

“十二五”国家重点图书出版规划项目
交通运输建设科技丛书·公路基础设施建设与养护
国家科技支撑计划资助项目(2008BAG07B00)

The Key Engineering Technology of
Xihoumen Bridge Construction

西堠门大桥 建设关键技术



宋 晖 沈 旺 王昌将 等 编著



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

“十二五”国家重点图书出版规划项目

交通运输建设科技丛书·公路基础设施建设与养护

国家科技支撑计划资助项目(2008BAG07B00)

西堠门大桥建设关键技术

宋 晖 沈 旺 王昌将 等 编著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书以国家科技支撑计划项目“跨海特大跨径钢箱梁悬索桥关键技术研究及工程示范”(2008BAG07B00)为依托,介绍了西堠门大桥的基本概况与主要设计、施工技术,重点阐述了大桥建设关键技术研究成果,包括跨海特大跨径钢箱梁悬索桥勘察设计关键技术、跨海特大跨径钢箱梁悬索桥抗风关键技术、大跨径悬索桥缆索系统关键材料研究、海洋环境下特大跨径钢箱梁悬索桥制造安装及控制关键技术、特大跨径钢箱梁悬索桥结构监测系统研发和应用等内容。

本书可供从事桥梁设计、科研、施工和建设管理人员参考使用,也可供相关高等院校桥梁方向师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

西堠门大桥建设关键技术 / 宋晖等编著. — 北京 :
人民交通出版社股份有限公司, 2015.9
(交通运输建设科技丛书. 公路基础设施建设与养护)
“十二五”国家重点图书出版规划项目
ISBN 978-7-114-12463-1
I. ①西… II. ①宋… III. ①箱梁桥—悬索桥—跨海
峡桥—桥梁工程—舟山市 IV. ①U448.19

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 199626 号

“十二五”国家重点图书出版规划项目

交通运输建设科技丛书·公路基础设施建设与养护

书 名: 西堠门大桥建设关键技术

著 作 者: 宋 晖 沈 旺 王昌将 等

责任编辑: 曲 乐 李 喆

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: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 32.25

字 数: 772 千

版 次: 2015 年 9 月 第 1 版

印 次: 2015 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12463-1

定 价: 86.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

交通运输建设科技丛书编审委员会

主 任：庞 松

副主任：洪晓枫 袁 鹏

委 员：郑代珍 林 强 付光琼 石宝林 张劲泉 赵之忠
费维军 关昌余 张华庆 蒋树屏 沙爱民 郑健龙
唐伯明 孙立军 王 炜 张喜刚 吴 澎 韩 敏

总 序

近年来，交通运输行业认真贯彻落实党中央、国务院“稳增长、促改革、调结构、惠民生”的决策部署，重点改革力度加大，结构调整积极推进，交通运输科技攻关不断取得突破，促进了交通运输持续快速健康发展。目前，我国公路总里程、港口吞吐能力、全社会完成的公路客货运量、水路货运量和周转量等多项指标均居世界第一。交通运输事业的快速发展不仅在应对国际金融危机、保持经济平稳较快发展等方面发挥了重要作用，而且为改善民生、促进社会和谐做出了积极贡献。

长期以来，部党组始终把科技创新作为推进交通运输发展的重要动力，坚持科技工作面向需求，面向世界，面向未来，加大科技投入，强化科技管理，推进产、学、研相结合，开展重大科技研发和创新能力建设，取得了显著成效。通过广大科技工作者的不懈努力，在多年冻土、沙漠等特殊地质地区公路建设技术，特大跨径桥梁建设技术，特长隧道建设技术，深水航道整治技术和离岸深水筑港技术等方面取得重大突破和创新，获得了一系列具有国际领先水平的重大科技成果，显著提升了行业自主创新能力，有力支撑了重大工程建设，培养和造就了一批高素质的科技人才，为交通运输科学发展奠定了坚实基础。同时，部积极探索科技成果推广的新途径，通过实施科技示范工程，开展材料节约与循环利用专项行动计划，发布科技成果推广目录等多种方式，推动了科技成果更多更快地向现实生产力转化，营造了交通运输发展主动依靠科技创新，科技创新服务交通发展的良好氛围。

组织出版《交通运输建设科技丛书》，是深入实施创新驱动战略和科技强交战略，推进科技成果公开，加强科技成果推广应用的又一重要举措。该丛书分为公路基础设施建设与养护、水运基础设施建设与养护、安全与应急保障、运输服务和绿色交通等领域，将汇集交通运输建设科技项目研究形成的具有较高学术和应用价值的优秀专著。丛书的逐年出版和不断丰富，有助于集中展示和推广交通

