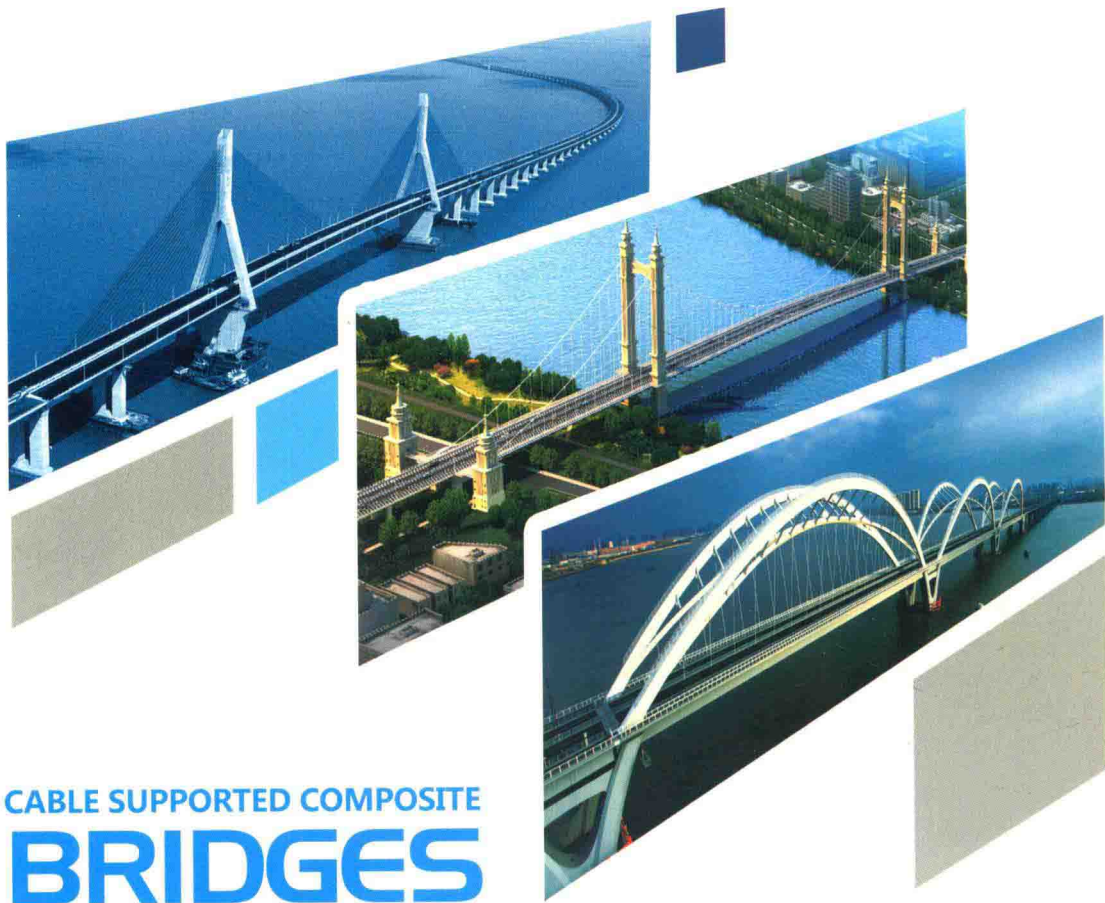


上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司

现代桥梁技术丛书

索承式组合结构桥梁

邵长宇 著



CABLE SUPPORTED COMPOSITE
BRIDGES

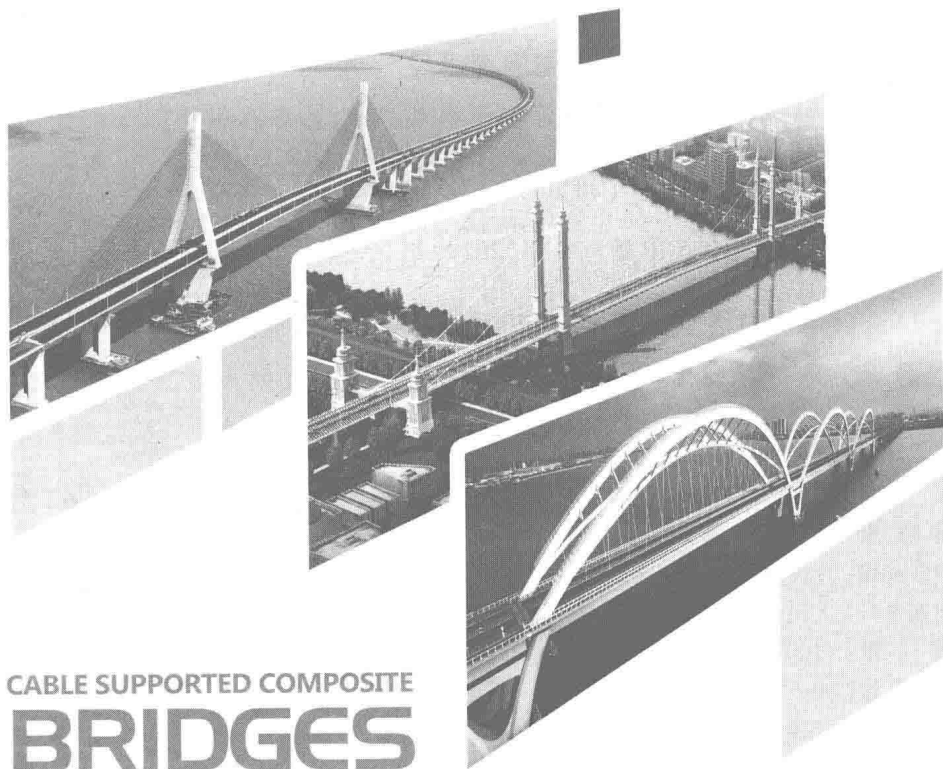


人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

上海市政工程设计研究
现代桥梁技术丛书

索承式组合结构桥梁

邵长宇 著



CABLE SUPPORTED COMPOSITE
BRIDGES



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书根据缆索支承体系组合结构桥梁的国际发展、最新动态及相关研究成果,以工程应用与实践为导向,分别针对斜拉桥、悬索桥、拱桥,系统阐述了三种桥型的结构体系、力学性能以及总体布置、结构形式与构造等,总结了主要施工方法,介绍了大跨度组合梁悬索桥、斜拉桥关键技术问题的研究成果。全书共分为9章,包括组合梁及其适用性、组合梁斜拉桥、组合梁悬索桥、组合梁拱桥、索承式桥梁施工方法、组合梁斜拉桥力学性能及经济性、组合梁悬索桥力学性能及经济性等内容。

