

高等学校教材

Qiaoliang Gongcheng

桥 梁 工 程

(下 册)

(土木工程专业用)

顾安邦 主编

范立础 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是土木工程专业学生的专业课教材,分两篇,第一篇内容为:混凝土拱桥(圬工、混凝土、钢筋混凝土、钢管混凝土和劲性骨架混凝土拱桥);第二篇内容为:混凝土斜拉桥。全书系统介绍了上述两种桥梁的设计和构造原理、计算理论和方法以及施工要点。

本书除作为高等院校土木工程专业教学用书外,亦可供从事桥梁工程的技术人员学习参考。

高等学校教材 桥 梁 工 程 (下 册)

(土木工程专业用)

顾安邦 主编

范立础 主审

插图设计: 版式设计:周 园 责任校对:张 捷

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街10号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

印刷厂印刷

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 插页: 1 字数: 千

1999年11月 第1版

1999年11月 第1版 第1次印刷

印数: 册 定价: 30.80元

ISBN 7-114- -

前 言

《桥梁工程》(下册)是土木工程专业的一门专业课。本教材是根据交通部路、桥及交通工程专业教学指导委员会 1996 年 11 月审定的《桥梁工程》编写大纲编写的。通过本课程的学习,使学生掌握大、中型混凝土拱桥和斜拉桥的设计和构造原理、计算理论和方法,并熟悉有关施工方面的知识,初步具有解决大跨径、较复杂桥梁问题的能力。

本册教材共有两篇。第一篇为混凝土拱桥,包括圬工、混凝土、钢筋混凝土、钢管混凝土和劲性骨架混凝土拱桥。第一章主要介绍了拱桥的发展、拱桥的各种体系及其适用条件,拱桥立面、横截面的布置原理和方法。第二章详细介绍了国内外最常用的上承式混凝土拱桥的设计、构造和计算原理及方法,包括板拱、肋拱、箱形拱、双曲拱、桁架拱、刚架拱等的主拱、拱上建筑以及墩台的设计、构造和计算。拱桥的设计计算与施工方法紧密相关,故在本章中还介绍了有支架施工、无支架吊装、转体施工和悬臂施工等四种拱桥的主要施工方法。本章还列有国内外较有代表性的实例四个,这一章是学生学习的重点。第三章介绍了中、下承式钢筋混凝土拱桥的总体布置、设计、构造原理和计算方法以及施工要点,对主拱的稳定计算和吊杆、桥面系的设计计算作了重点介绍。第四章介绍近年来发展较快的钢管混凝土拱桥和劲性骨架混凝土拱桥的设计、构造和计算,阐述了钢管混凝土结构的受力特性、验算公式和各施工阶段的受力分析。第五章介绍了拱式组合体系桥的类型、构造和设计施工特点,包括柔性系杆刚性拱、刚性系杆柔性拱、刚性系杆刚性拱以及连续梁与拱组合等拱式组合体系桥,重点介绍了目前用得较多的系杆拱桥的设计计算。

第二篇为混凝土斜拉桥。第一章介绍了斜拉桥的发展、总体布置及结构体系。第二章较详细的介绍了斜拉桥的拉索、混凝土主梁、索塔、拉索锚固和斜拉桥支承等的结构型式、尺寸拟定和一些细部构造,使学生能基本掌握混凝土斜拉桥的构造。第三章介绍了混凝土斜拉桥的施工,着重介绍了主梁和索塔的施工方法以及拉索的制作、挂索和张拉,也简要介绍了斜拉桥施工控制的方法。斜拉桥的施工是较复杂的,本章只给学生一些基本知识,学生还需要到生产实践中去认识。第四章介绍了斜拉桥的设计计算,着重介绍了以有限元法为主的斜拉桥静力分析和动力分析,包括斜拉桥抗风和抗震要点,在本篇中除了构造以外,这一章应是学习的重点。第五章介绍了国内外较有代表性的四个实例,其中法国的诺曼底大桥,是一座钢与混凝土混合的斜拉桥,可给学生开阔眼界,拓宽思路。

本教材第一篇第一章和第二篇第四、五章由重庆交通学院顾安邦教授编写,第一篇第二章由重庆交通学院向中富副教授编写,第二篇第一、二、三章由重庆交通学院陆莲娣副教授编写,第一篇第三、五章由重庆交通学院杨渡军教授编写,第一篇第四章由重庆交通学院周水兴副教授编写。全书由顾安邦教授主编,同济大学范立础教授主审。

由于编写水平有限,教材中不可避免有错误之处,敬请读者批评指正。

目 录

第一篇 混凝土拱桥

第一章 概述.....	1
第一节 拱桥的现状和发展.....	1
第二节 拱桥的结构体系及总体布置.....	6
第二章 上承式拱桥	15
第一节 上承式拱桥的设计与构造	16
第二节 上承式拱桥的施工	65
第三节 拱桥计算	82
第四节 实例介绍.....	155
第三章 中、下承式钢筋混凝土拱桥	170
第一节 中、下承式钢筋混凝土拱桥的适用场合及总体布置	170
第二节 中、下承式钢筋混凝土拱桥的构造及实例	173
第三节 中、下承式钢筋混凝土拱桥主拱强度及稳定性计算	180
第四节 吊杆及桥面系计算.....	185
第五节 中、下承式钢筋混凝土拱桥主拱的施工要点	189
第四章 钢管混凝土拱桥和劲性骨架混凝土拱桥.....	190
第一节 概述.....	190
第二节 钢管混凝土拱桥的基本组成、各部构造及实例	193
第三节 钢管混凝土拱桥的内力、变形及稳定计算	199
第四节 劲性骨架混凝土拱桥的构造及实例.....	207
第五节 劲性骨架混凝土拱桥各阶段内力、变形及稳定计算	212
第五章 拱式组合体系桥.....	223
第一节 主要类型及设计施工特点.....	223
第二节 拱式组合体系桥的构造及实例.....	227
第三节 系杆拱的设计计算.....	234