运输建设重大科技成果，传承科技创新文化，并促进高层次的技术交流、学术传播和专业人才培养。

今后一段时期是加快推进“四个交通”发展的关键时期，深入实施科技强交战略和创新驱动战略，是一项关系全局的基础性、引领性工程。希望广大交通运输科技工作者进一步解放思想、开拓创新，求真务实、奋发进取，以科技创新的新成效推动交通运输科学发展，为加快实现交通运输现代化而努力奋斗！

王 昌 顺

2014 年 7 月 28 日

前 言

舟山大陆连岛工程位于浙江省东北部的东海海域,连接舟山、宁波两市,是《国家高速公路网规划》中杭州湾环线的联络线及浙江省、舟山市规划建设的重要跨海通道,属于浙江省重点建设 A 类项目。西堠门大桥是其中的第四座大桥,采用主跨 1 650m 的两跨连续中央开槽宽度 6m 的分体式钢箱梁悬索桥,是我国跨径第一、世界第二的特大型悬索桥。西堠门大桥建设条件极其复杂,施工环境十分恶劣,设计和施工均面临巨大的挑战,大桥历时 5 年建成,攻克了大量难题,积累了许多宝贵经验。

本书内容依托国家科技支撑计划项目“跨海特大跨径钢箱梁悬索桥关键技术研究及工程示范”(2008BAG07B00)的研究成果,介绍了大桥的设计和施工技术,着重介绍了大桥建设关键技术。全书分为 9 章:第 1 章介绍了悬索桥的发展概况、西堠门大桥的工程概况和开展的关键技术研究;第 2 章介绍了西堠门大桥的结构设计,包括总体设计和主桥设计;第 3 章介绍了西堠门大桥的主要施工方案,着重介绍了索塔、锚碇、缆索系统架设和钢箱梁安装的施工方案;第 4 章介绍了跨海特大跨径钢箱梁悬索桥勘察设计关键技术研究取得的成果;第 5 章介绍了跨海特大跨径钢箱梁悬索桥抗风关键技术研究取得的成果;第 6 章介绍了大跨径悬索桥缆索系统关键材料研究方面的新技术;第 7 章介绍了海洋环境下特大跨径钢箱梁悬索桥制造、安装及控制关键技术;第 8 章介绍了特大跨径钢箱梁悬索桥结构监测系统研发和应用;第 9 章介绍了悬索桥发展的几个重要趋势。

本书第 1 章由宋晖、唐茂林、王晓冬编写,第 2 章由宋晖、王晓冬编写;第 3 章由卢伟、邓亨长编写;第 4 章由崔冰、宋晖、王晓冬、童育强编写;第 5 章由葛耀君、廖海黎、曹丰产、王骑编写;第 6 章由张家琦、周代义、张海良编写;第 7 章由崔冰、沈锐利、卢伟、唐茂林、童育强、邓亨长编写;第 8 章由李娜、刘志强、陈卫国编写;全书由宋晖、沈旺、王昌将负责统稿。

本书是舟山跨海大桥广大建设者的劳动成果和智慧的结晶，编者在此表示由衷的感谢！本书的出版得到了中交公路规划设计院有限公司的大力支持，在此致以谢意！限于编者水平，本书内容如有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

作 者
2014 年 5 月

目 录

第 1 章 概述	001
1.1 悬索桥发展概况	001
1.2 西堠门大桥工程概况	006
1.3 开展的关键技术研究	010
第 2 章 结构设计	016
2.1 总体设计	016
2.2 主桥设计	022
第 3 章 主要施工方案	038
3.1 索塔施工方案	038
3.2 锚碇施工方案	045
3.3 缆索系统架设施工方案	053
3.4 钢箱梁安装施工方案	086
3.5 本章小结	119
第 4 章 跨海特大跨径钢箱梁悬索桥勘察设计关键技术	120
4.1 海礁岩体质量分类体系	120
4.2 海礁桥梁地基综合勘察方法	128
4.3 特大跨径钢箱梁悬索桥结构体系及刚度	132
4.4 特大跨径钢箱梁悬索桥关键设计参数研究	136
4.5 分体式钢箱梁关键构造的传力机理及合理构造试验研究	149
4.6 正交异性钢桥面板系统的设计关键技术研究	151
4.7 大直径深长嵌岩桩承载特性及设计方法	165
4.8 本章小结	174
第 5 章 跨海特大跨径钢箱梁悬索桥抗风关键技术	175
5.1 加劲梁和桥塔断面气动选型数值方法	175
5.2 颤振稳定性能及控制	184
5.3 涡激共振性能及控制	193
5.4 静风稳定性能及评价	204
5.5 特大跨径中央开槽箱梁悬索桥抖振响应精细化分析	213
5.6 桥面行车风环境及其改善方法	221
5.7 动力特性测试与分析	229

