

钻孔桩施工监理技术
承台施工监理技术
索塔施工监理技术
主梁施工监理技术
斜拉索施工监理技术
钢锚梁和钢锚箱施工监理技术
斜拉桥施工控制
斜拉桥施工安全监理
斜拉桥施工测量监理

XIELAQIAO SHIGONG
JIANLI JISHU

斜拉桥施工 监理技术

张自荣 薛进 李超 编著



人民交通出版社
China Communications Press

Xielaqiao Shigong Jianli Jishu
斜拉桥施工监理技术

张自荣 薛 进 李 超 编著

人民交通出版社

前 言

20 世纪 50 年代中期,瑞典人修建了世界上第一座斜拉桥,主跨径为 182m。我国第一座斜拉桥是 1974 年 3 月建成的重庆云阳汤溪河斜拉桥,跨径 35m + 76m + 35m,从此开始了修建斜拉桥的新时代。改革开放以后,我国修建斜拉桥的势头一直呈上升趋势,之初都以混凝土斜拉桥为主,近几年已发展到钢塔和钢主梁的斜拉桥及多种结构形式的斜拉桥。随之而来,斜拉桥跨度从以混凝土为主梁结构的 400 ~ 500m 发展到用全钢主梁的 1 000m。目前正在建的斜拉桥,又发展到钢与混凝土的混合式斜拉桥以及钢和混凝土结合的斜拉桥,其中最典型的桥梁是已建成的武汉天兴洲公铁两用斜拉桥以及目前正在建的武汉二七长江大桥。武汉天兴洲公铁两用长江大桥是主跨 504m 双塔三桁三索面斜拉桥,上层为公路、下层为铁路,也是当今世界同类型大桥中跨度最大、荷载最重的斜拉桥,是代表着国内外桥梁技术最高水平的标志工程。武汉二七长江大桥是一座主跨为 $2 \times 616\text{m}$ 的三塔斜拉桥,也是钢与混凝土结合的斜拉桥,其边跨为钢和混凝土的混合式斜拉桥。可以预计今后更大跨度和更为先进结构形式的斜拉桥将有更加宽广的发展前景。

本书收集了自 20 世纪 90 年代后期至今 10 多年中近 10 座超大型斜拉桥施工、监理的各项技术资料,整理和编纂了一本适合于广大从事斜拉桥施工和监理的工程技术人员阅读和参考的技术性文本,本书也可作为中高级相关的技术人员进行研究和进一步深化与发展的参考资料。

本书共分十章,包括斜拉桥的概述,桩基承台、索塔、主梁、斜拉索施工和施工控制的全部内容,各个章节都由浅入深、从理论到实践,从原材料入手到分部工程的完成,均有详实的介绍和经验总结。书中特别对斜拉桥的塔、梁和索三个重要结构的施工和监理进行详实讲解和说明,深入浅出、图文并茂、通俗易懂,对初入门的斜拉桥建设者来说是一本很好的教科书性读物;同时也对近期已完成的斜拉桥在施工和监理方面作了公正的评述和介绍,对今后的大型和超大型的斜拉桥施工和监理有一定的指导和参考作用。

在本书编写过程中,中铁武汉大桥工程咨询监理有限公司张河、杨锐等同志参加了部分编写工作,陈文进、卢小伟、王晶等同志进行了部分校核、修改工作,并提出了很好的意见和建议,在此对他们表示衷心感谢。书中还引用了国内已有的专著、论文、规范、工程课题研究报告成果,在此对其作者一并表示感谢。

由于斜拉桥施工技术复杂并处于不断创新和发展之中,且限于编者学术水平有限,书中难免出现疏漏或错误,请读者甄别并敬请批评指正。

作者

2010 年 8 月于武汉

目 录

第一章 概述	1
第一节 斜拉桥发展	1
第二节 斜拉桥的结构体系和构造特点	2
第三节 我国斜拉桥的发展	7
第二章 钻孔桩施工监理技术	10
第一节 水上施工平台的搭设	10
第二节 试桩施工	14
第三节 钻孔桩施工	17
第四节 钻孔桩桩底压浆施工	22
第五节 钻孔桩常见问题及处理	25
第六节 特殊地层的处理	29
第三章 承台施工监理技术	31
第一节 承台主要施工方法	31
第二节 钢套箱的施工	32
第三节 承台混凝土施工的温度控制	41
第四节 承台施工	47
第五节 水中桥墩的防撞措施	50
第四章 索塔施工监理技术	58
第一节 索塔施工概述	58
第二节 钢筋混凝土索塔施工监理	61
第三节 钢索塔施工监理	82
第五章 主梁施工监理技术	97
第一节 斜拉桥主梁概述	97
第二节 钢箱梁的施工监理技术	102
第三节 混凝土主梁的施工监理技术	133
第四节 钢—混凝土结合梁的施工监理技术	149
第五节 钢—混凝土混合梁的施工监理技术	157
第六章 斜拉索施工监理技术	165
第一节 斜拉索的类型与性能	165
第二节 平行钢丝斜拉索的制作监理	167
第三节 平行钢丝斜拉索的施工监理	171
第四节 钢绞线斜拉索的安装及张拉	178

第五节	斜拉索施工常见问题及控制	188
第六节	斜拉索的减振	193
第七节	斜拉索的更换及调索	197
第七章	钢锚梁和钢锚箱施工监理技术	201
第一节	斜拉桥索塔的锚固构造及特点	201
第二节	钢锚箱的施工监理技术	205
第三节	钢锚梁的施工监理技术	210
第八章	斜拉桥施工控制	218
第一节	概述	218
第二节	施工阶段监测的内容和方法	219
第三节	施工控制方法和施工监控计算	222
第四节	施工控制的实施	229
第五节	施工控制的监理	238
第九章	斜拉桥施工安全监理	244
第一节	安全监理的目标和依据	244
第二节	安全监理的准备工作	246
第三节	安全监理的实施工作	248
第四节	安全监理的现场监控要点	252
第五节	文明施工及环境保护监理	265
第十章	斜拉桥施工测量监理	268
第一节	施工测量控制网	268
第二节	斜拉桥施工测量	270
第三节	斜拉桥施工测量监理	287
参考文献		291

