

HUST 21世纪高等学校教学用书
SHIJI GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU

· 中英文参照

大跨

度桥梁

——
理论与分析

Long-Span Bridges: Theory and Analysis

胡隽 编著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

HUST 21 世纪高等学校教学用书 (中英文参照)

大跨度桥梁 ——理论与分析

Long-Span Bridges: Theory and Analysis

胡 隽 编著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

根据高等学校道路桥梁与渡河工程专业教学的要求,本书参照国内外大跨度桥梁的相关文献,对大跨度桥梁作了较为系统的介绍,重点介绍了各类大跨度桥梁的计算理论、计算方法、构造原理、规划设计、施工要点与一些大跨度桥梁工程的应用实例,以使读者较好地了解大跨度桥梁的现状及未来发展方向。

本书为高等学校土木工程、道路桥梁与渡河工程专业用教材,也可供铁路、公路和城市建设部门从事桥梁设计、工程研究、施工管理等专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大跨度桥梁——理论与分析/胡隽 编著. —武汉:华中科技大学出版社,2012.10
ISBN 978-7-5609-7350-0

I. 大… II. 胡… III. 长跨桥-桥梁工程 IV. U448.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 182728 号

大跨度桥梁——理论与分析

胡隽 编著

策划编辑:徐正达

责任编辑:姚 幸

封面设计:范翠璇

责任校对:张 琳

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:武汉佳年华科技有限公司

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:24.75

字 数:634千字

版 次:2012年10月第1版第1次印刷

定 价:42.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

随着交通事业的发展和桥梁建造技术的进步,在大江大河上修建大跨度桥梁已十分普遍,这就导致桥梁建设规模越来越大,桥梁结构也越来越复杂。本书介绍了大跨度桥梁的计算理论、计算方法、构造原理、规划设计、施工要点与一些大跨度桥梁工程应用实例。

本书内容分成如下五个方面。

1. 在回顾桥梁分类的基础上,介绍国内、国际桥梁建筑的现状,并展望大跨度桥梁建设的前景。
2. 大跨度桥梁结构计算理论:根据大跨度桥梁结构的非线性特征,介绍相关的非线性分析理论与计算方法,以及目前有限元分析方法在大跨度桥梁结构中的计算应用情况。
3. 大跨度预应力混凝土梁式桥:包括预应力混凝土连续梁、连续刚构等大跨度梁式结构的计算分析与应用情况。
4. 大跨度拱桥:包括钢管混凝土拱桥、桁架拱桥、组合拱桥等的计算分析与应用实例。
5. 大跨度缆索承重桥梁:包括大跨度斜拉桥、悬索桥等柔性缆索承重的桥梁结构的计算方法与工程应用实例。

感谢华中科技大学“道路桥梁与渡河工程专业建设研究”项目的资助!感谢刘志峰博士、王琴硕士等人在书稿整理过程中给予的帮助!

华中科技大学道路桥梁与渡河工程专业 2004 至 2007 级学生在选修“大跨度桥梁”课程时,对讲义(本书书稿)提出了很多参考意见,作者在第二版讲义中对有关内容作了相应调整,现在,终于能成书付印了,在此,对所有提出修改意见的同学表示感谢!

由于时间仓促,加上作者水平所限,对于书中存在的不足与缺陷,恳请读者批评指正。作者联系方式:hujun@mail.hust.edu.cn。

胡 隽

2012 年 9 月于武汉

目 录

中文部分

第1章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 桥梁的分类	(1)
1.2.1 梁式体系	(2)
1.2.2 拱式体系	(2)
1.2.3 刚架桥	(2)
1.2.4 缆索承重桥	(3)
1.2.5 组合体系桥	(3)
1.3 桥梁建筑现状及展望	(3)
1.3.1 桥梁建筑的现状	(3)
1.3.2 现代桥梁建设规模	(10)
1.3.3 桥梁建筑的前景展望	(13)
1.3.4 21世纪世界主要跨海大桥规划概况	(14)
1.3.5 意大利墨西拿海峡大桥设计方案	(18)
1.3.6 超长跨度桥梁的构思和建议方案	(22)
1.3.7 超长跨度桥梁结构体系的构思和建议方案	(25)
1.3.8 21世纪特大跨度桥梁所应具备的主要性能与设计施工水平	(28)
1.3.9 常规悬索桥与斜拉桥可能达到的最大跨度	(29)
第2章 大跨度桥梁结构分析及有限元基本理论	(32)
2.1 大跨度桥梁结构分析概况	(32)
2.2 现有结构分析程序	(34)
2.3 有限元分析的基本概念和计算步骤	(37)
2.3.1 单元分析	(38)
2.3.2 整体分析	(39)
2.3.3 用直接刚度法形成结构刚度矩阵	(40)
2.3.4 支承条件的引入	(41)
2.3.5 非节点荷载的处理	(42)
2.3.6 有限元分析的基本步骤	(43)
2.4 基于最小势能原理的有限元法	(44)
2.4.1 基本理论	(44)
2.4.2 二力杆单元的刚度方程	(45)
2.4.3 自由扭转杆单元的刚度方程	(45)
2.4.4 平面梁单元的刚度方程	(46)
2.5 杆系结构的非线性分析理论	(47)
2.5.1 概述	(47)
2.5.2 几何非线性分析	(48)

