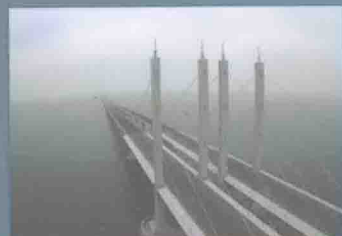


山东高速青岛胶州湾大桥建设丛书

稀索斜拉桥

■ 周 勇 主 编

■ 孔祥福 副主编
杨晓滨



人民交通出版社
China Communications Press

山东高

大桥建设丛书

稀索斜拉桥

■ 周 勇 主 编

■ 孔祥福 副主编
杨晓滨



人民交通出版社

内 容 提 要

本书是青岛胶州湾大桥建设丛书之一。全书共有六章,系统介绍了青岛胶州湾大桥红岛航道桥和沧口航道桥的方案选择、施工图设计和施工技术等相关内容;阐述了采用稀索斜拉桥方案实施过程中的设计理念、设计思路及施工中所采用的关键技术和监测方法。

本书丰富了我国海上建设稀索斜拉桥的建设技术资料库,可供桥梁工程技术人员和高等院校师生参考借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

稀索斜拉桥/周勇主编. —北京:人民交通出版社,2014.5

(山东高速青岛胶州湾大桥建设丛书)

ISBN 978-7-114-11031-3

I. ①稀… II. ①周… III. ①斜拉桥 IV.
①U448.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 076934 号

山东高速青岛胶州湾大桥建设丛书

书 名:稀索斜拉桥

著 作 者:周勇 孔祥福 杨晓滨

责任编辑:张征宇 刘永芬

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)59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

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:17.5

字 数:420千

版 次:2014年8月 第1版

印 次:2014年8月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-11031-3

定 价:48.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

《山东高速青岛胶州湾大桥建设丛书》

编审委员会

主任:孙 亮

副主任:李 萍 周 勇 艾贻忠

委 员:姜言泉 陈代级 钱 洪 于 潜 董淑喜

刘殿君 杨振平 邵新鹏

编辑工作委员会

主任:姜言泉

副主任:邵新鹏

成 员 (以拼音为序):

蔡建军	程建新	崔 峰	董君玲	段爱忠
盖国晖	郭保林	季 辉	季锦章	荆玉才
鞠锦慧	刘国强	马士杰	彭 霞	商 晨
宋吉刚	王存毅	王行耐	王明军	王 麒
王晓昆	王晓乾	王兆星	韦晓霞	吴 健
徐 强	闫宗山	于 坤	于天胜	于长河
翟文琦	张 莉	赵建刚	赵世超	周 斌
周焕涛	庄纪文			

《稀索斜拉桥》编委会

主 编:周 勇

副 主 编:孔祥福 杨晓滨

编写人员(以拼音为序):

陈文明	邓 煜	郭保林	姜美文	李启乾
李莹炜	刘深远	刘宪波	罗 玮	彭 霞
邵新鹏	孙海波	孙日双	陶诗君	王行耐
王 麒	魏忠芹	吴 健	肖旭红	徐现田
闫宗山	于 坤	赵富立	赵 国	

序

山东高速青岛胶州湾大桥(以下简称胶州湾大桥)是我国北方冰冻海域特大桥梁工程,是青岛市规划的东西跨海通道“一路一桥一隧”中的“一桥”。大桥全长 41.58km,建成后将成为山东半岛蓝色经济区战略的重要交通枢纽,对进一步完善青岛市东西跨海交通联系,为城市的深度发展拓展出崭新的空间。

胶州湾大桥由青岛市人民政府采取特许经营权模式,进行公开招标。山东高速集团凭借良好的信誉、雄厚的资金和技术实力、丰富的建设管理经验,一举中标成为项目法人。

胶州湾大桥早在 1993 年 4 月就开始前期工作,经历了规划、预可、工可、初设、施工图设计和招投标等严格的建设程序,共历时 13 年零 8 个月。这期间,包括两院院士、长江学者在内的数百名中外专家、学者为大桥付出了心血和汗水。