第一章 概 述

第一节 斜拉桥发展

一、斜拉桥的发展概述

斜拉桥是一种桥面体系主要受压、索体系受拉的桥型,其主要由塔、梁、索三种基本构件组成。作为一种拉索支撑体系,斜拉桥比梁式桥有更大的跨越能力,而在技术方案合理的跨径范围内,斜拉桥比悬索桥有更好的经济性,更兼线条纤秀、构造简洁、桥型优美,因此,尽管它的建造历史远比悬索桥为晚,但发展极为迅速,已成为大跨度桥梁的最主要桥型。

斜拉桥型虽然很早就有,但近 50 余年才得到广泛应用。1955 年瑞典建成的主跨 183m 的斯特伦松德桥标志着世界现代斜拉桥修建的开始。纵观现代斜拉桥的发展历史,基本上分为两个阶段:①20 世纪 80 年代以前,由于结构分析方法和钢材性能的限制,以及钢拉索防腐技术工艺的成熟,跨度突破不大,最大跨度是法国修建的圣—纳泽尔桥,跨径组成为 158m+404m+158m;②20 世纪 90 年代以后,随着结构分析方法的成熟和完善,以及高强度钢材的应用和拉索防腐技术工艺的提高,斜拉桥的跨度产生了质的飞跃,已建成的钢主梁斜拉桥跨度已超过千米(如苏通长江大桥和香港昂船洲大桥)。表 1-1 为世界目前跨度超过 500m 的斜拉桥情况。

世界斜拉桥排名

表 1-1

序号	名称	主跨跨径 (m)	地点	建成 年代	序号	名称	主跨跨径 (m)	地点	建成 年代
1	苏通长江大桥	1 088	中 国	2008	15	武汉白沙洲大桥	618	中 国	2000
2	香港昂船洲大桥	1 018	中 国	2009	16	武汉二七长江大桥	616	中 国	在建
3	湖北鄂东长江大桥	926	中 国	在建	17	青州闽江大桥	605	中 国	1999
4	多多罗大桥	890	日 本	1999	18	上海杨浦大桥	602	中 国	1993
5	法国诺曼底桥	856	法 国	1995	19	上海徐浦大桥	590	中 国	1997
6	江西九江公路桥	818	中 国	在建	20	名港中央大桥	590	日 本	1998
7	荆岳长江公路大桥	816	中 国	在建	21	舟山桃夭门大桥	580	中 国	2003
8	仁川大桥	800	韩 国	2009	22	Roin - Antirion	3 × 560	希 腊	2004
9	福建夏漳大桥	780	中 国	在建	23	斯卡尔桑德桥	530	挪 威	1991
10	上海长江大桥	730	中 国	2009	24	汕头礐石大桥	518	中 国	1999
11	上海闵浦大桥	708	中 国	2009	25	安庆长江大桥	510	中 国	2004
12	南京长江三桥	648	中 国	2005	26	鹤见航道桥	510	日 本	1994
13	南京长江二桥	628	中 国	2001	27	武汉天兴洲长江大桥	504	中 国	2009
14	舟山金塘大桥	626	中 国	2009	28	荆沙长江大桥	500	中 国	2002

二、斜拉桥快速发展的原因

斜拉桥能快速发展的原因有以下几个方面。

(1)考虑挠曲影响的超静定结构设计计算理论发展很快。这种理论便于电子计算机计算。当其用于斜拉桥时不仅能正确进行结构设计计算,还能精确做出施工控制计算。

(2)考虑共同作用的轻型结构的发展。由于自动焊接技术的进步,使正交异性板获得了成功,现在正交异性板的设计计算及制造方法都达到了相当高的水平,给钢斜拉桥的发展创造了条件。

(3)上部结构是连续的。斜拉桥的上部结构在塔及跨中多是连续的,正因如此,即使地质条件不好,也可以采用斜拉桥这种连续梁结构。

(4)钢索材料、制造、锚固方式和各种防腐工艺的发展。

(5)模型试验技术的发展。由于斜拉桥是超静定次数较高的结构,且某些部位(如斜拉索的锚固区等)应力分布又较复杂,所以常常依靠各种静、动模型试验,来探求其设计参数和验证设计安全性。设计时,可根据静力模型试验,研究桥梁结构构件的大应力传递;根据动力模型试验和风洞试验,摸索其动力特性及抗地震、抗风振的能力;根据疲劳度试验,研究构件和锚固系统的疲劳强度;根据光弹模型试验,决定锚固区的应力分布。

(6)新结构形式的发展。斜拉桥最早以钢斜拉桥为主。从发展的观点看混凝土斜拉桥的最大跨度要比钢斜拉桥小,随着对斜拉桥研究的深化,钢与混凝土同时采用的结合梁斜拉桥和混合梁斜拉桥等新型结构也得到了广泛的采用。

在合理的跨径范围内,斜拉桥与跨越能力更好的悬索桥相比,在许多方面都存有一定的优势。首先,斜拉桥型在刚性、经济性及架设方面都比悬索桥优越;其次,斜拉桥的最大优点是不需要像悬索桥那样笨重的钢索锚固装置;另外,为了获得长大桥良好的抗风稳定性,斜拉桥的主梁采用扁平断面,这种断面结构减震能力相当高,所以在抗风稳定性方面比悬索桥优越;最后,斜拉桥可以用钢索来抵抗主梁的扭转振动,而悬索桥必须以加劲梁抵抗扭矩,这也是悬索桥的不及之处。

