



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

桥梁工程 (下册)

夏 禾 主 编

季文玉 韩 冰 张 楠 副主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

桥梁工程 (下册)

QIAOLIANG GONGCHENG

夏禾 主编

季文玉 韩冰 张楠 副主编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书是北京高等教育精品教材,从“宽口径”土木工程专业的要求出发,综合考虑铁路、公路及城市桥梁的特点编写而成。

全书分为上、下两册,上册适用于土木工程专业本科生学习,通过学习使学生能基本掌握城市、公路及铁路常用中、小跨径桥梁设计和施工的基本知识;下册适用于土木工程专业选修桥梁课群组的本科生使用。各章内容相对独立,可根据需要选学,通过学习使学生掌握较复杂的大、中型桥梁设计与施工的基本知识,以及桥梁振动、抗震与抗风、桥梁检定与评估等方面的初步知识。

本书为下册,分为10章,内容包括:混凝土连续梁和刚构桥、拱桥、组合梁桥、悬索桥、斜拉桥、城市桥梁、高速铁路桥梁、桥梁振动、桥梁抗震与抗风、桥梁检定与评估等。

本书可作为高等院校土木工程专业及相关专业教材,也可供从事桥梁工程研究、设计和施工的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁工程.下册/夏禾主编. —北京:高等教育出版社, 2011.1

ISBN 978-7-04-030887-7

I. ①桥… II. ①夏… III. ①桥梁工程-高等学校-教材 IV. ①U44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 246101 号

策划编辑	赵湘慧	责任编辑	赵湘慧	封面设计	王 晔	责任绘图	尹 莉
版式设计	王艳红	责任校对	王 雨	责任印制	毛斯璐		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 唐山市润丰印务有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 26.75
字 数 660 000

版 次 2011 年 1 月第 1 版
印 次 2011 年 1 月第 1 次印刷
定 价 40.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 30887-00

前 言

20 世纪 80 年代以来,随着我国铁路、公路、城市轨道和道路等交通基础设施的持续发展,桥梁建设的规模、速度和技术创新都进入了一个飞速发展的黄金时期,建成了一大批结构新颖、技术先进、设计和施工难度大、具有高科技含量的现代化桥梁,取得了令国人自豪、世界瞩目的成就。近年来,我国相继建成了重庆朝天门大桥,主跨 552 m,为世界第一拱桥;苏通长江大桥,主跨 1 088 m,为世界第一斜拉桥,西堠门大桥,主跨 1 650 m,为世界第二悬索桥。京沪高速铁路南京大胜关公铁两用长江大桥,具有 6 线铁路,其规模和跨度都达到了世界铁路拱桥之最。目前,我国在桥梁跨度方面已经占据了混凝土梁(刚构)桥、拱桥、斜拉桥三种桥式的世界纪录。在世界十大跨径拱桥中我国占 6 座,十大跨径斜拉桥中我国占 8 座,十大跨径悬索桥中我国占 5 座。我国桥梁建设正在从桥梁大国向桥梁强国迈进,桥梁工程从理论到实践都发生了质的飞跃,这对桥梁工程的创新与发展提出了更高的要求,对“桥梁工程”课程教学也提出了新的挑战和需求。

北京交通大学是新中国成立后较早建立土建类本科专业的高等学校,桥梁工程是我校土木工程专业特色方向之一,已有近 60 年的历史,在教学和科学研究方面具有传统的优势。我校桥梁与隧道工程学科 1986 年被评为铁道部重点学科,2007 年被评为国家重点学科;土木工程专业 1999 年通过住房和城乡建设部专业评估,2004 年和 2009 年通过复评,2008 年被评为北京市和国家级特色专业建设点;“桥梁工程”课程于 2006 年被评为北京市精品课程,2009 年被评为国家精品课程;《桥梁工程》教材 2009 年被评为北京高等教育精品教材建设项目。

根据全国高等学校土木工程专业指导委员会制订的培养方案,“桥梁工程”是土木工程专业的一门专业主干课程。本教材是从“宽口径”土木工程专业的要求出发,综合考虑铁路、公路及城市桥梁的特点,结合现行规范编写而成。全书分为上、下两册。

上册适用于土木工程专业本科生学习,按 48 学时左右安排。共分 10 章:第 1 章国内外桥梁建设的历史和现状,桥梁的组成、类型和基本结构体系;第 2 章桥梁的规划与设计;第 3 章桥梁设计作用(荷载);第 4 章桥面构造;第 5~8 章混凝土简支梁桥、钢梁桥、桥梁支座、梁桥墩台及基础的构造、设计及计算方法;第 9 章桥涵水文和桥渡设计;第 10 章涵洞。通过学习使学生能基本掌握城市、公路及铁路常用中、小跨径桥梁设计和施工的基本知识。

下册适用于土木工程专业选修桥梁课群组的本科生使用,各章内容相对独立,可根据需要灵活选学,用 32~64 学时讲授。共分 10 章:第 11~17 章混凝土连续梁和刚构桥、拱桥、组合梁桥、悬索桥、斜拉桥等大跨径桥梁及城市桥梁、高速铁路桥梁的结构构造特点、设计的基本内容、分析方法及其施工特点;第 18~20 章桥梁振动、桥梁抗震与抗风及桥梁检定与评估的基本内容。通过学习使学生掌握较复杂的大、中型桥梁设计与施工的基本知识,并了解各种桥梁设计规范的区别和联系,以及桥梁振动、抗震与抗风等方面的初步知识。

本书由北京交通大学夏禾担任主编,季文玉、韩冰、张楠担任副主编,负责确定各章节内容、制订编写大纲及全书的统稿工作。上册由夏禾(第 1 章),季文玉(第 3、8、10 章),闫志刚(第 4

II 前言

章),杨丽辉(第5章),高日(第6章),韩冰、赵冠远(第7章),齐梅兰(第9章),北方工业大学韩艳(第2章)共同编写。下册由雷俊卿(第11、14、15章),韩冰(第12章),刘保东(第13章),朱尔玉、杜近生(第16章),张楠(第17章),郭薇薇(第18章),刘保东、郭薇薇、赵冠远(第19章),战家旺(第20章)共同编写。