第二篇 混凝土斜拉桥

第一章 概述.....	238
第一节 斜拉桥的发展.....	238
第二节 总体布置及结构体系.....	240
第二章 混凝土斜拉桥的构造.....	252
第一节 拉索的种类、构造及防护	252
第二节 混凝土主梁的总体布置、尺寸拟定、钢筋(束)布置和钢—混凝土结合梁的	

构造特点.....	257
第三节 索塔的结构型式和截面尺寸.....	274
第四节 拉索锚固结构.....	278
第五节 斜拉桥的支承.....	282
第三章 混凝土斜拉桥的施工.....	285
第一节 主梁施工方法介绍.....	285
第二节 索塔施工要点.....	290
第三节 斜拉索的制作、挂索和张拉	292
第四节 斜拉桥的施工控制与调整.....	297
第四章 混凝土斜拉桥的设计与计算.....	302
第一节 斜拉桥的静力分析.....	302
第二节 斜拉桥的动力分析.....	320
第三节 斜拉桥施工的理论计算.....	346
第五章 实例.....	348
实例一 山东济南黄河斜拉桥.....	348
实例二 法国伯劳东纳大桥.....	353
实例三 重庆大佛寺长江大桥.....	355
实例四 法国诺曼底大桥.....	358

第一篇 混凝土拱桥

第一章 概 述

第一节 拱桥的现状和发展

拱桥是我国公路上常用的一种桥梁型式(图 1-1-1)。拱桥在竖向荷载作用下,两端支承处除有竖向反力外,还产生水平推力,正是这个水平推力,使拱内产生轴向压力,并大大减小了跨中弯矩,使它的主拱截面材料强度得到充分发挥,跨越能力增大。根据理论推算,混凝土拱桥的极限跨度可达 500m 左右,钢拱桥的极限跨度可达 1 200m 左右。亦正是这个推力,使修建拱桥时要有较庞大的墩、台和良好的地基。

图 1-1-1 重庆万县长江公路大桥

由于拱是主要承受压力的结构,因而,可以充分利用抗拉性能差而抗压性能较好的圬工材料(石料、混凝土、砖等)来建造拱桥,这种由圬工材料建造的拱桥,也称为圬工拱桥。这种拱桥具有就地取材、节省钢材和水泥、构造简单、有利于普及、承载潜力大、养护费用少等优点,因此在我国修建得比较多。建于 1990 年、跨度 120m 的湖南凤凰县乌巢河大桥,是当今世界上跨度最大的石拱桥。

为了减小拱的截面尺寸,减轻拱的质量,在混凝土拱中,配置有受力钢筋的,称之为钢筋混凝土拱桥。在钢筋混凝土拱桥中,截面的拉应力主要由受拉钢筋承受。这样,桥跨结构的工程数量可相应减少,有效地提高了拱桥的经济性能,扩大了拱桥的使用范围。同时,钢筋混凝土拱桥在建筑艺术上也容易处理,它可以通过选择合理的拱式体系及突出结构上的线条来达到美的效果。表 1-1-1 列出了国外一些大跨径钢筋混凝土拱桥的实例,表 1-1-2 列出了我国部分已

