

高等学校教材

桥梁工程

中南大学 裘伯永 盛兴旺 乔建东 文雨松 编著  
北方交通大学 许克宾 主审

中国铁道出版社

2001年·北京

# (京)新登字 063 号

## 内 容 简 介

本书系高等院校交通土建类专业用教材,铁路桥梁与公路桥梁内容并重。全书共设总论及十五章,包括桥梁设计荷载、钢筋混凝土和预应力混凝土桥梁、钢桥、地道桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥、桥梁墩台及支座、大中桥与小桥涵勘测设计、涵洞等内容。选材以常用的铁路和公路桥梁及墩台设计计算,施工所需基本知识和基本理论为主,注意介绍国内外桥梁现代技术。

本书除作为高等院校交通土建类专业用教材外,也可供桥梁专业研究生和桥梁工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

桥梁工程/裘伯永等编著.-北京:中国铁道出版社,2000.12  
高等学校教材  
ISBN 7-113-04003-9

. 桥... . 裘... . 桥梁工程-高等学校-教材 . U44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 85903 号

书 名:桥梁工程

作 者:裘伯永 盛兴旺 乔建东 文雨松

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:程东海

封面设计:马 利

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:787×1092 1/16 印张:30 字数:757千

版 本:2001年2月第1版 2001年2月第1次印刷

印 数:1~4000册

书 号:ISBN 7-113-04003-9 TU·651

定 价:41.00元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

# 前 言

原长沙铁道学院主编的《铁路桥梁》教材出版于1990年,10年来国家经济发生了巨大变化,教育面向社会,原铁路系统高等院校的桥梁、铁道工程等专业早已拓宽为交通土建类专业。这10年也是我国科学、技术、经济发展最快的10年,桥梁的大跨度、新结构、新技术不断涌现,铁路、公路桥梁规范正向可靠度设计理论过渡,应用可靠度理论的“铁路桥梁设计规范”已报部审批。这一切都要求编著新的桥梁教材以适应专业需要及科学技术的发展。新教材有以下特点:

1. 原则上按即将颁布的应用可靠度理论的“铁路桥梁设计规范”及1989年的“公路桥涵设计规范”(合订本)编写。

2. 铁路桥梁与公路桥梁内容并重。

3. 尽可能反映10年来桥梁科学技术的新成果及新的桥梁结构型式。这在第三章预应力混凝土简支梁,第四章混凝土连续体系梁桥,第六章其他类型的钢桥,第七章地道桥,第八章拱桥,第九章斜拉桥与悬索桥,第十章桥梁支座及第十一、十二章梁桥墩台中均有体现。

4. 将作者的教学、科研、生产成果融入教材中,能抓住重点,内容比较切合实际。这在许多章节中均有体现,在第四章与第十三、十四章中体现尤为突出。

5. 适应大跨度桥的发展,将“斜拉桥与悬索桥”单独列为一章,并作了较深入的阐述。

6. 没有单独设桥梁施工章节,但对常用结构的施工方法,在相应章节中作了程度不同的介绍。

本书由中南大学裘伯永、盛兴旺、乔建东、文雨松编著,北方交通大学许克宾教授主审。参加编著的有:中南大学裘伯永教授(总论、第一、二、八、九章及第六章第二节);卢树圣教授(第三章);盛兴旺副教授(第四、十章);张麒讲师(第五章、第六章第一、三、四、五节);乔建东副教授(第七、十一、十二章);文雨松教授(第十三、十四、十五章)。

