

近十年我国桥梁组合结构研究与应用进展

韦建刚¹, 陈宝春^{1,2}, 刘永健³, 陈宜言², 牟廷敏⁴, 刘君平², 李聪¹, 姜磊³

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;
3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 4. 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 组合结构是重要的桥梁结构之一, 其中钢-混凝土组合结构应用最多, 混凝土组合结构的应用正不断增多。文章首先明确了所讨论的桥梁组合结构与组合结构桥梁的内涵, 回顾了钢-混凝土组合梁、柱和拱的研究与应用进展。其中, 传统钢-混凝土组合结构(如钢梁-混凝土板组合梁、钢管混凝土拱桥)的应用与研究持续深入, 设计理论体系不断完善; 新型组合结构发展迅猛, 如波形钢腹板(杆)-混凝土组合梁、钢管混凝土组合梁、斜拉桥混合梁、钢管混凝土组合桥墩与桥塔、钢管混凝土美兰拱等, 但研究成果与技术经验在相关规范中未能得到充分的反映, 有待今后规范修订时补充完善。之后, 介绍了不同混凝土材料组合而成的混凝土组合结构。随着混凝土材料科学与技术的进步, 尤其是超高性能混凝土的出现, 使混凝土性能差异不断增大, 混凝土组合结构不断出现, 在梁、柱、拱中均有应用。它们的结合面相容性较好, 应用前景广阔, 今后应加强相关研究。讨论认为, 钢-混凝土组合结构的命名与分类应考虑结构的受力性能; 混凝土组合结构的研究重点在于不同混凝土材性的差异性大小; 混合结构的关键是结合段, 且要将其与局部加强构造区别开来。最后, 给出了桥梁组合结构的定义, 并提出了重构公路桥梁设计规范体系的建议。

关键词: 桥梁组合结构; 钢; 混凝土; 拱; 梁; 柱; 桥墩; 桥塔; 规范

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)01-0001-32

Review of bridge composite structures in China in the last decade

WEI Jiangang¹, CHEN Baochun^{1,2}, LIU Yongjian³, CHEN Yiyang²,
MU Tingmin⁴, LIU Junping², LI Cong¹, JIANG Lei³

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

3. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

4. Highway Planning, Survey and Design Institute, Department of Transportation of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

Abstract: The composite structure is one of the important bridge structures, in which the steel-concrete composite structure is the most widely used, and the application of concrete composite structure is increasing. The connotations are firstly clarified of bridge composite structure and composite bridge, research and application progress are then reviewed of steel-concrete composite beams, columns and arches. It can be found that the traditional steel-concrete composite structures, such as the composite beams of steel beam-concrete deck slab, and concrete-filled steel tube (CFST) arch bridge, have been applied continuously and studied in-depth, and the corresponding design theory system is constantly improved. The new composite structures such as corrugated steel web (truss rod)-concrete composite beams, CFST composite beams, hybrid girders in the cable-stayed bridges, CFST piers and pylons, CFST Melan arches, etc., have been developing rapidly.

收稿日期: 2024-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(52278158); 福建理工大学科研启动基金(GY-Z23239, GY-Z21220)

第一作者简介: 韦建刚(1971—), 男, 广西上思人, 教授, 博士, 研究方向: 拱桥、钢-混组合结构。

通信作者: 陈宝春(1958—), 男, 福建罗源人, 教授, 博士, 研究方向: 拱桥、无伸缩缝桥与UHPC桥。

However, their research results and technical experiences have not been fully reflected in the relevant codes, which need to be supplemented and improved in future revisions. Then an introduction is made of the concrete composite structure which is composed of different concrete materials. With the progress of concrete material science and technology, the performance difference among various concrete has been enlarging, especially after the emergence of ultra-high performance concrete, which results in more and more application of concrete composite structure in beams, columns and arches. They have good compatibility and broad application prospects, and relevant research should be strengthened in the future. This research finds out that the naming and classification of steel-concrete composite structures should consider the mechanical properties of the structures; the research emphasis for concrete composite structures is the difference in the properties of different concretes; while for hybrid structures, the key issues are their composite segments, and they should be distinguished from the locally reinforced constructions. Finally, the definition of composite bridge structure is proposed and some suggestions are put forward to reconstruct the design code system for design of highway bridges in China.

Keywords: bridge composite structures; steel; concrete; arch; beam; column; pier; pylon; code

桥梁的受力构件主要有梁、柱、拱、索。不同材料的组合是为了发挥不同材料的相对优势,以形成经济合理的结构。钢、混凝土是现代桥梁的主要建筑材料,钢桥、混凝土桥和组合桥是现代桥梁的主要桥型。本文的讨论对象为桥梁工程应用的组合结构(以下简称桥梁组合结构),包含钢—混凝土组合结构、不同混凝土的组合结构(简称混凝土组合结构),前者的应用最多。由于混凝土抗拉强度低,因此无论是钢-混凝土组合结构还是混凝土组合结构均主要用于梁、柱和拱等受弯与受压构件中,而不出现在以受拉为主的构件中。

文献[1]对 2013 年以前我国钢-混凝土组合桥的研究与应用进展进行了综述。然而,近十年来,桥梁组合结构得到更加广泛的应用,组合形式更加多样,结构内涵更加丰富,有必要对其研究与应用进展进行综述。为此,本文首先讨论桥梁钢-混凝土组合结构的定义,接着分别以梁、柱、拱为主要结构介绍钢-混凝土组合结构、混凝土组合结构的研究与应用进展,最后对相关问题展开讨论,并给出桥梁组合结构的定义和公路桥梁设计规范体系重构的建议。

1 本文讨论的对象

1.1 桥梁钢-混凝土组合结构与钢-混凝土组合桥梁

现有公路桥梁规范中未见桥梁钢-混凝土组合结构的定义,但有钢-混凝土组合桥梁的解释。在《公路钢混组合桥设计与施工规范》(JTG/T

D64-01-2015)^[2](以下简称《钢混组合桥》JTG/T D64-01-2015)中它被称简称为钢混组合桥梁,它在术语解释中为:“梁、主塔、拱等主要受力部分由钢和混凝土两种材料结合形成的组合构件或混合构件组成的桥梁”。但是,在桥梁工程中,以材料划分的桥梁类型,如钢桥、混凝土桥、组合桥,通常是按桥跨结构主要建造材料来分类的^[3]。而上述的解释中将主塔包含在内,显然不合适,因为主塔本身并不是桥跨结构,通常不会以其材料表征来称呼相应的桥梁,如组合塔斜拉桥、组合塔悬索桥。因此,钢-混凝土组合桥梁不应包含主塔为钢-混凝土组合结构的桥梁。

实际上,钢-混凝土主塔是桥梁组合结构的一种,它与钢-混凝土组合墩、桩同属于以受压为主的钢-混凝土组合柱。除组合柱外,常见的桥梁钢-混凝土组合结构还有钢-混凝土组合梁(包含板)和组合拱。它们是在截面上由钢和混凝土两种材料有效地组合并通过连接件共同受力的结构,是经典和狭义的钢-混凝土组合结构。组合梁在本文中,除特别指出外,均指狭义的组合结构。

广义的钢-混凝土组合结构,还包括钢-混凝土混合结构。它是指由采用不同材料的构件组成的受力结构。

以梁为例,钢-混凝土组合梁指截面由钢梁和混凝土板连成整体、共同受力的梁,如图 1(a)所示;钢-混凝土混合梁则指在顺桥向由钢梁与钢筋(预应力)混凝土梁通过结合部组合在一起共同受力的梁,如图 1(b)所示。类似地,有钢-混凝土

组合柱、混合柱(或墩、塔等),钢-混凝土组合拱、混合拱。

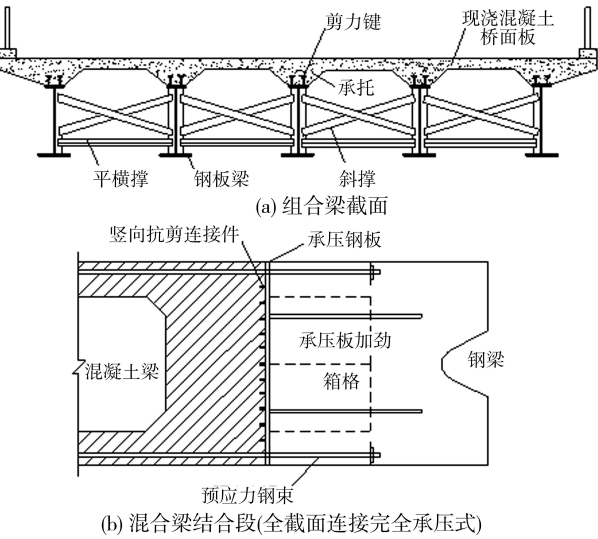


图 1 钢-混凝土组合梁、混合梁示意图
Fig.1 Schematic diagram of steel-concrete composite beam and hybrid beam

显然,钢-混凝土组合结构强调的是截面上不同材料的组合,构造的关键在于不同材料之间的界面,如组合梁的抗剪连接件;而钢-混凝土混合结构强调的是由不同材料构件的组合,构造的关键在于不同部件的结合段,如混合梁或混合塔的结合段^[4]。

1.2 桥梁其他组合结构与其他组合桥梁

桥梁其他组合结构主要有混凝土组合结构、FRP-混凝土组合结构等。后者应用较少,本文没有讨论。

桥梁混凝土组合结构是混凝土-混凝土组合结构的简称。现有公路桥梁规范中未见相关的定义。在《钢混组合桥》JTG/T D64-01-2015^[2]中,给出了叠合混凝土板的名词解释。它指在预制板上加浇一层现浇混凝土,当现浇混凝土硬化后两者形成整体共同受力的桥面板,如图 2 所示。这种板,也有称为预制-现浇混凝土组合板或预制-整体组合式板^[3]。为简洁起见,建议将其称为“混凝土组合板”。它属于混凝土不同制作方式的组合,预制部分除参与整体受力外,还作为现浇部分的模板,受力计算需要分阶段进行,并保证界面的结合质量。

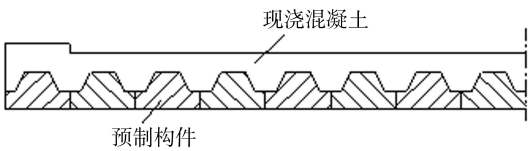


图 2 混凝土组合构件(预制-现浇混凝土组合板)
Fig.2 Concrete composite members (precast and cast-in-place concrete composite slab)

除采用不同制作方式外,在桥梁工程中采用材性不同混凝土所形成的结构,早已有之。然而,过去因混凝土材性差异不大,一般不将其视为组合结构。随着混凝土材料的发展,出现了超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)等新材料,它与普通混凝土(normal concrete, NC)材性差异很大,不同材性混凝土形成的结构,也应纳入到混凝土组合结构之中。混凝土材性不同的内涵包括但不限于:强度(普通、高强、超高强之间,不含同一级别内的不同)、重度(普通、轻质)、组分(骨料、纤维等)、耐久性等。

对于钢结构所用的钢材,虽然出现了由不锈钢与一般钢板、钢板与高分子材料组合而成的复合钢板,但习惯上将其作为材料来考虑,相应的结构不视为组合结构^[5]。

桥梁混凝土组合结构同样可以有广义与狭义之分。广义的混凝土组合结构包含了混凝土混合结构。由于其内涵与钢-混凝土组合结构相似,这里不再赘述。

2 桥梁钢-混凝土组合结构的研究与应用进展

在桥梁钢-混凝土组合结构施工时,混凝土为可塑形材料,钢为定型材料。建筑钢材主要有线材(钢筋)、板材(钢板)与型材。钢筋与混凝土的组合成为钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)或预应力混凝土(prestressed concrete, PC)结构,不归入组合结构。因此,钢-混凝土组合结构中主要的钢材是板材与型材。钢板除少量用于桥面板中,与混凝土组合形成组合板外,较少用于其他组合构件。在钢-混凝土组合构件中,主要应用的是型材(如工字钢、钢管)或由板材焊接而成的构件(如板梁)。钢型材与混凝土的组合,又根据型材的截面性质可分为开口型和闭口型,后者主要有钢管和钢箱。

在实际工程中,钢-混凝土组合结构常见的分类以受力性质为主,主要有组合梁、组合柱和组合拱。以下按此分类,对其研究与应用进展进行介绍。

2.1 钢-混凝土组合梁

钢-混凝土组合梁(包含板)以受弯为主。本节将分别介绍钢梁-混凝土板组合梁、钢腹板(杆)-混凝土顶底板组合梁、钢管混凝土(concrete filled steel tube, CFST)组合梁,最后介绍钢-混凝土混合梁。

2.1.1 钢梁-混凝土板组合梁

钢梁-混凝土板组合梁是出现最早、应用最多的组合梁,如图 1 所示。不特别说明时,钢-混凝土组合梁指的就是这种组合梁。其他类型如钢桁梁-混凝土板组合桁梁^[6]、钢板-混凝土板组合板,也可归入其中。它在我国的发展已较为成熟,出版了一批专著^[7-8],颁布了国家和行业标准^[2,9]。近十年,研究在向纵深方向发展,着重于疲劳、腐蚀、长期荷载和单一或多重作用下的性能^[10-15]等研究。同时,扩大了研究对象,如采用装配化施工的组组合梁^[16-17]、采用 UHPC 板^[18]的组合梁,以及自带钢销型钢-UHPC 的组合梁^[19]。

对于具体桥梁,根据实际条件,提出了适应性结构,并开展了相应的分析。例如,云南乍甸 1 号大桥为减小连续梁的负弯矩区段桥面板易开裂问题,混凝土桥面板采用“预制板+后浇层”的做法,在负弯矩区段桥面布置延性工程水泥基复合材料(engineered cementitious composites, ECC)层,并通过支座顶升方式向负弯矩区段桥面板施加预压力^[20]。

在中下承式钢管混凝土拱桥中,采用钢-混凝土组合梁、组合板整体结构的桥面板,2004 年首次应用于广东佛山东平大桥,钢格子梁上满铺 6~8 mm 厚钢板,通过开孔板连接件(perfobond leiste, PBL)与板上的现浇混凝土形成总厚度为 120~150 mm 的组合(桥面)板,如图 3 所示。这种结构已在标准跨径梁桥、钢管混凝土桁梁桥、超 500 m 的钢管混凝土中承式拱桥中应用,制订了中国公路学会《公路桥梁钢-混凝土现浇组合桥面板技术指南》T/CHTS10114-2023 和四川地方标准《钢-混凝土组合桥面板技术规程》DB51/T1991-2015,并纳入《公路钢管混凝土拱桥设计规范》JTG/T D65-2015^[21]。

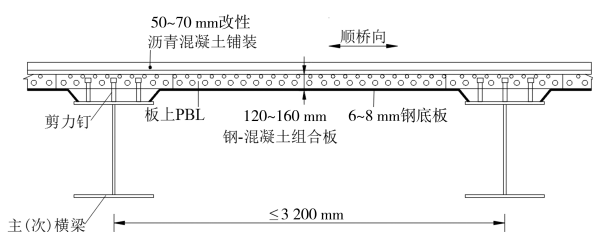


图 3 钢-混凝土组合梁、组合板横截面图

Fig.3 Cross-section of steel-concrete composite ribbed slab

在大跨钢桥中,近年来钢-UHPC 组合桥面板的研究与应用在我国异常活跃。它成为解决钢桥铺装层开裂损坏和钢箱梁疲劳开裂等问题的主要手段之一^[22]。已在许多桥梁上得到应用,形成较为成熟的技术,出版了专著^[23],制订了标准^[24-25]。

抗剪连接件是保证组合梁中钢与混凝土共同受力的关键,它以栓钉为主,但施工时人工成本高,且栓钉焊接残余应力、应力集中等对受力均有较大的影响。采用黏结剂连接能克服这些缺点,但由于破坏呈脆性,需采用较大的安全储备,目前还不易为工程界所接受。所以,又提出二者组合连接的方式,并开展了研究^[26-30]。研究表明,这种连接方式的界面滑移很小,组合梁具有较好的塑性变形能力,研究给出了相应梁的抗弯承载力计算方法。这种结构在国外的桥梁工程中已有应用,如德国的 Gärtnerplatz 人行桥^[31]、法国 Illzach 桥^[32]。前者采用环氧树脂将 UHPC 预制板与钢桁梁连接在一起组成钢-混凝土组合桁梁,后者采用水泥基黏结剂与栓钉将预制 UHPC 板与钢桥面板组合在一起;但在我国还未见应用。

在钢-混凝土组合梁中,钢梁的腹板也可采用波形钢腹板代替平钢腹板,以省去平钢腹板需要的加劲构造,减小用钢量和焊接工作量。由此产生的组合梁,可称为波形腹板钢梁-混凝土板组合梁。钢梁可以是槽形^[33]、箱梁(分离式双箱或单箱双室)^[34]或工字形^[35]。2013 年河北邢台路桥已实现了工厂化生产,如图 4 所示。近十年来,这种桥型的研究在不断地深化之中,主要对其动力特性^[33-34]、剪力滞^[36]、有效分布宽度^[37]、抗弯性能^[38]、腹板稳定性和设计参数^[35]等开展了研究,使其技术更加成熟。



图 4 某波形腹板工字钢梁-混凝土板组合梁

Fig.4 A composite beam with corrugated web I-steel beam and concrete slab

2.1.2 钢腹板(杆)-混凝土顶底板组合梁

钢腹板(杆)-混凝土顶底板组合梁,一般施加有体外和(或)体内预应力。它由 PC 箱梁的腹板用钢腹板(杆)替代而成,称为钢腹板(杆)-PC 组合梁。当跨径不大时,也可不加预应力,顶、底板为 RC 板,相应的梁称为钢腹板(杆)-RC 组合梁。它与 PC 或 RC 梁相比的主要优点是自重减轻,且克服了混凝土腹板开裂的问题。

