

※ 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

组合索塔锚固结构

Cable-Tower Composite Anchorage



张喜刚 刘玉擎 著



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书全面介绍了钢—混凝土组合索塔锚固结构的研究成果及工程应用情况,内容涉及组合索塔锚固结构的有限元计算、模型试验、现场监测、简化计算、细部构造、钢锚箱加工以及施工控制等,并附有设计示例。

本书可供从事桥梁工程设计、施工、科研工作的工程技术人员参考,亦可供相关专业研究生查用。

图书在版编目(CIP)数据

组合索塔锚固结构/张喜刚等著. —北京:人民交通出版社,
2010.2
ISBN 978-7-114-07772-2

I. 组… II. 张… III. 斜拉桥—索塔—锚固 IV. U443.38

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第004963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:组合索塔锚固结构

著 作 者:张喜刚 刘玉擎

责任编辑:沈鸿雁 王文华

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)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:北京盛通印刷股份有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:8.75

字 数:245千

版 次:2010年2月 第1版

印 次:2010年2月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-07772-2

定 价:30.00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、上海浏港桥、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 2×134 m 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 and 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 1 088m 斜拉桥,以及在其基础上拓展的主跨 1 308m、1 500m、1 800m 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

随着斜拉桥跨径的进一步增大,各承重构件所受荷载将会大幅度增加,这就要求有更加合理的结构设计。斜拉桥的斜拉索承担着将主梁上的荷载传递给索塔的作用,索塔锚固区成为一个重要的关键设计部位。传统设计主要是在索塔锚固区布置环向预应力筋,从而达到承担拉索水平分力的目的。但是随着斜拉桥跨径增大、索塔高度增加,对索塔锚固区的安全可靠性要求更高,其施工和后期的维护难度等也将随之加大。

采用钢锚箱或钢锚梁与混凝土塔壁结合,形成组合索塔锚固结构,利用钢结构承担斜拉索水平拉力、混凝土塔壁承担竖向压力,充分发挥钢与混凝土各自的材料性能优势,是更为合理的索塔锚固结构形式,特别适合应用于大跨径斜拉桥。

本书系统总结了斜拉桥组合索塔锚固区结构设计、计算、监测、制作、施工及控制等方面的研究成果,以便为同类大桥的建设提供参考和借鉴。

在本书编写过程中,戴捷、陈志坚、周彦锋、谢瑞丰、顾斌、邢昕、赵晨、王倩等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 刘玉擎

2009 年 12 月

目 录

第 1 章 组合结构在斜拉桥中的应用	1
1.1 概述	1
1.2 组合结构在主梁中的应用	2
1.3 组合结构在主塔中的应用	4
1.4 组合结构在索塔锚固中的应用	5
第 2 章 组合索塔锚固应用实例	9
2.1 钢锚梁锚固应用实例	9
2.2 钢锚箱锚固应用实例	10
2.3 低塔斜拉桥组合索塔锚固	12
第 3 章 组合索塔锚固区传力机理仿真分析	14
3.1 概述	14
3.2 组合锚固区有限元模拟方法	14
3.3 索塔焊钉连接件刚度取值试验研究	16
3.4 锚固区有限元模型的建立	22
3.5 锚固区水平受力机理分析	23
3.6 锚固区竖向受力机理分析	26
3.7 连接件布置影响分析	28
3.8 本章小结	31
第 4 章 组合索塔锚固区节段模型试验及仿真分析	32
4.1 索塔锚固区节段模型试验方法	32
4.2 索塔锚固区节段模型试验设计示例	34
4.3 锚固区节段模型试验结果及分析	39
4.4 锚固区模型试验仿真分析	44
4.5 锚固区水平索力分配	53
第 5 章 组合索塔锚固区的简化计算方法	54
5.1 概述	54
5.2 锚固区的荷载作用	54
5.3 锚固区水平传力计算思路	55
5.4 锚固区水平作用简化计算方法	58
5.5 锚固区水平承载力简化计算	63
5.6 锚固区水平作用影响参数分析	66
5.7 锚固区竖向作用简化计算方法	69
5.8 本章小结	72
第 6 章 组合索塔锚固区的细部构造设计方法	73
6.1 概述	73
6.2 钢锚箱锚固形式的比较	73
6.3 混凝土塔壁抗裂措施	75

2

第 1 章 组合结构在斜拉桥中的应用

1.1 概述

主梁、索塔及拉索是斜拉桥的主要承重构件,选择不同的结构外形和材料可以组合成多姿多彩、新颖别致的斜拉桥形式。斜拉桥主梁主要采用钢梁或混凝土梁,主塔主要有钢塔和混凝土塔。随着大跨度斜拉桥的快速发展,对结构的合理性提出了新的要求,钢与混凝土组合结构以其良好的受力性能和经济性,在斜拉桥中的应用日趋广泛。