5.8	气动参振数、风场参数和抖响应现场实测	237
5.9	本章小结	259
第6章	大跨径悬索桥缆索系统关键材料研究	261
6.1	国产特大跨径悬索桥主缆用镀锌钢丝绳制作技术研究	261
6.2	特高强度大规格吊索钢丝绳研制	281
6.3	超长高强悬索桥主缆索股制造技术研究	311
6.4	本章小结	331
第7章	海洋环境下特大跨径钢箱梁悬索桥制造、安装及控制关键技术	332
7.1	特大跨径悬索桥施工控制理论及关键技术	332
7.2	特大跨径悬索桥分体式钢箱梁制造关键技术研究	391
7.3	特大跨径悬索桥架设技术及关键设备研制	408
7.4	本章小结	433
第8章	特大跨径钢箱梁悬索桥结构监测系统研发和应用	434
8.1	引言	434
8.2	跨海悬索桥结构监测、巡检管理关键技术研究	435
8.3	养护管理智能辅助决策支持系统研究	467
8.4	本章小结	490
第9章	展望	492
9.1	悬索桥的跨径发展趋势	492
9.2	悬索桥的材料发展趋势	492
9.3	悬索桥抗风稳定性发展趋势	493
	参考文献	494

第1章 概述

1.1 悬索桥发展概况

1.1.1 发展历史

悬索桥与其他大跨径桥型相比,具有明显的优势和极高的美学价值,被誉为“桥梁皇后”,非常适用于大跨径桥梁。主缆的重力刚度是悬索桥的主要特点,主缆及其锚固系统是其核心构件。主缆是悬索桥的生命线,由塔支承并由强大的锚碇锚固,始终处于受拉状态而不会失稳,拉应力均布于缆的截面,能够充分利用材料强度;加劲梁为桥面主要结构物,其跨度相当于吊索的间距,成为一个小跨径的弹性支承连续梁,主跨的大小与加劲梁刚度没有很直接的关系;恒载主要由主缆承受,加劲梁所承受的弯矩不大,其截面尺寸可以较小。另外,悬索桥的塔高只是斜拉桥的 $1/2$,当航空的限高和通航的净空有要求时,多选用悬索桥;在施工过程中,悬索桥始终处于一个静定结构状态下,容易控制、风险小,也是一些工程师偏爱悬索桥的原因。

悬索桥的历史古老,早期热带原始人利用森林中的藤、竹、树茎做成悬式桥以渡小溪,使用的悬索有竖直的、斜拉的,或者两者混合的。婆罗洲、老挝、爪哇原始藤竹桥,都是早期悬索桥的雏形。不过具有文字记载的悬索桥雏形,最早的要属中国,直到今天,仍在影响着世界悬索桥形式的发展。

远在公元前3世纪,在中国四川境内就修建了“笮”(竹索桥)。秦取西蜀,四川《盐源县志》记载“周赧王三十年(公元前285年)秦置蜀守,固取笮,笮始见于书。至李冰为守(公元前256~公元前251年),造七桥”,七桥之中有一笮桥,即竹索桥。可见至少在公元前3世纪,我国已有了竹索桥。

公元前50年(即汉宣帝甘露四年),已经在四川建成长达百米的铁索桥。1665年,徐霞客有篇题为《铁索桥记》的游记,曾被传教士 Martini 翻译到西方,该书详细记载了1629年贵州境内一座跨度约为122m的铁索桥。1667年,法国传教士 Kircher 从中国回去后,著有《中国奇迹览胜》一书,书中记有建于公元65年的云南兰津铁索桥。该书曾译成多种文字并多次再版。据科技史学家研究,只是在上述书出版之后,索桥才传到西方。可见,中国古代的悬索桥是独创发明并领先的。著名的四川大渡河上由9条铁链组成的泸定桥,是在1706年建成的。

在云南亦较早就出现了悬索桥,据《徐霞客游记·滇游日记》记载的云南龙川东江藤桥云:“龙川东江之源,滔滔南逝。系藤为桥于上以渡……”

悬索桥历史悠久,各个时期都有它不同的特点,现代悬索桥的发展更是如日中天,迄今出现了四个集中发展阶段。



1) 20 世纪 60 年代前美国的悬索桥

美国分别在 1903 年和 1909 年建成了主跨为 488m 的威廉姆斯堡桥和主跨为 448m 的曼哈顿桥,两座桥均在空中用编丝轮将钢丝编拉后组成主缆。20 世纪 20 年代美国建成了两座主跨超过 500m 的悬索桥,分别是 1926 年在费城跨越特拉华河建成的主跨为 533m 的本杰明·富兰克林桥(又名费城·坎姆登桥)和 1929 年在底特律建成的主跨为 564m 的大使桥。在此期间美洲其他国家也建成不少中小跨度的悬索桥。