2.1.2.1 波形钢腹板-混凝土组合梁

钢腹板-混凝土组合梁中的腹板最早采用的是平钢腹板,并建成了法国 Ferte-Saint-Aubin 试验桥,但研究中发现平钢腹板因刚度大,吸收了大量的预应力,且存在剪切失稳的趋势^[39],因此,在该桥之后再无应用。波形钢腹板具有较大刚度和稳定性,自 20 世纪 80 年代法国的干邑桥(Cognac Bridge)建成之后,波形钢腹板-PC 组合梁桥技术引入日本,应用于简支梁、连续梁、连续刚构、斜拉桥和部分斜拉桥之中,迄今已建与在建的桥梁超过 200 座,其中 2017 年建成的新名神高速公路安威川桥创当时同类桥梁跨径的世界纪录(主跨 179 m)^[40]。文献[41]介绍了日本近期建设的 4 座各具特色的桥例,包括边主跨比小的茨原川 II 桥、采用挂篮悬臂施工的柳岛高架桥、采用异步悬臂施工的新池山高架桥和采用快速施工方法且在主梁底板结合处喷镀防腐蚀金属材料的安威川桥。

波形钢腹板-PC 组合梁桥于 2000 年左右被介绍到中国,最早应用于 2015 年内建成的江苏淮安长征人行桥等 3 座桥,之后应用数量不断增多^[42],跨径不断增大,技术也不断发展^[43]。据不完全统计,截至 2021 年底,我国已建和在建的有 149 座,其中主跨大于 120 m 的有 45 座。桥型以

连续梁为主,占总数的 84.1%,最大跨径达 160 m,为珠海前山河大桥。波形钢腹板-PC 组合梁也被用于部分斜拉桥,如山西运宝黄河大桥,主跨达 200 m^[44]。此外,安徽合肥南淝河特大桥,主跨 153 m,横向由 3 幅桥面组成,宽达 64 m,属超宽结构^[45],如图 5(a)。我国的相关技术还服务于“一带一路”沿线国家,如伊朗德黑兰 BR-06L/R 特大桥^[46],如图 5(b)。



(a) 安徽合肥南淝河特大桥



(b) 伊朗德黑兰 BR-06L/R 特大桥

图 5 两座波形钢腹板-PC 组合梁桥

Fig.5 Two corrugated steel webs-PC composite girder bridges

伴随着应用,有关的研究在我国也不断地系统、深入。在静力性能方面对疲劳、横向内力、温度效应、混凝土徐变、剪力键受力、剪力滞效应和抗弯、抗剪、抗扭性能、梁端混凝土局部应力等开展了大量的研究^[47-48];在动力方面主要集中于自振特性、动力响应、冲击系数和抗震性能等方面^[49-50]。近年来,又开展了波形钢腹板-RC 组合梁、波形钢腹板-UHPC 组合连续箱梁^[51]等研究,并对主跨 180、360 m 的桥梁进行了试设计分析^[46,52]。

波形钢腹板-PC 组合梁常在剪力比较大的腹板部位(一般为支座处)设置内衬混凝土,以提高腹板的稳定性。对于大跨径波形钢腹板-PC 组合梁桥,设置内衬混凝土成为必要的构造措施。然而,如果设置长度较长,则减弱了波形钢腹板减轻自重的作用,经济性变差。目前有学者已对内衬混凝土的抗剪性能、计算方法、设计参数开展了研究^[45,53],为合理设置内衬混凝土打下了理论基础,但今后还要深化研究。同时,还可以综合考虑

构造措施,以减小内衬混凝土的自重,如波形钢腹板设加劲构造、内衬混凝土采用 UHPC、内衬混凝土部分高度设置等。至于体外束和体内束的设置比例,有些工程师认为值得探讨^[52]。但实际上,采用悬臂施工的大跨梁桥的体内束以承担一期恒载(自重)为主,体外束以承担二期恒载和运营期活载为主,由于自重占比很高(70% ~ 80%),因此二者可调范围不大。

我国已先后出版了数本有关波形钢腹板-PC 组合梁专著^[54-56],颁布了 2 本行业规范^[57-58]以及 7 部地方标准。今后应在现有研究成果与工程经验总结基础上,对已有标准进行修订完善,在超大跨径波形钢腹板-PC 组合梁桥方面,开展结构动力性能、腹板稳定性、施工工法、数值分析方法等研究^[59-60],使我国波形钢腹板-PC 组合梁桥的技术保持国际领先水平^[46]。

2.1.2.2 钢桁腹-混凝土组合梁

混凝土箱梁中的混凝土腹板用钢腹杆代替,就成为钢腹杆-混凝土组合梁,也称为钢桁腹-混凝土组合梁。这种桥型最早应用在法国 1985 年建成的 Arbois 桥,之后在日本、德国、葡萄牙、瑞士等国的桥梁中均有应用,尤以日本为多。我国最先采用这种结构的是上海闵浦大桥斜拉桥的边跨(4×63 m)主梁,该桥于 2010 年建成通车^[61]。2011 年建成的南京绕城高速江山桥(35 m + 35 m)也采用了这种结构^[62],建成后还开展了静动载试验^[63]。

近十年来,我国对钢桁腹-混凝土组合梁开展了较多的试设计分析^[64],但实际应用较少。少量的应用中,桥梁的跨径也不大或仅为人行桥^[65]。同时,开展了等效刚度换算^[66]、节点受力性能^[67]、结构自振特性^[68]、变形计算^[69]、受弯承载力^[70]、受扭^[71]、剪力滞^[72]和翼板纵向应力^[73]等计算方法研究,为实际应用提供了技术支撑。

如同波形钢腹板-RC 组合梁一样,钢腹杆-混凝土组合梁也可是 PC 梁或 RC 梁。对于跨度较大的 PC 桥,钢腹杆因其抗屈曲能力较之波形钢腹板大,可用于较高的截面。我国目前的应用与研究仍以跨径较小的 RC 梁为主,经济效益不明显。今后,需要抓住大跨 PC 梁的实际需要,推动钢腹杆-PC 组合梁的应用与研究。同时,应将钢腹板(杆)-混凝土组合梁作为一个整体来考虑,当桥梁跨径较大而需要采用轻型、预制腹板时,宜

推荐钢腹杆,不一定只考虑波形钢腹板。

此外,有学者提出将钢管混凝土腹杆应用于 PC 箱梁中并开展了试设计与抗震性能研究^[74]。但这种结构的工程应用可行性较弱。因为若腹杆采用空钢管制作,则后期灌注管内混凝土困难;若采用钢管混凝土制作,则腹杆与弦管的连接困难。

2.1.3 CFST 组合梁

CFST 本身就是组合构件,它主要应用于以受压为主的柱、拱结构中。当用于受弯为主的梁时,极少将单根构件作为梁直接应用,而是将其作为弦杆与其它钢腹杆组成桁梁,以提高结构的受力性能与使用效率。桁梁的腹杆一般为钢管,上、下弦可以都是 CFST,也可以是仅受压杆为 CFST、受拉杆仍为钢管。研究表明,无论是受拉或受压杆,管内混凝土对节点承载力和刚度提高的作用大于对杆件截面承载力和刚度提高的作用。对于高跨比较大的 CFST 组合梁,节点受力性能的提高能有效改善桁梁的整体受力性能^[75-77]。

在桥梁中,桁梁的上弦宜尽可能将桥面板予以利用。如,四川干海子大桥的 CFST 组合连续桁梁,施工时,上、下弦杆均为 CFST,其中上弦杆后期埋入桥面板混凝土结构中,考虑桥面板的作用后,上弦杆采用了小管径杆件^[78]。这种桥兼具钢管和混凝土桥梁的优点,重量仅为混凝土结构的一半,全桥施工不需要模板,在高烈度地震区、复杂地形山区的高速公路建设上,是一种抗震性能好、经济适用的新桥型。有限元分析表明,当其位于河谷场地中时,应特别注意墩高突变区的低墩和梁跨的抗震设计,尤其要重点考虑局部场地效应的影响^[79]。对地震下行车安全性能的分析表明,柔性高墩轻型桥梁对地震波有滤波效应,地震波传至桥面时强度明显减弱,E1 多遇地震作用下,最不利的重型货车的倾覆指标阈值大于桥面最大横向加速度,即不存在车辆侧倾现象,且墩顶位移满足设计,要求干海子特大桥行车安全性能良好^[80]。

这种结构在 2018 建成的汶马高速汶川克枯大桥(图 6)又得到了应用并进行了相应的优化,改三角桁架型式为平面桁架型式,更易于施工,上、下弦管及腹管均为 CFST,且下弦管采用先张法施加了预应力。主梁顶面采用钢混凝土组合桥面板,桁主梁梁高分别为 3.5 m 和 4.2 m,下部结构为 CFST 桥墩和混凝土桩基础。该桥全长约

4.3 km,共计 32 联、219 跨,采用 30 m 和 40 m 两种跨径组合,最短联长度为 150 m,最长联长度 290 m。实桥测试结果表明,管内混凝土有效地提高了结构的受力性能,下缘主管最大应力仅 9.7 MPa,应力水平较低,支管热点应力和名义应力水平也较低。主梁整体刚度较大,试验荷载作用下基本符合平截面假定^[81]。该桥全长 6 430 m,经历了 2022 年 6 月 1 日和 2022 年 6 月 10 日两次 6 级地震,行车安全性良好。



图 6 四川汶马高速汶川克枯大桥

Fig.6 Wenchuan Keku Bridge of Wenma Highway in Sichuan Province

CFST 桁梁也有个别做成敞开式的,即下承式

无风撑结构,上弦杆用圆钢管混凝土而下弦杆用钢筋混凝土结构,如某一跨 50 m 的跨闸桥^[82]。

在 CFST 受拉弦杆中,通过管内混凝土掺纤维或采用 UHPC 材料,可提高其抗拉强度^[83]。也可通过对其施加预应力来提高梁的整体受力^[84],或采用轻集料混凝土以减小自重的作用和地震反应^[85]。

CFST 的弦杆以圆形为主,也可采用矩形,以方便腹杆与弦杆的连接。对矩形钢管混凝土桁梁桥开展了结构体系、装配式结构、带 PBL 键结构、节点疲劳、抗震、受弯承载力、抗剪承载力等研究^[86-93],在工程中得到应用^[94],也颁布了地方标准^[95]。一般情况下,桁梁的上、下弦杆均为矩形钢管混凝土,截面高度可根据实际需要采用等高或变高,如主跨 40 m 的陕西省黄延高速 K15 + 644.312 跨线桥采用等截面^[94],而主跨 90 m 的北京顺于路西延跨温榆河大桥主桥则采用变截面。也有个别桥梁 CFST 桁梁上弦和下弦分别为圆形和矩形钢管混凝土,如双跨 70 m 的 G211 国道甘肃甜水桥^[96]。CFST 组合梁截面形式多样,图 7 列出了部分形式。

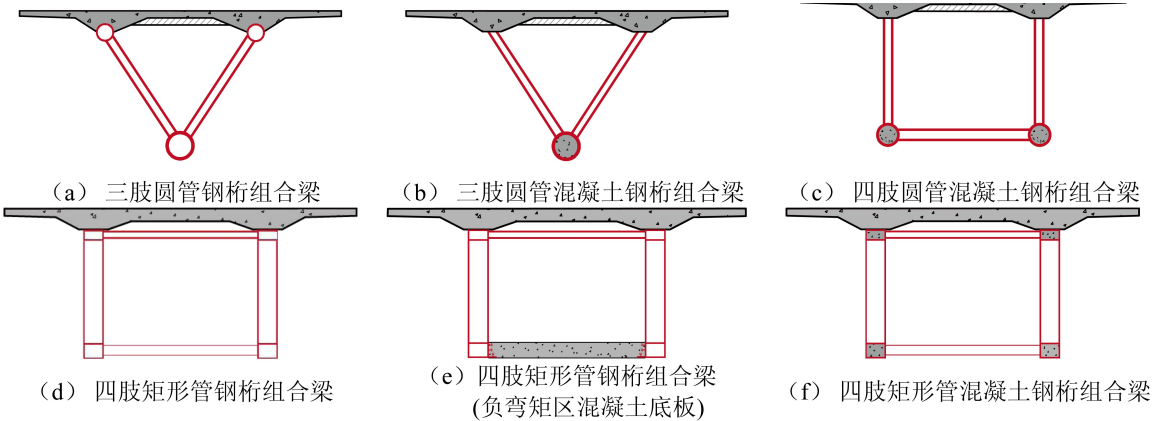


图 7 CFST 组合梁截面形式

Fig.7 Section forms of CFST beams

除了钢腹杆外,陈宝春等将波形钢板引入 CFST 桁梁中,形成波形钢腹板-CFST 桁梁。这种结构继福建厦门侨英人行天桥(2012 年建成)应用外^[1],在 2015 年建成的京珠国道主干线河北段 K347 + 500 人行天桥(图 8)、深圳马峦山公园公园 1 号桥等工程中得到应用并开展了相应的研究^[97]。近年来,对弦杆采用矩形钢管混凝土杆件的结构也开展了研究^[98]。

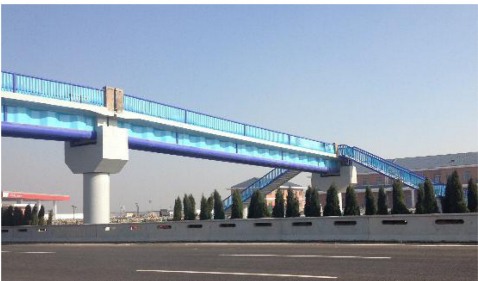
2.1.4 混合梁

混合梁的类型很多,包括钢梁-PC 梁混合梁、钢管-CFST 混合梁(部分填充混凝土的钢管混合梁)、不同腹板的混合梁等。

2.1.4.1 钢梁-混凝土梁混合梁

主梁采用钢梁和混凝土梁混合的组合结构,也称为钢-混凝土混合梁,是桥梁结构中最常见的混合梁,可用于连续梁^[99]、连续刚构^[100]或斜拉桥

的加劲梁^[101]。它主要用于边主跨比较小的情况,主跨全部或中段采用钢梁,边梁全部或加上主跨的一部分采用 PC 梁^[102]。



(a) 京珠国道主干线河北段K347+500人行天桥



(b) 深圳马峦山公园1号桥

图 8 两座波形钢腹板-CFST 桁梁

Fig.8 Two corrugated steel web-CFST truss girders

混合梁的设计要点在于结合点位置的选择、结合部的构造以及预应力布置等,对此已开展了一些分析^[103]。同时,对冲击系数^[104]、抗震性能^[105]、结合部受力^[106]、施工阶段的台风响应^[107]等开展了相应的研究。《钢混组合桥》JTG/T D64

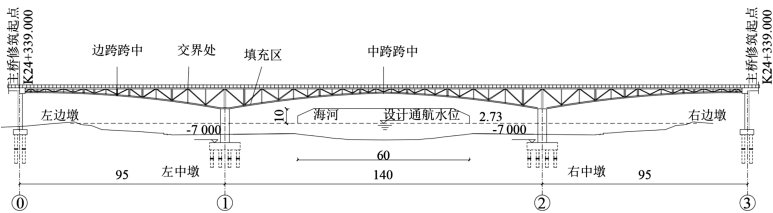


图 9 天津海河某部分填充混凝土组合钢桁梁桥总体布置图(单位:m)^[110]

Fig.9 Elevation of a partially filled CFST truss bridge in Haihe, Tianjin(unit: m)^[110]

另有一种在钢箱-混凝土组合连续梁负弯矩区的钢箱受压区内部分充填混凝土的结构,它实际上是局部改善结构受力的构造措施,可不归入混合梁的范畴^[111]。

2.1.4.3 波形钢腹板混合梁

波形钢腹板混合梁的应用还不多,这里举两个例子。

日本 2016 年建成的兴津川大桥采用了具有波形钢腹板、混凝土腹板两种梁的混合结构^[112]。该桥跨径布置为 (64.25 + 144.0 + 107.0 + 80.0 +

-01-2015^[2]第 8 章“混合结构”给出了混合梁结合部的构造形式,主要有全截面连接完全承压式、全截面连接承压传剪式、部分截面连接完全承压式和部分截面连接承压传剪式等;第 13 章则给出了“混合梁结合部施工”的规定。

混合梁也可由组合梁与混凝土梁组成。如,阜淮高铁颍河特大桥提出主跨 230 m 的混合梁斜拉桥方案,通航孔主梁为钢混组合梁,其余跨主梁为混凝土梁^[108]。

2.1.4.2 部分填充混凝土的钢管混合梁

在钢管桁梁的弦杆钢管中,仅部分填充混凝土,则弦杆可视为由 CFST 和空钢管混合而成。充填的部位一般为受压弦杆、弦杆支座附近区域、受集中力或侧向力作用的弦杆和压力较大的腹杆等。由于钢管本身是一个连通的整体,这种混合梁的连接构造较为简单,多在相接段空钢管一侧设置内加劲构造,以增加其抗局部屈曲稳定性并扩散集中应力。

目前已开展了这种混合梁的静动力性能、车桥振动、地震响应等研究^[109-110]。但实际应用还不多。图 9 为天津海河某部分填充混凝土组合钢桁梁桥总体布置图。该桥跨径布置为 (95 + 140 + 95) m,桥面宽 43 m,主桁为变截面,桥墩处梁高 12 m,跨中梁高 3.5 m,边跨端梁高 3.0 m^[110]。

61.25) m,总体布置图见图 10。其中波形钢腹板-PC 梁段长 287.250 m,普通 PC 梁段长 171.250 m。桥面净宽 9.5 m,最高墩高 60 m。

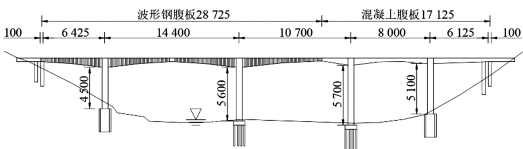


图 10 日本兴津川大桥总体布置图(单位:cm)

Fig.10 Elevation plan of Xingjinchuan Bridge in Japan(unit: cm)

我国 2017 年建成通车的深圳东宝河新安大桥则采用具有不同底板梁段的混合结构^[113],见图 11。该桥主桥为(88+156+88)m 变梁高波形钢腹板连续箱梁,在中跨跨中 49.6 m 范围的梁段为波形钢腹板钢梁-混凝土顶板组合截面,其余段采用波形钢腹板-PC 梁段。同时,该桥的腹板在端横隔和墩上的 0 #和 1 #块为混凝土腹板和具有内衬混凝土的钢-混凝土组合腹板,其余段为波形钢腹板,也具有混合性。