本书可供桥梁专业技术人员和科研人员从事研究、设计和施工时参考使用,也可供大专院校研究生和高校大学生学习时参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

索承式组合结构桥梁 / 邵长宇著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017. 7

ISBN 978-7-114-13826-3

I. ①索… II. ①邵… III. ①缆索—支承—组合结构—桥梁结构—研究 IV. ①U443

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 098684 号

上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司

现代桥梁技术丛书

书 名: 索承式组合结构桥梁

著 作 者: 邵长宇

责任编辑: 卢俊丽(ccplujunli@126.com)

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

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: 人民交通出版社股份有限公司发行部

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: 29.25

字 数: 700 千

版 次: 2017 年 7 月 第 1 版

印 次: 2017 年 7 月 第 1 版

书 号: ISBN 978-7-114-13826-3

定 价: 126.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

序

上海市政工程设计研究总院邵长宇总工在他的《梁式组合结构桥梁》一书中主要介绍了组合钢板梁、组合钢箱梁和组合钢桁梁三种中小跨度梁式组合结构。在本书中则着重介绍大跨度索承式组合梁斜拉桥、悬索桥和中、下承式索承组合拱桥的最新进展。

1982年,在已故李国豪校长主持的北京国际桥梁会议上,德国施莱希(J. Schlaich)教授介绍了他为印度 Hooghly 河桥所做的新型结合梁斜拉桥方案。不久,加拿大 P. Taylor 博士就率先建成了世界第一座大跨度结合梁斜拉桥——温哥华市的 Annacis 桥。接着,上海南浦大桥在李校长的倡导下也采用了结合梁斜拉桥作为实施方案,并于1992年建成通车,成为中国自主建设大跨度斜拉桥的重要里程碑。

上海市政工程设计研究总院在推广使用组合结构桥梁方面一直走在全国的前列。2005年建成的上海东海大桥中的几座航道桥都采用了组合梁斜拉桥方案,十多年的使用证明了其优良的耐久性、抗风性能以及混凝土桥面板对重载集装箱卡车的良好适应性。2012年建成的杭州九堡大桥则采用了组合结构桥面和钢拱肋的下承式梁拱组合体系,并用整体顶推法施工,这又是一个富有创意的成功实例。

进入21世纪以来,因基于平面假定的混凝土结构配筋和配索方法难以适应大型薄壁箱梁桥的复杂空间应力状态,致使不少预应力混凝土连续箱梁桥的腹板和底板中都出现了难以克服的裂缝,影响了结构的耐久性。因此,世界各国桥梁界便从组合结构寻找解决方案,促使组合结构桥梁进一步发展和应用,已逐渐成为一种创新结构形式,得到业内人士的普遍赞赏。

邵长宇总工对组合结构桥梁有较深入的研究,本书是他多年来学习国外成功经验和国内设计实践的总结。我相信,组合结构桥梁以其突出优点和竞争力,在中小跨度梁式桥和大跨度索承式桥梁中都能得到成功的应用,有可能成为21世纪的“主流桥型”。希望本书的出版能对中国桥梁走向世界有所裨益,并为中国“一带一路”倡议中的交通建设作出贡献。

邵长宇

2017年4月

前 言

组合结构桥梁在欧美等发达国家的桥梁建设中占有重要地位,组合梁在斜拉桥、悬索桥和拱桥中应用广泛,这一方面离不开理念与技术的发展,另一方面也离不开组合结构桥梁的技术经济竞争力。时至今日,尽管我国在组合结构桥梁方面的研究与实践尚有不足,但可以预见,在未来的桥梁建设中组合结构桥梁将迎来黄金发展时期。

大跨度桥梁采用组合梁的理念可以从两个方面来看,和采用正交异性钢桥面板的钢梁相比,用混凝土桥面板代替钢梁上缘的正交异性钢板,可以提升桥面抗疲劳性能和刚度,并降低加劲梁的工程造价;和早期混凝土行车道板置于钢梁上的结构形式相比,可以加强结构的整体性和受力性能,减少后期维护工作量、提高结构的耐久性。组合梁在斜拉桥、悬索桥和拱桥中都有大量的工程应用,但不同类型的组合梁在三种大跨度桥梁中的应用水平和程度差别较大,这与不同结构体系的力学性能、工程需求、技术发展等多方面的因素有关。不言而喻,斜拉桥、悬索桥和拱桥三者加劲梁受力性能的差异是最为重要的影响因素。只有准确把握不同桥梁结构体系的特点和性能要求,从钢与混凝土材料中找到合适的结合点,充分借鉴国内外实践经验,才能使桥梁的设计、施工、维护更趋合理,并不断提升组合结构桥梁的经济性与竞争力。目前,组合结构桥梁在国内已经得到应有的重视,未来必将成为我国桥梁建设的重要组成部分。

《索承式组合结构桥梁》一书作为《梁式组合结构桥梁》的姊妹篇,已经滞后原计划完成时间一年有余。书中第1~6章主要为本人多年来学习成果的归纳总结,第7、8两章取自本人负责的973课题研究成果,陈亮、张春雷、汤虎三位博士高工参与了课题研究工作。

限于时间和水平,缺点难免,恳请读者和同行批评指正,希望能够对我国大跨度组合结构桥梁的发展有所裨益!