第二节 斜拉桥的结构体系和构造特点

一、斜拉桥的结构体系

斜拉桥是由上部结构的主梁、拉索、索塔及下部结构的桥墩、桥台四种基本构件组成的组合体系桥梁。斜拉桥的结构体系可以根据主梁、拉索、索塔和桥墩的不同组合构成四种不同形式的结构体系。

1. 塔墩固结、塔梁分离——飘浮体系

飘浮体系(图 1-1)的特点是塔墩固结、塔梁分离。主梁除两端有支承外,其余全部由拉索作为支承,成为在纵向可稍作浮动的一根具有多点弹性支承的单跨梁。飘浮体系的主要优点是满载时,塔柱处主梁不出现负弯矩峰值,温度及混凝土收缩、徐变力内力均较小。由

于拉索不能对主梁提供有效的横向支承,所以对飘浮体系必须施加一定的横向约束,提高其振动频率以改善动力性能。

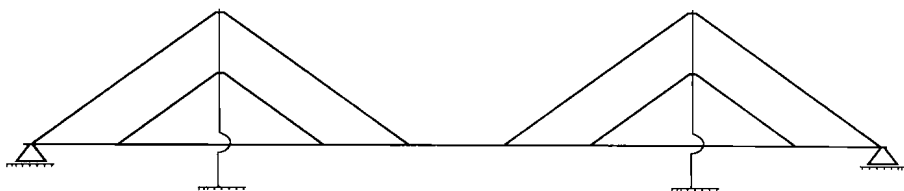


图 1-1 飘浮体系斜拉桥

飘浮体系的缺点是:采用悬臂施工时,塔柱处主梁需临时固结,以抵抗施工过程中的不平衡弯矩和纵向剪力。由于施工时不可能做到完全对称,成桥后解除临时固结时,主梁会发生纵向摆动。

国内采用飘浮体系的斜拉桥有:荆州长江公路大桥北汊桥(混凝土),主跨径 500m;上海长江大桥主通航孔(钢),主跨径 730m 等。

2. 塔墩固结、塔梁分离,在塔墩处主梁下设置竖向支承——半飘浮体系

半飘浮体系(图 1-2)的特点是塔墩固结,主梁在塔墩上设置竖向支撑,成为在跨内具有多点弹性支撑的连续或悬臂梁。主梁可布置成连续体系,也可在中跨跨中设剪力铰或简支挂孔。半飘浮体系的主梁内力在塔墩支承处出现负弯矩峰值。通常须加强支承区段的主梁,如在塔墩处设置可调节高度的支座或弹簧支承来代替从塔柱中心悬吊下来的拉索,并在成桥时调整支座反力。与飘浮体系相比,这种体系无论在经济上还是美观上都优于飘浮体系。

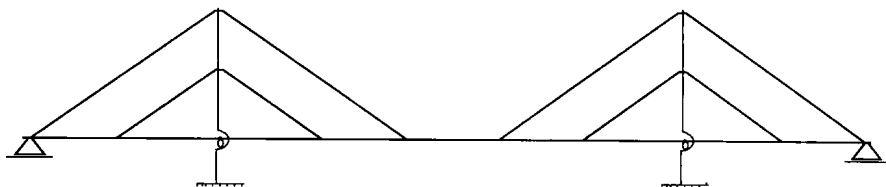


图 1-2 半飘浮体系斜拉桥

国内采用半飘浮体系的斜拉桥有:南京长江二桥南汊桥(钢),主跨径 628m;安庆长江大桥(钢),主跨径 510m 等。

3. 塔梁固结、塔墩分离——塔梁固结体系

塔梁固结体系(图 1-3)的特点是塔梁固结并支承在桥墩上,斜拉索变为弹性支撑,主梁相当于顶面用拉索加强的一种连续梁或悬臂梁。主梁和塔柱内的内力和挠度直接与主梁和塔柱的弯曲刚度比值有关。这种体系的优点是取消了承受很大弯矩的下塔柱部分,代之以一般桥墩,使主梁和塔柱的温度内力极小,并可显著减小主梁跨中段承受的轴向拉力。但当跨中满载时,由于主梁在墩顶处的转角位移导致塔柱倾斜,使塔顶产生较大的水平位移,因而明显增大了主梁的跨中挠度和边跨的负弯矩。这种体系上部结构的重力和活载反力均由支座传给桥墩,要求设置很大吨位的支座,所以一般仅用于小跨径斜拉桥。

国内采用塔梁固结的斜拉桥有:红水河铁路斜拉桥,48m+96m+48m;广东南海九江大桥,160m+160m等。

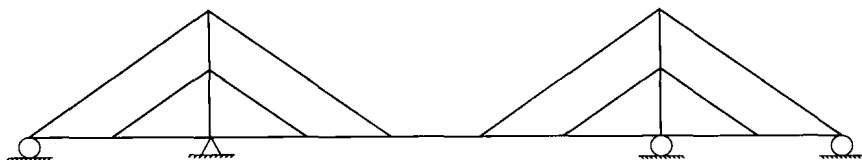


图 1-3 塔梁固结体系斜拉桥

4. 主梁、索塔、桥墩三者互为固结——刚构体系

刚构体系(图 1-4)的特点是梁、塔、墩固结,主梁成为在跨内有多点弹性支承的刚构。这种体系的优点是结构刚度大,主梁和塔柱的挠度小,最适合用悬臂法施工。但刚构体系动力性能差,在主梁、塔、墩固结处主梁负弯矩极大,此区段主梁截面必须加大。这种体系比较适合于独塔斜拉桥。