桥名	建造年份	建造国家	跨径 (m)	矢跨比	矢高 (m)	结构型式	拱圈(肋) 截面型式
KRK	1980	南斯拉夫	390(主跨)	1/6.5	60	空腹无铰拱	三室箱形
KRK	1980	南斯拉夫	244(副跨)	1/5.2	47	空腹无铰拱	三室箱形
Gladsville	1964	澳大利亚	304.8	1/7.5	40.8	空腹无铰拱	单室箱肋
Parana	1962	巴西	290	1/5.5	53	空腹无铰拱	三室箱形
Bloukrans	1983	南非	272	1/4.1			
Arrabida	1964	葡萄牙	270	1/5.2	51.8	空腹无铰拱	三室箱肋
La Rance	1990	法国	261	1/7.5			
Sandö	1943	瑞典	264	1/6.7	39.5	空腹无铰拱	三室箱形
	1963	南斯拉夫	246.4	1/8	30.8	空腹无铰拱	三室箱形
别府桥	1989	日本	235	1/6.4			
Fiumarella	1961	意大利	231	1/3.5	66.1		
ep	1952	前苏联	228	1/6.7	34	空腹无铰拱	三室箱形
Nosi sad	1961	南斯拉夫	221(主跨)	1/6.5	32.5	中承式无铰拱	单室箱肋
Nosi sad	1961	南斯拉夫	165.75(副跨)	1/6.3	26.5	中承式无铰拱	单室箱肋
Esla	1940	西班牙	210	1/3.4	62.4	空腹无铰拱	三室箱形
宇佐川	1982	日本	204		38.677	空腹无铰拱	三室箱形
Van Stundens	1971	南非	198		44	空腹无铰拱	三室箱形
	1966	南斯拉夫	193.2	1/7	27.6	空腹无铰拱	三室箱形
Antans	1955	巴西	186	1/6.6	28	中承式无铰拱	单室箱肋
Plougastel	1930	法国	3 × 180	1/6.5	27.5	空腹无铰拱	三室箱形
外津桥	1974	日本	170	1/6.4	26.5	空腹两铰拱	双室箱形
Selah	1971	美国	167.5	1/3.1	54.6	空腹无铰拱	三室箱形
Roche-guyon	1934	法国	161	1/7	23	中承式无铰拱	单室箱肋
Suinesund	1942	瑞典挪威交界	155.18	1/3.9	39.95	空腹无铰拱	
Neckar	1977	前联邦德国	154.4	1/3.1	49.85	空腹无铰拱	双室箱肋
Canada	1955	法国	153	1/5.9	26.1	中承式无铰拱(敞口桥)	单室箱肋
Caracas	1953	委内瑞拉	152	1/4.6	33	空腹双铰拱	单室箱肋
Podolsko	1942	捷克	150	1/3.6	41.8	空腹无铰拱	矩形
帝释桥	1978	日本	145	1/4.8	30	空腹无铰拱	双室箱形
Teufelstal	1938	前联邦德国	138	1/5.3	26.04	空腹无铰拱	矩形肋
Saint-pierre-duvauvray	1923	法国	130	1/5.2	25.3	中承式无铰拱	单室箱肋
Oise	1929	法国	126	1/7.6	16.6	中承式无铰拱	单室箱肋
Krummbach	1977	瑞士	124	1/4	31	空腹无铰拱(弯桥)	矩形肋
赤谷川桥	1979	日本	116	1/4	29.2	空腹刚梁柔拱(无铰)	矩形
Fozde Sousa	1952	葡萄牙	115	1/7.8	14.75	空腹无铰拱	I形肋
Stechovice	1939	捷克	114	1/6.3	18	中承式无铰拱	单室箱肋
Mosel	1934	前联邦德国	107	1/13.2	8.12	空腹三铰拱	双室箱肋
Rome	1911	意大利	100	1/10	10	实腹无铰拱	箱形

凝土拱桥一览表

表 1-1-1

截面变化规律	拱圈(肋)高度		桥面宽度(m)	拱圈(肋)宽度(m)	施 工 方 法	备 注
	拱顶(m)	拱脚(m)				
等截面	6.5	6.5	11.4	13	悬臂桁架法拼装,千斤顶调整拱内力	
等截面	4	4	11.4	8	悬臂桁架法拼装,千斤顶调整拱内力	
变截面	4.26	7	25.66	4 肋× 6.1	钢拱架上拼装	
变截面	3.2	4.8	13.50	拱顶: 11; 拱脚: 13	钢拱架上浇筑	
			16		塔架斜拉索法	
变截面	3	4	26.5	2 肋× 8	钢拱架上浇筑	
			12			
变截面	2.66	4.5	12	9.5	木拱架上浇筑	
镰刀形	3.7	2.7	10.76	7.5	塔架斜拉索法悬浇	
			18.70			
变截面	6	7		11.4	钢拱架上浇筑	公铁两用桥
镰刀形	4.5	3.2	19.95	桥面上: 2 肋× 2.5; 拱脚: 2× 4.7	钢拱架上浇筑	公铁两用桥
镰刀形	3.63	2.6	19.95	桥面上: 2 肋× 2.2; 拱脚: 2 肋× 4.2	钢拱架上浇筑	公铁两用桥
变截面	4.5	5.08	8.74	拱顶: 7.92; 拱脚: 9.06	刚性骨架法	铁路桥
变截面	3.6	4.4	21.9	17.8		
等截面	2.75	2.75	26	14.6	塔架斜拉索法悬浇	
镰刀形	3	2.3	9.25	7	塔架斜拉索法悬浇	
变截面	3	5	9	2 肋× 1.5	拱架上浇筑	
	4.97		8	7.5	木拱架上浇筑	公铁两用桥
变截面	2.4	3	10.1	拱顶: 8; 拱脚: 16	悬臂桁架法浇筑	
变截面	2.13	3.35	12.04	9.75	钢拱架上浇筑	
镰刀形	2.65	1.45	10	桥面上: 1.4; 拱脚: 3	木拱架上浇筑	
			9.45		木拱架上浇筑	
等截面	3	3	31	2 肋× 6.5	桥面箱梁由一侧顶推法施工	
变截面	3.2	3.6	12.3	桥面上: 2.1; 拱脚: 3.52	拱架上浇筑	
	2.9		24.5	3 肋× 3.2	拱架上浇筑	
变拱圈宽度	2	2	8.5	拱顶: 7.5; 拱脚: 9.5	木拱架施工	
变截面	2.4	3.8	9.9	9.9	塔架斜拉索与刚性骨架组合法	
变截面	1.3	2.8	22.4	2 肋× 7.05	拱架施工	
变截面	2.5	4.1	8.3	拱顶: 2.5	木拱架施工	
镰刀形	2.1	1.2	8.2	拱顶: 1.2; 拱脚: 1.8	拱架施工	
变截面	1.5	2.36	10	2 肋× 1.1	塔架斜拉索法浇筑	
等截面	0.8	0.8	12.2	9	悬臂桁架法	铁路桥
	1.6		9	2 肋× 4.38	木拱架施工	
镰刀形	2.2	1.3	9.75	拱顶: 1.3; 拱脚: 2.5		
	0.85		19.2			
镰刀形	1.7	1.24	18	2 肋× 6.6		外观实腹式