20 世纪 30 年代是美国修建大跨度悬索桥的最兴盛时期,1931 年建成跨度首次突破千米的乔治·华盛顿桥(主跨达 1 067m)。1936 年建成旧金山-奥克兰海湾大桥,此桥分东西两桥,其中西桥是两座串联衔接的孪生悬索桥,每座均为三跨悬吊,主跨均为 704m,采用钢桁加劲梁。1937 年又建成举世闻名的金门大桥,主跨为 1 280m,曾保持世界最大桥梁跨度纪录达 27 年之久。

以上这些悬索桥的建成,包括两座跨度超过千米的桥梁,形成美国悬索桥的第一次发展高峰,主跨 1 280m 的金门大桥为其代表。

20 世纪 40 年代悬索桥发展却遇到了挫折。1940 年在华盛顿州建成主跨为 853m 的塔科马老桥,因加劲梁断面抗风稳定性差,在建成当年的 11 月 7 日接近中午的时候被风吹断,导致整个世界的悬索桥建设发展整整停滞了 10 年之久。1940 年塔科马老桥发生事故之后,成立了塔科马桥事故调查委员会,通过风洞进行三维模型试验,肯定了无衰减的反复力逐渐累积起来以后,可以发生极度的共振乃至破坏。1950 年按原有跨度重建塔科马新桥,在新桥的设计中,决定将加劲梁改为钢桁梁。通过塔科马新桥的设计,悬索桥的风洞模型试验从此在设计中成为必要的手段。20 世纪 50 年代中期,美国在克服了风灾挫折后重整旗鼓再度致力于修建大跨度悬索桥。1951 年首先于威明登建成主跨为 655m 的特拉华纪念桥。1957 年又建成主跨为 1 158m 的麦基纳克湖口大桥和主跨为 610m 的华尔特·惠斯曼桥。

2) 20 世纪 60 年代欧美的悬索桥

进入 20 世纪 60 年代后,美国首先在 1960 年于纽约的圣·劳伦斯河上建成跨度 655m 的 Seaway Skyway 桥,1964 年又在纽约海湾建成主跨超过金门大桥 18m 的维拉扎诺海峡桥,此桥曾保持了世界桥梁第一大跨度纪录 17 年之久,一直到 1981 年才被英国的主跨为 1 410m 的亨伯尔桥打破。欧洲最早的大跨度悬索桥是 60 年代前期法国建成的主跨为 608m 的坦卡维尔桥。其后,英国在 1964 年与 1966 年先后在苏格兰和布里斯托尔建成主跨为 1 006m 的福斯公路桥与主跨为 988m 的首次采用钢箱梁与斜吊索闻名于世的塞文桥。葡萄牙于 1966 年也在首都里斯本建成主跨为 1 013m 的 4 月 25 日大桥。以上这些悬索桥的建成形成了第二次悬索桥发展高峰,并以美国主跨 1 298m 的维拉扎诺桥和英国主跨 988m 的塞文桥为代表。

3) 20 世纪 70 ~ 80 年代的欧洲与日本的悬索桥

在欧洲,1973 年土耳其伊斯坦布尔建成主跨为 1 074m 的博斯普鲁斯海峡第一大桥。1981 年,英国建成当时世界第一大跨度(1 410m)的亨伯尔桥,并一直将此纪录保持到 1998 年。除此之外,土耳其于 1988 年又建成主跨为 1 090m 的博斯普鲁斯海峡二桥。20 世纪 80 年代为止,日本在本四联络桥的初期建设中建成了主跨 770m 的因岛大桥、大岛大桥、主跨 876m 的大鸣门桥、主跨 940m 的下津井大桥、主跨 1 100m 的南备赞大桥和主跨 990m 的北备赞大桥六座大跨度的悬索桥。综上所述,在 70 年代 ~ 80 年代共建成了 4 座跨度超过千米的大跨度

