

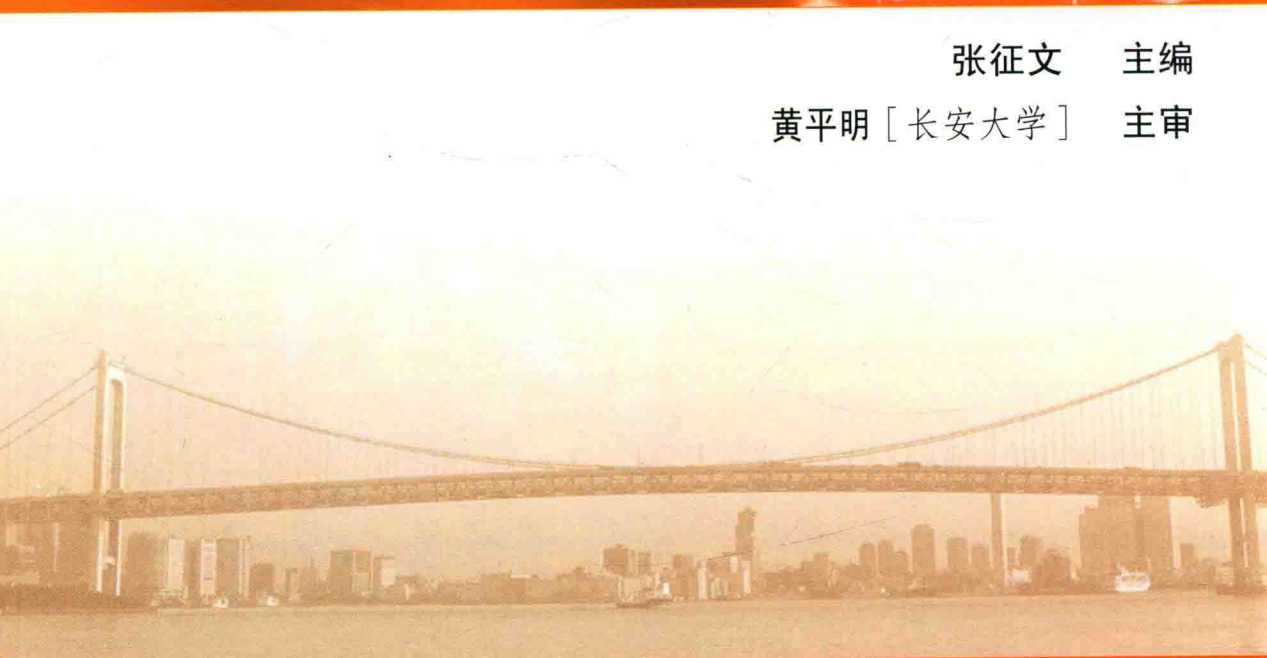


高等职业教育“十二五”规划教材

结构设计原理

张征文 主编

黄平明 [长安大学] 主审



人民交通出版社
China Communications Press

高等职业教育“十二五”规划教材

Jiegou Sheji Yuanli
结构设计原理

张征文 主 编

黄平明[长安大学] 主 审

人民交通出版社

内 容 提 要

本教材在主要内容选取上遵循了高等职业教育的特点,根据结构材料特性将内容分为基础知识、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构以及圬工结构四篇十五章。每一篇章内又根据不同的构件受力特征就工程中常见的受弯构件、受压构件进行重点介绍。在内容的编写上,严格遵循《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)、《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)等现行的行业标准和国家标准。

本书可作为高等职业院校道路桥梁工程技术专业教材,也可供土建类相关专业教学和参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

结构设计原理/张征文主编. — 北京:人民交通出版社,2014.5

高等职业教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-114-11366-6

I. ①结… II. ①张… III. ①建筑结构—结构设计—
高等职业教育—教材 IV. ①TU318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 074629 号

高等职业教育“十二五”规划教材

书 名:结构设计原理

著 作 者:张征文

责任编辑:任雪莲 李 娜

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:15.25

字 数:380 千

版 次:2014年5月 第1版

印 次:2014年5月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-11366-0

定 价:38.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

道路桥梁工程技术专业建设委员会

主任委员：王怡民

副主任委员：金仲秋 李锦伟

编 委：柴勤芳 屠群锋 兰杏芳 张征文
郭发忠 陈 凯 王建林 彭以舟
陈晓麟 徐忠阳 贾 佳 薛廷河
邵丽芳 钮 宏 开永旺 赵 伟
赵剑丽 单光炎(企业) 胡建福(企业)
刘 芳(企业) 周观根(企业)

