

高职高专道路桥梁工程技术专业规划教材

桥梁工程技术

主编 张 辉

主审 王 彤

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 张 辉 2006

图书在版编目 (CIP) 数据

桥梁工程技术 / 张辉主编 .— 沈阳 : 东北大学出版社, 2006.8

(高职高专道路桥梁工程技术专业规划教材)

ISBN 7-81102-297-4

I. 桥... II. ①张... III. 桥梁工程—教材 IV. U44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 091088 号

出 版 者 : 东北大学出版社

地址 : 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编 : 110004

电话 : 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真 : 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail : neuph @ neupress.com

http : // www.neupress.com

印 刷 者 : 沈阳市第六印刷厂

发 行 者 : 东北大学出版社

幅面尺寸 : 184mm × 260mm

印 张 : 15.5

字 数 : 400 千字

出版时间 : 2006 年 8 月第 1 版

印刷时间 : 2006 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑 : 张德喜 刘宗玉

责任校对 : 秘 楠

封面设计 : 唐敏智

责任出版 : 秦 力

丛书定价 : 348.00 元 (本册定价 : 35.00 元)

序 言

辽宁省交通高等专科学校道路桥梁工程技术专业，已有 55 年的办学历史，具有深厚的专业积淀，培养了大批道路桥梁工程技术专业人才。

为了进一步适应公路交通行业发展的需求，我校在广泛深入调研的基础上，从 1999 年开始，进行了面向施工一线的教育教学改革，将道路桥梁工程技术专业特色定位为“精施工、懂设计、会管理”。2002 年，该专业被教育部确定为高等职业教育教学改革试点专业，同年，辽宁省交通厅以教学科研项目立项，资助该专业深入开展教育教学改革和建设研究，有力地推动了专业人才培养水平的提高。2005 年，该专业被辽宁省教育厅确定为示范专业。

高等职业教育专业教学改革和建设，核心是课程改革和建设。课程改革和建设的重点是教学内容的改革和建设，教材建设是最重要的方面，要充分体现应用性、先进性和实践性，兼顾现实应用能力与技术跟踪能力的培养，使教学内容与一线实际和今后发展接轨。正是出于上述考虑，我校道桥专业的教师及有关工程技术专家编写出了这套专业规划教材。

这套规划教材的出版是这一课程改革和建设思想探索与实践的成果，是全体专业教师、工程技术专家、一线技术人员共同劳动的结晶，同时也为今后进行更深入的课程改革和建设，打下了很好的基础。

这套规划教材适用于道路桥梁工程技术专业，也可供相关专业选用，希望这套书能被多所院校所采用，供大家借鉴，并得以推广，使其发挥更大作用。

辽宁省交通高等专科学校校长



2006 年 5 月

前 言

本教材是根据道路桥梁工程技术专业培养目标和教学大纲编写的。在教材编写过程中以交通部最新颁布的《公路工程技术标准》(JTJ B01—2003)《公路桥涵设计通用规范》(JTJ D60—2004)《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ D62—2004)和《公路圬工桥涵设计规范》(JTJ D61—2005)(本书简称《桥规》)为依据,并以“理论上够用为度,注重实践”为原则,编者在认真学习和领会新规范的基础之上编写出本教材。

本书共有四篇。在第一篇总论内主要介绍国内外桥梁建筑的发展概况、桥梁的组成部分和桥梁的作用。在桥梁的总体规划和设计要点中扼要阐述了桥梁设计的基本要求、桥梁设计的基本资料和设计内容,以期学生在深入学习各章内容前对桥梁设计工作的全貌有一概括的了解。

第二篇为钢筋混凝土和预应力混凝土梁式桥。在第4章钢筋混凝土和预应力混凝土梁式桥构造中,从截面形式和静力体系上,介绍各类梁式桥的特点及其适用条件。并较详细地论述了公路上最常用中小跨径简支梁桥(以装配式桥梁为主)的构造。在以下各章中详细地论述简支梁桥(以装配式桥梁为主)的设计和作用效应计算。第5章简支梁桥的计算是讲授的重点之一。其中荷载横向分布原理是公路桥梁设计的主要计算理论,为了保持系统性起见,本书将常用的各种计算方法归并在一起介绍。第6章梁式桥的支座部分,重点阐明了支座的作用、各类支座的构造及其适用场合。第7章为其他体系桥梁。鉴于桥梁建筑中新体系、新工艺的不断发展,从事公路与桥梁工程的技术人员除了要能解决常用中、小型桥梁结构的设计、施工问题外,目前在生产中也常常面临需要处理其他较复杂体系桥梁的任务。为此,在本章中着重对我国已较多采用的连续梁桥、T形刚构桥、连续刚构桥、斜拉桥和悬索桥分别从结构类型、构造特点和桥梁结构等方面作了概要说明。

第三篇讲述圬工和钢筋混凝土拱桥,这是我国公路桥梁广泛采用的桥型。在第9章拱桥构造中,除了介绍拱桥的一般组成部分外,重点放在空腹式拱桥和箱形截面拱桥的构造和结构细节上,对其他类型拱桥(如桁架拱桥、刚架拱桥、组合体系拱桥等)只介绍一些构造特点。第10章中重点阐明拱桥主要尺寸拟定和拱轴线形选择等。第11章拱桥的计算是本篇学习的重点,其中详细介绍了等截面悬链线拱的设计与计算。