邵长宇

2017年3月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 桥梁跨度发展	1
1.2 索承式组合结构桥梁的特点	4
1.3 索承式组合结构桥梁的竞争能力	6
1.4 索承式组合结构桥梁的说明	10
第2章 组合梁(桥面结构)及其适用性	12
2.1 概述	12
2.2 组合钢板梁	14
2.3 组合钢箱梁	22
2.4 组合钢桁梁	28
第3章 组合梁斜拉桥	37
3.1 组合梁斜拉桥的发展	37
3.2 结构体系	48
3.3 力学性能与特点	56
3.4 总体布置	64
3.5 加劲梁的结构与构造	96
第4章 组合梁悬索桥	126
4.1 组合梁悬索桥的发展	126
4.2 结构体系	135
4.3 力学性能与特点	145
4.4 总体布置	153
4.5 加劲梁的结构与构造	166
第5章 组合桥面结构(梁)拱桥	192
5.1 拱桥的发展	192
5.2 结构体系	200
5.3 力学性能	207
5.4 系杆拱桥	220
5.5 中承式拱桥	251
5.6 连续梁拱桥	273

第6章 施工方法..... 292

6.1 斜拉桥加劲梁安装 292

6.2 悬索桥加劲梁安装 306

6.3 拱桥桥面结构安装 312

6.4 索承式桥梁顶推施工 324

第7章 组合梁斜拉桥力学性能及经济性..... 336

7.1 研究内容与方法 336

7.2 总体力学性能 344

7.3 结构静力与抗风稳定 359

7.4 跨径增长影响因素 361

7.5 经济性能 382

7.6 主要结论 387

第8章 组合梁悬索桥力学性能及经济性..... 389

8.1 研究内容与方法 389

8.2 总体力学性能 398

8.3 组合梁结构关键参数影响分析 415

8.4 单跨悬索桥方案经济性分析 427

8.5 三跨悬索桥方案经济性分析 433

8.6 主要结论 440

第9章 展望..... 443

9.1 发展需求 443

9.2 材料、构件及其效率..... 444

9.3 结构性能要求 445

9.4 可预测性和可维护性 446

9.5 结语 447

参考文献..... 449

索引..... 455

第1章 绪 论

1.1 桥梁跨度发展

从18世纪初至今,拱桥、悬索桥及斜拉桥的跨径纪录变化过程如图1.1-1所示。在梁式桥中,箱梁桥由于在更大跨度范围内与斜拉桥相比不具有竞争力,因而一般适用于跨度范围200m左右的桥梁;桁架梁桥虽然在18世纪末就被创造超过500m的跨度纪录,今后也很难会被大规模建造,跨度也难以突破。自20世纪80年代以来,大跨度桥梁基本都采用缆索承重桥梁,主要为斜拉桥和悬索桥,拱桥主要用于500m以下跨度的桥梁。

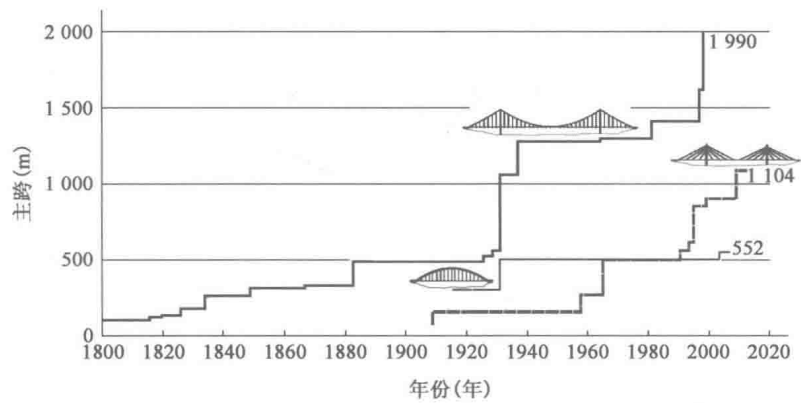


图 1.1-1 不同桥型跨径发展历程

悬索桥在大跨度桥梁中一直占支配地位,悬索桥的跨越能力在近几十年获得了大幅度的提高,从1981年亨伯尔大桥的1410m(图1.1-2)到1998年明石海峡大桥(图1.1-3)提高到1990m,按照当前的发展趋势,悬索桥的跨度仍有提高的趋势,规划中的意大利墨西拿海峡大桥(图1.1-4),跨度达到了3300m。



图 1.1-2 亨伯尔大桥



图 1.1-3 日本明石海峡大桥

悬索桥不断增长的跨度纪录都是由钢箱梁、钢桁梁创造的,采用组合梁的悬索桥数量有限,主要是中小跨度悬索桥,千米级大跨度悬索桥还是空白。2014 年中国建成了 850m 的大跨度组合梁悬索桥(图 1.1-5),不过这是在内陆风速较小、地质条件较好条件下的越江桥梁。在千米级以上跨度的悬索桥中,近年来出现了钢桁梁采用组合梁行车道板的工程应用,行车道板支撑在钢桁梁上,而不与钢桁梁结合成整体。鉴于悬索桥的力学特点,随着跨度的增加,或者在沿海强风环境下,组合梁悬索桥造价较高,应用前景面临的主要挑战在于经济性。

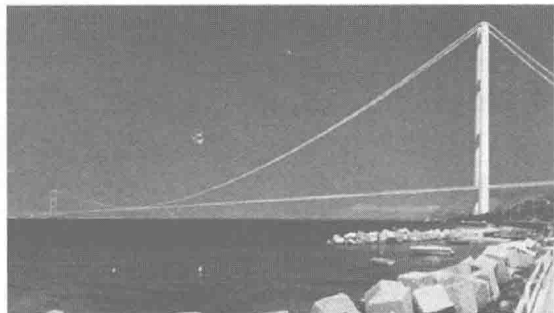


图 1.1-4 意大利墨西拿海峡大桥模拟图



图 1.1-5 中国武汉鹦鹉洲大桥

自 20 世纪 60 年代末以来,斜拉桥开启了密索体系新时代,为斜拉桥向大跨度发展奠定了基础,有力推动了斜拉桥在结构形式、跨越能力等多方面的全面发展。2008 年通车的中国苏通大桥(图 1.1-6),以 1 088m 的跨度使斜拉桥的跨度首次突破千米;短短四年之后,俄罗斯的 Russky Island 大桥(图 1.1-7)又以 1 104m 的跨度创造了斜拉桥跨度新纪录。从当前的发展趋势看,建造 1 500m 跨度的斜拉桥技术已经成熟。



图 1.1-6 中国苏通大桥,2008 年



图 1.1-7 俄罗斯 Russky Island 大桥,2012 年

在斜拉桥的发展过程中,组合梁斜拉桥也有着重要的贡献,1993 年上海杨浦大桥(图 1.1-8)以主跨 602m 创造了斜拉桥跨度的世界新纪录,首次实现了斜拉桥跨度超越拱桥、成为仅次于悬索桥的第二大跨越能力的桥型。组合梁在现代斜拉桥中得到了广泛应用,在 600m 以下跨度的斜拉桥中,组合梁作为加劲梁的工程占有很高的比例,特别是在欧美国家更是如此。但是组合梁斜拉桥的跨度发展和自身的能力并不相符,在上海杨浦大桥之后至今未获得显著的增加,目前最大跨度的组合梁斜拉桥为英国苏格兰主跨 650m 的福斯三桥(图 1.1-9)。