建大跨径钢筋混凝土拱桥的实例。需要指出的是,在大跨径钢筋混凝土拱桥中,由于自重大,拱截面中由于恒载引起的压应力数值相当大,因此,由活载弯矩引起的截面应力相对较小,故一般都是混凝土压应力控制设计。拱内钢筋的配置,主要根据拱在无支架施工时的要求进行,一旦拱桥建成,这些钢筋并没有充分发挥作用,故它应该属于混凝土拱桥的范畴,但习惯上也称这类拱桥为钢筋混凝土拱桥。

修建大跨径拱桥的关键是施工问题。过去常采用搭架(拱架)施工法。随着无支架施工技术的发展,扩大了拱桥的使用范围,提高了它在大跨径桥梁中的竞争能力。钢筋混凝土拱桥与斜拉桥相比,抗风稳定性强、造价低、维护费用少。目前世界上最大跨径的钢筋混凝土拱桥——重庆万县长江大桥(跨径 420m, 1997 年建成,见图 1-1-1)和南斯拉夫 KRK 桥(1980 年建成,跨径 390m,见图 1-1-2)就是在与其它大跨径桥梁方案作了比较之后而中选的。随着拱桥跨径的不断增大,如何减轻拱桥结构自重、改进施工方法和高强混凝土的开发使用,就成为修建和发展拱桥的重要问题。近年来,国内在箱形拱桥的基础上,出现了刚架拱桥、预应力混凝土组合桁架拱桥、钢管混凝土拱桥和劲性骨架混凝土拱桥等新型拱桥。特别是钢管混凝土拱桥,由于它是先安装钢管拱,后填充管内混凝土,使得安装质量大大减轻,施工十分方便。而管内混凝土又由于钢管的套箍作用,使其强度(特别是抗压强度)得到很大的提高。以上的这些优点使得这种拱桥迅速发展,自 1990 年四川省建成第一座钢管混凝土拱桥以来,全国已相继建成 50 多座这类拱桥,其中广西三岸邕江大桥,跨径达 270m。用钢管混凝土作为劲性骨架,外包混凝土形成主拱截面的劲性骨架混凝土拱桥,可使体积庞大的拱箱混凝土在符合拱的受力方式下逐渐形成,而不需要强劲的支架和强大的吊装能力,使修建特大跨径的混凝土拱桥成为可能。1997 年建成的重庆万县长江大桥和 1996 年建成的广西邕宁邕江大桥(312m)均是这种类型的拱桥。前者为目前世界上跨径最大的钢筋混凝土箱形拱桥,后者为世界跨径最大的中承式拱桥。可以预见,环绕着解决修建拱桥所要求的用料省、安装质量轻、施工简便、承载能力大的诸多矛盾,新的拱桥型式和先进的拱桥施工方法会不断的出现。

拱桥的主要缺点是:由于它是一种推力结构,支承拱的墩台和地基必须承受拱端的强大推力,因而修建拱桥要求有良好的地基;对于多孔连续拱桥,为防止其中一孔破坏而影响全桥,还要采取特殊的措施,或设置单向推力墩以承受不平衡的推力;在平原区修建拱桥,由于建筑高度较大,使桥两头的接线工程量增大,亦使桥面纵坡加大,对行车不利;混凝土拱桥施工需要劳动力较多,建桥时间较长等。

混凝土拱桥(包括圬工拱桥和钢筋混凝土拱桥)虽然存在以上缺点,但由于其优点突出,在我国公路桥梁中得到了广泛的应用,而且,这些缺点也正在得到改善和克服。如在地质条件不好的地区修建拱桥时,可从结构体系上、构造型式上采取措施,以及利用轻质材料来减轻结构自重,或采取措施提高地基承载能力。为了节约劳动力、加快施工进度,可采用预制装配及无支架施工。这些都有效地扩大了拱桥的适用范围,提高了跨越能力。

第二节 拱桥的结构体系及总体布置

一、拱桥的基本组成

拱桥和其它桥梁一样,也是由桥跨结构(上部结构)及下部结构两部分组成。

根据行车道的位置,拱桥的桥跨结构可以做成上承式、下承式或中承式三种类型,如图 1-

1-3 所示。

一般的上承式拱桥,桥跨结构是由主拱圈(肋、箱)简称主拱及拱上建筑(又称拱上结构)所构成。主拱圈(肋、箱)是主要承载构件,承受桥上的全部荷载,并通过它把荷载传递给墩台及基础。由于主拱圈是曲线形,一般情况下车辆无法直接在弧面上行驶,所以在行车道系与主拱圈之间需要有传递荷载的构件和填充物,这些主拱圈以上的行车道系和传载构件或填充物统称为拱上建筑。拱上建筑可做成实腹式(图 1-1-4)或空腹式(图 1-1-3a)),相应称为实腹拱桥或空腹拱桥。在图 1-1-4 中,表示出了拱桥的主要组成部分、主要尺寸和名称。