图 11 深圳东宝河新安大桥

Fig.11 Xin'an Bridge over Dongbao River in Shenzhen

前文所提的试设计研究的主跨 360 m 波形钢腹板组合梁桥也采用了混合梁结构。主跨由两边段 120 m 长的变高度波形钢腹板箱梁 + 中间段 120 m 等截面钢箱梁组成,边跨主梁采用 150 m 长变高度波形钢腹板箱梁结构,主墩采用混凝土双薄壁矩形空心结构,其立面布置如图 12 所示^[46]。

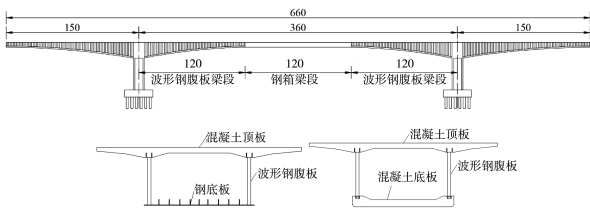


图 12 试设计 360m 波形钢腹板桥总体布置图(单位:m)

Fig.12 General layout of CSW bridge with a span of 360 m under trial design (unit: m)

顺便指出,文献[114]所指的是特宽桥在单箱多室截面,除采用波形钢腹板外还采用混凝土腹板的结构,如图 13 所示。这种结构在山西运宝黄河大桥中得到应用,主要用于改善结构的横向受力性能。它不属于这里所说的混合结构。

2.2 钢-混凝土组合柱

桥梁钢-混凝土组合柱主要用于桩基、桥墩和桥塔等以受压为主的结构之中。在桩基中,主要的应用是 CFST 桩,因应用量不大且技术较为成

熟,本文不再介绍。

在桥墩与桥塔的应用中,它可以是单个结构或构件采用钢与混凝土的组合,也可以是柱肢与连接件采用两种材料的组合。桥墩中较为常见的是 CFST 柱,桥塔中较为常见的是柱肢为 RC、连接件为钢构件的组合柱。建筑工程中常见的型钢混凝土柱(steel reinforced concrete, SRC),在桥梁中较为少用,偶有采用以 CFST 为埋置支架的桥墩,本文将其归在 CFST 柱。

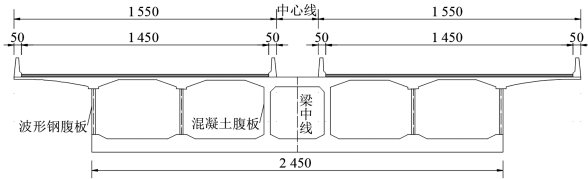


图 13 宽桥截面上两种腹板组合使用示意图(单位:cm)

Fig.13 Combined use of two webs in a wide bridge (unit: cm)

2.2.1 钢管增强混凝土桥墩

外包混凝土的 CFST 桥墩适用于墩高特别大的山区桥梁,它为矩形空心薄壁结构,四角设有四根钢管混凝土构件。施工时先架设钢管再内填混凝土,然后外包管外混凝土和四壁混凝土,形成桥墩。这种结构首先在 2012 年建成的四川腊八斤特大桥(墩高 37 ~ 183 m)、黑石沟特大桥(墩高 34 ~ 157 m)中得到应用^[78,115]。目前,所应用的最高桥墩为四川凉山州金阳县金阳河三峡连心桥 6 号主墩,高达 196 m。现有的研究与应用中,常将这两种截面构成成分相同、分别用于桥墩和建筑物柱子的结构视为同一种结构。因截面构成复杂,所给出的名称也多种多样。如 CFST 核心柱、叠合柱^[116]、劲性骨架混凝土柱、钢管增强混凝土柱(steel tube reinforce concrete, STRC)^[117~118]和 CFST 加劲混合柱^[119]等。

实际上,通过对 CFST 面积比(横截面中 CFST 截面积与总截面积的比值)的调查分析可知,对于桥墩,其面积比较小,主要分布在 0.02 ~ 0.10 之间,以外包混凝土受力为主,可称之为 STRC 桥墩或柱,因其施工时先架设空钢管,后灌管内混凝土和外包混凝土,与美兰拱(详见 2.3.2 节)的施工方法相似,所以也可称为美兰墩或柱;对于建筑物柱,其面积比较大分布在 0.20 ~ 0.50 之间,以内置 CFST 受力为主,则称为混凝土外包钢管混凝土柱(concrete - encased CFST, CE-

CFST)。

已开展的 CE-CFST 柱受压试验较多,而 STRC 柱的极少。作者曾进行 STRC 和 CE-CFST 柱的对比试验,两种试件的面积比分别为 0.04 和 0.13,结果表明,峰值荷载后,STRC 柱中的外包混凝土出现明显压溃和剥落的现象,表现出较为明显的脆性破坏,破坏过程与 RC 柱接近;而 CE-CFST 柱受压外包混凝土压溃并退出工作后,核心 CFST 仍具有较大的承载作用,破坏过程更靠近 CFST 柱。因此,对于以外包混凝土受力为主的 CFST 外包混凝土的桥墩,属于 STRC 墩柱^[118]。

现有的研究主要集中对 CE-CFST 柱开展了静力性能分析^[120]、侧向力作用下的动力响应^[121]、拟动力试验^[122]、振动台试验^[123]、抗震性能^[124]等研究,为其应用提供了技术支撑。但对 STRC 柱的受力性能研究还较少。尽管两种结构柱的组成部分相似,但受力性能会有所不同,有关面积比、外包混凝土土配筋等参数对其受力性能的影响也会所不同,因此需要进一步开展以 STRC 柱(为主)与 CE-CFST 柱受力性能的对比研究。

此外,文献[125]还开展了将这种结构应用于桥塔的可行性分析,但未见应用。

2.2.2 钢管混凝土桥墩

这里所说的 CFST 桥墩指应用于上部自重较轻、墩高不高时的单肢 CFST 柱墩,如图 14 所示。

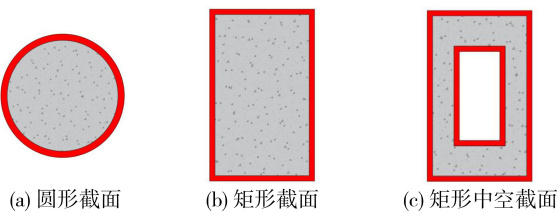


图 14 钢管混凝土单肢柱墩截面形式

Fig.14 Section forms of single CFST column piers

圆形是其最常用的截面形式,也有采用矩形和中空矩形的。文献[126]进行了截面选型分析。这种柱子的静力性能已有大量的研究,在桥墩中应用时,主要开展抗震性能的研究^[127-128]。它的常规施工方法是先安装钢管,再灌管内混凝土。有的研究提出将其做成预制多节段拼装柱墩^[129],没有考虑到工程中要实现双层钢管及其所夹混凝土的拼接相当困难,可行性差。文献[130]提出装配式 CFST 格构墩的设想,其柱肢为内附有一层 10 cm 左右厚混凝土的钢管(离心生

产),节段间用法兰螺栓连接,其可行性较之双层钢管有所提高,但也仍未见实例。

除图 14 所示的 3 种截面形式外,学术研究提出或在其他结构中应用的截面形式多种多样,如外圆内圆、外方内圆等全填充或中空 CFST 柱^[131]以及矩形内配异心双圆钢管混凝土的所谓“新型复式 CFST 墩柱”^[132]、用混凝土外包圆钢管混凝土并在外侧四角配置角钢的“劲性骨架及 CFST 高墩”^[133]等,还有 CFST 外面再包纤维增强复合材料和碳纤维增强复合材料管的。这些截面形式,由于构造复杂,在桥墩中应用极少,这里不详细介绍。

当墩柱直径较大时,常采用约束型 CFST,如深圳北站大桥、兰州雁盐黄河大桥等^[134]。周绪红等对其受力性能开展了研究^[135-136]。这种墩柱钢管不直接参与纵向受力,主要作用是约束管内混凝土,无需与承台连接。不高的桥墩可采用单节段预制装配化施工,一些学者对其与承台的连接方式开展研究^[137-138],其抗震性能同样是研究热点^[139-140]。此外,对波形钢管混凝土柱在桥墩中的应用也开展了研究^[141],但它能否被工程界所接纳应用,目前不得而知。

近年来,刘永健等提出了一种采用 PBL 键加劲管壁的 CFST 柱(图 15),简称 PBL 加劲型 CFST 柱,所用的钢管可以是圆形、方形,也可以是其它形状。

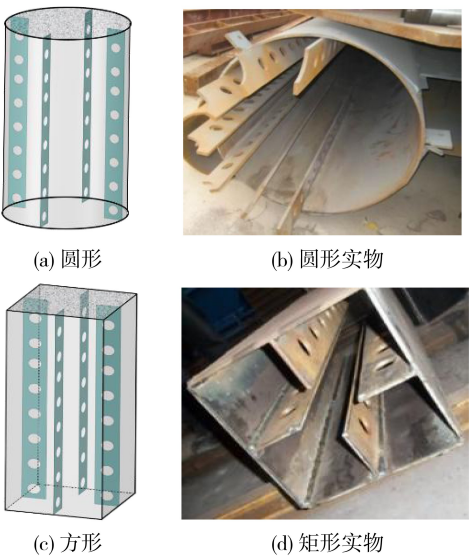


图 15 PBL 加劲型 CFST 柱

Fig.15 CFST column with stiffened PBL

PBL 键兼具界面连接和钢板防局部屈曲加

劲的作用。对其受压性能的研究表明,PBL 键能增强 CFST 套箍作用和钢管局部稳定^[142-143],推出试验表明 PBL 键可确保 CFST 界面和节点传力的可靠性^[144]。

文献[145]对 PBL 加劲型矩形钢管混凝土结构力学性能研究进行了综述。这种结构已在陕西黄延高速跨线桥桥墩、西安二环路匝道桥桥墩、合铜高速跨线桥桥墩等工程中得到应用,见图 16^[89]。

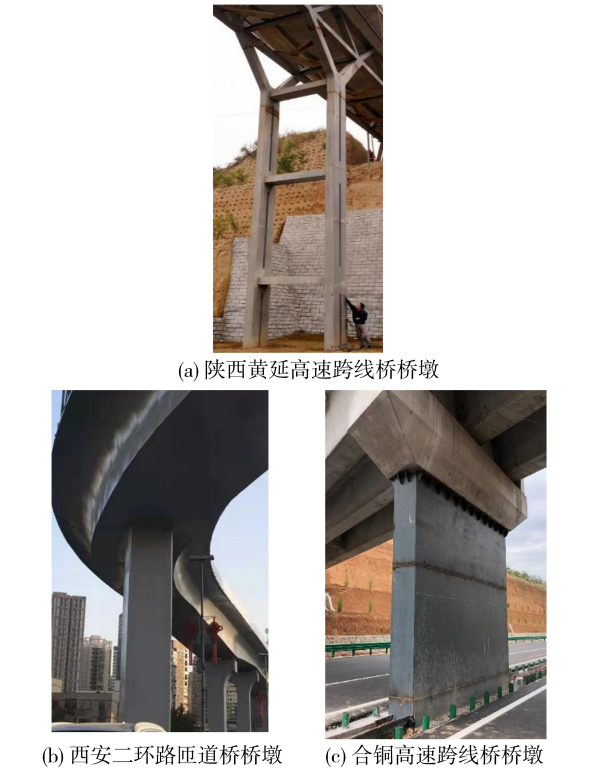


图 16 PBL 加劲型钢管混凝土桥墩
Fig.16 CFST pier stiffened with PBL

桥墩较高时,可采用多根 CFST 作为柱肢,形成刚度较大的格构柱。表 1 给出部分工程实例。对 CFST 格构柱的静力性能研究已较为成熟^[134],但对其抗震性能的研究还在不断深入之中,在斜缀管、等截面等研究不断成熟的基础上^[146-147],着重于平缀杆、变截面结构的抗震性能及其在罕遇地震、极端温度作用下抗震性能的研究^[116,148-149]。其中对干海子大桥采用的平缀管格构柱开展了拟静力试验^[150]、拟动力试验^[151]、振动台试验^[152]和有限元数值模拟分析^[153],研究了截面类型、缀件布置方式、长细比、轴压比等参数对受力性能、地震反应的影响,提出了水平荷载-位移能力曲线的统一计算方法^[154]和抗震性能设计指标^[80]。

表 1 钢管混凝土格构墩部分工程实例			
Tab.1 Bridge examples of CFST lattice piers			
工程名称	墩高/m	建成年份	管内混凝土强度等级
重庆黄桶立交桥主线桥	36	2016	C50
甘肃驿马沟特大桥	35~76	2018	C60
四川油坊湾大桥	—	在建	C80
四川得妥特大桥	43~65	在建	C80
四川干海子特大桥	24~67	2012	C50
	95~107		

与 CFST 相关的混合墩常见的有两种,一种是不同柱肢的混合柱,另一种是不同缀件的混合柱。

不同柱肢的混合柱,可以是在钢管内部分(通常是底部)填充混凝土的墩柱,其受力构件可视为由 CFST 与钢管混合而成的墩柱;交接处的构造与部分填充混凝土的混合梁相似,见 2.1.4.2 小节介绍。已有的研究主要集中于抗震性能。墩柱的截面形式一般为圆形^[155-156],也有方形(或称钢箱)^[157],也有的管内带肋^[158],有的则施加了预应力使其在水平荷载作用下具有自复位能力^[159]。一些研究则集中于其关键参数—填充长度(率)^[160]。虽然研究已较多,但在我国的实际应用还较为少见。需要指出的是,这里所说的部分填充是指在钢管长度范围内的部分填充,与建筑结构柱的部分填充(包覆)钢-混凝土组合柱内涵不同。后者是指是在截面上的部分填充(包覆),即柱子是由工字钢或 H 型钢及填充在钢翼缘之间的混凝土组成^[161]。

不同柱肢的混合柱,还可以是钢筋混凝土柱在柱脚采用外包钢管的抗震加固的情况。目前,对这种混合柱的抗震性能试验还较少^[162],已进行的试验多为全长加固的柱子^[163]。

还有一种情况是在钢筋混凝土墩柱中,为增强其抗震性能,加入 CFST 内芯,文献[164]称其为 CFST 组合桥墩。对于一般的桥墩,仅需在柱脚设置。这样的话,它也是一种混合结构。但目前未见实际应用。

采用不同缀件连接的混合墩,柱肢一般为 CFST,缀件以钢管杆件为主,柱脚段则采用 RC

板,以减小钢管缀杆的剪切变形对格构柱整体稳定性的不利影响。这一部分的组合结构,也被称为 CFST 复合柱。陈宝春等对其受力性能开展了研究,提出相应的极限承载力的计算方法^[165-166]。这种混合墩主要在四川干海子大桥的高墩中得到应用。

虽然 RC 缀板主要的作用是减小复合柱的剪切错动,但它实际上会参与结构受力而承担一定的纵向压力。由于混凝土的极限应变远小于 CFST 的极限应变,所以复合柱的承载力常以 RC 缀板为控制。改进的方法,一是缀板不参与纵向受力,只起联接柱肢的作用,类似于约束型 CFST 的钢管;二是提高缀板材料的极限应变值,如采用 UHPC 缀板,形成 UHPC-CFST 复合柱。对于后者,也已开展了系列的研究^[167-168]。结果表明, UHPC-CFST 复合轴压短柱中,缀板与钢管混凝土柱肢基本上同步破坏,承载力大于 RC-CFST 复合短柱。在试验研究和有限元参数分析基础上,提出了 UHPC-CFST 复合柱极限承载力计算方法和设计中结构性能指标的合理范围取值^[169]。

2.2.3 钢-混凝土组合塔柱

钢-混凝土组合塔柱近年来在缆索支承桥梁(斜拉桥和悬索桥)中的应用越来越多。CFST 柱是钢-混凝土组合塔柱最常用的结构形式。当跨径不大(如主桥跨径不大于 150 m)时,常采用单圆管独柱塔或门式塔,如广东南海紫洞大桥、重庆万安大桥、安徽淮北长山路桥、江苏无锡蓉湖大桥、湖北武汉后湖大桥、安徽六安长征大桥、甘肃临夏刘家峡大桥等^[170-171]。其中,刘家峡大桥为主跨 536 m 的悬索桥,钢管混凝土门式框架桥塔的钢管直径为 3 m、壁厚 50 mm,管内灌注 C40 微膨胀混凝土^[171]。一些桥塔为了造型需要,外层钢板需与桥塔外形相适应而不再采用圆形,代之以矩形、椭圆形、圆端形以及其 L 形、T 形等异形截面^[172],其组合作用削弱,施工中起模板的作用增强,如沈阳市高坎浑河大桥^[173]。

当缆索支承桥梁的跨径较大时,塔柱不仅受力大而且高,截面尺寸也相应增大,实心截面不仅受限于钢管制造、连接、局部稳定等问题,也不经济,于是多采用空心截面,如空心矩形、空心多边形、空心梯形等,还可做成多腔式或单箱多格式,如图 17 所示。

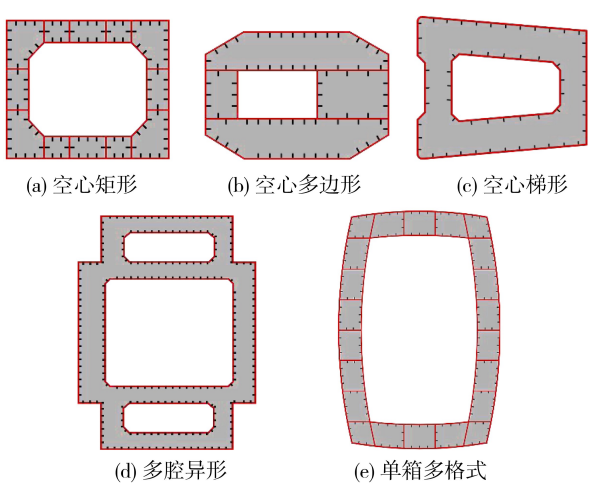


图 17 几种大型桥塔截面形式

Fig.17 Cross-section forms of large pylons

这种结构的塔壁采用双钢板内填混凝土结构,需在钢管壁上设置栓钉、PBL 键加强连接和加劲构造,以防止钢板掀起、剪切滑移和局部失稳。这种结构有时也称为“钢壳混凝土桥塔”^[174]或“钢板-混凝土组合结构桥塔”^[175],本文视其为广义的钢管混凝土结构,或称之为钢管混凝土“组合”桥塔,将其定义为“在钢壁板形成的闭口截面内填充混凝土构成组合截面共同受力”的桥塔^[172]。它们已在许多桥梁工程中得到应用,图 18 给出部分实例照片。