大跨度斜拉桥处在快速发展时期,香港昂船洲大桥和苏通大桥的主跨均达到千米以上。随着斜拉桥跨径的增大,斜拉桥各承重构件所受荷载大幅增加,这就要求有更加合理的构造形式。如图 1-1 所示,斜拉桥采用组合结构的主要形式有钢板梁或钢箱梁与混凝土桥面板、折形钢腹板或钢腹杆与混凝土上下翼缘板形成的组合梁;钢梁与混凝土梁组成的混合梁;钢管混凝土塔、型钢混凝土塔以及钢塔与混凝土塔结合的组合塔;钢锚梁与混凝土塔壁、钢锚箱与混凝土塔壁构成的组合索塔锚固结构。

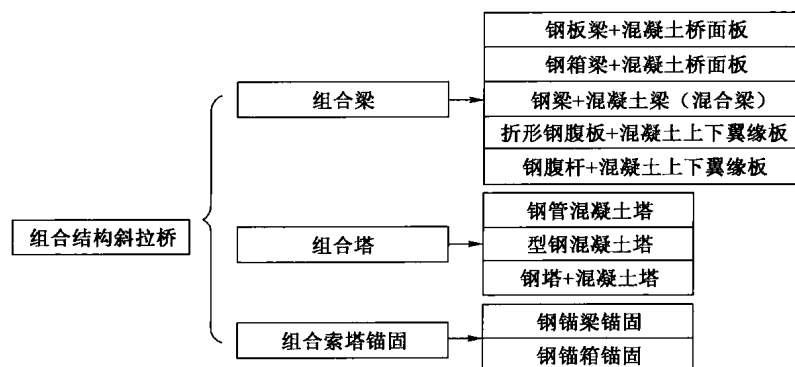


图 1-1 组合斜拉桥的分类

表 1-1 汇总了世界上跨径排名前 10 位的斜拉桥,其中有 7 座在索塔锚固区中采用了组合结构。在其他大跨径斜拉桥中,也有多座采用了组合索塔锚固结构。

世界上跨径排名前 10 位的斜拉桥(截至 2009 年底)

表 1-1

桥 名	主跨(m)	组合结构的应用	国家或地区	建 成 年 份
苏通大桥	1 088	组合索塔锚固	中国	2008
昂船洲大桥	1 018	组合索塔锚固	中国香港	在建
鄂东长江大桥	926	组合索塔锚固,混合梁	中国	在建
多多罗大桥	890	混合梁	日本	1999
诺曼底大桥	856	组合索塔锚固,混合梁	法国	1995
荆岳长江大桥	816	组合索塔锚固,混合梁	中国	在建
仁川大桥	800	组合索塔锚固	韩国	在建
上海长江大桥	730	组合索塔锚固	中国	在建
上海闵浦大桥	708	组合复合桁架梁	中国	2009
宁波象山港大桥	688	组合索塔锚固	中国	在建

大跨度斜拉桥斜拉索承受较大的拉力,如果采用预应力索塔锚固方式,需要配置相当数量的环向预应力钢筋才能满足受力要求,施工难度和后期维修难度将随之加大。因此,大跨度斜拉桥采用钢锚箱或钢锚梁与混凝土塔壁组合索塔,利用钢锚箱或钢锚梁来承受较大的拉索力,可以充分利用两种材料的优点,满足索塔的受力要求,是比较合理的结构形式。

1.2 组合结构在主梁中的应用

斜拉桥主梁在拉索作用下可以看做是弹性支撑连续梁,活载作用时,主梁下部受拉而上部受压。因而,斜拉桥主梁采用钢板梁、钢箱梁、钢管混凝土梁以及槽形钢箱梁与混凝土桥面板组合,可以充分利用钢材和混凝土的材料性能,满足受力要求。如图 1-2 所示是东海大桥主航道桥主梁横截面,该桥为主跨 420m 的单索面斜拉桥。为了适应跨海大桥的特点,采用的是槽形钢与混凝土桥面板的组合梁,结构形式新颖。东海大桥颗珠山桥为双塔双索面斜拉桥,主跨 332m,主梁采用钢主梁和混凝土桥面板的组合梁形式,主梁断面如图 1-3 所示。

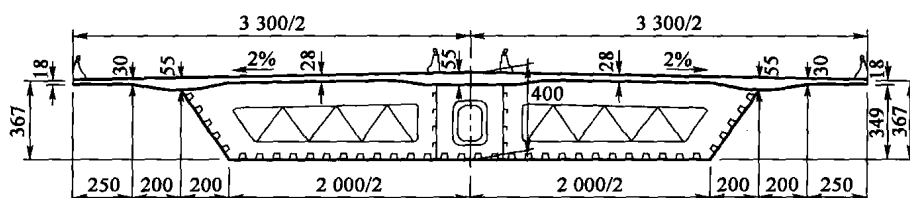


图 1-2 东海大桥主航道桥主梁横截面(尺寸单位:cm)

