

同济大学现代桥梁技术丛书

组合结构桥梁

组合结构桥梁

刘玉擎摇编著

人民交通出版社

前 言

FORWORDS

伴随着世界经济的一体化,工程建设领域也必须开始面对竞争日趋激烈的国际环境,建设长久耐用、造价低廉、功能合理的公共工程建筑物已是当务之急。桥梁是土木工程领域中技术含量最高、技术要求最复杂的工程项目之一,合理利用各种建筑材料的组合性能,提高抵御自然灾害的综合能力,确保寿命期间中的费用最低是桥梁结构设计的发展趋势。

本书把钢材与混凝土两种主要建筑材料通过使用粘合剂或连接件合理地加以组合,构成异种材料截面并形成一体的构件称为组合构件;由钢构件、混凝土构件或组合构件的异种构件相互接合,并能共同工作的结构体系称为组合结构;使用组合构件或组合结构的桥梁体系称为组合结构桥梁。

全书共分 12 章,主要内容如下:

第 1 章叙述了组合结构桥梁的分类与技术特点;

第 2 章叙述了钢与混凝土接合的连接形式,介绍了圆柱头焊钉连接件、型钢连接件、开孔钢板连接件、组合连接件的力学性能及其应用实例;

第 3 章叙述了组合钢板梁桥的现状与发展,介绍了钢板梁、桥面板、简支组合梁、连续组合梁的设计方法及构造措施;

第 4 章叙述了波折腹板组合箱梁桥的现状与发展,介绍了该桥型的结构体系、各构造间的连接、设计计算方法,并附有实例;

第 5 章叙述 了组合桁架桥的现状与发展、设计技术特点,并附有实例;

第 6 章叙述 了组合刚构桥的现状与发展、接合部的设计技术特点,介绍了接合部的非线性有限元分析以及设计计算方法。

本书编写过程中,得到了项海帆院士的热情指导与鼓励,并在百忙中对全书进行了详细审阅,同济大学桥梁工程系主任陈艾荣教授始终给予极大的关心与支持,提出了宝贵意见。另外,本书曾作为 1998 年年底在同济大学举办的组合结构桥梁与桥梁设计新理念高级研修班的讲义,与会的交通部领导及专家赐教了许多修改建议,在此一并表示衷心感谢。

作者从 1983 年研究生学习起就一直从事钢与混凝土组合结构的研究,在日本九州大学工作期间,曾有机会受邀参加土木学会组合结构桥梁调查研究委员会以及钢结构协会钢桥性能状态设计法研究委员会的工作,得以

对世界范围内组合结构桥梁的现状与发展有了比较全面的认识,为此将多年的学习积累以及研究成果汇编成书。由于作者水平有限,书中不当之处在所难免,谨请读者批评指正。

刘玉擎

同济大学桥梁工程系

2009年 11月

序

PREFACE

19世纪末,由法国在1852年发明的钢筋混凝土结构从房屋开始推广应用于小跨度梁桥和拱桥,建造了首批钢筋混凝土桥梁,并于19世纪初编制了欧洲第一部钢筋混凝土设计规范。与此同时,在19世纪的公路钢桥中所采用的木桥面板也逐渐被钢筋混凝土桥面板所替代,大大改善了桥面的行车条件。

然而,在1852年以前的钢桥都是按各种构件单独起作用的原则设计的,即在组成桥面系统的纵梁和横梁的设计中并不考虑它们和钢筋混凝土桥面的共同作用,桥面板只是作为传递荷载的一种局部构件,而忽视了它在桥梁整体中可以发挥的作用。

19世纪70年代是欧美各国桥梁技术和设计理论的一个重要发展时期。除了大跨度钢拱桥和悬索桥取得了突破性进展外,在中小跨度梁式桥方面,荷载横向分布理论的问世,使工程师们认识到桥梁各部分之间的空间相互作用。1870年焊接技术的发明打破了铆接在钢桥中的一统局面,同时也为组合结构(钢梁与混凝土板)的发展准备了更有力的条件,即在钢筋混凝土板和钢梁之间的各种剪力连接器可采用焊接以代替最初的铆接方式。

二次大战后的19世纪40年代是欧美各国和日本桥梁建设的黄金时期,组合结构以其整体受力的经济性,发挥两种材料各自优势的合理性以及便于施工的突出优点而得到了广泛的应用,建造了大量各种形式的组合结构桥梁,其中也包括大跨度斜拉桥所采用的组合桥面系统。

