

※ 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAG04B01)

千米级斜拉桥设计关键技术著作书系

苏通大桥设计与结构性能

Sutong Bridge Design and Structural Performance



张喜刚 陈艾荣 等著



人民交通出版社
China Communications Press

国家科技支撑计划资助项目(2006BAG04B01)

千米级斜拉桥设计关键技术著作书系

Sutong Bridge Design and Structural Performance

苏通大桥设计与结构性能

张喜刚 陈艾荣 等著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

苏通大桥是世界首座突破千米跨径的斜拉桥,是世界桥梁建设的里程碑工程,本书即是以苏通大桥的工程设计为背景,全面系统阐述了特大跨径斜拉桥的结构性能设计。全书共分8章,内容包括:前言、结构静力设计、抗风性能设计、抗震性能设计、船撞作用设计、组合索塔锚固结构性能与设计方法、超长直径群桩基础设计方法与示例、结构性能测试和试验方法与示例。

本书可供从事大桥梁设计、监控及施工的技术人员使用,也可供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

苏通大桥设计与结构性能/张喜刚,陈艾荣等著. —北京:人民交通出版社,2010.2

ISBN 978-7-114-07770-8

I. 苏… II. ①张…②陈… III. ①公路桥:斜拉桥—设计—江苏省②公路桥:斜拉桥—结构性能—江苏省 IV. U448.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 021307 号

国家科技支撑计划资助项目(2006BAG04B01)

千米级斜拉桥设计关键技术著作书系

书 名: 苏通大桥设计与结构性能

著 者: 张喜刚 陈艾荣 等

责任编辑: 沈鸿雁 刘永超 岑 瑜

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门内大街斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市凯鑫彩色印刷有限公司

开 本: 880×1230 1/16

印 张: 12.75

字 数: 360 千

版 次: 2010年2月 第1版

印 次: 2010年2月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-07770-8

定 价: 33.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

现代斜拉桥的发展是桥梁工程师最引以为豪的成就之一。

虽然利用藤、竹等柔性天然材料承重并实现跨越是人类最早认识到的自然规律之一，但斜拉桥作为一种固定结构形式，其发展却由于缆索材料的性能问题长期停滞。在现代材料与技术进步的推动下，1956 年 Strömsund 桥在瑞典建成通车；之后，在德国著名工程师 Franz Dischinger 的推动下，多座稀索体系斜拉桥在莱茵河上相继建成，现代斜拉桥正式形成，也实现了斜拉桥跨径的第一次发展。随后，现代斜拉桥又经历了从稀索体系到密索体系等一系列重要的发展历程，跨越能力稳步提升。1995 年，法国诺曼底大桥实现了 856m 的跨径；1999 年日本多多罗大桥实现了 890m 的跨径。而挑战千米级斜拉桥，实现斜拉桥跨径的千米级突破，则成为桥梁工程师在那之后又一个奋斗目标。

我国第一座斜拉桥为 1975 年原交通部重庆公路科学研究所设计和指导施工的四川云阳桥，跨径组合为 34.91m+75.84m+34.91m，主梁为混凝土单箱，每塔三对斜拉索。与此同时，上海市市政工程设计研究总院也设计了新五桥，跨径组合为 24m+54m+24m，双车道宽 6.6m。此后国内又相继修建了三台涪江桥、上海御港桥、广西红水河铁路桥等。在 1975 年~1985 年的 11 年间，我国大陆共建成各式混凝土斜拉桥 15 座，台湾建成了跨径 2×134m 的三塔斜拉桥光复桥。我国大跨径斜拉桥的发展始自 1991 年建成的 423m 跨径的上海南浦大桥；随后，1993 年上海杨浦大桥突破了 600m 跨径，建成时跨径位于世界同类桥梁前列。此后，全国各地掀起大跨径斜拉桥的建设热潮，大批 400~600m 跨径的斜拉桥相继建成通车。