图 1.1-8 上海杨浦大桥,1993 年

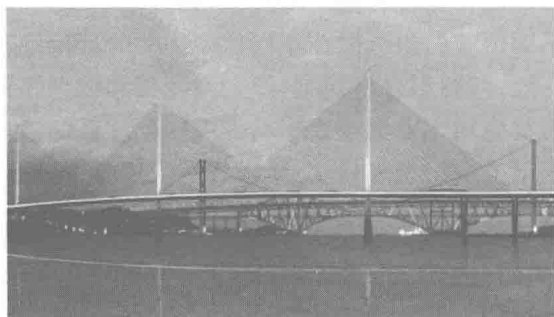


图 1.1-9 苏格兰福斯三桥,2017 年

拱桥是人类使用的最古老的桥型之一,1931 年美国建成了主跨 510m 的贝永大桥,创造了拱桥跨度的世界纪录,但是随后的跨度并没有大的突破,可以预见拱桥的跨度很难有大的发展。尽管如此,按照当前的发展形势,500m 左右的大跨度拱桥仍然有着良好的应用前景。有索支承的中承式拱桥和系杆拱桥(下承式)的跨度发展要晚很多,2003 年卢浦大桥主桥采用中承式钢拱桥(图 1.1-10),主跨 550m 创造了当时拱桥跨度世界第一。

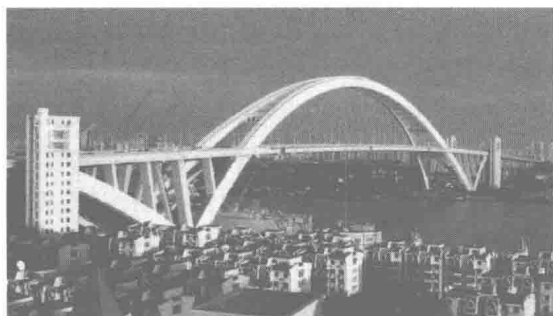


图 1.1-10 卢浦大桥,2003 年

二战之后,欧美国家和日本相继建造了许多大跨度的系杆拱桥,1963 年德国的费马恩(Fehmarnsund)海峡公铁两用桥,跨度达到了 248.4m;1991 年竣工的日本新浜寺大桥,采用提篮形拱肋,主跨 254m。

近年来,美国 Blennerhassett 岛 Ohio 大桥采用了网状吊杆和组合桥面结构,建成了跨度 267.8m 的系杆拱桥(图 1.1-11)。在欧洲等国家大量应用的系杆拱桥中,采用组合结构作为系梁成为主流并占据着很高的应用比例,在中承式拱桥中也常采用组合结构作为主梁。2013 年中国合江波司登大桥采用中承式推力拱桥(图 1.1-12),以 530m 主跨跻身 500m 级大跨度拱桥的行列,其桥面结构为纵横梁体系的钢梁,采用组合结构行车道板支承在钢梁上,尽管没有直接采用组合梁,但反映出大跨度拱桥采用组合结构的工程需求。

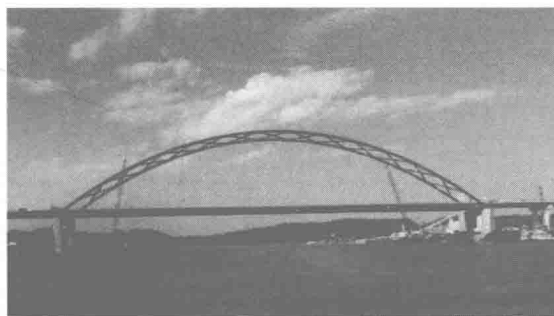


图 1.1-11 美国 Blennerhassett 岛 Ohio 大桥,2014 年



图 1.1-12 中国合江波司登大桥,2013 年

迄今为止,悬索桥、斜拉桥和拱桥三种大跨度桥型都有大量应用组合结构的工程实例,但不同形式的组合梁在不同桥型中的应用范围和程度各不相同。总体而言,斜拉桥的应用最为广泛,包括组合钢板梁、组合钢箱梁和组合钢桁梁等都有大量的应用;拱桥的应用也十分广泛,但其应用主要集中在钢梁为纵横梁体系的组合梁(或称组合钢板梁)上,组合钢箱梁和组合钢桁梁的应用相对较少;悬索桥的应用最少,组合钢箱梁、组合钢板梁都有应用,也有桁架梁上采用组合结构行车道板的实例。

1.2 索承式组合结构桥梁的特点

1.2.1 一般特点

组合梁作为桥梁结构中的一种重要结构形式,在拱桥、斜拉桥和悬索桥中有着大量的应用,组合梁(桥面结构)用于不同桥型其受力各不相同、各有特点;即使在同一种桥型中,跨度不同对其性能要求也不同,而且桥梁正常运营状态和抗风抗震对其性能要求也不同。

总体而言,除了作为桥面传力结构外,斜拉桥的加劲梁是以承受压弯为主的构件,悬索桥加劲梁是以承受弯曲为主的构件,拱桥加劲梁(或桥面结构)也是以承受弯曲为主的构件,但对于系杆拱桥则是以承受拉弯为主的构件。结构受力上的差异、在桥梁体系中的构造要求以及施工方法等,都将对加劲梁的结构形式产生影响。

组合梁由钢和混凝土两种材料构成,相对于混凝土梁,组合梁的桥面板以下的大部分截面由钢梁取代;相对于钢箱梁,又以混凝土桥面板取代正交异性钢桥面板。从结构自重和受力性能看,组合梁介于混凝土和钢梁之间。不同材料加劲梁的优缺点,并不能简单作为实际工程取舍的条件,对于不同形式的组合梁也是如此,需要纳入桥梁体系与工程环境之中,根据跨度大小、建桥条件等,兼顾材料性能、受力特点,考虑施工特点及风险等多种因素,最后做出最能发挥结构技术经济优势的选择。