图 18 组合塔柱工程实例

Fig.18 Examples of steel-concrete composite pylons

超大跨桥梁的组合桥塔结构常有其特殊性,且截面构成可能较之图 17 的形状更为复杂。如:张靖皋长江大桥南航道悬索桥(跨径为 2 300 m),两个主塔塔高 350 m,采用门式框架结构,塔身外轮廓为带凹角的矩形柱,断面包括外壁钢箱、4 个钢管和 13 个窗口,截断上有多个闭合环,称为钢箱-钢管约束组合桥塔^[176]。

以实际工程为背景,学者对大型钢管混凝土组合桥塔,已开展了一些模型试验和相关的计算分析,为实际工程的应用提供了技术支撑^[177]。然而,许多超大型的桥塔往往是一桥一结构,今后根据具体结构开展研究,仍为必要。

此外,学者们对此类组合塔柱的共性问题,如短期荷载作用下的加劲钢板稳定、轴压及偏压性能已取得了丰硕的研究成果^[172,178-179],而抗剪性能、长期荷载作用下的徐变效应及全寿命周期内的钢-混界面性能还需开展更深入的试验与理论研究。另外,先前的研究重点主要集中在塔柱上,而塔柱与横梁的连接、索塔锚固区及塔柱承台结合部等连接构造的受力更为复杂,需提出传力可靠、施工便捷的连接、锚固及结合部构造。

2.2.4 钢-混凝土混合桥塔

钢和混凝土混合桥塔也是高大桥塔常用的结构。通常上塔柱采用钢结构,下塔柱采用混凝土结构,中塔柱(斜拉桥)采用钢或混凝土结构。如,双跨 110 m 的山东临沂西安路沭洒斜拉桥主塔^[180],主跨 850 m 的武汉鹦鹉洲长江大桥三塔四跨悬索桥中塔^[181],常泰长江大桥主航道桥主塔^[182],主跨 1 120 m 的马鞍山公铁两用长江大桥主航道斜拉桥主塔^[183]。以马鞍山公铁两用长江大桥为例,其主航道桥为(112+392+2×1 120+392+112) m 三塔钢桁梁斜拉桥。中塔塔高 345 m,其中上塔柱为 Q500qE 钢结构,高 112.5 m;中、下塔柱为 C60 混凝土结构,高 229.5 m;钢-混结合段高 3 m。塔柱根部壁厚 3 m,塔座为高 3 m 的 C50 混凝土结构^[183]。

与混合梁一样,结合部的设计与施工是混合塔的关键所在,由于材料和截面形式的突变,易导致应力集中和局部破坏。结合部由钢塔加劲过渡段和钢混结合段组成,应能将钢塔柱所受的内力平顺地传递到混凝土塔柱中。近年来,对混合塔柱结合段的受力性能也开展了试验和有限元分析,为实际工程建设服务^[184-185]。但总体而言数

量不多,且与 CFST 桥塔一样多存在一桥一结构的情况,今后结合实际工程开展研究,十分必要。

《钢混组合桥》JTG/T D64-01 的第 8 章“混合结构”给出了混合索塔结合部的设计要求,第 14 章则给出了“索塔及拱座钢混结合部施工”规定。对于结合部连接形式,《钢混组合桥》JTG/T D64-01、文献[186]、文献[187]给出的形式不尽相同,是否需要统一,值得讨论。此外,也有按是否设立格室,将其分为有格室和无格室的。今后,应针对结合段钢混材料之间的传力机理、合理构造等共性问题开展深入研究,给出共识性较高的构造形式、应用条件和设计方法,为工程应用提供技术支撑。

2.3 钢-混凝土组合拱

钢-混凝土组合拱的主要结构形式有 CFST 拱、钢腹板(杆)-混凝土组合拱、钢-混凝土混合拱等。此外,还有用于小跨径的波纹钢-混凝土组合拱^[188]等组合结构。

2.3.1 CFST 拱

近十年,CFST 拱桥在我国继续得到发展。截至 2021 年 10 月,我国修建或在建的 CFST 拱桥不少于 458 座^[134]。2013 年以来建成的几座大跨径的桥梁有广西平南三桥(中承式,计算跨径 560 m,2020 年建成)、四川合江长江三桥(飞鸟式,计算跨径 507 m,2021 年建成)、贵州德余乌江特大桥(上承式,计算跨径 475 m,2023 年建成),如图 19 所示。



(a) 广西平南三桥



(b) 四川合江长江三桥



(c) 贵州德余乌江特大桥

图 19 几座大跨径 CFST 拱桥

Fig.19 Examples of large-span CFST arch bridges

随着科研的深入与大量工程经验的积累,

CFST 拱桥技术不断成熟。2013 年以来,《钢管混凝土拱桥技术规范》GB 50923-2013^[189]、交通运输行业标准《公路钢管混凝土拱桥设计规范》JTG/T D65-06-2015^[21]相继颁布。铁路行业标准《铁路桥梁钢管混凝土结构设计规范》TB 10127-2020^[190]也于 2020 年颁布,它虽然不限于 CFST 拱桥,但以 CFST 拱桥为主,文献[191]介绍了规范采用的相关的设计计算理论。目前,团体标准《水利水电工程钢管混凝土拱桥设计规程》也正在制订之中。

实际工程中,钢管与管内混凝土脱粘现象的普遍存在,引发了工程界对钢管混凝土能否发挥组合结构的担忧。研究表明,管内混凝土的收缩、日照引起的钢管膨胀是引起脱粘的主要原因^[192-196],前者称为收缩脱粘,后者称为热脱粘。对收缩脱粘,在材料方面通过材料制备、内养护等措施制备出低收缩、微膨胀混凝土^[197-198],在施工方面,宜万铁路宜昌长江大桥首次采用的抽真空管技术灌注管内混凝土^[199],得到推广应用^[198],对减缓脱粘的问题取得了较好的效果^[200]。

在构造方面,提出了采用内栓钉、PBL 键的解决方法,设置 PBL 键后管内的界面强度可提高两倍以上^[142],传力长度大幅减小^[201],且界面抗剪性能几乎不受疲劳荷载影响^[144],PBL 键也使钢管混凝土的节点刚度及承载力得到显著提高^[145],能同时解决收缩脱粘与热脱粘问题,从根本上解决了钢管与混凝土的界面脱粘问题^[202],为 CFST 作为组合结构的应用提供了坚实的技术保证。这些技术已在贵州总溪河大桥、重庆双堡特大桥、西安凤凰池南桥和西宁湟水河二号桥等桥梁中得到应用^[203-205]。

针对中下承式拱桥吊杆、系杆的断索事故,近十年来开展了强健性设计与加固的研究,提出了构造要求和设计计算方法^[206-208]。对于大跨桁式拱,个别桥梁出现了节点疲劳开裂的问题,已进行了许多试验和数值分析,提出了相应的疲劳寿命的设计方法^[209-211]。此外,对于冲击系数^[212]、非线性温度^[213]、管内混凝土收缩与徐变对极限承载力的影响^[195-196,214-217]等也都开展了研究;对不同规范的计算方法也进行了比较。以上研究为规范修订提供了基础。此外,对于已颁布十年左右的规范应适时进行修订,不断完善。

2.3.2 美兰拱

美兰拱指采用美兰法修建的混凝土拱桥。美兰法源于 19 世纪末奥地利工程师约瑟夫·美兰(Josef Melan)提出的专利,先架设重量较轻的型钢拱架,然后外包混凝土,形成拱圈^[218]。在此后的一个世纪内,采用该法建成了大量的美兰拱桥,其中不乏创跨径纪录的桥梁。然而,美兰法因型钢埋置拱架用钢量大、施工复杂,20 世纪末在国外的应用日渐减少。

我国在江西太白桥首次采用 CFST 作为埋置拱架修建^[219](简称 CFST 美兰法)。CFST 美兰法利用了空钢管的刚度和管内混凝土的刚度和强度,极大地减小了用钢量,而仅增加了灌注管内混凝土这一并不困难的施工步骤。此后,CFST 美兰法在我国得到不断发展,使美兰法重焕生机,成为我国近几十年大量修建大跨混凝土拱桥的核心技术。据文献[117]调查,2021 年 5 月前我国已建或在建的美兰拱桥不少于 57 座,其中跨径超过 400 m 的有 4 座,最大的计算跨径达到 600 m。近年来,以天峨龙滩大桥为对象,对外包混凝土工序、受力、调载开展了较多的研究,为该桥的建设服务,也可供其他桥梁参考^[220-221]。

CFST 美兰拱的施工包括钢管拱架设、管内混凝土灌注和外包混凝土 3 个主要阶段,见图 20。先架设的钢管拱要承受自重和管内混凝土重量,即钢管初应力($\sigma_1 = \sigma_{1-1} + \sigma_{1-2}$),见图 20(a)和 20(b),称为第一重初应力。之后钢管与固结后的管内混凝土(CFST 拱)要承受外包混凝土的重量产生的应力,即 CFST 初应力,见图 20(d),称为第二重初应力 σ_2 。在承受了双重初应力后,外包混凝土固结达到设计强度的 CFST 美兰拱结构才开始全截面承担后续施工的结构自重和活载等荷载。

以往的研究以考虑第一重钢管初应力问题为主,且主要集中于对短柱极限承载力的研究,得出的结论是它对其承载力影响很小^[222-224]。CFST 美兰拱的跨径大,等效成 CFST 美兰柱的长细比也很大。如,广西天峨龙滩特大桥的拱肋以无铰拱按 0.36 S(S 为拱的弧长)等效成 CFST 美兰柱后,其长细比为 58.5,属于长柱。相对来说,建筑物中的 CE-CFST 柱受楼层的约束,长细比较小,如广州某高层商主楼中柱子的长细比仅为 2.40,属于短柱。已有对 CFST 结构的研究表明,初应

力会导致钢管提早进入塑性阶段,初应力对截面强度影响较小,但可能会对稳定承载力有较大影响。因此,长细比可能成为初应力对 CFST 美兰拱(等效为长柱)极限承载力影响的主导因素。

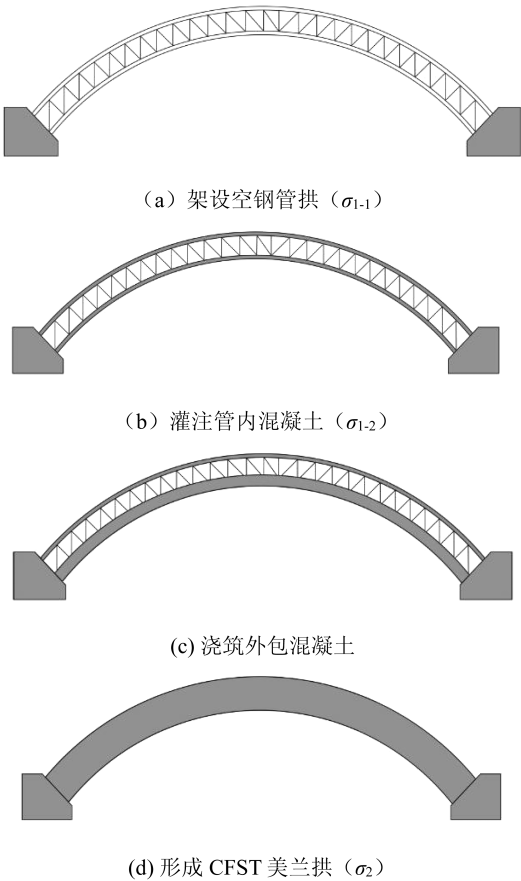


图 20 CFST 美兰拱施工过程

Fig.20 Construction process of a CFST Melan arch

此外,现有的第二重初应力研究仅以数值分析为主,计算结果表明当施加 CFST 初应力时使得组合柱的承载力有所提高(0~10%)^[225],而另外的分析绪论却相反^[226]。因此,美兰拱结构依次在钢管和 CFST 上施加二次初应力的试验研究,则才刚刚开始^[227],需要今后不断的深入。

为减少美兰拱现浇混凝土施工工序,2003 年提出了“强劲骨架”的概念并在 2012 年建成的四川广元昭化嘉陵江大桥首次得到应用^[228]。它使外包混凝土的分环数从原来的七八环减少到二三环,大大简化了工序,加快了施工进度。强劲拱架的实现途径中,采用超高强 CFST(UCFST)拱架是一条有效的途径。按文献^[229]的定义,UCFST 为钢管和管内混凝土有一项或二者同为超高强材料的 CFST,这样一共有 5 种不同材料组合的

UCFST,用下标小写字母 h、u 表示相应的高强和超高强材料,见表 2。

表 2 UCFST 按组成材料强度的分类及其英语缩写
Tab.2 Names of CFST and their English abbreviations according to material strength

英语缩写	混凝土	钢管
C _u FST	超高强	普通
C _u FS _h T	超高强	高强
CFS _u T	普通	超高强
C _h FS _u T	高强	超高强
C _u FS _u T	超高强	超高强

相对来说,埋置拱架中提高管内混凝土的材料强度可能最为经济,已有个别桥梁的 CFST 拱架采用了抗压强度不低于 100 MPa 的管内混凝土^[117]。需要指出的是,管内混凝土有其自身的条件与要求,它不应直接采用 UHPC,而应根据它的特性来制备。同时,它与钢管强度的匹配也是值得研究的一个课题^[229]。

影响美兰拱结构受力性质的因素很多,其中 CFST 的承载力与整个截面承载力的比值 α 、二次初应力的情况是两个主要因素。在美兰拱中, α 值很小,可看成钢管增强混凝土 (STRC) 或美兰结构,见图 21(a);它与建筑物中应用的 α 值较大的柱子不同,后者以 CFST 受力为主,可视其为混凝土外包 CFST (CE-CFST) 结构,见图 21(b)。

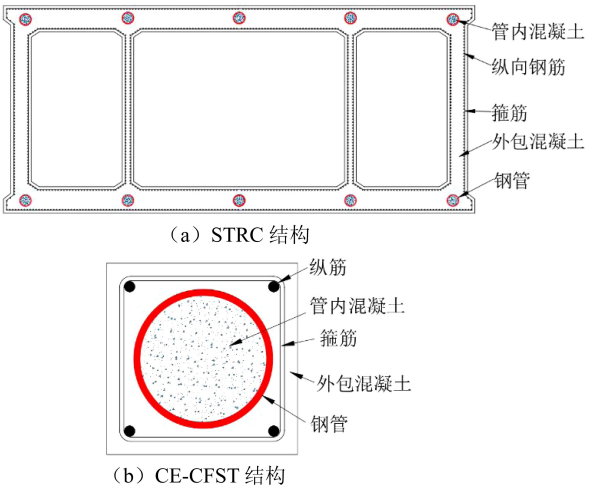


图 21 STRC 结构与 CE-CFST 结构截面

Fig.21 Cross-sections of STRC structure and CE-CFST structure

CE-CFST 在建筑结构中有较多的应用,对其已开展了较多的研究,并已有相应的规范。但实际的美兰拱桥多属于 STRC 结构,有针对性的研究还极少,目前多借鉴 CE-CFST 的研究成果,而其科学性如何有待进一步的研究。例如,有的 CE-CFST 短柱承载力的试验结果表明纵筋的作用较小,按构造配筋即可^[230]。其主要原因是,CE-CFST 柱的面积比较大,内置的 CFST 对承载力的贡献占主导地位,故外包混凝土中纵筋的作用较低。虽然 STRC 结构的截面构成与 CE-CFST 的相同,但面积比不同,导致其受力行为与极限承载力的显著不同。试验研究表明,纵筋率对 STRC 短柱承载力有着明显的提高作用^[118]。因此,直接引用 CE-CFST 柱试验结果进行美兰拱的设计是不合适的。

2.3.3 钢腹板(杆)-混凝土组合拱

钢腹板(杆)-混凝土组合拱结构的提出,借鉴了钢腹板(杆)-混凝土组合梁的结构形式,主要目的是为减小拱的自重,减小施工难度。采用美兰法^[117]或悬臂浇筑法施工时,免除了腹板混凝土的浇筑工序;采用悬臂拼装法施工时,可减小吊装重量或减小吊装节段数。

最先提出的这种新结构,采用波形钢腹板。此后研究发现在 PC 梁中不适用的平钢腹板,在拱中却可以应用。研究表明,由于腹板采用了钢构件,主拱自重可减轻 30% ~ 40%,施工困难减小所带来的经济效益超过采用钢构件引起的材料费用增加,对跨径为 100 ~ 300 m 的拱桥,具有很强的技术经济可行性。这种结构自 2006 年由作者提出并开展相应研究后,引起国内外学者的关注^[231]。遗憾的是,迄今未见实际应用。

对于跨径更大的拱桥,随着截面高度的增大,钢腹板的局部屈曲稳定问题突显出来,采用钢腹杆能有效地增强其腹部构件的稳定性,且同样具有减轻自重等优点,但其与顶、底板相连的节点局部受力成为结构的关键受力部位,尤其是立柱下的节点的抗冲切能力。

钢腹板(杆)-混凝土组合拱的施工可采用其他混凝土拱桥的施工方法,如悬臂拼装(或浇筑)法、转体法、美兰法。美兰法中埋置拱架的弦杆可采用 CFST,先架设钢腹板(杆)-钢管桁拱,合龙后灌管内混凝土形成钢腹板(杆)-CFST 桁拱,最后再外包混凝土形成钢腹板(杆)美兰拱。对于