第四篇桥梁墩台中阐述墩台在基础以上部分结构的构造形式和设计计算方法。在取材方面,除了常用的重力式墩台以外,还介绍了公路桥梁上日益推广使用的各类轻型墩台的构造形式和柔性墩的计算要点。

本书第一篇、第三篇由张辉编写;第二篇中的第4章和第四篇由王海兴编写;第二篇第5、6、7章及附录I、附录II、附录III由于忠涛编写。全书由张辉主编,王彤教授主审。

由于编者水平所限,编写时间也较紧迫,谬误之处一定不少,敬请读者批评指正。

编 者
2006年2月

目 录

第一篇 总 论

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 第 1 章 概 论 | 1 |
| 1.1 桥梁在交通事业中的地位和国内外桥梁发展概况 | 1 |
| 1.2 桥梁的组成与分类..... | 10 |
| 第 2 章 桥梁的总体规划和设计要点 | 17 |
| 2.1 桥梁总体规划原则和基本设计资料..... | 17 |
| 2.2 桥梁纵、横断面设计和平面布置 | 19 |
| 第 3 章 桥梁的作用 | 23 |
| 3.1 规范中有关作用的规定..... | 23 |
| 3.2 效应组合..... | 31 |

第二篇 钢筋混凝土和预应力混凝土梁式桥

| | |
|--------------------------------------|------------|
| 第 4 章 钢筋混凝土和预应力混凝土梁式桥构造 | 34 |
| 4.1 梁式桥的主要类型及适用情况..... | 34 |
| 4.2 板桥的设计与构造..... | 36 |
| 4.3 梁桥的设计与构造..... | 43 |
| 4.4 桥面构造..... | 59 |
| 第 5 章 简支梁桥的计算 | 68 |
| 5.1 行车道板的计算..... | 68 |
| 5.2 荷载横向分布计算..... | 75 |
| 5.3 主梁内力计算..... | 98 |
| 5.4 横隔梁内力计算 | 101 |
| 5.5 挠度的计算 | 105 |
| 第 6 章 梁式桥的支座 | 107 |
| 6.1 概 述 | 107 |
| 6.2 支座的类型和构造 | 107 |

| | |
|--------------------------|------------|
| 6.3 支座的计算 | 113 |
| 第7章 其他体系桥梁简介..... | 118 |
| 7.1 悬臂梁桥 | 118 |
| 7.2 连续梁桥 | 119 |
| 7.3 T形刚构桥 | 120 |
| 7.4 连续刚构桥 | 121 |
| 7.5 斜拉桥 | 123 |
| 7.6 悬索桥 | 127 |

第三篇 圬工和钢筋混凝土拱桥

| | |
|-----------------------------------|------------|
| 第8章 圬工和钢筋混凝土拱桥概述..... | 130 |
| 8.1 拱桥的基本特点及其适用范围 | 130 |
| 8.2 拱桥的组成及主要类型 | 131 |
| 第9章 拱桥的构造..... | 135 |
| 9.1 主拱圈的构造 | 135 |
| 9.2 拱上建筑的构造 | 141 |
| 9.3 拱桥的其他细部构造 | 144 |
| 第10章 拱桥主要尺寸拟定和拱轴线形选择 | 148 |
| 10.1 拱桥的总体布置..... | 148 |
| 10.2 拱轴线形的选择和拱上建筑的布置..... | 150 |
| 10.3 拱圈截面变化规律和截面尺寸的拟定..... | 151 |
| 第11章 拱桥设计与计算 | 155 |
| 11.1 悬链线拱的几何性质与弹性中心..... | 155 |
| 11.2 结构重力作用下拱的作用效应计算..... | 161 |
| 11.3 活载作用下拱的效应计算..... | 164 |
| 11.4 裸拱内力计算..... | 167 |
| 11.5 温度变化、混凝土收缩和拱脚变位的效应计算 | 167 |
| 11.6 拱圈强度及拱的“整体－稳定”验算..... | 171 |

第四篇 桥梁墩台

| | |
|---------------------------|------------|
| 第12章 桥梁墩台的构造 | 176 |
| 12.1 概 述..... | 176 |
| 12.2 桥 墩..... | 177 |

| | |
|--|------------|
| 12.3 桥 台..... | 185 |
| 第 13 章 桥墩设计与计算 | 192 |
| 13.1 作用及其组合..... | 192 |
| 13.2 重力式桥墩计算..... | 197 |
| 13.3 桩柱式桥墩的计算要点..... | 203 |
| 第 14 章 桥台计算 | 207 |
| 14.1 重力式桥台的计算..... | 207 |
| 14.2 梁桥轻型桥台的计算特点..... | 209 |
| 附录 I 铰接板荷载分布影响线竖标表..... | 213 |
| 附录 II 比拟正交异性板法..... | 224 |
| 附录 III G-M 法 K_0, K_1, μ_0, μ_1 值的计算用图 | 234 |
| 参考文献..... | 238 |

第一篇 总论

第1章 概论

1.1 桥梁在交通事业中的地位和国内外桥梁发展概况

1.1.1 桥梁在交通事业中的地位

大力发展交通运输事业,建立四通八达的现代化交通运输网,对于发展国民经济、加强全国各族人民的团结、促进文化交流和巩固国防等方面,都具有非常重要的作用。在公路、铁路、城市和农村道路以及水利建设中,为了跨越各种障碍(如江河、沟谷或其他线路等),必须修建各种类型的桥梁与涵洞,因此桥涵是陆路交通中的重要组成部分,而且往往是保证全线早日通车的关键。在经济上,桥梁和涵洞的造价一般说来平均占公路总造价的10%~20%。在国防上,桥梁是交通运输的咽喉,在需要高度快速、机动的现代战争中具有非常重要的地位。此外,为了保证已有公路、铁路等的正常运营,桥梁的养护与维修工作也十分重要。