1.2.2 组合梁斜拉桥的特点

斜拉桥的加劲梁是斜拉桥体系中的主要承载构件之一,在恒载作用下的受力状态与运营活载、温度等作用下的受力完全不同。在恒载作用下,可以调整斜拉索的索力,使加劲梁的恒载弯矩小到几乎可以忽略的程度,加劲梁主要承受轴向压力作用。在活载作用下,加劲梁的受力主要是结构承载后的被动反应,所产生的主要是弯矩作用,轴力作用较小,在中跨靠近跨中区域及边跨辅助墩顶区域,会出现较大的弯矩峰值。对于大跨度斜拉桥,组合梁混凝土桥面板的承压性能优点,可以在受压区得到充分发挥。在跨中轴向压力较小、弯矩较大的区域,通常正弯矩较大、负弯矩较小,处于组合梁上缘的混凝土板在正弯矩作用下,主要承担压应力。在斜拉桥的边跨区域,特别是墩顶区域,加劲梁要承受较大的负弯矩作用,即使该区域有一定的轴向压力作用,组合梁上翼缘混凝土板也可能出现拉应力,常常成为组合梁受力上的不利区域。

组合梁用于斜拉桥,其最大优势在于发挥混凝土的抗压优势。和钢梁相比,组合梁重量较大,将导致斜拉索、桥塔及其基础所受轴力的增加,这是其不利的一面。总体来看,组合梁应用

于斜拉桥,不仅组合梁自身的经济性优于钢梁,而且在结构受力上能够发挥加劲梁的性能优势,在很大的跨度范围内可以抵消重量增加所产生的不利影响,可以在更大的跨度范围展现技术经济上的竞争力。

1.2.3 组合梁悬索桥的特点

地锚式悬索桥的加劲梁首先是承担车辆等桥面荷载的传力构件,加劲梁在自重作用下仅受梁段节间的自重弯矩,在二期恒载和活载作用下承受整体弯曲作用。成桥节段悬索桥加劲梁的挠度从属于主缆,大部分荷载都由主缆承担,对于大跨度悬索桥,从总体受力角度看,加劲梁几乎退化为传力构件。悬索桥加劲梁在运营阶段的受力相对容易满足,桥梁宽度较大时会发生横向受力控制的情况,纵向受力甚至会出现加大梁高也不能减小主梁应力的情况。运营阶段的受力需求有时也不能完全左右加劲梁的选择,美国塔克马大桥的事故就是最好的说明。大跨度悬索桥加劲梁的选型往往受抗风性能的控制,需要采用抗扭性能良好的桁架梁和箱梁等截面形式,为提高悬索桥的抗风性能,加劲梁常采用风嘴等气动措施。悬索桥中常用的钢箱梁也是从抗风的角度选择,依靠封闭的箱形截面提供足够的抗扭能力,仅从运营受力需要出发,开口的钢板梁即可满足要求。

对于组合梁而言,混凝土桥面板替代正交异性钢桥面板,增强了结构刚度、加大了结构自重。结构刚度加大对桥面有着明显的优势,也会增加结构的总体刚度,但对整体受力而言并不是必需的。组合梁用于悬索桥,降低了加劲梁本身的造价、改善了桥面结构的性能,但整体受力上并不能充分发挥其较大刚度的优势。和钢梁相比,其重量增加将导致缆索、桥塔及其基础所受轴力以及锚碇受力的增加。总体来看,组合梁替代钢梁应用于悬索桥,在自身造价节省的同时,重量增加引起缆索、桥塔、锚碇等造价增加,经济上的优劣取决于两者的对比关系,不仅与悬索桥跨度密切相关,还与组合梁结构形式、桥式布置、地质与自然环境等多种因素有关,特别是随着悬索桥跨度的增加,加劲梁较大重量对经济性的不利影响越发显著。组合钢板梁结构简洁、抗扭能力较弱,在采取气动措施的情况下,在内陆地区可以满足 800 ~ 900m 跨度悬索桥的抗风要求;在沿海地区,为了满足桥梁抗风要求,必须采取抗扭性能好的封闭式组合钢箱梁。

对于自锚式悬索桥,主缆不再提供重力刚度,加劲梁需要通过弯曲承担较大比例的荷载,同时要承受锚于梁端的主缆传递来的轴向压力。由于自锚式悬索桥结构刚度与主缆初应力无关,其刚度主要依靠缆和梁组合体系。因此,对于自锚式悬索桥,加劲梁类型及截面高度等对结构刚度及受力有一定影响。自锚式悬索桥的加劲梁一般可采用钢加劲梁、混凝土加劲梁、组合梁和混合梁等结构形式。自锚式悬索桥加劲梁必须是连续的,其设计不仅要关注结构在自重、活载、温度及收缩徐变等作用效应下引起的内力满足强度要求,还要重点考虑主缆的水平分力产生的轴向压力引起的加劲梁整体稳定、局部屈曲等问题。组合梁应用于自锚式悬索桥中,结构的力学性能与重量介于混凝土加劲梁和钢加劲梁之间,可以较好地满足结构的运营受力要求和结构稳定要求。此外,混凝土桥面板可以较好地解决桥面刚度的问题,其钢结构和桥面板为预制加工构件,质量容易保证,可施工性较好。由于自锚式悬索桥所能适用的跨度有限,一般情况下抗风问题并不突出,容易通过合理的设计得到满足。因此,自锚式悬索桥具有较好的受力性能和使用性能,其有竞争力的跨度可以达到 400m 以上。

