

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 斜拉桥发展概况	2
1.3 混合梁斜拉桥发展概况	4
第 2 章 混合梁斜拉桥结构体系与特性	7
2.1 概述	7
2.2 混合梁斜拉桥结构体系	7
2.3 混合梁斜拉桥结构特性	25
2.4 主梁合理钢—混结合部位置及边跨布置	45
第 3 章 混合梁斜拉桥计算分析	54
3.1 概述	54
3.2 总体静力计算	55
3.3 局部构造精细化分析	80
3.4 抗震分析	86
3.5 抗风分析	93
第 4 章 钢—混结合部受力特性	98
4.1 概述	98
4.2 钢—混结合部结构形式	98
4.3 结合部受力特性分析	103
4.4 结合部简化计算	118
4.5 结合部设计方法	130
第 5 章 钢—混结合部模型试验	137
5.1 概述	137
5.2 结合部节段梁模型试验	137
5.3 局部格室承载能力模型试验	146
5.4 结合部高性能混凝土材料试验	153
5.5 钢格室混凝土浇筑工艺试验	163
第 6 章 施工控制——双目标控制法	172
6.1 概述	172
6.2 双目标控制法基本构想	172
6.3 几何非线性结构几何控制原理	176

6.4	关键构件初始几何参数确定	184
6.5	关键构件制造、浇筑控制	189
6.6	混合梁斜拉桥安装控制	196
6.7	无温度效应合龙技术	203
6.8	应用实例——鄂东长江公路大桥监控结果	207
第7章	混合梁斜拉桥全寿命设计	213
7.1	概述	213
7.2	全寿命设计基本理论	213
7.3	混合梁斜拉桥耐久性设计	216
7.4	混合梁斜拉桥管养设计	222
7.5	混合梁斜拉桥安全风险评估	232
7.6	混合梁斜拉桥全寿命成本分析	240
第8章	混合梁斜拉桥工程实例	255
8.1	湖北鄂东长江公路大桥	255
8.2	香港昂船洲大桥	261
第9章	混合梁斜拉桥展望	266
参考文献		267

第1章 绪 论

1.1 概述

斜拉桥的主梁材料一般有钢和混凝土两种,主梁按这两种材料的不同组合可分为钢梁、混凝土梁、组合梁和混合梁。

主梁采用钢材构成钢梁,采用预应力混凝土构成混凝土梁,如图 1.1-1a)和 b)所示。

钢主梁的优点是自重轻、跨越能力大、构件可在工厂制作、质量可靠、施工速度快,但价格贵、后期养护工作量大。钢主梁以箱形截面为主,钢桁梁采用较少,多数用于双层桥面或公铁两用桥。

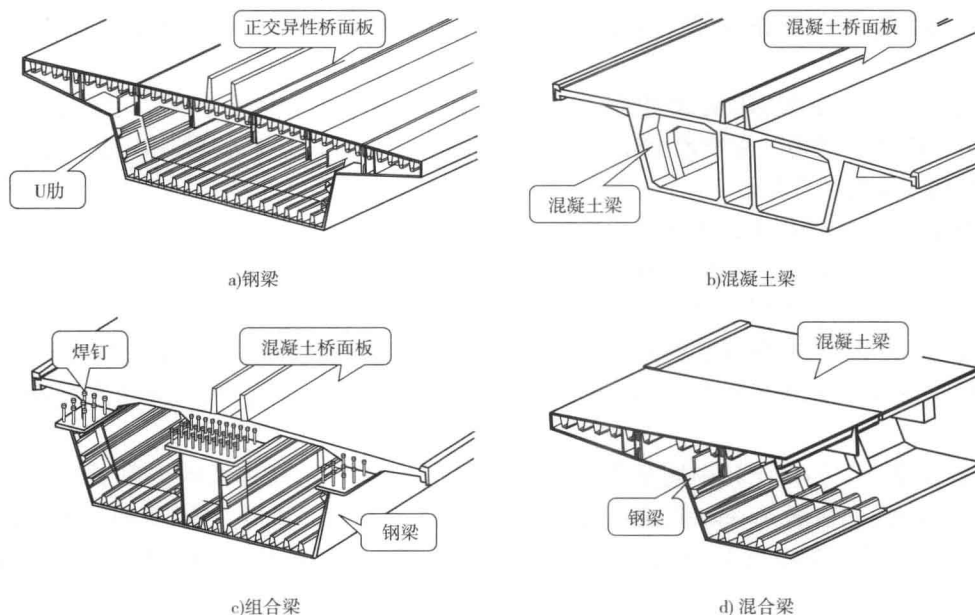


图 1.1-1 主梁示意图

混凝土主梁的优点是造价低,但当斜拉桥跨径超过 500m 时,混凝土主梁的造价节省难以抵消由于混凝土自重大而导致拉索和基础费用的额外增加;刚度大、挠度小,在汽车荷载作用下,产生的主梁挠度约为类似钢主梁的 60% 左右;抗风稳定性好,混凝土结构具有两倍于钢结构的衰减系数;后期养护比钢主梁简单便宜。缺点是跨越能力不如钢主梁大,施工速度不如钢主梁快。

组合梁在横截面内由钢和混凝土两种材料组成,是不同材料在截面内的组合。组合梁斜拉桥主要有 4 种类型:

- (1) 行车道板采用混凝土板,主梁采用钢板或钢箱梁(两者共同受力),如图 1.1-1c)所示。
- (2) 主梁为混凝土,横隔板采用钢结构的组合梁。
- (3) 组合钢桁梁,又可以细分为钢桁架与混凝土桥面板的组合和钢桁腹杆与混凝土上下弦杆组合。
- (4) 波折钢腹板组合梁,顶板和底板采用混凝土,腹板采用波折钢板。

组合梁优点是用混凝土板代替正交异性钢桥面板,经济性好、刚度大,可拆分为小构件,易于运输和

安装。缺点是需要解决好桥面板开裂的问题。组合梁斜拉桥在 300 ~ 600m 跨度范围内,具有良好的适用性。

混合梁是指主梁沿梁的长度方向由钢和混凝土两种材料组成,主跨的梁体为钢梁,边跨(部分连结或全部连结或伸入主跨一部分)的梁体为混凝土梁,如图 1.1-1d)所示。钢主梁重量较轻,跨越能力强,而混凝土主梁自重大,造价低。混合梁合理使用钢材和混凝土两种材料,充分发挥钢梁和混凝土梁各自的优势,改善了结构体系的受力性能,灵活利用施工条件,优化工程经济性。但是钢梁和混凝土梁连接部(简称钢—混结合部,以下同)是主梁刚度突变点,容易形成结构体系的弱点,是有待深入研究的关键技术问题之一。混合梁斜拉桥可为跨度 600m 以上的斜拉桥提供更强的竞争力,尤其是当边跨长度受到限制时,可优先考虑混合梁方案。

1.2 斜拉桥发展概况

斜拉桥的上部结构由梁、索、塔 3 类构件组成,它是一种桥面体系以加劲梁受压(密索)或受弯(稀索)为主、支承体系以斜索受拉及桥塔受压为主的桥梁。作为一种拉索支承体系,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,尽管它的建造历史比悬索桥短,但发展极为迅速,不到半个世纪,已普及到世界各地。

斜拉桥在世界范围内的应用从 20 世纪 70 年代开始,90 年代迅速发展,其跨径已经进入以前悬索桥使用的特大跨径范围。结构分析技术手段、高强材料研发、施工装备以及防腐技术的进步,对于大跨径斜拉桥的发展起到了关键的作用。

斜拉桥的发展,大体经历了以下 3 个阶段:

第一阶段:自 20 世纪 50 年代中至 60 年代中期,其特征是拉索为稀索体系,钢或混凝土梁体以受弯为主,以瑞典 Strömsund 桥(钢梁)和委内瑞拉 Maracaibo(混凝土梁)桥为代表。

第二阶段:自 20 世纪 60 年代后期开始,以德国 Friedrich-Ebert 桥(密索、单索面)和美国 P-K 桥(密索、双索面)的建造为开端,其特征是拉索逐步采用密索体系,并可以换索,钢或混凝土梁以受压为主,截面减小。

第三阶段:从 20 世纪 80 年代中期至今,拉索普遍采用密索体系,梁体结构出现了组合式(如加拿大 Annacis 桥)、混合式(如法国 Normandie 桥)、钢管混凝土(如广东南海紫洞大桥)等新的形式,相应的主梁向更加轻型化方向发展,梁高减小,梁体截面也出现了肋板式(如挪威 Helgeland 桥)、板式(如希腊 Evripos 桥)等形式。

世界上第一座现代斜拉桥是瑞典 1956 年建成的 Strömsund 桥,跨径组成为 74.7m + 182m + 74.7m,主梁由两片板梁组成,拉索呈辐射形布置。

1957 年德国建成的 Theodor Heuss 桥,其跨径布置为 108m + 260m + 108m,钢塔高 41m,横向不设横梁,拉索呈竖琴布置,钢梁高 3.12m,索距为 36m。

1959 年德国建成的 Severins 桥,主跨 302m,是最早的 A 形独塔斜拉桥,拉索呈放射状布置,桥面“飘浮”体系,有效提高了桥梁的抗震性能。

1962 年德国建成的 Norderelbe 桥,跨径布置为 64m + 171.88m + 64.00m,钢箱梁高 3.00m,是第一座单索面斜拉桥。

1962 年委内瑞拉建成的 Maracaibo 桥为第一座混凝土斜拉桥,主塔和主梁都采用混凝土结构,主跨跨径为 235m,主梁为带挂孔的悬臂体系。

20 世纪 60 年代初期,随着计算机技术的广泛应用,结构分析有了新的突破,能够采用电子计算机分析超静定结构,导致密索体系斜拉桥的产生,从而避免了稀索体系斜拉桥主梁重且配筋多的缺点。

1967 年德国建成 Friedrich-Ebert 桥,主跨 280m,是第一座单索面的密索体系斜拉桥,这种体系使得

锚固点集中力减小,应力分布均匀且易于悬臂施工。该设计构思为其后的许多斜拉桥做出了典范。

1969年德国建成的 Knie 桥,为主跨跨径 320m 的独塔斜拉桥,索塔无横系梁,拉索竖琴形布置,主梁采用开口断面。

1975年法国修建的 Saint-Nazaire 桥,跨径组成为 158m + 404m + 158m,主梁采用正交异性钢桥面,A形索塔,拉索呈放射状布置。

1978年美国建成的 P-K 桥,跨径布置为 123.9m + 299m + 123.9m,为采用密索体系的预应力混凝土斜拉桥。该桥首创采用预制节段、双悬臂法拼装施工工艺,对我国预应力混凝土斜拉桥的建造产生了重大影响。

1984年西班牙修建的 Luna 桥,主跨为 440m,采用预应力混凝土桥面,双塔双索面,拉索扇形布置。

1986年加拿大修建的 Annacis 桥,主跨 465m,是一座双塔双索面扇形布置的组合梁斜拉桥。主梁由两个“I”形钢梁及钢筋混凝土桥面板组成,是世界上第一座典型的组合梁斜拉桥。

1991年挪威修建的 Skarnsundet 桥,主跨 530m,采用预应力混凝土主梁,是当今跨径最大的混凝土斜拉桥。

1995年法国修建的诺曼底桥,主跨 856m,是一座混合梁结构斜拉桥,边跨采用混凝土主梁,而主跨中部采用钢箱梁。与此设计相似,1999年建成的日本多多罗大桥把跨径记录提高到 890m。诺曼底桥和多多罗桥第一次把斜拉桥带入特大跨径领域。

2003年希腊建成 Rion-Antirion 桥,主跨为 560m,是一座 4 塔 5 跨的双索面组合梁斜拉桥,创造性地采用了纵横向全飘浮体系、基础加筋土等抗震措施。

2005年法国建成的米约高架桥是一座主跨 342m 的 7 塔斜拉桥,最高桥墩高 245m,采用了塔梁整体从两端向中间顶推的施工方法,桥梁外观设计也是美学上的典范。

斜拉桥在我国的发展始于 1975 年四川省云阳县跨径为 76m 的钢筋混凝土斜拉桥。

1982年在山东省建成的济南黄河大桥,其主跨为 220m,为双塔双索面扇形布置拉索的混合梁斜拉桥,采用悬臂现浇混凝土施工工艺。

1991年我国在总结加拿大 Anncis 桥经验的基础上,建成上海南浦大桥,主跨为 423m,为双塔双索面扇形布置的组合梁斜拉桥,开创了我国修建 400m 以上大跨径斜拉桥的先河。1993 年上海建成的杨浦大桥,主跨为 602m,采用箱形主梁和工字形横梁以及混凝土桥面板组成的组合梁。

1998年建成的香港汀九桥是跨径组成为 127m + 448m + 475m + 127m 的 3 塔 4 索面组合梁斜拉桥。

1998年建成的广东汕头礮石桥为双塔双索面混合梁斜拉桥,主跨为 518m。

2000年建成的武汉白沙洲大桥为主跨 618m 的双塔双索面混合梁斜拉桥。

2001年建成通车的南京长江第二大桥南汊主桥,主跨达 628m,为双塔双索面斜拉桥,主梁采用钢箱梁,桥面采用环氧沥青铺装。

2001年建成的湖南岳阳洞庭湖多跨斜拉桥,主桥跨径组成为 130m + 2 × 310m + 130m,三塔,主梁采用肋板式断面,飘浮体系,拉索为扇形双斜面索,索塔采用钻石形空心塔。

2002年建成的湖北荆州市荆沙长江大桥为主跨 500m 的双塔双索面扇形布置拉索的预应力混凝土斜拉桥,主梁采用预应力肋板结构,主塔为 H 形预应力混凝土结构。

2005年建成通车的南京长江第三大桥,主桥跨径组成为 63m + 257m + 648m + 257m + 63m,双塔双索面钢斜拉桥,主梁采用钢箱梁,飘浮体系,索塔采用倒“Y”字形曲线钢塔。

2008年建成的苏通大桥,主跨跨径为 1088m,使得斜拉桥的跨径第一次超过千米,是当今第二大跨径的斜拉桥,其采用倒“Y”字形主塔,主梁为钢箱梁。

2009年香港建成通车的昂船洲大桥,主跨跨径为 1018m,桥塔独具特色,为圆锥形独柱式,与诺曼底桥相似,主梁也是采用混合梁。

30 多年来,斜拉桥以其独特优美的造型及优越的跨越能力在我国得到迅速推广,至今我国已建各种类型斜拉桥 100 多座,其中跨径大于 200m 的有 80 多座。

表 1.2-1 给出了跨径排在世界前 20 位的斜拉桥及其构造形式。超大跨斜拉桥大多使用组合结构的形式,有钢梁与混凝土桥面板结合的组合梁;钢梁与混凝土梁结合的混合梁;钢塔与混凝土塔结合的混合塔;钢锚梁与混凝土塔壁或钢锚箱与混凝土塔壁结合的组合索塔锚固结构。