由于编著者水平有限,教材中不可避免有谬误之处,敬请读者批评指正。

编著者

2000年12月

# 目 录

总 论.....	1
第一节 桥梁组成与基本类型.....	1
第二节 桥梁发展概况.....	4
第三节 桥梁设计概述 .....	13
第四节 混凝土梁桥面构造 .....	20
第一章 设计荷载 .....	25
第一节 永久荷载 .....	25
第二节 可变荷载 .....	25
第三节 偶然荷载 .....	31
第四节 荷载组合 .....	34
第二章 钢筋混凝土简支梁 .....	37
第一节 钢筋混凝土简支梁标准设计及构造 .....	37
第二节 钢筋混凝土简支梁设计与计算 .....	47
第三章 预应力混凝土简支梁 .....	65
第一节 后张法预应力混凝土简支梁标准设计及构造 .....	66
第二节 先张法预应力混凝土简支梁标准设计简介 .....	73
第三节 其他型式预应力混凝土简支梁简介 .....	76
第四节 后张法预应力混凝土简支梁设计与计算 .....	85
第五节 预应力混凝土简支梁的制造及架设 .....	93
第四章 混凝土连续体系梁桥.....	101
第一节 概 述.....	101
第二节 混凝土连续体系梁桥的构造.....	103
第三节 混凝土连续体系梁桥的设计.....	111
第四节 结构内力与配筋计算.....	119
第五节 箱梁分析.....	140
第六节 混凝土连续体系梁桥施工.....	159
第七节 混凝土刚架桥简介.....	177
第五章 下承式简支钢桁梁桥.....	185
第一节 概 述.....	185
第二节 钢桁梁的组成部分及其作用.....	186
第三节 钢桁梁内力分析的基本原理.....	190
第四节 主 桁 架.....	191
第五节 桥 面 系.....	201
第六节 纵向联结系.....	213

第七节	横向联结系.....	220
第八节	制动撑架.....	223
第九节	钢桁梁的节点.....	225
第十节	钢桁梁的竖向刚度、上拱度与横向刚度 .....	238
第六章	其他类型的钢桥.....	242
第一节	钢箱梁桥.....	242
第二节	结合梁桥.....	248
第三节	连续桁梁及悬臂桁梁桥.....	253
第四节	钢拱桥及组合体系桥.....	256
第五节	公路铁路两用桥.....	260
第七章	地道桥.....	262
第一节	概 述.....	262
第二节	地道桥的构造特点及主要尺寸.....	264
第三节	地道桥顶进法施工.....	265
第四节	地道桥计算特点.....	269
第八章	拱 桥.....	273
第一节	概 述.....	273
第二节	钢筋混凝土拱桥构造.....	275
第三节	钢管混凝土拱桥构造.....	279
第四节	拱桥的设计与计算.....	283
第五节	拱桥施工.....	295
第九章	斜拉桥与悬索桥.....	300
第一节	斜拉桥与悬索桥的特点与发展.....	300
第二节	斜拉桥的构造.....	303
第三节	斜拉桥的设计.....	311
第四节	斜拉桥的计算.....	315
第五节	斜拉桥施工控制与调整.....	322
第六节	悬索桥的构造.....	323
第七节	悬索桥的设计与计算.....	329
第八节	风振问题.....	335
第十章	桥梁支座.....	340
第一节	支座的作用、类型及布置方式 .....	340
第二节	板式橡胶支座.....	341
第三节	盆式橡胶支座构造与计算.....	344
第四节	钢 支 座.....	346
第五节	其他桥梁支座.....	348
第十一章	梁桥桥墩.....	351
第一节	桥墩类型及适用条件.....	351
第二节	桥墩构造与尺寸拟定.....	356
第三节	桥墩计算.....	368

第四节	铁路桥墩计算示例.....	382
第十二章	梁桥桥台.....	390
第一节	桥台类型及适用条件.....	390
第二节	桥台构造与尺寸拟定.....	395
第三节	桥台计算特点.....	397
第四节	铁路 T 型桥台示例 .....	401
第十三章	大中桥勘测设计.....	411
第一节	河川与径流.....	411
第二节	泥沙运动与河床演变.....	414
第三节	水文观测.....	416
第四节	形态法求历史洪水资料.....	420
第五节	有水文观测资料时推求设计流量.....	424
第六节	缺少水文资料时求设计流量.....	432
第七节	桥梁水文中的其他统计方法.....	434
第八节	大中桥孔径计算.....	436
第九节	桥下河床冲刷计算.....	438
第十节	桥下净空.....	443
第十一节	桥位选择.....	445
第十二节	调治结构.....	448
第十三节	曲线桥布置.....	449
第十四章	小桥涵水文计算.....	452
第一节	小桥涵设计流量计算.....	452
第二节	小桥孔径计算.....	457
第三节	涵洞孔径计算.....	459
第十五章	涵洞及其他过水建筑物.....	463
第一节	涵洞的构造.....	463
第二节	涵洞设计与计算.....	465
第三节	陡坡涵洞及其他过水建筑物.....	470
参考文献	.....	473