1956年,欧洲国际混凝土委员会(CEB)、欧洲钢结构大会(CECS)、国际预应力联盟(CIP)和国际桥梁及结构工程协会(IBC)组成了组合结构联合委员会,总结了19世纪40年代组合结构发展中所取得的经验,编制了一本组合结构的模范准则(CEB-CIP),作为各国编制规范时的指导性文件,如英国BS5400标准、德国DIN1046标准、美国AASHTO的规范以及日本钢—混凝土组合结构设计规范等,进一步促进了组合结构桥梁的发展。

进入19世纪60年代后,组合结构有了新的发展趋势,除了传统的型钢—混凝土柱、钢筋混凝土板和钢梁的上下结合梁外,还出现了边跨混凝土梁和

中跨钢梁的纵向接合,钢筋混凝土边梁和钢横梁的横向组合以及钢筋混凝土下塔柱和钢上塔柱的接合等多种混合形式。在材料方面也已不限于性能不断提高的钢和混凝土两种材料的组合,而出现了钢和混凝土与复合纤维材料、工程塑料、玻璃、木材、各种高强度钢丝索、铝合金等多种材料的相互组合。20世纪80年代中后期,国际桥协曾召开过一次以混合结构(钢梁桥、斜拉桥等)为主题的学术会议,研讨了组合结构的新进展。可以预期,在21世纪中,组合结构作为一种极富创新空间的结构形式将会得到更大的发展。

我国在20世纪80年代学习前苏联的过程中也开始接触到组合结构的概念,但因钢材匮乏,在公路桥梁建设中很少采用钢桥,也使组合结构桥梁的应用受到限制。改革开放以来,上海在学习发达国家的斜拉桥新技术中引进了组合桥面斜拉桥的新形式,设计建造了上海南浦大桥和杨浦大桥,使组合结构逐渐为中国桥梁工程师所认识。但由于缺乏组合结构桥梁的设计规范和教材,使广大桥梁工程师对组合结构桥梁仍感到陌生而难以普遍掌握和应用。

刘玉擎副教授在日本留学多年,对组合结构桥梁有较深入的研究和工程实践经验。在他撰写的本书中,首先介绍了组合结构桥梁的基本概念、力学特点、材料应用以及各种连接方式,然后按各种不同类型的组合结构桥梁分章说明设计和施工方法,并附有典型的实例。本书理论结合实际,构造和计算并重,而且说理清楚、图文并茂,最后还附有详细的参考文献供感兴趣的读者进一步查阅,是一本便于在职工程师和研究生学习和进修的教材。

为了在中国公路桥梁建设中推广组合结构桥梁,缩小和发达国家的差距,特别是在西部山区的公路桥梁建设中发挥这种结构的优势,同济大学桥梁工程系组织编写了这本专著,相信一定能为中国桥梁的发展和进步作出贡献。

中国工程院院士
同济大学教授

刘玉擎

2000年 10月

目 录

CONTENTS

第 1 章 组合结构桥梁概论	1
1.1 组合结构的基本概念	1
1.2 组合结构的力学特点	7
1.3 组合结构桥梁的分类及其特点	12
1.4 耐候钢在组合结构桥梁上的应用	17
1.5 参考文献	18
第 2 章 钢与混凝土的连接	20
2.1 连接形式概述	20
2.2 圆柱头焊钉连接件	24
2.3 开孔钢板连接件	27
2.4 组合连接件	30
2.5 参考文献	32
第 3 章 组合钢板梁桥	33
3.1 概述	33
3.2 钢板梁	35
3.3 桥面板	38
3.4 简支组合钢板梁桥	41
3.5 连续组合钢板梁桥	45
3.6 参考文献	50
第 4 章 波折腹板组合箱梁桥	52
4.1 概述	52
4.2 结构体系及其布置	54
4.3 箱梁截面的连接	57
4.4 组合箱梁的设计	60
4.5 设计施工实例	63

参考文献.....	源
第 缘章 组合桁架桥.....	缘
缘 缘 组合桁架桥的现状与发展	缘
缘 缘 组合桁架桥的技术特点	怨
缘 缘 设计施工实例	源
参考文献.....	源
第 远章 组合刚构桥.....	缘
远 远 概述	缘
远 远 接合部的技术特点	远
远 远 接合部的非线性有限元分析	员
远 远 接合部的设计计算例	怨
参考文献.....	源