超大跨斜拉桥的构造形式

表 1.2-1

序 号	桥 名	跨径(m)	主 梁	主 塔	索塔锚固	国 别	建成年份
1	Russky Island Bridge	1104	混合梁	A 形混凝土塔	组合锚固	俄罗斯	2012
2	苏通大桥	1088	钢箱梁	倒 Y 形混凝土塔	组合锚固	中国	2008
3	昂船洲大桥	1018	混合梁	圆形组合塔	组合锚固	中国	2009
4	鄂东长江大桥	926	混合梁	混凝土塔	组合锚固	中国	2010
5	多多罗大桥	890	混合梁	倒 Y 形钢塔	钢锚固	日本	1999
6	诺曼底大桥	856	混合梁	倒 Y 形混凝土塔	组合锚固	法国	1995
7	九江长江公路大桥	818	混合梁	H 形混凝土塔	组合锚固	中国	在建
8	荆岳长江大桥	816	混合梁	H 形混凝土塔	组合锚固	中国	2010
9	仁川大桥	800	钢箱梁	倒 Y 形混凝土塔	组合锚固	韩国	2009
10	厦漳跨海大桥	780	钢箱梁	混凝土塔	组合锚固	中国	在建
11	Zolotoy Rog Bridge	737	钢箱梁	H 形混凝土塔	组合锚固	俄罗斯	2012
12	上海长江大桥	730	钢箱梁	人字形混凝土塔	组合锚固	中国	2010
13	闵浦大桥	708	混合梁	H 形混凝土塔	组合锚固	中国	2009
14	南京长江三桥	648	钢箱梁	人字形混合塔	钢锚固	中国	2005
15	望东长江大桥	638	组合梁	混凝土塔	组合锚固	中国	在建
16	南京长江二桥	628	钢箱梁	混凝土塔	非交错锚固	中国	2001
17	金塘大桥	620	钢箱梁	混凝土塔	组合锚固	中国	2009
18	白沙洲长江大桥	618	混合梁	A 形混凝土塔	非交错锚固	中国	2000
19	二七长江大桥	616	组合梁、混合梁	混凝土塔	组合锚固	中国	2011
20	青州闽江大桥	605	组合梁	混凝土塔	非交错锚固	中国	2001

1.3 混合梁斜拉桥发展概况

混合梁斜拉桥的构思是在 1963 年德国进行 Leverkusen 桥设计方案时首次提出的。此方案是一座跨度为 50m+280m+50m 的 3 跨斜拉桥,由于边跨与主跨的比值过小,有方案建议边跨采用混凝土梁、主跨采用钢梁,但当时此方案未被采纳。此后于 1972 年建成了世界上首例混合梁斜拉桥,主跨达 287m 的独塔斜拉桥 Kurt-Schümacher 桥。此后德国于 1979 年建成了主跨达 368m 的独塔斜拉桥 Düsseldorf-Flehe 桥,瑞典于 1981 年建成中跨达 386m 的双塔斜拉桥 Tjörn 桥。早期将混合梁应用于大跨径桥梁工程中,是对斜拉桥结构体系的创新,对后续的大跨径斜拉桥设计产生了较大的影响。

随后混合梁斜拉桥的设计从欧洲走向世界,并在较长时期内引领了特大跨径斜拉桥的设计。法国于 1995 年建成主跨达 856m 的 Normandy 桥,一举将斜拉桥跨径提高了 40%,是混合梁斜拉桥应用的范例。日本于 1999 年建成主跨达 890m 的混合梁斜拉桥 Tatara 桥,保持世界最大跨径斜拉桥近 10 年,直至 2008 年我国建成跨径达 1088m 的苏通大桥。2012 年刚建成主跨达 1104m 的 Russky Island 混合梁斜拉桥,再一次打破斜拉桥跨径的世界记录。

我国于 1997 年建成了跨径达 590m 的上海徐浦大桥,首次将混合梁应用于大跨径斜拉桥中,并陆续建成了汕头礮石大桥、白沙洲长江大桥和舟山桃夭门桥,为后来我国混合梁斜拉桥建设,积累了较为丰富的经验。

近年来,伴随我国交通基础设施大规模的建设,混合梁斜拉桥建设得到快速发展。2010 年建成的主跨达 926m 的鄂东长江大桥和 816m 的荆岳长江大桥,均采用混合梁斜拉桥方案,还有主跨 818m 的九江长江大桥,与主跨 616m + 616m 的武汉二七长江大桥。2009 年建成主跨达 1018m 的香港 Stonecutters 桥和 708m 的上海闵浦大桥。目前世界前 10 座最大跨度斜拉桥中混合梁斜拉桥占了 7 座。可以预见,混合梁在超大跨径斜拉桥建设中,将得到更为广泛的应用。表 1.3-1 列举了国内外部分混合梁斜拉桥实例。

混合梁斜拉桥的工程实例

表 1.3-1

编 号	桥 名	国 别	桥 塔	跨径(m)	建成年份(年)
1	Rusky Island Bridge	俄罗斯	双塔	1104	2012
2	昂船洲大桥	中国	双塔	1018	2009
3	鄂东长江大桥	中国	双塔	926	2010
4	Tatara Bridge	日本	双塔	890	1999
5	Normandy Bridge	法国	双塔	856	1995
6	九江长江公路大桥	中国	双塔	818	在建
7	荆岳长江大桥	中国	双塔	816	2010
8	上海闵浦大桥	中国	双塔	708	2009
9	白沙洲长江大桥	中国	双塔	618	2000
10	二七长江大桥	中国	三塔	616	2011
11	上海徐浦大桥	中国	双塔	590	1997
12	舟山桃夭门桥	中国	双塔	580	2003
13	汕头礐石大桥	中国	双塔	518	1999
14	天兴洲长江大桥	中国	双塔	504	2008
15	Ikuchi Bridge	日本	双塔	490	1991
16	湛江海湾桥	中国	双塔	480	2007
17	Kap Shuimun Bridge	中国香港	双塔	430	1997
18	Tjörn Bridge	瑞典	双塔	386	1981
19	Düsseldorf-Flehe	德国	独塔	368	1979
20	广州鹤洞大桥	中国	双塔	360	1998
21	Tampico Bridge	墨西哥	双塔	360	1988
22	Wesel Bridge	德国	独塔	335	2009
23	Kao Ping His	中国台湾	独塔	330	1999
24	塘沽海河大桥	中国	独塔	310	2004
25	Rama VIII Bridge	泰国	独塔	300	2002
26	Kurt-Schümacher	德国	独塔	287	1972
28	Ibi River Bridge	日本	低塔	271	2001
29	South Bridge	乌克兰	独塔	271	1990
27	Kiso River Bridge	日本	低塔	275	2001
30	Japan-Palau Bridge	帕劳	低塔	247	2002
31	Toyota Arrows Bridge	日本	双塔	235	2005
32	Bybura Bridge	挪威	独塔	185	1979
33	Sanmurin Bridge	日本	独塔	145	1996

混合梁在超大跨径斜拉桥中占较大比例,在 100 ~ 400m 中等跨径斜拉桥中依然应用广泛,且有灵活的结构创新设计。低塔斜拉桥中,塔高较低,斜拉索作用范围小,桥塔附近斜拉索锚固范围内采用 PC 主梁,远离桥塔的跨中处采用钢主梁以减轻自重,如日本的 Kiso River 桥与 Ibi River 桥。德国 2009 年在莱茵河上建成 335m 的 Wesel 桥,我国于 2004 年建成 310m 的塘沽海河桥,及厦门马新桥、南昌英雄桥,均为中小跨混合梁斜拉桥。