# 总 论

## 第一节 桥梁组成与基本类型

### 一、桥梁的作用及其组成

桥梁是供铁路、公路、渠道、管线等跨越河流、山谷或其他障碍并具有承载能力的架空建筑物。跨越河流或山谷的桥梁称跨河桥或跨谷桥。有些跨谷桥的高度和长度由地形和经济条件决定,建成的高而长的桥梁称为高架桥。跨越铁路或公路的桥梁称为跨线桥或立交桥。线路通过城市区、工业区或农作物区,为保留线路通过地段的空间或少占耕地,不修路堤而以桥梁通过,称这种桥为旱桥或栈桥。用于城市交通的铁道高架桥(有的城市与地下铁道相连)称为轻轨铁道桥。

图 1 为跨河桥图式。图中注明了桥梁的主要组成部分——桥跨、桥墩、桥台及桥头锥体等。桥跨是跨越结构,墩和台是支承桥跨的结构。使全部荷载传至地基的底部奠基部分,称为墩台的基础。桥台又是桥梁与路堤衔接的结构物,其两侧做成填土或填石锥体并在表面加以铺砌,用来保证桥台与路堤很好衔接,并保证桥头路堤的稳定。有些桥梁为免遭水害,还修建导流堤,引导水流顺畅从桥下宣泄,修建丁坝、护岸等防护工程,保护桥头路堤或附近河岸。桥梁与桥头引线和导流防护工程等建筑物,以它们与船渡相对应,总称之为桥渡。

图 1 跨河桥图式

通常习惯称桥跨为桥梁的上部结构;称桥墩、桥台及其基础为桥梁的下部结构。图 1 中还标注了低水位、高水位、设计水位。低水位是指枯水季节的最低水位。高水位是指出现洪峰时的最高水位。设计桥梁的洪水水位和通航水位称为设计水位和设计通航水位。对设计水位和设计通航水位,要能满足设计技术标准确定的桥下净空要求或通船净空要求。设计水位、设计通航水位的确定方法将在第十五章中介绍。

下面介绍一些与桥梁布置有关的主要术语。

净跨径是设计洪水位上相邻两个桥墩(或桥台)之间的净距。

桥梁孔径是多孔桥梁中各孔净跨径的总和,它反映了桥下宣泄洪水的能力。

计算跨径对于具有支座的桥梁,是指桥跨结构相邻两个支座中心之间的距离。一般称公路桥的跨径为两相邻墩中心之间的距离。

桥长的规定,公、铁路规范不统一。对于梁桥,铁路桥长系指桥台挡碴前墙之间的长度,公

路桥长系指两桥台侧墙或八字墙尾端间的距离。习惯上,设计人员仍把两台尾之间距离称作桥长。

建筑高度是桥上行车路面(或轨底)至桥跨结构最下缘之间的距离。

## 二、桥梁基本类型

桥梁型式很多,根据其受力情况分:梁桥、拱桥、刚架桥、悬索桥、组合体系桥等。

梁桥在竖向荷载作用下,只产生竖向反力。梁桥分为实腹梁(简称梁)或桁架梁(简称桁梁)。实腹梁承受弯矩和剪力;而桁梁的杆件则主要承受轴向力。梁桥又分简支梁桥、连续梁桥和悬臂梁桥。图 1 为简支梁桥,主跨为简支下承(桥面在梁的下部平面上)桁梁,边跨为简支上承(桥面在梁的顶平面上)梁。图 2 中(a)为连续梁桥,(b)为其力学简图。若在该连续梁中设剪力铰或挂孔,便成为悬臂梁桥。

图 2 连续梁桥图式

还有一种梁与墩刚性连接,称连续刚构桥。其墩很柔,在竖向荷载下墩顶基本上为竖直反力,人们把它归纳在梁桥范畴。图 3 是连续刚构图式。

图 3 连续刚构图式

拱桥在竖向荷载作用下有竖向反力和拱脚推力(水平反力),无铰拱还有支承弯矩。拱桥桥跨简称主拱,以受压为主,同时也受弯矩和剪力。图 4 为拱桥图式,(a)为上承实腹拱(拱上填实),(b)为中承空腹拱。主拱也可用桁架构成,称桁拱。图中(c)和(d)为拱的力学图式。

