

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.106

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



钢-混组合结构桥梁 2019 年度研究进展

肖林, 卫星, 温宗意, 李刚

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:钢-混凝土组合结构是土木工程中一种主要组合结构,能充分发挥混凝土和钢材的性能,可作为一种可持续发展的桥梁结构。近年来,随着绿色建造以及可持续建造理念的普及,钢-混组合结构桥梁在公路、铁路桥梁中所占比例逐步提高,学者们从多个方面开展了对钢-混组合结构桥梁的科学研究和工程应用。为了促进对该结构更加全面、深入的研究,指导钢-混组合结构在桥梁建设中更切合实际的应用与推广,对2019年度钢-混组合结构整体力学行为、钢-混组合结构剪力键、钢-UHPC组合结构、钢管混凝土结构及波形钢腹板-混凝土组合结构5个方面的最新研究进行梳理与总结,并对未来钢-混组合结构研究热点和方向进行展望。

关键词:组合结构;力学行为;剪力键;钢管混凝土

中图分类号:U448.38 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2020)05-0168-15

State-of-the-art review of steel-concrete composite bridges in 2019

Xiao Lin, Wei Xing, Wen Zongyi, Li Gang

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: Steel-concrete composite structure is one of the main structures in the field of civil engineering construction, which can give full play to the properties of concrete and steel, thus leading to a sustainable development direction of the bridge structure. In recent years, with the popularization of the concept of green construction and sustainable construction, the proportion of steel-concrete composite bridges in highway and railway bridges has gradually increased. Consequently, many scholars have carried out scientific research and engineering applications on various aspects of steel-concrete composite structural bridges. In order to promote comprehensive and further basic research on this structure, and to guide the practical application in bridge construction, the latest domestic and foreign researches in 2019 were reviewed and summarized. The researches include the overall mechanical behavior of steel-concrete composite structures, shear connectors of steel-concrete composite structures, steel-UHPC composite structures, concrete-filled steel tube structures and steel-concrete composite structures with corrugated steel webs. Based on the latest research progress above, the future research focuses and directions of steel-

收稿日期:2020-04-03

基金项目:国家自然科学基金(52078424)

作者简介:肖林(1982-),男,副教授,主要从事桥梁钢结构、钢-混组合结构桥梁的计算分析理论、耐久性研究, E-mail: xiaolin@swjtu.edu.cn.

卫星(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail: we_star@home.swjtu.edu.cn.

Received:2020-04-03

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 52078424)

Author brief: Xiao Lin (1982-), associate professor, main research interests: calculation theory and durability of steel bridge and steel-concrete composite bridge, E-mail: xiaolin@swjtu.edu.cn.

Wei Xing (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: we_star@home.swjtu.edu.cn.

concrete composite structure are prospected.

Keywords: composite structure; mechanical behavior; shear connectors; concrete-filled steel tube structures

钢-混组合结构能充分发挥混凝土和钢材的性能,是一种可持续发展的桥梁结构形式。常见的钢-混组合桥梁有组合梁桥、组合桁梁桥、组合刚构桥、组合拱桥、组合斜拉桥等。钢-混组合结构桥梁是利用剪力连接件将高抗拉强度的钢材和高抗压强度的混凝土连成整体,形成在横截面内共同受力的构件,进而组成桥梁结构,极大发挥了两种材料相对优势^[1]。20 世纪 90 年代以来,钢-混组合结构在中国梁式桥、拱桥、悬索桥及斜拉桥中均得到不少应用,但数量占比仍然不超过 0.5%。2016 年 7 月,交通运输部发布《关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见》,要求到“十三五”期末新建大跨、特大跨径桥梁以钢结构为主。随着绿色建造以及可持续建造理念的普及,加上桥梁工程产业结构加速转型升级,标准化和工业化建造钢-混组合结构桥梁在公路、铁路桥梁中所占比例将逐步提高。