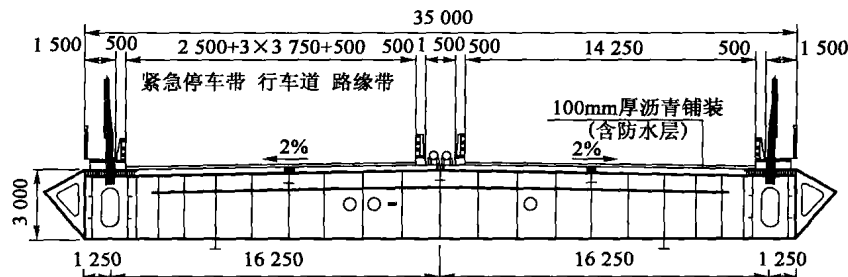


图 1-3 颗珠山大桥主梁横截面(尺寸单位:mm)

对于混凝土箱形主梁,腹板与顶底板形成一体,顶底板的温度差及其腹板的干燥收缩引起的应力问题比较突出,会出现各种各样的裂缝,严重影响承载性能及其耐久性。斜拉桥主梁采用折形钢腹板组合箱梁,可以有效减小收缩徐变等的影响,方便施加主梁预应力,同时还可以大大减轻主梁的自重。日本栗东大桥的主梁横截面如图 1-4a)所示,该桥为最大跨径 170m 的双索面低塔斜拉桥,采用 3 室单箱波折腹板组合箱梁。位于日本第二东名高速公路上的矢作川桥是一座普通斜拉桥,其主梁同样采用了折形腹板组合箱梁。

出于对桥梁刚度和视野通透性的考虑,双层桥面斜拉桥也可以采用钢腹杆组合梁。上海闵浦大桥为主跨跨径 708m 的双层桥面斜拉桥。边跨主梁由外包混凝土的型钢弦杆、钢竖腹杆、钢斜腹杆、钢斜撑、预应力混凝土横梁与混凝土桥面板组成,构成了桁腹式组合梁体系,如图 1-4b)所示。葡萄牙 Europe Bridge 为一座独塔斜拉桥,主梁模型如图 1-4c)所示,主梁为双向预应力混凝土桥面与钢腹杆组成的桁腹式组合梁体系,钢腹杆与混凝土桥面板的结合方式为直接插入式。该桥在设计上充分考虑了桥梁的服务功能、与环境相协调的景观美学、结构创新三者的结合。

为了满足通航等要求,有些斜拉桥主跨和边跨跨径比例失调。此时,为了平衡斜拉索力,常在中跨

采用钢主梁,而边跨采用混凝土主梁作为配重,即钢梁与混凝土梁组成的混合梁斜拉桥。

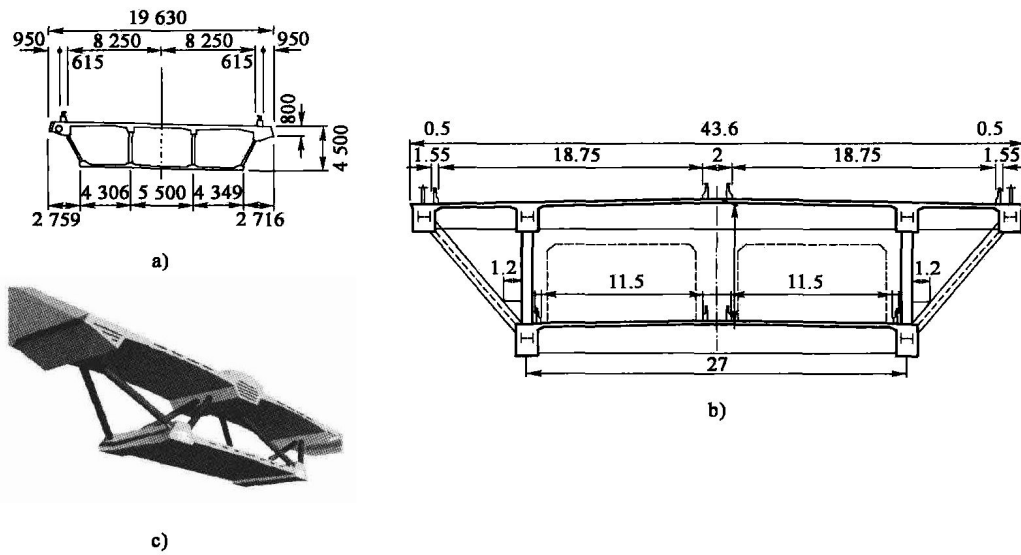


图 1-4 组合结构在主梁中的应用

a) 栗东大桥主梁横截面(尺寸单位:mm); b) 闵浦大桥边跨主梁横截面(尺寸单位:m); c) 葡萄牙 Europe Bridge

鄂东长江大桥主梁中跨采用钢箱梁,边跨采用混凝土箱梁,混合梁结合段构造如图 1-5 所示。钢与混凝土结合段采用钢格室与混凝土横梁浇筑为一体的连接形式,钢格室通过钢箱梁加强段与钢箱梁连接。为了保证钢箱梁与混凝土箱梁紧密结合,结合段混凝土在纵向弯矩和横向风荷载作用下均不出现拉应力,在该处采用设置预应力钢束进行连接。