刚架桥的显著特点是桥跨和墩台刚性连接成整体。它与连续刚构桥的区别是:墩的刚度较大,在柱脚处产生水平反力和支承弯矩。图 5 为刚架桥图式,(a)为门形刚架桥,(b)为门形刚架静力图式,(c)为斜腿刚架桥。

还有一种类似于门式刚架的地道桥(又称框架桥),如图 6 所示。它与门式刚架桥的主要区别是,地道桥为整体基础。根据其受力特性,属于刚架桥类型。地道桥主要用于铁路线上的立交。

悬索桥图式如图 7,缆索跨过塔顶锚固在河岸上,是桥的承重结构。在缆索上悬挂吊杆,吊着桥面系,缆索受拉。

组合体系桥是由不同体系组合而成的桥梁。图 8 为组合体系桥图式,其中(a)和(b)是梁、拱组合体系。拱在梁上方的也称系杆拱,拱的水平推力由系杆承受,在竖向荷载作用下,支座只产生竖向反力。(c)为斜拉桥,是梁、索组合体系,斜拉索一端锚在塔上,一端锚在梁上,梁和索共同承受荷载。当悬索加劲梁刚度较大,能与缆索共同承受荷载时,也可称梁、索组合

体系。

以上都是固定式桥梁。还有活动桥(或称开启桥)和浮桥。浮桥随水位升降,多为临时性桥梁。当河道两岸不容许修建较高的路堤,而桥下通航又需要保持必要的净空高度,在这种情况下,可建造活动桥。活动桥开启方式可以是平转、立转或升降。活动桥水陆交通互相干扰,养护又困难,只在特殊情况下采用。

图 4 拱桥图式

图 5 刚架桥图式

图 6 地道桥图式

图 7 悬索桥图式

桥梁按梁(拱)跨结构用料不同,分木桥、圬工桥(石、混凝土桥)、钢筋混凝土桥、预应力混凝土桥、钢桥和结合梁桥。木桥现已只用于临时性桥梁。圬工桥多用于小跨度桥( $< 20\text{ m}$ )。结合梁桥指钢梁和混凝土桥面板共同受力的一种梁桥。

按用途来划分,有公路桥、铁路桥、公铁两用桥、人行桥、运水桥(渡槽)及其他专用桥梁(如通过管路、电缆等)。

图 8 组合体系桥图式

为了反映桥梁建设规模的大小,桥梁按桥长或跨长分大、中、小桥。《桥规》规定(以下不带括号的说明为公、铁路统一规定,带括号的说明为公路《桥规》规定):桥长  $500\text{ m}$ (或跨径  $100\text{ m}$ )为特大桥;桥长  $100\text{ m}$ (或跨径  $40\text{ m}$ )为大桥;桥长  $> 20\text{ m}$ ( $30\text{ m}$ 或跨径  $20\text{ m}$ )为中桥;桥长  $20\text{ m}$ ( $30\text{ m}$ 或跨径  $< 20\text{ m}$ )为小桥。

## 第二节 桥梁发展概况

### 一、我国桥梁发展概况

我国是文明古国,在桥梁建设史上也写下了不少光辉灿烂的篇章。古代桥梁不但数量惊人,而且类型也丰富多采,几乎包含了所有近代桥梁建筑中的最主要型式。

根据史料记载,在三千年前我国就有了木梁桥和浮桥。稍后有了石梁桥。世界公认悬索桥最早出现在中国,公元前 3 世纪四川已有竹索桥;公元前 2 世纪陕西已有铁链桥,而欧洲迟至 17 世纪才开始有悬索桥的记载。

我国古代三大名桥,是古代桥梁的杰出代表,闻名于世。它们是河北赵县赵州桥、福建泉州万安桥和广东潮州湘子桥。赵州桥又称安济桥,于公元 591~599 年由石匠李春所建,净跨  $37.02\text{ m}$ ,拱矢高  $7.218\text{ m}$ ,拱桥全宽  $9.6\text{ m}$ ,桥面净宽  $9\text{ m}$ 。它是世界上第一座敞肩式石拱桥