胶州湾大桥开工建设以来,国家有关部委,山东省委、省政府以及青岛市委、市政府等各方面高度重视,要求建设者高标准、高质量建成精品工程。全体建设者露宿风餐、无私奉献、奋勇攻关,确保了工程质量、建设进度和施工安全,整个工程建设过程中,未出现一起质量、安全事故,没有发生一起违法违纪事件。

胶州湾大桥建设者始终坚持创新引领,攻克了许多特大型跨海大桥的技术难题,他们发明的“水下无封底混凝土套箱技术”为世界首创;“稀索斜拉桥索塔的耳板锚固方式”具有独创性;兼具防雾和景观功能的 LED 桥梁护栏节能灯为世界首创;应用 4D 技术和 4D 管理理念实现了项目管理的集成化和可视化管理;并且在结构耐久性的研究和长寿命评估方面,实现了大桥全寿命周期的过程控制。从而全面提高了胶州湾大桥的运营效率、降低了运营成本,延长结构的实际使用寿命,为海上桥梁的耐久性设计提供了数据基础和理论依据。

胶州湾大桥于 2011 年 6 月 30 日全线通车,它结构新颖,造型独特,气势恢弘,美观大气,像一条玉带飘荡在蔚蓝色的大海上。它也对冰冻海域的大型桥梁建设提供了一个可资借鉴的经验和样板。

鉴于胶州湾大桥在科技创新、工程美学价值、与自然环境的协调统一等各方面的成绩,很有必要编写这套丛书。而且就在本书即将付梓的时候,今年 6 月,在美国匹兹堡举行的世界桥梁大会上,胶州湾大桥荣获组委会颁发的“乔治·理查德森大奖”。这个奖项是专门授予那些在技术创新、工艺造型、工程质量、人才培养等方面都有卓越表现的大型桥梁工程。也为中国桥梁工作者赢得了荣誉。

借此机会,向胶州湾大桥所有的建设者表示祝贺!

胡希捷

2013 年 7 月 1 日

前 言

山东高速青岛胶州湾大桥是我国在北方寒冷冰冻海域建设的首座特大型桥梁集群工程,是青岛市交通规划中东西岸跨海通道“一路、一桥、一隧”中的“一桥”,是国家高速公路网青岛至兰州高速公路的起点段。

山东高速青岛胶州湾大桥红岛航道桥和沧口航道桥主要本着通航净空及航空限高的要求,通过多方案的比选,沧口航道桥采用双幅分离式双塔双索面钢箱梁斜拉桥,红岛航道桥采用双幅分离式钢箱梁平行双索面斜拉桥,斜拉索均呈竖琴形稀索布置。其主要特点是桥梁设计需考虑航空限高,钢箱梁安装采用大节段吊装方案,而且要考虑潮汐水位的制约。其设计、施工工艺及控制技术含量高,施工难度较大。

本书系统介绍了两个航道桥采用稀索斜拉桥方案的设计思路、设计方案、施工工艺和科学研究等方面的经验。丰富我国跨海桥梁建设的技术资料,是编写本书的出发点和落脚点。

《稀索斜拉桥》是《山东高速青岛胶州湾大桥建设丛书》的第四册,分6章编写。第1章介绍了斜拉桥起源、演变和发展过程,简述了稀索斜拉桥的特点和典型稀索斜拉桥示例;第2章阐述了沧口航道桥的方案设计、总体设计和结构设计等内容;第3章阐述了红岛航道桥的方案设计、总体设计和结构设计等内容;第4章以沧口航道桥为例,介绍了稀索斜拉桥下部结构和桥塔的施工方法和关键技术;第5章主要介绍了沧口桥钢箱梁制造、运输和安装等工艺和关键技术;第6章简述了稀索斜拉桥的施工监测和施工控制的内容、方法和关键技术问题。