早期的稀索斜拉桥中,主梁刚度比较大,而后来发展起来的密索斜拉桥中,主梁承受的弯矩相对较小,所以其结构抗弯刚度也渐趋变小。但是,在斜拉桥设计中都是将边跨作为主跨的锚固构件考虑,所以边跨梁的抗弯刚度减小并不合理。特别是边跨跨度相对较短时,如果其刚度太小,不能很好的起到锚固作用。此外,斜拉桥的整体刚度虽然受拉索轴向抗拉刚度的影响较为明显,但仅仅提高拉索刚度并不能将跨径提高到特大跨径范围来,还必须增加边跨的锚固支承作用,从而减小挠跨比以提高整体刚度,这可以采用刚度较大的混凝土主梁做边跨、边跨设密辅助墩的方法来解决。当边跨主梁的刚度增大时,不仅可以减小主跨梁的内力和变形,而且还可以减小或避免边跨端支点的负反力。鉴于这种思路,于是就出现了主跨设计为钢梁、边跨设计为刚度和自重较大的混凝土梁的混合梁斜拉桥。

在实际应用中,混合梁斜拉桥较单一的钢梁斜拉桥或混凝土梁斜拉桥有许多的优点,主要体现在:

(1) 边跨采用自重较大的混凝土梁,可以起到对自重较轻的钢结构中跨的锚固和压重作用,所以主跨的跨越能力比一般斜拉桥要大,而边跨与主跨的比例比一般斜拉桥要小。

(2) 边跨预应力混凝土梁不但能平衡主跨的钢梁重量且边跨各支点均不出现负反力,而且由于后锚拉索分布较密,从而总体上提高了整座桥的刚度。

(3) 索和重的混凝土边跨提供了稳固支撑,因此当边跨布置活载时,对主跨影响较小。这样主跨的弯矩变幅和斜拉索变幅就明显减小,因此也就减小了主梁和拉索的疲劳影响。

(4) 主塔和边跨预应力混凝土梁可以同时施工。当主塔和边跨主梁完成后即可采用悬臂法架设主跨钢梁,有利于加快施工进度。同时,由于其始终为单悬臂施工,可提高施工期安全性。

(5) 超大跨混合梁斜拉桥扭转频率比提高 25%,跨中风致竖向位移减小约 20%,抗风性能优。

(6) 主跨和边跨分别采用钢结构和预应力混凝土结构,可以在结构重量与用钢量两个指标上寻求较好的平衡,从而从总体上降低工程造价、节省费用。

一般而言,当斜拉桥的主跨与边跨的正常比例受到限制(即边跨跨度较小)时,若采用钢斜拉桥,在活荷载作用下,边跨的支点可能会出现负反力,如果边跨采用预应力混凝土梁,则可以有效地控制主跨钢箱梁的变形,即提高斜拉桥的刚度。由此可知,混合梁斜拉桥可较好地解决主跨与边跨间比例不协调的矛盾。混凝土斜拉桥由于自身的局限性难以满足大跨度的要求,混合梁斜拉桥集钢与混凝土两种材料的优点于一体,满足了超大跨度(跨径 800m 以上)的要求。著名的诺曼底桥、多多罗大桥和 Russky Island 桥根据桥位处的地形,很好地利用了混合梁的特点,使其跨度均超过 800m,一举成为同类型桥梁中的世界之最。

第2章 混合梁斜拉桥结构体系与特性

2.1 概述

混合梁斜拉桥全部或部分边跨采用混凝土梁、部分或全部中跨采用钢梁,边中跨的刚度比和恒载比相差较大,边跨对中跨起到很好的锚固和压重作用。与混凝土梁斜拉桥相比,中跨的跨越能力大大增强;与全钢箱梁斜拉桥相比,在跨越能力相同的情况下,边跨的长度可以设置得小一些,且刚度和动力特性相对更优。混合梁斜拉桥充分发挥了钢与混凝土两种材料的特性,有很好的经济性,同时具有很强的建设条件适应性。

由于主梁不同区段采用两种不同的材料,使其结构特性与钢斜拉桥、混凝土斜拉桥具有较大的差异。

钢梁与混凝土梁连接部(简称钢—混结合部,以下同)是混合梁斜拉桥独有的,且最为重要的构造。钢—混结合部位置及构造的合理确定是混合梁斜拉桥设计的关键。

混合梁斜拉桥结构总体设计既有与钢斜拉桥和混凝土斜拉桥总体设计基本相同的内容,又有其特殊性,主要包括:基于桥梁各项总体设计参数对结构受力影响进行对比分析,全面开展结构总体静、动力受力计算,掌握全桥整体结构受力性能,进而优化桥梁总体设计参数。在此基础上,确定桥梁整体跨径布置,同时确定混合梁钢—混结合部的位置;以结构受力性能为目标,研究确定主梁的各向支承体系等。

2.2 混合梁斜拉桥结构体系

这里的结构体系是指:由构成整座桥梁的所有外在和内在的宏观因素组成的系统,包括受力体系、结构组成、总体布置、塔—梁—墩之间的约束条件等。

2.2.1 斜拉桥基本受力体系与分类

斜拉桥是由主梁、桥塔和斜拉索3种主要构件组成的高次超静定体系,主梁直接承受活载,以轴向受压或压弯为主;斜拉索受拉并将荷载传递至桥塔;桥塔承担由斜拉索传递的荷载,成为典型的压弯构件。在活载及其他附加荷载作用下,构件受力按刚度分配。斜拉索的作用相当于在主梁跨内增加了若干弹性支承,使主梁跨径显著减小,从而大大减小了梁内弯矩、梁体尺寸和梁体重量,使桥梁的跨越能力显著增大。调整斜拉索的索力可以调整主梁的内力,使主梁的内力分布更均匀合理。斜拉桥无需悬索桥那样的锚碇装置,斜拉索水平分力对主梁产生轴向预加力,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,引起其刚度降低。

斜拉桥与一般连续梁桥都有作为跨越和承受荷载作用的主梁,它们的本质差别在于斜拉桥多了连续支承主梁的斜拉索和将主梁承受的力通过斜拉索进一步传递至基础和地基的桥塔。斜拉索的弹性支承作用降低了主梁的截面弯矩和剪力,是斜拉桥的主梁比一般连续梁高度更小、重量更轻、刚度更柔,进而跨越能力提高。斜拉桥的主梁、桥塔、斜拉索形成了一个简单明确的受力体系。

可见:斜拉桥上部结构由主梁、桥塔和斜拉索 3 种构件组成,它是一种桥面体系以主梁承受轴向力(密索体系)为主、支承体系以斜拉索受拉和桥塔受压为主的桥梁。在活载等荷载作用下,构件受力按刚度分配。斜拉桥的主要特点就是利用桥塔引出的斜拉索作为主梁的弹性中间支承,从而降低主梁的截面弯矩和剪力,减轻梁重,提高主梁的跨越能力(图 2.2-1)。

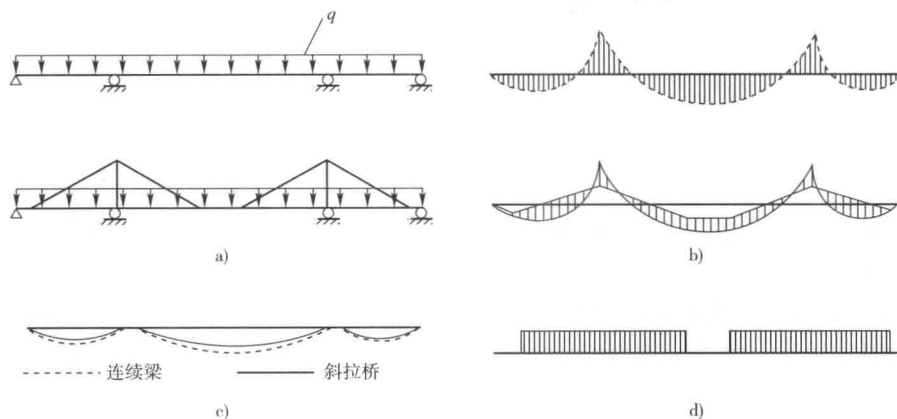


图 2.2-1 斜拉桥与连续梁桥的比较
a) 桥型; b) 弯矩图; c) 挠度; d) 轴力图

因主梁是桥梁的最主要构件,通常根据主梁材料和结构的不同将斜拉桥分为混凝土斜拉桥(准确地讲应是混凝土梁斜拉桥)、钢斜拉桥(钢梁斜拉桥)和混合梁斜拉桥。

2.2.2 混合梁斜拉桥结构组成

混合梁斜拉桥,具备斜拉桥上部结构的基本受力体系。其主梁由钢梁和混凝土梁共同组成,两者通过钢—混结合部结合在一起共同受力。

对于下部结构,由于全部或部分边跨为混凝土梁,因此除了必需的边墩(与引桥相接的过渡墩或交接墩)或桥台外,通常还设置有一个或多个辅助墩。

可见,混合梁斜拉桥由主梁、桥塔、斜拉索、桥墩(台)和基础组成。其中主梁为混合梁,由钢主梁、混凝土主梁及钢—混结合部组成。桥墩一般包括辅助墩及过渡墩。最典型的混合梁斜拉桥结构组成见图 2.2-2。