第 1 章 组合结构桥梁概论

1.1 组合结构的基本概念

组合结构是指至少两种及其以上的建筑材料相互接合在一起,并且形成更加合理的构件或结构体系。从工程建设的经济性、实用性考虑,代表性的建筑材料主要是钢材与混凝土,因此一般所说的组合结构,就是指由这两种材料通过粘结、机械咬合或连接件相互接合,并且能够共同承担作用力的构件或结构。

组合结构分类有多种多样的形式。图 1-1 所示是从材料、构件、结构的层面进行分类的方法之一。钢材与混凝土两种建筑材料通过摩擦力、粘结力、机械咬合或连接件接合成一体,从构件截面来看是异种材料的接合,称为组合构件。严格说钢筋混凝土也应称为组合构件,不过它已有专用名词,属于混凝土构件之列。

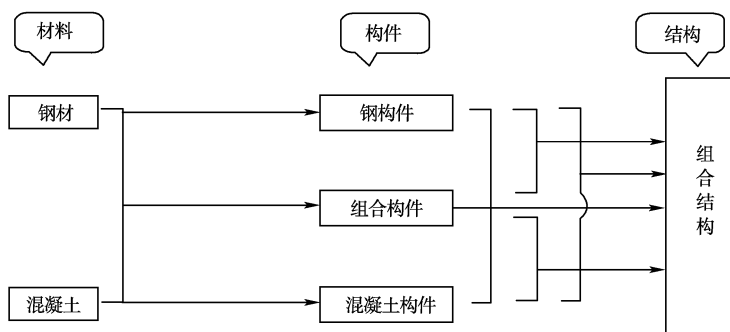


图 1-1 组合结构的分类

组合构件的应用实例如图 1-2 所示。常用的钢管混凝土就是在圆形或角形钢管中填充混凝土,依靠两者间的粘结力、摩擦力形成一体,相互约束,从而使承载性能大幅度提高。将工字钢、角钢等设置在混凝土中的型钢

混凝土是最早的组合构件,于1852年由美国开始研究。另外,使用连接件将钢板与混凝土板、钢梁与混凝土板接合在一起的组合构件,充分利用两种材料的抗拉压强度的不同,达到增大刚度及其承载性能的目的。

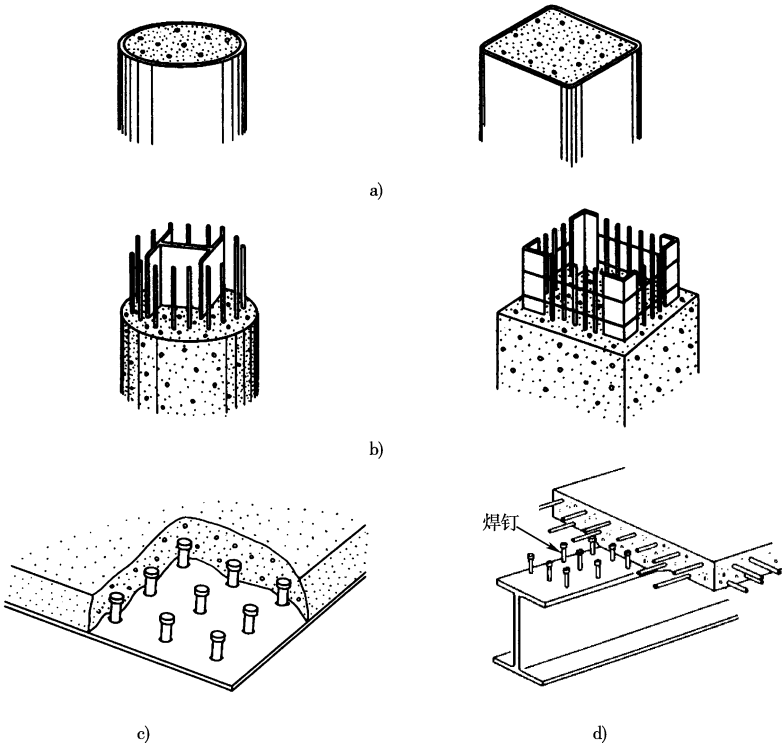


图 1.1.1 摇摇组合构件的实例

a) 钢管混凝土 ; b) 月型钢混凝土 ; c) 组合板 ; d) 组合梁

钢构件、混凝土构件或组合构件中的任意圆种或猿种通过连接件接成一体,从体系来看是异种构件的接合,称为组合结构。代表性的应用实例如图 1.1.1 所示。一种形式是钢梁与钢筋混凝土梁在长度方向上通过连接件及其预应力钢筋等接合在一起,有时又把这样的梁称为混合梁。另一种形式是钢梁与钢筋混凝土墩相接合,形成刚构体系,充分利用钢梁质量轻、混凝土抗压弯性能好的特点。