前言 Preface

结构设计原理是道路桥梁工程技术专业群的专业基础课,是学习桥梁工程技术类课程的前导课程。

本教材在主要内容选取上遵循了高等职业教育的特点,根据结构材料特性将内容分为钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构以及圬工结构三个主要篇。每一篇又根据不同的构件受力特征就工程中常见的受弯构件、受压构件进行重点介绍。在内容的编写上,严格遵循《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)、《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)等现行的行业标准和国家标准。为了突出使用技能的培养,在编写过程中对于复杂深奥的理论进行了简化说明,注重应用知识体系和能力体系的构建,书中的应用示例是为读者学好本书内容特别安排的。考虑到便于一些初学者对本书涉及内容的理解能力以及加深理论与工程应用的联系,本书与其他相关书的不同之处在于,在第一篇中大篇幅地介绍了公路桥梁的发展、桥梁结构的分类以及桥梁构件的受力特征,即明确桥梁构件受力类型,便于读者理解。

本教材是由浙江交通职业技术学院与浙江省交通设计研究院共同编写完成的,具体编写分工如下:第一、三、四、五、六、七、八、九章由浙江交通职业技术学院张征文编写,第二、十、十一、十二、十三章由浙江交通职业技术学院王巍编写,第十四、十五章由浙江交通职业技术学院汪芳芳、浙江交通规划设计研究院陈国兴、徐祖恩编写,学生邢伟城、虞晓曙参与了本教材应用示例的文字录入。本教材由浙江交通职业技术学院张征文主编,长安大学黄平明教授主审。

本教材在编写过程中得到了人民交通出版社卢仲贤、任雪莲的指导和帮助,在此深表感谢。

由于时间仓促,对规范理解不深,本教材中难免存在缺点和错误,恳请读者批评指正。

编者
2013年12月

目 录 Contents

第一篇 基础知识

第一章 概述	3
第一节 桥梁建设及发展成就	3
第二节 桥梁结构的分类及组成	10
第三节 常见桥梁结构及构件受力特点	13
思考题	16
第二章 结构按极限状态法设计计算的原则	17
第一节 结构的可靠性与极限状态概念	18
第二节 《设计规范》(JTG D62—2004)规定的设计原则	19
第三节 作用与作用效应组合	21
思考题	24

第二篇 钢筋混凝土结构

第三章 钢筋混凝土结构的基本概念及材料	29
第一节 钢筋混凝土结构的基本概念	29
第二节 混凝土	30
第三节 钢筋	36
第四节 钢筋与混凝土之间的黏结	40
思考题	42
第四章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	43
第一节 受弯构件的截面形式与构造要求	43
第二节 受弯构件正截面受力过程和破坏特征	49
第三节 典型截面受弯构件正截面承载力设计计算	53
第四节 应用示例	69
思考题与习题	75
第五章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	77
第一节 受弯构件斜截面的破坏形态	77
第二节 受弯构件的斜截面抗剪承载力	80
第三节 受弯构件的斜截面抗弯承载力	85
第四节 全梁承载能力校核与构造要求	86
第五节 应用示例	89

思考题与习题	91
第六章 钢筋混凝土受弯构件的应力计算	92
第一节 截面换算	92
第二节 施工阶段的应力验算	96
第三节 应用示例	98
思考题	100
第七章 钢筋混凝土受弯构件挠度和裂缝宽度验算	101
第一节 挠度验算	101
第二节 裂缝宽度验算	103
第三节 混凝土结构的耐久性	106
思考题	109
第八章 轴心受压构件的正截面承载力计算	110
第一节 普通箍筋柱	110
第二节 螺旋箍筋柱	114
第三节 应用示例	117
思考题与习题	118
第九章 偏心受压构件的正截面承载力计算	120
第一节 概述	120
第二节 矩形截面偏心受压构件	126
第三节 圆形截面偏心受压构件	134
第四节 应用示例	140
思考题与习题	144