2.5.3	材料非线性分析	(49)
2.5.4	非线性方程组的求解	(52)
2.6	稳定计算理论	(55)
2.6.1	概述	(55)
2.6.2	第一类稳定有限元分析	(56)
2.6.3	第二类稳定有限元分析	(57)
2.7	小结	(57)
第3章	桥梁结构的数值分析方法	(58)
3.1	概述	(58)
3.2	结构简化及其数值模拟	(58)
3.2.1	结构建模与离散	(58)
3.2.2	材料和截面特性描述	(60)
3.2.3	边界条件模拟	(60)
3.2.4	荷载模拟	(61)
3.3	梁式桥的结构分析	(61)
3.3.1	恒载内力的计算	(61)
3.3.2	附加荷载内力计算	(63)
3.3.3	活载内力计算	(63)
3.3.4	荷载组合	(64)
3.3.5	预应力束的布置与计算	(66)
3.3.6	结构验算	(66)
3.3.7	计算实例	(67)
3.4	拱桥的结构分析	(72)
3.5	斜拉桥的结构分析	(75)
3.6	悬索桥的结构分析	(82)
3.6.1	悬索桥的受力特征与计算流程	(82)
3.6.2	确定主要构件基本尺寸的计算	(84)
3.6.3	悬索桥恒载构型计算	(84)
3.6.4	悬索桥内力与变形计算	(87)
3.6.5	计算实例	(87)
3.7	小结	(91)
第4章	大跨度预应力混凝土梁式桥关键问题分析	(92)
4.1	结构恒载内力计算	(92)
4.2	悬臂浇筑施工时连续梁的恒载内力计算	(92)
4.3	顶推法施工时连续梁桥的恒载内力计算	(94)
4.4	活载内力计算	(99)
4.5	非简支体系梁桥的内力影响线	(108)
4.6	预应力效应计算的等效荷载法	(110)
4.6.1	预应力次内力的概念	(110)
4.6.2	等效荷载法原理	(111)
4.6.3	等效荷载法的应用	(113)
4.6.4	吻合束的概念	(115)
4.7	混凝土徐变次内力计算的换算弹性模量法	(116)

4.7.1	徐变次内力概念	(116)
4.7.2	徐变系数表达式	(117)
4.7.3	结构混凝土的徐变变形计算	(119)
4.7.4	超静定梁的徐变次内力计算	(122)
4.7.5	逐阶段徐变分析的有限单元法	(126)
4.8	混凝土收缩次内力计算	(127)
4.9	基础沉降次内力计算	(129)
4.10	温度次内力和自应力计算	(130)
4.10.1	基本概念	(130)
4.10.2	基本结构上的温度自应力计算	(132)
4.10.3	连续梁温度次内力计算	(134)
4.11	悬臂施工时挠度和预拱度计算	(137)
4.11.1	一期恒载作用下的挠度计算和预拱度设置	(137)
4.11.2	设置预拱度应考虑的因素	(139)
第5章	大跨度拱桥	(141)
5.1	拱桥简述	(141)
5.1.1	拱桥的发展简史及研究现状	(141)
5.1.2	拱桥的主要类型	(143)
5.2	梁拱组合体系桥梁简述	(145)
5.2.1	梁拱组合式体系桥梁的产生及发展	(145)
5.2.2	梁拱组合体系桥梁分类及特点	(146)
5.2.3	梁拱组合体系桥梁的优点	(148)
5.2.4	梁拱组合桥的发展现状	(148)
5.2.5	梁拱组合体系桥梁存在的问题	(149)
5.3	钢管混凝土在拱桥中的应用	(149)
5.3.1	钢管混凝土结构发展概况	(149)
5.3.2	钢管混凝土结构类型	(149)
5.3.3	钢管混凝土拱桥具有的独特优点	(150)
5.3.4	钢管混凝土的工作机理及工作性能	(151)
5.3.5	钢管混凝土拱桥目前存在的问题及发展前景	(152)
5.4	钢管混凝土的基本计算理论	(152)
5.4.1	概述	(152)
5.4.2	短柱轴心受压的承载力计算	(153)
5.4.3	弹性变形模量的计算	(154)
5.5	钢管混凝土的构造特点	(155)
5.5.1	钢管混凝土拱桥的构造特点	(155)
5.5.2	钢管混凝土拱桥的设计和计算	(156)
5.6	钢管混凝土拱桥桥例	(157)
第6章	大跨度缆索承重桥梁	(160)
6.1	缆索承重桥梁的研究现状	(160)
6.2	缆索承重桥梁的经济性	(165)
6.2.1	概述	(165)
6.2.2	悬索体系	(166)