作为施工埋置拱架的波形钢腹板-钢管混凝土拱,开展了系列的研究,为其工程应用打下了坚实的基础^[232-233]。采用美兰法施工,对于钢腹杆-混凝土组合拱,除施工优势外,腹杆与埋置拱架中的型钢或 CFST 弦杆相接,而不是直接与混凝土顶、底板相接,极大地改善了节点受力^[234-235],从而提高了这种结构应用的技术可行性。

钢腹杆-混凝土组合拱也可采用悬臂吊装法施工。世界上第一座钢腹杆-混凝土组合拱桥—乌蒙山大桥,采用该法施工。该桥位于贵州省六盘水市,为上承式拱,主拱计算跨径 270 m,矢高 54 m,矢跨比 1/5;拱轴线采用悬链线,拱轴系数 1.95,该桥目前主拱已合龙,见图 22。以该桥为背景,钢腹杆-混凝土组合拱结构体系受力性能以及组合拱节点传力机理的试验研究^[236-237]。



图 22 乌蒙山大桥主拱

Fig.22 Steel web-concrete flange composite arch rib in Wumenshan ridge

2.3.4 混合拱

混合拱指主拱不同部位采用不同材料和截面形式的结构。福建福鼎山前大桥是国内较早采用混合拱概念设计的一座桥梁,主跨为 80 m 的下承式刚架系杆拱,拱肋在两拱脚段至 $L/4$ 处为钢管混凝土截面,拱顶段为空钢管截面。钢管外径全肋相同,均为 $\Phi 1\ 200\ \text{mm}$,但壁厚不同,空钢管段壁厚为 20 mm,钢管混凝土段壁厚为 16 mm^[238]。

近十年来,混合拱的应用有增多的趋势。其中跨径较大的是成贵铁路贵州鸭池河特大桥。该桥跨径 436 m,为中承式拱桥,总体布置见图 23。拱肋从拱脚到拱顶由三种截面组成,拱脚段为内含埋置拱架的混凝土箱形截面,拱顶段为钢桁截面,中间段为顶、底板有外包混凝土的桁式截面^[239]。敬洪武对混合段进行了有限元分析和模型试验,并提出了优化方案,为大桥的设计提供了技术支撑^[240]。

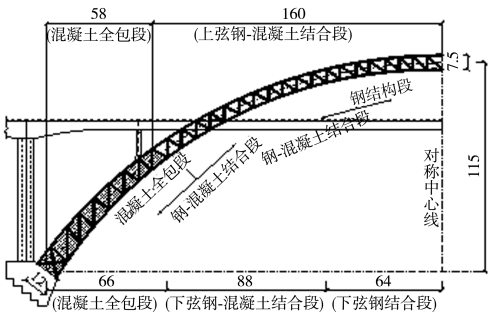


图 23 成贵铁路贵州鸭池河特大桥拱肋构造(单位:m)^[239]

Fig.23 Arch rib of Guizhou Yachi River Bridge in Chengdu-Guiyang Railway (unit : m)^[239]

文献[241]提出了拱脚段采用混凝土拱肋、其余段采用钢箱拱肋的混合拱概念,并对分界点位置对结构受力影响进行了分析。还有一种钢箱-混凝土组合拱^[242],实际上也是一种混合拱,拱脚段全填充混凝土,其他段或顶板或底板浇筑一层或二层混凝土,也称为钢箱部分填充混凝土拱,周远智等开展了试验与分析^[243],但由于构造与施工工序复杂,在试验了几座桥之后未见推广应用。

一些采用混凝土 V 形或 Y 形墩刚构与下承式钢拱或 CFST 拱组成的桥梁,如果将桥墩的斜杆看成拱肋的延伸,则也可视为混合拱桥。如重庆蔡园坝大桥、广州新光大桥、广东揭阳市区进贤门大桥等^[244]。若将桥面上下结构分属上、下部结构,则它不属于混合拱桥,但存在结合段构造^[245]。

至于 CFST 拱肋为增强拱脚段的防撞、防腐能力而将拱脚部分做成实心或箱形混凝土截面^[224],因区段较短且仍按 CFST 拱桥设计的,可视为局部构造,而不视为混合拱。

同其他混合结构一样,结合段是混合拱设计施工的关键,虽可参照其他结构的研究成果,但今后仍应针对其特性开展相关的研究。

3 桥梁混凝土组合结构的研究与应用发展

3.1 混凝土组合梁与混合梁

混凝土组合板包含在组合梁中,图 2 所示的组合板早已有之。近年来,随着 UHPC 的应用推广,图 24 所示的 UHPC 补强改造既有 RC 桥面板形成的 UHPC-RC 组合板得到较多的应用^[246]。

对 UHPC 加固既有 NC 梁形成的 UHPC-NC 梁,也开展了研究^[247]。UHPC-NC 组合板也可用于新建的近海桥梁中,其中 UHPC 置于底层,以发挥其高抗裂性和耐久性^[248]。

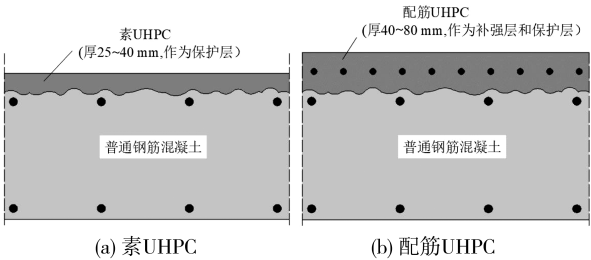


图 24 UHPC-RC 组合板

Fig.24 UHPC-RC composite slab

图 25 为采用不同混凝土材料与制作方式的组合梁实例。强度高、重量轻的 UHPC 槽形梁在工厂预制,安装到墩台上后,现浇 RC 桥面板,形成 RC 桥面板-UHPC 槽形梁组合梁。大量研究表明处于受压区且以横向受力为主的桥面板不必要采用超强但材料费用高的 UHPC 材料。这样的组合,既充分发挥了两种混凝土材料的特性,又兼顾到了施工的可行性与便利性,使得整体经济性得到提高^[249-250]。

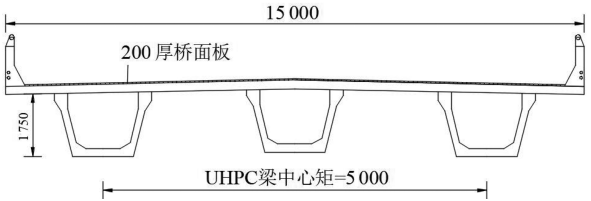


图 25 RC 桥面板-UHPC 槽形梁组合梁(单位:mm)

Fig.25 Cross-section of composite girder with RC slab and UHPC channel beams (unit: mm)

预制 UHPC 薄板还被用作混凝土浇筑的永久性模板,考虑其受力作用时,形成的板为 RC-UHPC 组合板^[251]。

同钢-混凝土组合结构一样,混凝土组合结构的界面受力性能也是关注的一个热点。研究表明,由于二者同为混凝土材料,结合面的受力性能要好于钢-混凝土组合结构,一般不需钢连接件,只需对界面层进行凿毛等粗化处理即可^[252-253]。

UHPC 层中可以加钢筋也可以不加。有的研究提出在 UHPC 中加 CFRP 筋来加固 RC 梁,由于 UHPC 耐久性较好,CFRP 筋应用的必要性不足^[254]。

混凝土混合梁主要出现在边中跨比较小(等于或小于 0.5)的连续梁或连续刚构中。如图 26 所示的三跨连续梁,可通过中跨中间段采用轻质或高强或既轻质且高强的材料、其余段采用 NC 材料所形成的混凝土混合梁来解决。它较之中间段采用钢梁的钢-混凝土混合梁,两段材料、截面相近,刚度突变性不明显,结合段构造简单。一个典型的桥例是建于 1998 年的挪威 Stolmasundet (斯托尔桑德特桥),跨径布置(94+301+72) m,边主跨之比仅为 0.31 和 0.24,主跨的 182 m 范围采用了轻质混凝土(C60,重度 19.5 kN/m^3)^[255]。近年来,随着 UHPC 材料与工程技术的发展,也提出了中间段采用 UHPC 的设想^[256]。同时,轻质 UHPC 的开发,将为这样的结构实现提供了新的途径^[257-258]。



图 26 三跨混凝土混合连续梁布置示意图
Fig.26 Layout diagram of three-span continuous concrete hybrid beam

3.2 混凝土组合柱与混合柱

混凝土组合柱中较多应用的也是 UHPC-NC 柱。以 UHPC 预制外筒为永久模板、现浇内核 RC 形成的 UHPC-RC 桥墩,可解决跨海桥梁桥墩施工与防腐两大问题。作者等人最早提出这种构思,并以平潭海峡大桥为工程背景开展了试设计和试件受力性能研究^[259]。试验结果表明,UHPC 永久性模板能参与结构的受力,且对核心混凝土有一定的套箍作用。从受力性能出发,为加强套箍作用,又开展了在配筋 UHPC 预制筒状模板内填素混凝土的组合柱的受力性能研究^[260-261]。除新建桥梁外,UHPC 加固既有 NC 桥墩,也形成相似的结构。国内学者已对 UHPC-NC 柱的轴压性能、长期性能也开展了较多的研究^[262-264]。

混凝土混合结构中最常见的是 UHPC 与 NC 在桩基和墩柱中的混合应用。如图 27(a)所示的 UHPC-RC 阶梯桩,用于整体桥中以适应桩顶较大变形的需要^[265];图 27(b)所示的则是 UHPC 管桩-RC 灌注桩的混合桩,适用于近海尤其是有珊瑚礁的桥位处^[266]。图 27(c)为采用 UHPC 在海

平面附近局部加固 NC 桥墩形成的 UHPC-RC 阶梯墩柱^[267];图 27(d)则是为了增加结构的抗震性能,将配筋 UHPC 用于塑性铰区域形成 UHPC-NC 混合墩柱(等截面)^[268];对于与盖梁、系梁形成框架的双柱式墩,也可以上、下两头都采用 UHPC 的混合墩柱,如图 27(e)所示^[269]。

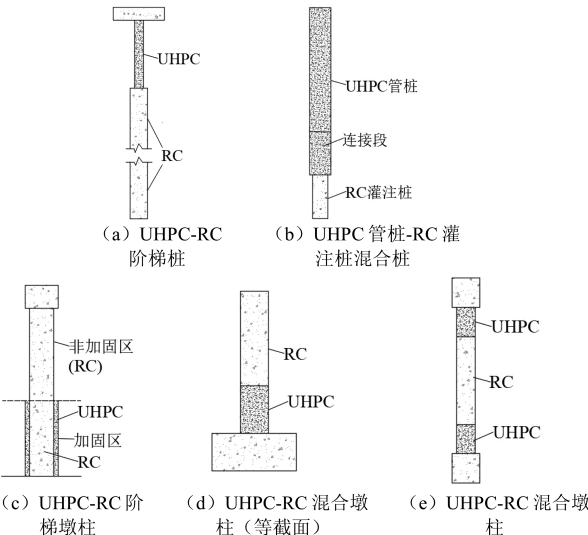


图 27 UHPC-RC 混合柱
Fig.27 UHPC-RC hybrid column

3.3 混凝土组合拱

混凝土拱桥主拱施工中常采用预制与现浇的组合,由于主拱以受压为主,结合面之间的剪力不大,结构的受力性能与整体现浇差异较小,过去较少将之视为混凝土组合结构。在不同混凝土材料组合方面,过去应用较少。CFST 美兰拱中,管内外的混凝土常采用不同的等级,但由于有钢管存在且等级差异不大,所以不应视为混凝土组合拱。

近期作者等人提出采用 UHPC 蝶形腹板 RC 顶底板拱,简称 UHPC 蝶形腹板混凝土拱,则可算是混凝土组合拱。其基本做法是:在混凝土箱拱中采用若干个独立放置、不连续连接的 UHPC 蝶形腹板代替混凝土腹板或者钢腹板(杆)。目前,已开展了部分 UHPC 蝶形腹板的受力性能试验、UHPC 蝶形腹板-混凝土组合拱的试设计研究和一座人行桥的初步设计(图 28)^[270]。

混凝土蝶形腹板在日本的 PC 梁桥、部分斜拉桥中已有应用^[271-272]。它为预制构件,采用高性能混凝土并配有钢筋或预应力筋,与悬臂现浇的顶底板,构成混凝土组合梁,如图 29 所示。本文作者提出的 UHPC 蝶形腹板,由于 UHPC 本身

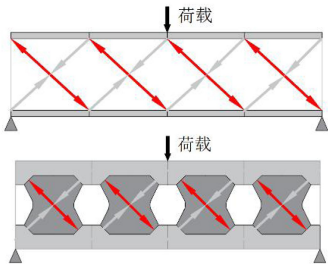
具有一定的抗拉强度,且在拱中剪力较小,所以有望不配筋或少配筋。同时,UHPC 采用预制施工,可减小其收缩量大的问题,并通过施工等综合效益来克服 UHPC 材料单价高的缺点,为 UHPC 材料拓宽应用范围。它也可以应用于 PC 梁桥中,可视为一种混凝土组合梁。



图 28 UHPC 蝶形腹板—混凝土组合拱人行桥效果图
Fig.28 Image view of a footbridge of UHPC butterfly web-concrete composite arch



(a) 实物照片



(b) 受力原理

图 29 预应力梁桥中的高强混凝土蝶形腹板^[271-272]
Fig.29 Butterfly webs of high-strength concrete in prestressed girder bridge^[271-272]

4 讨论

4.1 考虑受力性能的钢-混凝土组合结构的命名与分类

钢-混凝土组合构件的受力介于钢构件与混凝土构件之间。但从受力性能与发展逻辑来看,可定性地归为偏向钢结构、偏向混凝土结构和处

于二者之间 3 大类,具体的命名,宜考虑它的这一特性。

以组合梁为例。梁以受弯为主,钢梁与混凝土板组合而成的组合梁,以钢梁的受弯为主,尤其是钢桁梁与混凝土板组合时,更是如此;而波形钢腹板-PC 组合梁,则以 PC 梁受力为主。维持波形钢腹板不变,如果混凝土下翼缘改用钢板时,它成为波形腹板钢梁-混凝土(上翼缘)板组合梁,它的受力性能则与前述的钢梁-混凝土板组合梁相似,受力偏向于钢结构,所以本文将其归在 2.2.1 节中讨论,而不是放在 2.2.2 节中。

CFST 也有相似的问题。一般的 CFST,英语直译为填充有混凝土的钢管,最早的结构应用中不考虑管内混凝土的作用,按钢管计算。目前,一般按组合结构理论进行计算。对于圆形截面,通常还考虑紧箍效应对混凝土强度的提高,而对于矩形截面,有些国外规范并不考虑这一部分。即使是圆钢管混凝土,过去我国的不同规程所依据的基本理论也不同,有的从混凝土结构理论出发,有的则从钢结构理论出发,并引发了学术争议。而对于约束型 CFST 柱,一般用于截面较大的桥墩或桥塔之中,主体结构的面积较大而钢管截面面积相对较小,柱身的钢筋混凝土是主要受力的部分,所以它的受力性能更偏向于钢筋混凝土柱,当然其强度与耐性均有较大的提高。

更为突出的例子是 2.2.1 和 2.3.2 节中曾提到的 CE-CFST 柱与 STRC 柱(或美兰柱),如图 21 所示。两种柱子的组成一样,都是由 CFST 和外包混凝土组成,但受力性能却有显著不同。

建筑物中型钢混凝土(steel reinforced concrete, SRC)是一种梁、柱中常用的结构,它的受力性能偏向于 RC 结构。采用型钢的 SRC 在我国 1980 - 1990 年的美兰拱中有所应用^[117]。之后主要应用 CFST 作为埋置拱架,这样所形成的结构,仿照 SRC 则应该称为钢管混凝土增强混凝土(CFST-RC)结构,这之中有两个“混凝土”,简化之可称为 STRC。这一称呼对于一般的美兰拱是合适的,因为 CFST 在整个拱肋或拱圈截面中所占的面积较小,承载力占比不大,即使是强劲拱架,也仅要求承载力占比不小于 20%。若考虑到强劲拱架的分环数量减小,其施工过程中的初应力水平并不低,则在后期成拱之后的承载力贡献就更小。但对于建筑物中的柱子,CFST 承载力占

比较大,且初应力极小,其受力性能更趋近于 CFST,所以称其为 CFST 加劲混合结构 (CE-CFST) 更为合理。当然,对于二者分界的承载力占比值为多少,或者是否还应再划分出一个中间状态,还有待深入研究。

这个问题在桥墩中也存在,2.2.3 节的柱子是应该称为 CE-CFST 柱还是 STRC 柱? 文献[116] 将其与 CFST 格构柱、混合柱和叠合墩并列,称为 CFST 高墩形式,如图 30 所示。从图 30(a)~(c) 适应不断增高的桥墩。

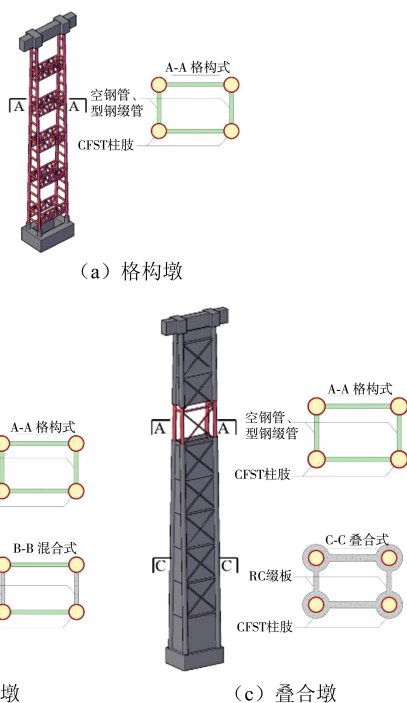


图 30 钢管混凝土高墩的几种结构形式

Fig.30 Structural forms of CFST high piers

4.2 混凝土组合结构

混凝土组合结构在公路桥梁中早有应用。在建筑结构中,文献[273]提出“组合混凝土结构”的基本概念。它的内涵主要是在不同种类混凝土材料在同一构件上的组合,包含了材料、构件与结构 3 个层面,有别于当前的“组合结构”和“混合结构”。这与本文将桥梁广义的“混凝土组合结构”包含了不同制作方式的组合、也包含了混凝土混合结构、并被纳入桥梁“组合结构”的范畴等提法均不同。对于采用“混凝土组合结构”还是“组合混凝土结构”的术语,今后还可继续讨论。

