

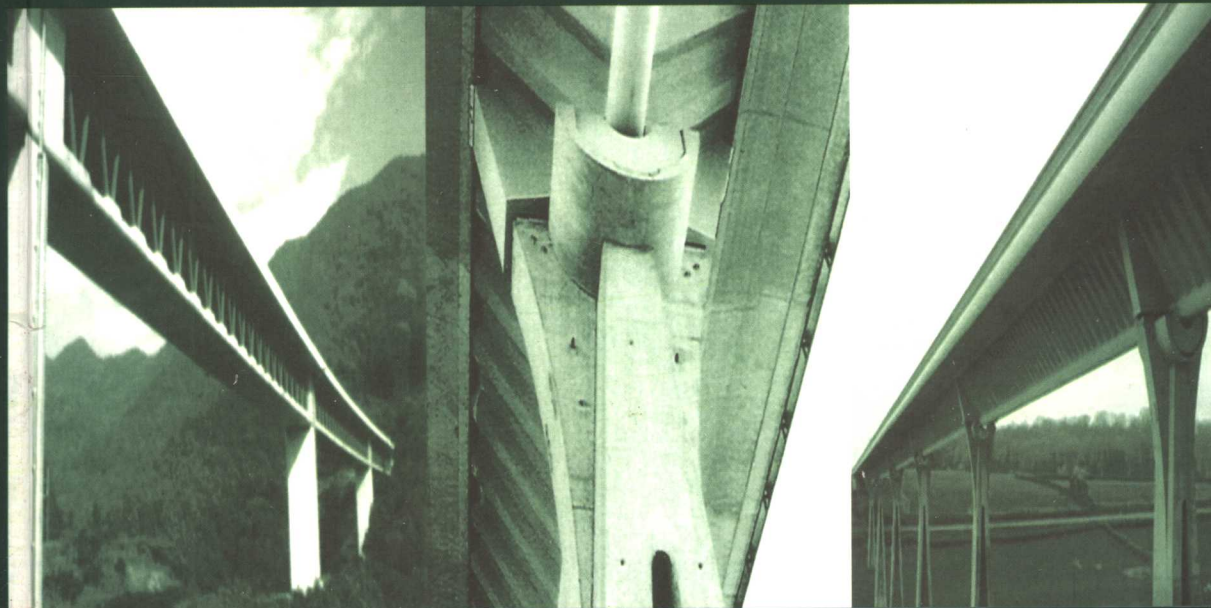


同濟大學

现代桥梁技术丛书

# 组合结构桥梁

刘玉擎 编著



人民交通出版社

China Communications Press



同济大学  
现代桥梁技术丛书

U448.21  
L715



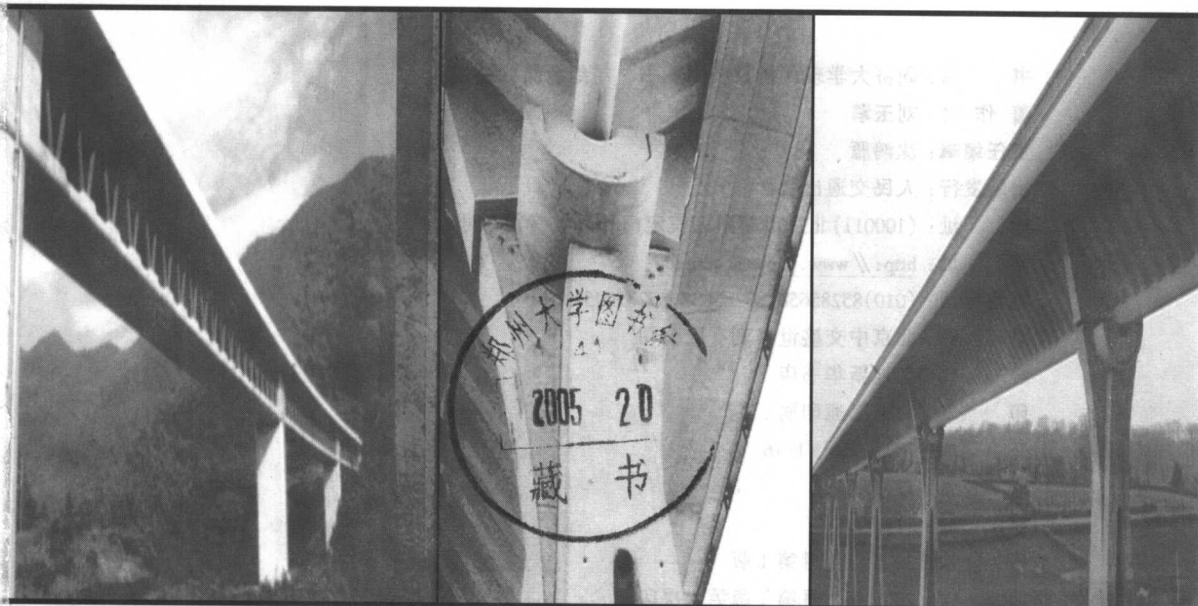
郑州大学 \*04010169842Z\*

HYBRID BRIDGE

-43

# 组合结构桥梁

□ 刘玉擎<sup>9/109</sup> 编著



U448.21  
L715

人民交通出版社

QAW 79/2

## 内 容 提 要

本书为同济大学现代桥梁技术丛书之一。书中全面阐述了组合结构桥梁的设计理论及工程应用情况,内容涉及钢与混凝土的连接、组合钢板梁桥、波折腹板组合箱梁桥、组合桁架桥、组合刚构桥,并附有典型案例。本书理论结合实际,构造和计算并重,图文并茂,是迄今为止较全面介绍组合结构桥梁的首部作品。

本书可供从事桥梁工程设计、施工、科研工作的工程技术人员学习参考,亦可供相关专业研究生查用。

### 图书在版编目(CIP)数据

组合结构桥梁 / 刘玉擎编著. —北京:人民交通出版社,2004.11

ISBN 7-114-05345-2

I.组... II.刘... III.组合体系桥:梁桥-设计  
IV.U448.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第112991号

书 名: 同济大学现代桥梁技术丛书 组合结构桥梁

著 者: 刘玉擎

责任编辑: 沈鸿雁

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)85285656,85285838,85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京凯通印刷厂

开 本: 787×960 1/16

印 张: 13.25

字 数: 215千

版 次: 2005年1月第1版

印 次: 2005年1月第1版第1次印刷

书 号: ISBN 7-114-05345-2

印 数: 0001-4000册

定 价: 39.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 序

## PREFACE

19 世纪末,由法国在 1876 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 20 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 1930 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。

20 世纪 30 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。1936 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(Composite Structures)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 20 世纪 60 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。