从上述的分类来看,组合结构可以看成是仅次于钢结构、混凝土结构的第三种结构形式。

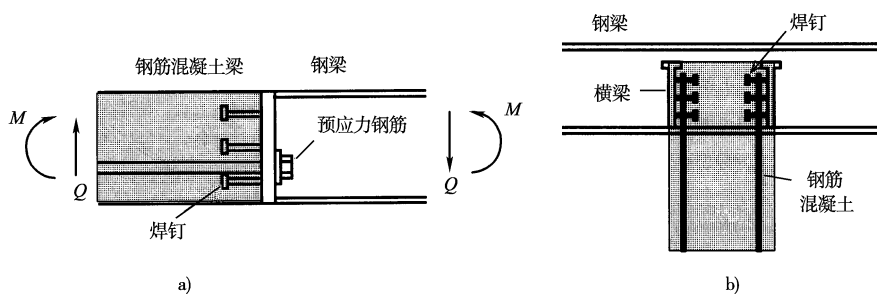


图 4-1 组合结构的实例
 (a) 钢梁与混凝土梁接合 ;(b) 钢梁与混凝土墩接合

组合结构的力学特点

将抗拉性能强的钢材、抗压性能强的混凝土,分别合理地用在构件的拉伸区及其压缩区,最大限度地追求高性能、经济性是钢与混凝土组合结构的设计原则。将两种材料合理地加以组合后,从经济性来看要好于钢结构或混凝土结构。图 4-2 所表示的是组合结构的设计理念,当混凝土与钢材的用量比例适当时,定性上有造价最低的可能性^[1]。

组合结构最大的技术特点是组合后的性能已经超过两种材料各自的力学性能。钢材处于拉伸区域时,其强度及其延性能够很好发挥,但当处于压缩区域时,由屈曲强度决定,特别是薄钢板制作的构件,材料性能很难发挥,而混凝土是比钢材便宜、自重大、抗拉强度显著小的脆性材料。因此,两者力学上的组合主要表现在两个方面,即钢材对混凝土的支援及混凝土对钢材的支援。

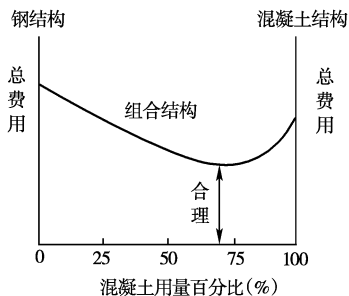


图 4-2 组合结构设计理念

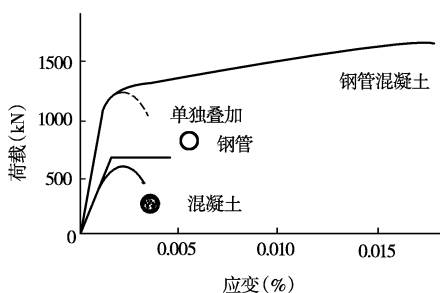


图 4-3 受压钢管混凝土柱

最典型的钢材对混凝土支援的实例是钢管混凝土,图 5-10 所示是受轴向压力的钢管混凝土柱的荷载与应变关系^[10]。混凝土柱在钢管的约束支援下,承载力及其变形能力都大幅度提高,远远高于两者单独叠加的效果。混凝土桥墩用钢板外包补强也是钢材支援混凝土的实例之一。

混凝土对钢材支援的实例也有很多,譬如防腐蚀、防振动、减轻噪声及其提高屈曲强度等。图 5-11 所示是受集中力作用的钢管混凝土梁的荷载与变形关系,几个试件的不同分别是管壁内侧是否有摩擦和加劲肋。可以看出,即使管壁无摩擦、无加劲肋的钢管混凝土梁,作为受弯构件使用,在局部屈曲后仍然有很大的承载力与变形能力^[10]。基于这一点,将钢管混凝土用作梁桥、刚构桥、斜拉桥等桥型的主梁也是可行的。