限于编写时间及编写者水平,本书难免存在不当之处,恳请同行指正。

编者

2012年12月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 斜拉桥的概念	1
1.2 斜拉桥的发展概况	1
1.3 斜拉桥设计理论简介	7
1.4 青岛胶州湾大桥通航孔桥桥型方案	8
第2章 沧口航道桥结构设计	10
2.1 总体设计	10
2.2 主梁设计	11
2.3 索塔及其基础设计	12
2.4 墩身及其基础设计	14
2.5 斜拉索设计	15
2.6 附属设施设计	17
2.7 结构计算	18
第3章 红岛航道桥结构设计	28
3.1 总体设计	28
3.2 主梁设计	29
3.3 索塔及基础设计	33
3.4 斜拉索设计	37
3.5 过渡墩及基础设计	39
3.6 结构计算	39
第4章 沧口桥下部结构及主塔和拉索施工	55
4.1 海上钻孔灌注桩施工	55
4.2 承台和防撞钢套箱施工	92
4.3 辅助墩及过渡墩施工	126
4.4 索塔施工	133
4.5 拉索制作与安装	149
第5章 沧口航道桥钢箱梁制造与安装	153
5.1 钢箱梁制造与加工	153
5.2 钢箱梁运输及吊装	232

第 6 章 施工控制 262

6.1 施工控制的目的与意义 262

6.2 施工控制的原则、方法和系统运行过程 262

6.3 施工控制的主要工作内容 264

6.4 施工控制精度 265

6.5 分工和数据的传递 265

6.6 施工控制工作程序和每阶段测量内容 267

6.7 索塔的施工控制 268

1.1 斜拉桥的概念

斜拉桥又称斜张桥,主要由索塔、主梁、拉索三种基本构件组成,是一种缆索承重体系桥梁。斜拉桥主梁通过拉索将其自重及承受的荷载传递给索塔,索塔主要承受压力,拉索承受拉力,主梁承受压力和弯矩。斜拉桥主梁可看作拉索代替支墩的多跨弹性支承连续梁,由于拉索的弹性支承,主梁体内弯矩减小,可降低主梁建筑高度,减轻结构自重,节省了材料,同时增大了跨越能力。

1.2 斜拉桥的发展概况

斜拉桥的雏形远在几百年之前就出现了,如原始的竹制、木制斜拉桥梁,以及铁链吊拉的桥梁,但是在相当长的一段时间内,斜拉桥的发展非常缓慢。进入 20 世纪 30 年代,人们重新认识到斜拉桥结构体系的优越性。二战后,为修复和重建在二战中毁坏的大量桥梁,现代斜拉桥首先在欧洲大陆诞生。

第一座现代斜拉桥是 1955 年瑞典建成的 Strömsund Bridge(图 1.2-1),全长 332m,其中主跨跨径为 182m,它是由现代斜拉桥的先驱——德国人 Franz Dischinger 设计的。



图 1.2-1 Strömsund Bridge(斯特伦松德桥)

1957 年,德国建成其第一座斜拉桥——Theodor Heuss Bridge(又称 North Bridge),全长

476m,其中主跨跨径为 260m(图 1.2-2)。

Theodor Heuss Bridge 巩固了现代斜拉桥的地位,随后,斜拉桥结构开始在全世界范围内得到广泛应用。



图 1.2-2 Theodor Heuss Bridge(特奥尔多豪斯桥)

随着高强度新材料、计算机技术和先进施工技术等先进技术的应用,斜拉桥结构取得了长足的发展,跨越能力极大提高,结构造型更加灵活美观。

1.2.1 斜拉桥跨径的发展

斜拉桥的跨越能力得到了巨大发展,已经进入了以前只有悬索桥使用的特大跨径范围,成为现代大跨度桥梁主要结构形式之一。斜拉桥跨径世界记录不断被刷新,见表 1.2-1。

斜拉桥跨径世界记录 表 1.2-1

序号	桥 名	国 家	建 成 年 代	主跨跨径(m)
1	Strömsund Bridge	瑞典	1955	182
2	Theodor Heuss Bridge	德国	1957	260
3	Severins Bridge	德国	1961	302
4	Knie Bridge	德国	1969	319
5	Duisburg-Neuenkamp Bridge	德国	1970	350
6	Saint-Nazaire Bridge	法国	1974	404
7	Luna Bridge	西班牙	1983	440
8	Annacis Bridge	加拿大	1986	465
9	Skarnsundet Bridge	挪威	1991	530
10	杨浦大桥	中国	1993	602
11	Normandie Bridge	法国	1995	856
12	Tatara Bridge	日本	1999	890
13	苏通大桥	中国	2008	1088