20世纪80年代后,我国实行改革开放政策以来,由于科学技术的进步,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。现代高等级公路上迂回交叉的立交桥、城市快速干道上的高架桥、几十公里长的海湾和海峡桥、高速铁路桥以及城市轻轨运输高架桥等,不但是规模巨大的工程实体,而且犹如一条条地上“彩虹”,将城市装扮得格外美丽。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。因而桥梁建筑已不再单纯作为各种道路的一部分,而且常作为一种空间艺术结构物存在于社会之中。

我国幅员辽阔,大小山脉和江河湖泊纵横全国,海湾、岛屿众多。实行改革开放以来,国民经济飞速发展,社会主义工业、农业、国防和科学技术现代化正在逐步实现,全国高速公路、高速铁路、城市交通网络的建设方兴未艾。作为咽喉工程的桥梁建设的发展则突飞猛进。至20世纪末,我国各类现代化桥梁的建筑与设计技术已经达到或超过世界先进水平。而随着经济的进一步发展和人民生活水平的进一步提高,交通运输事业向着快速、高效、舒适、安全的方向发展,因此,我国广大桥梁工程技术与科学工作者将不断面临着设计和建造各类桥梁的光荣而艰巨的任务。

1.1.2 我国桥梁建筑的成就

我国文化悠久,是世界上文明发达最早的国家之一。我国有许多科学技术“往往远远超过同时代的欧洲,特别是15世纪以前,更是如此”(英国人李约瑟在他所著《中国科学技术

史》序言中语)。其中就桥梁来说,我们的祖先也在世界桥梁建筑史上写下了不少光辉灿烂的篇章。我国山川河流众多,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的最主要形式。

根据史料记载,在距今约三千年的周文王时,我国就已在宽阔的渭河上架设过大型浮桥。鉴于浮桥的架设具有简便快速的特点,常被用于军事。汉唐以后,浮桥的运用日益普遍。现代桥梁中广为修建的多孔桩柱式桥梁,据历史考证,我国在春秋战国时期(公元前332年)已遍于黄河流域和其他地区,不同的只是古桥多以木桩为墩柱,上置木梁、石梁,而今则都用钢筋混凝土代之。

近代的大跨径悬索桥和斜拉桥也是由古代的藤、竹悬索桥发展而来的。几乎在大部分有关桥梁的历史书上,都承认我国是最早有悬索桥的国家,迄今至少有三千年左右的历史。而西方在16世纪才开始建造铁链悬索桥,比我国晚了上千年。至今尚保留下来的古代悬索桥有四川泸定县的大渡河铁索桥(1706年),以及灌县的安澜竹索桥(1803年)等。泸定铁索桥跨长约100m,宽约2.8m,由13条锚固于两岸的铁链组成,1935年中国工农红军长征途中曾强渡此桥,因此更加闻名。安澜桥是世界上最著名的竹索桥,全长340m之多,分8孔,最大跨径约61m,全桥由细竹篾编成粗0.167m的24根竹索组成,其中桥面索和扶栏索各半。

天然石料是大自然赋予人类最早的、取之不尽用之不竭的建筑材料。一旦人们创造了强有力的加工工具,石梁、石柱、石拱等结构无疑就普遍发展起来;又鉴于石料的耐久性,因此几千年来修建较多的古代桥梁要推石桥居首。我国古代桥工巨匠的辛勤劳动曾对桥梁建筑作出了卓越贡献。



图 1-1 赵州桥

在秦汉时期,我国已广泛修建石梁桥。世界上现在尚保存着的最长、工程最艰巨的石梁桥,就是我国于1053—1059年在福建泉州建造的万安桥,也称洛阳桥。此桥长达800m之多,共47孔,位于“波涛汹涌,水深不可址”的海口江面上。此桥以磐石铺遍桥位江底,是近代筏形基础的开端,并且,独巨匠心地用养殖海生牡蛎的方法胶固桥基使成整体,此亦是世界上绝无仅有的造桥方法。近千年前就能在这种复杂的水文条件下建成如此长桥,实为中外桥梁史上一次勇敢的突破。

1240年建造的福建漳州虎渡桥,总长约335m,某些石梁长达23.7m,沿宽度用三根石梁组成,每根宽1.7m,高1.9m,自重力达2000kN,该桥一直保存至今。据史料记载,这些巨大石梁是利用潮水涨落浮运架设的,足见我国古代加工和安装桥梁的技术何等高超。富有民族风格的古代石拱桥技术,结构的精心巧思,以及艺术造型的丰富多姿,长期以来一直

驰名中外。举世闻名的河北省赵县的赵州桥(又称安济桥),就是我国古代石拱桥的杰出代表(图 1-1)。该桥在隋大业初年(公元 605 年左右)由李春所创建,是一座空腹式的圆弧形石拱桥,净跨 37.02m,宽 9m,拱矢高度 7.23m。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、增加美观。赵州桥的设计构思和工艺的精巧,不仅在我国古代桥梁中首屈一指,据对世界桥梁的考证,像这样的敞肩拱桥,欧洲到 19 世纪中叶才出现,比我国晚了 1200 多年。赵州桥的雕刻艺术,包括栏板、望柱和锁口石等,其上狮象龙兽形态逼真,琢工得精致秀丽,不愧为文物宝库中的艺术珍品。