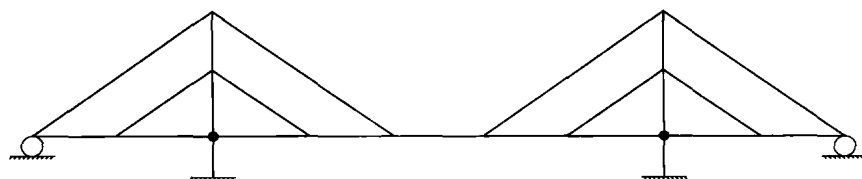


图 1-4 刚构体系斜拉桥

国内采用刚构体系的斜拉桥有:广东金马大桥(混凝土)、长沙湘江北大桥(混凝土)等。

二、斜拉桥的构造特点

1. 索塔

在斜拉桥的基本组成构件中,索塔是表达斜拉桥个性和视觉效果的主要结构物。组成索塔的主要构件是塔柱,另外还有塔柱之间的横梁或其他联结构件。塔柱之间的横梁一般可分为承重横梁和非承重横梁,前者为设置主梁支座的受弯横梁,以及塔柱转折处的压杆横梁或拉杆横梁;后者为塔顶横梁和塔柱无转折的中间横梁。索塔承受的荷载主要有塔身自重、拉索传递的水平及竖直分力、风力、地震力等。

索塔的结构形式在顺桥向有柱形和 A 字形钢架两种。柱形在沿桥纵向的刚度一般较小,抵抗纵向弯矩的能力相对较低,而 A 字形钢架在顺桥方向刚度较大,有利于承受索塔两侧斜缆索的不平衡拉力。索塔在横桥向的布置主要有柱式、门式、钻石形、倒 V 形、倒 Y 形等,柱式塔刚度较小,一般适用于单索面的斜拉桥;门式塔横向刚度较大,可作为桥面宽度不大双索面斜拉桥的桥塔;倒 V 形和倒 Y 形索塔横向刚度较大,适用于大跨径的斜拉桥。

按照材料的不同,索塔的主要类型有混凝土索塔和钢索塔。混凝土索塔的塔身刚度相对钢塔而言要大,可塑性强,造价较低,且几乎不需要保养维修,近年来,世界各国大部分的斜拉桥多采用混凝土塔身;钢索塔抗震性能好,但造价高,运营期维修保养要求高,国外只有一些发达国家的部分斜拉桥采用钢索塔,我国只有 2005 年竣工的南京长江三桥的桥塔采用了部分钢结构(下塔柱为混凝土)。从施工的角度看,钢桥塔在架设过程中,由于桥塔上不安

装施工机械,因而施工方便,精度易得到保证,而且施工进度较快,优势较大,以南京长江三桥为例:桥塔总高 215m,下塔柱高 35.2m,为混凝土结构,施工工期近 3 个月,中、上塔柱高为 179.8m,为全钢结构,北主塔安装工期为 3 个月,南主塔安装工期为 2 个月,如中、上塔柱为混凝土结构,按正常施工工期需 8 个月,钢塔施工能缩短桥塔工期一半以上。

2. 主梁

斜拉桥主梁的主要作用有三个:一是将恒载、活载分散传给拉索,梁的刚度越小则承担的弯矩越小;二是与拉索及索塔一起成为整个桥梁的一部分,主梁承受的力主要是拉索的水平分力所形成的轴向力,因而需有足够的刚度防止压屈;三是抵抗横向风载和地震荷载,并把这些力传给下部结构。

斜拉桥的主梁按材料不同,分为钢梁、混凝土梁、钢梁上加设混凝土桥面板的结合梁和钢梁与混凝土梁混合使用的混合梁四类。

(1) 钢梁

钢主梁动力特性良好、质量轻、跨越性能优良,适用于超大跨度的斜拉桥。有关分析资料显示,当斜拉桥跨径大于 600m 时应采用钢主梁。

钢梁按其结构形式分为实腹梁和钢桁梁两类。实腹梁使用初期常采用双工字梁和多工字梁,其缺点是主梁抗扭刚度小。为了增加抗扭刚度,实腹梁逐渐发展了箱形断面,包括单箱和多箱,其中流线型扁平钢箱梁已广为大跨度斜拉桥采用,如主跨 1 088m 的苏通长江大桥。斜拉桥采用钢桁梁主要是由于布置双层桥面的需要,多用于双层桥面或公铁两用桥,如芜湖长江大桥。

(2) 混凝土梁

混凝土主梁斜拉桥由于造价较低,在我国得到优先发展,我国是世界上建造混凝土斜拉桥最多的国家。混凝土梁与钢梁相比,其主要优点是:

- ① 造价低,后期养护比钢桥简单便宜。
- ② 刚度大,挠度小。在公路汽车荷载作用下,产生的主要挠度约为类似钢主梁的 60%。
- ③ 抗风稳定性好。这是因为混凝土结构振动衰减系数约为钢结构的两倍。

混凝土梁的缺点是跨越能力不如钢梁大,施工速度也不如钢梁快。混凝土梁的跨径一般在 500m 以内,如大于 500m,混凝土主梁的低造价难以抵消由于混凝土自重大而导致斜拉索和基础费用的额外增值。

(3) 结合梁

结合梁是相当于上用预制混凝土桥面板代替钢箱梁的正交异性钢桥面板而形成的钢混结构,它除具有与钢梁相同的优缺点外,还能节约钢材用量且其刚度及抗风稳定性均优于钢主梁。除此以外,由于桥面板采用混凝土,从而使桥面铺装层的设计和施工变得比较容易,结合部位也不易破坏,增强了耐久性。

结合梁一般都采用双钢主梁,并只适用于双索面斜拉桥。结合梁斜拉桥跨径适宜在 300 ~ 600m 之间。我国上海的南浦大桥和杨浦大桥、武汉二七长江大桥(在建)均采用结合梁主梁。

(4) 混合梁

混合梁斜拉桥是一种主跨大部分或全部为钢梁、边跨采用混凝土梁的桥型。混合式

斜拉桥特别适用于边跨与主跨比值较小的桥型,在特大跨径斜拉桥的建设方面优势很大。

由于混合梁结合部位结构的突变,往往是混合梁最容易出问题的地方,为了减小过渡段受力的不利情况,一般应将结合部位选在弯矩和剪力都比较小的地方,另外,要从构造措施上保证传力。