6.2.3	斜拉体系	(170)
6.2.4	吊拉组合体系	(173)
6.3	非线性有限元方程及解法	(175)
6.3.1	非线性有限元方程的建立	(176)
6.3.2	非线性方程的解法	(177)
6.3.3	收敛准则	(180)
6.4	大跨度缆索承重桥梁的单元分析	(181)
6.4.1	缆索单元	(181)
6.4.2	梁塔单元	(183)
6.4.3	吊杆单元	(187)
6.5	小结	(187)

英文部分

CHAPTER 1	Introduction	(188)
1.1	Summary	(188)
1.2	Classifications of Bridges	(188)
1.2.1	Beam System	(189)
1.2.2	Arch System	(189)
1.2.3	Rigid-Frame Bridge	(190)
1.2.4	Cable Supported Bridge	(190)
1.2.5	Composite Bridge	(191)
1.3	Current Construction Situation and Prospects of Bridges	(192)
1.3.1	Current Construction Situations of Bridges	(192)
1.3.2	Scale of Modern Bridge Construction	(196)
1.3.3	Prospects for Bridge Engineering	(197)
1.3.4	Planning Overview on World's Main Cross-sea Bridges in 21st Century	(199)
1.3.5	Design Plan of Italian Messina Strait Bridge	(202)
1.3.6	Ideas and Proposals of Super Long-Span Bridges	(204)
1.3.7	Ideas and Proposals of Super Long-Span Bridge Structure System	(206)
1.3.8	Main Performance and Level of Design and Construction of Super Long-Span Bridge in 21st Century	(208)
1.3.9	Largest Span Which General Suspension Bridge and Cable-stayed Bridge May Reach	(210)
CHAPTER 2	Structural Analysis of Long-Span Bridges and Basic Theory of Finite Element	(213)
2.1	Overview on Structural Analysis of Long-Span Bridges	(213)
2.2	Analysis Program of Existing Structure	(217)
2.3	Basic Concepts and Calculation Steps of Finite Element Analysis	(222)
2.3.1	Unit Analysis	(223)
2.3.2	Overall Analysis	(224)
2.3.3	Structural Rigidity Matrix Formed by Direct Rigidity Method	(225)

2.3.4	Introduction of Support Conditions	(226)
2.3.5	Treatment of Non-nodal Loads	(228)
2.3.6	Basic Steps of Finite Element Analysis	(229)
2.4	Finite Element Method Based on Principle of Minimum Potential Energy	(230)
2.4.1	Basic Principle	(230)
2.4.2	Rigidity Equation of Two-force Bar Unit	(231)
2.4.3	Stiffness Equations of Free Torsion Bar Elements	(232)
2.4.4	Stiffness Equations of Plane Beam Elements	(233)
2.5	Nonlinear Analysis Theory of Skeletal Structures	(234)
2.5.1	Summary	(234)
2.5.2	Geometric Non-linear Analysis	(235)
2.5.3	Non-linear Analysis of Material	(237)
2.5.4	Solutions of Non-linear Equations	(240)
2.6	Theory of Stability Calculation	(243)
2.6.1	Summary	(243)
2.6.2	First Kind of Finite Element Analysis of Stability	(244)
2.6.3	Second Kind of Finite Element Analysis of Stability	(246)
2.7	Brief Summary	(246)
CHAPTER 3	Numerical Analysis Methods of Bridge Structures	(247)
3.1	Summary	(247)
3.2	Simplification and Numerical Simulation of Structure	(248)
3.2.1	Structural Modeling and Discreteness	(248)
3.2.2	Description of Material and Sectional Characteristic	(249)
3.2.3	Simulation of Boundary Conditions	(250)
3.2.4	Load Simulation	(251)
3.3	Structural Analysis of Beam Bridges	(251)
3.3.1	Calculation of Internal Force of Permanent Load	(252)
3.3.2	Calculation of Additional Load's Internal Forces	(253)
3.3.3	Calculation of Superimposed Load's Internal Force	(254)
3.3.4	Load Combinations	(255)
3.3.5	Layout and Calculation of Pre stressing Tendon	(257)
3.3.6	Structural Checking Computations	(258)
3.3.7	Calculation Examples	(260)
3.4	Structural Analysis of Arch Bridges	(262)
3.5	Structural Analysis of Cable-stayed Bridges	(267)
3.6	Structural Analysis of Suspension Bridges	(274)
3.6.1	Force Characteristics and Calculation Flow of Suspension Bridges	(274)
3.6.2	Calculation of Determining Basic Dimensions of Main Components	(276)
3.6.3	Calculation of Suspension Bridge's Permanent Load Configuration	(276)
3.6.4	Internal Force and Deformation Calculation of Suspension Bridges	(280)
3.6.5	Calculation Example	(281)