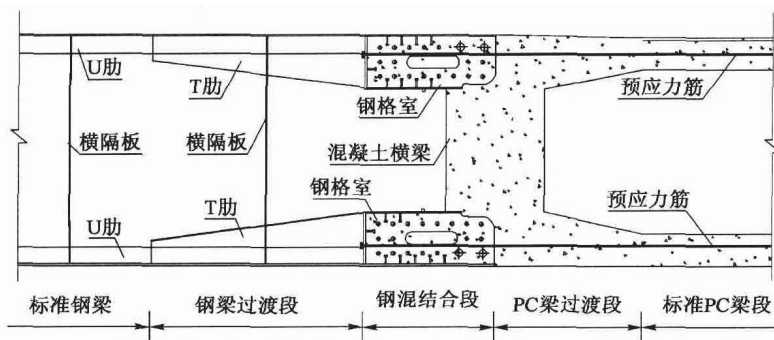


图 1-5 鄂东长江大桥主梁结合段

荆岳长江大桥为主跨 816m 的混合梁斜拉桥,钢与混凝土结合段构造如图 1-6 所示。采用混合梁的斜拉桥还有法国的诺曼底桥,日本的多多罗大桥,我国的徐浦大桥、湛江海湾大桥等。

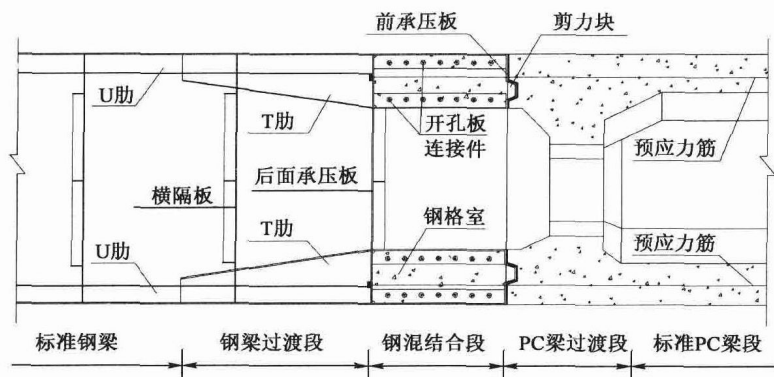


图 1-6 荆岳长江大桥主梁结合段

1.3 组合结构在主塔中的应用

斜拉桥主塔采用钢与混凝土结合的形式,即组合塔斜拉桥。合理地使用组合塔斜拉桥可以使材料用量及工程费用得以降低,同时还可以方便施工。斜拉桥组合结构索塔主要有两种形式,即钢管混凝土塔柱和钢与混凝土上下组合塔柱。钢管混凝土塔柱又有单管形与哑铃形两种形式。

广东省紫洞大桥的索塔布置如图 1-7 所示,该桥为双塔单索面斜拉桥,索塔采用单管圆形钢管混凝土结构,塔梁墩固结,主塔高 36m,钢管外径 1 840mm,厚度 25mm,填充 C50 混凝土。采用钢管混凝土塔柱,在施工中不需要模板及其支架,加工及其拼装都很方便,与混凝土塔柱相比,其材料用量及工程费用将大幅节省。

淮北市长山路桥为独塔双索面斜拉桥,其索塔塔柱布置如图 1-8 所示。索塔柱采用哑铃形钢管混凝土组合截面,减小了塔柱的截面尺寸,增强了结构延性及抗震能力,同时哑铃形截面的两块腹板间可设置索塔锚固装置。日本石川县在 1990 年完成同类型的一座人行斜拉桥,采用哑铃形钢管混凝土作为主塔,钢管直径为 508mm,厚度为 12mm,管壁内侧加工成刻纹,以此来提高与填充混凝土的黏结性能,混凝土采取自上而下的浇筑方式。

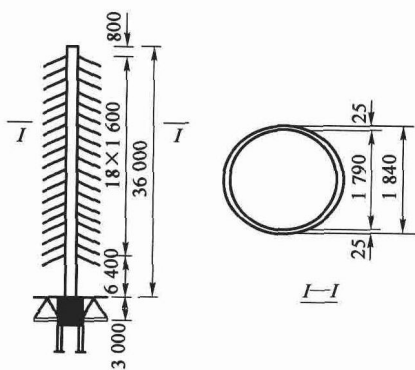


图 1-7 紫洞大桥塔柱布置(尺寸单位:mm)

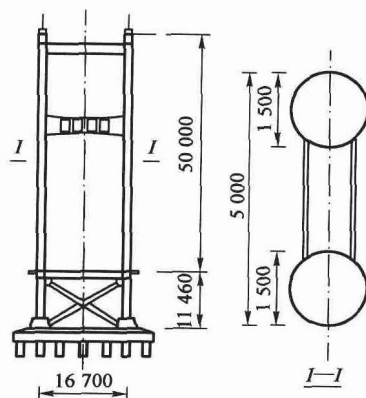


图 1-8 长山路大桥塔柱布置(尺寸单位:mm)

钢与混凝土组合索塔的结合部有三种情况:一是在承台顶部附近,日本大部分桥梁均如此;二是在主梁附近,如泰国的湄南河桥、日本鹤见航道桥、我国的南京长江第三大桥等;三是在索塔锚固区附近,如捷克斯洛伐克的 Elbe River 桥。