(图9),像这样的敞肩拱桥,欧洲到19世纪期中叶才出现。万安桥又称洛阳桥(跨洛阳江),于公元1053~1059年由蔡襄所建,原桥全长834 m,1996年修缮后长731.29 m,共47孔,每孔用7根跨度11.8 m的石梁组成,宽约4.9 m。该桥在基础工程上首创筏形基础,采用蛎(蚝)种在潮水涨前的抛石基底和石砌墩身上,使胶结成整体。湘子桥又称广济桥(跨赣江),于公元1170~1192年建成,全长517.95 m,东西浅滩部分各建一段石桥,中间深水部分以浮桥衔接。浮桥可开可合,是世界上活动桥的先导。

图9 赵州桥

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政府腐败,各方面都得不到应有发展。解放前仅有的几座特大桥建筑,大部分是由外国投资,洋人设计,外商承包。1934~1937年由茅以升先生主持修建的浙赣线钱塘江大桥是解放前由我国技术人员完成的唯一一座大桥工程。该桥为双层公铁两用钢桁梁桥,正桥16孔,全长1 400 m。

新中国成立后,随着国民经济的发展,桥梁事业迅猛发展,其主要特点是:几乎所有桥梁都由中国人自己设计、制造和施工;理论、技术正在赶上或接近世界先进水平。新中国成立后的桥梁建设大致可分为三个时期:1949~1954年;1954~1978年;1978年至今。在第一个时期以修复、加固旧桥为主。第二时期在新建的铁路、公路网线和渡口,修建了不少桥梁。在这一时期,由于钢铁供应不足,中、小跨以拱桥和钢筋混凝土简支梁、预应力混凝土简支梁桥为主,个别铁路大跨桥梁及公路大型桥梁采用钢梁。拱桥施工方法主要是:在拱架上建筑或将拱圈(肋)分环分段,采用缆索吊装施工。在第三个时期,大跨度预应力连续梁、连续刚构、拱桥、斜拉桥、悬索桥等新结构迅速涌现。拱桥采用无支架施工。计算理论与手段、材料质量、机具设备、施工技术、桥梁跨度的记录均接近或达到世界先进水平。

### (一) 钢梁

长江中下游的四座钢桁梁桥代表了新中国成立后钢桥发展的四个里程碑,1957年武汉长江公铁两用大桥建成,首次在长江上实现了“一桥飞架南北,天堑变通道”。这是我国钢桥史上第一个里程碑。武汉长江大桥正桥全长1 556 m,桥跨结构为三联 $3 \times 128$  m连续钢桁梁。

这一时期建钢桥用的材料都是进口碳钢,结构是铆接的,工艺大都采用手工操作,只是在建造武汉长江大桥时,引进前苏联机器样板钻孔,使钢梁制造做到工厂化、标准化。

1969年南京长江公铁两用桥的建成是第二个里程碑,正桥钢梁全长1 576 m,桥跨结构为128 m简支钢桁梁加三联 $3 \times 160$  m铆接连续钢桁梁。这座桥是完全依靠自己的技术力量和国产材料建成的长江大桥,标志着我国建桥技术进入到了一个独立自主的新水平。在60年代后期我国研究发展了栓焊钢桥新技术,在成都铁路等线上建成了13种不同结构型式的栓焊钢桥44座,从此结束了全部铆接钢桥历史。

图 10 南京长江公铁两用桥

1993年九江长江公铁两用大桥是钢桥史上第三个里程碑,正桥钢梁全长1 806 m,桥跨结构为栓焊,连续刚性桁梁柔性拱。钢梁采用了由我国自己研制成的屈服点高( $\sigma_s = 420$  MPa)、焊接性能好、韧性好、板厚效应小(可以用到56 mm)的十五锰钒氮60级桥梁钢。2000年芜湖长江公铁两用大桥是钢桥史上第四个里程碑,该桥为主跨312 m的斜拉桥,主梁为钢桁梁,采用由我国研制成的十四锰钒氮,其主要特点是具有较好的综合性能和焊接性能,尤其是低温冲击韧性有大幅度提高。从此,我国用国产优质高强度、高韧性钢建造特大跨栓焊桥梁,在材料、工艺、理论方面都达到国际先进水平。

在钢梁发展过程中,还不断创造了很多新型结构。如1976年建成的汉江铁路斜腿刚构桥,跨度176 m,采用薄壁箱梁结构。1987年建成的东营黄河公路斜拉钢桥,跨度288 m。1996年建成的长江西陵峡公路悬索桥,加劲梁为全焊钢箱梁,主跨900 m。涌现出新型结合梁结构,在公路斜拉桥、城市立交桥中得到应用,等等。