悬索桥,形成悬索桥发展史上的第三次高峰。其代表是英国的亨伯尔桥与日本的南备赞大桥。

4) 20 世纪 90 年代至今以亚洲为主的悬索桥

进入 20 世纪 90 年代,世界悬索桥的发展 centers 已从欧美移至亚洲,并进入了修建悬索桥的鼎盛时期,目前跨径超过 1 千米的悬索桥有近 20 座。日本在本四联络桥的后期建设中出现跨度再度破纪录的主跨达 1 990m 的明石海峡大桥,以及来岛一桥、二桥与三桥,其中来岛二桥与三桥的主跨分别为 1 020m 与 1 030m。此外,日本还建成主跨为 570m 的彩虹桥与主跨为 720m 的白鸟大桥。20 世纪 90 年代初,中国也进入发展悬索桥的队伍之中。建成的主跨为 1 385m 的江阴大桥和主跨为 1 377m 的香港青马大桥分别跻身世界大跨度桥梁序列中。在 90 年代中期,除了上述两座跨度超过千米的悬索桥之外,还建成厦门海沧大桥、西陵长江大桥、广东虎门大桥、广东汕头海湾大桥及重庆丰都长江大桥等。进入 21 世纪,润扬长江大桥南汉主桥为主跨 1 490m 的单跨悬索桥,当时跨度排名位居中国第一、世界第三。目前国内最大跨径钢箱梁悬索桥为主跨 1 650m 的舟山西堠门大桥,世界排名第二。除此之外,武汉阳逻长江大桥、贵州坝陵河大桥、广州珠江黄埔大桥、湖南矮寨大桥、南京长江四桥、安徽马鞍山大桥、泰州大桥等一大批大型桥梁相继建设成功,标志着我国的建桥水平步入国际先进水平。目前在建的我国最大跨径钢箱梁悬索桥——虎门二桥以及湖南岳阳洞庭湖二桥、云南龙江大桥,这些桥梁建成后,将会使我国悬索桥的设计施工水平迈上一个新的台阶。

除亚洲外,20 世纪 90 年代在欧洲也建成两座跨度超过千米的悬索桥,分别为主跨 1 624m 的丹麦大贝尔特东桥(建成时世界第二)和主跨为 1 210m 的瑞典高海岸桥。以上这些 90 年代修建的悬索桥,其中 7 座跨度超过千米的桥,形成了悬索桥第四次发展高峰。悬索桥的发展日趋成熟,跨度越来越大,结构越来越好,在科技和经济日益发达的当今社会,悬索桥的发展将会更加美好。

大跨度桥梁是国民经济和社会发展的基础设施,也是交通行业新技术集中应用与创新的综合体现。悬索桥作为特大跨度桥梁的最优选择,发展势头迅猛。

1.1.2 计算理论的发展

18 世纪末 19 世纪初,俄国计划在圣彼得堡附近的涅瓦河上建造一座悬索桥,Euler 的学生 Fuss 作为沙俄皇家科学院的数学家受命研究缆索应取的形状,他研究了受均布荷载作用下悬索的线形问题,揭示了缆的几何形状为抛物线,缆的水平内力为恒定值的规律,这是悬索桥计算理论研究的开始。此后,Telford 在修建梅耐桥之前,曾就缆的形状向英国皇家学会主席 Gilbert 请教,Gilbert 因而组织力量研究受均匀应力的变截面缆的形状问题。梅耐桥曾采用了 Gilbert 的建议,并通过眼杆数目的增减来改变主缆截面,因此,梅耐桥可以算是第一座注意到理论研究的悬索桥。紧随其后,Brunel 在设计克里夫顿桥时,就抛物线缆、等截面悬链线缆、均匀应力悬链线缆三种缆索形式进行过计算,其中关于等截面悬链线缆的数学理论是早就由 Bernoulli 解决了的问题。上述关于缆索计算的理论被当时在英国学习和研究悬索桥的法国数学家和工程师 Navier 收录在他 1823 年发表的著作中。

到 19 世纪的上半叶,理论研究还是局限在缆索方面,并没有发展到对全桥整体行为的分析。这时的英国工程师对缆索的刚度不放心,就借助加劲梁或斜拉索来增加全桥的刚度,同样的设计思想也体现在美国工程师 J. A. Roebling 的设计中。例如,在尼亚加拉河公铁两用悬索

桥中,同时使用了典型的带竖吊索的主缆、木质加劲桁架梁和斜拉索,然而,Barlow 曾在 1858 年进行过一系列的模型试验,从试验结果可知:即使采用较弱一些的加劲梁,也能使吊索传到缆上的活载分布相当均匀。于是,就提出了一个主缆和加劲梁如何分担活载的问题。对这个问题的探讨导致 Rankine 在当年提出其“Rankine 理论”,但该理论在本质上却强调了加劲梁的刚度作用。这是关于悬索桥结构分析的第一个理论。尽管它也许并未真正用于悬索桥设计,但它强调加劲梁刚度作用的思想却在一个时期内影响了悬索桥的设计,并且也可能是英国的悬索桥跨度在相当长的时期内停滞不前的原因。