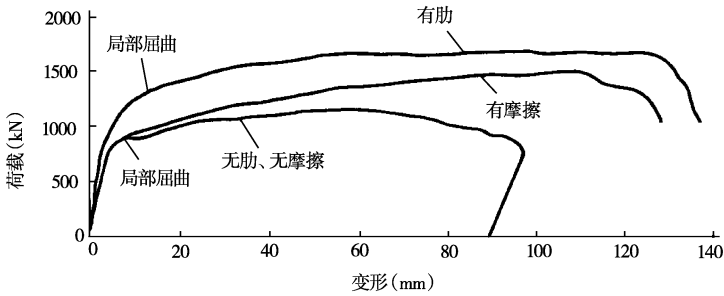


图 5-11 摇摇受弯钢管混凝土梁

一般来说,连续组合梁负弯矩区受力很大,通常要采取在混凝土桥面板中施加预应力、或加大截面高度等措施。图 5-12 所示是在工字钢的腹板

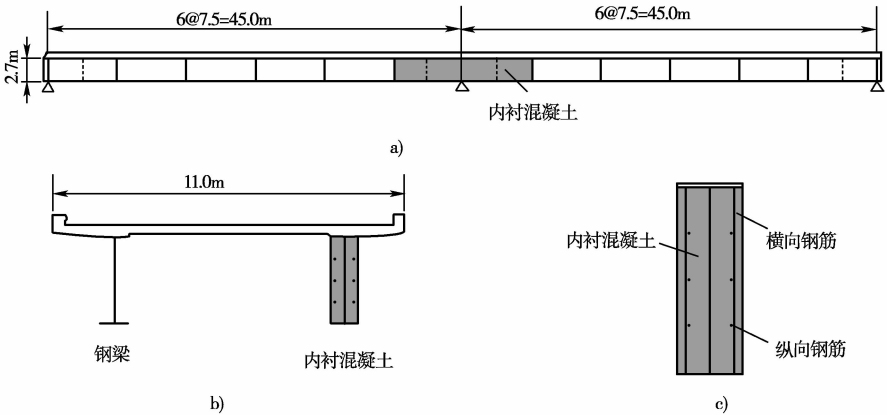


图 5-12 摇摇内衬混凝土组合梁的构造
(a)连续梁一般图;(b)桥梁横截面;(c)组合梁截面

与上下翼缘之间填充混凝土并配有少量钢筋的构造形式,是通过用混凝土对钢梁的支援来达到提高承载性能的目的^[1]。把这种截面形式称为内衬式组合梁,依据抗弯及其抗剪加载试验得出的荷载与变形的关系如图 1-10 所示。与纯工字钢梁相比,其抗弯承载力提高约 1.5 倍,抗剪承载力提高约 1 倍,同时有竖向加劲肋间距可以增大、纵向加劲肋能够省略的技术特点。

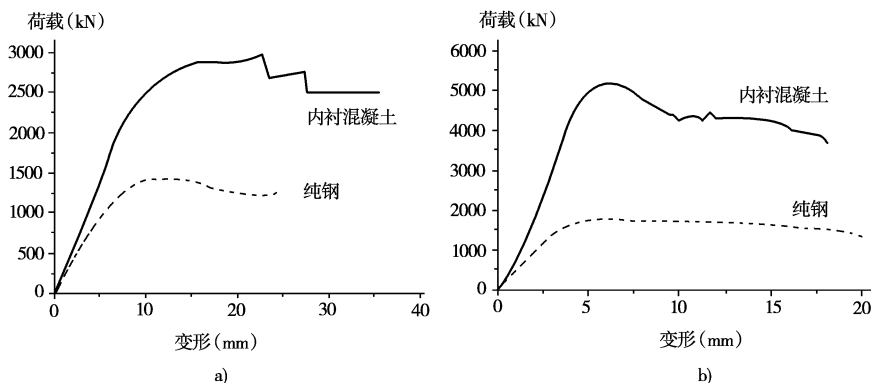


图 1-10 内衬混凝土组合梁的加载试验结果
(a) 弯矩作用; (b) 剪力作用

1.1 组合结构桥梁的分类及其特点

本书把使用组合构件或组合结构的桥梁称为组合结构桥梁,分类大致如表 1-1 所示,其它还有预弯组合梁等比较特殊的桥型未列入其中。所述其特点主要是与钢桥相比,也仅仅列出主要的事项,其它特点将在有关章节中详细叙述。