第三篇 预应力混凝土结构

第十章 预应力混凝土结构的基本概念及其材料	149
第一节 概述	149
第二节 施加预应力的方法与设备	152
第三节 预应力混凝土结构的材料	160
思考题	163
第十一章 预应力混凝土受弯构件的设计与计算	165
第一节 概述	165
第二节 预加力计算与预应力损失的估算	167
第三节 预应力混凝土受弯构件承载力计算	175
第四节 预应力混凝土受弯构件的应力计算	181
第五节 预应力混凝土构件的抗裂验算	188
第六节 端部锚固区计算	191
第七节 挠度计算及预拱度设置	195
思考题	198
第十二章 预应力混凝土受弯构件的设计	199
第一节 预应力混凝土梁的设计计算	199

第二节	预应力混凝土梁的钢筋布置及混凝土保护层厚度	203
思考题		208
第十三章	其他预应力混凝土结构简介	209
第一节	部分预应力混凝土受弯构件	209
第二节	无黏结预应力混凝土结构	211
思考题		214

第四篇 圬工结构

第十四章	圬工结构基本概念与材料	217
第一节	基本概念	217
第二节	圬工结构材料	217
第三节	砌体的强度与变形	221
思考题		225
第十五章	砖、石及混凝土构件的强度计算	226
第一节	计算原则	226
第二节	受压构件的承载力计算	226
第三节	受弯、受剪构件与局部承压的计算	231
思考题与习题		232
参考文献		233

第一篇 基础知识

第一章 概述

桥梁指的是为道路跨越天然或人工障碍物而修建的建筑物,它架设在江河湖海上,使车辆、行人等能顺利通行。

第一节 桥梁建设及发展成就

从工程技术的角度来看,桥梁发展可分为古代、近代和现代三个时期。

一、古代桥梁

人类在原始时代,跨越水道和峡谷,是利用自然倒下来的树木、自然形成的石梁或石拱、溪涧突出的石块、谷岸生长的藤萝等。据史料记载,我国在周代(公元前 11 世纪 ~ 前 256 年)已建有梁桥和浮桥,如公元前 1134 年左右,西周在渭水架有浮桥。古巴比伦王国在公元前 1800 年建造了多跨的木桥,桥长达 183m。古罗马在公元前 621 年建造了跨越台伯河的木桥,在公元前 481 年架起了跨越赫勒斯旁海峡的浮船桥。古代美索不达米亚地区,在公元前 4 世纪时建起挑出石拱桥(拱腹为台阶式)。

古代桥梁在 17 世纪以前,一般是用木材、石材等材料建造。

石桥的主要形式是石拱桥。据考证,我国早在东汉时期(公元 25 ~ 220 年)就出现了石拱桥。坐落在河北省赵县洺河上建于隋朝大业年间(公元 605 ~ 618 年)的赵州桥,净跨径达到 37.02m,采用空腹式拱上建筑,既能减轻结构自重,增加桥梁的跨越能力,又能便于泄洪,是当今世界上现存最早、保存最完善的古代石拱桥,如图 1-1 所示。中国古代石拱桥拱圈和墩一般都比较薄,比较轻巧,如建于公元 816 ~ 819 年的苏州宝带桥,全长 317m,薄墩扁拱,结构精巧,现在的宝带桥是明正统年间重建的,如图 1-2 所示。



图 1-1 赵州桥



图 1-2 苏州宝带桥

罗马时代,欧洲建造拱桥较多,如公元前 200 ~ 公元 200 年间在罗马台伯河建造了 8 座石拱桥,其中建于公元前 62 年的法布里西奥石拱桥,桥有 2 孔,各孔跨径为 24.4m。又如现存于法国的加尔德引水桥,建于公元前 1 世纪,桥分为 3 层,最下层为 7 孔,跨径为 16 ~ 24m。罗马时代拱桥多为半圆拱,跨径小于 25m,墩很宽,约为拱跨的三分之一。

石梁桥是石桥的又一形式。我国陕西省西安市附近的灞桥原为石梁桥,建于汉代,距今已有 2000 多年。公元 11~12 世纪南宋泉州地区先后建造了几十座较大型的石梁桥,其中有建于北宋皇祐五年至嘉祐四年(1053~1059 年)的泉州洛阳桥,如图 1-3 所示;始建于南宋绍兴八年(1138 年)的安平桥原长 2500m,362 孔,现长 2070m,332 孔,安平桥(图 1-4)是我国现存古代最长的石桥。



