



大跨度悬索桥 施工实例集

(第一册)

中交第二公路工程局有限公司 主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

Dakuadu Xuansuoqiao Shigong Shiliji
大跨度悬索桥施工实例集

(第一册)

中交第二公路工程局有限公司 主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

《大跨度悬索桥施工实例集》为系列丛书。本书第一册共有八章内容,即概论、厦门海沧大桥、润扬长江公路大桥、舟山西堠门大桥、泰州长江公路大桥、广州珠江黄埔大桥、钱塘江九桥、施工控制。本书全面介绍了我单位近年来已建成的大跨径悬索桥下部及上部结构施工技术。

本书可供桥梁设计、研究、施工技术人员及高等院校桥梁工程专业高年级本科生及研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

大跨度悬索桥施工实例集. 第1册 / 中交第二公路工程局有限公司主编. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014. 11

ISBN 978-7-114-11655-1

I. ①大… II. ①中… III. ①长跨桥—悬索桥—桥梁施工—建筑实录 IV. ①U448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 201571 号

书 名: 大跨度悬索桥施工实例集(第一册)

著 作 者: 中交第二公路工程局有限公司

责任编辑: 袁 方 王绍科

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

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)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 880×1230 1/16

印 张: 19.5

插 页: 2

字 数: 558 千

版 次: 2014 年 11 月 第 1 版

印 次: 2014 年 11 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11655-1

定 价: 120.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

厦门海沧大桥



▲ 上部结构施工



▲ 主缆紧缆施工



▲ 主缆缠丝施工



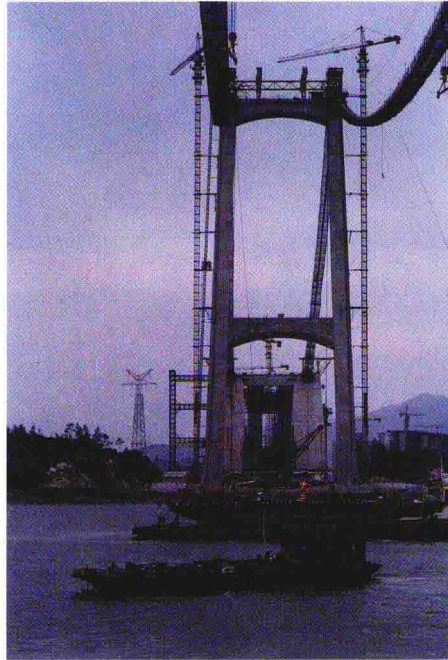
▲ 主缆跨缆吊机拼装



▲ 猫道面网铺设



▲ 猫道承重索架设



▲ 钢箱梁吊装施工



钢箱梁合龙段吊装 ▶



◀ 项目经理部

润扬长江公路大桥



▲ 上部结构施工全景



▲ 主索鞍吊装



▲ 晚间调索作业



▲ 南锚碇基础



▲ 猫道架设完成



▲ 主缆紧缆施工



▲ 钢箱梁吊装



▲ 主桥合龙



▲ 主桥贯通



◀ 建成后的润扬长江公路大桥

舟山西堠门大桥



▲ 直升机牵引先导索架设



▲ 钢箱梁合龙段吊装



▲ 主桥及接线工程全景



▲ 主缆及南引桥全景