最常见的组合钢板梁桥,是通过使用连接件把钢板梁与混凝土桥面板加以组合,抗弯刚度能够大幅度提高,减小梁高,增大跨径。图 1-11 所示是法国于 1947 年完成的匀质梁桥,两根主梁的间距为 10 m,通过使用高强度的混凝土桥面板及施加横向预应力钢筋来减少主梁根数^[1]。

闭合截面组合箱梁桥主要是用混凝土桥面板承担上缘压应力。从节省材料来看,不用钢顶板的槽形截面组合梁是可选方案之一,但是施工精度及其控制要求较高。法国工程界提出的波折腹板组合箱梁桥,是利用波折钢板抗剪强度大、纵向刚度小的特点,以其代替混凝土腹板,达到减轻结构自重、减少腹板承担预应力的目的。同时从抗弯、抗压的受力角度来看,使用波折腹板后,顶底板单独受力,减少了干燥收缩、徐变、温差的影响。

摇摇组合结构桥梁

年建成的 阅缘桥是一座用波折腹板的 苑跨连续组合箱梁桥,其中有缘跨跨度达到 愿皂,完成后的照片如图 员缘圆所示^[编]。

组合结构桥梁的分类及其特点

表 员缘圆

序号	名称	形式	特点
员	组合钢板梁桥	摇钢板梁 垣混凝土桥面板	摇抗弯刚度增大
圆	组合箱梁桥	摇闭截面钢箱梁 垣混凝土桥面板 摇槽形截面钢箱梁 垣混凝土桥面板 摇波折钢板腹板 垣混凝土上下翼缘板	摇抗弯、扭刚度增大,顶钢板未充分利用 摇省去顶钢板、施工难度加大 摇自重减轻,预应力能有效施加
猿	组合桁架桥	摇钢桁架梁 垣混凝土桥面板 摇钢桁架腹杆 垣混凝土上下翼缘板	摇抗弯刚度增大,连接件设置较困难 摇省去上下弦杆,施工难度加大
源	组合刚构桥	摇钢板梁 垣混凝土墩 摇钢箱梁 垣混凝土墩 摇钢桁架梁 垣混凝土墩	摇省去支座,负弯矩区性能改善, 抗震性能提高,悬臂施工法能够使用
缘	混合梁桥	摇钢梁 垣混凝土梁	摇跨度增大,连接较难处理
远	组合拱桥	摇钢管混凝土拱 摇型钢混凝土拱 摇混合结构拱 摇混凝土拱肋 垣承重钢梁	摇施工容易,填充质量较难保证 摇施工容易,无钢材维护的问题 摇增强拱脚强度 摇减轻上部结构自重
苑	组合斜拉桥	摇钢板梁 垣混凝土桥面板 摇钢箱梁 垣混凝土桥面板 摇槽形截面钢箱梁 垣混凝土桥面板 摇波折腹板组合箱梁 摇钢梁 垣混凝土梁	摇抗弯刚度增大 摇抗弯、扭刚度增大 摇省去顶钢板 摇改善箱梁受力性能 摇塔墩附近加劲梁抗压性能提高

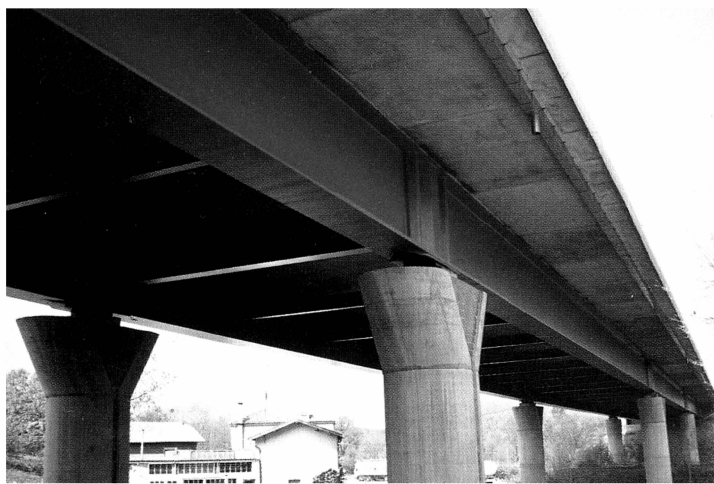


图 员缘圆 摇摇组合结构桥梁

把钢桁架的上下弦用钢筋混凝土板代替,节省了钢材,减小了截面高度,也是极有意义的探索。图 4-1-1 所示是日本于 1970 年完成的运动场桥,最大跨径为 100m。