3.7	Brief Summary	(283)
CHAPTER 4 Analysis of Key Issues on Long-Span Pre-Stressed Concrete Beam Bridges		
	(284)
4.1	Internal Force Calculation of Structure Under Superimposed Loads	(284)
4.2	Superimposed Loads Internal Force Calculation of Continuous Beam Bridge While Cantilever Casting Constructed	(284)
4.3	Superimposed Loads Internal Force Calculation of Continuous Beam Bridge While Incremental Launching Method Constructed	(285)
4.4	Internal Force Calculation Under Live Loads	(289)
4.5	Internal Force Influence Line of Non-simply Supported Beam Bridges	(297)
4.6	Equivalent Load Method of Calculating Prestressing Effect	(299)
4.6.1	Concept of Pre-Stressed Secondary Internal Force	(299)
4.6.2	Principle of Equivalent Load Method	(299)
4.6.3	Application of Equivalent Load Method	(301)
4.6.4	Concept of Anastomosing Bundle	(302)
4.7	Conversion Elastic Modulus Method on Calculation of Concrete Creep Secondary Internal Force	(303)
4.7.1	Concept of Creep Secondary Internal Force	(303)
4.7.2	Expression of Creep Coefficient	(304)
4.7.3	Calculation of Structural Concrete's Creep Deformation	(306)
4.7.4	Calculation of Statically Determinate Beam's Creep Secondary Internal Force	(309)
4.7.5	Finite Element Method of Creep Analysis by Stage	(313)
4.8	Calculation of Concrete Shrinkage Secondary Internal Force	(314)
4.9	Calculation of Foundation Settlement Secondary Internal Force	(316)
4.10	Calculation of Temperature Secondary Internal Force and Temperature Self-restrained Stress	(317)
4.10.1	Basic Conception	(317)
4.10.2	Calculation of Temperature Self-restrained Stress on Basic Structure	(318)
4.10.3	Calculation of Temperature Secondary Internal Force on Continuous Beam	(320)
4.11	Calculation of Deflection and Camber While Cantilever Constructed Method	(322)
4.11.1	Deflection Calculation and Camber Establishment Under One-time Permanent Loads	(322)
4.11.2	Considered Aspects in Setting Camber	(324)
CHAPTER 5 Long-Span Arch Bridges		
5.1	Brief Description of Arch Bridges	(325)
5.1.1	Development History and Research Status of Arch Bridges	(325)
5.1.2	Main Types of Arch Bridges	(327)

5.2	Brief Description of Beam-arch Composite Bridges	(330)
5.2.1	Production and Development of Beam-arch Composite Bridges	(330)
5.2.2	Classifications and Characteristics of Beam-arch Composite Bridges	(332)
5.2.3	Advantage of Beam-arch Composite Bridge	(335)
5.2.4	Development Status of Beam-arch Composite Bridges	(336)
5.2.5	Existing Problems of Beam-arch Composite Bridge	(336)
5.3	Application of Concrete Filled Steel Tube in Arch Bridges	(337)
5.3.1	Development Overview of Concrete Filled Steel Tubular Structures	(337)
5.3.2	Types of Concrete Filled Steel Tubular Structures	(338)
5.3.3	Unique Advantages of Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge	(338)
5.3.4	Working Mechanism and Working Performance of Concrete Filled Steel Tube	(339)
5.3.5	Present Existing Problem and Development Prospects of Concrete-filled Steel Tube Arch Bridges	(340)
5.4	Basic Calculation Theory of Concrete-filled Steel Tube	(341)
5.4.1	Summary	(341)
5.4.2	Calculation on Bearing Capacity of Short Column Under Axial Compression	(342)
5.4.3	Calculation of Elastic Deformation Modulus	(344)
5.5	Construction Features of Concrete-filled Steel Tube	(345)
5.5.1	Construction Features of Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridges	(345)
5.5.2	Design and Calculation of Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridges	(346)
5.6	Bridge Examples of Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridges	(349)
CHAPTER 6 Long-Span Cable Supported Bridges		(350)
6.1	Current Research Status of Cable Supported Bridges	(350)
6.2	Economical Efficiency of Cable Supported Bridges	(357)
6.2.1	Summary	(357)
6.2.2	Suspended System	(358)
6.2.3	Cable-stayed System	(362)
6.2.4	Combined Cable Stayed Suspension System	(365)
6.3	Non-linear Finite Element Equations and Solutions	(368)
6.3.1	Building of Nonlinear Finite Element Equations	(369)
6.3.2	Solutions to Linear Equations	(371)
6.3.3	Convergence Criterion	(374)
6.4	Element Analysis on Long-Span Cable Supported Bridges	(375)
6.4.1	Cable Elements	(376)
6.4.2	Beam and Tower Elements	(379)
6.4.3	Suspender Elements	(383)
6.5	Brief Summary	(383)
参考文献		(385)