▲ 全桥涂装期间全景



▲ 建成后的舟山西堠门大桥

泰州长江公路大桥



▲ 北锚碇钢沉井浇筑



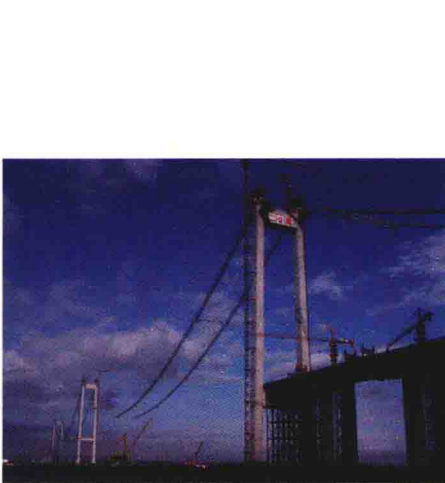
▲ 主缆施工完毕



▲ 首段钢箱梁吊装



▲ 北塔接高施工



▲ 猫道施工完毕



▲ 建成后的泰州长江公路大桥

广州珠江黄埔大桥



▲ 锚碇基础施工场景



▲ 北塔施工场景



▲ 主桥边跨施工场景



◀ 钢箱施工场景



建成后的广州珠江黄埔大桥 ▶

钱塘江九桥



▲ 基础施工场景



▲ 上部结构施工场景



▲ 挂篮悬浇施工



◀ 钢箱梁顶推施工



建成后的钱塘江九桥 ▶

编 委 会

主 任：韦世国

副 主 任：薛光雄

编写人员：（按姓氏笔画排序）

王 君	王高彦	石虎强	冯 刚
先正权	齐 鹏	刘 晨	孙镇国
杜洪池	吴 辛	吴建强	张明闪
杨 光	林吉明	孟凡伟	梁进达
郭 恒	施津安	喻胜刚	韩学伟



序

现代悬索桥,不仅以其良好的跨越能力、卓越的结构性能以及优美的建筑造型,在桥梁建筑中占据着十分重要的地位,更代表着一个国家、地区的经济发展、科技创新实力,倍受世人关注。20世纪30年代,美国建造了第一座跨度超千米的大跨径悬索桥——旧金山金门大桥(主跨1280m),这一世界最大桥跨纪录保持了27年之久。旧金山金门大桥建设水平和建设成就曾令世界各国望其项背。直至20世纪中叶,悬索桥建设在欧洲、亚洲逐步发展并有所创新;20世纪末,科技进步日新月异,伴随着信息时代的到来,悬索桥的发展逐渐从美、欧转移到了亚洲的日本和中国,尤其在20世纪最后十年,中国的悬索桥建设实现了跨越式发展。

现如今,在已建成的世界排名前20位的大跨径悬索桥中,中国占据了9席。其中由中交第二公路工程局有限公司(以下简称“中交二公局”)作为主要建设者参与建设的就有5座,即:2008年建成、跨径位居世界第二、刷新中国悬索桥跨径纪录的舟山西堠门大桥;2005年建成、跨径当时位居世界第三的润扬长江公路大桥;2012年建成、世界第二大跨径、三跨连续钢箱梁悬索桥南京长江第四大桥;2008年建成的广州黄埔大桥;2012年建成、世界首座千米级三塔两跨悬索桥泰州长江公路大桥。

在以公路桥梁为主业的50年的发展历程中,中交二公局不仅成为了中国桥梁建设的主力军,并且通过世界级悬索桥梁的建设,成长为国内乃至国际桥梁施工技术领军者。通过这些桥梁建设,中交二公局不仅为企业赢得了“鲁班奖”、“詹天佑奖”、“国家优质工程奖”等各项国内顶级建筑大奖,还获得了美国国际桥梁大会授予的“古斯塔夫·林德萨尔奖”、英国结构工程师学会授予的“卓越结构工程大奖”等国际奖项,推进了世界悬索桥前沿技术的发展与进步。

在悬索桥施工技术迅速发展的今天,中交二公局及时组织专业技术人才,对这些超大型、大型悬索桥施工技术进行了全面的回顾和总结,一方面形成了其自有的、科学的、可行的施工控制理论,另一方面也为未来国内悬索桥施工技术的创新和发展打下坚实的理论基础。

虽然此类书籍的编著在行业内已有先例,但系统总结多个世界级悬索桥施工实例却是第一次。本书的主要编著者分别是各悬索桥的主要参与者和科技研发人员,他们拥有丰富

的悬索桥施工经验,其中大多数为教授级高级工程师、高级工程师。此书所述施工案例详实、施工工艺全面、技术总结清晰、理论功底深厚,值得献身桥梁事业的有识之士研读。

希望这部实践专著能够为中国桥梁事业的发展起到更好的推动作用!