图 4-1-1 运动场桥



图 4-1-2 运动场桥

钢板梁、钢箱梁或钢桁架梁与混凝土桥墩固结在一起,能够节省支座及其它的维护费用,容易使用悬臂施工法。图 4-1-2 所示是施工中的日本今别府川桥,该桥为 3 跨连续刚构体系,跨径为 100m,墩高 40m,耐候钢主梁与混凝土桥墩通过焊钉连接件以及开孔钢板连接件固结,然后采用悬臂施工法用滑车吊装各节段梁^[10]。

混合梁主要用在斜拉桥的加劲梁上,代表性的有法国的曼特维尔桥、日本的多多罗大桥、我国的徐浦大桥、湛江海湾大桥等。而混合梁同样也适用

摇摇组合结构桥梁

于连续梁桥,当高架桥需要跨越河川、道路,不得不设计成边跨比主跨跨径小许多时,如果采用混合梁其截面作用力及其支座反力就会得到较大改善。如图 1-1-1 所示是日本新近建成的新川桥^[1],为连续梁体系,跨径为 100m、100m、100m、100m、100m。接合部的设计与以往的形式大致相同,采取的方法是在钢梁格室中填充混凝土,通过各格室的连接件将钢梁段的作用力传递给混凝土梁段。只是各格室钢板上沿纵向焊接开孔钢板连接件,取代以往较常使用的焊钉或者型钢连接件。焊钉在格室腹板、顶底板的焊接难度相对较大,数量又多,而开孔钢板仅仅是板件的焊接,抗剪刚度、强度比较大,



图 1-1-1 摇摇施工中的今别府川大桥



图 1-1-2 摇摇新川桥

又不易受疲劳的影响,作为混合梁的连接件有较好的应用性。

拱桥不仅有钢拱桥、混凝土拱桥、组合结构拱桥,还有石拱桥。石拱桥一般是由拱圈块石与拱背填土构成,也可以看成是组合结构的一种形式,但是对它进行严密的数值分析仍然比较困难^[10]。拱桥的施工复杂、造价相对较高,常常在对美观有特殊要求时采用。近年来,通过采用钢管混凝土以及转体施工法等新技术使拱桥得到了很大的发展。在我国最具有代表性的组合结构拱桥是圆形钢管混凝土拱桥,还有像四川万县长江大桥采用的是型钢混凝土结构,其净跨为 3600m,是世界上最大跨度的混凝土拱桥。

另外,拱肋用钢筋混凝土结构、承重梁用钢梁或组合梁的拱桥也应属于组合拱桥的一种形式。图 4-1-10 图 4-1-11 所示是德国的一座拱桥的立面布置及桥面系的横截面,拱肋与立柱都采用钢筋混凝土结构,而承重梁是槽形截面钢梁与混凝土桥面板的组合结构^[10]。图 4-1-12 图 4-1-13 所示是日本的一座拱桥的立面布置及横截面,拱肋与立柱都采用钢筋混凝土结构,而承重梁是钢板梁与混凝土桥面板的组合结构,并从维护管理、抗震性、经济性考虑,钢梁与部分立柱固结,形成刚构体系^[10]。

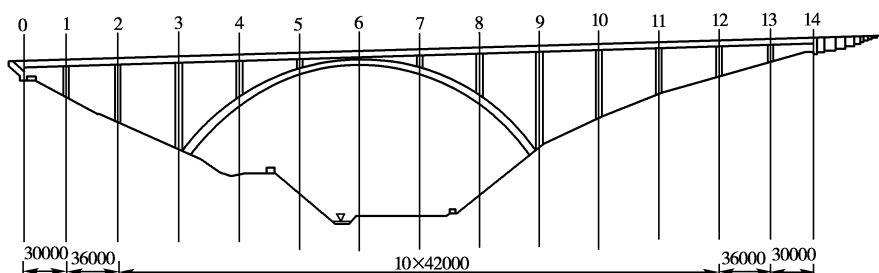


图 4-1-10 混凝土拱肋与槽型钢梁组合拱桥的立面布置(尺寸单位:毫米)