第1章 绪 论

1.1 概 述

桥梁与人类的生活密切相关。没有桥梁,就不会有今天四通八达的公路和铁路把世界如此紧密地联系在一起,人们的生活空间将大受限制。桥梁是人类所建造的最古老、最壮观与最美丽的建筑工程之一,是一个时代的文明与进步的标志。

人类造桥,上至远古的狩猎活动,下至现代的货物运输、旅客来往,主要是出于经济活动的需要。一般而言,桥梁和涵洞的造价一般要占公路总造价的10%~20%,特别是在现代高等级公路及城市高架道路的建设中,桥梁不仅在工程规模上十分巨大,而且也往往是整条线路中的控制工程。

20世纪50年代以来,随着科学技术的进步、工业水平的提高、社会生产力的高速发展,人们对桥梁建筑提出了更高的要求。现代高速公路上迂回交叉的立交桥、高架桥和城市的高架道路,几十公里长的海湾、海峡大桥,新发展的城郊高速铁路桥与轻轨运输高架桥等,这些新型桥梁不但是规模巨大的工程实体,而且犹如长长的地上“彩虹”。纵观世界各国的大城市,常以工程雄伟的大桥作为城市的标志与骄傲。因而桥梁建筑已不单纯作为交通线上重要的工程实体,而且常作为一种空间艺术结构物存在于社会之中。

对桥梁的定义,我国最权威的《辞海》和《现代汉语词典》中是这样解释的:桥是架在水上或空中以便通行的建筑物。英国最权威的《牛津现代高级英语词典》的定义为:桥是用木、石、砖、钢、混凝土等做成的,让道路跨越河流、运河、铁路等的结构物。美国最权威的《韦氏大词典》的解释则是:“桥梁是:(1)让大小道路跨越洼地或障碍的结构物;(2)衔接或过渡的时间、空间或手段。”美国《韦氏大词典》的解释略胜一筹的是把“桥梁”一词延伸到社会生活领域的含义也包括了进去,第(2)条实际上是包含了第(1)条含义在内的对“桥梁”一词的广义解释。其实,关于“桥梁”一词更为简洁、准确与科学的定义应该是:桥梁是跨越障碍的通道。

1.2 桥梁的分类

桥梁的分类方式很多,如:按跨径大小可分为特大桥、大桥、中桥、小桥;按桥面位置可分为上承式桥、中承式桥、下承式桥;按用途可分为公路桥、铁路桥、公路铁路两用桥、农桥、人行桥、运水桥及其他专用桥梁;按结构体系可分为梁式桥、拱桥、刚架桥、缆索承重体系、组合体体系;按跨越方式可分为固定式桥梁、开启桥、浮桥、漫水桥;按施工方法分为整体施工桥梁(上部结构一次浇筑而成)、节段施工桥梁(上部结构分节段组拼而成);按建筑材料分为木桥、钢桥、圬工桥(包括砖、石、混凝土桥)、钢筋混凝土桥和预应力钢筋混凝土桥。本书现仅详细介绍按跨径大小和按结构体系分类的情况,其他的分类情况请读者参阅相关的“桥梁工程”的资料。

我国公路工程技术标准《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)中有关桥梁跨径分类内容如表1.2-1所示。

表1.2-1中的分类只能理解为一种行业管理的分类,没有反映桥梁工程设计、施工的复杂性。国际上一般认为单跨跨径小于150m属于中小桥梁,大于150m即称为大桥。而能称为特大桥梁的则只与桥型有关,一般而言,国际特大跨度桥梁分类如表1.2-2所示。

表 1.2-1 我国桥梁跨径分类表

Table 1.2-1 Classification chart of bridge span

桥梁分类	多孔跨径总长 L/m	单孔跨径 L_k/m
特大桥	$L > 1\ 000$	$L_k > 150$
大桥	$100 \leq L \leq 1\ 000$	$40 \leq L_k \leq 150$
中桥	$30 < L < 100$	$20 \leq L_k < 40$
小桥	$8 \leq L \leq 30$	$5 \leq L_k < 20$
涵洞	—	$L_k < 5$

表 1.2-2 国际特大跨度桥梁分类表

Table 1.2-2 Chart of classification of super major bridge

桥型	最小单孔主跨径 L_k/m
悬索桥	1 000
斜拉桥	500
钢拱桥	500
钢筋混凝土拱桥	300
梁式桥	200

桥梁按结构体系划分时,有梁式桥、拱桥、刚架桥、缆索承重桥(即悬索桥、斜拉桥)等四种基本体系,其他还有几种由基本体系组合而成的组合体系等。不同体系的桥梁受力特点不同:梁式桥——主梁受弯;拱桥——主拱受压;刚架桥——构件受压弯;缆索承重桥——缆索受拉;组合体系桥——几种受力的组合。