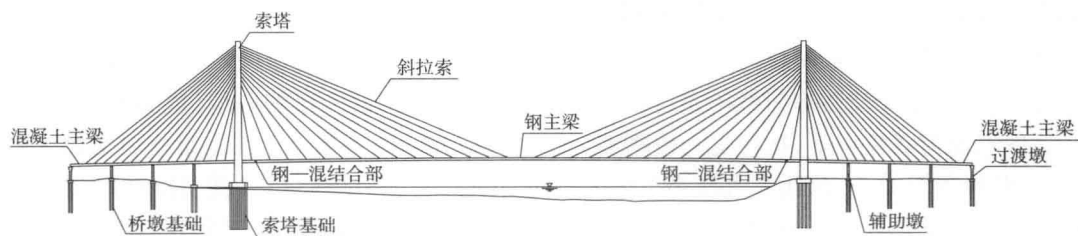


图 2.2-2 典型混合梁斜拉桥结构组成

2.2.3 混合梁斜拉桥总体布置

路线平、纵、横设计是桥梁总体设计的基本内容,应考虑桥梁和道路的关系,以路线设计的一般性原则为指导,开展桥梁路线的平面线形、纵断面线形和横断面布设的设计和优化。

桥梁跨径布设则是桥梁总体布置的又一项基本内容,每座桥梁的设计首先都应进行跨径布设,并以

之确定各塔、墩的位置。

根据桥梁主跨孔数设置情况的不同,斜拉桥可以分为双塔单主跨、3塔双主跨、多塔多主跨等总体布置形式。混合梁斜拉桥主要是通过边跨采用混凝土主梁起到很好的锚固和压重作用,提高桥梁整体的刚度和静、动力受力特性。对于多塔多主跨的斜拉桥,仅在两侧边跨采用混凝土梁,将难以达到上述目的,从而丧失混合梁斜拉桥的本质特征,因此,本书所论述的混合梁斜拉桥在总体布跨上主要针对双塔单主跨斜拉桥(包含单侧混合梁和双侧混合梁),也可外延到3塔双主跨斜拉桥。

主梁钢—混结合部位置直接关系到桥梁的边跨总跨径及其分跨组成,即关系到桥梁的边中跨跨径之比和边跨桥墩的数量和位置,因此,主梁钢—混结合部位置确定是混合梁斜拉桥总体布置应单独开展的一项特殊性工作。

在桥梁塔、墩位置和跨径布设确定后,需要进一步开展桥塔和斜拉索的布置,确定桥塔总体高度、斜拉索索面布设方式及其在桥塔、主梁上的设置范围等,从而完成混合梁斜拉桥的总体布置。

上述总体布置的各项内容中,对于遵照桥梁总体设计一般性原则和方法来开展的工作,如路线平、纵、横设计,中跨及有通航要求的边跨的确定等,本书不再赘述。重点论述属于混合梁斜拉桥独具特点的总体布置等设计内容。

应该注意到,桥梁总体布置涉及的各项内容并不是孤立存在的,而应是相互联系、相辅相成的。

国内外已建及在建大跨混合梁斜拉桥总体方案设计概要见表2.2-1。

2.2.3.1 总体布跨原则

桥梁总体布跨包括中跨跨径的确定、边跨跨径的确定和边跨分跨布置三个方面。桥梁中跨跨径主要根据工程建设条件(如地形、通航、水文、地质、生态、环保等)、技术经济性、景观等综合确定,对于靠近桥塔的有通航要求的边跨则主要根据通航要求确定其最小跨径,这两个跨径的确定遵从桥梁总体设计的一般性原则。

对于混合梁斜拉桥,桥跨布设的关键内容是:在中跨及有通航要求的近塔边跨跨径确定的前提下,如何合理确定边中跨比及边跨分跨布置,以最大限度地发挥混凝土梁的作用,使之既能满足受力要求又能达到经济合理且利于施工的目的。

边中跨比与钢—混结合部位置密不可分,两者可以说是一个问题的两个方面。钢—混结合位置一般应从结构受力性能、施工和经济性三个方面来进行研究和考虑。在施工和经济性方面,各桥情况不同,会存在较大的个性差别。而在结构受力方面,则通过研究获得了一种具有普遍适用性的理论方法。

2.2.3.2 总体布跨设计方法

边跨分跨布置主要是指:边跨是否设置辅助墩?若设置,设几个辅助墩?辅助墩设于什么位置?边跨分跨布置与钢—混结合部位置同样密切相关。边跨分跨布置对全桥结构静、动力受力性能均有很大影响,同时也决定了桥梁施工方案和造价的合理性。

对于混合梁斜拉桥,选取合理的钢梁与混凝土梁连接位置,即钢—混结合部位置,是该类桥型设计和施工中需首先解决的关键问题。结合部位置一方面决定了重量及刚度差别很大的钢梁与混凝土梁的长度比例,对全桥结构特别是主梁整体受力影响很大,需综合考虑跨径布置、辅助墩设置、塔梁约束条件、斜拉索疲劳性能等多方面因素的影响,合理的结合部位置能显著改善混合梁斜拉桥的整体结构性能;另一方面从结合部自身局部考虑,为防止混凝土开裂,合理的结合部位置还应选在主梁弯矩较小的地方。此外,经济因素、施工因素等也是结合部位置选取时必须要考虑的。

目前,国内外已公开报道的有关混合梁桥钢—混结合部位置选取的研究还十分有限。

同济大学徐利平教授根据斜拉桥主梁和桥塔理想成桥状态的要求,对双塔3跨辐射式混合梁斜拉桥的合理跨径进行了概念分析,得到了与钢梁和混凝土梁每延米重量之比、边跨内钢梁和混凝土梁长度之比有关的混合梁斜拉桥合理边中跨比例。其研究成果对混合梁斜拉桥钢—混结合部位置的合理选择有一定的参考意义。