据不完全统计，我国 1986 年~1990 年 5 年间建成斜拉桥 33 座，1991 年~1995 年 5 年间建成 43 座，1996 年~2000 年 5 年间建成 63 座，自 1975 年开始到 2002 年共建成斜拉桥 155 座。从一定程度上看，大跨径斜拉桥的快速发展和跨径在 600m 左右的突破，解决了我国现代交通网络建设中的关键技术问题，是 20 世纪 80~90 年代桥梁工程领域取得的最重要成就之一。通过大量的斜拉桥建设，我国也积累了丰富的斜拉桥建设经验，并与世界同步，甚至是更为超前地考虑斜拉桥千米跨径的突破问题。

20 世纪末，仍处于方案研究阶段的苏通大桥与香港昂船洲大桥几乎同时提出了超千米跨径的斜拉桥方案。2002 年苏通大桥率先进入工程实施阶段，并于 2008 年 5 月正式建成通车，成为世界首座突破千米跨径的斜拉桥，是世界桥梁建设的里程碑工程。苏通大桥

的建成极大地提高了国内外桥梁建设者的信心,如我国主跨 926m 的鄂东长江大桥也已开工建设,国外也有跨径超千米的斜拉桥即将投入建设。这些千米级斜拉桥的建设,将世界斜拉桥建设的跨径水平提升到了一个崭新的高度。

如果说 20 世纪 90 年代,实现斜拉桥跨径 600m 级的突破主要依靠引进和学习国外先进桥梁建设技术成果的话,那么本次实现的斜拉桥千米跨径的突破,则更多地体现了自主创新。全面总结苏通大桥建设经验,解决结构体系和设计方面的关键技术问题,形成系统的千米级斜拉桥设计理论与方法,开发具有自主知识产权的桥梁设计分析工具,为类似工程提供有力的技术支撑,并研究千米级斜拉桥结构性能的一般规律,探索斜拉桥跨径提升的制约条件及其工程设计对策,为斜拉桥跨径的下一步突破进行技术储备,已成为迫切需要解决的问题。

苏通大桥是国家“十一五”重点工程建设项目,是《国家高速公路网规划》中沈阳至海口高速公路跨越长江的重要节点工程。苏通大桥位于上海西北约 100km 处,横跨长江,连接苏州、南通两市,是我国沿海高速公路跨越长江的咽喉工程。

苏通大桥地处长江河口地区,该大桥建设具有水文条件差、气象条件复杂、基岩埋藏深、通航标准高等建设条件方面和高、大、长、柔等结构方面的特点,千米级斜拉桥的技术要求超越了国内外现行标准、规范规定。千米级斜拉桥结构体系及特殊设计方法、深水急流潮汐河段条件下大型群桩基础施工控制、千米级斜拉桥塔梁索施工控制等多项世界级技术难题需要攻克,工程建设面临着极大的技术挑战。为了支撑苏通大桥建设,系统攻克千米级斜拉桥建设关键技术问题,科学技术部于 2006 年批准了国家科技支撑计划支持的首个重大公路交通工程项目——“苏通大桥建设关键技术研究”。

“千米级斜拉桥技术标准和关键结构及特性研究”是“苏通大桥建设关键技术研究”项目课题之一。课题研究针对千米级斜拉桥建设面临的复杂建设条件特点和结构体系等设计方面的技术难点,对技术标准、结构体系、关键结构及设计方法等进行攻关,解决了一系列关键技术问题,有力地支撑了苏通大桥的建设,并为以后同类桥型的建设提供了重要参考和借鉴。

本套丛书是课题研究成果的系统总结。《千米级斜拉桥——结构体系、性能与设计》是对千米级斜拉桥结构体系、性能和设计方法方面研究的成果总结,包括以苏通大桥为设计原型的主跨 1088m 斜拉桥,以及在其基础上拓展的主跨 1308m、1500m、1800m 斜拉桥结构性能及作用特性的研究。考虑到千米级斜拉桥特殊的结构性能,研究还针对千米级斜拉桥特殊的设计理论、前沿设计方法等进行了研究。《苏通大桥设计与结构性能》中详细介绍了苏通大桥设计过程中对抗风、抗震等关键问题的研究成果。《组合索塔锚固结构》和《超长群桩基础承载机理研究》系统介绍了在苏通大桥中应用的组合索塔锚固结构