南京长江第三大桥是跨径 648m 的斜拉桥,首次在国内桥梁建设中运用钢结构塔柱,钢与混凝土上下塔柱的结合面放置在索塔下横梁顶面,塔柱结合部的构造如图 1-9 所示。

Elbe River 桥是一座双塔单索面斜拉桥,最大跨径为 123.2m,其索塔布置如图 1-10 所示。主塔为钢与混凝土上下塔柱的组合。塔柱由 2 格室的钢箱构成,混凝土填充到离最下端拉索 0.75m 的位置。

日本的都田川桥是一座单塔三索面低塔斜拉桥,跨径为 133m+133m,桥面以上塔高为 20m,而塔墩高为 62.9m。塔墩与塔柱均采用内含多根钢管混凝土的结构形式,箍筋则用预应力筋螺旋布置,从而提高约束作用,减少钢筋绑扎的工时。钢管外表面设有刻纹从而提高它与混凝土的黏结力。

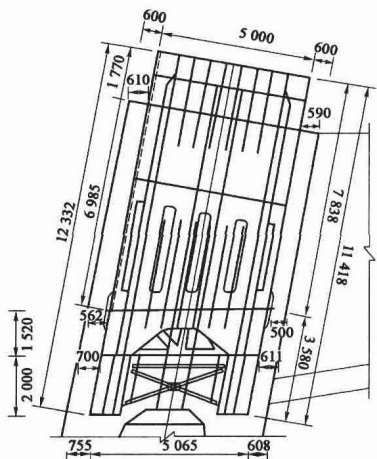


图 1-9 南京三桥塔柱结合部(尺寸单位:mm)

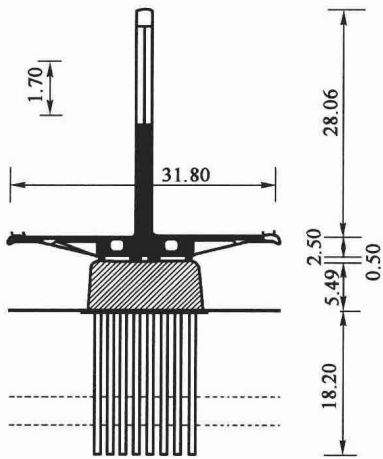


图 1-10 Elbe River 桥索塔的布置(尺寸单位:m)

1.4 组合结构在索塔锚固中的应用

主塔的拉索锚固部位,是一个将拉索的局部集中力分散到全截面,并安全、均匀地传递到锚固区以下塔柱的重要受力构造。拉索锚固部位的构造,与拉索的布置形式、主塔的构造与材料、拉索的牵引和张拉方法等种种因素有关,索塔的施工还要满足可行性。由此可见,索塔锚固区是斜拉桥的关键部位,其可靠与否直接关系到大桥的安全度。

在斜拉桥的发展历程中,工程师设计了各种形式的锚固构造,近年来索塔锚固方式多采用拉索在锚固区断开的非交错式锚固结构。组合索塔锚固结构以钢结构承担拉索水平拉力,以混凝土塔壁承担竖向压力,发挥材料各自的优势,特别适合应用于大跨度桥梁。其主要形式有钢锚梁锚固及钢锚箱锚固,以下对这两种组合索塔锚固结构的特点和应用情况进行简要介绍。

1.4.1 钢锚梁式组合锚固结构

混凝土索塔钢锚梁的锚固方式,是将钢锚梁沿顺桥向置于混凝土索塔内壁的牛腿上,拉索锚固在钢横梁两端的锚固件上,锚固件通过两斜腹板将索力传递给钢横梁,其中,水平力主要由钢横梁承受,竖向分力通过支座传递给牛腿进而传给塔柱。钢锚梁由上下盖板、腹板(拉板)、锚垫板和承压板组成,其他横隔板、连接板和加劲板等均为连接和保证结构整体性而设。其中锚垫板和支承板是主要承压构件,腹板是主要承拉构件,如图 1-11 所示。采用钢锚梁锚固形式的斜拉桥有南浦大桥、杨浦大桥、江苏灌河大桥、东海颗珠山大桥、东海大桥主航道桥和加拿大 Annacis 大桥等,如表 1-2 所示。