除赵州桥外,还有其他著名的石拱桥,如北京永定河上的卢沟桥,颐和园内的玉带桥和十七孔桥,苏州的枫桥等。我国石拱桥的建造技术在明朝时曾流传到日本等国,促进了世界各国人民的文化交流,并增进了友谊。

在我国古桥建筑中尚值得一提的是广东潮安县横跨韩江的湘子桥(又名广济桥)。此桥始建于公元 1169 年,全长 517.95m,总共 20 墩 19 孔,上部结构有石拱、木梁、石梁等多种形式。设置浮桥的目的,一方面适应大型商船和上游木排的通过,另一方面也避免了过多的桥墩阻塞河道,以致加剧桥基冲刷而造成水害。这座世界上最早的开合式桥,论石桥之长、石墩之大、桥型之多以及施工条件之困难、工程历时之久,都是古代建桥史上所罕见的。此桥自清代修复后,至今约二百年,历经天灾人祸,始终安如磐石,屹立于惊涛骇浪之中。新中国成立后又进行了改建和扩建,使历史上屡亟屡修屡法的这座古桥焕发了青春。

然而,封建制度的长期统治,大大束缚了生产力的发展。1840 年鸦片战争后,帝国主义列强的侵入和腐朽的社会制度,更使广大劳动人民处于水深火热之中,人民群众的无穷智慧被压抑和摧残。在桥梁建筑方面,大部分是外国投资、洋人设计、外商承包。解放前,我国交通事业落后,可供通车的公路里程很少,质量低劣。公路桥梁绝大多数为木桥,年久失修,破烂不堪。纵使当时我国自己也修过一些公路钢桁梁桥、悬索桥和钢筋混凝土拱桥等,但与当时世界上桥梁建筑的技术水平相比,处于很落后的状态。

新中国成立后,我国人民以大无畏的英雄气概,迅速地医治了战争创伤,恢复了经济。我国建国初期修复并加固了大量旧桥,随后在第一、二个五年计划期间,在新建的铁路、公路上修建了不少重要桥梁,并取得了迅速发展。20 世纪 50 年代至 60 年代,修订了桥梁设计规程,编制了桥梁设计标准和桥梁设计计算手册,培养并形成了一支强大的桥梁工程设计与施工技术队伍。随着社会主义建设的向前发展,桥梁建筑同其他各条战线一样,也出现了突飞猛进的局面。

1957 年,第一座长江大桥——武汉长江大桥——的胜利建成,既结束了我国万里长江无桥的历史,又标志着我国修建大跨度钢桥的现代化桥梁技术水平提高到新的起点。大桥的正桥为两联 $3 \times 128\text{m}$ 的连续钢桁梁,下层双线铁路,上层公路桥面宽 18m,两侧各设 2.25m 人行道,包括引桥在内全桥总长 1670.4m。1969 年又胜利建成了举世瞩目的南京长江大桥(图 1-2)。这是我国自行设计、制造、施工,并使用国产高强钢材的现代化大型桥梁。正桥除北岸第一孔为 128m 简支钢桁梁外,其余 3 联 9 孔为每联 $3 \times 160\text{m}$ 的连续钢桁梁。上层为公路桥,下层为双线铁路桥。包括引桥在内,铁路桥梁全长 6772m,公路桥梁全长 4589m。桥址处水深流急,河床地质极为复杂,大桥桥墩基础的施工非常困难。南京长江大桥的建成,显示出我国的钢桥建设已接近了世界先进水平,是我国桥梁史上又一个重要标志。

20 世纪 60 年代,桥梁钢材已普遍采用低合金钢(16 锰钢),结构连接已从早期的铆接逐



图 1-2 南京长江大桥

步过渡到栓、焊连接。在公路和铁路上修建了一些大跨度钢桥，如 1972 年建成的山东北镇黄河大桥，主桥采用 $4 \times 112\text{m}$ 的栓焊连续钢桁梁桥。1993 年建成的九江长江大桥铁路部分长 7657.4m ，公路部分长 4215.9m ，跨度为 216m 。进入 20 世纪 80 年代，我国又发展了钢箱梁结构，1982 年在陕西安康建成箱形截面、栓焊结构的铁路斜腿刚架桥，跨径 176m ，是目前该种桥型铁路桥的世界纪录。1984 年在广东省建成了采用正交异性板桥面、栓焊结构的钢箱梁桥。

我国钢桥建设铆接结构进展到栓焊结构，从钢桁架梁发展到正交异性板桥面的钢箱梁，研制了板厚效应小(56mm 厚)，焊接性能和韧性好的 $15\text{MnVN}_q\text{—C}$ 桥梁钢，为我国建造大跨钢桁架桥、钢斜拉桥和钢悬索桥创造了条件。进入 20 世纪 90 年代后，我国经济发展飞跃到新台阶，需要建设更大跨径的钢桥。现代化悬索桥的发展，国外走了百余年的历程，我国从第一座现代化悬索桥建设始至今只有 10 余年的历史。到 20 世纪末，已建成 4 座大跨悬索桥，具有代表意义的是香港青马大桥，全焊钢箱梁结构，主跨 1377m ，1998 年建成(图 1-3)；江阴公路长江大桥，该桥为全焊钢箱梁结构，主跨 1385m ，1999 年建成通车(图 1-4)。