2014 年 6 月



前言

《大跨度悬索桥施工实例集》(第一册),主要介绍了由中交二公局建设的六座悬索桥——厦门海沧大桥、润扬长江公路大桥、舟山西堠门大桥、泰州长江公路大桥、广州黄埔大桥、钱塘江九桥关键构造部位的施工技术,对悬索桥的构造设计、计算分析方法、锚固结构制造与安装、锚体混凝土施工、上部结构安装等进行了较为详细的探讨,形成了成套的技术理论和相应的施工方法,具有很强的实践指导意义,可供桥梁设计、研究、施工技术人员及高等院校桥梁工程专业高年级本科生及研究生学习参考。

本册共分为八章,分别介绍了三跨连续漂浮体系悬索桥、超大跨径悬索桥、千米级三塔两跨悬索桥、超大地连墙锚碇基础悬索桥、自锚式两塔三跨空间缆悬索桥等几种主要的现代悬索桥桥型结构和施工技术特点。第一章,主要介绍了悬索桥国外国内发展概况、悬索桥的结构构造、悬索桥施工简介及中交二公局主要参建的悬索桥梁工程简介;第二章,主要介绍了厦门海沧大桥猫道系统、钢箱梁吊装施工技术;第三章,主要介绍了润扬长江公路大桥南汊悬索桥锚碇基础、上部结构安装施工技术;第四章,主要介绍了舟山西堠门大桥锚碇、塔柱、牵引系统架设、钢箱梁吊装施工技术;第五章,主要介绍了泰州长江公路大桥锚碇、上部结构施工技术;第六章,主要介绍了广州黄埔大桥地连墙导墙、地下连续墙、墙底注浆、基坑开挖及内衬施工技术;第七章,主要介绍了钱塘江九桥钢箱梁顶推施工、空间缆索体系转化施工技术;第八章,主要介绍了控制网、上部结构安装工程施工测量、施工监控等技术。

本册在编写过程中得到了行业内、局内专家的指点和帮助,也得到了参加建设的工程技术人员的大力支持,在此一并表示衷心感谢!

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免存在疏漏和不足之处,还望读者批评指正。

王君

2014年6月



目 录

第一章 概论	1
第一节 悬索桥的发展概况	1
第二节 悬索桥的结构构造	5
第三节 悬索桥施工简介	6
第四节 中交二公局承建的悬索桥	11
第二章 厦门海沧大桥	14
第一节 工程概况	14
第二节 猫道系统	16
第三节 钢箱梁吊装	22
第四节 结语	28
第三章 润扬长江公路大桥	29
第一节 工程概况	29
第二节 锚碇基础——排桩冻结施工	32
第三节 上部结构安装施工	51
第四节 结语	97
第四章 舟山西堠门大桥	100
第一节 工程概况	100
第二节 锚碇施工	102
第三节 塔柱施工	118
第四节 牵引系统架设施工	132
第五节 钢箱梁吊装施工	141
第六节 结语	152
第五章 泰州长江公路大桥	153
第一节 工程概况	153
第二节 锚碇基础——沉井施工	158
第三节 上部结构施工	187
第四节 结语	235
第六章 广州珠江黄埔大桥	238
第一节 工程概况	238
第二节 地连墙导墙施工	239
第三节 地下连续墙施工	241
第四节 墙底注浆施工	249
第五节 基坑开挖及内衬施工	253

第六节 结语 262

第七章 钱塘江九桥 263

第一节 工程概况 263

第二节 钢箱梁顶推施工 266

第三节 空间缆索体系转换 279

第四节 结语 281

第八章 施工控制 283

第一节 概述 283

第二节 控制网 283

第三节 上部结构安装工程施工测量 284

第四节 上部结构安装工程施工监控 291

第五节 结语 296

参考文献 297

第一章 概 论



悬索桥是指以悬索为主要承重结构的桥梁,其主要结构由主缆、索塔、锚碇、吊索、加劲梁组成。其受力特点是:将作用在桥面荷载由吊索传至主缆,再传递到索塔和锚碇,传力途径明确。