## (二) 预应力混凝土梁

20世纪50年代,我国开始对预应力混凝土梁进行研究与试验,并推广应用。在1978年以前以采用预应力混凝土简支梁为主,开发了跨度32 m及以下系列铁路标准梁与跨度40 m及以下系列公路标准梁。个别铁路、公路桥上开始采用较大跨度预应力混凝土梁,如20世纪50年代在兰新线建成单跨56 m预应力混凝土系杆拱桥,60年代在成都线上建成中跨64 m预应力混凝土悬臂梁桥,70年代在邯长线上建成跨度82 m预应力混凝土斜腿刚架桥及在湘桂线红水河上建成的预应力混凝土斜拉桥等。这些都带有铁路试点桥性质。公路上,1977年建成河南洛

阳黄河公路桥,为 62 孔 50 m 预应力混凝土简支梁。1978 年建成中跨为 70 m 预应力混凝土连续梁桥。1967 年建成柳州桥,中跨 124 m 与 1971 年建成福建乌龙江桥,中跨 144 m 的预应力混凝土 T 型刚构等。

当时的预应力锚固体系为环销式锚具或锥形锚具,采用高强度钢丝,强度为 1 500 MPa。

1978 年后,预应力技术得到迅速发展与广泛采用。铁路上,预应力混凝土简支梁跨已建造到 50 m,在南昆线上达到 56 m。建起多座跨度 80 m 及以上的预应力混凝土连续梁桥,最大跨度达 96 m(石长线上湘江、沅江桥)。钱塘江双线 80 m 跨铁路预应力混凝土连续梁,连续长度达 1 340 m,为世界之最。建起了多座连续刚构桥,南昆线清水河桥的跨度达 128 m(图 11)。建于攀钢专线金沙江桥的最大跨度达 168 m。

图 11 南昆线清水河桥

公路上预应力混凝土梁的发展更引人注目。16 m、20 m 跨度后张式空心预应力混凝土板梁得到普遍推广。40 m、50 m 跨度,除采用预应力混凝土简支梁型式外,顶推、顶拉施工的预应力混凝土连续梁得到发展。悬臂法施工的大跨径预应力混凝土连续梁、连续刚构、斜拉桥,在各省、市都有修建。

目前,公路预应力混凝土连续梁最大跨度达 154 m(云南六库怒江桥)。公路预应力混凝土连续刚构最大跨度为 270 m(虎门辅航道桥),其次是黄石长江大桥主跨 254 m。

在此期间,部分预应力混凝土技术也得到发展。用部分预应力混凝土建造公路桥标准跨度已达到 50 m;铁路桥梁已建到 96 m,节省了预应力钢材,减少了全预应力混凝土的上拱现象。

与此同时,强度高(极限强度 1 860 MPa)、低松弛、工厂化、运输方便的钢绞线及与其配套的锚固性能好,施工方便的夹片式锚具在各类预应力混凝土桥梁中广泛应用。已经研制成了张拉力达 12 000 kN 的大型锚具及张拉设备。

我国 20 世纪 60 年代开始发展橡胶支座,80 年代后,橡胶支座在铁路、公路混凝土梁式桥跨结构上普遍应用,代替原先的钢支座,节省了钢材。目前我国大吨位(60 000 kN)盆式橡胶支座已经研制成功,已能适应大跨度预应力梁桥的发展。

### (三) 拱桥

中国拱桥历史悠久,新中国成立前,修建的拱桥大多为石拱桥。新中国成立初期由于缺乏钢材,铁路、公路上修建了不少石拱桥,铁路上以成渝、宝成、石太线为代表。早期,公路上,尤

其由地方修建的桥,大多为石拱桥。目前铁路上石拱桥最大跨度为54 m(成昆线上);公路上石拱桥 1998 年最大跨度120 m(湖南凤凰县),山西晋城丹河将建成146 m跨石拱桥,都为世界上石拱桥最大跨度。