图 1-3 香港青马大桥

2000 年建成的芜湖公铁两用长江大桥，为主跨 312m 的钢斜拉桥。正在规划的大跨钢悬索桥的主跨是 $1500 \sim 2000\text{m}$ ，钢斜拉桥主跨已超越 1000m 。已建成的上海卢浦大桥为跨长 550m 的中承式钢箱拱桥。

20 世纪 50 年代，我国在修建大量小跨径钢筋混凝土梁桥的同时，开始对预应力混凝土桥梁进行了研究与试验，于 1956 年在公路上建成了第一座跨径 20m 的预应力混凝土简支梁桥。随后，预应力混凝土简支梁在公路上获得广泛采用，并提出了装配式预应力混凝土简支

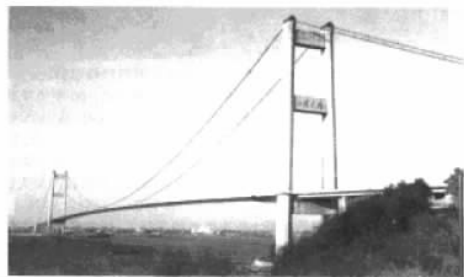


图 1-4 江阴公路长江大桥

梁桥的系列标准设计，最大跨径达 40m。1970 年，河南省建成了跨径达 52m 的鱼腹形预应力混凝土简支梁桥。1976 年建成的洛阳黄河公路大桥，跨径为 50m，全长达 3000m，是我国目前最长的公路桥。1985 年在浙江省建成了跨径 60m 的预应力混凝土简支梁桥。20 世纪 60 年代中，我国首次采用了先进的悬臂施工方法，建成了第一座 T 形刚构桥，为我国修建大跨径预应力桥梁提供了成功的经验，开拓了发展前景。迄今已修建了 20 多座大中跨径的预应力混凝土 T 形刚构桥，1971 年建成的福建省乌龙江公路大桥，主孔跨径为 $3 \times 144\text{m}$ ；1980 年建成的重庆长江公路大桥，共 8 孔，总长 1000m，最大跨径达 174m。20 世纪 70 年代后，在桥梁建设上，各种体系的预应力混凝土桥获得了迅猛的发展。各国应用最多的预应力混凝土连续梁桥在国内开始兴建。近 20 年来，修建了大量的连续梁桥，掌握了各种先进的施工方法与技术，如顶推法、移动模架法、逐跨架设法等。并在国外承包修建了伊拉克的摩索尔四号桥，全长 648m，主跨 56m 的一联 12 孔箱形连续梁；科威特的巴比延桥，全长 2400m，主跨 54m 的新型空间桁式腹系箱形连续梁桥，施工速度和质量获得了良好的国际声誉。

进入 20 世纪 80 年代，用悬臂法施工的大跨径连续梁桥获得了迅速的发展。其中，如 1984 年建成的广州珠海三桥，主跨为 $80\text{m} + 110\text{m} + 80\text{m}$ ；1991 年建成的杭州钱塘江二桥，为公铁两用桥，主桥为 18 孔一联预应力混凝土箱形连续梁，分跨为 $45\text{m} + 65\text{m} + 14 \times 80\text{m} + 65\text{m} + 45\text{m}$ ，连续长度达 1340m，为目前国内之冠。2001 年建成的南京北汊桥为五跨预应力混凝土连续梁，主跨为 160m。

20 世纪 80 年代末至 90 年代初，预应力束锚固与张拉工艺的使用及施工设备的日益完善，促进了预应力混凝土桥向更大的跨径冲击，发展了双薄壁墩的连续刚构体系。如 1989 年建成的主跨 180m 的广东洛溪桥，1996 年建成的主跨 245m 的黄石长江大桥，1997 年建成的主跨 270m 的广东虎门辅航道桥(图 1-5)，为当时世界最大跨径。它标志着我国预应力混凝土桥梁的设计、施工工艺与技术水平均已跨入世界先进行列。

在世界桥梁建筑中，20 世纪 50 年代出现了第一座现代钢斜拉桥以后，由于结构合理，跨越能力大，用材指标低和外形美观，这种桥型异军突起，发展迅速。20 世纪 60 年代开始修建了预应力混凝土斜拉桥。我国虽起步较迟，但勇于实践和攀登新的技术高峰，从 1975 年开始修建四川云阳汤溪河桥(主跨 76m)和上海松江县新五桥(主跨 54m)两座试验桥以来，至今已修建了各种类型的现代预应力混凝土斜拉桥达 70 余座，成为目前世界上建造这种桥梁座数最多的国家。其中有现主跨最大(432m)的铜陵长江公路大桥；主索张拉力最大(10000kN)的杭州钱塘江三桥，它是一座独塔单索面双跨斜拉桥(图 1-6)。



图 1-5 广东虎门辅航道桥



图 1-6 杭州钱塘江三桥

此外,结合我国情况,在修建钢筋混凝土桁架拱桥的基础上,还发展了预应力混凝土桁架拱桥与桁架 T 构桥。1985 年建成的贵州江界河大桥,为预应力混凝土组合悬臂桁架拱-梁体系,主跨已达 330m。