1971 年,欧洲国际混凝土委员会(CEB)、欧洲钢结构大会(ECCS)、国际预应力联盟(FIP)和国际桥梁及结构工程协会(IABSE)组成了组合结构联合委员会,总结了 20 世纪 60 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(Model Code),作为各国编制规范时的指导性文件,如英国 BS 5400 标准、德国 DIN 标准、美国 AASHTO 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 20 世纪 80 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(Mixed Structures)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50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

2004年11月



# 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6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3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3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2003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1985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  
2004年11月



# 目 录

## CONTENTS

<b>第 1 章 组合结构桥梁概论</b> .....	1
1.1 组合结构的基本概念 .....	1
1.2 组合结构的力学特点 .....	3
1.3 组合结构桥梁的分类及其特点 .....	5
1.4 耐候钢在组合结构桥梁上的应用 .....	13
参考文献 .....	17
<b>第 2 章 钢与混凝土的连接</b> .....	19
2.1 连接形式概述 .....	19
2.2 圆柱头焊钉连接件 .....	24
2.3 开孔钢板连接件 .....	36
2.4 组合连接件 .....	41
参考文献 .....	46
<b>第 3 章 组合钢板梁桥</b> .....	48
3.1 概述 .....	48
3.2 钢板梁 .....	58
3.3 桥面板 .....	67
3.4 简支组合钢板梁桥 .....	80
3.5 连续组合钢板梁桥 .....	94
参考文献 .....	123
<b>第 4 章 波折腹板组合箱梁桥</b> .....	125
4.1 概述 .....	125
4.2 结构体系及其布置 .....	130
4.3 箱梁截面的连接 .....	145
4.4 组合箱梁的设计 .....	152
4.5 设计施工实例 .....	158



参考文献	164
<b>第 5 章 组合桁架桥</b>	<b>165</b>
5.1 组合桁架桥的现状与发展	165
5.2 组合桁架桥的技术特点	169
5.3 设计施工实例	174
参考文献	184
<b>第 6 章 组合刚构桥</b>	<b>185</b>
6.1 概述	185
6.2 接合部的技术特点	186
6.3 接合部的非线性有限元分析	191
6.4 接合部的设计计算例	199
参考文献	204