图 1-1-3

a) 上承式; b) 下承式; c) 中承式

中下承式拱跨结构的组成参阅本篇第三章。

拱桥的下部结构包括桥墩、桥台和基础,用以支承桥跨结构,将桥跨结构的全部荷载传至地基。桥台还起与两岸路堤相连接的作用,使路桥形成一个协调的整体。

图 1-1-4 实腹拱桥

1-主拱圈; 2-拱顶; 3-拱脚; 4-拱轴线; 5-拱腹; 6-拱背; 7-起拱线; 8-桥台; 9-桥台基础; 10-锥坡; 11-拱上建筑
1₀——净跨径; l——计算跨径; f₀——净矢高; f——计算矢高; f/l——矢跨比

二、拱桥的分类和体系

拱桥的型式多种多样,构造各有差异,可以按照不同的方式来进行分类。例如:
按照主拱圈(肋、箱)所使用的建筑材料可以分为圬工拱桥、钢筋混凝土拱桥及钢拱桥等;
按照拱上建筑的形式可以分为实腹式拱桥及空腹式拱桥;
按照拱轴线的形式,可将拱桥分为圆弧拱桥、抛物线拱桥、悬链线拱桥等;
按照桥面的位置可分为上承式拱桥、下承式拱桥和中承式拱桥;
按照有无水平推力,可分为有推力拱桥和无推力拱桥等。

现仅根据下面两种不同的分类方式对圬工和钢筋混凝土拱桥的主要类型作一些介绍。

(一) 按照结构体系分类

拱式桥跨结构按照静力图式可以分为三种类型。

1. 简单体系的拱桥

简单体系的拱桥, 可以做成上承式的、下承式的(无系杆拱)或中承式的(见图 1-1-3), 均为有推力拱。

在简单体系的拱桥中, 上承式拱桥的拱上建筑或中、下承式拱桥的拱下悬吊结构(统称为行车道系结构), 不与主拱一起承受荷载。桥上的全部荷载由主拱单独承受, 它们是桥跨结构的主要承重构件。拱的水平推力直接由墩台或基础承受。

按照主拱的静力特点, 简单体系的拱桥又可以分成如下的三种, 见图 1-1-5。

(1) 三铰拱

属外部静定结构。由于温度变化、支座沉陷等原因引起的变形不会在拱内产生附加内力, 计算时无需考虑体系弹性变形对内力的影响。当地基条件不良, 又需要采用拱式桥梁时, 可以采用三铰拱。但由于铰的存在, 使其构造复杂, 施工较困难, 维护费用增高。而且, 减小了结构的整体刚度, 降低了抗震能力。又由于拱的挠度曲线在顶铰处有转折, 对行车不利。因此, 三铰拱一般较少采用。国外三铰拱的最大跨径达 107m(见表 1-1-1)。我国仅在一些较小跨径的桥上有所采用。公路空腹式拱桥的拱上建筑中的边腹拱, 常用三铰拱。

图 1-1-5 拱圈(肋)的静力图式

a) 三铰拱; b) 两铰拱; c) 无铰拱

(2) 两铰拱

属外部一次超静定结构。由于取消了拱顶铰, 使结构整体刚度较三铰拱大。在墩台基础可能发生位移的情况下或坦拱中采用, 较之无铰拱可以减小基础位移、温度变化、混凝土收缩和徐变等引起的附加内力。目前, 世界最大跨径的两铰拱桥是日本的外津桥, 跨径 170m。

(3) 无铰拱

属外部三次超静定结构。在自重及外荷载作用下, 拱内的弯矩分布比两铰拱均匀, 材料用量省。由于无铰, 结构的整体刚度大, 构造简单, 施工方便, 维护费用少, 因此在实际中使用最广泛。但由于无铰拱的超静定次数高, 温度变化、材料收缩、结构变形、特别是墩台位移会在拱内产生较大的附加内力, 所以无铰拱一般希望修建在地基良好的条件下, 这使它的使用范围受到一定限制。不过, 随着跨径的增大, 附加内力的影响要相对地减小, 因而无铰拱仍是国内外拱桥上采用最多的一种构造型式。世界最大跨径已达 420m。

除以上三种拱桥外, 单铰拱桥在理论上是可能的, 但实际建造的很少。法国的 I artuby 桥是单铰拱桥, 跨径 110m。

2. 组合体系的拱桥

在拱式桥跨结构中, 行车系的行车道梁与拱组合, 共同受力, 称为组合体系的拱桥。

由于行车系与主拱的组合方式不同, 其静力图式也不同。组合拱可分成无推力的和有推力的两类。同样, 组合拱可以做成上承式的或下承式的。常用的有以下几种型式:

(1) 无推力的组合体系拱

拱的推力由系杆承受, 墩台不承受水平推力。根据拱肋和系杆的刚度大小及吊杆的布置型式可以分为(见图 1-1-6):

具有竖直吊杆的柔性系杆刚性拱——称系杆拱, 见图 1-1-6a);

具有竖直吊杆的刚性系杆柔性拱——称蓝格尔拱, 见图 1-1-6b);

具有竖直吊杆的刚性系杆刚性拱——称洛泽拱,见图 1-1-6c)。

以上三种拱,当用斜吊杆来代替竖直吊杆时,称为尼尔森拱,见图 1-1-6d)、e)、f)。

(2)有推力的组合体系拱

此种组合体系拱没有系杆,由单独的梁和拱共同受力,拱的推力仍由墩台承受。图 1-1-7a)是刚性梁柔性拱(倒蓝格尔拱);图 1-1-7b)是刚性梁刚性拱(倒洛泽拱)。