图 1-3 洛阳桥



图 1-4 安平桥

早期的木桥多为梁桥,如秦代在渭水上建的渭桥,即为多跨梁式桥。木梁桥跨径不大,伸臂木桥可以加大跨径。我国 3 世纪在甘肃安西与新疆吐鲁番交界处建有伸臂木桥,“长一百五十步”。公元 405~418 年在甘肃临夏附近河宽达 132m 处建悬臂木桥,桥高达 165m。八字撑木桥和拱式撑架木桥亦可以加大跨径。16 世纪意大利的巴萨诺桥为八字撑木桥。

木拱桥出现较早,公元 104 年在匈牙利多瑙河建成的特拉杨木拱桥,共有 21 孔,每孔跨径为 36m。我国在河南开封修建的虹桥,净跨约为 20m,亦为木拱桥,建于公元 1032 年。

我国西南地区有用竹篾缆造的竹索桥。著名的竹索桥是四川都江堰市的珠浦桥,桥为 8 孔,最大跨径约 60m,总长约 330m,建于宋代以前。

二、近代桥梁

18 世纪铁的生产和铸造,为桥梁结构提供了新的建筑材料。但铸铁抗冲击性能差,抗拉性能也低,易断裂,并非良好的造桥材料。19 世纪 50 年代以后,随着酸性转炉炼钢和平炉炼钢技术的发展,钢材成为重要的造桥材料。钢的抗拉强度大,抗冲击性能好,尤其是 19 世纪 70 年代出现钢板和矩形轧制断面钢材,为桥梁的部件在厂内组装创造了条件。

18 世纪初,人们发明了用石灰、黏土、赤铁矿混合煅烧而成的水泥。19 世纪 50 年代,开始采用在混凝土中放置钢筋以弥补水泥抗拉性能差的缺点。1875 年,法国的一位园艺师蒙耶(1828~1906 年)建成了世界上第一座钢筋混凝土桥。

近代桥梁按建桥材料划分,除木桥、石桥外,还有铁桥、钢桥、钢筋混凝土桥。

16 世纪前已有木桁架。1750 年在瑞士建成拱和桁架组合的木桥多座,如赖谢瑙桥,跨径为 73m。在 18 世纪中叶至 19 世纪中叶,美国建造了不少木桥,如 1812 年在费城斯库尔基尔河建造的拱和桁架组合木桥,跨径达 104m。桁架桥省掉了拱和斜撑构,简化了结构,因而被广泛应用。由于木桥用铁件量很多,不如全用铁经济,因此,19 世纪后期木桥逐渐被钢铁桥所代替。

我国于 1705 年修建了四川大渡河泸定铁链悬索桥,桥长 100m,宽 2.8m,至今仍在使用,见图 1-5。欧洲第一座铁链悬索桥是英国的蒂斯河桥,建于 1741 年,跨径 20m,宽 0.63m。1820~1826 年,英国在威尔士北部梅奈海峡修建了一座中孔长 177m 用锻铁眼杆的悬索桥。

世界上第一座不用铁链而用铁索建造的悬索桥,是瑞士的弗里堡桥,建于1830~1834年,桥的跨径为233m。这座桥用2000根铁丝就地放线,悬在塔上,锚固于深18m的锚碇坑中。

1869~1883年,美国建成纽约布鲁克林悬索桥,跨度为283m+486m+283m,开创了大跨径悬索桥的先河,见图1-6。1937年建成的美国旧金山金门大桥,主跨长达1280m,边孔为344m,塔高为228m,保持了27年的世界纪录,至今金门大桥仍是举世闻名的桥梁经典之作,见图1-7。