结合梁斜拉桥的典型实例有法国诺曼底桥、日本多多罗桥、汕头礮石桥、武汉白沙洲长江大桥、武汉二七长江大桥(在建)等。

3. 拉索

拉索承受桥面传来的恒载、活载以及风载等,并将其传递到主塔上,它是斜拉桥的主要受力构件。根据已有斜拉桥的统计资料,边索的倾角,无论是双塔三跨式或独塔两跨式斜拉桥,宜控制在 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$,竖琴形布置较多取 $26^{\circ} \sim 30^{\circ}$,辐射形或扇形布置,倾角在 $21^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 范围内,以 25° 最为普遍。

(1) 拉索的形式

根据拉索在纵向的不同布置方法,可以分为以下四种形式:

①辐射式。这种布置方法是将全部拉索汇集到塔顶,使各根拉索都具有可能的最大倾角。由于索力主要根据垂直力而定,因此索力较小,这将减少拉索用钢量。缺点是:有较多数量的拉索汇集到塔顶,将使锚头拥挤,构造处理较困难;塔身从顶到底都受到最大压力,自由长度较大,塔身刚度要合格且满足稳定的要求。

②平行式。这种形式中各拉索互相平行,因此各拉索倾角相同,各拉索的锚固设备构造相同。塔中压力逐段向下加大,有利于塔的稳定。缺点是这种形式拉索的用钢量最大。

③扇式。扇式是介于辐射式和平行式之间的形式,兼顾了以上两种形式的优点,因此有较多的斜拉桥采用这种形式。

④星式。星式虽在美观上具有突出之处,但将拉索集中在梁的一点上,使得构造复杂,同时不符合尽量将连接点沿梁纵向分开以减小跨径的原则。

拉索按其所组成的平面,通常分为双垂直平面、双斜面、单平面三种形式。

(2) 拉索的构造

在近代大跨度的斜拉桥中,拉索的构造基本分为整体安装的斜索和分散安装的斜索两大类,前者的代表为平行钢丝索和冷铸锚,后者的代表为平行钢绞线索和夹片锚。为了提高拉索的耐久性,延长使用寿命,减少养护工作,在斜拉桥中对拉索的防护要加以重视。防护工作主要是防止拉索锈蚀,为此要求防护层有足够强度而不致开裂,有良好的附着性而不脱落,有良好的耐候性以延长使用时间。目前使用较多的是由复合材料制成的柔性索套。

(3) 拉索的锚固形式

拉索与索塔的连接多采用在塔壁上设置锚固齿板或槽口、钢锚箱等形式。拉索与主梁连接,混凝土梁多采用两种形式:一种是在箱梁内设横隔板锚固或在梁底锚固;另一种是主梁处外侧伸出悬臂横梁锚固拉索。钢梁主要采用钢锚箱、耳板(锚拉板)、拉索钢套管穿过钢梁腹板等几种形式。

第三节 我国斜拉桥的发展

一、我国斜拉桥的发展阶段

我国自 1975 年四川云阳建成第一座主跨为 76m 的斜拉桥,至今已建成各种类型斜拉桥 100 多座,其中跨径大于 200m 的有 60 余座。从我国斜拉桥发展情况来看,大致分为以下三个阶段。

(1)从 1975 年建设第一座斜拉桥至 1982 年,是我国斜拉桥发展的起步阶段。这一阶段以 1982 年建成的主跨 220m 的山东济南黄河斜拉桥为代表,短短 7 年里,我国斜拉桥跨度增加了 3 倍,共建成 11 座斜拉桥,这标志着我国已基本掌握大跨度斜拉桥设计与施工技术。这一阶段修建的斜拉桥均为混凝土斜拉桥,多数跨度不大,主梁断面多为抗风稳定性稍差的矩形梁(箱)加桥面系的形式,门形塔,拉索多采用 $\phi 5$ 高强钢丝、未镀锌、稀索布置,拉索防护涂料多为耐久性差的防火涂料多层涂覆、玻璃钢防护层、钢丝网水泥壳套,钢、铝、塑料管套灌以水泥浆、黄油等。

(2)1983 ~ 1986 年是我国斜拉桥发展的第二阶段。由于第一阶段已建成的斜拉桥的斜拉索防护要么层次多、成本高,要么过于简单,或处理不当而失败,以致有的斜拉桥建成 3 ~ 4 年后斜拉索防护就损坏,危及斜拉桥安全。这一阶段修建的斜拉桥不多,但对采用聚乙烯材料进行斜拉索防护工艺进行了研究和尝试,为下一阶段斜拉桥的持续发展作好了准备。

(3)20 世纪 80 年代中期至今,随着世界斜拉桥技术的发展,也使我国斜拉桥进入技术发展鼎盛时期。这一阶段修建的斜拉桥跨度从 200 余米到 1 000m 以上,而且我国 400m 以上的长大斜拉桥大多在这一时期内修建。在已建桥梁中,钢斜拉桥、组合梁斜拉桥、主组合边混凝土混合式斜拉桥,均保持着相应桥型跨径世界第一的地位。据不完全统计,目前世界上已建和在建的跨度超过 500m 的斜拉桥中,我国占了 75%,江苏苏通大桥(主跨 1 088m)和香港昂船洲大桥(主跨 1 018m),首次将斜拉桥的跨径突破千米。这些大跨度桥梁的工程实践,使我国长大斜拉桥的发展和技术开发逐趋完善和成熟,并开始迈入世界先进行列。

二、结构类型的发展

1. 主梁设计的动向

(1)主梁材料和结构形式的多样化

由于桥梁跨径不断增大,为减轻主梁结构自重,其结构设计有趋于轻巧和更为柔性的发展动向,斜拉桥主梁的形式也从建设初期单一的混凝土斜拉桥发展到目前的钢斜拉桥、组合梁斜拉桥、主组合边混凝土混合式斜拉桥等多种类型。值得注意的是,近年来因制造质量易于保证,安装方便、快捷,正交各向异性钢箱梁在大跨斜拉桥中采用较多。