20 世纪 60 年至 70 年代开始发展钢筋混凝土拱桥及无支架施工方法。铁路上于 1959 年在詹东线上修建了丹河桥,为上承式钢筋混凝土拱桥,跨度88 m;1963 年修建了丰沙线 7 号桥,为中承式钢筋混凝土拱桥,跨度150 m,都在拱架上建筑。公路上大跨度拱桥以发展无支架施工为主,采用分环分段吊装拱圈(肋)。建于 1979 年的四川马鸣溪金沙江大桥是我国用缆索吊机吊装施工的跨度最大的箱型截面钢筋混凝土拱桥,跨度150 m。

采用分环分段虽然在一定程度上解决了拱桥无支架施工问题,但因受起吊能力限制,构件必须轻巧,分得较细,致使工序增多,结构整体性差。有典型性的双曲拱桥(截面由拱肋、拱波、拱板三部组装而成)修建最多。双曲拱桥材料省、造价低、施工简便,对公路建设曾起了很大作用。由于其截面组装、连接简单,整体性较差。在 20 世纪 70 年代后已被现代结构型式取代。

20 世纪 80 年代后公路上主要发展转体施工法与劲性骨架施工法。四川省于 70 年代首创拱桥转体施工法,1989 年在重庆涪陵乌江上建成世界上少见的用转体法施工的特大跨度(200 m)钢筋混凝土拱桥。转体施工法不需大型起重设备,可避免高空作业。然而,当拱桥的跨度进一步增大时,转体法又呈现出局限性。于是劲性骨架施工法便应运而生,它是先将钢拱架分段吊装合拢,做成劲性骨架,然后把钢拱架作为支承结构,上挂模板,浇筑混凝土。90 年代发展的钢管拱进一步完善劲性骨架结构,它不仅用作拱支架,也是浇筑混凝土的模板。钢管拱比较轻巧,也可用转体法施工。现在钢管混凝土拱桥不仅用于山区,也在沿海、平原地区推广。采用钢管作为劲性骨架的钢筋混凝土拱最大跨度达420 m(重庆万县长江大桥)至 1997 年建成的钢管混凝土拱(系杆拱)最大跨度为200 m(广东南海三山西大桥,建于 1997 年,图 12)。类同于该桥,主跨为344 m的广州丫髻沙桥正即将建成。

图 12 广东三山西大桥

20 世纪 70 年代后铁路上很少修建拱桥,现在筹划在西南山区修建钢管混凝土拱桥。

#### (四)斜拉桥与悬索桥

我国斜拉桥以预应力混凝土斜拉桥为主。1975 年开始修建跨度不大的公路斜拉桥。20 世纪 80 年代后期斜拉桥在我国迅速发展,不但数量急剧增加,跨度不断增大,类型多种多样,

结构也日趋完善。我国已有 9 座(包括香港两座)400 m 及以上斜拉桥,占世界400 m 以上斜拉桥总数的 1/4 以上(表 9—1)。1999 年至 2002 年还将建起400 m 以上跨度 8 座。目前我国斜拉桥最大跨度达602 m(上海杨浦大桥,图 13),主梁为结合梁。主梁预应力混凝土梁的斜拉桥最大跨度达444 m(重庆长江大桥)。目前预应力斜拉桥的总数已居世界之首。我国斜拉桥起步虽比欧美晚了 20 年,现正在赶上世界先进水平。

图 13 上海杨浦大桥

20 世纪 80 年代初我国首次建成铁路斜拉桥(湘桂线红水河桥)。由于竖向与横向刚度及索疲劳等原因,纯铁路斜拉桥没有得到发展。现在芜湖正在修建公铁两用斜拉桥,跨度为 312 m,主梁为钢桁架与混凝土板结合梁。

我国的现代悬索桥起步较晚。20 世纪在 90 年代建成 7 座(包括香港一座)现代化悬索桥(表 9—2)。1995 年建成的汕头海湾大桥,中跨 452 m,采用预应力混凝土箱形加劲梁,在全世界独一无二。1999 年前建成的最大跨度悬索桥为香港青马大桥(图 14),中跨 1 377 m 及湖北宜昌西陵峡大桥中跨 900 m。1999 年建成的江阴长江大桥,主跨为 1 385 m,建成后名列世界第四。1999 年底建成厦门海沧大桥主跨 648 m。宜昌长江大桥主跨 960 m 正在建设中。以上悬索桥均为公路桥,除汕头海湾大桥外,加劲梁为钢梁,塔均为钢筋混凝土结构。