图 1-5 泸定桥

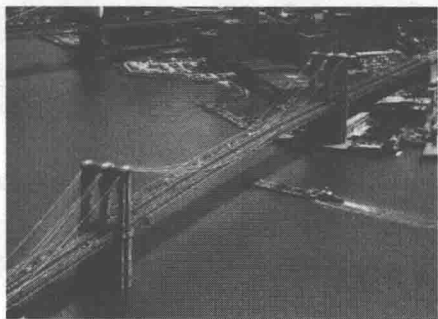


图 1-6 布鲁克林桥

1940年,美国建成的华盛顿州塔科玛海峡桥(图1-8),桥的主跨为853m,边孔为335m,加劲梁高为2.74m,桥宽为11.9m;这座桥于同年11月7日,在风速仅为67.5km/h的情况下,中孔及边孔便相继被风吹垮,这一事件,促使人们研究空气动力学同桥梁稳定性的关系。



图 1-7 金门大桥

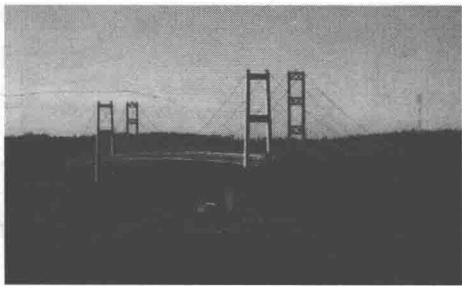


图 1-8 塔科玛海峡桥(左侧老桥,右侧新桥)

美国密苏里州圣路易市密西西比河的伊兹桥,建于1867~1874年,是早期建造的公路铁路两用无铰钢桁拱桥,跨径为153m+158m+153m,见图1-9。19世纪末弹性拱理论已逐步完善,促进了20世纪20~30年代修建较大跨钢拱桥,较著名的是建成于1932年的澳大利亚悉尼港桥,见图1-10,该桥跨径503m,宽48.8m,有8条车道,2条铁轨,1条自行车道及1条人行道,该桥设计者当时的高瞻远瞩值得学习。

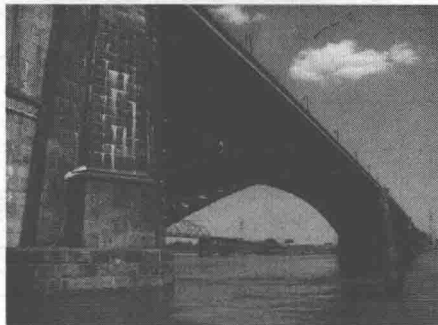


图 1-9 伊兹桥



图 1-10 悉尼港桥

1875 ~ 1877 年,法国园艺家莫尼埃建造了一座人行钢筋混凝土桥,跨径 16m,宽 4m,从此钢筋混凝土作为一种新型建筑材料开始应用于桥梁建筑,桥梁跨径不断被突破。1890 年,德国不莱梅工业展览会上展出了一座跨径 40m 的人行钢筋混凝土拱桥。1898 年,修建了沙泰尔罗钢筋混凝土拱桥,这座桥是三铰拱,跨径 52m。1905 年,瑞士建成塔瓦纳萨桥,跨径 51m,是一座箱形三铰拱桥,矢高 5.5m。1928 年,英国在贝里克的罗亚尔特威德建成 4 孔钢筋混凝土拱桥,最大跨径为 110m。1934 年,瑞典建成跨径为 181m、矢高为 26.2m 的特拉贝里拱桥;1943 年又建成跨径为 264m、矢高近 40m 的桑德拱桥。

三、现代桥梁

1928 年,法国弗雷西内工程师经过 20 年的研究,用高强钢丝和混凝土制成预应力钢筋混凝土。这种材料,克服了钢筋混凝土易产生裂缝的缺点,使桥梁可以用悬臂安装法、顶推法施工。随着高强钢丝和高强混凝土的不断发展,预应力钢筋混凝土桥的结构不断改进,跨度不断提高。

第二次世界大战后,随着强度高、韧性好、抗疲劳和耐腐蚀性能好的钢材的出现,以及用焊接平钢板和用角钢、板钢材等加劲所形成轻而高强的正交异性板桥面的出现,高强度螺栓的应用等,钢桥也有很大发展。

随着科技的快速发展,桥梁结构理论与计算方法也获得了重大进展,组合材料、新材料越来越多地应用于桥梁建设中,如钢—混凝土材料、钢管混凝土、碳纤维材料等,推动了现代桥梁的多样化建设和发展。