现代悬索桥的主缆采用高强度钢丝作为主要承拉结构,具有跨越能力大、受力合理、能最大限度发挥材料强度、造价经济等特点。目前,世界跨径大于 1000m 的桥梁大部分以悬索桥为主。

第一节 悬索桥的发展概况

一、国外悬索桥的发展

1. 美国悬索桥的发展

(1) 美国的悬索桥

20 世纪初,美国大城市的兴起,促进了大跨桥梁建设的发展。在 1920 年之前,美国相继建成的悬索桥有:匹兹堡桥、布鲁克林桥、威廉斯堡桥、曼哈顿桥等。接着在 1931 年,美国在国际上率先建成跨度超过千米的乔治·华盛顿(George Washington)大桥,主跨达 1067m;1937 年建成的旧金山金门(Golden Gate)大桥,主跨为 1280m 曾保持世界上最大桥跨纪录达 27 年之久,使美国的悬索桥建设成就遥遥领先于其他各国。

1940 年,美国发生了塔科马海峡(Tacoma Narrows)老桥风毁事故,悬索桥建设步伐放慢。经过专家们的多方调查、风洞试验研究和科学分析,认识到风对悬索桥有涡流和颤振的动力作用。即塔科马海峡老桥用下承式钢板梁作为加劲梁,抗风可靠性极差。通过此风毁事故的教训,世界各国在较大跨悬索桥中,不再使用钢板梁作为加劲梁。

20 世纪 50 年代,美国的悬索桥又蓬勃发展起来,其代表作为 1964 年修建的维拉扎诺海峡(Verrazano Narrows)桥,主跨达 1298m,双层桥面,12 条车道,创造了新的桥梁跨径世界纪录,并保持 17 年之久。近年来,于 2003 年建成了主跨 728m 的卡奎内兹钢箱梁悬索桥,2007 年建成了塔科马海峡新桥(New Tacoma Narrows Bridge),主跨为 853m。

(2) 美国悬索桥的特点

一般而言,美国悬索桥有如下特点:

- ①绝大部分为三跨地锚式,索塔采用钢结构,钢结构采用铆接或栓接;
- ②主缆都采用空中纺线法(Air Spinning 法)制造架设;
- ③采用竖直的吊索;
- ④除少数小跨的城市桥外,绝大部分加劲梁采用桁架形式;
- ⑤加劲梁是非连续的,在索塔处有伸缩缝;
- ⑥采用钢筋混凝土桥面,绝大部分是公路桥,个别能通行城市客运电车。



2. 欧洲悬索桥的发展

(1) 欧洲的悬索桥

进入 20 世纪以后,欧洲悬索桥的建设继续发展并有所创新。法国于 1959 年建成了主跨为 608m 的坦卡维尔悬索桥,其创新之处为加劲桁梁连续,在桥塔处不断开,将主缆与加劲梁在主跨跨中点固接,桥塔为混凝土结构。

英国在 1964 年和 1966 年先后建成主跨为 1006m 的 Forth 公路悬索桥和主跨为 988m 的 Severn 桥。Forth 桥基本上属美国流派的悬索桥,主要技术是从美国引进的,其他方面有所改进,而 Severn 桥的建成则是悬索桥发展中的一个新的里程碑。该桥的创新特点体现在第一次采用了扁平纤细、截面具有良好抗风性能的全焊流线型钢箱梁,打破了以往悬索桥全为钢桁架加劲梁的局面;另外该桥还采用了斜吊索以提高桥梁的抗风阻尼。

随后 1970 年在丹麦修建的主跨为 600m 的小贝尔特(Little belt)桥和 1973 年在土耳其建成的主跨为 1074m 的 Bosphorus 一桥,主要结构构思均与 Severn 桥相似,为扁平流线型加劲钢箱梁。1981 年,英国又建成了 Humber 特大跨悬索桥,主跨为 1410m,也是扁平钢箱加劲梁,采用混凝土桥塔,为当时世界上第一大跨径桥梁。1988 年土耳其又建成 Bosphorus 二桥,主跨为 1090m,扁平加劲钢箱梁,采用了垂直吊索。1997 年建成的瑞典高海岸大桥,主桥跨度 1210m;1998 年丹麦大贝尔特(Great belt)悬索桥建成,主跨为 1624m,也为扁平钢箱加劲梁。