1961 年,德国建成的 Severins Bridge(图 1.2-3),主跨跨径为 302m,为独塔双索面斜拉桥。索塔为 A 形钢索塔,主梁为钢桥面,斜拉索呈扇形布置。

1969 年,德国杜塞尔多夫建成的 Knie Bridge(图 1.2-4),主跨跨径为 320m,为独塔双索



图 1.2-3 Severins Bridge(塞弗林大桥)



图 1.2-4 Knie Bridge(格尼桥)

面斜拉桥。索塔为 H 形钢索塔,主梁为钢桥面,斜拉索呈竖琴形布置。

1974 年,法国建成的 Saint-Nazaire Bridge(图 1.2-5),主跨跨径为 404m,为双塔双索面斜拉桥,是第一座跨径突破 400m 的斜拉桥。索塔为 A 形混凝土索塔,主梁采用正交异性钢桥面板,斜拉索呈扇形布置。

1983 年,西班牙建成的 Luna Bridge,主跨跨径为 440m,为双塔双索面斜拉桥。索塔为 H 形混凝土索塔,主梁采用预应力混凝土桥面,斜拉索呈扇形布置(图 1.2-6)。



图 1.2-5 Saint-Nazaire Bridge(圣纳泽尔桥)

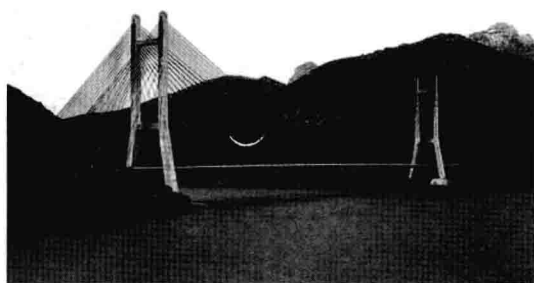


图 1.2-6 Luna Bridge(卢纳巴里奥斯桥)

1986 年,加拿大温哥华建成的 Annacis Bridge,主跨跨径为 465m,为双塔双索面斜拉桥。索塔为 H 形混凝土索塔,主梁采用钢混组合梁,斜拉索呈扇形布置(图 1.2-7)。



图 1.2-7 Annacis Bridge(安那西斯桥)

1991 年,挪威建成的 Skarnsundet Bridge,主跨跨径为 530m,为双塔双索面斜拉桥,是当时跨径最大的混凝土斜拉桥。索塔为 A 形混凝土索塔,主梁采用预应力混凝土主梁,斜拉索呈扇形布置(图 1.2-8)。



图 1.2-8 Skarnsundet Bridge(斯卡恩圣特桥)

1995 年,法国建成的 Normandie Bridge,主跨跨径为 856m,为双塔双索面斜拉桥。Normandie Bridge 是一座钢混混合结构斜拉桥,主跨采用正交异性桥面的钢箱梁,边跨采用混凝土主梁。索塔为倒 Y 形混凝土索塔,斜拉索呈扇形布置(图 1.2-9)。

1999 年,日本建成的 Tatara Bridge,主跨跨径为 890m,为双塔双索面斜拉桥。索塔为倒 Y 形混凝土索塔,主梁为钢箱梁,斜拉索呈扇形布置(图 1.2-10)。

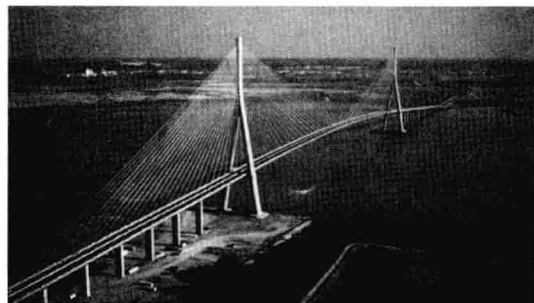


图 1.2-9 Normandie Bridge(诺曼底桥)



图 1.2-10 Tatara Bridge(多多罗大桥)

