论探讨、实验研究,以及依托工程的工程实践检验成果。

1.4 本书理论与技术的工程背景

本书从理论和实践两个方面阐述预应力混凝土斜拉桁架结构关键技术。以湖北省归州大桥和宜昌市小溪塔大桥的设计、施工以及运营为依托,通过研究归州大桥和小溪塔大桥工程建设的设计、关键施工技术、特殊施工措施和最佳施工方案,归纳总结预应力混凝土斜拉桁架结构的关键技术。

1.4.1 归州大桥简介

归州大桥是主跨为 140 m 的下承式预应力混凝土斜拉桁架连续刚构桥(见图 1-12),全长 344.3 m。设计荷载:汽车-20 级,挂车-100 级,人群 3.5 kN/m^2 。桥梁全宽为 12.54 m(净 7 m + $2 \times 1.35 \text{ m}$ (人行道 + 栏杆) + $2 \times 1.17 \text{ m}$ (桁架结构宽)),主桥分孔为 $(79.45 + 140 + 79.45) \text{ m}$ 。塔高 22.3 m,高跨比为 1 : 7.76,跨度比为 0.49,宽跨比为 1 : 11.16,下弦杆高 1.2 m,梁的高跨比为 1 : 116.7。两主墩高度分别为 59 m 和 71 m。主墩墩身为空心圆形墩,上端为 V 形斜腿,与桁架下弦杆固结形成刚构体系。

1.4.2 小溪塔大桥简介

小溪塔大桥全长 426.56 m。主桥桥跨布置为 $(85.5 + 173 + 85.5) \text{ m}$,为预应力混凝土斜拉桁架连续刚构桥(见图 1-13),标准断面如图 1-14 所示,塔高 22.3 m,高跨比为 1 : 7.76,跨度比为 0.49;桥梁全宽为 15 m(净 9 m + $2 \times 1.5 \text{ m}$ (人行道) + $2 \times 0.25 \text{ m}$ (栏杆) + $2 \times 1.25 \text{ m}$ (桁架结构宽)),宽跨比为 1 : 11.5,下弦杆高 1.5 m,梁的高跨比为 1 : 115.3。设计荷载:城市-A 级,人群 3.5 kN/m^2 。

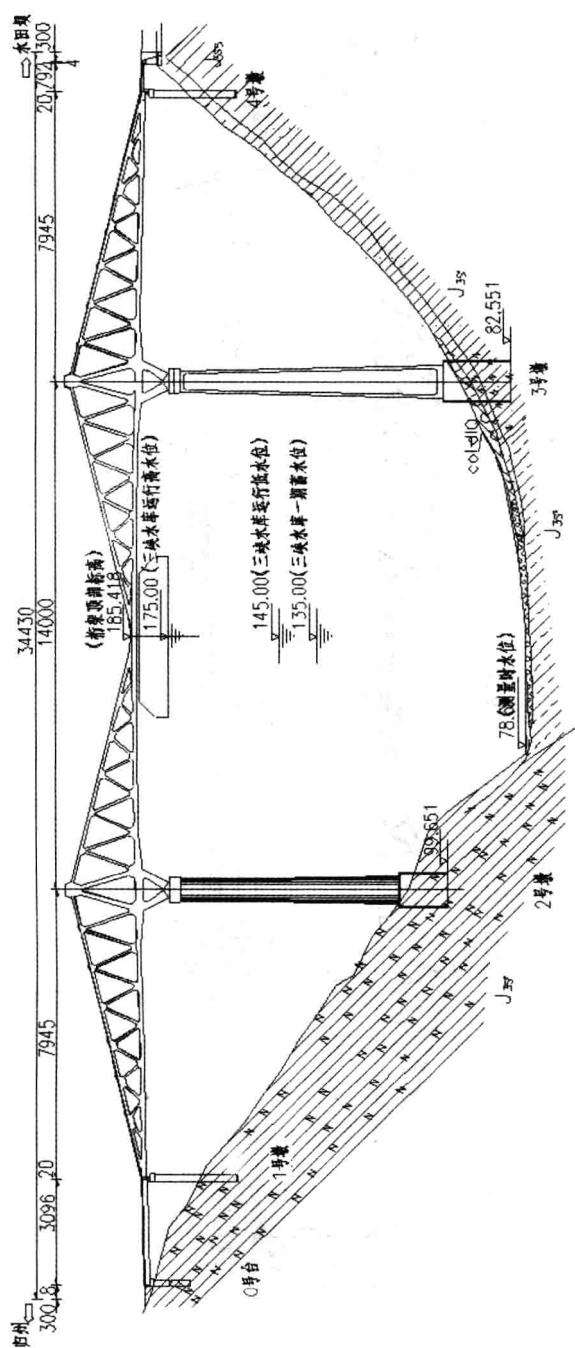


图 1-12 归州大桥桥型布置图(单位:cm)