和超长大型群桩基础的相关机理、设计理论和方法等。《千米级斜拉桥设计指南》是对研究形成的千米级斜拉桥设计方法和技术的总结,也是国内外有关超大跨径斜拉桥设计的首部专门指导性专著。

课题研究及本丛书的编写凝结了课题组近百位研究人员多年的研究成果。国内外多位知名专家及交通运输部、科学技术部相关领导也在研究过程中多次关注,并提出了重要的指导意见,在此对他们一并表示衷心的感谢。

限于研究时间和精力,有偏颇和不足之处,望不吝赐教!

张喜刚

2010年1月

前 言

斜拉桥是主梁通过斜拉索支承在索塔上的现代桥型,其跨越能力强、结构刚度大、经济性好、适应性广。20 世纪末,世界最大跨径斜拉桥为主跨 890m 的日本多多罗大桥,我国最大跨径斜拉桥为主跨 628m 的南京长江二桥。

随着交通建设适应经济快速发展的需要,国内外跨越江河海湾、连接岛屿及大陆的长大桥梁将陆续修建,而复杂恶劣的建设条件和较高的通航标准对斜拉桥突破千米跨径提出了迫切需求,如规划建设的苏通大桥(主跨 1088m)、昂船洲大桥(主跨 1018m)、俄罗斯 Russky Island 大桥(主跨 1104m)等。

苏通大桥位于长江下游,连接苏州、南通两市,是国家高速公路网中跨越长江口的咽喉工程,是国家科技支撑计划支持的首个重大公路交通工程,是我国自主设计和建造的世界首座突破千米跨径的斜拉桥。在苏通大桥设计和科研工作中,开展了大量的研究工作,本书将苏通大桥设计及抗风、抗震、防船撞等相关研究成果进行了总结,同时介绍了钢混组合索塔锚固结构、钢混组合变截面桩结构的性能与设计方法,并介绍了结构性能测试和试验方法方面的研究成果,以便于为同类大桥的建设提供参考和借鉴。

在本书编写过程中,袁洪、裴岷山、刘玉擎、龚维明、叶爱君、张启伟、刘高、朱斌、阮欣、马如进、王达磊、吴宏波等也参加了部分内容的编写工作,在此一并致谢!

限于研究时间和精力,有偏颇和不足之处,望不吝赐教!

张喜刚 陈艾荣

2009 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 斜拉桥的发展历程	1
1.2 斜拉桥的结构体系	2
1.3 千米级斜拉桥的结构受力特点	3
1.4 苏通大桥介绍	4
第 2 章 结构静力设计	6
2.1 概述	6
2.2 结构体系的选择	6
2.2.1 静力结构体系比选	7
2.2.2 动力结构体系比选	7
2.2.3 适宜的静、动力结构体系	8
2.3 结构方案设计	9
2.3.1 主梁方案设计	9
2.3.2 索塔方案设计	9
2.3.3 斜拉索方案设计	10
2.4 模型的建立	10
2.4.1 苏通大桥结构体系概况	10
2.4.2 主要构件材料及性能	11
2.4.3 空间有限元模型的建立	12
2.5 非线性影响	12
2.6 静力分析	13
2.6.1 荷载及荷载组合	13
2.6.2 成桥阶段主要计算结果	15
2.7 静力稳定分析	21
2.7.1 计算原则及判别准则	21
2.7.2 主要施工阶段及成桥阶段第一类稳定分析	21
2.7.3 主要施工阶段及成桥阶段第二类稳定分析	21
2.7.4 弹性屈曲稳定计算结果	22
2.7.5 弹塑性稳定计算结果	24
2.8 施工控制分析	24
2.8.1 施工控制概述	24
2.8.2 施工控制及理论计算原则	25
2.8.3 施工控制计算	26
2.8.4 施工控制	32
2.9 疲劳计算	33
2.10 冲击系数	35