除石拱桥外,我国还创造和推广了不少新颖的拱桥结构。如 1964 年创建的双曲拱桥,具有材料省、造价低、施工简便和外形美观等优点,在公路上得到应用和推广,对加快当时我国公路桥梁建设速度,曾起了很大的作用。目前我国跨径在百米以上的双曲拱桥共有 16 座,最大跨径达 150m(河南省前河大桥)。此外,全国各地还因地制宜地创建了各具特色的拱式桥,其中推广较快的在江浙一带修建的钢筋混凝土桁架拱桥和刚架桥,其特点是上部结构自重小,适合于软土地基上建造拱桥。山东的两铰平板拱,河南的双曲扁拱,山西和甘肃的扁壳拱,广东的悬砌拱,广西的薄壳石拱,湖南的圬工箱形拱和石肋板拱等,这些新桥型在结构上或施工上各具特色,对探索经济合理的中、小跨径拱桥建筑曾作出了贡献。

在拱桥的施工技术方面,除了有支架施工外,对于大跨径拱桥,目前已广泛采用无支架施工,而且在四川、贵州和湖南等省已采用转体法分别建成了跨径为 70m 的肋拱桥、200m 的箱拱桥等。近年来,随着缆索吊装技术的发展、起重能力的增大,为了提高拱桥在无支架吊装中构件的稳定性和增强主拱的整体性,较大跨径的拱桥大都采用薄壁箱形拱肋。几年来,我国已建成跨径在百米以上的箱形拱桥有 10 余座,跨度最大达 420m 的四川万县长江大桥,于 1997 年建成,它是用钢管混凝土劲性骨架作为拱架施工的箱形拱桥。

据不完全统计,我国迄今已建百米以上跨径的公路圬工拱桥和钢筋混凝土拱桥近 40 多座,约占世界同类拱桥的三分之一以上。

我国在深水急流中修建了不少桥梁,已积累了极为可贵的深水基础工程的设计和施工经

验。20世纪50年代,我国修建武汉长江大桥时,在世界上首次采用了大型管柱基础。随后,这种先进的深水基础形式得到了推广和发展,大型管柱的直径从1.55m发展到5.8m,最大埋置深度达47.5m。在沉井施工方面,由于成功地采用了先进的触变泥浆套下沉技术,大幅度地减小了基础圪工数量(据某大桥的实践,减小达一半),并加快下沉速度。在中、小跨径公路桥建设中,我国还广泛采用和推广了就地成孔的钻孔灌注桩基础。北镇黄河公路桥成功地采用这种基础施工,钻孔深度达104m。

为了排除钻孔坍塌的危险,又发展了套管法施工桩基础。在大跨桥梁中,除了采用大型管柱钻孔桩基础外,还有管柱桩与沉井组合基础,常用于深水桥墩。在大型基础施工中,还开创使用双壁钢围堰与钻孔灌注桩基础。

随着桥梁向大跨、轻型、高强、整体方向的发展,桥梁下部结构形式出现日新月异的变化。我国深水桥墩设计与施工水平,虽已处于世界前列,但我国江河纵横,海岸线很长,沿海有开发价值的岛屿众多,规划中的大桥甚至要修建70~100m水深的基础工程。这将是桥梁工程与近海工程结合的发展时代。

1.1.3 20世纪桥梁工程的伟大成就

20世纪是人类经济发展、科技突飞猛进、文明进步、成就辉煌的一个世纪,但同时,它也经历了两次世界大战,是人类历经残酷的侵略与反侵略,战争与和平反复较量的一个世纪。虽然在第二次世界大战胜利后,全球的局部战争一直不断,但人类终于在经过不懈斗争后迎来了一个相对和平的建设时期。20世纪50年代后,经过“石油革命”与“电子革命”的洗礼,以及高新科技向民用技术的转化,使得现代科技得以不断创新。随着材料工业的发展,科学理论与计算方法的创新,施工机械化、电子化、自动化(控制技术)的革新,桥梁形式、跨度不断突破,桥梁建设获得了巨大发展。

简言之,桥梁建筑材料在17世纪以前,主要是石材与木料。虽然中国在11世纪就出现了瓦,公元前5世纪至3世纪就出现了砖,人类第一次创造的人工材料推动了房屋等工程的发展,但在桥梁中应用甚少。18世纪末,炼铁技术发展,铁开始应用于桥梁。1779年首次建成了铸铁拱桥(Coal brookdale桥,主跨30m)。留世至今的是著名的法国巴黎塞纳河上的亚历山大三世铸铁拱桥(主跨107.5m,1899年)。

19世纪有了锻铁,中叶出现了现代建筑钢材和钢丝,这是人工建筑材料的又一次飞跃。桥梁应用优质钢材使桁架结构形式有了发展,主跨从百米左右飞跃到500m左右。标志性建筑为1883年建成的美国纽约布鲁克林桥(主跨486m的悬索桥)和1890年建成的苏格兰福思湾铁路桥(主跨520m的悬臂钢桁桥)。进入20世纪,钢拱桥的第一个世界纪录为美国新河桥518m;钢桁桥的第一个世界纪录为加拿大的魁北克桥549m。从跨径上只突破了几十米。但在20世纪,建筑钢材从普通钢发展到高强合金钢、全气候钢,结构的连接从铆接、栓接,发展到焊接。结构高强轻型化,钢管、钢箱梁的应用,制造工艺自动化、工厂化,施工机械化,从而创造出千姿百态的现代钢桥。20世纪钢桥的发展主要反映在悬索桥与斜拉桥的建设上。悬索桥从20世纪初的1000m(纽约华盛顿,主跨1067m,1931年建成)至20世纪末跃至1991m。其标志性建筑为1937年建成的美国金门大桥(主跨988m,悬索桥,世界第一次采用扁箱流线形的加劲梁,改善了结构空气动力稳定性),1997年建成的中国香港特别行政区青马大桥(主跨1377m,世界上跨径最大的现代化公铁两用桥)以及1998年建成的日本明石海峡大桥,主跨1991m,并在施工期间经受住了1995年日本阪神大地震(图1-7)。