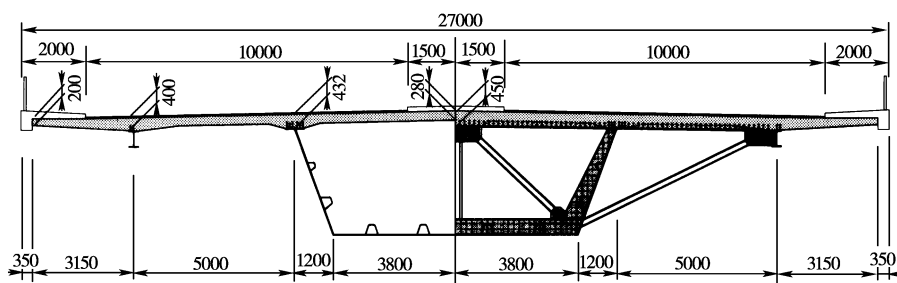


图 4-1-12 承重槽形截面组合梁横断面(尺寸单位:毫米)

斜拉桥承重构件主要由梁、塔与索三部分组成,选择不同的结构外形和

材料可以组合成多彩多姿、新颖别致的各种形式。通常依据主梁所使用的

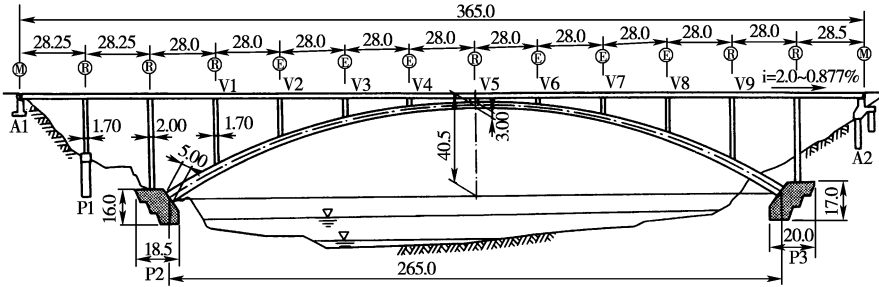


图 1 摇摇混凝土拱桥与钢板梁组合拱桥的立面布置(尺寸单位:米)

材料对斜拉桥进行分类,当主梁用钢材、而主塔用钢筋混凝土时,从整个结构体系来看,应属于组合结构斜拉桥,但是一般仍称为钢斜拉桥。本书是从材料、构件、结构的层面,依据主梁及主塔所使用的材料加以分类,如图 2 所示。当主梁使用钢材或混凝土时,只要主塔不使用组合构件,仍然分别称为钢斜拉桥或混凝土斜拉桥。当主梁为钢板梁、钢箱梁或钢管混凝土梁与混凝土桥面板组合,以及波折钢腹板与混凝土上下翼缘板组合时,称为组合梁斜拉桥,也就是一般所说的结合梁斜拉桥;当主梁为钢梁与混凝土梁的混合结构时,称为混合梁斜拉桥;当主塔是钢塔与混凝土塔混合,或采用钢管混凝土塔、型钢混凝土塔时,称为组合塔斜拉桥。用组合梁、混合梁或组合塔的斜拉桥通称为组合结构斜拉桥。

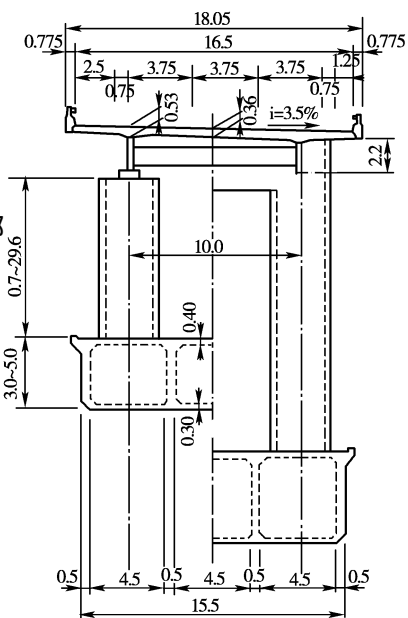


图 2 摇摇承重组合钢板梁横断面(尺寸单位:米)

图 3 和图 4 所示是东海大桥主航道桥立面布置及主梁横截面。该桥为主跨 1140m 的单索面斜拉桥,为了适应跨海大桥的特点,采用的是槽形钢与混凝土桥面板的组合梁结构形式新颖。

图 5 和图 6 所示是日本栗东大桥的立面布置及主梁横截面。