3. 拱片桥(图 1-1-8)

上边缘与桥面纵向平行,下边缘是拱形的有推力结构,称为拱片。在拱片中,行车道系与拱肋刚性联成一整体,共同承受荷载,故它仅能用于上承式桥梁。拱片的立面可以做成实体拱片,也可以挖空做成桁架式拱片。根据桥梁宽度的不同,拱片桥由两片以上的拱片组成,并用横向联结系将各拱片联成整体。行车道板支承在拱片上。拱片桥可以做成无铰、两铰或三铰,它的推力由墩台承受。

图 1-1-6 无推力的组合体系拱

a) 系杆拱; b) 蓝格尔拱; c) 洛泽拱; d) 尼尔森系杆拱; e) 尼尔森蓝格尔拱; f) 尼尔森洛泽拱

图 1-1-7 有推力的组合体系拱

a) 倒蓝格尔拱; b) 倒洛泽拱

图 1-1-8 拱片桥

(二)按照主拱的截面型式分类

主拱的横截面型式很多,通常可分为下面几种类型(图 1-1-9)。

1. 板拱桥(图 1-1-9a))

如果主拱的横截面是整块的实体矩形截面,称为板拱桥。板拱桥是最古老的拱桥型式,由于它构造简单,施工方便,至今仍在使用的。

由于在截面积相同的条件下,实体矩形截面比其它型式截面的截面抵抗矩小,在有弯矩作

用时,材料的强度没有得到充分利用。如果要获得与其它型式截面相同的截面抵抗矩,板拱就必须增大截面积,这就相应地增加了材料用量和结构自重,故采用板拱是不太经济的。

2. 肋拱桥(图 1-1-9b))

为了节省材料,减轻结构自重,必须充分利用材料的强度,以较小的截面积获得较大的截面抵抗矩,将整块的矩形实体截面划分成两条(或多条)分离式的肋,以加大拱的高度,这就形成了由几条肋组成的拱桥,称为肋拱桥。肋拱桥的拱肋可以是实体截面、箱形截面或桁架截面。肋拱桥材料用量一般比板拱桥经济,但构造比板拱桥复杂。

3. 双曲拱桥(图 1-1-9c))

主拱圈的横截面是由数个横向小拱组成,使主拱圈在纵向及横向均呈曲线形,故称之为双曲拱桥。

双曲拱截面的抵抗矩比相同截面积的实体板拱圈要大,因此可节省材料,结构自重力小,特别是它的预制部件分得细,吊装质量轻。在公路桥梁上获得过较广泛的应用,最大跨径达150m。但由于其截面组成划分过细,整体性能较差,建成后出现裂缝较多。

4. 箱形拱桥(图 1-1-9d))

将实体的板拱截面挖空成空心箱形截面,则称为箱形拱或空心板拱。由于截面挖空,使箱形拱的截面抵抗矩较相同截面积的板拱的截面抵抗矩大得多,从而大大减小弯矩引起的应力,节省材料较多。

图 1-1-9 拱的横截面型式

- a) 板拱——整块矩形实体截面; b) 肋拱——分离式肋形截面; c) 双曲拱——截面由数个小拱组成;
d) 箱形拱——整块空心箱形截面

在轴力和弯矩作用下,板拱中的应力为:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{Ne}{W} = \frac{N}{A} \left(1 \pm \frac{e}{r} \right) \quad (1-1-1)$$

式中: e ——轴力偏心距;

Ne ——弯矩;

r ——核心半径,

$$r = \frac{W}{A} = \frac{H_1}{6};$$

H_1 ——板拱截面高度;

N ——轴向力;

A ——截面积。

尚若在保持同样的截面面积 A 及拱宽 B 的情况下,将实体截面挖空成空心箱形截面,将

挖空部分用来增大拱圈截面高度,箱形截面的高度为 H , 见图 1-1-9d), 则

截面沿宽度方向的挖空率为:

$$= \frac{B - b}{B} \quad (1-1-2)$$

截面沿高度方向的挖空率为:

$$= \frac{H - d}{H} \quad (1-1-3)$$

空心箱形截面的核心半径为:

$$r = \frac{H}{6} \times \frac{1 - \frac{d^3}{H^3}}{1 - \frac{b^3}{B^3}} = \frac{H}{6} a \quad (1-1-4)$$

式中: $a = \frac{1 - \frac{d^3}{H^3}}{1 - \frac{b^3}{B^3}} > 1$

显然, 箱形截面的核心半径是实体截面核心半径的 $H a / H_1$ 倍。箱形拱中由弯矩引起的应力只有板拱中由弯矩引起的应力的 $\frac{H_1}{H} a$ 倍。

三、拱桥的总体布置

在选定了桥位, 进行了必要的水文、水力计算, 掌握了桥址处的地质、地形等资料后, 即可进行拱桥的总体布置。总体布置是否合理, 考虑问题是否周全, 不但直接影响桥梁的总造价, 而且还对今后桥梁的使用、维护、管理带来直接的影响。因此, 拱桥的总体布置十分重要。一个好的设计, 往往就体现在总体布置的优劣上。