表 2.2-1

国内外已建及在建大跨混合梁斜拉桥总体方案设计

序号	桥 名	桥跨布 (m)	结合位置 (距桥塔中心线)	主梁断面及轮廓尺寸 (m)	塔高 (m)	斜拉索 结构形式	结构支承体系 (塔—梁)	建成年份 (年)
1	昂船洲大桥	289 + 1018 + 289	伸入边跨 49.75m	独立双箱横梁相连, 50.9 × 3.5	约 295		容许主梁扭转, 纵向约束, 纵向加装液压缓冲器	2009
2	鄂东长江公路大桥	275 + 926 + 275	伸入中跨 12.5m	分离双箱 38 × 3.8	242.5、236.5	平行钢丝	横竖向约束, 纵向黏滞阻尼器	2010
3	多多罗大桥	270 + 890 + 270	边跨距桥塔 164.5m	整箱, 23 × 2.7	224.0	平行钢丝	竖向支承, 纵向弹性约束	1998
4	诺曼底大桥	518 + 856 + 737	伸入中跨 116m	整箱, 21.2 × 3	202.7	钢绞线	塔墩梁固结	1995
5	九江长江公路大桥	229 + 818 + 358	单侧混合梁, 伸入中跨 49.5m	单箱多室 38.9 × 3.6	约 260	钢绞线	横竖向约束, 纵向黏滞阻尼器	在建
6	荆岳长江大桥	398 + 816 + 230	单侧混合梁, 伸入中跨 22m	分离双箱 38.5 × 3.8	265.5、224	平行钢丝	横竖向约束, 纵向黏滞阻尼器	2010
7	武汉白沙洲大桥	230 + 618 + 230	边跨距桥塔 143m	分离双箱 30.2 × 3	174.7	平行钢丝	横竖向约束, 纵向弹性约束	2000
8	上海徐浦大桥	590	0 号梁段处	主跨边主梁断面 35.95 × 3.0	212.5	平行钢丝	横竖向约束	1997
9	舟山桃夭门大桥	146 + 580 + 146	伸入中跨 16.7m	单箱多室 27.6 × 2.8	151	平行钢丝	横竖向约束	2003
10	汕头礐石大桥	294 + 518 + 294	边跨距桥塔 100m	分离双箱 30.75 × 3	148	钢绞线	横竖向约束, 纵向弹性约束	1998
11	日本生口大桥	150 + 490 + 150	伸入中跨 2.65m	整箱, 约 23			桥塔处设支座, 边墩设橡胶支座	2000

该方法对于初步确定混合梁斜拉桥合理边中跨比例及钢—混结合部位置具有较强的实践指导作用。

此外,丹麦学者 Gimsing 采用双塔3跨辐射式斜拉桥缆索体系,从控制锚索应力比以保证其抗疲劳性能的角度出发,对斜拉桥的边中跨比问题进行了较系统的理论研究。

本书提出混合梁斜拉桥合理钢—混结合部位置及边跨布置可按以下三阶段设计方法进行:

(1)采用基于斜拉桥理想成桥状态推导的简化方法初步确定混合梁斜拉桥合理钢—混结合部位置及边跨布置。该方法对于初步确定混合梁斜拉桥合理边中跨比例及钢—混结合部位置具有较强的实践指导作用。基于该法初步确定的边中跨比例,可以作为基于主梁弯曲应变能方法进行精确分析研究钢—混结合部位置的基本模型。具体方法见第2.2.3.3节。

(2)基于主梁弯曲应变能方法,计算求得在结构受力方面最合理的钢—混结合部位置及边跨布置。本书利用斜拉桥桥塔只承受轴力、不承担弯矩的理想成桥恒载状态,采用主梁弯曲应变能作为主要指标,同时考虑在运营状态汽车活载下的结合部局部弯矩值、斜拉索索力及在恒载+活载下的支墩反力分布,建立了从结构受力性能上确定混合梁斜拉桥结合部合理位置的有效方法。合理结合部的位置应选在成桥状态恒载下使主梁弯曲应变能最小的位置,同时应保证在运营状态汽车活载下结合部弯矩幅值较低,具体方法见第2.4节。

(3)结合实际工程的建设条件、施工因素、经济性因素,最终综合确定混合梁斜拉桥的合理钢—混结合部位置、边中跨比及边跨布置,具体方法见第2.2.3.4节。

2.2.3.3 基于恒载平衡成桥状态的合理钢—混结合部位置及边跨布置设计方法

1) 斜拉桥理想成桥状态一般要求

斜拉桥理想的成桥状态是:主梁恒载弯矩接近刚性支承连续梁的弯矩,桥塔恒载弯矩接近于零。显而易见,斜拉桥的主梁和桥塔要得到这一理想成桥状态,桥塔两侧的主梁要求处于一定的重力平衡状态。

根据理想成桥状态的要求,边跨主梁最小总长度应满足:边跨梁重力平衡中跨梁重力,即成桥状态边跨不出现负反力,中跨满布活载时,边跨出现负反力;边跨主梁最大总长度应满足:边跨梁重力平衡中跨满布活载时总重力,这样,边跨任何时候均不出现负反力。

2) 钢梁伸入边跨

定义 L_s 为钢梁伸入边跨长度或混凝土梁伸入中跨长度。

图2.2-3为混合梁斜拉桥钢梁伸入边跨的跨径布置,其中 L_a 、 L_m 分别为边跨跨径和中跨跨径; L_{a1} 、 L_{a2} 分别为边跨内混凝土梁的长度和钢梁的长度, $L_{a1} + L_{a2} = L_a$; g_a 、 g_m 分别为混凝土梁和钢梁包括二期恒载在内的每延米重力; p 为满布作用在中跨的活载换算集度。

当斜拉桥满足理想成桥状态要求时,由对 O 点的力矩平衡条件可得:

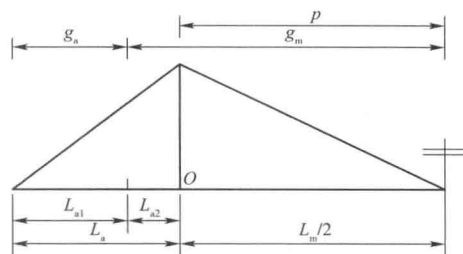


图 2.2-3 钢梁伸入边跨的情况

$$g_a L_{a1} \left(\frac{L_{a1}}{2} + L_{a2} \right) + \frac{1}{2} g_m L_{a2}^2 - \frac{1}{2} (g_m + p) \left(\frac{L_m}{2} \right)^2 = 0$$

如设 $\beta_g = \frac{g_m}{g_a}$, $\beta_p = \frac{p}{g_a}$, $r_a = \frac{L_a}{L_m}$, $L_s = L_{a2}$, $r_s = \frac{L_s}{L_m}$, 则由上式可解得:

$$r_a^2 - (1 - \beta_g) r_s^2 = \frac{\beta_g + \beta_p}{4} \quad (2.2-1)$$

只要给出恒、活载条件,由式(2.2-1)即可得到满足理想成桥状态的混合梁斜拉桥边中跨比 r_a 与伸入长度比 r_s 间的关系。

当 $L_s = 0$ 时,即边跨完全为混凝土梁,中跨为钢梁,可得:

$$r_{a \min} = \frac{1}{2} \sqrt{\beta_g + \beta_p} \quad (2.2-2)$$

当 $L_{a2} = L_a$ 时,即边跨完全为钢梁,中跨为钢梁,可得:

$$r_{a \max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\beta_g + \beta_p}{\beta_g}} \quad (2.2-3)$$

式(2.2-2)和式(2.2-3)给出了满足斜拉桥理想成桥状态的边中跨比的上、下限值,该限值取决于边中跨的恒载及活载。如边中跨比超出该限值,则无论边跨内混凝土梁和钢梁如何布置,都无法达到斜拉桥理想成桥状态,是不合理的跨径布置形式。

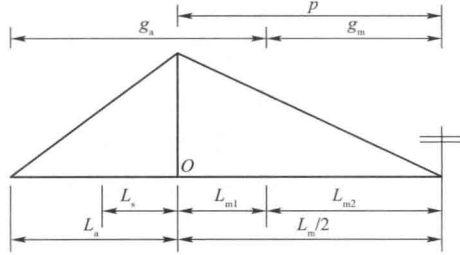


图 2.2-4 混凝土梁伸入中跨的情况

3) 混凝土梁伸入中跨

图 2.2-4 为混合梁斜拉桥混凝土梁伸入中跨的跨径布置,其中 L_a 、 L_m 分别为边跨跨径和中跨跨径; L_{m1} 、 L_{m2} 分别为中跨内混凝土梁的长度和钢梁的长度, $2(L_{m1} + L_{m2}) = L_m$; g_a 、 g_m 分别为混凝土梁和钢梁包括二期恒载在内的每延米重力; p 为满布作用在中跨的活载换算集度。