2019 年,学者们针对组合结构桥梁的研究主要采用数值模拟与模型试验方法,研究内容主要侧重于钢-混组合桥梁整体力学行为、钢-混组合结构剪力键、钢-UHPC 组合桥面板力学行为、钢管混凝土桥梁力学行为及波形腹板组合梁桥力学行为 5 个方面。中国关于钢-混组合结构的研究主要集中于钢-混组合结构整体力学行为及波形钢板-混凝土组合结构方面,而其他国家较多地集中在钢-混组合结构剪力键研究和钢管混凝土构件力学行为方面。笔者梳理、总结钢-混组合结构上述 5 个方面在 2019 年度取得的研究进展,并指出今后钢-混组合结构发展方向。

1 钢-混组合结构整体力学行为研究

钢板混凝土组合梁和钢-混凝土组合箱梁是钢-混组合结构桥梁的主要结构形式,可作为梁式桥和斜拉桥的主梁,近年来在中国桥梁工程中逐渐得到推广应用。2019 年对钢-混组合结构桥梁总体力学行为研究可分为 6 类:钢-混组合结构桥梁工程应用研究、钢-混组合结构桥梁弯曲性能研究、钢-混组合结构桥梁空间受力行为研究、钢-混组合结构桥梁动力性能研究、钢-混组合结构桥梁局部受力性能研究及其他研究。其中,工程应用研究、弯曲性能研究、空间受力行为研究占比较大。

1.1 工程应用研究

在钢-混组合结构桥梁工程应用研究方面,主要研究内容分为两方面:1)结合具体工程项目介绍钢-混组合结构桥梁结构特点及关键技术^[2];2)讨论钢-混组合结构在大跨桥梁、山区桥梁、高速铁路桥梁(图 1)、轨道交通轨道梁、预制装配式桥梁等结构中的适应性。相关研究结果表明^[3],在大跨度无砟轨道桥梁中,宜采用 PC 梁与钢结构组合桥梁,比如 PC 梁与钢结构拱组合、PC 梁钢桁组合,均能满足高速铁路无砟轨道的要求,而且可以较好地控制混凝土徐变和主梁变形,进而可为大跨度无砟轨道桥梁选型拓宽思路。

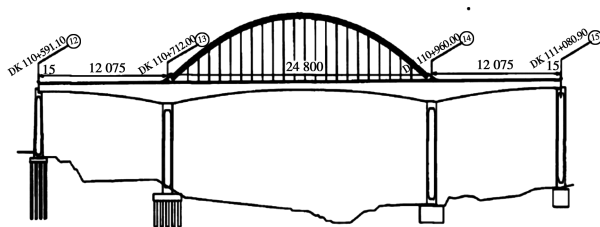


图 1 高速铁路组合结构桥梁^[3]

Fig. 1 High-speed railway composite structure bridges^[3]

1.2 弯曲性能研究

在钢-混组合结构桥梁弯曲性能研究方面,刘劲等^[4]对钢-混组合梁在负弯矩作用下的抗弯刚度进行了研究,研究结果表明,组合梁在负弯矩作用下,抗弯刚度受剪力连接度影响较大,纵筋率影响其次,而如栓钉布置、栓钉直径及组合梁跨度等参数影响较小。

万世成等^[5]利用预应力碳纤维板加固钢-混凝土组合连续梁负弯矩区,提高组合梁抗弯承载力,梁体抗裂性也大幅增强如图 2。通过该加强措施可使组合梁抗弯极限承载力提高 19.4%,碳纤维板加固可限制裂缝产生和扩展,并减小梁体挠度和裂缝宽度。

冀伟等^[6]、Zhang 等^[7]对钢-混组合梁挠度计算方法进行了研究(图 3),研究表明,钢-混组合梁挠度计算需考虑层间滑移效应,梁体刚度会因层间滑移效应增大而减小,既而梁体挠度会增大,剪力连接件抗剪刚度大于 1 200 MPa 时,可不考虑滑移效应影响,否则需予以考虑。

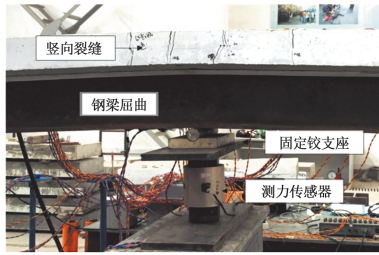


图 2 CFRP 加固钢-混组合梁负弯矩区试验^[5]

Fig. 2 Test of the negative moment zone of CFRP-reinforced steel-concrete composite beam^[5]