第3章 抗风性能设计	36
3.1 概述	36
3.2 桥位处基本风参数研究	36
3.2.1 平均风速、风向和风攻角	37
3.2.2 基本风速、设计基准风速和颤振检验风速	37
3.2.3 湍流度和阵风因子	37
3.2.4 湍流积分尺度	38
3.2.5 功率谱密度函数	39
3.2.6 空间相关性	39
3.3 结构动力特性分析	40
3.4 静气动力系数	41
3.4.1 主梁静气动力系数	42
3.4.2 桥塔阻力系数	42
3.4.3 斜拉索阻力系数	44
3.5 拉索振动与减振研究	47
3.5.1 拉索参数振动与线性内部共振分析	47
3.5.2 拉索风雨激振及气动措施减振研究	51
3.5.3 拉索减振措施研究	55
3.6 气动稳定性	56
3.6.1 节段模型风洞试验	56
3.6.2 全桥气弹模型气动稳定性试验	56
3.6.3 成桥状态气弹模型失稳分析	58
3.7 涡激共振研究	59
3.7.1 缩尺比 1:70 节段模型涡振试验	59
3.7.2 缩尺比 1:50 节段模型涡振试验	60
3.7.3 缩尺比 1:13.5 节段模型涡振试验	61
3.8 风荷载分析	63
3.9 桥塔区域风环境分析	64
3.9.1 桥塔区域桥面风环境风洞试验	64
3.9.2 桥面风环境试验结果	66
3.9.3 桥塔区域桥面风环境数值模拟	67
第4章 抗震性能及设计	70
4.1 千米级斜拉桥的抗震设计流程	70
4.2 抗震设防标准的确定	71
4.3 地震动输入的选择	72
4.4 动力计算模型的建立	73
4.4.1 基础以上部分的模拟	74
4.4.2 群桩基础的模拟	74
4.5 动力特性分析	78
4.6 地震反应谱分析	79
4.6.1 边墩、主塔的地震反应及易损部位分析	79

4.6.2 上部结构的地震反应及易损部位分析	82
4.7 抗震结构体系确定	86
4.7.1 纵向抗震体系	86
4.7.2 横向抗震体系	87
4.8 时程反应分析及抗震验算	88
4.8.1 地震反应分析	88
4.8.2 结构抗震性能验算	93
4.8.3 小结	97
第5章 船撞作用设计	98
5.1 概述	98
5.2 防撞设计内容及技术路线	98
5.3 苏通大桥船撞风险分析	99
5.3.1 船撞风险分析基本条件	99
5.3.2 苏通大桥船撞风险分析	102
5.3.3 船撞桥风险分析结果	103
5.3.4 桥梁其他构件撞损可能性	103
5.3.5 关键因素对船舶撞击风险影响	103
5.3.6 结论	104
5.4 船撞桥动力分析方法	104
5.4.1 动力模拟方法	104
5.4.2 桥梁建模	105
5.4.3 动力有限元方法应用实例	105
5.5 基于性能的防(抗)撞设计	107
5.6 小结	108
第6章 组合索塔锚固结构性能与设计方法	109
6.1 组合索塔锚固结构	109
6.2 组合锚固区设计方法	109
6.2.1 设计原则	109
6.2.2 性能要求	110
6.2.3 设计流程	110
6.3 组合锚固区节段模型试验方法	110
6.3.1 试验模型设计	111
6.3.2 边界条件模拟	111
6.4 组合锚固区计算分析方法	112
6.4.1 水平传力简化计算方法	112
6.4.2 索塔锚固区水平承载力计算方法	115
6.4.3 锚固区竖向传力分析及简化计算方法	116
6.4.4 有限元计算方法	116
6.5 锚固区连接件设计计算方法	121
6.5.1 焊钉连接件和开孔板连接件概述	121
6.5.2 焊钉连接件抗剪强度计算方法	122