1.2.1 梁式体系

梁式体系是古老的结构体系。梁作为承重结构,是以它的抗弯能力来承受荷载的。梁分简支梁、悬臂梁、固端梁和连续梁等。悬臂梁、固端梁和连续梁都是利用支座上的卸载弯矩减少跨中弯矩,使梁跨内的内力分配更合理。与简支梁相比,悬臂梁、固端梁和连续梁以同等抗弯能力的构件断面就可建成更大跨度的桥梁。预应力混凝土梁式体系的桥梁应用甚广,简支梁的最大跨度已达 76 m,连续梁的最大跨度已近 200 m。

1.2.2 拱式体系

拱式体系的主要承重结构是拱肋(或拱箱),以承压为主,可采用抗压能力强的圬工材料(如石、混凝土与钢筋混凝土等)来修建。拱分单铰拱、双铰拱、三铰拱和无铰拱。拱是有推力的结构,对地基要求较高,一般常建于地基良好的地区。混凝土拱桥因铰的构造不易制做,故一般采用无铰拱体系。无铰拱结构的外部增加超静定次数,将引起更大的附加内力。为了获得结构合理的受力状态,在拱桥设计中,必须寻求合理的拱轴线形式。20 世纪 50 年代后,一方面因预应力混凝土桥梁的发展,另一方面因拱桥施工费工费料费时而失去了竞争能力;60 年代后,拱桥采用了悬臂施工法,遂又获得了新的发展,最大跨度已达 420 m。

1.2.3 刚架桥

刚架桥是介于梁与拱之间的一种结构体系,它是由受弯的上部梁(或板)结构与承压的下部柱(或墩)整体结合在一起的结构。由于梁与柱的刚性连接,梁因柱的抗弯刚度而得到卸

载,整个体系是压弯结构,也是有推力的结构。刚架分直腿刚架与斜腿刚架。刚架桥的桥下净空比拱桥大,在同样净空要求下可修建较小的跨径。刚架桥施工较复杂,一般用于跨径不大的城市或公路的高架桥和立交桥。近年来,采用预应力混凝土结构和悬臂施工法,在城市跨河桥上也是一个竞争方案,最大跨度大于 300 m。

1.2.4 缆索承重桥

缆索承重桥是以缆索为主要承重构件的桥梁结构,分为斜拉桥和悬索桥。

斜拉桥是由承压的塔、受拉的索与承弯的梁体组合起来的一种结构体系(故有学者将其归类于组合体系)。20 世纪 50 年代初,联邦德国首先修建了钢斜拉桥,梁体用拉索多点拉住,好似多跨弹性支承连续梁,使梁体内弯矩减小、降低了建筑高度;又因栓焊连接与正交异性板的箱形断面构造的应用,结构可充分利用材料的受力特性,从而减轻了结构重量,节省了材料。这种体系因而发展很快,各国竞相采用,最大跨度已达 890 m。预应力混凝土斜拉桥是在近 40 年里发展起来的,至今其最大跨度的结构体系已达 530 m。

悬索桥又称吊桥,是一种古老的桥型。很早以前人们就利用藤条和竹子等材料来制作悬索桥,用以解决交通问题。至今我国四川省灌县的安澜竹索桥仍保留着原始的风貌。随着社会的发展,冶炼技术的进步,抗拉强度较高的铁链开始被用来作为悬索桥的缆索,我国四川省大渡河上九条铁链组成的泸定桥($L=100\text{ m}$)建于 1706 年,是最早用铁链建成的悬索桥。

悬索桥被公认为特大跨度桥梁的主要形式,一般认为其经济跨径为 500 m 以上,最大跨度可达 4 000 m 以上。

现代悬索桥通常由桥塔、锚碇、主缆、吊索、加劲梁及索鞍等主要部分组成。

1.2.5 组合体系桥

1. T 形刚架和连续刚构

T 形刚架和连续刚构,都是由梁和刚架相结合的体系。它们是预应力混凝土结构采用悬臂施工法而发展起来的一种新体系。结构的上部梁在墩上向两边采用平衡悬臂施工,首先形成一个 T 字形的悬臂结构。相邻的两个 T 形悬臂在跨中可用剪力铰或跨径较小的挂梁连成一体,即称为带铰或带挂梁的 T 形刚构。如结构在跨中采用预应力筋和现浇混凝土区段连成整体的,即为连续刚构。它们又可派生出不同的组合形式,如采用双薄壁墩或边墩上采用连续梁组合等。不管体系如何组合,它们的上部梁主要是承弯构件。由于采用悬臂施工法,施工机具简便,施工快速,又因结构在悬臂施工时的受力状态与使用状态下的受力状态基本一致,所以省料、省工、省时,这就使结构的应用范围得到了迅猛发展。据统计,在预应力混凝土桥梁中,这类结构体系(包括连续梁)约占 50%。