1.2.4 组合桥面拱桥的特点

拱桥桥面结构的受力可以分为两种情况,一类是由吊索支撑、不承受拱肋水平分力作用的桥面结构,如中承式拱桥的中间跨主梁;另一类是由吊索支撑、同时承受拱肋水平分力作用的桥面结构,如系杆拱桥的系梁。前一种主梁的受力类似于悬索桥,主要为承担车辆等桥面荷载的传力构件,通过调节吊索力,可以使主梁在恒载作用下的弯矩几乎可以忽略,在活载作用下承受整体弯曲作用。对于常规的拱桥而言,桥面结构在活载作用下的受力问题容易得到满足,因此出现了很多桥面结构采用横梁体系的工程实例,即行车道板支承在横梁上,横梁通过吊杆锚于拱肋上。但是,为了抵抗横向风、车辆偏载等荷载作用,需要加劲梁具有相应的横向刚度和抗扭能力,特别是对于大跨度拱桥,桥面结构侧向刚度及整体性不足,容易引起结构的损伤。常用的组合钢板梁形式,钢梁由纵横梁组成并与混凝土桥面板结合成整体,具有良好整体性能以及纵横向刚度,可以很好地满足拱桥桥面结构的受力要求,也便于安装施工。系杆拱桥的桥面结构除了在运营阶段受弯曲作用外,自恒载阶段就需要承担拱脚的水平分力作用。系杆拱桥在欧洲有着广泛的应用,其桥面结构以组合梁为主,结构构造简洁、整体性强。这些现代拱桥的桥面结构,混凝土板是系梁不可分割的一部分,同钢纵梁一起共同抵抗拱脚传来的拉力。由于拱桥的适用跨度相对于悬索桥、斜拉桥要小,抗风问题一般不会成为加劲梁选型的控制因素。因此,系梁(桥面结构)可以选择构造简洁、材料节省的组合钢板梁等结构形式,和钢梁上安装混凝土行车道板的结构相比,结构的整体性更好,和正交异性桥面板的全钢结构相比,造价将会明显降低。但不可避免的是,由于组合桥面的重量大于全钢结构,必然引起拱肋受力的增加,也即拱肋要增加材料用量而引起造价增加。但在拱桥的优势跨度范围,组合桥面结构有着广阔的应用前景和技术经济竞争力。

1.3 索承式组合结构桥梁的竞争能力

1.3.1 组合梁斜拉桥

斜拉桥采用组合梁,可以发挥混凝土材料的抗压性能优势、减少钢材用量,从而降低造价并改善桥面性能。斜拉桥中最为常用的组合钢板梁,其钢梁为纵横梁格体系,钢主梁(纵梁)与斜拉索的布置相互匹配,传力路径明确顺畅、构造简洁,不仅结构受力高效,而且便于因地制宜选用多种施工方案,展现了优良的技术经济优势。随着斜拉桥跨度的增加,组合钢板梁不能适应强风环境的抗风要求,需要采用具有良好抗扭性能的组合钢箱梁,以适应跨度增加的结构受力和抗风要求。对于公铁两用桥,较宽的上层公路路面采用混凝土板与钢桁结合,形成组合钢桁梁,用于斜拉桥同样具有技术经济竞争力。

斜拉桥由加劲梁、斜拉索、桥塔、桥墩及基础等组成,在斜拉桥的总造价中,梁、索、塔等不同构件所占比重各不相同,总体而言加劲梁造价所占比例最高,对于钢箱梁斜拉桥,加劲梁的造价甚至超过总造价的50%。研究表明,斜拉桥跨度在1000m以内时,组合梁的造价将低于钢箱梁。重量较大的组合梁必然会引起斜拉索、桥塔及其基础造价的增加,斜拉索的增加量基本与所受荷载成比例关系;桥塔及基础则不同,加劲梁重量的增加,只是增加了其所受的轴力,

并不会对其所受弯矩造成明显的影响。特别是斜拉索、塔墩及基础的造价在总造价中的比例较低,所以组合梁斜拉桥在较大的跨度条件下将能够展现经济优势。

从目前的工程实践看,组合梁斜拉桥有着广泛的应用,面对不同的建设条件和功能要求,都有合适的加劲梁形式可以选用。自上海杨浦大桥建成至今,尽管组合梁斜拉桥的跨度未获大幅度增长,但研究表明组合梁斜拉桥技术经济合理跨度可以达到 900m 左右,甚至在 1 000m 跨度也能够表现出竞争力。

1.3.2 组合梁悬索桥

悬索桥是跨越能力最大的桥型,其技术经济竞争力主要表现在大跨度桥梁上。一般来说,悬索桥在 500m 以上跨度才能表现出竞争优势。悬索桥加劲梁的材料用量指标不会随着跨度的变化而发生明显的变化,除非超大跨度悬索桥因为抗风等因素而较大改变加劲梁的形式,比如由整体闭口钢箱梁改变成分体式钢箱梁。重量较大的加劲梁将会引起缆索索力的增长,随着悬索桥跨度的加大,缆索材料用量指标大幅增加,进而导致经济竞争力下降。当然,加劲梁重量增加后,经由缆索传递到主塔、主塔基础以及锚碇的反力也将增加,只是缆索受力增加引起的桥梁造价增加通常更加显著。因此,人们普遍认为钢梁几乎是千米级大跨度悬索桥的唯一选择。

悬索桥的加劲梁、缆索、锚碇、桥塔及基础等不同组成部分,在悬索桥的总造价中所占比重各不相同,总体而言加劲梁造价基本不受跨度变化的影响,塔桥、锚定及其基础虽然随地址、水文等条件不同而变化,但同等条件下每平方米造价指标随悬索桥的跨度变化并无显著变化,只有主缆的造价指标随悬索桥跨度增加而不断增加。对于三跨悬索桥,采用钢箱梁时,在跨度达到 1 200m 以上后主缆造价指标超过加劲梁;采用组合梁时,跨度达到 800m 时主缆造价指标超过加劲梁。对于单跨悬索桥,采用钢箱梁时,在跨度达到 900m 以上后主缆造价指标超过加劲梁;采用组合梁时,跨度即使在较低的 700m 时主缆造价指标也大幅超过加劲梁。加劲梁由组合梁替代钢箱梁,由混凝土替代钢材,造价将有所下降,重量较大的组合梁必然会引起缆索、桥塔锚碇及基础造价的增加,缆索造价的增加不仅随梁重增加而增加,随着跨度的增加其造价在总造价中的比例显著提高。换言之,随着悬索桥跨度的增加,以组合梁替代钢箱梁,主缆造价增加对总造价增加的贡献率将逐步增加,加劲梁造价的降低对总造价降低的贡献率将逐步降低。因此,随着悬索桥跨度增加,组合梁悬索桥的造价将超越钢箱梁而不再具有经济优势。组合梁悬索桥即使在 700m 以下的跨度条件,造价一般也将高于钢箱梁悬索桥,更大跨度则很难再有竞争力,尤其在强风环境和不良地质的条件下,组合梁悬索桥的经济跨度将下降。