在美国,J. A. Roebling 在修建尼亚加拉河公铁两用桥时,就开始认识到主缆重力刚度的作用。这样的认识,加上高强碳素钢丝的使用,使他敢于把布鲁克林桥的跨度一下提高到 486m,而梁高只是跨度的 1/90。尽管该桥仍然使用了斜拉索,但它同时也依靠了主缆的重力刚度。布鲁克林桥的设计思路主要是来自经验,并不曾进行结构力学理论分析。

在 1880 年前后,鉴于 Rankine 理论分析所得的缆和加劲梁的变形不协调,在欧洲和美国分别有一些学者尝试将拱的弹性分析理论应用于悬索桥,这就导致悬索桥弹性分析理论的建立。弹性理论也使工程师过于注重加劲梁的刚度作用,因此 1903 年建成跨度 488m 的威廉斯堡桥的加劲桁架梁高度达到了跨度的 1/40。

早在 1888 年,奥地利的 Melan 教授就提出了适用于拱和悬索桥一类结构的挠度理论,并于 1906 年做出进一步的改进。这一理论首先由 Moisseiff 应用于 1909 年建成的跨度 448m 的曼哈顿桥的设计计算中,其结果是使曼哈顿桥的加劲梁梁高仅是其跨度的 1/60。

与弹性理论比较,挠度理论在它诞生之后的一段时期曾被称为“精确理论”,但实际上它是建立在若干个简化的假定之上,这就必然要带来误差。再加上其所使用的是非线性微分方程,求解不方便。随着计算数学、计算力学和计算工具的发展,又提出了许多种改进挠度理论的悬索桥分析理论和方法,这其中就发展了有限位移理论。有限位移理论是目前计算桥梁最精确的理论。研究表明,与其他桥型相比,悬索桥具有较强的几何非线性,在计算分析中应该加以考虑。有限位移理论是伴随着电子计算机及有限元方法的发展而产生的。无论何种结构,其受荷载作用的平衡方程应建立在结构变形之后的状态,这就是有限位移理论的实质。

在有限位移理论出现以前,受计算假定和求解规模的限制,悬索桥的分析一般简化为横向、竖向、纵向三种模型进行分析。随着计算技术的进步,基于有限位移理论为基础的空间有限元法是目前解决悬索桥结构分析的最好方法,可以一个模型求解悬索桥受各种荷载的内力和位移,能够仿真模拟悬索桥真实的情况。

1.1.3 施工技术的发展

世界上首座采用空中成缆的铁丝悬索桥是由法国工程师约瑟夫·查理(Joseph Chaley)设计并于 1834 年建成的位于瑞士弗里堡(Fribourg)的柴林根大桥(Grand Pont Suspendu),后来该技术称为空中纺线法(AS, Aerial Spinning),由一名法国工程师路易斯维卡(Louis Vicat)在 1830 年发明,解决了丝缆施工问题,此前的方法是铁丝先绑成主缆再整体提升就位。

1841 年从德国移民到美国的约翰·奥古斯塔斯·罗勃林(John Augustus Roebling)获得了空中纺线法架缆(AS, Aerial Spinning)的专利,将架缆标准化、机械化,而此前都是手动空中纺线法架缆。1854 年,在他修建的尼亚加拉河悬索桥(主跨 250m)中使用了该方法。1870 年,

他承担了布鲁克林桥(主跨 486.3m)的建设任务,但不久就因工伤逝世。这一座举世闻名的大桥后来由他的儿子 W·罗柏林接办直到完成,总工期历时 13 年。该桥大缆 4 道,钢丝总质量 320t,但用于空中送丝架缆的时间却是 21 个月。随后,这项技术、所用机具及施工组织、安全设施等有很大改进。美国 1964 年完成的韦拉扎诺桥,大缆钢丝总质量 3 465t,架缆所用时间不到 6 个月。

1969 年,美国在罗德岛(The State of Rhode Island and Providence Plantations)建成了克莱本佩尔新港大桥(Claiborne Pell Newport Bridge),跨度为 545m。该桥首次使用预制平行丝股(prefabricated parallel wire strand)法架设主缆,再次创立一种现代悬索桥主缆的施工方法,发明人为杰克逊 L. 德基(Jackson L. Durkee),并于 1970 年申请专利。新港大桥主缆采用 76 股 61 丝直径为 0.2in(1in=0.025 4m)的高强钢丝,钢丝总长 8 000mile(1mile=1 609.344m),质量 2 280t。