于 2003 年 12 月正式动工,2006 年 8 月 28 日竣工通车的重庆石板坡长江大桥复线桥,耗资 4.28 亿元,采用连续刚构与连续梁的混合梁结构,全长 1103.5m,宽 19m,主跨达到了 330m,是目前世界跨径最大的预应力混凝土梁式桥,见图 1-11。

图 1-11 石板坡长江大桥
世界十大梁式桥见表 1-1。

世界十大梁式桥 表 1-1

序 号	桥 名	主跨跨经(m)	所 在 国 家	建 成 时 间
1	石板坡长江大桥	330	中国	2006 年
2	斯托尔马桥	301	挪威	1998 年
3	拉脱圣德桥	298	挪威	1998 年
4	虎门辅航道桥	270	中国	1997 年
5	巴拉圭河桥	270	巴拉圭	1979 年
6	苏通长江大桥附航道桥	268	中国	2008 年
7	红河大桥	265	中国	2003 年
8	瓦罗德 2 号桥(Varodd-2)	260	挪威	1994 年
9	门道桥(Gateway)	260	澳大利亚	1986 年
10	泸州长江大桥	252	中国	2000 年

梁式桥由于受力特点及材料限制,跨径受限,大跨径桥梁需考虑采用其他桥型,如拱桥、斜拉桥、悬索桥等结构。

我国建筑拱桥有着悠久的历史,位于长江上游重庆主城区的朝天门长江大桥,于 2006 年 3 月动工,并于 2009 年 4 月 29 日通车,西连江北青草坝,东接南岸王家沱,主跨长 552m,全长 1741m,若含前后引桥段则长达 4881m,主跨超越上海的卢浦大桥(跨径 550m)成为目前世界上跨径最大的拱式桥,见图 1-12。



图 1-12 朝天门长江大桥

世界十大拱式桥见表 1-2。

世界十大拱式桥				表 1-2
序号	桥 名	主跨跨径(m)	所 在 国 家	建 成 时 间
1	朝天门大桥	552	中国	2009 年
2	卢浦大桥	550	中国	2007 年
3	新河峡谷大桥	518	美国	1977 年
4	贝尔桥	504	美国	1931 年
5	悉尼港桥	503	澳大利亚	1932 年
6	巫山长江大桥	492	中国	2005 年
7	万县长江大桥	420	中国	1997 年
8	菜园坝长江大桥	420	中国	2007 年
9	克尔克大桥	390	克罗地亚	1980 年
10	弗里芝特桥	383	美国	1973 年



图 1-13 俄罗斯岛大桥

2012 年 6 月建成通车的位于俄罗斯符拉迪沃斯托克的俄罗斯岛大桥总长度为 3.1km,主跨跨径达 1104m,桥塔高超过 320m,是目前世界上最长的斜拉桥,见图 1-13。

我国的斜拉桥建设起步稍晚,1975 年建成的跨径 76m 的四川云阳桥是国内第一座斜拉桥。20 世纪 90 年代以后,因跨越大江大河的需要,斜拉桥得到了快速的发展,我国修建了一系列特大跨度的斜拉桥,据不完全统计,我国建成的斜拉桥已超过 100 座,其中跨度超过 400m 的斜拉桥已达 20 座,居世界首位。

世界十大斜拉桥见表 1-3。

世界十大斜拉桥				表 1-3
序号	桥 名	主跨跨径(m)	所 在 国 家	建 成 时 间
1	俄罗斯岛大桥	1104	俄罗斯	2012 年
2	苏通长江公路大桥	1088	中国	2008 年
3	香港昂船洲大桥	1018	中国	2009 年
4	多多罗桥	890	日本	1999 年

续上表

序号	桥 名	主跨跨径(m)	所 在 国 家	建 成 时 间
5	诺曼底桥	856	法国	1995 年
6	南京第三长江大桥	648	中国	2005 年
7	南京第二长江大桥	628	中国	2001 年
8	武汉第三长江大桥	618	中国	2001 年
9	青州闽江大桥	605	中国	2001 年
10	杨浦大桥	602	中国	1993 年

苏通大桥起于通启高速公路的小海互通立交,终于苏嘉杭高速公路董浜互通立交,路线全长 32.4km,主要由北岸接线工程、跨江大桥工程和南岸接线工程三部分组成。其中,跨江大桥工程总长 8206m,主桥采用 100m+100m+300m+1088m+300m+100m+100m 的双塔双索面钢箱梁斜拉桥。斜拉桥主孔跨度 1088m,见图 1-14。