此间,挪威在 1977 年修建的 kvalsund 桥,主跨 525m,主缆为密封钢丝绳材料,单根钢丝绳直径 72mm。1992 年 12 月通车的霍达兰卑尔根阿斯克沃伊大桥,主跨 850m,为挪威最大跨径的悬索桥,主缆也采用了密封钢丝绳材料。

1999 年改造成公路六车道、铁路双轨的双层葡萄牙里斯本 4 月 25 日大桥,是世界上最大跨径的公铁两用桥。拟建的意大利墨西拿海峡大桥,主跨 3300m,桥宽 60m,建成后将是世界最大跨径的桥梁。

欧洲现代大跨悬索桥的修建,确定了混凝土桥塔、扁平流线型全焊加劲钢箱梁悬索桥的优势,且比桁架式加劲梁节省工程投资费用 10% 左右。

(2) 欧洲悬索桥的特点

欧洲悬索桥的主要特点有如下几个方面:

- ①加劲梁采用流线型扁平钢箱梁;
- ②部分桥梁采用斜吊索;
- ③采用混凝土桥塔;
- ④采用连续的加劲梁,有的悬索桥采用主缆与加劲梁在主跨跨中点固接的形式;
- ⑤钢结构用焊接代替铆接和栓接。

3. 日本悬索桥的发展

日本悬索桥的发展主要是通过本州四国联络桥的修建开始的,本四联络二线中有 22 座大桥,其中 11 座是悬索桥。在本四联络线修建之前,日本于 1962 年在福冈建成主跨为 367m 的若户桥,其后在 1973 年建成跨度为 178m + 712m + 178m 的关门一桥,1977 年又在长崎建成主跨为 465m 的平户桥。通过以上三座悬索桥的实践,接着在本四联络桥中陆续建成一系列的悬索桥。在这些悬索桥中包括有 1983 年建成位于尾道—今治线的因岛大桥,跨度为 250m + 770m + 250m;1985 年建成位于神户—鸣门线的大鸣门桥,跨度为 423m + 876m + 423m,以及 1988 年建成的跨度为 230m + 940m + 230m 下津井大桥,跨度为 274m + 990m + 274m 的北备赞大桥,跨度为 274m + 1100m + 274m 的南备赞大桥;世界跨度纪录的明石海峡大桥,跨度为 960m + 1991m + 960m,受到全世界的瞩目。

日本在修建上述悬索桥的构思方面,接受美国模式的特点较多。在本四联络线中的悬索桥之所以仍采用桁式加劲梁,主要考虑其有公、铁两用桥,采用桁架梁易于布置成双层桥面使公、铁分层通过。但对英国模式的悬索桥,日本也做过些尝试性的实践,其加劲梁都采用钢箱梁,如位于大阪跨度为 120m +

300m + 120m 的北港桥、1987 年建成跨度为 330m + 720m + 330m 的白鸟桥,以及 1988 年建成跨度为 140m + 560m + 140m 的大岛桥。

由于工业的发达和技术的发展,日本悬索桥也有如下几个特点:

- ①主缆的制造和架设基本上用预制平行钢丝索股法 (PPWS)代替了空中纺线法;
- ②采用大跨度公、铁两用悬索桥,以缓冲梁来解决铁路对桥面伸缩量和转角方面的要求;
- ③采用连续桁梁,在桥塔处没有伸缩缝;
- ④采用正交异性板代替预应力钢筋混凝土板;
- ⑤日本处于地震多发区,索塔多采用钢塔。

4. 韩国悬索桥的发展

韩国悬索桥近年来也开始大量修建,但其技术受日本影响很大,例如位于仁川机场高速 1995 年建成的永宗大桥,为主跨 300m 的自锚式双层钢桁梁悬索桥。最新建成的悬索桥工程还有:2012 年建成的光阳大桥,跨度组合为 357.5m + 1545m + 357.5m,加劲梁采用分离式钢箱梁结构,类似于我国舟山西堠门大桥;2011 年建成的木浦大桥,主跨 840m;将于 2013 年建成的蔚山大桥,主跨 1150m,采用单跨双铰钢箱梁结构设计。