由于作者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2010年10月

目 录

第 11 章 混凝土连续梁和刚构桥	1	15.5 斜拉桥实例	192
11.1 概述	1	思考题	207
11.2 混凝土连续梁桥的构造	3	第 16 章 城市桥梁	208
11.3 混凝土连续梁桥的设计	10	16.1 概述	208
11.4 混凝土连续梁桥的施工	17	16.2 城市高架桥	210
11.5 混凝土刚构(架)桥	24	16.3 跨座式单轨交通轨道梁桥	233
11.6 地道桥	33	16.4 磁浮铁路轨道梁桥	250
思考题	44	思考题	255
第 12 章 拱桥	46	第 17 章 高速铁路桥梁	256
12.1 概述	46	17.1 概述	256
12.2 拱桥的构造特点	49	17.2 高速铁路桥梁的特点	274
12.3 拱桥结构设计计算	62	17.3 高速铁路桥梁设计方法	275
12.4 拱桥施工	75	17.4 高速铁路桥梁设计实例	283
思考题	86	17.5 高速铁路预应力混凝土整孔箱 梁的架设施工	289
第 13 章 组合梁桥	87	思考题	296
13.1 概述	87	第 18 章 桥梁振动	297
13.2 组合钢板梁桥	96	18.1 桥梁振动问题	297
13.3 其他形式的组合梁桥	104	18.2 列车作用下桥梁的振动问题	305
13.4 组合梁桥的制造与架设	118	18.3 车桥系统共振问题	325
思考题	124	思考题	332
第 14 章 悬索桥	125	第 19 章 桥梁抗震与抗风	333
14.1 概述	125	19.1 概述	333
14.2 悬索桥的结构形式及构造特点	126	19.2 桥梁抗震	344
14.3 悬索桥结构设计理论	133	19.3 桥梁抗风	363
14.4 悬索桥的锚碇与主塔设计	137	思考题	376
14.5 悬索桥的缆索系统设计	140	第 20 章 桥梁检定与评估	377
14.6 悬索桥的主梁设计	145	20.1 概述	377
14.7 悬索桥的制造与架设	148	20.2 基于静载试验的桥梁检定评估 技术	379
14.8 悬索桥的工程实例	155	20.3 基于动力荷载试验的桥梁检定 评估技术	400
思考题	167	思考题	419
第 15 章 斜拉桥	168	参考文献	420
15.1 概述	168		
15.2 斜拉桥的基本构造与结构体系	170		
15.3 斜拉桥的设计与计算分析	175		
15.4 斜拉桥的施工	180		

第 11 章

混凝土连续梁和刚构桥

11.1 概述

混凝土连续梁、连续刚构、连续梁与刚构组合体系桥梁是我国桥梁建设中的常见桥型。连续梁桥按材料主要分为钢梁桥、结合梁桥和预应力混凝土梁桥。本章主要介绍混凝土连续梁桥和连续刚构桥。

11.1.1 连续梁桥的发展历程

1. 国外连续梁桥的发展历程

从 1886 年至 1928 年,预应力混凝土技术经历了尝试、发明、试运用的过程,1928 年法国人 E. Freyssinet 开始采用高强度钢丝施加预应力,标志着现代预应力混凝土进入一个新的发展阶段。1939 年,在发明了安全又经济的张拉方法和端头锚具后,预应力混凝土技术开始得到广泛的应用。

第二次世界大战后,预应力混凝土技术从理论、材料、工艺到工程应用都取得了巨大的发展。尤其是随着部分预应力概念的逐步成熟,突破了混凝土不能受拉与开裂的约束,大大扩展了它的应用范围,成为预应力梁桥结构体系发展的一个新方向。

连续梁桥的发展中存在着两个突破方向:一个是向大跨径发展,这方面较有代表性的有南斯拉夫的主跨 210 m 的 Danube River 桥和瑞士的主跨 192 m 的 Mosel 桥;另一个是向超长连续长度发展,这方面较有代表性的为英国的主跨 190 m 的全连续长度 1 288 m 的 Orwell 桥。1985 年建成的澳大利亚的主跨 260 m 的 Gateway 桥曾居世界最大混凝土梁式桥跨径纪录达 12 年之久。

20 世纪 40 年代后期,预应力混凝土预制分段拼装施工技术开始发展。1945 年—1948 年, E. Freyssinet 采用预制块件拼装施工在 Marne 河上建造了 Luzancy 桥。此后不久,德国工程师 U. Finsterwalder 在跨越莱茵河的桥梁施工中,首次采用了预应力混凝土现浇平衡悬臂施工技术。1952 年,跨径超过 100 m 的预应力混凝土桥梁——德国跨越莱茵河的 Worms 桥建成。从此,这种平衡悬臂施工体系得到了广泛的应用并很快推广到世界各地。20 世纪 60 年代至 70 年代,在跨径 100 m 到 200 m 范围内的桥型比选中,几乎均是预应力混凝土梁桥成为优胜方案。

连续刚构桥在墩顶是一个墩梁固结的 T 型结构,在跨中合龙区域是一个连续结构。其上部主梁的受力与连续梁桥大致类似。下部桥墩由于结构的整体性,温度和收缩徐变造成的内力十

分显著,但一般来讲,如果全连续长度在 600 m 左右,桥墩的受力基本没有问题。这方面较有代表性的为 1999 年建成的挪威的主跨 298 m,全长 711 m (86 m + 202 m + 298 m + 125 m) 的 Raft Sundet 桥。