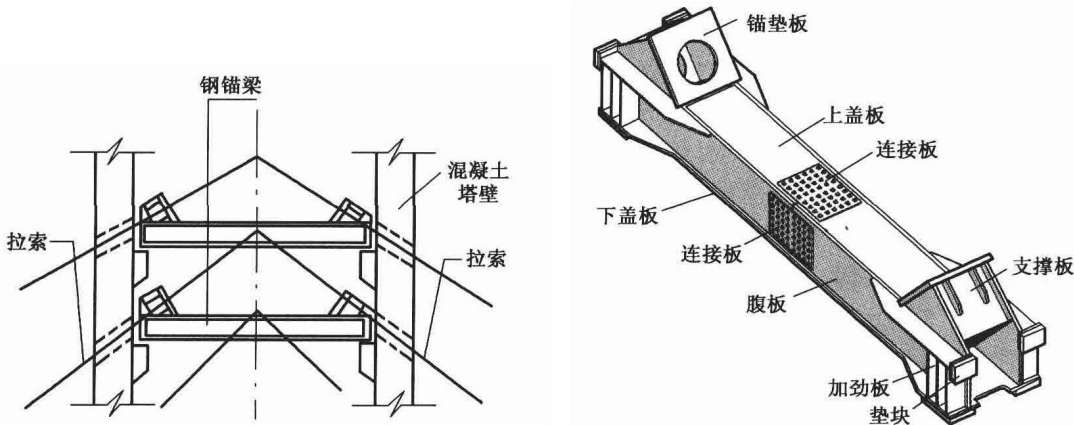


图 1-11 钢锚梁式组合索塔锚固

钢锚梁应用情况(截至 2009 年底)

表 1-2

桥 名	主 跨(m)	国 家	建 成 年 份
荆岳长江大桥	816	中国	在建
舟山金塘大桥	620	中国	2009
上海杨浦大桥	602	中国	1993
Annacis 大桥	465	加拿大	1986
上海南浦大桥	423	中国	1991
东海大桥主航道桥	420	中国	2005
江苏灌河大桥	340	中国	2006
东海明珠山大桥	332	中国	2005

钢锚梁与混凝土塔壁之间的连接有刚性与非刚性两种方式,如图 1-12 所示。非刚性连接的钢锚梁锚固方式是将钢锚梁架设在塔壁内牛腿的橡胶支座上,斜拉索的水平分力全部由钢锚梁承担,斜拉索的竖向分力通过牛腿传递到混凝土塔壁上。考虑到在运营若干年后斜拉索换索及可能出现的断索情况,主塔截面纵向将出现较大的不平衡水平分力,为使塔壁更好地共同受力,有时采用钢锚梁与塔壁间刚性连接的方式,即钢锚梁与牛腿之间通过焊钉连接。这样钢锚梁和混凝土塔壁将共同承担斜拉索的水平分力。

钢锚梁的牛腿大多为混凝土结构,与塔壁一起浇筑。因为牛腿处受力较大,且,从塔壁突出,不便于滑模施工,近年也出现了采用钢牛腿的结构形式。

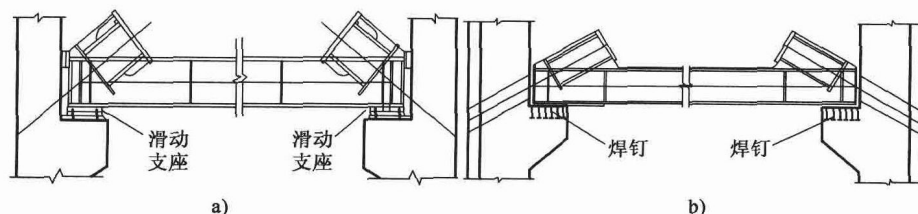


图 1-12 钢锚梁与牛腿连接方式
a)非刚性连接(灌河大桥);b)刚性连接(东海大桥)

钢锚梁有先装法和后装法两种安装方法。先装法是在相应混凝土牛腿施工前,就将钢锚梁吊装到位;后装法则是将钢锚梁先分两部分,吊装到位后利用高强螺栓在高空连接。

钢锚梁组合锚固结构体系的主要特点是:

- (1)斜拉桥拉索的水平分力由钢锚梁自相平衡,而不直接作用在混凝土塔壁上,无需施加环向预应力。
- (2)钢锚梁可以在工厂预制,现场安装,施工快捷方便,避免了全混凝土锚固区必须的环向预应力的高空作业,且可以在工厂精确加工、试拼,拉索倾角定位准确,施工质量有保证。
- (3)需要在钢锚梁两端设纵桥向和横桥向的限位构造装置。当塔柱两侧拉索水平分力不等时,不平衡力将通过钢横梁下的支撑摩阻力或顺桥向两端的限位挡块传给牛腿,再传给塔壁。
- (4)由于钢锚梁两端可作微小的自由移动和转动,由温度影响引起的约束力也比较小。

1.4.2 钢锚箱式组合锚固结构

20 世纪 90 年代以来,日本、欧洲、中国等地相继建成许多大跨度斜拉桥。钢锚箱结构形式由于其受力方式明确、锚固点定位准确、施工方便等优点,已在多座大跨度斜拉桥中得到应用。如表 1-3 所示。

钢锚箱结构如图 1-13 所示。钢锚箱的优点与钢锚梁类似,如钢锚箱可承受大部分甚至全部斜拉索水平力,易于检测维护;钢结构力学性能较为可靠;工厂加工,锚箱施工质量

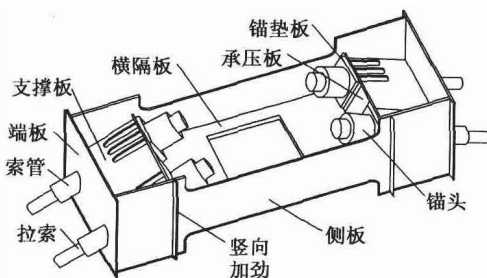


图 1-13 钢锚箱结构示意

容易保证等。与钢锚梁不同的是钢锚箱侧板位于拉索两侧,锚箱横隔板形成一个张拉平台,便于施工;另外,各锚箱通常上下连接,使锚固点定位更加精确,同时也分担了部分竖向力。