二、国内悬索桥的发展

从 20 世纪 50 ~ 80 年代,我国修建的悬索桥跨径大多在 200m 以内,结构简单,工程规模不大,承载能力较小。

上世纪末期开始,悬索桥的发展中心逐渐从欧、美转移到了亚洲的日本和中国,使这一古老的桥型在自己的故乡又焕发了新的活力。中国的悬索桥自进入 20 世纪 90 年代以来,随着我国国民经济的高速发展,交通基础工程的建设取得了巨大的成就。为了适应公路事业的发展,我国在大江、大河、沿海和中西部山区修建了一系列特大跨径的悬索桥,并在全世界已建成的最大跨径的悬索桥中,无论跨径还是数量,均占据了重要的地位。具体见表 1-1 所示。

世界已建成大跨径前 20 位主要悬索桥一览表 表 1-1

序号	桥 名	位置	完成日期	桥跨布置 (m)	主梁结构	截面形式
1	明石海峡大桥	日本	1998	960 + 1991 + 960	三跨简支	钢桁梁
2	西堠门大桥	中国	2009	578 + 1650 + 485	两跨连续	分离式钢箱梁
3	大贝尔特桥	丹麦	1998	535 + 1624 + 535	三跨连续	钢箱梁
4	光阳大桥	韩国	2012	357.5 + 1545 + 357.5	三跨连续	分离式钢箱梁
5	润扬长江大桥	中国	2005	470 + 1490 + 470	单跨简支	钢箱梁
6	南京长江四桥	中国	2012	410.2 + 1418 + 363.4	三跨连续	钢箱梁
7	恒伯尔大桥	英国	1981	530 + 1410 + 280	三跨简支	钢箱梁
8	江阴长江大桥	中国	1999	369 + 1385 + 309	单跨简支	钢箱梁
9	香港青马大桥	香港	1998	355 + 1377 + 300	两跨连续	钢箱桁架梁
10	维拉扎诺桥	美国	1964	370 + 1298 + 370	三跨简支	钢桁梁
11	阳逻长江大桥	中国	2008	250 + 1280 + 440	单跨简支	钢箱梁
12	金门大桥	美国	1937	343 + 1280 + 343	三跨简支	钢桁梁
13	高海岸桥	瑞典	1997	317.5 + 1210 + 287.5	三跨连续	钢箱梁
14	湖南矮寨大桥	中国	2012	242 + 1176 + 116	单跨简支	钢桁梁
15	麦基纳大桥	美国	1957	549 + 1158 + 549	三跨简支	钢桁梁
16	广州黄埔大桥	中国	2008	290 + 1108 + 350	单跨简支	钢箱梁
17	南备赞大桥	日本	1988	274 + 1100 + 274	三跨连续	钢桁梁
18	博斯普鲁斯 II 桥	土耳其	1988	210 + 1090 + 210	单跨简支	钢箱梁
19	贵州坝陵河桥	中国	2009	248 + 1088 + 228	单跨简支	钢桁梁
20	泰州长江大桥	中国	2012	390 + 1080 + 1080 + 390	三塔两跨	钢箱梁



中国的悬索桥建设综合了世界各国悬索桥发展的技术成果,主缆均采用 PPWS 法架设主缆,索塔多为混凝土索塔;沿海地区有水运条件的悬索桥多采用扁平钢箱加劲梁,中西部山区多采用钢桁加劲梁。

1992 年广东汕头海湾大桥的开工建设,拉开了我国现代化长大悬索桥建设的序幕。在 20 世纪末的十年中,我国的悬索桥建设实现了跨越式的发展,先后成功地建成了汕头海湾大桥、西陵长江大桥、虎门大桥、江阴长江大桥、厦门海沧大桥、宜昌长江大桥、重庆忠县长江大桥、万州长江二桥等长大跨径悬索桥。这些悬索桥特色鲜明,而且技术上各有创新;上述悬索桥的成功修建及所取得的成就,大大缩短了我国现代化长大跨径悬索桥与世界水平的差距。