2. 国内连续梁桥的发展历程

国内采用平衡悬臂施工方法建造的第一座预应力混凝土 T 型刚构桥是 1965 年建造于河南汤阴的五陵卫河桥,跨径组合为 25 m + 50 m + 25 m,主跨跨中设剪力铰。很快,这种施工方法就显示出了强大的生命力,1968 年建成了主跨 124 m 的广西柳州桥,1971 年建成了主跨 144 m 的福建乌龙江大桥,1981 年建成了主跨 158 m 的湖北宜昌葛洲坝三江大桥,目前国内最大的设剪力铰的预应力混凝土 T 型刚构桥是 1980 年建成的主跨 174 m 的重庆长江大桥。

1960 年建成的山东济宁跃进桥是我国最早采用 3 跨变截面钢筋混凝土薄壁箱形结构的连续梁桥。但在随后一段时间内,这种结构形式没有多大的发展。直到 20 世纪 80 年代中期,由于计算机技术的发展,T 型刚构桥逐步失去市场,连续梁桥成为混凝土桥梁的主要选择桥型。1984 年建成的湖北沙洋汉江大桥,桥跨布置为 62.4 m + 6 × 111 m + 62.4 m,全长 790.8 m,是我国首座跨径超越百米的预应力混凝土连续梁桥。有代表性的连续梁桥还有 1986 年建成的主跨 120 m 的湖南常德沅水大桥;1991 年建成的主跨 154 m 的云南六库怒江大桥;主跨 100 m、全连续长度为 1 308 m 的襄樊汉江大桥;主跨 80 m、全连续长度 1 340 m 的杭州钱塘江二桥。目前国内最大的预应力混凝土连续梁桥是主跨 165 m 的南京长江第二大桥北汊桥。

随着预应力混凝土连续梁桥跨径的增大,这种结构的支点反力大幅度地增加:一座跨径在 170 m 左右、桥面宽在 12 m 左右的连续梁桥,一个桥墩上往往需要至少安装 2 个承载能力在 4 000 t 以上的巨型支座。巨型支座的设计制造和后期养护变成了一个十分重要的问题,同时造价也非常昂贵。现阶段国内外大反力支座绝大部分为盆式橡胶支座,桥梁运营几十年后,由于橡胶的老化使支座性能降低而引发的支座更换问题,将成为一个新的难题。

T 型刚构桥由于是墩梁固结结构,因此没有连续梁桥支座的问题,在墩顶与主梁底这一区域,构造和受力远较连续梁桥简单。将 T 型刚构桥不设支座的优点和连续梁桥上部变形连续、使用性能好的优点结合起来,即出现了连续刚构桥。连续刚构桥在墩顶是一个墩梁固结的 T 型结构,在跨中合龙后是一个连续结构。其上部主梁的受力与连续梁桥类似。下部桥墩由于结构的整体性,温度和收缩徐变造成的内力十分显著,但一般来讲,如果全连续长度在 600 m 左右,桥墩的受力基本没有问题。

由于有大跨径 T 型刚构桥和大跨径连续梁桥建造的基础,国内的连续刚构桥一开始就有较高的起点。1988 年建成的广东洛溪大桥为我国较早的连续刚构桥,该桥的跨径组合为 65 m + 125 m + 180 m + 110 m,全长 480 m,其主跨径当时居亚洲混凝土梁式桥之首、世界第七。30 多年来,连续刚构桥取得了很大的发展,跨径纪录屡屡被打破,较有影响的桥梁有 1993 年建成的主跨 160 m 的三门峡黄河大桥,1996 年建成的主跨 245 m 的湖北黄石长江大桥等。1997 年建成的主跨 270 m 的虎门大桥辅航道桥,其主跨当时居世界混凝土梁式桥第一位。2006 年建成的主跨 330 m 的重庆石板坡长江大桥复线桥,是现在世界第一大跨径的刚构桥。

据不完全统计,目前我国已建和在建的跨径在 100 ~ 200 m 之间的混凝土梁桥已有 100 多座,跨径超过 200 m 的连续刚构桥已有 20 多座,所以大跨径预应力混凝土梁(刚构)桥在我国发挥着非常重要的作用。

11.1.2 连续梁桥的发展趋势

桥梁的全连续长度越长,下部的刚度越大,则桥墩在温度和收缩徐变作用下的内力越大。在一些温差大的区域,这一因素往往决定着连续刚构桥型方案是否可取。因此,在一些采用长连续、大跨径连续桥型的方案中,出现了刚构和连续梁的组合形式——连续刚构梁桥。在这种桥式中,中间若干孔采用墩梁固结刚构形式,而其他孔采用墩顶设支座的连续梁形式,这样既改善了下部桥墩的受力条件,又尽可能地简化了结构,节省了支座的费用。有代表性的桥梁是1993年建造的山东东明黄河大桥,全长990 m($75\text{ m}+7\times 120\text{ m}+75\text{ m}$),中间四个主墩为墩梁固结,两边各两个主墩设支座。在预应力混凝土梁式桥范畴内,连续刚构梁桥是现在桥梁设计优先采用的桥型。

从目前来看,连续刚构梁桥有以下几点发展趋势:

① 跨径进一步增大。国外已建成主跨跨径达301 m的Stolma桥。我国2009年建成的重庆石板坡大桥复线桥跨径组成为: $86.5\text{ m}+4\times 138\text{ m}+330\text{ m}+132.5\text{ m}$,是世界上跨径、规模最大的连续梁与连续刚构混合体系桥梁。可以预期在不久的将来,连续刚构桥将会取得跨度上的进一步突破。

② 上部结构不断轻型化。采用高强、轻质、具有良好耐久性的混凝土,或者是钢和混凝土的结合以及混合的应用,减轻上部结构自重是混凝土桥梁向大跨径迈进的必由之路。

③ 预应力束的类型和布置方式不断简化。大吨位锚固张拉系统,更多样化的预应力束,以及更完善的布置方式将会越来越多地在连续刚构梁桥中得到应用。

④ 施工工艺不断完善,落地支架施工方法将逐步被取消。

⑤ 为适应桥址处的地形特点,下部结构将更加轻型化和多样化。

⑥ 三向预应力技术将得到更广泛地应用。采用三向预应力技术使得连续刚构梁桥可以使用长悬臂顶板的单箱截面,这样既可以节约材料、减轻上部结构自重,又可以充分利用悬臂施工方法的特点加快施工进度。