图 14 香港青马大桥

## (五) 桥梁基础工程

我国深水基础从武汉长江大桥首创管柱基础开始,有比较大的发展。特别在修建南京长江大桥时,对水深最大达30.5 m,覆盖层最厚达48.5 m,成功地采用了重型沉井、深水浮运钢筋混凝土沉井和钢沉井、沉井加管柱等基础。20世纪60年代初,公路首先用钻孔和挖孔灌注桩,铁路上从成昆线开始较大规模发展钻孔桩基础。20世纪70年代后期钻、挖孔桩技术迅速发展,九江长江大桥首创双壁钢围堰钻孔桩基础。现在长江上已建成的几座大桥,都采用了双壁钢围堰钻孔桩基础。公路在大桥上开始采用大直径钢筒围堰钻孔桩基础。钢管桩基础也引起工程界注意,在个别桥基础中得到采用。

## (六) 桥梁设计与科研

建国五十年来,我国公、铁、城市建设部门和高等院校、科研机构已形成一支人数众多,力量雄厚的设计、科研队伍。1956年开始制定我国公路、铁路桥梁设计规范,并根据建桥经验不断翻新版本。目前桥梁设计理论已进展到极限状态设计方法,用可靠度理论的新规范将陆续出台。对中、小跨常用桥型广泛编制了标准设计图纸,加速了我国桥梁建设事业。在桥梁设计中,空间分析、结构复杂的次内力计算、非线性计算、稳定、振动、风振分析与地震响应等进行了大量研究,取得了有实际价值的成果。桥梁静、动力模型试验、现场测试、风洞试验的测试设备与技术正在接近世界水平,其研究成果为发展我国桥梁事业提供了科学依据。近年来,电子计算机的应用已经普及,在引进并应用国外结构分析和程序的同时,我国已开发编制用于公路、铁路桥梁计算的各种分析程序。CAD技术已经普及,CAD软件正在不断开发、完善、配套。现在桥梁设计计算已在计算机上完成,基本上不用图板,由计算机出图。现代计算技术的推广应用,为加快桥梁设计速度、提高设计质量、发展新型结构,起到了极为重要的作用。

## 二、国外桥梁概况

在工业发达、技术先进国家,材料强度、分析理论和计算技术等方面不断发展,不断创造出新颖桥梁结构型式,不断刷新着桥跨记录。

在钢梁方面,有名的大跨度钢梁较多,如加拿大魁北克公铁两用桥(悬臂桁梁),主跨549 m;英国福斯铁路桥主跨521 m(悬臂桁梁);日本月生公路桥,为连续桁梁,主跨400 m;巴西瓜拉巴拉海湾公路桥,为连续箱梁,跨度300 m;德国汉姆铁路桥为带柔性拱的连续桁梁,主跨250 m,等等。关于宽跨比,国外有不少钢桁梁桥都小于 $1/20$ (包括我国规范制定的最小值),最小的达 $1/30$ 。所用的钢材最高等级已达60~80级。连接方法为栓焊或全焊。架设方法多为悬拼和节段吊装。1989年,日本在中跨为235 m正莲寺川桥的钢箱梁的架设中,吊装节段长225 m,重达56 000 kN。

国外公路最大跨度预应力混凝土连续梁桥为挪威Salbion桥,主跨212 m,建于1980年。公路最大跨度预应力混凝土连续刚构属挪威新施托姆桥,主跨301 m,建于1998年。铁路最大跨度预应力混凝土连续梁桥为日本北浦港桥,主跨120 m,双线,建于1990年。铁路最大跨度预应力混凝土连续刚构为葡萄牙坡托桥,主跨250 m,建于1990年。

在20世纪80年代国外已广泛采用高强度、低松弛钢绞线、群锚体系。悬拼、体外束新技术得到发展。

国外大跨度拱桥中,钢拱居多。美国采用耐候钢修建的跨度为518 m的新河公路拱桥,以结构轻、跨度大著称于世。早在1932年修建的澳大利亚悉尼港拱桥,跨度503 m,至今仍为世界上跨度最大的公铁两用钢拱桥。混凝土拱桥最大跨径为390 m,是前南斯拉夫于1980年建