Normandie Bridge 和 Tatara Bridge 第一次把斜拉桥带入了以前只有悬索桥使用的特大跨径范围。

斜拉桥在我国的发展开始于 1975 年,重庆市云阳县建成主跨跨径为 76m 的预应力混凝土斜拉桥。

1982 年,山东省建成的济南黄河大桥(图 1.2-11),主跨跨径为 220m,为双塔双索面混凝土斜拉桥,采用悬臂现浇混凝土施工工艺。

1991 年,上海市建成的南浦大桥(图 1.2-12),主跨跨径为 423m,为双塔双索面组合梁斜拉桥。

1993 年,上海市建成的杨浦大桥(图 1.2-13),主跨跨径为 602m,为双塔双索面组合梁斜拉桥,是当时世界最大跨度斜拉桥。

1997 年,香港建成汀九桥(图 1.2-14),主跨跨径分别为 448m 和 475m,为三塔四索面组合梁斜拉桥。

2001 年,南京市建成的南京长江第二大桥南汊桥(图 1.2-15),主跨跨径为 628m,为双塔双索面钢箱梁斜拉桥。

2005年,南京市建成的南京长江第三大桥(图1.2-16),主跨跨径为648m,为双塔双索面钢箱梁斜拉桥,索塔采用“人”字形钢塔。



图 1.2-11 济南黄河大桥



图 1.2-12 上海南浦大桥

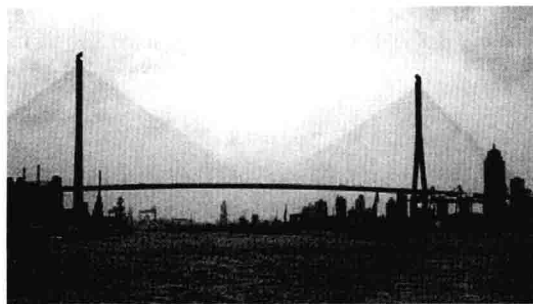


图 1.2-13 上海杨浦大桥

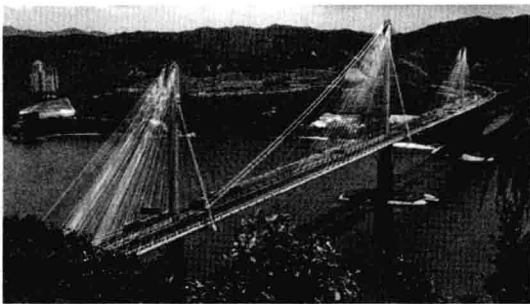


图 1.2-14 香港汀九桥



图 1.2-15 南京长江第二大桥



图 1.2-16 南京长江第三大桥

2008年,浙江省建成的杭州湾大桥,是当时世界最长海湾大桥,其主桥为双塔双索面钢箱梁斜拉桥(图1.2-17),主跨跨径为448m。

2008年,江苏省建成的苏通长江大桥,主跨跨径为1088m,为双塔双索面钢箱梁斜拉桥(图1.2-18),第一次把斜拉桥带入1000m跨径领域,成为当今世界最大跨度斜拉桥。

1.2.2 斜拉桥造型的发展

在过去的几十年中,斜拉桥不仅跨越能力得到了巨大的发展,其结构造型也更加灵活美观。

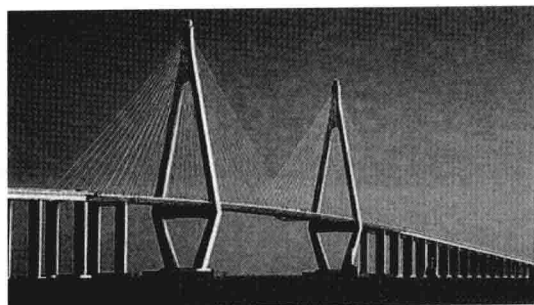


图 1.2-17 杭州湾大桥

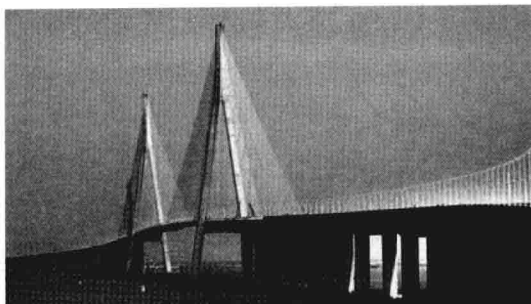


图 1.2-18 苏通长江大桥

1992 年,西班牙建成的 Alamillo Bridge(图 1.2-19),主跨跨径为 200m,采用无背索倾斜索塔设计,通过索塔自重来平衡主跨斜拉索的拉力。