11.2 混凝土连续梁桥的构造

11.2.1 立面布置

预应力混凝土连续梁桥的立面布置包括结构的体系安排、桥跨布置、梁高选择等,可以设计成等跨或不等跨、等截面或变截面的结构形式(图11.1)。结构形式的选择主要考虑结构受力合理性,同时还与施工方法密切相关。

1. 桥跨布置

根据连续梁的受力特点,大、中跨径的连续梁桥一般宜采用不等跨布置,但多于三跨的连续梁桥其中间跨一般采用等跨布置。当采用三跨或多跨的连续梁桥时,为使边跨与中跨的最大正弯矩相近,达到经济的目的,边跨取中跨的0.8倍为宜;当综合考虑施工和其他因素时,边跨一般取中跨的0.5~0.8倍。对于预应力混凝土连续梁桥宜取偏小值,这样可以增加边跨刚度,减小活载弯矩的变化幅度,减少预应力筋的数量。但边跨过小时,会在边跨支座上产生拉力,需在桥

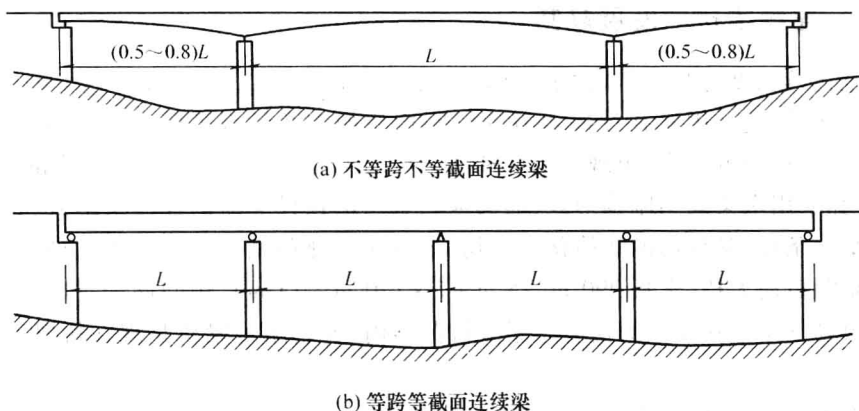


图 11.1 连续梁立面布置

台上设置拉力支座或压重。当受到桥址处地形、河床断面形式、通航(车)净空及地质条件等因素的限制并且总桥长受到制约时,可采用多孔小边跨与较大的中间跨相配合,跨径从中间向外递减,以使各跨内力峰值相差不大。

桥跨布置还与施工方法密切相关。长桥及选用顶推法施工或者先简支后连续法施工的桥梁,多采用等跨布置,这样做结构简单、模式统一。等跨布置的跨径大小主要取决于经济分跨和施工的设备条件。

连续梁跨数以三跨采用得最为广泛。连续跨数超过五跨时的内力虽然与五跨时相差不大,但连续梁过长会造成梁端伸缩量很大,需设置大位移量的伸缩缝,因此,连续跨数一般不超过五跨。

2. 梁高选择

(1) 变截面连续梁桥

连续梁桥采用变截面梁有很多优点:支点截面负弯矩比跨中正弯矩大,采用变截面形式符合受力特点;变截面梁一般采用悬臂法施工,变高度梁与施工阶段内力相适应;从美学观点看,变高度梁比较有韵律感。

变截面梁的梁底线形可采用折线、抛物线、圆曲线和正弦曲线等。其中二次抛物线与连续梁的弯矩变化相适应,最常采用。根据已建成桥梁的资料分析,支点梁高 H_s 约为最大跨径 l_m 的 $1/15 \sim 1/20$,跨中梁高 H 约为支点梁高 H_s 的 $1/1.6 \sim 1/2.5$ 。

(2) 等截面连续梁桥

连续梁桥采用等截面布置,构造简单、预制定型、施工方便,随着施工方法的发展愈来愈受到重视。对于中等跨径 $40 \sim 60 \text{ m}$ 的连续梁桥,若采用预制装配施工和就地浇筑施工,为便于预制安装和模板周转使用,宜选用等截面布置;若采用顶推法施工,为便于布置顶推和滑移设备,一般采用等截面梁。对于中等跨径的长桥,采用逐跨架设施工和移动模架法施工以及整孔架设,按等截面布置最为有利,它可以使用少量施工设备完成全桥的施工。

等截面连续梁桥的梁高,在拟定时可参考有关资料,按梁高与最大跨径的关系 $H = (1/15 \sim 1/30)l_m$ 选用。当桥梁的跨径较大,采用顶推法施工时,梁高的选择不仅取决于桥梁的跨径,还要

考虑顶推施工对梁高的要求。为了避免顶推法施工时最大悬臂的不利受力状态,通常可设置临时墩;不设置临时墩时,梁高与顶推跨径之比选在 $1/12 \sim 1/15$ 为宜。

11.2.2 横向布置

预应力混凝土连续梁桥的截面形式很多,一般应依据桥梁的跨径、宽度、梁高要求、支承条件、桥梁的总体布置和施工方法等确定。合理选择主梁的截面形式对减轻梁的重量、节约材料、简化施工和改善截面的受力性能都具有重要的意义。