(2)总体布局及结构体系的多样化

根据不同桥梁的功能和结构特性,对斜拉桥的总体布局开发有双塔双索面、双塔单索面、独塔双索面、独塔单索面,还对多跨斜拉桥进行了探索和实践。在结构体系方面,开发的有上飘浮体系、支承体系、梁墩固结和钢构体系。

(3) 多跨斜拉桥的实现

1998 年建成通车的香港汀九桥使多跨连续的斜拉桥得以实现,其为一座 3 塔 5 跨,主跨为 $2 \times 475\text{m}$ 的结合梁斜拉桥,它的成功为以后跨海工程中建造多跨连续斜拉桥开辟了一条新路,具有重要的意义。

2. 索塔的发展

(1) 索塔的发展动向

早期斜拉桥索塔多采用钢结构,近年来却更多地采用混凝土索塔结构。现建的斜拉桥有独塔、双塔和三塔式;塔形有 H 形、倒 Y 形、A 形、钻石形等。因倒 Y 形或钻石形塔可使梁体获得较高扭转自振频率以提高其临界颤振风速,大跨斜拉桥多采用这两种类型的索塔。

(2) 独塔斜拉桥

近年来,独塔斜拉桥的数量有明显增加的动向。独塔斜拉桥按其桥跨布置可分为独塔单跨式和独塔双跨式。单跨式斜拉桥的塔后斜拉索一般采用地锚形式,而双跨斜拉桥的桥跨布置有两跨完全对称和两跨不对称两种形式。一般来说,独塔斜拉桥的主跨双塔斜拉桥的主跨要小一些,所以较适宜于在中、小河流上建造。另外,独塔斜拉桥增多的原因有:①它能免去对岸的索塔,当对岸的地基条件不好时可较大地降低造价;②独塔斜拉桥在大多数情况下能与周围环境融合一致,增加结构造型和环境协调的景观美。

(3) 矮塔斜拉桥

近年来,一些国家对矮塔斜拉桥在进行研究和发展。这是因为:斜拉桥的斜拉索由于应力变幅较大,设计中容许应力仅取钢丝抗拉标准强度的 $40\% \sim 45\%$;而矮塔斜拉桥主梁的跨高比值较一般斜拉桥小,介于斜拉桥与连续梁之间,这说明矮塔斜拉桥的整体刚度主要由梁体提供,斜拉索的刚度仅起加强作用,因而斜拉索应力变化幅度较小,设计中其容许应力与一般梁体内的预应力索相同,可取为钢丝抗拉强度的 $60\% \sim 72\%$ 。最早的矮塔斜拉桥应为瑞士山区的甘特(Ganter)桥,其混凝土箱形梁由预应力混凝土斜拉板悬挂在非常矮的索塔上,因其结构的优美且与瑞士群山完美结合、相互映衬,受到赞誉。较典型的实例是日本木曾川桥,其为 5 跨连续、单索面混合梁矮塔斜拉桥,跨径组成为 $160\text{m} + 3 \times 275\text{m} + 160\text{m}$,桥面以上塔高仅 30m 。另一著名的实例则是安徽芜湖长江大桥,跨径组成为 $180\text{m} + 312\text{m} + 180\text{m}$,桥面以上塔高也仅为 35m 。因其为公铁两用桥,它以强大的双层桥面钢桁架为主,以部分斜拉的索为辅,成功地解决了公铁荷载作用下杆件内力和挠度过大的问题。

3. 斜拉索的发展

(1) 密索体系的发展

20 世纪 50 ~ 70 年代中期,由于计算理论和计算技术等诸方面的限制,斜拉桥主要采用稀索体系。稀索体系在主梁上的间距一般为 $30 \sim 60\text{m}$ (钢梁)及 $15 \sim 30\text{m}$ (混凝土梁),梁以受弯为主,故梁的弯矩及剪力仍相当大而需要有较大的梁高。斜拉索的内力与截面相对来说也较大,因此给架设和施工带来较多困难。斜拉索锚固点的构造细节较复杂,其附近常需作大规模的补强,耗材也多。此后,随着设计理论的发展、计算机技术的日益发达,斜拉桥跨度增大,斜拉索多采用密索体系,且斜拉索长度和数量不断增大,梁的受力状态以受压为主,其截面有所减小。

(2) 两种斜拉索系统的发展

经过数十年不断创新和淘汰,目前常用的斜拉索系统已集中为下列两种:①用热挤 PE 防腐的平行钢丝索配以环氧冷铸墩头锚系统;②用热挤 PE 防腐(或加强环氧涂层防腐)的单股钢绞线组成平行的绞线索,两端用不同于一般预应力钢绞线的特殊的夹片锚形成群锚系统。热挤 PE 防腐的平行钢丝索首创于日本,我国在修建山东东营黄河桥时,首次从日本进口了这种斜拉索。热挤防腐的平行钢绞线索首创于法国,其主要优点是可以较方便地进行单根钢绞线安装,最后再用小行程千斤顶进行调整。两种斜拉索系统各有优缺点,拉索吨位较小时,平行钢丝索较方便;吨位较大的斜拉索,可考虑采用平行钢绞线索。

三、主要施工技术的发展

1. 索塔锚固区采用箱形断面

斜拉桥在箱形塔内张拉和锚固,使索塔外形简洁、拉索锚固长度减短,克服了因交叉锚固斜拉索不在同一平面使得桥面宽度增加、锚头外露、换索及维修不便等缺点,增加了索塔结构的刚度。

2. 主梁施工工艺的成熟

混凝土斜拉桥主梁施工,一般采用支架现浇、悬臂浇筑、悬臂预制拼装、顶推和转动。目前大跨混凝土梁斜拉桥多采用挂篮悬臂浇筑法,且无平衡重轻型挂篮技术的发展,使斜拉桥施工实现索距 8m、主梁宽度 30m 的全断面一次浇筑混凝土成型,既保证了施工质量又缩短了工期。常用的挂篮有利用斜拉索作前支点的牵索式挂篮和无平衡重后支点挂篮。