早期的悬索桥加劲梁一般是桁架式的,所采用的架设方法是像桁架桥的悬臂安装法那样,采用同样的机具——能沿着桁架梁上弦行走的德立克。不同于悬臂安装法的是,它不靠已成梁段来承担其后拼装的自重(该自重将对前者产生悬臂弯矩),而是立即将刚拼好的梁段同其对应的吊索相连,让所有已拼梁段的自重都经由吊索而传给大缆,由大缆承担。对于三跨两铰式悬索桥,架梁一般需要德立克 4 台。梁段各构件的提升顺序是从两塔开始,分别向两侧(一侧指向跨中,另一侧指向岸边)进行。边跨与主跨的跨度比各桥一般不同。为了使塔顶纵向位移尽可能较小,对于在主跨拼成几个梁段时,边跨应该拼几个,应进行推算。在历史上,曾经因为推算的速度赶不上施工需要,而使用全桥的结构模型试验(例如旧金山海湾桥)来决定其较为合理的梁段提升次序。

对于正在架设中的加劲梁,其风动力稳定性能如何,是值得探讨的。英国福斯桥的主跨是将尺寸为 2m×7.32m 的正交异性钢桥面板叠置在桁架梁上。风洞试验表明:这样的结构在其全跨不曾建成时,当风速超过 22m/s 时便不够稳定,但若将桥面板尺寸暂时改为 2m×4.88m,那就可以将该临界风速提高到 44.4m/s。于是,在其架梁的第一阶段,就只架设 2m×4.88m 的桥面板。

在旧金山海湾桥施工中,第一次将加劲梁的架设改为缆载起重机,先预制成梁段,然后装在驳船之上并浮运到桥下,用可以行驶于大缆的起重台车,借助滑轮组及钢丝绳将梁段提升到位。其梁段包含加劲桁架梁两个节间,其最大质量是 180t。这一施工方法是经济合理的,随后便被广泛采用。在维拉扎诺桥建设中,其设备有较大改进,所提升的梁段最大质量达到 357t。而更为合理的措施是改用液压连续提升千斤顶,用钢绞线提升梁段。香港青马大桥、江阴长江大桥也使用了这种方法,提升的梁段质量一般是 400~500t。日本的来岛悬索桥施工时,又给运梁驳船配备了“动力定位系统”(Dynamic Positioning System),使此法在海运繁忙处也能使用。

将加劲梁设计为梭状扁钢箱梁,始于塞文桥。其合理的架梁方法是采用梁段提升法。该桥在节约资金方面采取如下措施:在梁段提升方面,不是将梁段装在驳船上,而是将梁段作为浮体(梁端用薄钢板封头)来拖运。其梁段最大质量是 130t,采用两点起吊的布置,这使梁段在提升过程中不易控制(当顺桥向风速是 5.5m/s 时,其俯仰振幅就已不小)。目前主缆架设采用的 AS、PPWS 法,加劲梁的液压缆载起重机吊装施工法比起 19 世纪 70、80 年代更加成熟。



1.1.4 技术挑战

悬索桥以其受力性能好、跨越能力大、外形美观、抗震性能好、施工安全快捷而成为跨越大江大河、海峡港湾等交通障碍的首选桥型。但是,随着悬索桥跨径不断突破新的纪录,对大跨径悬索桥的建设提出了新的技术挑战。

首先,悬索桥的理论极限跨径取决于主缆材料强度,从19世纪悬索桥主缆采用铁链到目前采用1770MPa级的高强镀锌钢丝,悬索桥跨径也从最初的200~300m发展到了明石海峡大桥的1991m。主缆材料强度的提高是发展更大跨径悬索桥的基础和前提。由于主缆自重占恒载的比例达30%左右,活载仅为恒载的10%甚至更低,因此开发更高强度主缆材料成为特大跨径悬索桥发展的迫切问题。

第二,特大跨径悬索桥结构抗风稳定性问题更加突出。由于特大跨径悬索桥跨越海峡、江湖河口,桥位处风环境比较复杂,结构抗风稳定性成为大桥能否安全建成与运营的最为重要的技术问题。20世纪40年代发生于美国塔科马大桥的风毁事件,促使人们对悬索桥加劲梁的结构形式、气动措施进行试验研究。随着跨海悬索桥建设的逐步开展,建设条件和工程环境变得更为复杂、更为恶劣,因而对悬索桥的抗风性能进行全面系统的研究,提出可靠的结构形式与措施,成为建设成败的关键问题之一。

第三,跨海特大跨径悬索桥桥位处岛礁地貌,处于台风侵袭范围,施工条件恶劣,例如西堠门大桥地处台风频发的浙江舟山群岛,一些传统的施工与控制方法不能适用于如此复杂的建设条件。从该桥所采用的加劲梁形式这个技术层面上,也已突破了已建钢箱梁悬索桥的极限,对于这样特大跨径的跨海悬索桥,目前现有的悬索桥技术标准、规范难以涵盖。因此必须在一些关键领域进行技术攻关,支撑大桥的建设,并为今后类似或更大跨度悬索桥提供参考与借鉴。