当斜拉桥满足理想成桥状态要求时,由对 O 点的力矩平衡条件可得:

$$\frac{1}{2} g_a L_a^2 - \frac{1}{2} (g_a + p) L_{m1}^2 - (g_m + p) L_{m2} \left(L_{m1} + \frac{L_{m2}}{2} \right) = 0 \quad (2.2-4)$$

如设 $\beta_g = \frac{g_m}{g_a}$, $\beta_p = \frac{p}{g_a}$, $r_a = \frac{L_a}{L_m}$, $L_s = L_{m1}$, $r_s = \frac{L_s}{L_m}$,则由式(2.2-4)可解得:

$$r_a^2 - (1 - \beta_g) r_s^2 = \frac{\beta_g + \beta_p}{4} \quad (2.2-5)$$

当 $L_s = 0$ 时,即边跨为混凝土梁,中跨完全为钢梁,可得:

$$r_{a \min} = \frac{1}{2} \sqrt{\beta_g + \beta_p} \quad (2.2-6)$$

当 $L_s = \frac{L_m}{2}$ 时,即边跨为混凝土梁,中跨完全为混凝土梁,可得:

$$r_{a \max} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \beta_p} \quad (2.2-7)$$

比较式(2.2-1)和式(2.2-5)可见,对于满足理想成桥状态的混合梁斜拉桥,无论是钢梁伸入边跨,还是混凝土梁伸入中跨,它们满足相同的控制方程。只要给出恒、活载条件,即可得到满足理想成桥状态的混合梁斜拉桥边中跨比 r_a 与伸入长度比 r_s 间的关系。这表明,混合梁斜拉桥在满足重力平衡的理想成桥状态下,钢梁伸入边跨与混凝土梁伸入中跨的效果是相同的,即如果混凝土梁伸入中跨一定长度使混合梁斜拉桥满足理想成桥状态,那么把钢梁伸入边跨相同的长度也可达到相同的效果。

需要注意的是,根据式(2.2-2)、式(2.2-6)和式(2.2-3)、式(2.2-7),钢梁伸入边跨与混凝土梁伸入中跨两种情况下,满足理想成桥状态的斜拉桥边中跨比限值并不完全一致,如表 2.2-2 所示。由表可见,两者的边中跨比下限值相同,均对应于边跨为混凝土梁、中跨为钢梁的跨径布置形式;而对于边中跨比的上限值,两者分别对应于钢主梁和混凝土主梁的跨径布置形式,由于 $\beta_g \leq 1$,故前者要大于后者,这表明在满足理想成桥状态时,钢梁伸入边跨的斜拉桥跨径布置可调范围更大。表 2.2-3 给出了不同钢梁与混凝土梁重力(包括二期恒载)之比 β_g 下的满足斜拉桥理想成桥状态的边中跨比限值,其中取 $\beta_p/\beta_g = 0.25$ 两种情况。

理想成桥状态下混合梁斜拉桥边中跨比限值

表 2.2-2

跨径布置	钢梁伸入边跨	混凝土梁伸入中跨
下限值	边跨为混凝土梁,中跨为钢梁: $r_{a \min} = \frac{1}{2} \sqrt{\beta_g + \beta_p}$	边跨为混凝土梁,中跨为钢梁 $r_{a \min} = \frac{1}{2} \sqrt{\beta_g + \beta_p}$
上限值	边跨、中跨均为钢梁: $r_{a \max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\beta_g + \beta_p}{\beta_g}}$	边跨、中跨均为混凝土梁: $r_{a \max} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \beta_p}$

混合梁斜拉桥边中跨比限值典型值

表 2.2-3

跨径布置	p/g_m	g	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6
钢梁伸入边跨	0	$r_{a \min}$	0.500	0.354	0.289	0.250	0.224	0.204
		$r_{a \max}$	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
	0.25	$r_{a \min}$	0.559	0.395	0.323	0.280	0.250	0.228
		$r_{a \max}$	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559
混凝土梁伸入中跨	0	$r_{a \min}$	0.500	0.354	0.289	0.250	0.224	0.204
		$r_{a \max}$	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
	0.25	$r_{a \min}$	0.559	0.395	0.323	0.280	0.250	0.228
		$r_{a \max}$	0.559	0.530	0.520	0.515	0.512	0.510

对于常见的钢梁与混凝土梁重力之比 $\beta_g = \frac{1}{4}$, 由式(2.2-1) ~ 式(2.2-3) 和式(2.2-5) ~ 式(2.2-7)

可得如图 2.2-5 所示的混合梁斜拉桥合理跨径关系曲线。对于跨径布置合理的混合梁斜拉桥,其边中跨比 r_a 与伸入长度比 r_s 应在 $p=0$ 和 $p=0.25g_m$ 两条曲线之间的区域内,此时,恒载状态下边跨不出现负反力,恒载 + 中跨满布活载下边跨才出现不大的负反力;如果高于 $p=0$ 曲线,则表明边跨偏轻,恒载状态下边跨即已出现较大的负反力;如果低于 $p=0.25g_m$ 曲线,则表明边跨偏重,恒载 + 中跨满布活载时,边跨仍有较大的正值反力,对于该种跨径布置,如使桥塔获得较理想的恒载弯矩,则边跨在多余部分重力作用下将产生非常大的恒载弯矩,这时已不是典型的斜拉桥主梁受力特性,而是介于斜拉桥主梁与连续梁之间。

实际上,这里所讨论的是典型的混合梁斜拉桥合理跨径问题,基本出发点是其符合典型的斜拉桥受力特性,即主要通过缆索体系(包括缆索和只承受轴力作用的塔梁)承受外部荷载。如果抛开该前提,则并不存在所谓的合理跨径,因为边跨过轻,可于边跨压重或设置拉力墩;边跨过重,则可设置辅助墩,按连续梁设计。

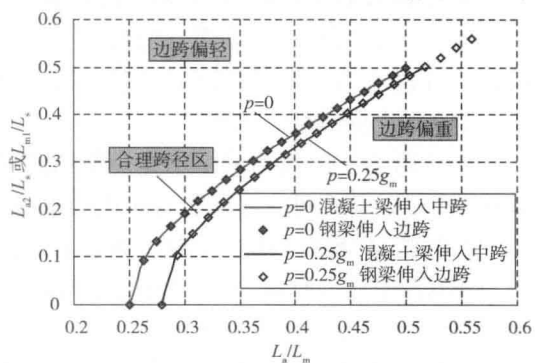


图 2.2-5 混合梁斜拉桥合理跨径关系曲线

4) 算例分析

按照上述方法,对几座典型的混合梁斜拉桥跨径比例问题进行了分析,见表 2.2-4。由表可见,对于所列的几座混合梁斜拉桥,除个别桥梁外,其他各桥均满足按上述方法确定的基于理想成桥状态的混合梁斜拉桥合理跨径范围之内。对于处于计算合理跨径范围外的大桥,其主要特点均是边跨较重,其优点在于:边跨支墩反力始终为正值,不会出现上拔力,不需要压重;对中跨锚固较好,可以有效控制跨中的活载变形。不利的是,边跨过重,会使边跨支墩及基础造价上升;在成桥状态时,如使桥塔获得较理想的恒载弯矩,则边跨在多余部分重力作用下将产生较大的恒载弯矩,这时已不是典型的斜拉桥主梁受力特性,而是介于斜拉桥主梁与连续梁之间,设计时应特别注意。