预应力混凝土连续梁桥常用的横截面形式有板式(包括空心板)、T形梁式(包括宽肋梁)和箱形梁式(图 11.2)。

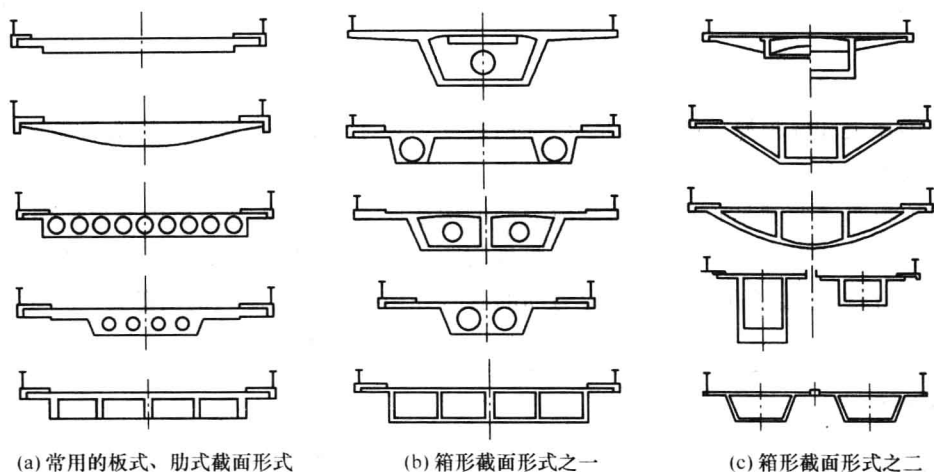


图 11.2 连续梁桥典型截面形式图

1. 板式和肋式截面

板式和肋式截面一般只适用于中、小跨径的连续梁桥,如图 11.2a 所示。板式桥构造简单,施工方便,建筑高度小,在高架道路上用得较多。在板式截面中,矩形实体截面已较少使用,代替它的是曲线形整体截面。当桥墩在横截面上是 Y 形支承时,可选取双峰形实体截面。实体截面的连续梁桥常采用在支架上现浇施工。空心板截面常用于跨径 $15 \sim 30$ m 的连续梁桥,板厚可取 $0.8 \sim 1.2$ m。

肋式截面预制方便,常采用预制架设施工,并在梁段安装完之后,经体系转换为连续梁桥。常用跨径为 $30 \sim 50$ m,梁高一般取 $1.6 \sim 2.5$ m。为简化多肋 T 梁的施工,也有采用宽矮肋的单 T 断面,肋宽可达 $3 \sim 4$ m,外悬长翼板,称之为脊形梁或异形结构。总体来说,由于肋式截面肋的宽度不大,布置钢筋受到限制,在负弯矩区承压面积小,因此应用不多。

2. 箱形截面

当连续梁的跨径超过 $40 \sim 60$ m 时,主梁多采用箱形截面。箱形截面为闭口截面,具有良好的抗弯和抗扭性能,并且箱形截面有顶板和底板,在跨中或支座部位都能有效地抵抗正负弯矩。图 11.2b 所示为常用的箱形截面,其中单箱单室截面多用在顶板宽度小于 18 m 的桥梁,单箱双室截面适用于顶板宽度 25 m 左右;双箱单室截面顶板宽度可达 40 m 左右,圆空式单箱双室截面

适用于顶板宽度 15 m 左右,单箱多室截面的桥梁宽度可不受限制。此外,箱形截面还有单箱三室、双箱双室、多箱单室等。

单箱单室截面受力明确、施工方便、节省材料用量。因此,当桥宽在 20 ~ 25 m 范围时,有不少桥梁采用单箱单室截面,但需要在截面构造上采取一定的措施。如图 11.2c 所示,为了加强长悬臂板的抗弯刚度,可采用横梁加劲、斜撑加强,或在顶板上设置横向预应力筋,以后者最为常见。

直腹板箱梁构造简单,施工方便,主要用于箱宽不大时。斜腹板箱梁可减小底板的横向跨度,节省下部结构的圬工量,还能有效地减小迎阳面积,改善风的攻角,改善温度应力和抗风性能,但模板制造较复杂。

分离式箱梁(图 11.2c)的特点是结构简单,受力明确,横向分布系数小,施工时可分箱进行,施工简单。

(1) 顶板和底板厚度

箱形梁顶板和底板厚度既要满足纵、横向的受力要求,又要满足结构构造及施工上的需要。其选定原则如下:

箱梁顶板厚度要满足布置纵、横预应力筋的构造要求,同时还要满足桥面板横向弯矩的受力要求。不设横向预应力筋时,顶板厚度与腹板间距的关系可以参考表 11-1 选取。当设有横向预应力筋时,顶板厚度需足够布置预应力筋的套管并留有混凝土注入的间隙。

表 11-1 腹板间距与顶板厚度

腹板间距/m	3.5	5.0	7.0
顶板厚度/cm	20	22	28

顶板两侧悬臂板的长度是调节顶板内弯矩的重要因素,一般采用 2 ~ 5 m。当长度超过 3 m 后,一般需布置横向预应力筋。

对于变截面连续梁,箱梁跨中底板厚度一般按构造选定:若不配预应力筋,厚度可取 18 ~ 22 cm;若配有预应力筋,厚度一般为 20 ~ 25 cm。

在负弯矩区特别是在靠近桥墩截面的底板,要承受较大的负弯矩,由于底板的宽度比顶板小得多,底板的厚度要比顶板大,以适应受压要求。底板厚度在墩顶处一般为支点梁高的 1/10 ~ 1/12,由支点对跨中逐渐减小。

对于顶推法施工的等高连续梁,由于施工过程中截面承受交变的正负弯矩,底板往往设计成等厚。

(2) 腹板厚度

跨中腹板厚度的选定,主要取决于布置预应力筋和浇筑混凝土必要的间隙等构造要求。一般情况下可按以下原则选用:腹板内无预应力筋时,可取 20 cm;腹板内有预应力筋时取 25 ~ 30 cm,有预应力锚固头时取 35 cm。为满足支点较大剪应力的要求,墩上或靠近桥墩的箱梁根部腹板需加厚到 30 ~ 60 cm,特殊情况可达 100 cm。大跨度桥腹板应采用变厚度形式,从跨中向支点分段逐步加厚,变厚段一般为一个节段长。为方便施工,简化内模构造,中、小跨径连续梁桥腹板一般采用等厚度形式。

3. 横隔板(板)