无论是(狭义)组合结构的界面还是混合结构的结合段,均是广义组合结构的受力与构造关

键。但相对于钢-混凝土组合结构,混凝土组合结构的问题没有那么突出。在截面组合方面,混凝土-混凝土界面的相容性远好于与钢-混凝土界面,加上粗化或齿状处理和穿过界面钢筋的增强作用,可使二者形成整体,而无需特别设置的剪力键。在不同材料的构件之间结合段,由于材性与刚度差异不大,与截面结合面一样易于处理,常常结合段也退化为结合面。当然,无论是界面还是结合段(面)的处理均与两种混凝土材性的差异性大小有关,需要深入的研究。同时,两种材料具有多大差异性时需按“混凝土组合”结构来考虑,也是一个需要进一步研究的问题。

4.3 混合结构

在混合结构中,除了钢-混凝土、混凝土-混凝土混合外,还包含了钢-组合构件的混合、组合构件-混凝土构件的混合,如部分填充混凝土的钢管混合梁、组合梁-PC 梁混合梁。在应用混合结构概念时,应注意以下两点:

一是混合结构的不同部位的构件,不仅构成不同,而且设计中是按不同结构理论进行计算的。如在钢管结构中部分填充了混凝土后,形成了钢管混凝土和空钢管的不同构件,但如果设计中整个结构均按钢结构设计而填充的混凝土仅作为安全储备时,它不应视为混合结构,而仍应视为钢结构,例如法国的 Antrenas 桥为防止车辆撞击在拱脚段钢管内填充了混凝土,设计仍按钢结构设计,是一座钢管拱而不是混合拱。而前述的山前大桥拱脚段按 CFST 计算、拱顶段按钢结构计算,它是混合拱结构。此外,文献[274]分析的某收费站拱结构,在拱脚段填充混凝土,但该文仅进行了内力分析,不知是否按不同结构进行承载力验算,因此是否属混合结构还不得而知。

二是要将其与局部加强构造区别开来。例如,钢管桁梁弦杆内部分填充混凝土,应该有相当的长度,如果只在节点部位局部内填混凝土,目的是改善节点受力性能^[275],应视为局部构造措施,而不是混合结构。对于混凝土组合结构,同样地,如果只是局部措施,也不应视为混合结构,如采用 UHPC 连接装配式 RC 桥墩^[276]。

此外,钢结构与混凝土结构的结合构造(如钢桥塔与混凝土承台的连接段^[277-278],钢或钢管混凝土拱肋与混凝土拱座的连接段,钢拱与混凝土承台、拱座的连接部分,桥塔钢横系梁与混凝土

柱身的结合段),与本文讨论的混合结构结合部的构造有相似之处,相关规定可归到组合结构或钢结构规范中。

4.4 桥梁组合结构未来的发展趋势

钢-混凝土组合梁在中小跨径中具有较强的竞争力,其标准化、装配化工作是发展趋势,以推动其在中小桥梁中的更多应用。组合柱为适应山区桥梁高墩、大跨索支承结构高塔的受力需要,预计结构的组合与复合形式方面仍有不断的创新。CFST组合拱、美兰拱的技术将不断成熟,同时钢腹杆(板)-混凝土翼缘组合拱的应用将不断增多。

不同材性和制作方式形成的混凝土组合结构,在桥梁结构中的应用日益增多。近年来不断发展的UHPC技术为混凝土组合结构提供了新的机遇。随着对UHPC材性认识的不断深入和基于材料合理利用的考虑,它与普通或高强混凝土组合而成的结构将成为研究与应用热点。

4.5 桥梁组合结构的定义

桥梁组合结构(广义):桥梁中的(狭义)组合结构或混合结构。其中,(狭义)组合结构指同一截面由两种或两种以上材料有效地组合并通过连接件共同受力的结构;混合结构指由不同材料的构件通过结合段连接在一起共同受力的结构。

组合桥梁:梁、拱等主要受力部分采用组合结构的桥梁。

在这组定义中,主塔可以是桥梁组合结构的一种,即组合主塔;但采用组合主塔的斜拉桥、悬索桥并不归入组合桥梁。实际上,《钢混组合桥》JTG/T D64-01-2015^[2]中也没有给出主塔和拱组合或混合结构的设计规定,与塔和拱有关的只有第十四章“索塔及拱座钢混结合部施工”。同时,在正文中,均以混合结构的形式而非定义中的混合构件的形式出现。因此,建议《钢混组合桥》(JTG/T D64-01)修订时,组合桥梁的术语解释中删除“主塔”两字;也可以将《钢混组合桥》(JTG/T D64-01)的规范名改为《公路桥梁钢-混凝土组合结构设计与施工规范》,这样就可将钢-混凝土组合桥塔的内容纳入其中。

由2.2节可知,钢-混凝土组合主塔近年来在斜拉桥和悬索桥中的应用越来越多。但在《公路斜拉桥设计规范》(JTG/T 3365-01-2020)^[279],只给出了混凝土索塔和钢索塔的构造要求,并无

组合索塔的相关规定;在《公路悬索桥设计规范》(JTG/T D65-05-2015)^[280]中,虽给出了钢混组合索塔的定义与相关条文,但它是指由钢筋混凝土塔柱、钢横撑组成的组合结构索塔,不包含塔(柱)体本身为组合结构的主塔。因此,有关我国钢-混凝土组合桥塔的研究成果与工程经验,也可在《公路斜拉桥设计规范》(JTG/T 3365-01-2020)^[279]修订时加入,在《公路悬索桥设计规范》(JTG/T D65-05-2015)^[280]修订时将组合主塔的定义与内容扩展到塔柱本身为组合结构的主塔。

在本小节给出的桥梁组合结构和组合桥梁的定义中,没有规定具体的材料,使其有较大的发展空间。除钢-混凝土组合结构外,目前发展较快的是混凝土组合结构。需要指出的是,对于混凝土组合结构,它包括了不同的混凝土材料和不同的制作方式;而在混凝土混合构件中,则仅包含不同的混凝土材料,不含不同的制作方式,因为不同的制作方式,对形成的混合构件的受力性能影响不大。

虽然混凝土组合结构的应用日益增多,但现有公路桥梁规范中相关的规定很少。建议今后继续研究、积累经验,将相关的内容纳入相应的规范之中。

4.6 重构公路桥梁设计规范体系的建议

我国公路桥梁设计的行业标准经过几十年的发展,正不断完善。《钢混组合桥》JTG/T D64-01-2015^[2]是较迟新增的一本,但它的内容不仅有设计,还有施工,与其他规范仅含设计内容不协调。由此引发对现有公路桥梁设计规范体系的思考。

现有的我国公路桥梁设计的主要规范有:

- 1) JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范
- 2) JTG 3363-2019 公路桥涵地基与基础设计规范
- 3) JTG 3362-2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- 4) JTG D64-2015 公路钢结构桥梁设计规范
- 5) JTG/T D64-01-2015 公路钢混组合桥设计与施工规范
- 6) JTG D61-2005 公路圬工桥涵设计规范
- 7) JTG/T D65-06-2015 公路钢管混凝土拱桥设计规范
- 8) JTG/T D65-05-2015 公路悬索桥设计

规范

9) JTG/T 3365-01-2020 公路斜拉桥设计规范

众所周知,工程技术方面最主要的桥梁分类是按结构体系和材料两种。上述的桥梁设计规范,除第 1、2 本为各类桥梁共用外,第 3~6 按材料分类,第 7~9 按结构分类。

现有规范中,材料分类基本齐全。但其包含的是所有的桥梁结构,如桥墩、桥台,这与一般以材料分类的桥梁通常按上部结构的主要材料分类的做法不同,因此,称其为桥梁结构更为合理,如公路桥梁钢结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、钢-混凝土组合结构、圬工结构。

现有与桥型相关的设计规范目前仅有 3 本,梁桥作为最基本的桥型未有专门的规范。同时,作为常用桥型的拱桥仅限于 CFST 拱桥。梁桥与其他拱桥的相关规定,分散在材料分类的设计规范中。

根据上述分析,建议重构公路桥梁设计规范体系,仍分为 3 大版块。第 1 版块维持现有的两本不变,第 2 版块按桥型结构分为梁桥、拱桥、悬索桥和斜拉桥 4 本,第 3 版块按材料以桥梁结构的形式出现,分为混凝土(钢筋混凝土和预应力混凝土)结构、钢结构、组合结构、圬工结构,也为 4 本,总共有 10 本,较之现有的 9 本增加 1 本。在材料结构相关的规范中,着重于材性和极限状态验算的规定;在桥型相关的规范中,着重于结构与构造、作用响应计算等规定。

- 1) 公路桥梁设计通用规范
- 2) 公路桥梁地基与基础设计规范
- 3) 公路梁桥设计规范
- 4) 公路拱桥设计规范
- 5) 公路悬索桥设计规范
- 6) 公路斜拉桥设计规范
- 7) 公路桥梁混凝土结构设计规范
- 8) 公路桥梁钢结构设计规范
- 9) 公路桥梁钢-混凝土组合结构设计规范
- 10) 公路桥梁圬工结构设计规范

5 结束语

本文综述了 2013 年以来最近十年我国钢-混凝土组合桥的研究与应用进展,讨论了公路桥梁设计规范中有关组合桥梁、桥梁组合结构的定义

与内涵,主要结论如下:

(1) 钢-混凝土组合梁、柱、拱等桥梁组合结构在我国的应用不断增多,技术不断不成熟,制定了系列的标准。但尚有较多成果还未在相关规范中得到充分的反映,有待今后规范修订时补充完善。

(2) 新材料、新构造、装配化等桥梁钢-混凝土组合结构的研究与应用取得不断进展,丰富了组合结构的类型,为适应不同的需要提供了可能。但也有一些新提出的组合结构,应用必要性不充分,施工、经济的可行性考虑不足,缺乏良好的应用前景。未来还需对中小跨径的标准化、装配化方面继续努力,推动其在中小桥梁中的更多应用。

(3) 钢-混凝土组合结构的受力介于钢结构与混凝土结构之间。但从受力性能与发展逻辑来看,可定性地归为偏向钢结构、偏向混凝土结构和处于二者之间等 3 大类,具体的命名,宜考虑它的这一特性。对于组成相同、但各组份贡献不同的组合结构,设计理论与工程应用应视实际受力性能区别对待。

(4) 不同材性和制作方式形成的混凝土组合结构,在桥梁结构中的应用日益增多。其结构形式多样,不同材料之间的组合性能优于钢与混凝土,使得界面或结合段的构造较为简单。同时,具有多大材性差异的混凝土需要考虑其组合问题,值得探讨。随着对 UHPC 材性认识的不断深入和基于材料合理利用的考虑,它与普通或高强混凝土组合而成的结构将成为研究与应用热点。

(5) 组合桥梁是按照跨空结构主要材料划分的桥梁类型之一,不应将桥塔归入其中。桥塔等结构应归入桥梁组合结构中。对于我国公路桥梁设计规范体系,建议分为共用、桥型分类与材料分类 3 大块。在桥型分类的规范中,着重于结构与构造、作用响应计算等规定。在材料分类规范中,着重于材性和极限状态验算的规定。

在过去大规模的基础设施建设中,我国的桥梁组合结构得到大量的应用,积累了丰富的工程经验,取得了系列的研究成果。同时,创新性的结构不断提出,引领着桥梁技术的不断进步。我国仍处于大规模基础设施建设时期,同时许多结构进入服役阶段,继续开展桥梁组合结构的研究与技术创新,制定修订相应的技术标准,推动其不断的发展,是极其必要的。

参考文献:

- [1] 陈宝春, 牟廷敏, 陈宜言, 等. 我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用[J]. 建筑结构学报, 2013, 34 (S1): 1-10.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢混组合桥梁设计与施工规范: JTG/T D64-01—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [3] 陈宝春, 苏家战, 赵秋. 桥梁工程[M]. 4 版. 北京: 人民交通出版社, 2022.
- [4] 刘明虎. 桥梁钢-混凝土结合技术工程实践与展望[J]. 桥梁建设, 2022, 52 (1): 18-25.
- [5] LIU J P, LAI Z C, CHEN B C, et al. Experimental behavior and analysis of steel-laminated concrete (RC and UHPC) composite girders[J]. Engineering Structures, 2020, 225: 111240.
- [6] 郑小博, 张岗, 黄来喜, 等. 钢桁-混凝土组合结构梁桥连续破坏-倒塌动态行为研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35 (11): 147-159.
- [7] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [8] 黄侨. 桥梁钢-混凝土组合结构设计原理[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢-混凝土组合桥梁设计规范: GB 50917—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [10] 罗鑫源, 倪永军, 马观领. 疲劳荷载作用下钢-混凝土组合梁变形计算[J]. 公路交通科技, 2022, 39(5): 85-94.
- [11] 冀伟, 白倩, 罗奎. 长期效应下不同边界钢-混凝土组合梁挠度分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(3): 434-442.
- [12] 曹国辉, 廖世杰, 彭鹏, 等. 腐蚀与荷载耦合作用下钢-混凝土组合梁长期变形研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55 (1): 32-40, 88.
- [13] 匡亚川, 陶莉, 贺宇豪. 锈蚀栓钉钢-混凝土组合梁的疲劳寿命预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 770-778.
- [14] 张海鹏, 陈驹, 金伟良, 等. 栓钉锈蚀的钢-混凝土组合梁疲劳性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(5): 89-95.
- [15] 李小珍, 谭清泉, 肖林. 钢-混凝土组合梁疲劳性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(6): 12-17.
- [16] 张凡, 陈炳聪, 刘爱荣, 等. 装配式钢-混凝土组合梁高强螺栓剪力连接件力学模型[J]. 工程力学, 2022, 39(S1): 173-179.
- [17] 侯和涛, 臧增运, 鲁玉曦, 等. 新型全装配钢-混凝土组合梁连接件推出试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(2): 201-210.
- [18] 李聪. 钢-预制 UHPC 组合桥面板界面受力性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2020.
- [19] HE Y B, SHEN X J, CHEN G, et al. A new steel-UHPFRC composite beam with in-built composite dowels as connectors: concept and design principles[J]. Engineering Structures, 2024, 298: 117089.
- [20] 陈全胜, 侯圣均, 蒋晨晨, 等. 乍甸 1 号大桥钢-混凝土组合梁桥面优化设计[J]. 世界桥梁, 2022, 50(4): 25-31.
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢管混凝土拱桥设计规范: JTG/T D65-06—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [22] WALTER R, OLESEN J F, STANG H, et al. Analysis of an orthotropic deck stiffened with a cement-based overlay[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(3): 350-363.
- [23] 邵旭东, 胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [24] 广东省交通运输厅. 超高性能轻型组合桥面结构技术规程: GDJTG/T A01-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [25] 湖南省市场监督管理局. 钢-超高韧性混凝土轻型组合结构桥面技术规范: DB43-T1173-2016[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [26] LUO Y J, LI A, KANG Z. Parametric study of bonded steel-concrete composite beams by using finite element analysis[J]. Engineering Structures, 2012, 34: 40-51.
- [27] 孙启力, 路新瀛, 聂鑫, 等. 非蒸养 UHPC-钢板结构界面的受拉和剪切性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34 (9): 167-174, 192.
- [28] 李聪, 陈宝春, 谢泽豪, 等. 钢-UHPC 组合板环氧粘结界面的抗剪与抗拉性能试验[J]. 土木工程学报, 2023, 56

- (1): 25-36, 56.
- [29] LI C, CHEN B C, HU W X, et al. Push-out test of hybrid shear connector in steel-precast UHPC composite slab[J]. Structures, 2023(50): 1767-1782.
- [30] LI C, JI D L, ZHANG D, et al. Pull-out test of hybrid connection in steel-UHPC composite slab[J]. Structures, 2024(66): 106832.
- [31] 马熙伦, 陈宝春, 黄卿维, 等. 德国加特纳普拉兹超高性能混凝土人行桥[J]. 中外公路, 2017, 37(2): 77-81.
- [32] CHAMPENOY D, GÉNÉREUX G, HAJAR Z, et al. Illzach bridge: innovative repair of orthotropic deck using ultra-high-performance fibre-reinforced concrete—return after 5 years[J]. Structural Engineering International, 2020, 30(3): 387-392.
- [33] 冀伟, 胡世浩, 齐振峰, 等. 波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥的动力特性分析[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(5): 886-892, 1031-1032.
- [34] 冀伟, 罗奎, 马万良, 等. 装配式波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥动力特性分析与试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(20): 1-7, 16.
- [35] 查上, 邓文琴, 刘朵, 等. 波形钢腹板工字钢-混凝土结合板梁桥设计参数分析[J]. 桥梁建设, 2023, 53(1): 87-93.
- [36] 秦翱翔, 刘世忠, 马驰, 等. 单箱双室波形钢腹板-钢底板-混凝土顶板组合箱梁剪力滞效应研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(10): 98-106.
- [37] 马驰, 刘世忠, 陈权, 等. 波形钢腹板-钢底板-混凝土顶板组合箱梁的有效分布宽度研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(5): 1178-1185.
- [38] 周旺保, 许添鑫, 谭志化, 等. 波形钢腹板钢 混凝土简支组合箱梁抗弯承载力分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 2089-2096.
- [39] 黄卿维, 叶琳, 陈宝春. 平钢腹板-混凝土组合拱桥试设计研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 232-237.
- [40] 张建勋, 赵谕笛. 目前世界最大跨度波形钢腹板 PC 箱梁桥—安威川大桥的设计特点[J]. 中外公路, 2021, 41(2): 87-90.
- [41] 陈开利, 刘海燕. 日本波形钢腹板桥设计与施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2022, 50(4): 8-17.
- [42] 李淑琴, 陈建兵, 万水, 等. 我国几座波形钢腹板 PC 组合箱梁桥的设计与建造[J]. 工程力学, 2009, 26(S1): 115-118.
- [43] 陈宝春, 陈宜言, 林松. 波形钢腹板桥梁应用调查分析[J]. 中外公路, 2010, 30(1): 109-118.
- [44] 王泉, 金文刚, 王思豪, 等. 运宝黄河大桥主梁设计与施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2019, 47(1): 1-5.
- [45] 蒋华, 何晓晖, 王健, 等. 超宽波形钢腹板箱梁内衬混凝土合理设计参数和构造研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 1582-1590.
- [46] 陈宜言, 郭明, 王健, 等. 高烈度地震地区特大跨度波形钢腹板梁桥抗震设计[C]//第十七届全国现代结构工程学术研讨会. 天津: 天津大学, 2017: 1273-1278.
- [47] 袁卓亚, 李立峰, 刘清, 等. 波形钢腹板组合箱梁横向内力分析及试验研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(11): 73-81.
- [48] 黄雯, 万善强, 梁琛, 等. 波形钢腹板 PC 箱梁桥剪力件优化研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(4): 533-537.
- [49] 陈水生, 张超, 桂水荣. 单箱多室波形钢腹板 PC 组合梁桥动力特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(12): 122-127.
- [50] 冀伟, 邓露, 何维, 等. 公路波形钢腹板 PC 简支箱梁桥冲击系数的计算分析[J]. 桥梁建设, 2016, 46(3): 35-39.
- [51] 朱平, 丁子贤, 张哲, 等. 波形钢腹板-UHPC 组合连续箱梁桥静力和抗震性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(11): 45-56.
- [52] 施智, 罗吉智, 彭蓉. 大跨径波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥设计与研究[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 172-177.
- [53] 张峰, 李术才, 李宏江, 等. 波形钢腹板内衬混凝土部位抗剪性能[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(1): 16-24.
- [54] 陈宜言. 波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