6.5.3	焊钉连接件抗剪刚度的计算方法	123
6.5.4	开孔板连接件抗剪强度设计计算研究	124
6.5.5	开孔板连接件抗剪刚度的计算方法	125
6.6	组合锚固区构造优化设计	126
6.6.1	组合索塔钢锚箱细部设计	126
6.6.2	组合锚固区耐久性性能	126
6.7	本章小结	128
第7章	超长直径桩基础设计方法与示例	129
7.1	超长直径钻孔灌注桩单桩设计及示例	129
7.1.1	超长直径钻孔灌注桩的承载力计算	129
7.1.2	超长直径钻孔灌注桩桩端承载力	129
7.1.3	超长直径桩桩身自重的研究	131
7.1.4	桩身压缩量(沉降量)计算方法研究	131
7.1.5	承载力与沉降关系的研究	132
7.1.6	桩端后压浆灌注桩单桩轴向受压承载力	133
7.1.7	超长钻孔灌注桩承载力计算示例	133
7.2	超大群桩基础设计方法及示例	137
7.2.1	群桩效应系数研究	137
7.2.2	等代墩基破坏模型	141
7.2.3	苏通大桥群桩承载力评估	142
7.2.4	等代墩基法的群桩沉降计算方法研究	143
7.2.5	等效墩法	149
7.2.6	苏通大桥群桩基础沉降计算结果	154
7.3	超大型承台的设计方法及示例	155
7.3.1	承台设计国内外研究现状	155
7.3.2	国内外规范关于承台设计内容	156
7.3.3	桩基承台软化协调空间桁架模型理论方法	157
7.3.4	苏通大桥主墩群桩哑铃型承台概念优化设计	161
7.3.5	苏通大桥超大型承台设计方法校核	165
第8章	结构性能测试和试验方法与示例	166
8.1	概述	166
8.2	超高桥塔独立状态的动力性能	166
8.2.1	桥塔独立状态振动测试	166
8.2.2	苏通大桥桥塔振动幅域参数	167
8.2.3	苏通大桥桥塔独立状态动力特性参数	167
8.3	钢梁架设阶段塔—索—梁系统的动力特性	168
8.3.1	钢梁架设阶段的振动测试	168
8.3.2	钢梁架设阶段的结构动力特性——试验模态分析及与理论比较	169
8.3.3	钢梁架设阶段的风振响应分析	173
8.3.4	施工阶段钢主梁的风振响应分析	174
8.4	苏通大桥斜拉桥成桥状态的动力特性测试与分析	174

8.4.1 斜拉桥成桥状态的动力特性	174
8.4.2 交通荷载下桥面的振动强度	178
8.4.3 钢梁动力放大系数测试分析	178
8.4.4 斜拉索的振动及索力测定	179
8.5 千米级斜拉桥结构静力性能测试与分析	182
8.5.1 密集荷载下结构静力性能测试	182
8.5.2 密集荷载下结构整体力学行为	183
8.5.3 密集荷载下结构局部应力分析	185
8.6 小结	186
参考文献	187

第1章 绪 论

1.1 斜拉桥的发展历程

在桥梁这个大家族中,各式桥梁按结构体系划分,从梁桥、拱桥、刚架桥到缆索承重桥(即悬索桥、斜拉桥),斜拉桥可谓是后起之秀,它发展时间最短,却成为当今世上最受关注、应用最广泛也最具美感的桥型之一。斜拉桥的兴起非一朝一夕之功,没有最简单的梁桥,没有梁桥——拱桥——刚架桥——悬索桥——斜拉桥一步步的创新积累过程,就没有今天斜拉桥的大放异彩。回顾斜拉桥发展的历史,可以从了解结构体系的演变。

斜拉桥结构的影子,可以从最早时期的桥梁建筑中找到,近代的悬索桥和斜拉桥正是由古代的藤、竹悬索桥发展而来的。斜拉桥的进步是由德国人 Franz Dischinger 推动的,他的设计思想体现于莱茵河几座钢斜拉桥上,因而闻名于世。现代第一座斜拉桥——Strömsund 桥,1956 年在瑞典建成通车。该桥为三跨形式,两对斜拉索完全按纯扇形体系从塔顶放射散开布置,索塔为门式,加劲梁有两根位于索面外侧的板梁,容许斜拉索锚具隐藏在板梁以内。