2. 梁、拱组合体系

梁、拱组合体系中有系杆拱、桁架拱、多跨拱梁结构等。它们利用梁的受弯与拱的承压特点组成联合结构。在预应力混凝土结构中,因梁体内可储备巨大的压力来承受拱的水平推力,使这类结构既具有拱的特点,而又是非推力结构,对地基要求不高。这种结构施工比较复杂,一般用于城市跨河桥上,最大跨度也已突破 150 m。

1.3 桥梁建筑现状及展望

1.3.1 桥梁建筑的现状

我国文化悠久,是世界文明古国之一。就桥梁而言,我们的祖先在世界桥梁建筑史上写下

了不少光辉灿烂的篇章。我国山多河多,自然条件错综复杂,古代桥梁不但数量惊人,而且类型也丰富多彩,几乎包含了所有近代桥梁中最主要的形式。

根据史料记载,我国最早的桥梁是建于距今3 000年左右的周文王时期,那时就在渭河上架设过大型的浮桥。汉唐以后,浮桥的运用日趋普遍。在东汉光武帝时,在现在宜昌和宜都之间,出现了架设在长江上的第一座浮桥,之后,往往因战事等的需要,在黄河、长江上曾架设过浮桥不下数十余次。

举世闻名的河北省赵县的赵州桥(又称安济桥)是我国古代石拱桥的杰出代表。该桥由李春于公元605年左右建造,是一座空腹式圆弧形敞肩石拱桥,净跨37.02 m,宽9 m,拱矢高7.23 m,在拱圈两肩各设有两个跨度不等的腹拱,这样既能减轻桥身自重、节省材料,又便于排洪,美观大方。赵州桥的设计构思和建造工艺的精巧程度的确是很了不起的。

纵观国外桥梁建筑的发展史,早在罗马时代,欧洲的石拱桥艺术已在世界桥梁史上谱写过光辉的篇章。然而,促进和发展现代桥梁有深远影响的是在继意大利文艺复兴后在英国、法国和其他西欧国家冲破封建贵族制度而开始进入的资本主义时代。18世纪的工业革命促进生产力大幅度增长,推动了工业的发达,从而也促进了桥梁建筑技术方面的空前发展。

1. 预应力混凝土梁式桥

钢筋混凝土梁式桥因受到抗裂性能、刚度和承载能力的限制,发展缓慢。1940年,英国建成的纽华特洛桥,跨径为77.02 m(连续梁桥),仍是目前同类桥梁中跨径最大的桥梁之一。

预应力混凝土技术的出现与应用克服了钢筋混凝土的缺陷,开创了混凝土桥梁的新纪元;与预应力技术配套的悬臂施工法和顶推施工法的创立,使预应力混凝土桥梁得到迅速发展。预应力技术真正用于桥梁工程是在第二次世界大战后的1948年。法国利用预应力技术通过先预制梁段,再张拉预应力筋,使各梁段结合成整体的方法修复了马恩河上的五座桥梁(跨径约为74 m的带三角形矮腿的刚架桥)。原西德最早利用预应力技术,把悬臂施工法成功地用于预应力混凝土桥梁的施工,特别是在T形刚构桥和连续刚架桥施工中的应用,克服了大跨度桥梁施工的难题。原西德在1952年成功地建成了莱茵河上的沃伦姆斯桥(跨度为101.65 m + 114.2 m + 104.2 m,具有跨中剪力铰的T形刚构桥)后,该技术就迅速传播至全世界。1965年,原西德又在莱茵河上建成跨度208 m的本道尔夫桥(连续刚构桥),使悬臂技术更臻完善,同时预应力混凝土桥梁第一次主跨超过了200 m。20世纪70年代,预应力混凝土桥梁得到迅速发展:1974年,原南斯拉夫在多瑙河上建成跨度210 m的连续梁桥;1976年,日本建成240 m跨中带铰的T形刚构桥(浜名大桥);1977年,奥地利建成跨度76 m的简支梁桥(阿尔姆桥);1979年,巴拉圭建成270 m跨中带铰的T形刚构桥(亚松森桥)。阿尔姆桥和亚松森桥分别创造了同类桥型最大跨度的纪录。20世纪80年代,挪威建成了跨度212 m的连续梁桥(赛比恩桥,1980年);澳大利亚建成了跨度260 m的连续刚构桥(门道桥,1986年)。20世纪90年代以后,预应力混凝土梁桥得到更快的发展:1991年建成的葡萄牙坡托桥(主跨250 m)是世界上最大跨度的铁路预应力混凝土梁桥;1998年挪威建成的斯托尔马桥的主跨为301 m(见图1.3-1),拉夫特桥的主跨为298 m,分别是世界第一和第二跨度的连续刚构桥。据资料统计,世界已建成跨度大于240 m的预应力混凝土梁桥有17座,中国占7座。1997年建成的虎门大桥辅航道桥的主跨为270 m,是当时同类桥型的最大跨度。