2013 年 7 月建成的嘉绍大桥位于浙江省嘉兴与绍兴之间,跨越钱塘江,是世界最长最宽的多塔斜拉桥。主桥长度达 2680m,分出 5 个主通航道,索塔数量、主桥长度规模位居世界第一;大桥采用双向八车道高速公路标准,主桥总宽度达 55.6m(含布索区)。为科学合理地解决长主梁温度变形问题,采用在全桥跨中设置刚性铰装置的创新结构体系,这种结构在世界范围内是独一无二的,见图 1-15。



图 1-14 苏通大桥



图 1-15 嘉绍大桥

目前世界上跨度最大的悬索桥是 1998 年 4 月 5 日建成通车的日本的明石海峡大桥,大桥全长 3910m,主跨长 1991m,桥面宽 35m,设 6 车道;桥塔高 280m,基础沉箱的直径约 80m,高约



图 1-16 明石海峡大桥

70m;两根大缆各由 290 根高强钢索构成,直径为 1.222m;总投资约 40 亿美元。大桥按可以承受里氏 8.5 级强烈地震和抗 150 年一遇的 80m/s 的暴风设计。1995 年 1 月 17 日,日本阪神发生里氏 7.2 级大地震(震中距桥址仅 4km),大桥附近的神戸市内 5000 人丧生,10 万幢房屋夷为平地,但该桥经受住了大自然的无情考验,只是南岸的岸墩和锚锭装置发生了轻微位移,使桥的长度增加了 0.8m,见图 1-16。

我国的现代悬索桥建设起步较晚,特别是在

特大跨度悬索桥方面,但在 20 世纪 90 年代中期以后,这一局面得到了彻底的改变。1995 年建成的广东汕头海湾大桥,主跨 452m,开创了我国现代公路悬索桥的先河。

世界十大悬索桥见表 1-4。

世界十大悬索桥				表 1-4
序号	桥 名	主跨跨径(m)	所 在 国 家	建 成 时 间
1	明石海峡大桥	1991	日本	1998 年
2	舟山西堠门大桥	1650	中国	2009 年
3	大伯尔特桥	1624	丹麦	1996 年
4	润扬长江公路大桥	1490	中国	2005 年
5	亨伯尔桥	1410	英国	1981 年
6	江阴长江公路大桥	1385	中国	1999 年
7	香港青马大桥	1377	中国	1997 年
8	维拉扎诺桥	1298	美国	1964 年
9	金门大桥	1280	美国	1937 年
10	武汉阳逻长江公路大桥	1280	中国	2007 年

2009 年建成的舟山大陆连岛工程中的西堠门大桥,起始于册子岛桃夭门岭,跨越西堠门水道,终于金塘岛上雄鹅嘴,全长 5.45km,其中桥长 2.586km,按双向四车道高速公路标准修建,其中主跨为 1650m 的悬索桥,大桥设计行车速度 80km/h,桥面全宽 35m,投资约 23.6 亿元,见图 1-17。

此外,我国 1964 年创造钢筋混凝土双曲拱桥,该桥型一度成为我国 20 世纪 70 ~ 80 年代的主要桥型。该桥由拱肋和拱波组成,纵向和横向均有曲度,横向也用拱波形式。拱肋和拱波分段预制,因此可用轻型吊装设施安装。这样,在缺乏重型运输工具和重型吊装机具的情况下,也可以修建较大跨径拱桥。第一座试验双曲拱桥建于我国江苏无锡,跨径为 9m。此后,1972 年建成的湖南长沙湘江大桥,是一座 16 孔双曲拱桥,大孔跨径为 60m,小孔跨径为 50m,总长 1250m,见图 1-18。



图 1-17 西堠门大桥



图 1-18 湘江大桥

由于双曲拱桥自身结构性存在弊端,现今该桥型已很少采用。

钢管混凝土拱桥属于钢—混凝土组合结构中的一种。钢管混凝土拱桥是将钢管内填充混凝土,由于钢管的径向约束而限制受压混凝土的膨胀,使混凝土处于三向受压状态,从而显著提高混凝土的抗压强度。