斜拉桥结构发展至关重要的一步莫过于由稀索体系转变到密索体系,结构受力进一步合理化。第一座密索体系斜拉桥是由霍姆伯格(H. Homberg)设计的弗里特里希·欧贝特(Friedrich Ebert)桥,此桥建成于 1967 年,采用中心索面及支支承 40 根斜拉索的双塔。汉堡港的柯尔勃仑特(Kohlbrand)桥,是具有修正扇形索面构造以及短边跨的高效斜拉桥体系之一。

几乎所有斜拉桥的边主跨比都小于 0.4,除非边跨有中间支墩。而 20 世纪 90 年代日本建成的鹤见航道桥,边主跨比达 0.5,且一个单索面却支承了 38m 宽的大箱梁。具有地锚体系的首座重要斜拉桥是建造在佛罗伦萨附近跨越安诺河的印第安诺(Indiano)桥。

在斜拉桥的整个发展过程中,斜拉桥外形、跨径布置和索塔形状出现了许多变化。近 50 年来,主要有以下趋势:

(1) 跨径的增大

短短几十年的发展,斜拉桥跨径的增长尤其引人瞩目,斜拉桥以其纤细柔美的体态展现在世人的面前,斜拉桥跨径记录的变化趋势见图 1-1。特别是 21 世纪以来,斜拉桥跨径纷纷跨入千米级别,在给人美感的同时也不断提出新的技术挑战。

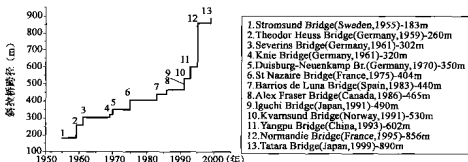


图 1-1 现代斜拉桥跨径记录变化曲线

(2) 密索、柔梁

斜拉桥经历了从稀索布置到密索布置的过程,这是由于稀索布置的斜拉桥会在主梁内产生较大的弯矩,迫使梁高增加,体系偏于梁桥,以致不能显著展现斜拉桥的受力优势。随着索距的减小,主梁得以弱化,为扁平加劲梁的出现提供了条件。需要指出的是,这也是计算能力提高的结果。

(3) 多塔

多塔斜拉桥是斜拉桥在不能满足一跨过水的情况下发展起来的,也可称作多跨斜拉桥(multispan cable-stayed bridge)。新世纪,大量跨越海湾、海峡大桥的兴建被提上议事日程,多塔斜拉桥往往成为具有竞争力的备选方案。

(4) 轻质高强材料

由于材料自身特性的限制,传统的钢、混凝土已跟不上结构体系创新脚步。碳纤维(Carbon Fiber Reinforced Polymer,简称 CFRP)和芳纶纤维(Aramid Fiber Reinforced Polymer,简称 AFRP)两种材料由于具有强度高、模量大、比重小、耐碱腐蚀等特点被引入到土木工程领域,日益受到人们的重视。

1.2 斜拉桥的结构体系

斜拉桥与一般连续梁桥都有作为跨越和承载作用的主梁,差别在于斜拉桥多了将主梁连续支承的拉索和将主梁中沿拉索传至的力进一步传递到基础的桥塔,斜拉索的弹性支承作用降低了梁跨的截面弯矩,使斜拉桥主梁比一般连续梁桥的更轻,跨越能力更高,斜拉桥的主梁、拉索、桥塔形成了一个简单明确的受力体系。

有关斜拉桥结构体系的观点论述虽然不同,但焦点却一致,均是以几种基本构件为前提。由此,斜拉桥的结构体系可理解为梁、塔、索三种基本构件之间不同的结合方式,和力在这三种基本构件之间传递方式。具体而言,按梁塔的结合方式,可组成四种不同的结构体系(如图 1-2 所示),即漂浮体系、支承体系、固结体系和刚构体系。如果将斜拉桥中一切形式的墩(包括塔墩、边跨辅助墩、锚固墩等)均看作塔的延伸及补充,那么边跨是否设置辅助墩、要设置的间距及数量、支承形式等都是斜拉桥结构体系所应讨论的范围。按斜拉索在塔梁间的布置形式,由索面布置形式有两种结构体系(如图 1-3 所示):竖琴体系和扇形体系;由空间索面布置可分为单索面体系、双索面体系,如图 1-4;由锚拉方式不同形成两种结构体系:自锚式体系和地锚式体系(含部分地锚式),如图 1-5。