1.2 西堠门大桥工程概况

舟山大陆连岛工程位于浙江省东北部的东海海域,连接舟山、宁波两市,是《国家高速公路网规划》(7918规划)中杭州湾环线的联络线及浙江省、舟山市规划建设的重要跨海通道,属浙江省重点建设A类项目。工程起于舟山市册子岛桃夭门岭,接桃夭门大桥西接线,于门头山经老虎山跨越西堠门水道,止于金塘岛上雄鹅嘴,接金塘大桥接线,初步设计全长5.45km,其中西堠门大桥长2.586km,册子岛侧接线长2.864km。按双向4车道高速公路设计,设计速度80km/h,初步设计概算总投资约23.61亿元,建设工期4.5年。西堠门大桥主桥采用主跨1650m的两跨连续中间开槽6m的钢箱梁悬索桥,孔跨组合为578m+1650m+485m(图1.2-1),是我国跨度第一、世界第二的特大型悬索桥。南边跨引桥采用6×60m预应力混凝土刚构—连续组合箱梁。

大桥设计施工中采用多项创新技术:加劲梁采用分体式流线型扁平钢箱梁、主缆采用1770MPa的高强镀锌钢丝索股、采用直升机架设先导索过海、加劲梁吊装采用无抛锚动力定位技术、穿越台风期架设加劲梁、桥面采用活动风障等。

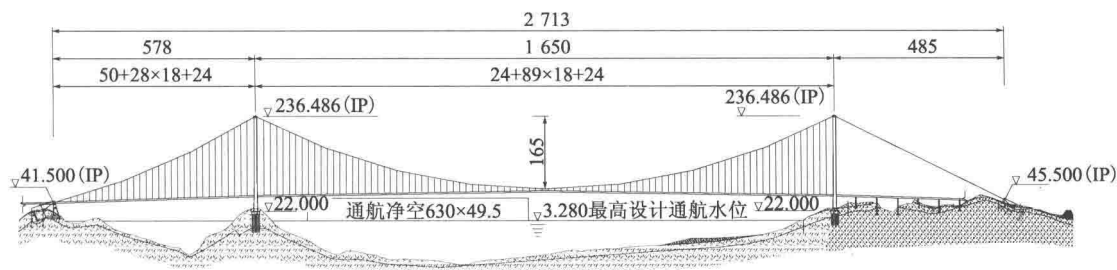


图 1.2-1 西堠门大桥主桥桥型布置(尺寸单位:m;高程单位:m)

1.2.1 建设过程

浙江省人民政府于2005年3月10日召开专题会议,决定成立浙江省舟山连岛工程建设领导小组,同时决定成立浙江省舟山连岛工程建设指挥部。指挥部在浙江省舟山连岛工程建设领导小组的指导、协调下开展工作,受浙江舟山大陆连岛工程高速公路有限公司委托,负责舟山大陆连岛工程西堠门大桥和金塘大桥两个项目的建设。

为了科学谋划大桥建设,浙江省舟山连岛工程建设指挥部拟定了合理的施工进度计划,各施工、监理单位按投标文件的承诺,编制了科学、合理的施工组织设计,全桥29个施工合同段,其中土建工程合同段14个,桥面系及附属工程合同段10个,机电工程合同段4个,航标工程合同段1个。

全桥工程于2005年5月开工。大桥索塔、锚碇施工于2006年6月基本完成,上部结构施工随之全面展开。2006年8月1日,成功实施未封航条件下由直升机牵引先导索过海。册子接线于2006年8月3日开工。2007年4月10日,大桥主缆顺利架设完成。大桥钢箱梁于2007年6月30日开始吊装,同年12月16日,126节钢箱梁架设全部完成。2008年9月23日,完成大桥钢桥面环氧沥青混凝土铺装施工。整个项目于2009年11月2日通过交工验收,2009年12月25日通车试运营。水土保持设施和绿化工程于2010年5月完工。

1.2.2 主要参建单位

西堠门大桥项目规模浩大,国内多家大型设计、施工、监理和科研单位参与了大桥建设。全桥施工合同段、监理合同段、设计合同段以及监控测控合同段见表1.2-1。同济大学、西南交通大学全过程系统地进行抗风研究。

西堠门大桥项目设计、施工、监理、监控单位一览表 表 1.2-1

施 工			监 理		设 计	
合同段	单 位	工 期	合同段	单 位	合同段	单 位
A	四川公路桥梁建设集团有限公司	20个月	J	武汉桥梁建筑工程有限公司	C-019	中交公路规划设计院有限公司
B	中交第二公路工程局有限公司	20个月				
C1	北京北重汽轮机有限责任公司	2005年3月开始供货, 2007年7月全部交货				