钢箱和混合梁斜拉桥的钢箱采用正交异性板,工厂焊接成段,现场吊装架设。钢箱与钢箱的连接,一是高强度螺栓,二是全焊,三是栓焊结合。

结合梁斜拉桥主梁安装简单而迅速,用吊装设备安装主梁及边梁,然后安装预制桥面板,在预留接缝内接钢筋及安设剪力键,然后用混凝土封闭即成。

3. 斜拉索制索工艺实现专业化和工厂化

经过不断的开发、研制,斜拉索的制作、防护工艺日趋完善,并基本实现专业化、工厂化,保证了斜拉索的质量,提高了使用寿命。

4. 施工过程控制技术不断发展

1959 年德国莱昂哈特在为杜基尔多夫北莱茵河桥施工安装设计时,提出了倒退分析法(backward analysis),并获得成功,这是一座主跨为 260m 的钢斜拉桥。此后,德国一些钢斜拉桥施工中都采用这种施工控制方法。

1978 年,莱昂哈特公司在指导美国帕斯科—肯尼威克桥施工中发现了倒退分析法的结果和实测存在着较大的偏差。后分析认为帕斯科—肯尼威克桥是一座混凝土斜拉桥,混凝土桥面的重力不像钢桥面那样精确,混凝土的弹性模量如采用规范中用于计算变形的值则明显偏低,再加上混凝土徐变的影响,使倒退分析中采用的这些参数与实际情况不符,影响了控制的精度。

随着斜拉索跨径的不断增大,其结构非线性和抗风抗震性将更加突出,需要对其在施工阶段和运营阶段的动、静力性能进行更为精致、准确的分析,确保桥梁结构的安全性。近年来,国内外学者已经尝试把现代控制技术应用到斜拉桥施工过程控制中来,自适应控制法、无应力控制法等均是其发展方向。

第二章 钻孔桩施工监理技术

斜拉桥的基础设计,一般均采用大型沉井和钻孔桩形式。大直径钻孔灌注桩具有承载力大、刚度大、施工快、造价省的优点,我国特大型桥梁深水基础施工中普遍采用了这种基础形式。对特大型桥梁,根据结构受力计算,为承担承台、墩(塔)身和上部结构产生的巨大反力,钻孔桩通常设计成群桩基础,即在满足桩的最小间距和承台边距要求的条件下,由数十根桩共同组成桩群,形成群桩基础发挥共同效应。

由于地质原因,目前国内桥梁特大型深水基础用得比较多的是摩擦桩,其特点为:①大直径,最大直径已达4.0m;②超深,最大深度已达150m;③变截面,通常根据受力情况设计成上大下小的截面,如上海长江大桥主塔墩钻孔桩采用2.5m/3.0m变截面桩径;④多层钢筋笼,上面几节钢筋笼主钢筋层数一般为2~3层;⑤桩底压浆,以提高桩基的承载力。

第一节 水上施工平台的搭设

斜拉桥一般均为有通航要求的桥梁,它的特点是大跨度、高净空,其基础除了采用费用昂贵的大型沉井外,一般均采用的是大直径、超长度钻孔桩基础形式。对于远离陆地、毫无落脚点可言的水上,钻孔桩的施工必须搭建水上施工平台,而施工平台的搭建施工将受到施工水域诸多因素的影响,该施工技术已成为斜拉桥主墩基础建设的关键所在。

一、水上施工平台的作用与要求

1. 水上施工平台的作用

基桩施工平台的作用是布置钻孔施工设备、设施,并为施工操作提供作业工作面。斜拉桥施工时,其主墩的施工平台还须考虑为后续的承台、塔柱施工提供足够的操作空间,如发电机组的布设、电梯安装、塔吊安装、拌和站的布置、生产加工区的作业面和办公、生活区的安排等。

2. 水上施工平台的搭设要求

(1)有足够的空间和平面来布设施工设施、泥浆循环系统和进行施工作业。在远离陆地的水域,平台即是生产基地,还要考虑生活区的布设。

(2)平台应有足够的高度,使其能在设计的施工水位下进行正常的施工。

(3)对施工荷载,如钻机重力、钻机钻孔时的扭矩、钻孔的冲击、平台自重及其他施工荷载,必须要有足够的承受能力。

(4)对风荷载、水流冲击、施工船舶的撞击等有足够的承载能力。

(5)能抵抗水流冲刷而自身稳定。

3. 平台的结构荷载和设计

平台结构荷载主要包括以下各项:

(1) 平台结构自重。包括基础支承结构、联结系、分配系和面板等。

(2) 施工荷载。包括平台上施工机械、材料、人员等荷重,吊装设备应考虑冲击系数。

(3) 波浪力。通常按 20 年(或 30 年)一遇洪水(或风暴潮)高水位时的波浪力,参照《公路工程水文勘测设计规范》(JTG C30—2002)计算。

(4) 水流力。通常按 5% 频率垂线平均流速,参照《港口工程荷载规范》(JTS 144-1—2010)计算。

(5) 风载。按平台设计最大风速进行计算。

平台结构设计须对上述荷载进行组合计算。目前常应用空间有限元分析计算软件建立模型,进行空间分析计算。计算模型须考虑平台基础冲刷影响,冲刷深度依据水文条件,通过水工模型试验、经验公式进行分析确定。

二、水上施工平台的结构形式

水上施工平台的结构形式根据施工工艺的不同,可分为以下四种:

(1) 采用打入钢管桩作为支撑搭设平台的插桩平联法。

(2) 采用打入的钢护筒和辅助钢管桩搭设平台的护筒支承法。

(3) 两侧设钢结构导管架,中间采用钢围堰搭设平台的导管钢围堰法。

(4) 采用钢浮箱浮运定位搭建平台的浮箱法。

根据桥位、桥梁基础以及自然环境的不同,选择相适应的施工工艺是非常重要的。借鉴近几年在江、海上搭设施工平台的经验,在水文、气候条件较好的水域,水深在 20m 以内,流速不大于 3m/s 时,宜采用插桩平联法或护筒支承法搭设施工平台;借鉴海上建立石油钻井平台的经验,在施工水域水文、气候条件复杂、恶劣,水深大于 20m,覆盖层很浅或基本无覆盖层,流速快、波浪力大的地方,大型桥墩基础施工宜采用导管钢围堰法或浮箱法搭设施工平台。

三、水上施工平台的主要施工方法

1. 插桩平联法

插桩平联法是利用打桩船在 GPS 定位测量控制下逐根插打钢管桩,将钢管桩打入河床以下一定深度,并用小钢管等作为平联及斜撑将钢管桩相互连接,形成整体排架,然后在钢管桩顶上焊接牛腿,铺设贝雷梁、型钢分配梁及钢板平台面,从而形成施工平台。结构如图 2-1 所示。

2. 护筒支承法

护筒支承法是利用大型打桩船插打钻孔桩钢护筒,以钢护筒作为平台主要施工荷载的承重基础,并用钢管平联及斜撑将钢护筒连成整体,同时插打钢管桩用以加宽平台,然后在钢护筒和钢管桩上焊接牛腿,铺设型钢和钢板,从而形成施工平台。它与插桩平联法所不同的是,钢护筒不仅是钻孔桩施工用护筒,同时也是平台的主要承重支撑结构。结构如图

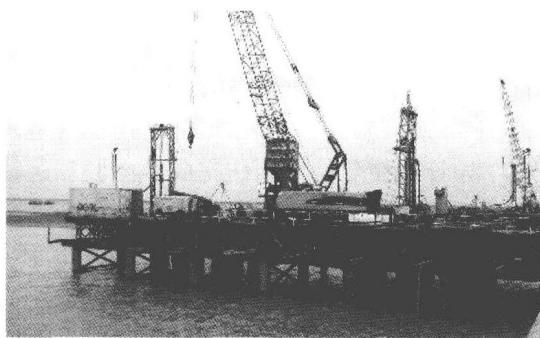


图 2-1 插桩平联法施工平台

2-2所示。

3. 导管钢围堰法

导管钢围堰法采用导管架和双壁钢围堰相结合的施工工艺,即将承台施工所需的钢套箱模板做成双壁钢围堰,安装到位后,钢围堰底高程根据承台底高程确定,顶高程和钢平台的顶高程相同。两端采用导管架形式将钢围堰固定。导管钢围堰法对平台搭设、钢护筒振入、钻孔桩施工及今后桥墩承台施工等进行了综合考虑:其一,两端导管架既是限制固定墩位处钢围堰的先遣平台,又是平台上生产和生活设施的基地;其二,钢围堰在钢护筒振入阶段作为施工平台,围堰内套管又是钢护筒的定位装置;其三,钻孔灌注桩施工时钢围堰作为施工平台,在箱体内容隔成若干单元,作为今后钻孔灌注桩施工时的泥浆箱和平台上淡水储存箱;其四,承台施工时钢围堰可作为桥墩承台的模板及支撑结构。这样既提供了钻孔桩的临时施工平台,又满足了下一步承台施工时,钢套箱模板和支撑的需要。

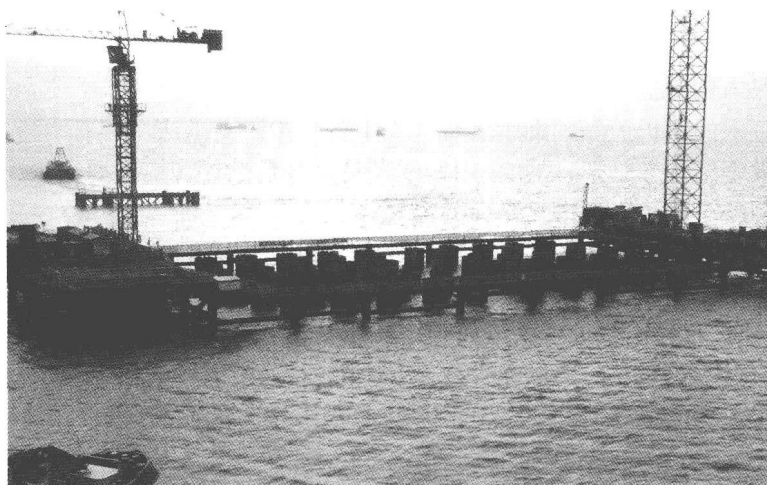


图 2-2 护筒支承法施工平台图

(1) 导管架的施工

在每个桥墩承台两边各设置 2 个导管架,每 2 个导管架组成一个海上施工平台,根据各自功能,每个桥墩承台两边的平台分别为生活区平台和生产区平台。平台由导管架、钢管桩、上部结构三部分组成,上部结构也就是最终形成的生产、生活平台面层。

导管架在陆地上制作完成后由驳船运输到现场沉放。根据导管架的重量,选用相应吨位的浮吊。沉放作业时间基本选在小潮汛期间的低平潮时,因为这个时间的海水流速、可作业时间等均是较佳的。在沉放前,进行海床高程的测量,确保导管架各点无明显高差。导管架安装定位,采用 GPS2RTK 实时定位控制。导管架下沉到位后,马上进行 4 根定位角桩的插桩和打桩作业,然后进行剩余钢管桩的插桩、打桩作业。桩打到高程后,马上进行桩和导管的连接作业。当导管架的定位桩全部施打好后,平台甲板层的安装就可进行,甲板层在陆上预先分块加工,用船运到施工现场后用浮吊将甲板层逐块吊装到位,然后在现场将分块的甲板层连接成整体,形成平台。导管架的施工如图 2-3 所示。

(2) 钢围堰的施工