工程实践表明,在地质条件较好、锚碇费用较低的情况下,跨度达到 800 ~ 900m 时,组合梁悬索桥与钢箱梁悬索桥相比,即使造价有所增加,但尚处于可接受范围,在综合考虑多种因素后,可以展现技术上的竞争能力。可以预见,在更小的跨度范围和合适的条件下,组合梁悬索桥与钢箱梁悬索桥相比,将在经济上表现出竞争能力。然而,随着跨度的减小,桥梁的技术经济性将是斜拉桥的优势范围,悬索桥还需面临斜拉桥的强有力竞争。显然,组合梁悬索桥合理跨度的进一步增加,难度首先不在技术层面,而是在于经济性。传统的以钢筋混凝土桥面板为桥面承载构件的组合梁,用于悬索桥的合理跨径将在 800 ~ 900m 范围内,很难再有大的提高。

自锚式悬索桥情况则有所不同,目前采用钢箱梁的自锚式悬索桥最大跨度达到 600m,采用组合梁的自锚式悬索桥最大跨度达到 370m 接近 400m。尽管实际工程进展的最大跨度已经达到 600m,但无论采用钢箱梁还是组合梁,自锚式悬索桥有竞争力的跨度都在 500m 之内。自锚式悬索桥的加劲梁承受较大的弯矩和主缆水平分力作用,缆索集中锚于悬索桥的梁端,这一方面要求加劲梁具有较强的抗弯和承压能力,另一方面也说明组合梁用于自锚式悬索桥有其受力合理性。既有的工程实践表明,组合梁自锚式悬索桥有竞争力的跨度可以达到 400m。

1.3.3 组合梁拱桥

目前,在欧洲国家系杆拱桥普遍采用组合桥面结构,由于系杆拱桥的优势跨度并不很大,通常在 200m 左右、一般不会超过 300m,采用组合桥面结构不仅在经济上具有竞争力,还可以提高桥面结构的刚度并方便安装施工。当跨度在 300m 以内,特别是在 200m 左右的范围,全钢系梁(桥面结构)的造价在总造价中所占比例较高,采用组合梁替代采用正交异性钢桥面板的钢梁,可以降低桥面结构造价,综合考虑拱结构及基础费用的增加,采用组合桥面结构的系杆拱桥仍然具有竞争力。中承式拱桥采用组合梁作为桥面结构也有很多实例,既有简单体系的推力拱桥,也有组合体系的部分推力拱桥。近年来,在国内 500m 级大跨度中承式拱桥中,采用了纵横梁体系的钢梁,组合桥面板支撑在钢梁上,并不是严格意义上的组合梁,显然是一种折中的选择,一是为了回避正交异性钢桥面疲劳损伤风险,二是减小混凝土桥面板的较大自重。

用混凝土桥面板代替钢梁上缘的正交异性板,能够减少钢材用量、降低造价并改善桥面性能。拱桥通常不会因为抗风问题限制桥面结构的选择,常用的组合钢板梁等钢梁为纵横梁格体系的结构形式,构造简洁、受力高效,而且便于施工,对于拱桥具有良好的技术经济优势。然而,工程实践表明拱桥的桥面结构的整体性关系到使用性能和耐久性,一些横梁体系的桥面结构由于整体性差,易于造成结构损伤,而且一旦吊杆破坏结构承载的冗余度降低。由此,直接采用组合梁(组合结构)替代组合桥面板支承于钢梁的体系,不仅可以增加结构刚度和整体性,也降低了后期维护工作量。

拱桥的桥面结构用组合梁代替钢梁,在总造价中占比较高的加劲梁造价降低比较显著,而对总造价中占比较低的桥墩及基础造价影响相对较小;拱肋在总造价中所占比例与跨度密切相关,随跨度加大而增加,跨度将是拱桥桥面结构选择的最重要影响因素。然而增加的重量属于结构的恒载,只在拱肋产生轴力,材料承载能力可以充分发挥,即使在 300m 以上跨度,组合梁拱桥仍然具有应用价值。

从目前的工程实践看,组合桥面结构(组合梁)拱桥有着广泛的应用,面对不同的建设条件和功能要求,都可能找到合适的应用价值。通常在 300m 以上跨度,拱桥采用组合梁与纯钢梁相比,虽然经济上优势逐步下降,但考虑到桥梁的使用性能和可维护性等技术上的优势,甚至在 400m 以上跨度也能够表现出竞争力。

1.3.4 索承式桥梁的相互竞争

斜拉桥直到 1991 年挪威的 Skarnsundet 大桥建成,才以 530m 的主跨跨度超越了 500m,随后进入了快速发展时期;至 2008 年中国苏通大桥以 1 088m 主跨使斜拉桥的跨度迈进了

1 000m级新时代。悬索桥作为跨越能力最大的桥型,目前采用钢桁梁的悬索桥跨度已经接近2 000m。从斜拉桥和悬索桥的技术发展看,在悬索桥的跨度不断发展的同时,斜拉桥的跨度也在快速发展,并在更大的跨度范围与悬索桥展开竞争。在斜拉桥与悬索桥相互竞争的过程中,悬索桥传统的优势跨度范围正在不断向更大的跨度范围转移。已有的实践已经表明了斜拉桥在千米级跨度桥梁的竞争优势,可以预见斜拉桥甚至可以在1 500m级跨度范围与悬索桥展开竞争。但鉴于斜拉桥的体系特点,在现有的结构材料性能等条件下,其技术经济上的竞争跨度在1 500m大关,难以再有大的突破。

如前所述,组合梁斜拉桥与其他梁型斜拉桥的竞争跨度可以达到900m左右,因此在同样的跨度范围内可以和不同梁型的悬索桥展开竞争。组合梁悬索桥与其他梁型悬索桥的竞争跨度一般在800m以内,即使在这个较大的跨度条件下,典型的双塔三跨悬索桥很难和双塔斜拉桥竞争。然而,在800m以下甚至500m的跨度范围,斜拉桥和悬索桥相比,并非具有绝对的竞争优势。以典型双塔体系为例,斜拉桥的加劲梁需要考虑边中跨平衡布置,而悬索桥的加劲梁则可以根据需要,选用一跨、两跨或三跨布置方式。比如,当桥梁仅有一孔跨越需求时,以跨度为700m为例,采用斜拉桥时加劲梁的总长度将达到1 300m左右,而采用悬索桥时加劲梁的总长度仍然是700m,两侧可采用造价低廉的小跨度桥梁,甚至直接与引道相衔接,这将使得悬索桥在经济上更具优势。如在山区地貌环境下,斜拉桥采用较大跨度无法展开边跨布置,或者采用较小跨度需要超高墩塔,甚至基础难以施工等,悬索桥可能成为较优的选择。对于越江桥梁需要一跨过江时也一样,悬索桥可以采用单跨结构形式,斜拉桥不仅要平衡布跨,而且其景观常常也有缺陷。显然,组合梁悬索桥有其合适的应用环境,其竞争优势取决于多种条件,如桥址环境、施工条件、工程地质、交通与车辆状况等,需要对多种影响因素综合考虑。