采用 T 形截面的连续梁桥,其横截面的抗扭刚度较小,为增加桥梁的整体性和横向刚度,一般均需设置中横隔板和端横隔板。中横隔板的数目、位置及构造与简支梁相同。

箱形截面的抗弯刚度和抗扭刚度较大,除在支点部位设置横隔板外,中间横隔板的数目较少,即使有横隔板,对横向刚度影响并不显著,反而增加了施工难度,目前的趋势是少设或不设中间横隔板。对于弯、斜梁,设置中横隔板的效果明显,厚度可取 15 ~ 20 cm。

箱梁支点处端横隔板的尺寸和配筋形式与箱梁的支承方式有关。当支座直接位于主梁腹板之下时,端横隔板的主要作用是增加箱梁横向刚度,限制箱梁的畸变,横隔板厚度为 30 ~ 50 cm,横隔板中只需配置一定数量的普通钢筋(图 11.3)。当支座设置在横隔板中部时,横隔板还要承担传递支反力的作用,是重要的受力结构,如采用普通钢筋混凝土结构,横隔板内的抗剪、抗弯及抗裂钢筋交错密布,导致混凝土浇筑困难且不易振捣密实;而如果采用预应力混凝土,横隔板厚度一般小于 80 cm,横隔板中设置曲线形的预应力筋,如图 11.4 所示,则可避免钢筋混凝土横隔板所产生的弊病。为满足施工、维修和通风的要求,横隔板上一般设置过人洞。

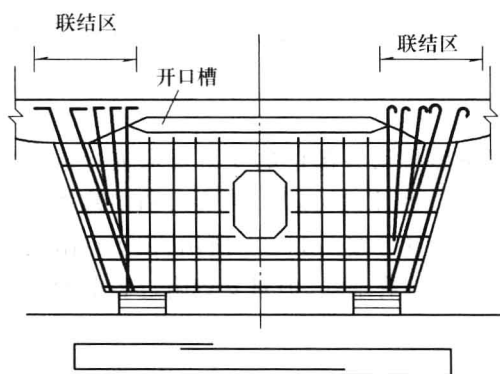


图 11.3 箱梁中的横隔板配筋示意图

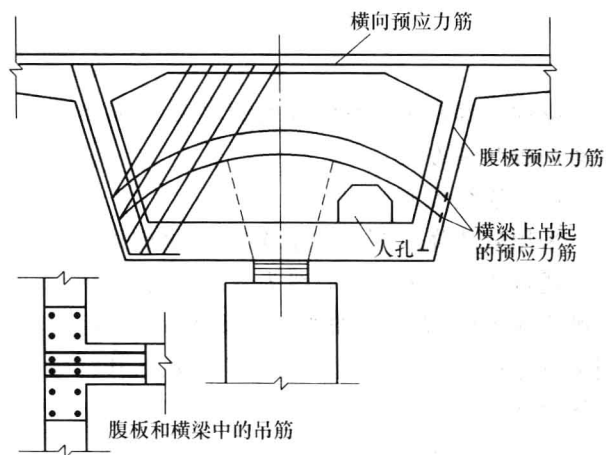


图 11.4 箱梁中横隔板的预应力筋布置示意图

11.2.3 预应力筋构造

连续梁纵向预应力筋为主筋,其数量与布置位置根据使用阶段及施工阶段受力要求确定。此外,在大跨度梁腹板内常布置竖向预应力筋,跨度较大的箱梁顶板和悬臂板内也常布置横向预应力筋。

在顶推法连续梁或分跨施工连续梁中,有时部分主筋需要逐段接长,接长的方法常采用连接器完成。我国目前常用的一种连接器的构造如图 11.5 所示,它用于高强钢丝束主筋和锚头锚。施工时先张拉锚环 A,并用螺帽锚固。锚环 B 由连接器接长使用。螺丝结合的连接需要一定的加工精度,施工也较麻烦,但它比起分段张拉、分段锚固的钢束要节省钢材。

为施工需要而设置的临时筋,在施工完成后予以解除,常用的作法是将临时筋与永久筋用连接器接长张拉,在施工期间临时束不压浆,待施工结束后割断连接器与临时筋的锚头。当然,这

种方法比较复杂,既要预留孔道,又要张拉锚固,施工完成后还有解除的工序。如果将临时筋设置在梁体外,临时沿箱内壁锚固,则在构造和施工上要简单许多。还有一种方法是通过控制张拉力来满足使用阶段和施工阶段的不同要求:预应力筋的张拉力先按施工要求张拉,施工完成后,再张拉到设计要求。这样做的优点是便于布束,并可满足不同阶段的受力要求;缺点是张拉工艺较复杂,在施工阶段不能压浆,预应力筋和锚头必须选择便于重复张拉的类型,对于施工期较长的桥梁,还需考虑力筋的防锈问题。当施工阶段的受力大于使用阶段的受力时,或当施工阶段与使用阶段的预应力筋用量相差甚大时,不宜采取此法。

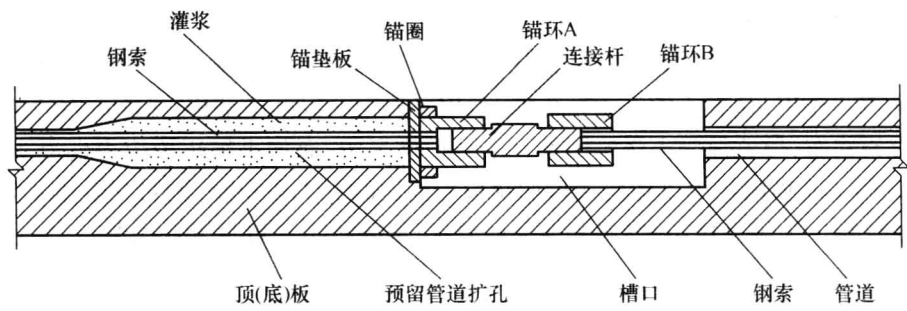


图 11.5 预应力筋连接器

纵向主筋常采用钢绞线或钢丝束,布置方式有:连续配筋、分段配筋、逐段接长预应力筋、体外布筋等几种方式。

(1) 连续配筋

采用就地浇筑施工的连续梁,其纵向预应力筋可以按照桥梁各部位的受力要求进行连续配束。通常预应力筋的重心线为二次抛物线组合而成的轨迹,如图 11.6a 所示,边跨和中跨都由多段抛物线组成,而正反曲线间有反弯点。预应力筋的具体布置可按图 11.6b 所示,在支点附近分别由负弯矩区转向正弯矩区,这样做虽然从抗弯的角度上看稍有削弱,但对支点附近各截面的抗剪能力却有较大提高。