# 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 1-1-1 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。

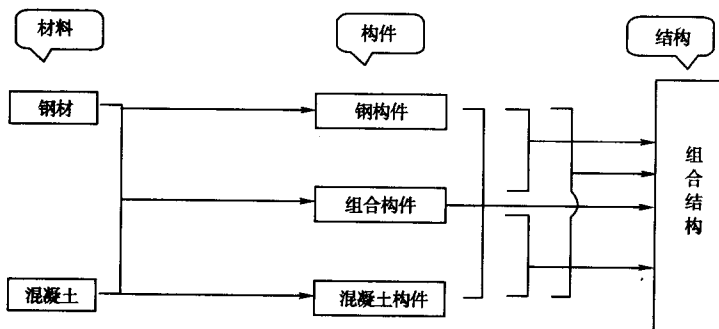


图 1-1-1 结构的分类

组合构件的应用实例如图 1-1-2 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1910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。

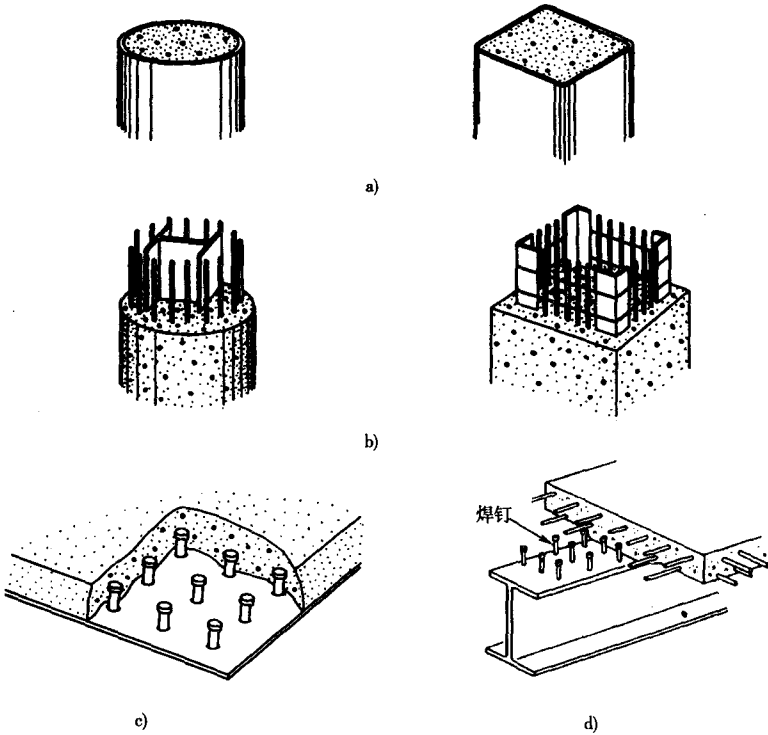


图 1-1-2 组合构件的实例

a)钢管混凝土;b)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2种或3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1-1-3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。

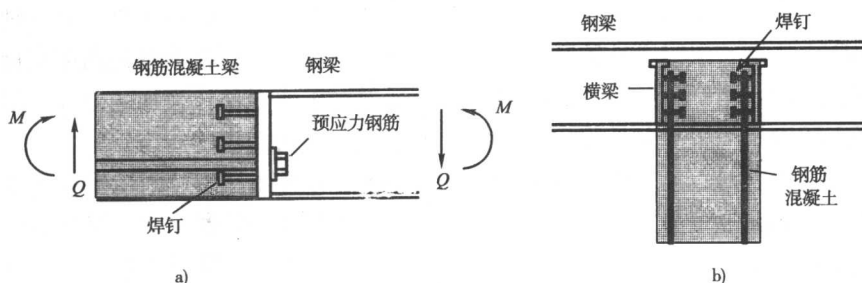


图 1-1-3 组合结构的实例  
a) 钢梁与混凝土梁接合; b) 钢梁与混凝土墩接合

## 1.2 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,极大地追求高性能、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 1-2-1 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<sup>[1]</sup>。