组合梁斜拉桥在200~600m的跨度范围有着大量的应用,也表明了其在这一范围的竞争优势。随着跨度的减小,组合梁斜拉桥的施工方法有着更加多样化的选择,比如可以在少临时墩、甚至无临时墩情况下,实现组合梁的钢梁的顶推施工;根据具体工程情况,还可以采用部分斜拉桥,以充分发挥加劲梁的承载能力、减少塔和索的材料消耗。这些施工的多选择性以及结构自身的多样性,使得组合梁斜拉桥甚至可以在150m左右的跨度范围与预应力混凝土连续梁展开竞争。地锚式组合梁悬索桥和钢梁悬索桥一样,在较小的跨度范围与其他桥型相比,不具有经济上的竞争力。虽然跨度较小可以采用自锚式悬索桥,但这种结构体系所能适应的这一跨度范围,基本处于斜拉桥和拱桥的优势跨度范围,只有在建筑高度受到限制,或者建筑景观有特殊要求等条件下,才能展现出竞争优势。

拱桥在所能适应的跨度范围内,主要是与梁式桥及斜拉桥竞争。一方面,对于跨度约在300m以下的范围,拱桥可以有效降低建筑高度,也不需要像斜拉桥那样需要平衡布跨,可以有效减小主桥的总长度,常常成为有竞争力的桥型;另一方面,在300m以下的跨度范围,也是组合桥面结构拱桥的优势范围。跨度大于300m的拱桥,一般情况下经济性不及斜拉桥;但在山区等特殊条件下,拱桥仍然有很强的竞争力,虽然自重较大的组合桥面将影响拱桥的竞争力,但由于工程造价并非工程选择唯一因素,仍然有着应用前景。

对于悬索桥、斜拉桥和拱桥,组合梁与钢箱梁、钢桁梁等梁型竞争,各自的竞争优势取决于多种条件,如桥址环境、施工条件、工程地质、交通状况等,都可能成为影响因素,而不限于力学性能

和工程造价等方面。比如山区桥梁,钢箱梁或采用正交异性板的钢桁梁,不方便运输、安装困难,采用组合结构有可能成为一种很好的选择。或者出于避免疲劳损伤风险的目的放弃采用正交异性钢桥面的结构,或者偏远地区为减少养护工作,这些情况都有可能成为选择组合梁的重要影响因素。

组合结构桥梁在欧洲获得了高度发展和广泛应用,其设计理念值得借鉴。

组合梁作为悬索桥或拱桥的加劲梁,特别是大跨度悬索桥,加劲梁在恒载作用下的纵向受力很小,一旦损伤需要进行维修时,或者在使用寿命后期需要更换时,通常只是需要中断行车,而不会对悬索桥整体受力安全产生重要影响。对于中承式拱桥,情况也和悬索桥类似。即使是混凝土桥面板参与受力的系杆拱桥,通常采用的施工方法也是钢梁及拱肋安装完成后进行桥面板施工,桥面板自重主要由钢系梁承受,桥面板与钢梁结合后共同承担二期恒载和运营荷载,这就容易通过微小的代价满足桥面板维修与更换要求。从加劲梁的横向受力看,若是采用先钢梁再桥面板的施工方法,桥面板维修更换同样不会对受力安全产生重要影响,即使桥面板从自重阶段就参与受力,也可以在桥面设置反力架,创造方便的桥面板维修或更换条件,或者钢横梁直接预留桥面板修补更换条件,代价并不高。总之,混凝土桥面板一旦出现损伤,可以方便、经济地进行修补,甚至更换。相对而言,钢箱梁一旦正交异性桥面系统出现损伤,维修加固并不容易,如需更换则更为复杂,甚至需要以整节段钢梁为单元进行更换,无论实施的便利性以及工程经济性,都难以达到组合梁混凝土桥面板的优势。

1.4 索承式组合结构桥梁的说明

索承式组合结构桥梁结构形式多样,在工程中应用范围广泛。“索承式”和“组合结构”是本书的两个关键词,鉴于本书所要论述的内容不可能涵盖所有的索承式组合结构桥梁,需要加以说明。

传统的索承式(缆索支撑)桥梁,主要指悬索桥和斜拉桥两大结构体系。随着桥梁技术的发展,下承式和中承式拱桥的吊杆也主要由索结构承担,因此也是有索支撑的桥梁。不难发现,采用缆索支撑的桥梁,不限于上述提到的悬索桥、斜拉桥和拱桥三种桥型,本书的目的不在于讨论索承式桥梁的分类,只是以“索承式”概括所要讨论的悬索桥、斜拉桥和拱桥三种大跨度桥型,其中拱桥不包括上承式拱桥。

组合结构的涵盖面及应用范围广泛,因此分类形式也多种多样。根据有关文献,这里将构件的断面由钢和混凝土或组合构件采用连接件连成整体共同工作,从断面看为两种以上构件的结合,称为组合结构(Composite Structure);将钢与混凝土等不同材料的构件用接头连接成整体的结构称为混合结构(Mixed Structure)。由此,组合结构桥梁应该包括使用组合构件或组合结构的桥梁,在此主要指钢与混凝土两种材料结合而成的组合结构。显然悬索桥和斜拉桥的桥塔也可以采用组合结构,拱桥中常用的钢管混凝土拱肋也是组合结构,“索承式组合结构桥梁”主要讨论索承式桥梁的加劲梁(或桥面结构)所采用的组合结构。

从加劲梁的角度出发,上述组合结构既有组合钢板梁、组合钢箱梁、组合钢桁梁三种结构形式,也包括波折腹板组合梁、桁式腹杆组合梁等结构形式,还有实腹板与空腹桁混合钢梁与