(2) 分段配筋

分段配筋是悬臂施工和先简支后连续法施工连续梁最常用的配筋方式。

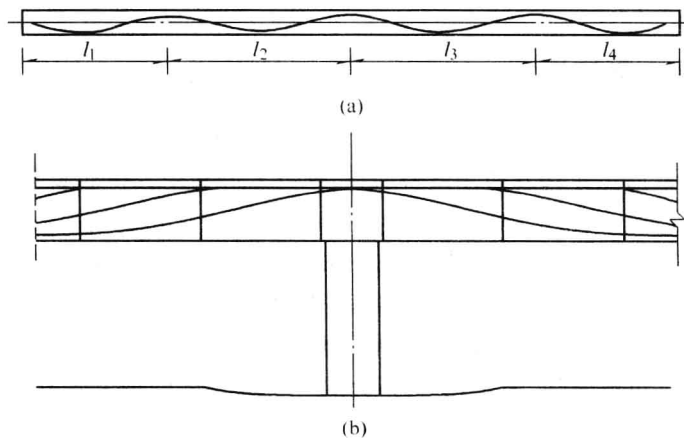


图 11.6 连续配筋的预应力筋布置

悬臂施工的连续梁桥,是从墩顶开始向左右对称悬臂施工,为了能支承梁体自重和施工荷载,需在悬臂施工时预加应力。在体系转换时,再张拉正弯矩预应力筋并补充其他在使用阶段所需要的预应力筋,这部分预应力筋又称二次张拉预应力筋或后期预应力筋。图 11.7 给出了悬臂施工连续梁桥预应力筋的一般构造,其中实线筋为在施工过程中张拉的预应力筋,虚线筋是在体系转换时张拉的后期预应力筋。

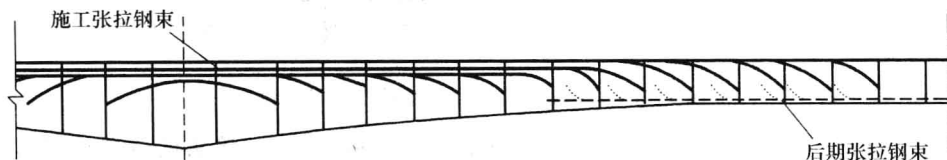


图 11.7 悬臂施工连续梁分段配筋示意图

预应力筋在截面上呈对称布置,并尽量安排在腹板附近。预应力筋数量较多时可分层布置,一般是先锚固下层预应力筋,后锚固上层预应力筋。预应力筋分为直筋和弯筋,根据结构各部位弯矩和剪力的要求确定,其中弯筋均通过腹板下弯锚固。当非腹板位置的预应力筋需要进入腹板弯曲时,首先进行平弯至腹板位置,然后在腹板平面内竖弯。预应力筋的弯起半径和弯起角按规范和有关资料确定。

对于预制安装先简支后连续法施工的连续梁桥,它们的预应力筋也是采用分段配筋(图 11.8)。预制构件在预制时根据其受力情况及考虑吊装的需要先行配筋张拉,简支段安装就位后,在墩顶部位布置二次张拉预应力筋,然后进行二次张拉。

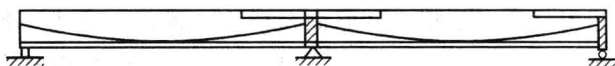


图 11.8 先简支后连续法施工连续梁的分段配筋示意图

(3) 逐段接长预应力筋

采用顶推法施工的连续梁桥,顶推施工阶段与使用阶段梁的受力状况差异较大,为兼顾两个阶段的受力需要,钢束常分前期张拉预应力筋和后期张拉预应力筋(图 11.9)。在施工过程中,箱梁的每一截面均会出现最大的正、负弯矩。前期筋为顶推施工需要而设置,通常在截面的上、下缘配置直线筋。又因为顶推法施工的程序是逐段预制,逐段顶推,分段张拉预应力筋,为了既要满足节段所需预应力筋的数量,又要方便施工,采用预应力筋接长张拉是很合适的。预应力筋接长使用连接器,预应力筋的长度选取两个梁段的长度,每个施工面上有半数预应力筋通过,半数预应力筋需进行接长,连接器间隔排列(图 11.10)。这样可以减少连接器的数量,改善主梁受力,节省钢材,简化施工。

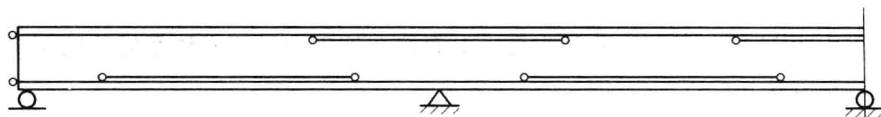


图 11.9 顶推法施工连续梁桥配筋示意图

后期筋是依照使用阶段要求补充设置的预应力筋,配置在支点截面的顶部和跨中截面的底部。为了改善腹板的受力情况,解决近支点截面主拉应力过大的问题,可在支点附近设置弯筋。