钢锚箱应用情况(截至 2009 年底) 表 1-3

桥 名	主 跨(m)	锚 固 形 式	国 家	建 成 年 份	连接件使用情况
苏通大桥	1 088	内置式	中国	2008	焊钉
昂船洲大桥	1 018	内置式	中国香港	2009	焊钉
鄂东长江大桥	926	内置式	中国	在建	焊钉/开孔板
诺曼底大桥	856	外露式	法国	1995	焊钉/刚性连接件
仁川大桥	800	内置式	韩国	在建	焊钉
上海长江大桥	730	内置式	中国	2009	焊钉
里翁-安蒂里翁大桥	560	外露式	希腊	1995	焊钉
厄勒海峡大桥	490	内置式	瑞典、丹麦	2000	焊钉
Geo-Geum-Brücke	468	外露式	德国	在建	焊钉
汀九大桥	448	外露式	中国香港	1998	无连接件
杭州湾跨海大桥	448	外露式	中国	2008	焊钉
济南黄河三桥	386	内置式	中国	2008	焊钉

依据钢锚箱在混凝土塔壁中的位置,可将其分为外露式和内置式两种方式。外露式钢锚箱将混凝土塔壁分开,斜拉索的竖向分力由锚箱两侧板的连接件传递到混凝土塔壁,通常需通过塔壁的环形预应力提高钢与混凝土交界面传剪力效果及减少混凝土塔壁拉应力。内置式锚索区混凝土塔柱仍是完整的箱形结构,钢锚箱封闭在混凝土塔壁内侧,斜拉索的竖向分力由锚箱两端板上的连接件传递到混凝土塔壁。两种构造如图 1-14 所示。

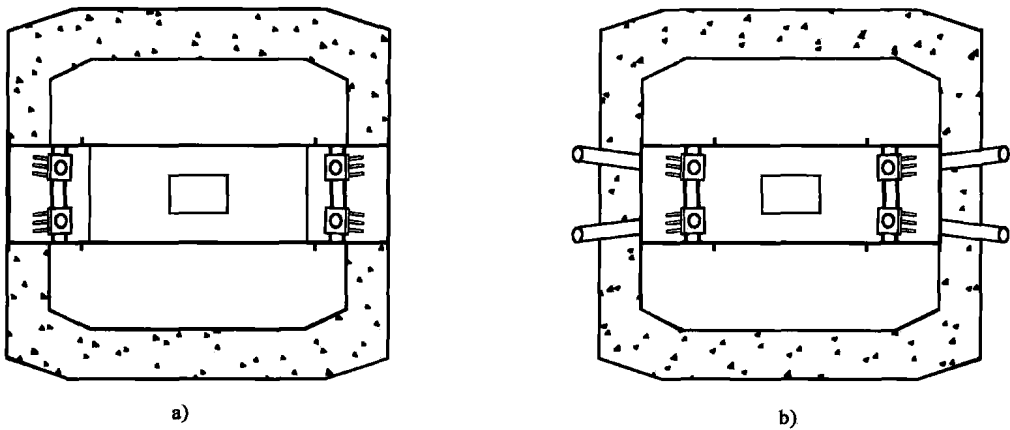


图 1-14 钢锚箱式组合索塔锚固形式
a)外露式;b)内置式

目前,钢锚箱组合结构的合理应用方法尚在研究之中,也有一些桥梁采用以上两种形式以外的钢锚箱结构。香港汀九大桥为三塔四索面斜拉桥,将钢锚箱安装在等截面独柱索塔两侧,以直线对穿预应力将其固定在塔壁上,如图 1-15 所示。德国 Zweite Geo-Geum-Brücke 桥为主跨 468m 双塔单索面斜拉桥,其斜拉索分成三组,拉索锚固在三个独立的 15.50m 高的钢锚箱上。锚箱端板加宽,吊装定位后浇筑锚箱侧板和塔壁之间的混凝土,如图 1-16 所示。