国外在发展混凝土梁桥的同时,也建造了不少钢梁桥。到目前为止,主跨超过500 m的悬臂钢桁梁桥有4座。最早的一座是苏格兰爱丁堡附近著名的福斯湾桥。该桥建于1882—



图 1.3-1 斯托尔马桥

Figure 1.3-1 Stolmasundet Bridge

1890年,两主跨均为521 m。1900—1917年又建成了一座更大跨度的魁北克公铁两用桥,主跨549 m,是目前世界上最大跨度的悬臂钢桁梁桥(见图1.3-2)。1960—1974年,又建成了两座大的悬臂钢桁梁桥:一座是日本大阪的港大桥(主跨510 m,1974年),另一座是美国切斯特的科莫多湾桥(主跨501 m,1974年)。此外,最大跨度的连续钢桁梁桥是1991年建成的主跨为400 m的日本生月大桥,最大跨度的钢箱梁桥是1974年建成的主跨为300 m的巴西康斯塔席瓦尔桥,最大简支钢桁梁桥是1973年建成的主跨为227 m的美国切斯特桥。

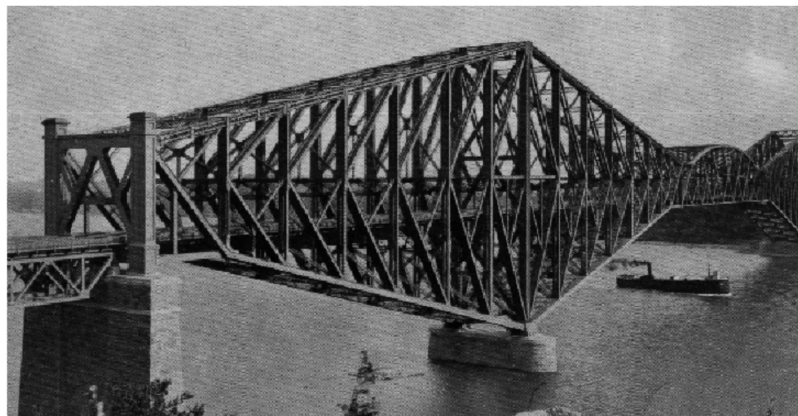


图 1.3-2 魁北克公铁两用桥

Figure 1.3-2 Highway-railway Bridge-Pont de Quebec

2. 拱桥

1855年,法国建造了第一批用水泥砂浆砌筑的石拱桥。随后,在1870年,德国开始建造用混凝土作为主要受力构件的混凝土拱桥。20世纪初,法国建成跨度为139.80 m的混凝土箱形拱桥。从19世纪末到20世纪50年代,钢筋混凝土拱桥在跨越能力、结构体系和主拱圈的截面形式上都得到了很大发展。法国于1930年建成3孔186 m拱桥,瑞典在1943年建成跨径264 m的桑独桥,并保持了20年最大跨度的纪录。直到1964年,澳大利亚建成了主跨为305 m的悉尼港柏拉马塔河桥,使混凝土拱桥的跨度首次突破了300 m。鉴于修建钢筋混凝土拱桥时支架、模板的复杂性,耗费大量的人力物力,国外在以后的十多年中已较少采用。1980年,南斯拉夫用无支架悬臂施工法建成了跨度为390 m的克尔克大桥(见图1.3-3),该桥的建

成,标志着国外混凝土拱桥的技术已达到相当高的水平,其跨径纪录一直保持到1997年,才被我国的万州长江公路大桥(主跨420 m)打破。



图 1.3-3 克尔克大桥
Figure 1.3-3 KRK Bridge

在国外大跨度拱桥中,钢拱桥居多。据资料统计,目前世界上跨度超过300 m钢拱桥有15座,其中主跨超过500 m的有3座。早在1932年修建的澳大利亚悉尼港拱桥,跨度503 m(见图1.3-4),至今仍为世界上跨度最大的公铁两用钢拱桥。1977年修建的美国新河峡公路拱桥,跨度为518.2 m,该桥桥面在新河峡谷水面以上267 m,是世界上通航净空最高者之一(见图1.3-5),它以结构轻、跨度大著称于世,其跨径纪录已被我国的上海卢浦大桥(主跨550 m)打破。



图 1.3-4 悉尼港拱桥
Figure 1.3-4 Sydney Harbour Arch Bridge

3. 斜拉桥

世界上第一座具有钢筋混凝土主梁的斜拉桥是1925年在西班牙修建跨越坦波尔河的水道桥(主跨60.35 m)。直至1962年委内瑞拉马拉开波湖公路大桥的建成,标志着现代预应力混凝土斜拉桥的开始。该桥主桥跨径为160 m + 5 × 235 m + 160 m,总长达9 km。直到1977年法国建成的主跨为320 m的普罗东纳桥,使混凝土斜拉桥主跨第一次突破300 m。据资料统计,世界上已建成的预应力混凝土斜拉桥100余座,遍布20多个国家,其中跨度大于400 m