进入 21 世纪以来,我国修建了一系列具有世界先进水平的悬索桥。世界最大跨径的悬索桥前 20 位中,我国占据了 9 席。2005 年通车的润扬长江公路大桥,主跨 1490m 位居当时世界第三,是新世纪我国自行设计、自行建造、自行管理的一座具有世界先进水平的特大型桥梁。2009 年建成的舟山西堠门大桥,主跨 1650m,位居世界第二,又一次刷新了中国悬索桥跨径的新纪录。主跨 1088m 的贵州坝陵河大桥、主跨 900m 的湖北四渡河大桥和主跨 1176m 的湖南矮寨大桥均为位于我国中西部山区的峡谷桥梁,由于运输条件较差,均采用了钢桁加劲梁结构,采用了多种创新性的施工方法。

除了跨径的增加外,悬索桥技术上的创新也应接不暇。2012 年通车的泰州长江公路大桥,主跨 1080m,为世界首座千米级三塔两跨悬索桥,跨径位居同类型桥梁第一位;南京长江第四大桥主跨 1418m,为世界第二大跨径的三跨连续钢箱梁悬索桥。2013 年通车的郑州桃花峪黄河公路大桥,为主跨 406m 的自锚式悬索桥,跨径居世界同类型桥梁第一位。

三、悬索桥的发展展望

目前,正在规划中的墨西哥海峡大桥,其主跨达 3300m。悬索桥作为跨越能力最强的桥型,今后的发展有着广阔的空间,同时世界范围内的工程技术人员也对悬索桥桥型的发展进行着坚持不懈的探索和创新。

(1) 设计理论方法的研究

大跨径悬索桥设计的难点主要是抗风设计,这将是悬索桥设计中无法回避而且必须认真研究的重点。悬索桥的设计理论正在不断地研究完善,从古典的弹性理论、挠度理论到广泛使用的有限位移理论和运用电子计算机进行的各种非线性分析和动力分析,悬索桥的设计方法也在不断完善和优化。国内对悬索桥的抗风设计理论、施工技术也在不断研究、创新,近年来,出版了许多有关悬索桥设计、施工、控制、试验等方面的技术专著。

(2) 特大跨径悬索桥的研究

目前,世界上最大跨度的桥梁尚未超过 2000m,悬索桥的最大跨度能达到多少,是桥梁工程技术人员正在研究的课题。国外曾有文献报道,如采用传统的材料,只考虑施工架设技术的可行性,最大跨度为 3500~5000m。对特大跨悬索桥,已有学者提出用悬索桥和斜拉桥相结合的拉吊组合桥型,以提高其跨越能力,这也将是悬索桥突破目前跨径的研究方向之一。

(3) 施工方法的改进及材料的更新

近年来,随着悬索桥的不断发展,各国在悬索桥的施工中都在不断改进和革新,如索塔的结构、主缆、加劲梁、表面防护工艺设备、控制系统等。其主要表现在以下几个方面:

①创新研究新型施工设备,如新型的主缆紧缆机、缠丝机、大吨位跨缆吊机,加强机、电、液一体化、计算机集成控制设计,提高施工设备的技术能力和安全可靠,使其满足特大跨径悬索桥施工的需要。例如提高卷扬机的牵引能力和牵引速度及计算机集成控制等,目前规划用于特大跨径悬索桥的大吨位卷扬机,其张力输出达 50t 以上。

②改进工厂预制平行钢丝主缆工艺,PPWS 主缆索股最大长度可达 5000m,可适应特大跨径悬索桥主缆采用 PPWS 法架设的需要。改进的更高效的 AS 工法,也可满足超大跨径悬索桥主缆架设的需要。

③新材料的使用,加强耐久性、抗腐蚀性、轻型化材料的研究。目前,主缆钢丝的抗拉强度不断增强,