- [55] 曾勇. 波形钢腹板 PC 组合箱梁桥耐久性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [56] 冀伟, 蔺鹏臻, 邓露. 波形钢腹板 PC 箱梁桥的动力特性分析与冲击系数研究[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [57] 中华人民共和国交通运输部. 组合结构桥梁用波形钢腹板: JT/T 784—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [58] 河南省质量技术监督局. 公路波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥设计规范: DB41/T 643—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [59] 徐栋, 尼颖升, 赵瑜. 波形钢腹板梁桥空间网格分析方法[J]. 土木工程学报, 2015, 48(3): 61–70.
- [60] XU D, NI Y S, ZHAO Y. Analysis of corrugated steel web beam bridges using spatial grid modelling[J]. Steel and Composite Structures, 2015, 18(4): 853–871.
- [61] 马磊, 颜爱华, 邓青儿, 等. 上海闵浦大桥设计与构思[J]. 上海建设科技, 2010(5): 1–4, 19.
- [62] 刘朵, 张建东, 阎卫国. 南京绕越公路江山桥的设计与施工[J]. 公路, 2013, 58(12): 80–83.
- [63] 董峰, 张建东, 李雪红, 等. 钢桁腹预应力混凝土组合梁桥静动载试验研究[J]. 中外公路, 2015, 35(2): 124–129.
- [64] 李勇, 方秦汉, 张建东, 等. 双层桥面钢桁腹 PC 组合桥梁设计与建造方法[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(S1): 33–38.
- [65] 李勇, 朱崇利, 查晓雄, 等. 汉江特大桥结构选型及上部结构设计优化[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(S1): 126–130.
- [66] 王彤, 谢旭, 王渊, 等. 桁腹式组合桁梁结构计算理论[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(4): 711–720, 741.
- [67] 端茂军, 刘钊, 张建东, 等. 钢管腹杆-混凝土 K 形组合节点试验及仿真分析[J]. 桥梁建设, 2017, 47(5): 47–52.
- [68] 方映平. 钢桁腹杆 PC 组合箱梁桥自振特性研究[J]. 城市道桥与防洪, 2017(6): 92–94, 15.
- [69] 陈建兵, 蒋明利, 周晨, 等. 钢桁腹混凝土组合梁挠度计算方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 66–72.
- [70] 杭子豪, 刘朵, 张建东, 等. 钢桁腹-混凝土组合梁桥受弯性能分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(4): 1564–1572, 1861.
- [71] 杨霞林, 于小芹, 张元海. 钢桁腹式混凝土组合箱梁的扭转效应分析[J]. 计算力学学报, 2021, 38(2): 230–238.
- [72] 匡冠桦, 王尧, 蒋明利, 等. 钢桁腹混凝土组合梁剪力滞效应试验与分析[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2022, 35(2): 15–19.
- [73] 张岩, 杨霞林, 冀伟. 钢桁腹式混凝土组合箱梁翼板纵向应力的计算方法研究[J]. 计算力学学报, 2019, 36(5): 642–649.
- [74] 李自林, 薛江, 王帅. 钢管混凝土腹杆-PC 组合箱梁桥抗震性能[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(1): 146–155.
- [75] 陈宝春, 黄文金. 圆管截面桁梁极限承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(3): 31–36.
- [76] HUANG W J, FENU L, CHEN B C, et al. Experimental study on joint resistance and failure modes of concrete filled steel tubular (CFST) truss girders[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 141: 241–250.
- [77] HUANG W J, FENU L, CHEN B C, et al. Experimental study on K-joints of concrete-filled steel tubular truss structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 107: 182–193.
- [78] HUANG Y F, BRISEGHIELLA B, ZORDAN T, et al. Shaking table tests for the evaluation of the seismic performance of an innovative lightweight bridge with CFST composite truss girder and lattice pier[J]. Engineering Structures, 2014, 75: 73–86.
- [79] 杨新磊, 王海良, 王世广, 等. 三维河谷场地效应对钢管混凝土空间组合桁架连续梁桥地震响应的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(3): 576–589.
- [80] 黄育凡, 吴庆雄, 袁辉辉, 等. 地震作用下钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁行车安全性分析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(11): 77–86.
- [81] 李畅, 牟廷敏, 范碧琨, 等. 基于实桥试验的钢管混凝土桁梁桥力学性能研究[J]. 西南公路, 2018(3): 104–109.
- [82] 罗剑, 李强, 王乐, 等. 敞开式钢管-混凝土桁架梁桥的静载试验研究[J]. 工程与建设, 2017, 31(5): 686–688.
- [83] HUANG W J, LAI Z C, CHEN B C, et al. Concrete-filled steel tube (CFT) truss girders: experimental tests, analysis, and design[J]. Engineering Structures, 2018, 156: 118–129.

- [84] HUANG W J, LAI Z C, CHEN B C, et al. Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steel tube (CFT) truss girders[J]. Engineering Structures, 2017, 152: 607-618.
- [85] 傅中秋, 吉伯海, 刘海生, 等. 钢管轻集料混凝土空间桁架梁受弯承载力试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(1): 69-76.
- [86] 高诣民, 刘永健, 周绪红, 等. 高性能钢管混凝土组合桁梁桥[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 174-187.
- [87] 姜磊, 刘永健, 龙辛, 等. 基于热点应力法的矩形钢管混凝土组合桁梁桥节点疲劳评估[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(6): 104-116.
- [88] 姜磊, 刘永健, 龙辛, 等. 矩形钢管混凝土桁架节点应力集中特性试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(2): 184-196, 214.
- [89] 刘永健, 马印平, 周绪红, 等. 钢管混凝土组合桁梁弯剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(6): 24-35.
- [90] 马印平, 刘永健, 龙辛, 等. 钢管混凝土组合桁梁受弯承载力简化计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(5): 76-84.
- [91] JIANG L, LIU Y J, FAM A, et al. Experimental and numerical analyses on stress concentration factors of concrete-filled welded integral K-joints in steel truss bridges[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 183: 110347.
- [92] JIANG L, LIU Y J, FAM A, et al. Stress concentration factor parametric formulae for concrete-filled rectangular hollow section K-joints with perfbond ribs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 160: 579-597.
- [93] 姜磊, 刘永健, 周绪红, 等. 钢管混凝土节点承载力计算方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(6): 86-100.
- [94] 刘永健, 马印平, 田智娟, 等. 矩形钢管混凝土组合桁梁连续刚构桥实桥试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(5): 53-62.
- [95] 陕西省市场监督管理局. 矩形钢管混凝土组合桁梁桥技术规范: DB61/T 1576-2022[S]. 北京: 人民交通出版社, 2022.
- [96] 程高, 张之恒, 谢亮, 等. 基于桁梁实桥试验的钢管混凝土界面传力机制[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(6): 158-168.
- [97] 陈康明, 黄汉辉, 吴庆雄, 等. 波形钢腹板-钢管混凝土桁式弦杆组合梁桥疲劳性能[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(5): 200-216.
- [98] 刘梓锋, 王志宇, 周夏芳. 波形钢腹板-钢管混凝土翼缘组合梁的受弯性能分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(S1): 325-332.
- [99] 林涛. 大跨度空腹式钢-混凝土混合连续梁桥钢箱梁长度参数分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(6): 94-98.
- [100] 刘德清, 王文洋. 大跨径钢-混混合梁连续刚构桥施工控制关键技术[J]. 桥梁建设, 2021, 51(1): 121-129.
- [101] 邹世华, 廖轩, 陈宇. 混合梁斜拉桥钢-混结合段力学性能模型试验研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(4): 27-34.
- [102] 贺鹏, 王成启. 嘉鱼长江公路大桥桥塔设计[J]. 桥梁建设, 2018, 48(4): 84-89.
- [103] 陈康明, 杨洋, 吴庆雄, 等. 钢-混凝土混合变截面连续梁桥钢箱梁段合理长度研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 237-243.
- [104] 戴飞, 冯伟杰, 陈光军, 等. 新型单箱砼-多钢箱混合梁桥结构冲击系数研究[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(2): 135-139.
- [105] 杨朝龙, 沈林白, 王德志, 等. 铁路刚构连续混合梁桥抗震性能分析[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(4): 92-100.
- [106] 陈志军, 周子培, 张朋, 等. 混合梁斜拉桥混凝土-钢桁结合段模型试验[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(3): 34-40.
- [107] 俞伯林. 悬臂施工的钢混混合连续梁桥台风响应实测与分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(2): 184-188.
- [108] 张欣欣, 徐俊. 高速铁路高低塔混合梁斜拉桥设计研究[J]. 铁道勘察, 2023, 49(3): 109-115.
- [109] 张锐银, 刘世忠, 栗振锋, 等. 部分填充混凝土矩形钢管组合桁梁桥车激振动响应分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(19): 8494-8501.
- [110] 李延强, 刘得运. 部分填充混凝土钢桁梁桥车激响应分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33(1): 7-13.
- [111] 郑艳, 王燕龙, 莫时旭, 等. 部分填充混凝土窄幅钢箱组合梁非线性有限元分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 7004-7010.

- [112] 刘海燕. 日本兴津川大桥-波形钢腹板-混凝土腹板混合梁桥[J]. 世界桥梁, 2017, 45(2): 92-93.
- [113] 代亮, 陈宜言, 陶慕轩. 深圳东宝河新安特大桥设计与创新[J]. 城市道桥与防洪, 2017(1): 55-57, 70, 9-10.
- [114] 赵虎, 勾红叶, 尼颖升. 波形钢与混凝土混合多箱室斜拉桥的剪力滞效应[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 93-103.
- [115] 吴庆雄, 余智敏, 袁辉辉, 等. 钢管混凝土箱型叠合柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(6): 108-117.
- [116] 袁辉辉, 吴庆雄. 钢管混凝土格构式桥墩抗震性能化设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [117] 陈宝春, 何福云, 李聪, 等. 美兰法与美兰拱桥技术发展综述[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(6): 1-24.
- [118] HE F Y, LI C, CHEN B C, et al. Axial compression behavior of steel tube reinforced concrete column[J]. Engineering structure, 2024, 303: 117548.
- [119] 韩林海, 牟廷敏, 王法承, 等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 1-24.
- [120] 吴庆雄, 余智敏, 袁辉辉, 等. 钢管混凝土箱形叠合超高墩设计与静力性能分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(6): 84-89.
- [121] 贾志路, 王蕊. 侧向冲击下箱形钢管混凝土叠合柱动力响应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(S1): 165-171.
- [122] 袁辉辉, 程军, 吴庆雄, 等. 主余震作用下钢管混凝土箱形叠合墩拟动力试验研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(7): 180-192.
- [123] 袁辉辉, 余智敏, 吴庆雄, 等. 钢管混凝土箱形叠合墩振动台试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(12): 200-213.
- [124] HAN L H, LIAO F Y, TAO Z, et al. Performance of concrete filled steel tube reinforced concrete columns subjected to cyclic bending[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(8/9): 1607-1616.
- [125] 汪洋, 陈立, 陶齐宇. 新型钢管混凝土组合桥塔在大跨悬索桥中的应用[J]. 四川建筑, 2021, 41(5): 112-114, 118.
- [126] 张国靖, 刘永健, 姜磊. 钢管混凝土墩柱截面选型[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(1): 94-101.
- [127] 孙浩, 徐庆元, 吕飞, 等. 动力荷载下钢管混凝土墩柱抗震性能极限分析[J]. 铁道学报, 2023, 45(3): 97-108.
- [128] 夏坚. 双层钢箱混凝土组合墩抗震性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2016.
- [129] 邢凯迪, 林元铮, 李明鸿, 等. 预制节段拼装双层钢管-混凝土组合墩柱抗震性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(2): 305-314.
- [130] 杨凯, 刘婉玥. 装配式钢管混凝土格构墩设计研究[J]. 工程与建设, 2021, 35(5): 931-934.
- [131] 赵均海, 樊军超, 胡壹, 等. 复式钢管混凝土结构研究现状与发展趋势[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(1): 1-15.
- [132] 张玉芬, 张燕, 贾宏鑫. 新型复式钢管混凝土墩柱轴压受力机理分析及承载力计算[J]. 工业建筑, 2022, 52(12): 128-135, 155.
- [133] 符晓锋. 劲性骨架及钢管混凝土高墩的结构特性分析研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [134] CHEN B C, LIU J P, WEI J G. Concrete-filled steel tubular arch bridges[M]. Singapore Springer Nature Singapore, 2023.
- [135] 周绪红, 刘界鹏. 钢管约束混凝土柱的性能与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [136] 甘丹, 周绪红, 刘界鹏, 等. 钢管约束钢筋混凝土柱受剪承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 96-103, 111.
- [137] 贾俊峰, 赵建瑜, 张强, 等. 螺栓连接预制拼装 CFST 桥墩抗震性能试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 242-249.
- [138] 贾俊峰, 赵建瑜, 张强, 等. 后张预应力节段拼装 CFST 桥墩抗侧力学行为试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 236-245.
- [139] 欧智菁, 颜建煌, 俞杰, 等. 装配式圆钢管约束混凝土桥墩抗震试验及计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(1): 77-89.
- [140] 李宁, 张双城, 李忠献, 等. 预制拼装钢管混凝土自复位桥墩变形分析模型及验证[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 135-143.

- [141] 刘保东, 冯明扬, 张林林, 等. 新型组合桥墩承插式连接侧剪强度试验研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(11): 50-56.
- [142] 刘永健, 程高, 张宁, 等. 开孔钢板加劲型方钢管混凝土轴压短柱试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(10): 39-46.
- [143] LIU J P, YANG J, CHEN B C, et al. Mechanical performance of concrete-filled square steel tube stiffened with PBL subjected to eccentric compressive loads: experimental study and numerical simulation[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 149: 106617.
- [144] 张宁, 刘永健, 刘士林. 单孔 PBL 剪力连接件疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(3): 186-192.
- [145] 周绪红, 刘永健, 姜磊, 等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土结构力学性能研究综述[J]. 中国公路学报, 2017, 30(11): 45-62.
- [146] 陈伯望, 邹艳花, 唐楚, 等. 四肢圆钢管混凝土格构柱恢复力模型研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(3): 42-49.
- [147] 杨有福, 刘敏. 格构式钢管混凝土构件抗震性能研究进展[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 10-20.
- [148] 欧智菁, 陈盛富, 吴庆雄, 等. 变截面钢管混凝土格构柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018(3): 77-83.
- [149] 袁辉辉, 吴庆雄, 陈宝春, 等. 平级管式钢管混凝土格构柱拟动力试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(7): 67-78.
- [150] YUAN H H, WU Q X, HUANG Y F, et al. Experimental and theoretical studies on the seismic performance of CFST battened built-up column piers[J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110099.
- [151] YUAN H H, SHE Z M, WU Q X, et al. Experimental and parametric investigation on elastoplastic seismic response of CFST battened built-up columns[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 145: 106726.
- [152] 吴庆雄, 黄育凡, 陈宝春. 钢管混凝土组合桁梁——格构墩轻型桥梁振动台阵试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(9): 89-96.
- [153] 袁辉辉, 吴庆雄, 陈宝春, 等. 平级管式等截面钢管混凝土格构柱抗震性能试验与有限元分析[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 226-235.
- [154] 袁辉辉, 吴庆雄, 陈宝春, 等. 平级管式等截面钢管混凝土格构柱荷载-位移骨架曲线计算方法[J]. 工程力学, 2016, 33(12): 206-216.
- [155] 王占飞, 隋伟宁, 李幅昌, 等. 水平往复荷载作用下部分填充混凝土圆形钢桥墩柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2015, 28(1): 62-70.
- [156] 王占飞, 李天宇, 隋伟宁, 等. 竖向偏心部分填充混凝土圆形钢桥墩顺桥方向抗震性能[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 119-128.
- [157] 刘富平, 高圣彬. 往复荷载作用下部分填充混凝土箱形截面钢桥墩的破坏模式[J]. 结构工程师, 2020, 36(6): 1-10.
- [158] 袁辉辉, 唐艺航, 吴庆雄, 等. 部分填充混凝土薄壁带肋箱型钢桥墩拟动力试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 504-511.
- [159] 马玥, 张鑫, 陈勇, 等. 自复位钢管混凝土桥墩力学性能研究[J]. 混凝土, 2023(2): 19-24.
- [160] 徐艳, 王臻, 陈智钊. 部分充填钢管混凝土独柱墩的最小混凝土充填率[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(11): 1546-1555.
- [161] 林德慧, 陈以一. 部分填充钢-混凝土组合柱整体稳定分析[J]. 工程力学, 2019, 36(S1): 71-77, 85.
- [162] 匡小波, 李贤, 李健. 外包式钢管混凝土柱脚滞回性能研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(S1): 190-197.
- [163] 黄海新, 张望欣, 程寿山. 近断层地震下钢管混凝土加固 RC 桥墩地震响应分析[J]. 公路工程, 2020, 45(6): 33-38.
- [164] 田甜. 钢管混凝土组合桥墩抗震性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [165] CHEN B C, LAI Z C, YAN Q L, et al. Experimental behavior and design of CFT-RC short columns subjected to concentric axial loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(11): 04017148.
- [166] 陈宝春, 晏巧玲, 薛建阳. 钢管混凝土复合柱静力试验与偏心率折减系数计算方法[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 92-102.
- [167] WEI J G, XIE Z T, ZHANG W, et al. Axial compressed UHPC plate-concrete filled steel tubular composite short col-