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。

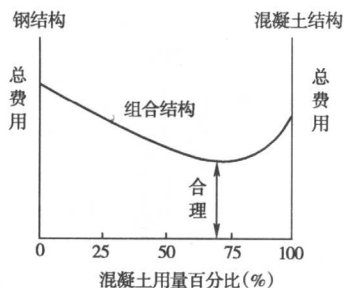


图 1-2-1 组合结构设计理念

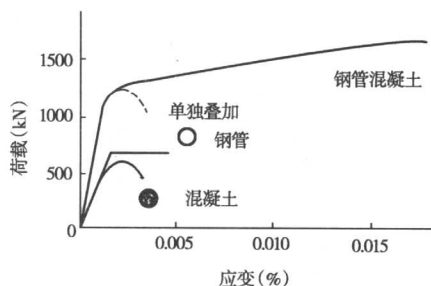


图 1-2-2 受压钢管混凝土柱

最典型的钢材对混凝土支援的实例是钢管混凝土,图 1-2-2 所示是受轴向压力的钢管混凝土柱的荷载与应变关系<sup>[2]</sup>。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 1-2-3 所示是受集中力作用的钢管混凝土梁的荷载与变形关系,3 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<sup>[2]</sup>。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。

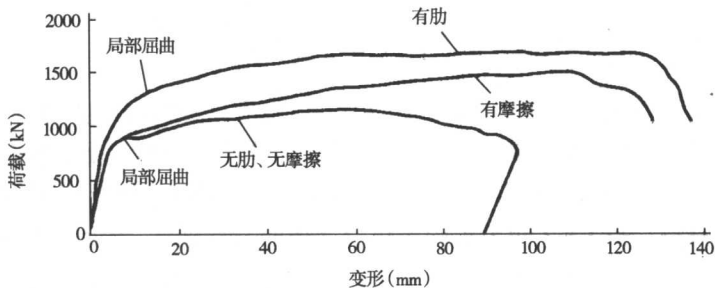


图 1-2-3 受弯钢管混凝土梁

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 1-2-4 所示是在工字钢的腹板与

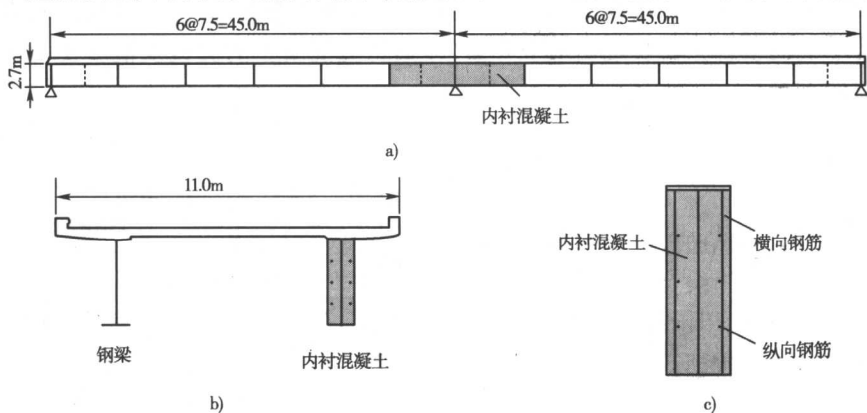


图 1-2-4 内衬混凝土组合梁的构造  
a) 连续梁一般图; b) 桥梁横截面; c) 组合梁截面

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<sup>[3]</sup>。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 1-2-5 所示。与纯工字钢梁相比,其抗弯承载力提高约 1 倍,抗剪承载力提高约 2 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。

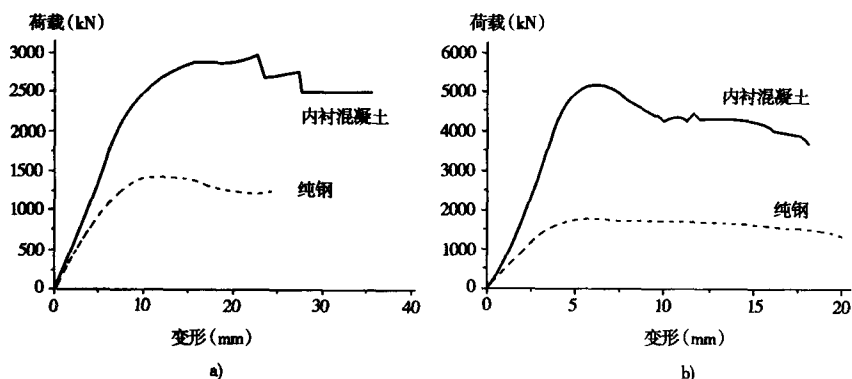


图 1-2-5 内衬混凝土组合梁的加载试验结果  
a) 弯矩作用; b) 剪力作用

### 1.3 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 1-3-1 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 1-3-1 所示是法国于 1990 年完成的 Hospital 桥,两根主梁的间距为 12.6m,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<sup>[4]</sup>。