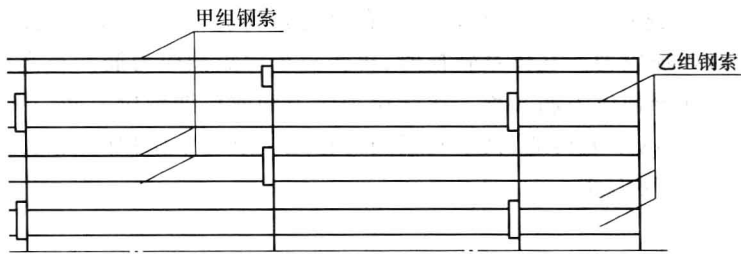


图 11.10 逐段接长预应力筋的横向导向设施

逐孔施工的连续梁桥,其主束布置往往也采用逐段接长配筋,接头的位置可设置在支点截面,也可设在离支点约 $1/5$ 跨径附近弯矩较小的部位。

(4) 体外布筋

体外布筋是将预应力筋设置在主梁截面以外的箱内,利用横隔梁、转向块等结构物对梁施加预应力。体外布筋不削弱主梁截面,不需预留孔道,预制节段的拼装可采用干缝结合,施工方便迅速,便于更换。但它对预应力筋、结构及管道防护设施要求都较高,结构的极限承载能力降低,耐疲劳及耐腐蚀性较差。

综上所述,预应力混凝土连续梁桥的主筋布置方式是多种多样的,它与所运用的施工方法有密切的关系。不同的施工方法要求不同的预应力筋布置,而预应力筋的数量则取决于结构的受力——使用阶段和施工阶段的综合考虑。

(5) 横向和竖向布筋

在设计中,有时需要对结构施加横向和竖向预应力。横向预应力一般施加在横隔梁内或顶板内,主要作用是加强桥梁的横向联系或提高悬臂板的抗弯能力;而竖向预应力筋布置在腹板内,主要作用是提高截面的抗剪能力。

横向和竖向的预应力筋都比较短,常采用钢绞线、钢丝束,也可选用精轧螺纹钢筋,在预留孔道内按后张法工艺施工。

11.3 混凝土连续梁桥的设计

预应力连续梁桥设计内容包括结构恒载内力计算、结构活载内力计算,同时由于连续梁为超静定结构,混凝土收缩及徐变作用、预加力等会在结构中产生次内力,因此还应进行结构次内力计算。

11.3.1 结构自重作用下的内力计算

结构自重内力与施工方法有很大关系。下面按在施工中是否有体系转换情况分别介绍结构自重内力的计算方法。

1. 无结构体系转换时的结构自重内力计算

若采用满堂支架现浇混凝土等施工方案,当结构自重作用于桥上时主梁结构已形成最终体系,结构内力可按结构力学中常用的方法计算。例如,采用弯矩分配法用手工计算,解析现成的图表能够获得足够精确的结果;采用平面杆系或空间有限单元法进行计算机分析,是目前最常用

的计算方法。结构内力也可采用影响线加载法计算,其计算公式如下:

$$S_{G1} = \int_0^l g(x)y(x)dx \quad (11-1)$$

式中, S_{G1} ——主梁结构自重内力(弯矩或剪力);

$g(x)$ ——主梁自重集度;

$y(x)$ ——相应的主梁内力影响线坐标;

L ——梁全长。

如果是等截面梁,其自重集度 $g(x)$ 沿桥长均布,则 S_{G1} 可按均布荷载乘主梁内力影响线总面积计算。

2. 有结构体系转换时的结构自重内力计算

有结构体系转换时的结构自重内力与施工方法相关,可采用结构力学方法按施工阶段分别计算各阶段的内力,然后按叠加原理计算总的结构自重内力。

下面以一座五跨连续梁桥采用悬臂拼装法施工为例,详细介绍有结构体系转换时的结构自重内力计算方法。如图 11.11 所示,该桥的施工程序及各阶段的内力状态如下:

① 悬拼完毕,吊机拆除。首先在所有桥墩内预埋铁件,安装扇形支架,浇筑墩顶节段。临时支座为混凝土块,设在永久支座两侧,用直径 32 mm 的钢筋将墩顶节段临时锚固在桥墩上,以保证从墩顶向墩两侧对称悬臂拼装的稳定性。悬拼完毕时的恒载内力如图 11.11a 所示。

② 现浇边跨部分。因为边跨长度大于悬臂拼装长度,所以需在边跨内另立排架,现浇部分节段与边跨的悬臂拼装相接。此时为一端固定、一端简支的梁,它在现浇段自重作用下的恒载内力如图 11.11b 所示。

③ 拆除 2 号墩、5 号墩上的临时支座,由一端固定、一端简支的梁转换成两端简支的单悬臂结构。这时,计算临时支座所释放的不平衡弯矩在两端简支的单悬臂上所产生的内力(图 11.11c)。

④ 将边跨的单悬臂梁与 3 号(4 号)墩的 T 构通过现浇合龙段合龙。这时,计算单悬臂梁和 T 构在支架、模板重量合龙段自重作用下的内力(图 11.11d)。

⑤ 合龙段支架模板拆除后,上述重量从相反方向加在已合龙的结构体系上,计算所产生的内力(图 11.11e)。

⑥ 拆除 3 号墩(4 号墩)的临时支座,计算因拆除临时支座所产生的内力(图 11.11f)。

⑦ 中跨合龙,把左半跨与右半跨合龙成 5 跨连续梁。计算合龙段两侧悬臂端在支架、模板重量、合龙段自重作用下的内力(图 11.11g)。

⑧ 合龙段支架模板拆除后,上述重量以相反的方向加在连续梁上,计算所产生的内力(图 11.11h)。

⑨ 将上述所有内力图叠加,即得到连续梁最终的恒载内力图(图 11.11i)。

采用顶推法施工时,顶推过程中结构体系不断发生变化,因此梁体内力亦不断发生变化。顶推过程中在梁内出现的内力,可根据顶推时不同的结构体系状态进行计算,通常采用电算方法计算。

采用先简支后连续方法施工连续桥,梁体自重内力应按简支梁计算,桥面铺装等二期恒载内力按铺装时的结构体系计算。