图 1-7 日本明石海峡大桥

20 世纪中叶时，第二次世界大战结束，各国经济迎来恢复发展时期，大量被破坏的交通设施需要修复。在电子计算机出现后，结构计算理论与方法的飞跃使工程师们爆发出巨大的创造力，使一些早期构思的、属于复杂的高度超静定的结构形式获得了新的生命力，异军突起的是斜拉桥体系。联邦德国于 1952 年便在达塞道夫(Dusseldorf)先后建成 3 座钢斜拉桥，主跨为 260~320m，形成独塔、双塔、双索面、单索面相匹配的典型斜拉桥体系，至今被誉为“斜拉桥家庭”。经过 50 年的发展，斜拉桥跨径已跃至 890m。

20 世纪大跨径桥梁的标志性建筑是：

- 主跨 1991m 的日本明石海峡大桥(见图 1-7)，钢悬索桥(先进的深水基础技术，先进的架设技术，超强主缆设计，结构控制技术)；
- 主跨 1624m 的丹麦大海带桥，钢悬索桥(先进的深水基础技术和先进的设计施工技术)；
- 主跨 890m 的日本多多罗桥，钢斜拉桥(边跨为混凝土结构)；
- 主跨 856m 的法国诺曼底桥，钢斜拉桥(边跨为混凝土结构，混合式斜拉桥，先进的塔形构造，塔身与梁体同时建设的范例，采用了结构控制技术，全焊箱式断面)。

20 世纪建桥历史中最突出的成就是预应力混凝土技术的广泛应用。粗略估计，当今世界上 70% 以上的现代化桥梁都采用预应力混凝土新技术。由于高强钢丝或钢绞线的防护技术愈来愈成熟可靠，预应力拉索技术不但应用于桥梁结构，而且渗透到各类结构中去，创造出各种索结构与索膜结构。从 19 世纪 20 年代制成波特兰水泥，经过一个世纪，出现了预应力混凝土。由于混凝土抗裂性能的提高使混凝土梁桥跨越能力大大提高，特别在 20 世纪 50 年代后，创造了混凝土桥梁的悬臂施工方法，由此发展了梁式桥、拱式桥等新结构形式。在 60 年代预应力混凝土首次被应用于斜拉桥，即委内瑞拉的马拉开波桥，从此，预应力混凝土桥梁从 20 世纪初跨越 30m 左右跃进到世纪末跨越 500m 左右(斯卡圣德脱 Skamsumdet 桥)。此外，钢筋混凝土和预应力混凝土还大量应用于其他土木工程。因而，20 世纪是钢筋混凝土与预应力混凝土桥梁占主导地位的发展时期。

20 世纪因电子计算机出现，有了高速数值运算方法，给结构和力学理论注入新的生命力，使各类力学问题都可迎刃而解。不但在结构线性、非线性的空间分析，稳定分析，动力

分析,风和地震响应分析方面有深入的发展,而且随着其他工业的发展,科学试验手段更趋先进,特别是对结构防灾(大风、大地震)和科学实验方法的发展(风洞、地震模拟振动台),使人类能够建造更高的塔楼和更大跨径的桥梁。

建设海峡工程,沟通全球交通,在20世纪初就是桥梁界的梦想。第一个海峡工程是美国旧金山的奥克莱海湾(San Francisco Oakland Bay)大桥,长6.8km,建成于1936年。在进入20世纪末的20年中,连接日本本州四国的三条联络线(海峡工程)陆续建成,如1988年建成的兜岛—板出线,长9.9km;1998年建成的明石海峡大桥,长3.91km;1999年建成的今治—尾道线,长60km。连接丹麦岛间的大带海峡(Great Belt Strait)桥,长17.5km,建成于1988年。

20世纪中后叶,因新型建筑材料初露锋芒,如纤维混凝土、炭纤维索及不同材料的复合应用和预应力拉索技术的发展,不但推动与促进了大跨径桥梁的发展,而且造就了千姿百态的新型中小跨径的现代化桥梁。

1.1.4 21世纪桥梁工程展望

在20世纪末已经开拓了几项大的海峡工程,但桥梁最大跨径没有超过2000m,深水基础深度也在50m左右。人们已经在规划的几项大的海峡工程,其设想方案的桥梁最大跨径要超过2000m,达到3000~5000m,深水基础深度可能在百米以上,如:联系意大利本土与西西里岛的墨西拿海峡工程,总长3.3km,最大水深300m。

21世纪面临的海峡工程建设,从先进国家国内的交通运输网络发展到组成各洲际、各国间主要联网,去适应21世纪信息革命而形成智能化与高效率的工农业生产的需要。海峡桥梁工程必然要满足高速运输、重载运输、海上高通航的要求,建成全天候服务,有较高抵抗自然灾害能力和舒畅安全的交通通道。另一方面,无论在海峡或在洲际建设现代化桥梁,还必须注意环境保护。人类在发展经济、扩大建设的同时,也破坏了自然环境资源。20世纪末统计,在最近25年中,全球自然资源的25%已遭到破坏,饮水资源也损失了20%。因而这将是21世纪中的一个课题,不仅建桥的工程师们要注意,也应引起各行各业建设者们的重视。