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。1995

## 组合结构桥梁

年建成的 Dole 桥是一座用波折腹板的 7 跨连续组合箱梁桥,其中有 5 跨跨度达到 80m,完成后的照片如图 1-3-2 所示<sup>[5]</sup>。

组合结构桥梁的分类及其特点

表 1-3-1

序号	名称	形式	特点
1	组合钢板梁桥	钢板梁 + 混凝土桥面板	抗弯刚度增大
2	组合箱梁桥	闭截面钢箱梁 + 混凝土桥面板 槽形截面钢箱梁 + 混凝土桥面板 波折钢腹板 + 混凝土上下翼缘板	抗弯、扭刚度增大,顶钢板未充分利用 省去顶钢板、施工难度加大 自重减轻,预应力能有效施加
3	组合桁架桥	钢桁架梁 + 混凝土桥面板 钢桁架腹杆 + 混凝土上下翼缘板	抗弯刚度增大,连接件设置较困难 省去上下弦杆,施工难度加大
4	组合刚构桥	钢板梁 + 混凝土墩 钢箱梁 + 混凝土墩 钢桁架梁 + 混凝土墩	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
5	混合梁桥	钢梁 + 混凝土梁	跨度增大,连接较难处理
6	组合拱桥	钢管混凝土拱 型钢混凝土拱 混合结构拱 混凝土拱肋 + 承重钢梁	施工容易,填充质量较难保证 施工容易,无钢材维护的问题 增强拱脚强度 减轻上部结构自重
7	组合斜拉桥	钢板梁 + 混凝土桥面板 钢箱梁 + 混凝土桥面板 槽形截面钢箱梁 + 混凝土桥面板 波折腹板组合箱梁 钢梁 + 混凝土梁	抗弯刚度增大 抗弯、扭刚度增大 省去顶钢板 改善箱梁受力性能 塔墩附近加劲梁抗压性能提高

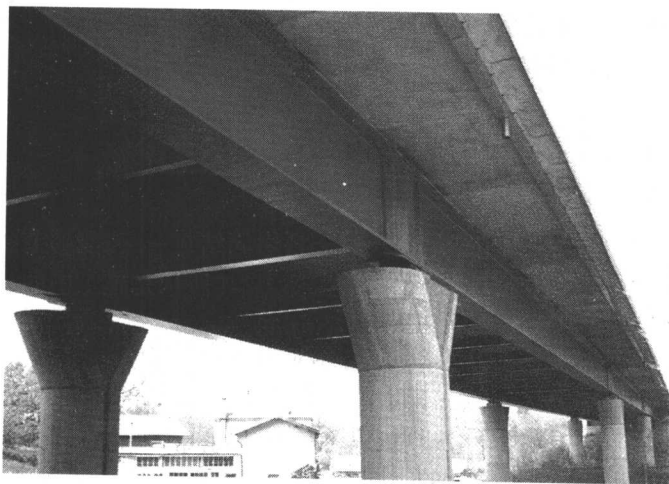


图 1-3-1 Hospital 桥

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 1-3-3 所示是日本于 2003 年完成的 Kinokawa 桥,最大跨径为 85.0m<sup>[6]</sup>。



图 1-3-2 Dole 桥



图 1-3-3 Kinokawa 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 1-3-4 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 48.2m + 81.5m + 57.2m,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<sup>[7]</sup>。

混合梁主要用在斜拉桥的加劲梁上,代表性的有法国的 Normandier 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



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 1-3-5 所示是日本新近建成的新川桥<sup>[8]</sup>,为 5 跨连续梁体系,跨径为  $39.2\text{m} + 40.0\text{m} + 118.0\text{m} + 40.0\text{m} + 39.2\text{m}$ 。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,

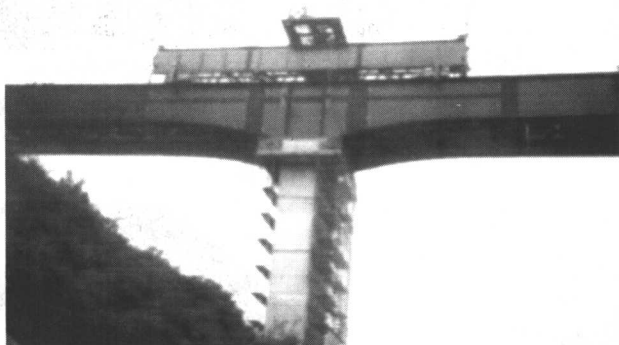


图 1-3-4 施工中的今别府川大桥



图 1-3-5 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。