拱桥的总体布置应按照适用、经济、安全和适当照顾美观的原则进行。总体布置图中阐明的主要内容应包括: 拟采用的结构体系及结构型式; 桥梁的长度、跨径、孔数; 拱的主要几何尺寸, 例如矢跨比、宽度、高度、外形等; 桥梁的高度; 墩台及其基础型式和埋置深度; 桥上及桥头引道的纵坡等。

(一) 确定桥梁长度及分孔

当通过水文、水力计算和技术经济等方面的比较, 确定了两岸桥台台口之间的总长度之后, 在纵、平、横三个方向综合考虑桥梁与两头路线的衔接, 可以确定桥台的位置和长度, 桥梁的全长便被确定下来。

在桥梁全长决定后, 再根据桥址处的地形、地质等情况, 并结合选用的结构体系和结构型式、施工条件, 可以进一步地确定选择单孔还是多孔。

如果采用多孔拱桥, 如何进行分孔, 是总体布置中一个比较重要的问题。如果跨越通航河流, 在确定孔数与跨径时, 一般分为通航孔和不通航孔两部分。分孔时, 除应保证净孔径之和满足设计洪水通过的需要外, 还应确定一孔或两孔作为通航孔。通航孔跨径和通航标高的大小应满足航道等级规定的要求(见表 1-1-3), 并与航道部门协商。通航孔的位置多半布置在常水位时的河床最深处或航行最方便的地方。对于航道可能变迁的河流, 必须设置几个通航的桥跨, 一旦主流位置变迁时, 也能满足通航要求。对于不通航孔或非通航河段, 桥孔划分可按经济原则考虑, 尽量使上下部结构的总造价最低。

在分孔中, 有时为了避开深水区或不良的地质地段(如软土层、溶洞、岩石破碎带等)而可能将跨径加大。在水下基础结构复杂、施工困难的地方, 为减少基础工程, 也可考虑采用较大跨径。

拱式桥梁通航净空尺寸

表 1-1-3

航道等级	驳船吨级(t)	船型尺寸(m) (总长×型宽×设计吃水深)	船队尺寸(m) (长×宽×吃水深)	天然及渠化河流(m)			
				净高	净宽	上底宽	侧高
I	3 000	75×16.2×3.5	350×64.8×3.5	24	160	120	7.0
			271×48.6×3.5	18	125	95	7.0
			267×32.4×3.5		95	70	7.0
			192×32.4×3.5		85	65	8.0
II	2 000	67.5×10.8×3.4	316×32.4×3.4	18	105	80	6.0
			245×32.4×3.4	18	90	70	8.0
		75×14×2.6	180×14.0×2.6	10	50	40	6.0
III	1 000	67.5×10.8×2.0	243×32.4×2.0	10	70	55	6.0
			238×21.6×2.0				
			167×21.6×2.0				
			160×10.8×2.0				
IV	500	45×10.8×1.6	160×21.6×1.6	8	60	50	4.0
			112×21.6×1.6				
			109×10.8×1.6				
V	300	35×9.2×1.3	125×18.4×1.3	8	46	38	4.0
			89×18.4×1.3				
			87×9.2×1.3	8.5	28~30	25	5.5
VI	100	26×5.2×1.8	361×5.5×2.0	6	22	17	3.4
		32×7×1.0	154×14.5×1.0				
		32×6.2×1.0	65×6.5×1.0				
		30×6.4(7.5)×1.0	74×6.4(7.5)×1.0				
VII	50	21×4.5×1.75	273×4.8×1.75	3.5	14	11	2.8
		23×5.4×0.8	200×5.4×0.8				
		30×6.2×0.7	60×6.5×0.7				

注：在平原河网地区建桥遇特殊困难时，可按具体条件研究决定；

桥墩侧如有显著的紊流，则通航孔桥墩间的净宽度值应为本表的通航净宽加两侧紊流区的宽度；

在航行条件较差或弯曲河段上建桥，其净宽应在表列数值基础上，根据船舶航行安全的需要适当放宽。

对跨越高山峡谷、水流湍急的河道或宽阔的水库，建造多孔小跨径桥梁不如建造大跨径桥梁经济合理。在条件容许并通过技术经济比较后，可采用单孔大跨拱桥。

分孔中，还应考虑施工的方便和可能，以及平战结合的要求。通常，全桥宜采用等跨或分组等跨的分孔方案，并尽量采用标准跨径，以便于施工和修复，又能改善下部结构的受力并节省材料。

此外，分孔中，还需注意整座桥的造型和美观，有时，这可能成为一个主要因素加以考虑。

(二) 确定桥梁的设计标高和矢跨比

拱桥的标高主要有四个，即桥面标高、拱顶底面标高、起拱线标高、基础底面标高(图 1-1-10)。这几项标高的合理确定，是拱桥总体布置中的另一个重要问题。

拱桥的桥面标高代表着建桥的高度，特别在平原区，在相同纵坡情况下，桥高会使两端的

图 1-1-10 拱桥标高及桥下净空图

引桥或行道工程显著增加,将提高桥梁的总造价。反之,如果桥修矮了,不但有遭受洪水冲毁的危险,而且往往影响到桥下通航的正常运行,致使桥梁建成后带来难以挽救的缺陷。故桥面标高必须综合考虑有关因素,正确合理的确定。