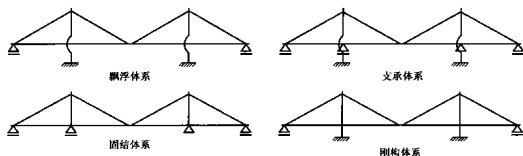


图 1-2 斜拉桥的结构体系



图 1-3 拉索在索面内的布置



图 1-4 拉索的空间布置

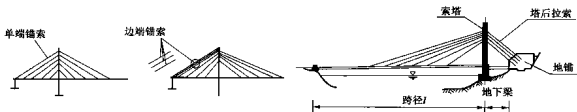


图 1-5 自锚体系与地锚体系

1.3 千米级斜拉桥的结构受力特点

斜拉桥属组合体系桥梁,它的上部结构由主梁、拉索和索塔三种构件组成。它是一种桥面体系以主梁受轴向力(密索体系)为主、支承体系以拉索受拉和索塔受压为主的桥梁。在荷载作用下,构件受力按刚度分配。斜拉桥的主要特点是利用由桥塔引出的斜拉索作为梁跨的弹性中间支承,借以降低梁跨的截面弯矩、减轻梁重、提高梁的跨越能力,如图 1-6 所示。

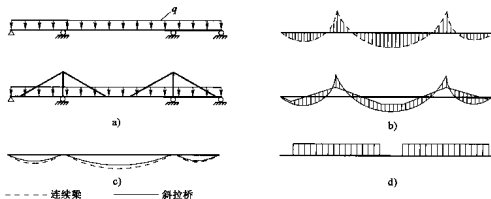


图 1-6 斜拉桥与连续梁的比较

a)桥式;b)弯矩;c)挠度;d)轴量力

斜拉桥利用主梁、拉索、索塔三者的不同组合形成不同的结构体系以适应不同的地形和地质条件。斜拉桥便于采用悬臂法施工和架设,借助斜拉索的作用可减轻施工机具对结构的影响,且安全可靠。与悬索桥相比,斜拉桥不需要笨重的锚固装置,抗风性能也优于悬索桥。但是,斜拉桥是一种高次超静定的组合结构,包含较多的设计变量,全桥总的技术经济合理性不能单从结构体积小、用料省、或者满应力等指标来衡量,这给选定合理的桥型方案和经济合理的设计带来困难,同时,拉索与主梁和索塔的连接构造较复杂,施工技术要求高,且拉索索力的调整工序也较复杂。斜拉桥的结构特点可归结为:恒载内力状态具有多样性;结构状态具有非线性;施工过程与成桥状态具有相关性。

本书着重介绍苏通大桥的设计与结构性能。对于苏通大桥这种结构体系而言,主要有以下几方面的力学特点:

(1) 主梁轴向压力大

主梁内轴向力的分布和轴力的正负号随斜拉桥拉索的锚拉体系和主梁的支承条件不同而变化。主梁处于完全受压状态,这对抗拉性能较差的混凝土主梁来说,相当于施加了免费预应力,既能充分发挥高强材料的特性,又提高了梁的抗裂性,对混凝土斜拉桥是十分有利的。但随着斜拉桥跨径的增大,斜拉索的水平拉力对主梁形成的水平轴向压力逐渐积累,在近塔处轴向力增加到很大值如图 1-7 所

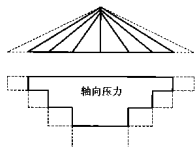


图 1-7 主梁轴向力随跨径增大的示意图

示。如果主梁截面面积较小,则轴向压应力会很大。同时,还会由于主梁截面模量也小,而导致主梁的压屈失稳。如果为此单纯用加大截面面积的办法来解决,则会由于自重加大而引起恶性循环,同时导致造价的增加,从而成为了千米级斜拉桥的首要制约因素。