- umns, Part I: Bearing capacity[J]. Steel and Composite Structures, 2023, 47(3): 405-421.
- [168] WEI J G, XIE Z T, ZHANG W, et al. Axial compressive property of UHPC plate-CFST laced composite columns[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e01085.
- [169] 谢志涛. 超高性能混凝土缀板-钢管混凝土复合柱承载力研究[D]. 福州: 福州大学, 2023.
- [170] 吴巨军, 郑江敏, 刘山林. 钢管混凝土斜塔斜拉桥设计[J]. 世界桥梁, 2020, 48(2): 6-9.
- [171] 王苍和, 刘世忠, 贾一全. 刘家峡大桥钢管混凝土桥塔粘结滑移力学试验研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(8): 89-92, 99.
- [172] 刘永健, 孙立鹏, 周绪红, 等. 钢管混凝土桥塔工程应用与研究进展[J]. 中国公路学报, 2022, 35(6): 1-21.
- [173] 宁斌. 高坎浑河大桥主塔施工测量控制[J]. 中国建筑金属结构, 2013(22): 189-190.
- [174] 彭强. 南京长江五桥钢壳混凝土桥塔足尺模型工艺试验[J]. 桥梁建设, 2019, 49(3): 46-50.
- [175] 樊健生, 朱尧于, 崔冰, 等. 钢板-混凝土组合结构桥塔研究及应用综述[J]. 土木工程学报, 2023, 56(4): 61-71.
- [176] 魏乐永, 颜智法, 张愉. 张靖皋长江大桥新型组合索塔设计[J]. 公路, 2023, 68(6): 20-27.
- [177] 张喜刚, 刘高, 高原, 等. 中空型外壁钢板-混凝土组合桥塔塔柱承载力研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 90-98.
- [178] 孙立鹏, 刘永健, 张宁, 等. 矩形高强钢管混凝土壁板弹塑性屈曲及宽厚比限值解析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(2): 112-121.
- [179] SUN L P, LIU Y J, WANG H T, et al. Axial compressive behavior of PBL-stiffened double-skin composite walls considering local buckling: experimental and theoretical investigation[J]. Engineering Structures, 2023, 289: 116329.
- [180] 张辉. 临沂市西安路桥空间混合桥塔设计与研究[J]. 城市道桥与防洪, 2017(2): 89-91, 124, 12.
- [181] 李翠霞. 武汉鹦鹉洲长江大桥桥塔设计[J]. 桥梁建设, 2014, 44(5): 94-98.
- [182] 张金涛, 傅战工, 秦顺全, 等. 常泰长江大桥主航道桥桥塔设计[J]. 桥梁建设, 2022, 52(5): 1-7.
- [183] 龙勇, 刘爱林, 董继红, 等. 马鞍山公铁两用长江大桥主航道桥桥塔混凝土抗裂技术研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53(3): 8-15.
- [184] 施洲, 顾家昌, 余万庆, 等. 大跨度斜拉桥双向曲面混合桥塔钢-混结合段受力性能研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(6): 73-85.
- [185] 张光辉, 张启伟, 刘玉擎, 等. 斜拉桥混合塔结合部受力机理模型试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 106-112.
- [186] 肖林, 叶华文, 卫星, 等. 斜拉桥桥塔钢-混结合段的力学行为和传力机理研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 88-96.
- [187] 王雪锋, 关大勇, 冯玉龙. 钢-混组合桥塔结合段承载性能模型试验研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(4): 93-100.
- [188] 王罡, 夏启龙, 王玉银, 等. 双层波纹钢混凝土组合拱静力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S2): 358-364.
- [189] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土拱桥技术规范: GB 50923—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [190] 国家铁路局. 铁路桥梁钢管混凝土结构设计规范: TB 10127—2020[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2020.
- [191] 徐升桥, 邹永伟. 铁路桥梁钢管混凝土结构设计理论研究[J]. 铁道技术标准(中英文), 2019, 1(2): 88-101.
- [192] 刘永健, 刘江. 钢-混凝土组合梁桥温度作用与效应综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(1): 42-59.
- [193] 陈津凯, 陈宝春, 刘振宇, 等. 钢管混凝土拱均匀温差设计取值研究[J]. 土木工程与管理学报, 2013, 30(4): 1-7.
- [194] 陈宝春, 刘振宇. 日照作用下钢管混凝土桁拱温度场实测研究[J]. 中国公路学报, 2011, 24(3): 72-79.
- [195] 陈宝春, 赖秀英. 钢管混凝土收缩变形与钢管混凝土拱收缩应力[J]. 铁道学报, 2016, 38(2): 112-123.
- [196] 赖秀英, 陈宝春. 钢管混凝土拱桥收缩次内力计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(3): 120-126.
- [197] LIU J P, TIAN Q, WANG Y J, et al. Evaluation method and mitigation strategies for shrinkage cracking of modern concrete[J]. Engineering, 2021, 7(3): 348-357.
- [198] 韩玉, 秦大燕, 冯智. 合江长江一桥施工关键技术及创新[J]. 公路, 2013, 58(3): 69-74.
- [199] 罗世东, 严爱国, 刘振标. 宜万铁路宜昌长江大桥主桥创新技术研究[J]. 桥梁建设, 2006, 36(S2): 12-15.

- [200] 陈宝春, 韦建刚, 周俊, 等. 我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 50-61.
- [201] LIU Y J, LI J J, JIANG L, et al. Mechanism and design method of load transfer into concrete-filled steel tubular arch ribs through perfolobond-rib-shear connectors[J]. Buildings, 2023, 13(3): 807.
- [202] 姜磊, 刘永健, 周绪红, 等. 钢管混凝土组合结构桥梁设计原理与技术发展综述[J]. 中国公路学报, 2024: 1-32.
- [203] 陈宝春, 陈津凯. 钢管混凝土内栓钉抗剪承载力试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(2): 66-73.
- [204] 陈津凯, 陈宝春, 刘君平. 钢管混凝土多排多列内栓钉受剪性能[J]. 工程力学, 2017, 34(6): 178-189.
- [205] 刘君平, 陈津凯, 陈宝春. 钢管混凝土桁肋内栓钉相贯节点受力行为试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(9): 150-157.
- [206] 陈宝春, 范冰辉, 余印根, 等. 钢管混凝土拱桥强健性设计[J]. 桥梁建设, 2016, 46(6): 88-93.
- [207] 吴庆雄, 余印根, 陈宝春. 下承式钢管混凝土刚架系杆拱吊杆断裂动力分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(15): 144-149.
- [208] 范冰辉, 陈宝春, 吴庆雄. 考虑强健性的中、下承式拱桥技术状况评定[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 64-68.
- [209] DEHGHANI A, ASLANI F. Fatigue performance and design of concrete-filled steel tubular joints: a critical review[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162: 1-18.
- [210] 吴庆雄, 黄汉辉, 陈康明, 等. 钢管混凝土 K 形节点足尺模型疲劳性能试验[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(10): 102-111.
- [211] 姜磊, 刘永健, 王康宁, 等. 焊接管节点结构形式发展及疲劳性能对比[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 180-191.
- [212] 张岩松. 钢管混凝土拱桥冲击系数研究[D]. 福州: 福州大学, 2023.
- [213] 祝汇丰. 钢管混凝土拱桥温度作用计算方法[D]. 福州: 福州大学, 2023.
- [214] 赖秀英. 钢管混凝土拱桥收缩、徐变效应研究法[D]. 福州: 福州大学, 2016.
- [215] CHEN B C, LAI Z, LAI X Y, et al. Creep prediction models for concrete-filled steel tube (CFT) arch bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(7): 1-15.
- [216] 赖秀英, 陈宝春, 郑娟, 等. 考虑持久荷载影响的 CFT 柱稳定承载力试验研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(3): 65-73.
- [217] 李小芳. 圆钢管混凝土偏压柱徐变后承载力研究[D]. 福州: 福州大学, 2022.
- [218] Savor Z, Bleiziffer J. From Melan patent to arch bridges of 400 m spans[C] // Proceedings of Chinese-Croatian Joint Colloquium on Long Span Arch Bridges, Brijuni Islands, Croatia, 2008: 349-356.
- [219] 程懋方, 陈俊卿. 大跨度刚架拱桥的设计与施工[J]. 有色冶金设计与研究, 1995, 16(2): 43-49.
- [220] 郭增伟, 程皓, 周水兴. 钢管混凝土劲性骨架拱桥混凝土外包过程非线性屈曲分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(10): 52-62.
- [221] 林春姣, 肖周强, 蒋才健, 等. 劲性骨架混凝土拱桥主拱圈箱形截面分环和浇筑方式[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(3): 81-90.
- [222] HE F Y, LI C, CHEN B C, et al. Compressive behavior of concrete-encased CFST column with initial stress[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 201: 107724.
- [223] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2022.
- [224] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [225] 徐梧, 于清, 尧国皇. 初应力对钢管混凝土叠合柱轴压性能影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(5): 556-562.
- [226] 晏彪. 初应力对劲性骨架混凝土结构极限承载力的影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [227] 李尧. 考虑两阶段初应力的 CFST 劲性骨架混凝土短柱轴压性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [228] 牟廷敏, 梁健, 范碧琨, 等. 大跨径钢筋混凝土拱桥的新作为[J]. 中国公路, 2019(5): 58-61.
- [229] 陈宝春, 李莉, 罗霞, 等. 超高强钢管混凝土研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 1-21.
- [230] 林拥军, 林池谈, 张晶. 圆钢管钢骨混凝土柱的承载力参数分析[J]. 钢结构, 2018, 33(10): 40-46, 58.
- [231] PIPINATO A. Innovative bridge design handbook; construction, rehabilitation and maintenance[M]. Amsterdam: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2016.

- [232] GAO J, SU J Z, XIA Y, et al. Experimental study of concrete-filled steel tubular arches with corrugated steel webs[J]. *Advanced Steel Construction*, 2014, 10(1): 99-115.
- [233] GAO J, CHEN B C. Investigation of in-plane behavior of concrete-filled steel tubular model arches with corrugated steel webs[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-bridge Engineering*, 2013, 166(3): 205-216.
- [234] 刘君平, 胡治华, 罗霞, 等. 钢腹杆-劲性骨架混凝土弦杆组合拱节点受力性能试验[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(2): 69-76.
- [235] 杨艳, 罗霞, 唐勇, 等. 钢桁腹杆-劲性骨架混凝土(SRC)组合拱极限承载力及简化计算研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(10): 200-206, 216.
- [236] 徐港宗. 钢桁腹杆-混凝土组合拱受力性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2023.
- [237] 龙强. 钢桁腹杆-混凝土组合拱节点传力机理与设计方法研究[D]. 福州: 福州大学, 2023.
- [238] 陈宝春, 陈友杰, 刘玉擎. 钢管与钢管混凝土复合拱桥[J]. *桥梁建设*, 2001, 31(1): 17-20.
- [239] 林鹏. 成贵铁路鸭池河特大桥拱肋架设二次横移技术[J]. *桥梁建设*, 2019, 49(2): 114-118.
- [240] 敬洪武. 贵州鸭池河特大桥主桥拱肋混合接头局部应力研究[J]. *交通科技*, 2019(5): 97-100.
- [241] 周倩, 张策, 周水兴, 等. 分界点对混合拱桥受力影响研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(1): 1-6.
- [242] 范亮. 钢箱-混凝土组合拱截面受力行为与设计原理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [243] 周远智, 朱金波, 邓晓红. 钢箱-混凝土组合拱桥受载全过程分析[J]. *交通科技*, 2015(2): 75-76, 82.
- [244] 周宇, 魏朝柱, 何海. 揭阳市区进贤门大桥主桥设计[J]. *中外公路*, 2020, 40(3): 182-186.
- [245] 胡阳. 钢桁拱-混凝土 V 构组合桥梁节点力学行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [246] EUGEN B. "Structural UHPFRC" to enhance bridges[C] // *Proceedings of the 2nd International conference on UHPC Materials and Structures*. Fuzhou: RILEM Publications S.A.R.L., 2018: 150-158.
- [247] 程怀亮. UHPC 加固受损 NSC 梁抗剪性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [248] 谭毅龙. RC-UHPC 叠合板负弯矩区受力性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2021.
- [249] Voo Y L, Hafezolzghorani M, Foster S J. Application of ultra-high performance fiber reinforced concrete technology for present and future[C] // *Proceedings of the 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures*. Fuzhou: RILEM Publications S.A.R.L., 2018: 6-20.
- [250] CHEN Y C, ZHOU J L, GUO F Z, et al. Experimental study on the flexural behaviors of prestressed segmental ultra-high-performance concrete channels and reinforced conventional concrete deck composite girders[J]. *Buildings*, 2023, 13(7): 1841.
- [251] 梁兴文, 王莹, 于婧, 等. 预制 UHPC 模板及采用预制模板的 RC 板受力性能及承载力分析[J]. *工程力学*, 2019, 36(7): 146-155.
- [252] 李岚. RC-UHPC 叠合板界面粘结性能与抗弯性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2020.
- [253] 高立强, 王敏, 王康宇. 预制 NC 拼装梁粗骨料 UHPC 湿接缝抗弯性能研究[J]. *桥梁建设*, 2022, 52(2): 82-88.
- [254] 杨家林. CFRP-UHPC 复合板加固 RC 梁的抗剪性能研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2022.
- [255] TOM I. Stolma bridge, Norway[J]. *Structural Engineering International*, 1999, 9(2): 100-102.
- [256] 卢祖梁, 方志. 活性粉末混凝土混合梁桥性能研究[J]. *公路工程*, 2016, 41(5): 22-27.
- [257] 张高展, 葛竞成, 丁庆军, 等. 轻质超高性能混凝土的制备及性能形成机理[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(2): 381-390.
- [258] 丁庆军, 郭凯正, 程华强, 等. 陶砂和钢纤维对轻质超高性能混凝土的影响[J]. *混凝土*, 2023(4): 59-63.
- [259] 林上顺, 黄卿维, 陈宝春, 等. 跨海大桥 U-RC 组合桥墩试设计研究[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17(4): 55-65.
- [260] 陈庆熠. RU-NC 组合短柱轴压力学性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2019.
- [261] 黄卿维, 王思睿, 黄伟, 等. RU-NC 组合短柱轴压受力性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(11): 137-149.
- [262] ZHANG Y, ZHU Y P, XU Z B, et al. Long-term creep behavior of NC filled UHPC tube composite column[J]. *Engineering Structures*, 2022, 259: 114214.

- [263] 傅方铁. 考虑二次受力的 US-RC 柱承载力研究[D]. 福州: 福州大学, 2022.
- [264] 林上顺, 陶志蕾, 夏樟华, 等. 考虑二次受力的 UHPC 加固 RC 桥墩轴压承载力研究[J]. 桥梁建设, 2022, 52(5): 28-35.
- [265] 陈宝春, 陈国栋, 苏家战, 等. 采用 UHPC-RC 阶梯桩的整体桥试设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(1): 1-8.
- [266] 张永涛, 李刚, 郑和晖. 预制 UHPC-灌注 RC 组合桩基方案设计及试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(S1): 45-51, 65.
- [267] 汪夏韬. UHPC 壳局部增强近海桥墩抗震性能试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [268] 任亮, 方博文, 刘青云, 等. 基于截面纤维模型的 UHPC-NC 组合桥墩抗震性能研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(9): 146-153.
- [269] 张仁巍, 李林翀, 颜玲月. RPC-NC 式混凝土双柱墩抗震性能分析[J]. 三明学院学报, 2021, 38(6): 78-86.
- [270] 熊世伟. UHPC 蝶形腹板-混凝土组合拱试设计研究[D]. 福州: 福州大学, 2023.
- [271] KAMINAGA Y, ASHIZUKA K, TAKAHASHI A, et al. Design and construction of butterfly web bridge-akutagawa bridge [C]// IABSE Symposium Report. International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland, 2015, 104(17): 1-7.
- [272] KASUGA A. Effects of butterfly web design on bridge construction[J]. Structural Concrete, 2017, 18(1): 128-142.
- [273] 肖建庄, 张青天, 余江滔, 等. 混凝土结构的新发展-组合混凝土结构[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 147-155.
- [274] 郭海洋, 董文秀. 钢管混凝土拱与钢管拱的稳定性及抗震性分析[J]. 工程与建设, 2016, 30(3): 368-371.
- [275] 左伟, 程斌, 滕念管. 部分内填混凝土钢桁梁焊接整体节点力学性能分析[J]. 公路工程, 2017, 42(2): 97-102.
- [276] 王宁宁, 赵奇, 米家禾, 等. UHPC 墩周连接装配式桥墩抗震性能研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(4): 780-791.
- [277] 黄侨, 李俊方, 李文贤, 等. 斜拉桥钢桥塔承压式钢-混结合段有限元分析[J]. 公路交通科技, 2020, 37(1): 50-57.
- [278] 张德明. 济南凤凰黄河大桥主桥桥塔设计[J]. 桥梁建设, 2020, 50(5): 84-89.
- [279] 中华人民共和国交通运输部. 公路斜拉桥设计规范: JTG/T 3365-01-2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [280] 中华人民共和国交通运输部. 公路悬索桥设计规范: JTG/T D65-05-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.