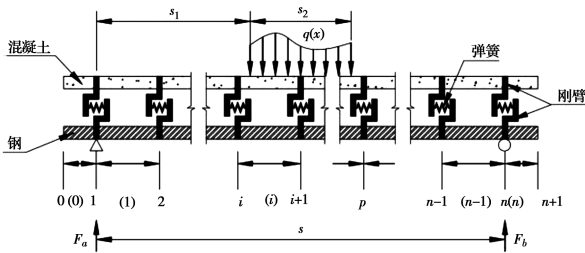


图 3 考虑界面滑移的钢-混组合梁计算模型^[7]

Fig. 3 The calculation model of steel-concrete composite beam considering interface slip^[7]

1.3 空间受力研究

在钢-混组合结构桥梁空间受力研究方面,文献[8]研究了钢-混组合梁桥弯扭耦合效应,弯扭耦合效应会增大钢-混组合梁桥在活载作用下剪力滞效应,剪力滞-轮载局部综合影响系数会超过 2.0,且支点截面处桥面板剪力滞-轮载局部效应大于跨中截面,同时,在不考虑剪力滞-轮载局部效应时,控制截面的偏载系数仍可能超过 1.2,大于设计采用的经验系数 1.15。由此可见,弯扭耦合效应会增大钢-混组合梁桥跨中截面和支点截面的剪力滞系数,特别是剪力较大的支点控制截面,所以针对弯扭耦合效应较大的钢-混组合结构桥梁需充分考虑该效应带来的影响。

双主梁式钢板组合梁桥因钢主梁间距较大,桥面板正应力横向分布不均,剪力滞效应显著,文献[9]对双主梁钢板组合梁桥翼缘有效宽度、宽跨比、主梁间距等几何参数进行了研究,研究表明,有效宽度可基于现行规范进行计算,宽跨比设计时宜小于等于 3,而主梁间距计算可参考文献[9]中对应公式。

1.4 动力特性研究

在钢-混组合结构桥梁动力特性研究方面,重点围绕大跨钢-混组合结构桥梁地震响应、高速铁路钢-混连续结合梁桥车桥动力响应及宽幅钢-混组合

结构桥梁风致振动开展了研究。

大跨度钢-混结合梁斜拉桥结构体系较柔,自振周期较长,地震响应显著。文献[10]对近断层脉冲地震作用响应进行了研究,发现与非脉冲地震作用相比,近断层脉冲作用使得主梁和主塔地震响应显著增大,最大可增大 177.9%,因此,建议在基于内力控制的结构抗震设计中考虑长周期脉冲影响。

在对高速铁路钢-混结合梁动力响应研究过程中,一般采用车桥耦合振动理论对其动力响应进行模拟,未考虑结合梁自身构造影响,文献[11]研究结果表明,结合梁柔性栓钉连接件会影响结构动力响应,柔性栓钉引起的界面滑移可减小梁体刚度,降低自振频率,同时,栓钉连接刚度对移动荷载作用下梁体跨中挠度响应也有较大影响。

钢-混结合梁截面形式通常为半开放截面,易发生涡激振动现象,在结合梁中被广泛应用的整体式风嘴无法降低宽幅双箱结合梁涡激振幅,文献[12](如图 4)通过在箱梁侧下方安装风嘴来减弱箱梁边缘流动分离,优化结构气动分离,进而减小涡激振幅,研究表明, -3° 、 0° 两种风攻角下主梁竖向涡激振动均低于规范允许振幅, 3° 风攻角下振幅略大于规范值。所以,在提高钢-混组合梁抗风能力时,可以考虑在不改变截面形式的基础上改变细部构造来改善结构的抗风特性。



(a) 节段模型整体照片

(b) 节段模型底面照片

图 4 钢-混组合梁节段风洞模型^[12]

Fig. 4 Wind tunnel model of steel-concrete composite beam segment^[12]

1.5 局部受力研究

在钢-混组合结构局部构造力学性能研究方面,研究对象主要围绕钢-混组合索塔(如图 5)和混合梁钢-混结合段(如图 6)进行。

钢-混组合索塔的钢锚箱与混凝土塔壁有内置和外置两种结合方式,中国一般采用内置形式。锚箱承担索力竖向分量通过剪力键传递给塔壁,索力水平分量则由锚箱端板传递给塔壁。文献[13]研究结果表明,锚箱和塔壁应力水平较低,分布均匀,二