基于理想成桥状态的混合梁斜拉桥合理跨径分析

表 2.2-4

桥 名	混合梁布置	β_R	r_a	r_s	r_s^p	r_s^0	结 论
香港昂船洲大桥	钢梁伸入边跨	1/4	0.284	0.049	0.057	0.155	边跨偏重
多多罗大桥生口岛侧边跨	钢梁伸入边跨	1/4	0.303	0.185	0.136	0.198	合适
多多罗大桥大三岛侧边跨	钢梁伸入边跨	1/4	0.360	0.289	0.261	0.298	合适
武汉白沙洲大桥	钢梁伸入边跨	1/4	0.372	0.231	0.284	0.318	边跨偏重
汕头礮石大桥	钢梁伸入边跨	1/4	0.375	0.193	0.288	0.322	边跨偏重
法国诺曼底大桥	混凝土梁伸入中跨	1/6	0.417	0.136	0.382	0.398	边跨偏重
日本生口大桥	混凝土梁伸入中跨	1/3	0.306	0.005	0.000	0.125	合适
舟山桃夭门大桥	混凝土梁伸入中跨	1/4	0.252	0.003	0.000	0.034	合适
鄂东长江大桥	混凝土梁伸入中跨	1/3	0.298	0.013	0.000	0.088	合适

2.2.3.4 基于施工和经济性的合理桥跨布置原则和设计方法

以全桥结构受力性能最优来确定混合梁斜拉桥的边中跨比及边跨布置,是在不受其他任何条件限制、完全理想状态下的单一因素设计方法。而对于实际工程而言,建设条件、施工因素、经济性因素对于确定混合梁斜拉桥的边中跨比及边跨布置同样重要,有时往往还成为决定性因素。以下给出基于施工和经济性的合理桥跨布置的原则和设计方法。对于实际工程而言,最终应综合三方面因素确定合理钢—混结合部位置、边中跨比及边跨布置。

1. 钢主梁的施工方案及适应性分析

对于混合梁斜拉桥,随着钢—混结合部所处位置的不同,钢主梁在不同的区域范围,分别可能分布于“全部或部分中跨、桥塔附近、部分边跨”。不同位置的钢主梁可以采用不同的安装施工方案,并各具适应性。在确定钢—混结合部的位置及确定全桥合理布跨时,应考虑钢主梁的施工方案。

(1) 钢主梁的施工方案

①中跨钢主梁段均采用节段拼装。钢主梁节段在工厂预制完成,运至桥位,一般通过桥面吊机进行起吊,并完成梁段间的连接和斜拉索的张拉。

②桥塔旁侧膺架预置。对于桥塔附近钢主梁节段,在工厂预制完成运至桥位,一般通过浮吊(或其他可行的吊装设备)起吊,放置于塔侧预先施工完成的膺架上,完成梁段间的连接,并与相邻的节段拼装法梁段施工进行工艺转换和衔接。

③边跨若具备浮吊的水深条件对于辅助墩及过渡墩顶钢主梁节段,在工厂预制完成运至桥位,一般通过浮吊起吊,放置于墩旁预先施工完成的膺架上,其他边跨钢主梁可通过浮运到位后桥面吊机吊装。

④边跨支架预置。预先搭设边跨支架,钢主梁节段在工厂预制完成运至桥位,一般通过浮吊起吊,放置于塔侧然后在支架上移至梁段位置支架上,完成节段间连接。随着中跨的后续拼装,对称安装并张拉边跨侧斜拉索。

(2) 钢主梁施工方案的适应性分析

中跨钢主梁节段施工方案不受跨径布置和钢—混结合部位置的影响,一般均采用节段拼装。

桥塔附近钢主梁节段施工方案不受跨径布置和钢—混结合部位置的影响,一般均采用膺架预置。

2. 混凝土主梁的施工方案及适应性分析

随着钢—混结合部所处位置的不同,混凝土主梁在不同的区域范围,分别可能分布于“全部或部分边跨、桥塔附近、部分中跨”。不同位置的混凝土主梁可采用不同的施工方案(支架现浇对挂篮悬臂浇筑和悬臂拼装等方案),并各具适应性。在确定钢—混结合部的位置及确定全桥合理布跨时,应考虑混凝土主梁的施工方案。

(1) 混凝土主梁的施工方案

①支架现浇。搭设满堂支架或立柱排架式的支架,在支架上进行分跨、分段等方式进行混凝土现场浇筑施工。

②挂篮悬臂浇筑。在塔区已完成现浇的混凝土主梁节段,拼装挂篮,利用挂篮逐节段进行混凝土梁节段的施工,并完成斜拉索张拉。

③悬臂拼装。混凝土梁段工厂预制并运至桥位,在塔区已完成现浇的混凝土主梁节段上拼装桥面吊机,利用桥面吊机逐节段进行混凝土梁的吊装与连接,并完成斜拉索张拉。

④顶推法施工。对所有混凝土梁段范围搭设顶推施工需要的临时墩和推移系统,在边跨端部搭设支架,按节段进行混凝土主梁的浇筑、预应力张拉施工,将已施工梁段向中跨侧顶推,并逐步完成混凝土主梁的接长。重复顶推及接长直至完成所有梁段的施工及顶推到位。

(2) 混凝土主梁施工方案的适应性分析

①支架现浇。在墩高相对较矮、陆地施工条件或水深较浅的施工条件下,结合经济性,一般适宜采用支架现浇,如昂船洲大桥、鄂东长江大桥等。

②挂篮悬臂浇筑。在墩高相对较高、不具备陆地施工条件且水深较深的施工条件下,综合比较又不适合采用节段预制悬拼时,适宜采用挂篮悬浇。

③悬臂拼装。在墩高相对较高、不具备陆地施工条件且水深较深的施工条件下,梁段运输、吊装能力等条件较好,综合比较较优时适宜采用悬臂拼装。

④顶推法施工。在地形、通航、水深、临时墩易于设置、顶推工法条件容易具备时,综合比较较优时适宜采用顶推法施工,如诺曼底大桥。

3. 钢—混结合部的施工方案及适应性分析

钢—混结合部一般采用支架现浇或挂篮悬臂浇筑施工。在特殊情况下也可采用工厂预制完成后吊装拼装施工方案,但该方案应与结构设计相对应。

钢—混结合部施工方案应与混凝土主梁施工方案相对应。若混凝土主梁采用支架现浇,则钢—混结合部采用支架现浇;若混凝土主梁采用挂篮悬臂浇筑,则钢—混结合部采用挂篮悬臂浇筑方案。

4. 基于施工的合理桥跨布置原则和设计方法

(1) 地形、水文条件对主梁施工方案和合理布跨的适应性分析

①桥全在水中。从桥梁总体设计的一般原则而言,全钢主梁斜拉桥更具优势。在既定采用混合梁斜拉桥的前提下,边跨宜尽量减小采用混凝土主梁的范围,并减少辅助墩的设置;相应,钢—混结合部的位置宜设置于辅助墩附近。

②中跨在水中,边跨部分在水中、部分在陆地。根据水深条件,边跨可全部或部分采用混凝土主梁,辅助墩的设置根据支架设置条件及施工期间对临时预应力的设计需求确定;相应,钢—混结合部的位置宜设置于最靠近桥塔的辅助墩附近或桥塔附近。

③中跨在水中,边跨在陆地。边跨全部采用混凝土主梁。中跨根据水深条件,可较少或较多范围采用混凝土主梁;相应,钢—混结合部的位置设置于靠近桥塔附近或中跨离桥塔较远处。

④边跨在陆地,中跨部分在水中、部分在陆地。边跨全部、中跨陆地部分及水深较浅范围采用混凝土主梁;相应,钢—混结合部的位置设置于中跨水深条件转换位置附近。