建在山区河流上的拱桥,由于两岸公路路线的位置一般较高,桥面标高一般由两岸线路的纵面设计所控制。

对跨越平原区河流的拱桥,其桥面最小高度一般由桥下净空所控制。为了保证桥梁的安全,桥下必须留有足够的排泄设计洪水流量的净空。对于无铰拱桥,可以将拱脚置于设计水位以下,但通常淹没深度不得超过矢高的 $2/3$ 。为了保证漂浮物能通过,在任何情况下,拱顶底面应高出设计洪水位 1.0m 。

对于有淤积的河床,桥下净空尚应适当加高。

对于通航河流,通航孔的最小桥面高度,除满足以上要求外,还应满足对不同航道等级所规定的桥下净空界限的要求(见图 1-1-10)。设计通航水位,一般是按照一定的设计洪水频率 ($1/20$) 进行计算,并与航运部门具体协商决定。

当桥面标高确定之后,由桥面标高减去拱顶处的建筑高度,就可得到拱顶底面的标高。

拟定起拱线标高时,为了减小墩台基础底面的弯矩,节省墩台的圬工数量,一般宜选择低拱脚的设计方案。但对于有铰拱桥,拱脚需高出设计洪水位以上 0.25m 。为了防止冰害,有铰或无铰拱脚均应高出最高流冰面 0.25m 。当洪水带有大量漂浮物时,若拱上建筑采用立柱时,宜将起拱线标高提高,使主拱圈不要淹没过多,以防漂浮物对立柱的撞击或挂留。有时为了美观的要求,应避免就地起拱,而应使墩台露出地面一定的高度。

至于基础底面的标高,主要根据冲刷深度、地基承载能力等因素确定。

当拱顶、拱脚标高确定后,根据跨径即可确定拱的矢跨比。矢跨比是拱桥的一个特征数据,它不但影响主拱圈内力,还影响拱桥施工方法的选择。同时,对拱桥的外形能否与周围景物相协调,也有很大关系。

拱的恒载水平推力 H_g 与垂直反力 V_g 之比值,随矢跨比的减小而增大。当矢跨比减小时,拱的推力增加,反之则推力减小。众所周知,推力大,相应地在主拱圈内产生的轴向力也大,对主拱圈本身的受力状况是有利的,但对墩台基础不利。同时,矢跨比小,则弹性压缩、混凝土收缩和温度等附加内力均较大,对主拱圈不利。在多孔情况下,矢跨比小的连拱作用较矢跨比大的显著,对主拱圈也不利。然而,矢跨比小却能增加桥下净空,降低桥面纵坡,对拱圈的砌筑和混凝土的浇筑比较方便。因此,在设计时,矢跨比的大小应经过综合比较进行选择。

通常,对于砖、石、混凝土拱桥和双曲拱桥,矢跨比一般为 $1/4 \sim 1/8$,不宜小于 $1/8$;箱形拱桥的矢跨比一般为 $1/6 \sim 1/10$ 。但拱桥最小矢跨比不宜小于 $1/12$ 。一般将矢跨比大于或等于

1/5 的拱称为陡拱, 矢跨比小于 1/5 的称为坦拱。

(三) 如何处理不等跨分孔问题

多孔拱桥最好选用等跨分孔的方案。在受地形、地质、通航等条件的限制, 或引桥很长, 考虑与桥面纵坡协调一致时, 可以考虑用不等跨分孔的办法处理。如一座跨越水库的拱桥, 全长 376m, 谷底至桥面高达 80 余米。根据地形、地质条件和经济比较等综合考虑, 以采用不等跨分孔为宜。于是, 跨越深谷的主孔跨径采用 116m, 而两边孔均采用 72m(图 1-1-11)。

图 1-1-11 不等跨分孔

不等跨拱桥, 由于相邻孔的恒载推力不相等, 使桥墩和基础增加了恒载的不平衡推力。为了减小这个不平衡推力, 改善桥墩基础受力状况, 可采用以下措施:

1. 采用不同的矢跨比

利用在跨径一定时, 矢跨比与推力大小成反比的关系, 在相邻两孔中, 大跨径用较陡的拱(矢跨比较大), 小跨径用较坦的拱(矢跨比较小), 使两相邻孔在恒载作用下的不平衡推力尽量减小。

2. 采用不同的拱脚标高

由于采用了不同的矢跨比, 致使两相邻孔的拱脚标高不在同一水平线上。因大跨径孔的矢跨比大, 拱脚降低, 减小了拱脚水平推力对基底的力臂, 这样可使大跨与小跨的恒载水平推力对基底产生的弯矩得到平衡(图 1-1-12)。

3. 调整拱上建筑的重力

常常是大跨径用轻质的拱上填料或采用空腹式拱上建筑, 小跨径用重质的拱上填料或采用实腹式拱上建筑, 用增加小跨径拱的恒载重力来增大恒载的水平推力。

4. 采用不同类型的拱跨结构

常常是小跨径用板拱结构, 大跨径用分离式肋拱结构, 以减轻大跨径拱的恒载质量来减小恒载的水平推力。有时, 为了进一步减小大跨径拱的恒载水平推力, 可加大大跨径拱肋的矢高, 而做成中承式肋拱桥梁(图 1-1-3c)。

图 1-1-12 大跨与小跨的拱脚标高

在具体设计时, 也可以将以上几种措施同时采用。如果仍不能达到完全平衡推力的目的, 则需设计成体型不对称的或加大尺寸的桥墩和基础来加以解决。

第二章 上承式拱桥

桥面位于整个桥跨结构上面的拱桥称为上承式拱桥。