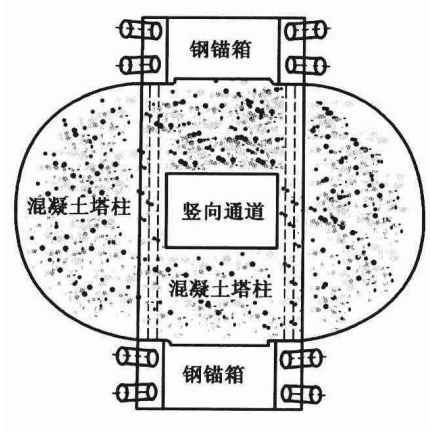


图 1-15 香港汀九大桥索塔锚固区横截面

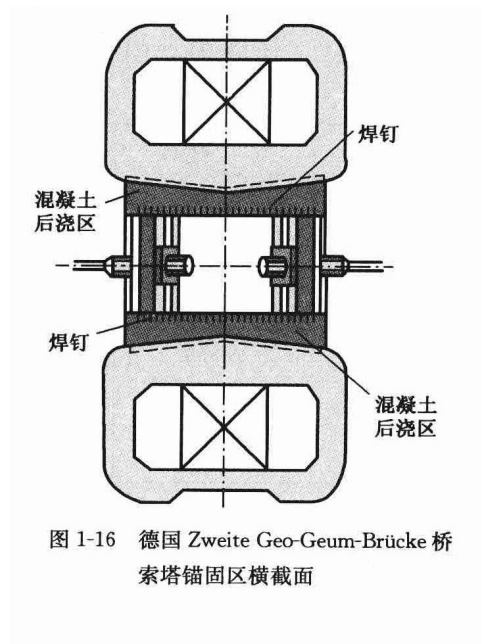


图 1-16 德国 Zweite Geo-Geum-Brücke 桥索塔锚固区横截面

第2章 组合索塔锚固应用实例

2.1 钢锚梁锚固应用实例

2.1.1 混凝土牛腿钢锚梁

灌河大桥是江苏省连云港至盐城高速公路上的一座特大型桥梁,采用双塔双索面半飘浮组合梁斜拉桥,桥面净宽 33m,主桥跨径布置为:32.9m+115.4m+340m+115.4m+32.9m。索塔采用平行索面的钢筋混凝土 H 形塔,共设 2 道水平横梁。每个索塔上共 13 对拉索,除第 1 对斜拉索直接锚固在上塔柱底部的混凝土底座上外,第 2~13 对斜拉索锚固在钢锚梁上。

钢锚梁长 5.6m,宽 1.02m,中部梁高为 0.62m。钢锚梁梁端距塔壁 100mm,设有限位钢板,每端在纵向设有 5mm 活动量。牛腿宽 500mm,顶面设预埋开槽钢板,内设聚四氟乙烯板支承钢锚梁。在运营状态时,钢锚梁并不会前后滑动。

锚垫板、支承板是主要钢锚梁承压构件,板厚分别为 50mm 和 40mm,拉板是主要承拉构件,板厚 30mm。为增加钢锚梁钢板的竖向稳定性,侧板外侧焊有竖向加劲肋;在箱形拉板之间设置横隔板,厚度 20mm。钢锚梁构造如图 2-1 所示。

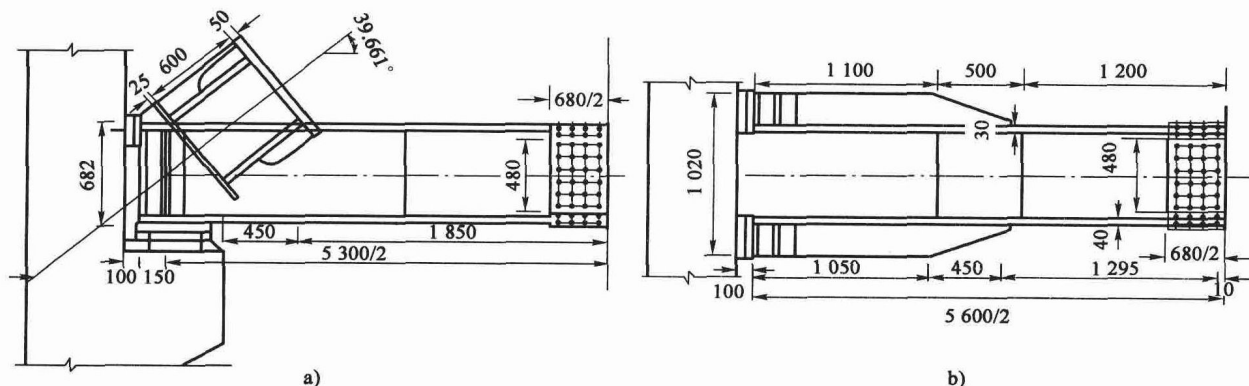


图 2-1 灌河大桥钢锚梁结构示意图(尺寸单位:mm)

a)半立面;b)半平面

为便于安装,每根钢锚梁分为 2 个节段,并采用高强螺栓连接。为方便安装和检修,在箱形拉板的底板中段设有手孔,端部开有人孔。

2.1.2 钢牛腿钢锚梁

大跨径斜拉桥为了提高结构抗风性能,普遍采用空间索面,因此为了采用钢锚梁构造,必须对其进行改进。主跨 620m 的舟山金塘大桥采用了新型钢锚梁,改进的思路主要是将斜拉索锚固构造焊在锚固梁两侧,一根钢锚梁连接 4 根斜拉索,斜拉索的平衡水平分力由钢锚梁承担,面外水平力也可由钢锚梁自身平衡。针对钢锚梁锚固施工不便的缺点,采用钢牛腿代替混凝土牛腿,并利用端板连接钢牛腿和混凝土塔柱,端板设置连接件保证和塔柱混凝土的可靠连接。端板沿上塔柱通长设置,这是改进方案的主要亮点,通长布置的端板同时作为混凝土施工的模板,因此内壁亦可以方便地利用滑模施工。这样一