(2) 斜拉索的垂度效应与振动

调整拉索的预拉力可以调整主梁的内力,使主梁的内力分布更均匀合理。自锚斜拉桥无需悬索桥那样的锚碇装置。斜拉索水平分力对梁产生轴向预加力,可增强主梁的抗裂性能。在活载作用下,索的刚度是结构刚度的重要组成部分。斜拉桥的拉索一般采用柔性索,在索自重作用下有垂度,垂度大小受到索力影响,属于非线性构件。由于拉索的自重垂度使其弹性模量下降或损失,引起拉索的刚度降低。斜拉索因自重垂度而引起损失后的弹性模量称为修正弹性模量,它与拉索的拉力、自重及水平投影长度有关,即著名的 Ernst 公式。

当斜拉桥跨径达到千米以上后,长拉索的振动问题变得异常突出。拉索的致振机理十分复杂,迄今为止已经知道可能发生的振动类型有以下几种:涡激振动、尾流驰振、风雨激振、抖振、参数振动。

(3) 结构抗风稳定性

斜拉桥是一种柔性结构,在成桥和施工状态,风荷载都是主要的控制荷载,而跨径越大结构越柔,风的静力作用越来越显著,同时风作用引起的各种复杂振动问题也越来越突出。

(4) 结构非线性

随着斜拉桥跨度的增加,结构刚度急剧下降,可能会出现一系列新的特殊力学问题。当斜拉桥的跨径较小时,非线性对结构的影响较小,因此,以往的斜拉桥在设计初始阶段一般还是采用线性方法进行计算。随着斜拉桥跨径的增大,非线性计算结果与线性计算结果的差别越来越大,对传统设计思路提出挑战。

1.4 苏通大桥介绍

苏通大桥主跨 1088m,主航道桥为支承体系双塔双索面七跨连续钢箱梁斜拉桥。结构采用弹性约束体系,即:过渡墩、辅助墩墩顶及索塔下横梁设滑动支座约束主梁竖向位移和扭转,索塔下横梁与主梁之间同时还设置纵向连接装置。加劲梁采用抗风性能好、整体性强、线条美观的封闭式流线型扁平钢箱梁,高跨比为 1/272,索塔采用人字形钢筋混凝土结构,承台以上塔高 300m,如图 1-8 所示。

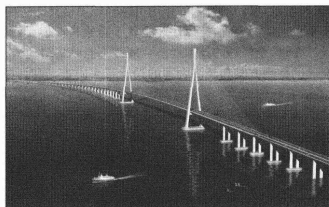


图 1-8 苏通大桥

苏通大桥初步设计阶段对主航道桥钢斜拉桥方案从纵向全飘浮、索塔处设竖向支座、索塔处设纵向弹性约束和塔梁固结四种体系方式进行了静力计算分析比较,研究表明,对超大跨径斜拉桥而言,正常使用状态(温度、汽车作用下)全飘浮体系要优于塔梁固结体系,但要控制静风引起的塔梁位移;同时从

结构动力学角度分析,也需要采取措施,调节结构在地震、脉动风等引起的动力反应。

通过对主梁两类约束——水平弹性约束和冲击荷载阻尼(阻尼)约束的计算分析,苏通大桥的纵向约束可采用弹性约束装置,也可采用冲击荷载缓冲(阻尼)约束装置。与水平弹性约束相比,冲击荷载阻尼约束体系具有约束对象明确、正常使用状态给予结构自由度大、使用寿命长的优点。在综合二者优势的基础上,苏通大桥纵桥向塔梁连接最终采用具有 $\pm 750\text{mm}$ 额定行程量的刚性限位和动力阻尼组合的装置系统。一个塔梁连接处安装 4 个装置,全桥共 8 个,装置布置及外形如图 1-9 所示。

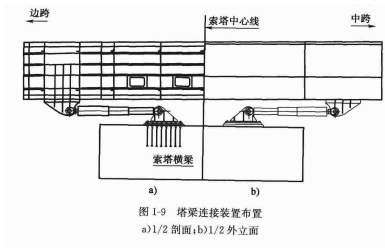


图 1-9 塔梁连接装置布置
a) 1/2 剖面; b) 1/2 外立面