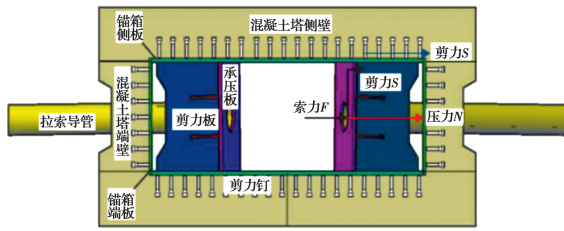


图 5 钢-混组合索塔构造^[13]

Fig. 5 Steel-concrete composite tower structure^[13]

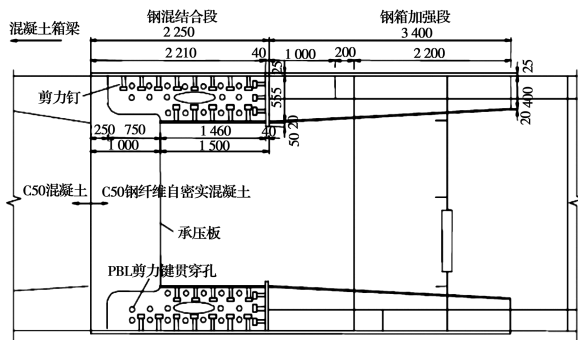


图 6 钢-混结合段构造^[14] (单位:mm)

Fig. 6 Steel-concrete composite section structure^[14] (units:mm)

者相对滑移较小,相对滑移最大值仅为 0.029 mm;增大剪力键抗剪刚度可减小塔壁主拉应力水平,主拉应力可减小 17.3%。基于此,可通过提高钢-混组合索塔的剪力键抗剪刚度来改善索塔应力水平分布,避免一定范围内应力集中。

钢-混结合段是混合梁斜拉桥关键部位,是主梁刚度突变点,传力复杂,存在局部应力集中情况。文献[14]研究结果表明,钢混结合段在荷载作用下,应力变化平顺,且应力水平较低,可有效传递内力,但部分部位存在应力集中现象,如加劲 T 肋尾端,箱梁底板折角与横隔板交接处。剪力连接件受力不均,距承压板越远,剪力钉和 PBL 剪力键所受剪力越大,否则越小。

此外,钢-混组合结构桥梁的抗火性能^[15]及体外预应力加固后钢-混组合连续桥梁的疲劳性能^[16]也受到了关注。

2 钢-混组合结构剪力键

组合桥梁结构中,剪力连接件是保证组合效应的关键,是该类结构研究的重点。目前,栓钉剪力键和开孔钢板剪力键在钢-混组合结构桥梁中应用较多,研究手段多为推出试验与数值模拟相结合的方式,研究重点集中在其抗剪刚度、滑移性能、承载力、疲劳性能等方面。2019 年度剪力键研究包括栓钉

剪力键、PBL 剪力键、高性能混凝土剪力键、新型剪力键及剪力键的耐久性 5 个方面。

2.1 栓钉剪力键

已有研究中,无论是通过推出试验还是梁式试验,都对一般的栓钉剪力连接键抗滑移性能、疲劳作用下抗剪性能进行了较多研究,且已有部分广泛使用的横向力-滑移公式,但对其抗拔性能研究相对较少。中国钢结构设计规范中对组合桥栓钉剪力键高度与直径之比有大于 4 的限制,以保证正常使用状态下的抗拔性能,而在特殊荷载下,如疲劳荷载作用下,其工作性能需求仍需进一步研究。由于较多抗剪公式都是通过推出试验结果拟合得到,公式适用范围与实际使用中拉-剪复合作用环境略有差别,在剪力栓钉高径比较大时,承载力性能差别与现有公式差别也会显现。