1996 年,荷兰建成的 Erasmus Bridge(图 1.2-20),主跨跨径为 280m,采用倾斜的折线形索塔,边、中跨斜拉索不对称布置。

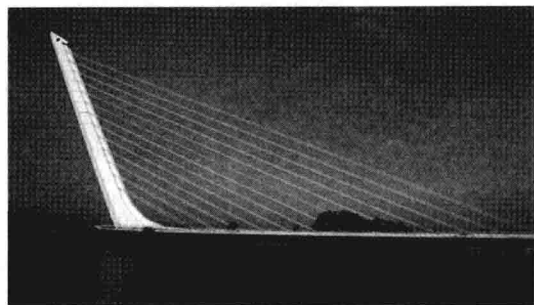


图 1.2-19 Alamillo Bridge(阿拉密洛大桥)

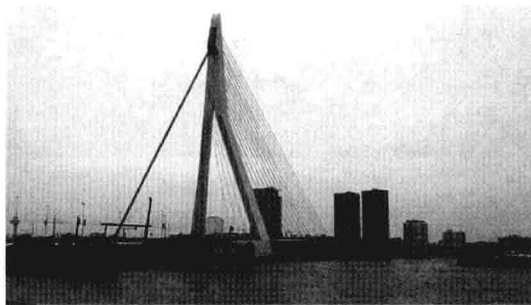


图 1.2-20 Erasmus Bridge(埃拉斯莫斯大桥)

2004 年,法国建成的 Millau Viaduct Bridge(图 1.2-21),为 6 塔斜拉桥,是世界上最高的交通用桥。

2004 年,希腊建成的 Rion-Antirion Bridge(图 1.2-22),为 4 塔斜拉桥,索塔为花篮形索塔。



图 1.2-21 Millau Viaduct Bridge(米洛大桥)

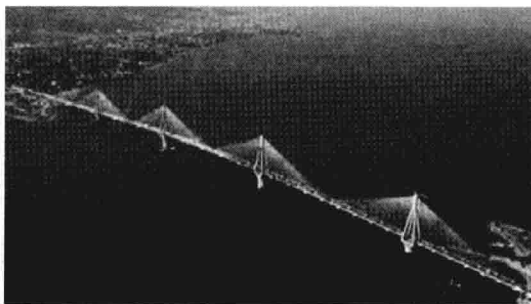


图 1.2-22 Rion-Antirion Bridge(里永安蒂里永大桥)

1.3 斜拉桥设计理论简介

斜拉桥是桥梁结构中跨越能力最大的桥型之一,随着桥梁建造向大跨径方向发展,它们越来越成为人们研究的热点。

斜拉桥诞生于17世纪,在最近的50年间,斜拉桥有了飞速的发展,成为200m到800m跨径范围内最具竞争力的桥梁结构形式之一。有理由相信,在大江河口的软土地基上或不适合建造悬索桥的地区,有可能修建跨径超过1200m的斜拉桥。斜拉桥是塔、梁、索三种基本结构组成的缆索承重结构体系,一般表现为柔性的受力特性。

1.3.1 斜拉桥的静力设计过程

斜拉桥的静力设计过程一般分为三个阶段:

(1)方案设计阶段。此阶段也称为概念设计,主要任务是凭借设计者的经验,参考别的斜拉桥的设计,结合自己的分析计算,来完成结构的总体布置,初拟构件尺寸。根据此设计文件,设计者或甲方进行方案比选。

(2)初步设计阶段。本阶段在前一阶段工作的基础上进一步细化。主要任务是:通过反复计算比较,进行恒活载集度确定、恒载分析、恒载索力初定、斜拉索截面修正、活载及附加荷载计算、荷载组合及梁体配索、索力优化以及强度刚度验算等。

(3)施工图设计阶段。此阶段要对斜拉桥的每一部位以及每一施工阶段进行计算,确保结构安全。主要计算内容有:构件无应力尺寸计算,对施工阶段循环倒退分析,斜拉索初张力和预拱度计算,强度、刚度、稳定性验算以及前进分析验算等。

1.3.2 斜拉桥的计算模式

斜拉桥计算模式一般有四种:

(1)平面杆系加横分系数。此模式用在概念设计阶段研究结构的设计参数,以求获得理想的结构布置。此模式还可用于技术设计阶段,仅仅计算恒载作用下的内力。

(2)空间杆系计算模式。此模式用在空间荷载(风载、地震荷载以及局部温差等)作用下的静力响应分析。此模式按照主梁可分为“鱼骨”模式、双梁式模式与三梁式模型。

(3)空间板壳、块体和梁单元计算模式。此模式用于计算全桥构件的应力分布特性,这类模式要特别注意不同单元结合部的节点位移协调性。

(4)从整体结构中取出的特殊构件。此模式主要是为了研究斜拉索锚固区等的应力集中现象。根据圣维南原理,对结构进行二次分析。

1.3.3 斜拉桥的计算理论

根据线性与非线性,斜拉桥的计算理论可以分为三类。

(1)微小变形理论。即弹性理论,这种计算方法将拉索简化为桁单元,其余部分用梁单元进行模拟,不考虑非线性影响。此计算方法适用于中小跨径的斜拉桥,或用于方案设计阶段。

(2) 准非线性计算理论。有三种情况:计入收缩徐变的线性弹性分析理论、考虑二阶效应的近似计算以及弹性理论计算结果乘以增大(大于1)系数。适用于概念设计阶段的计算,或计算中小跨径的斜拉桥。

(3) 有限位移理论。这是精确分析施工和正常使用阶段,以及结构在各种荷载下的静力响应的方法,适用于大跨桥梁设计的技术设计阶段的计算。用于前进分析与倒退分析中,以及成桥状态最优索力的确定。

引起斜拉桥几何非线性的因素主要有以下三个方面:

(1) 索的垂度的影响。将斜拉索模拟成桁单元,并用修正的弹性模量。当索力应力水平较低时,可直接用柔索单元来模拟斜拉索。

(2) 梁柱效应。斜拉桥的主梁、主塔都工作在压弯状态,引起了梁柱效应。用梁单元分析时,可用稳定函数表示的几何非线性刚度矩阵和一般的几何刚度矩阵来计入这一效应。

(3) 大位移效应。由于斜拉桥为柔性结构,外荷载作用下结构变形较大。可用大位移刚度矩阵或基于 U. L 列式的有限位移理论(拖动坐标法)计入这一效应。恒载与附加荷载的非线性计算,以计算荷载作用前的状态为初态,活载的非线性计算以成桥状态为初始内力状态,活载用影响区加载法来计算。

1.3.4 斜拉桥的计算内容

按照设计过程,斜拉桥的计算内容包括:

(1) 斜拉桥的恒载受力状态的优化计算。以往的斜拉桥索力优化计算归为三大类:指定受力状态的索力优化、无约束的索力优化和有约束的索力优化。同济大学肖汝诚老师利用调值计算的原理,提出了索力优化的影响矩阵法,用于成桥状态的索力优化与施工阶段的索力优化。

(2) 倒退分析。以成桥状态 $t = t_0$ 时刻的最优内力状态为参考状态,以设计的成桥线形为参考线形,对结构进行倒退分析。考虑到计算状态的不闭合,结构预应力、徐变、收缩引起结构倒退分析内力和实际内力的不闭合,以及斜拉索垂度效应和大位移效应等几何非线性的因素,肖汝诚提出了采用前进、倒退分析交互迭代法,可消除这些不闭合因素。通过倒退分析,可以得到初始张拉力、施工张拉力及预拱度。

(3) 前进分析。即施工仿真计算,施工终态的内力即为实际内力状态。

(4) 构件应力分析。

(5) 其他计算内容。施工控制计算、稳定计算、静风作用下的横向稳定分析以及动力计算等。

1.4 青岛胶州湾大桥通航孔桥桥型方案

随着社会的发展,人们意识到,桥梁已不仅仅意味着理性的计算、应用最经济的手段在一定的预知条件下承载特定的可变荷载以及跨越特定的距离,桥梁正在重新成为隐喻的载体。事实证明,桥梁可以具有更多的内涵,它具有建筑文化的观赏性、象征性,并且往往成为一个地域的标志性景观建筑。图 1.4-1 示出桥梁设计应具有的内涵。