为描绘21世纪桥梁建设的宏伟蓝图,科学家和工程师们要对建桥的有关课题和关键技术进行探讨:探索超大跨径桥梁(主跨3000~5000m)的新型建筑材料,合理结构形式,抗风、抗震、抗海浪的技术措施;要结合海洋工程的经验,探索100~500m的深水基础形式与施工方法;探索结构材料防腐的措施与方法;探索智能化结构的设计理论。21世纪除面临新建大工程外,还担负着对20世纪上半世纪建造的桥梁的加固、改建与修复的重任,约占20世纪总建筑桥梁数的50%。由此不但引发科学家与工程师们研究有效的维修、加固措施,而且提出安全耐久性和可靠性研究的新课题,这包括结构的施工控制与质量保证体系,桥梁生命期的监测系统,桥梁损伤判断与评估,桥梁生命保护的管理系统,等等。人们要控制结构,而且期望赋予结构智能。

在进入20世纪末的20年中,中国现代化桥梁建设犹如龙驹奔驰在祖国大地上,遍地掀起层层热浪。我国桥梁工程无论在规模上还是在发展速度上都已取得令全世界瞩目的伟大成就,如:

- 石拱桥:湖南鸟巢河桥,主跨120m,建于1990年,为世界第一纪录;
- 钢筋混凝土拱桥:四川万县长江大桥,主跨420m,建于1997年,为世界第一纪录;

• 预应力混凝土梁桥：广东虎门辅航道桥，主跨 270m，建于 1997 年，当时为世界第一纪录，现为第三纪录；

• 斜拉桥：江苏南京二桥，主跨 628m，建于 2000 年。以 20 世纪建成为限，斜拉桥在前 20 位世界纪录排名表上，中国占了第 3、4、5、6、7、9、11、20 位。

• 悬索桥：长江润阳公路大桥，主跨 1490m，2005 年建成通车，成为世界第四纪录。

显见，中国在建筑材料、结构设计理论与软件工程(包括 CAD 技术)、研究分析与科学实验、预应力混凝土技术、钢桥制造拼装技术、深水基础工程、施工技术与方法、施工工具与管理等方面，基本上都已经接近或达到国际先进水平。

跨入 21 世纪，我们已在规划的有琼州海峡工程(约 29.5km，最大水深 160m)、渤海海峡工程(约 75km，最大水深 60m)、伶仃洋跨海工程(约 49.3km，平均水深 11m)、杭州湾跨海工程(约 20~51km，平均水深约 8~12m)和长江口越江工程等。其中杭州湾跨海工程已经在建。中国工程师将面临建设特大跨径桥梁的挑战。我国桥梁工程建设虽然迅速起飞，但也要接受国外同行的竞争，寻找差距，继续努力奋斗。中国工程师将以自己的智慧为 21 世纪桥梁工程再创辉煌贡献自己的创造力。

1.2 桥梁的组成与分类

道路路线遇到江河湖泊、山谷深沟以及其他线路(铁路或公路)等障碍时，为了保持道路的连续性，充分发挥其正常的运输能力，就需要建造专门的人工构造物——桥梁——来跨越障碍。桥梁一方面要保证桥上的交通运行，也要保证桥下水流的宣泄、船只的通航或车辆的通行。

1.2.1 桥梁的组成部分

图 1-8 表示一座桥梁的概貌。从图中可见，桥梁一般由以下几部分组成。

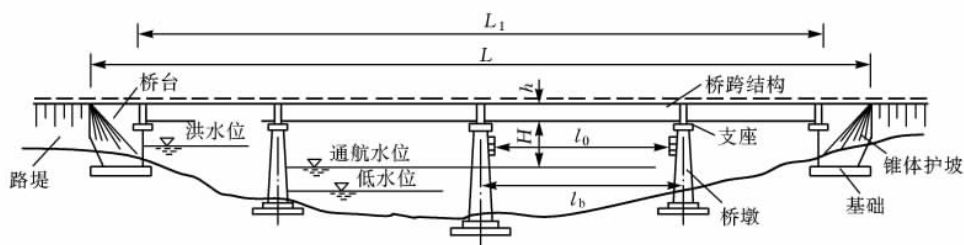


图 1-8 桥梁的基本组成

上部结构(或称桥跨结构)：是在线路中断时跨越障碍的主要承载结构。当需要跨越的幅度较大，并且除结构自重(恒载)外要求安全地承受很大车辆荷载的情况下，桥跨结构的构造就比较复杂，施工也相当困难。

下部结构：是支承上部结构并将结构重力和车辆等荷载传至地基的建筑物。包括桥墩、桥台和基础三部分。通常设置在桥梁两端的称为桥台，它除了上述作用外还与路堤相衔接，以抵御路堤土压力，防止路堤土的滑坡和塌落。设置在桥梁中间的支承结构物称为桥墩。单孔桥没有桥墩。对于两端悬出的桥跨结构，则往往不用桥台而设置靠近路堤边坡的岸墩。桥墩和桥台中使全部荷载传至地基的底部奠基部分，通常称为基础。它是确保桥梁能否安全使