文献[17-20]研究了疲劳作用下可拆卸螺栓剪力键的性能(图 7),栓钉基本抗拔、抗剪性能,以及拉-剪复合极限状态下栓钉破坏特性(图 8),并提出了受拉力影响栓钉抗剪承载力的折减公式。当栓钉受拔作用占到较大比例时,钢板材料特性也要考虑进来,复合拉-剪的破坏形式与纯剪切有所不同,在有限元计算中,考虑以比较靠近端头处的混凝土压应变和剪力钉的拉应变来判断失效模式,所提出的折减公式^[20]对于直径在 13~22 mm 的普通混凝土可用。



图 7 螺栓剪力键反复加载试验^[17]

Fig. 7 Repeated loading test for bolt shear connectors^[17]

2.2 PBL 剪力键

PBL 剪力连接键多用于波形钢腹板组合梁桥、混合梁交界面、索塔锚固区域等,其破坏形式较栓钉复杂,影响因素也多,PBL 剪力键基本承载性能、滑移状态和疲劳性能仍持续受到关注^[21-23]。对 PBL 剪力键两种试验方法(标准试件与埋入式试件)进行了对比,研究发现,两者存在明显差异,且滑移状态和承载能力极限状态均表现不同,埋入式试件滑移

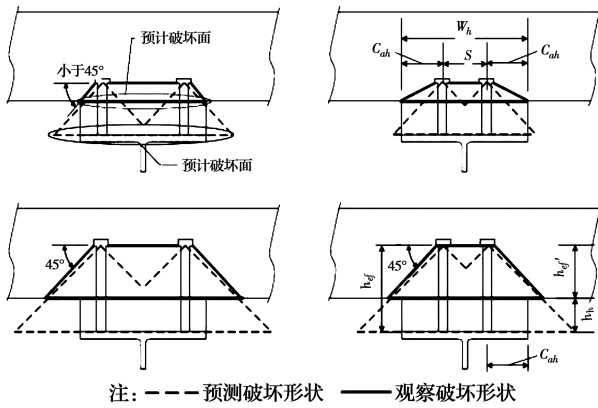


图 8 栓钉剪力键破坏模式^[19]

Fig. 8 Failure mode of stud connectors^[19]

更大,承载力也更大。其次,分析了试件细节(混凝土强度、开孔钢板、贯通钢筋、布置钢筋等)对试件承载力的影响,并提出了相应的拟合公式;另一方面,在常规 PBL 剪力键基础上提出创新构造^[24],如图 9 中双 PBL 连接键、图 10 中带橡胶环的 PBL 连接键,带橡胶环的 PBL 剪力连接键减轻了局部应力集中问题,有利于提高连接键滑移性能,改善了不均匀剪切力分布,充分发挥了混凝土抗压性能。

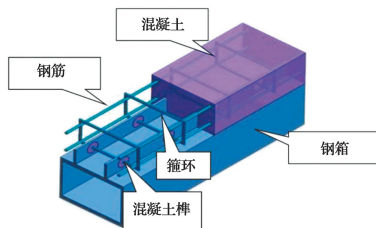


图 9 带环箍的 PBL 剪力键^[23]

Fig. 9 PBL Shear connector with hoop^[23]

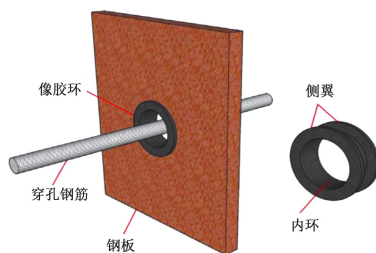


图 10 带橡胶环的 PBL 剪力键^[24]

Fig. 10 PBL shear connector with rubber ring^[24]

2.3 高性能混凝土剪力键

随着高性能混凝土(UHPC、ECC 等)在组合结构桥梁(特别是组合桥面板)中的应用,钢-高性能混凝土组合桥面板中剪力键力学行为越来越受关注^[25-26]。如图 11、图 12 所示,由于正交异性钢桥面板疲劳问题较为突出,为缓解疲劳问题,采用铺设 UHPC 桥面承受轮载,从而推动了 UHPC 中剪力键

力学性能研究的发展;同时,连续组合梁负弯矩区开裂问题推动了 ECC 的应用,ECC 中剪力键的性能需求受到关注;钢-混组合梁支座因受到较强的腐蚀作用,可以采用 UHPC 与剪力键加固方法强化支座的承载力,其研究主要是揭示破坏形态和相对滑移公式。

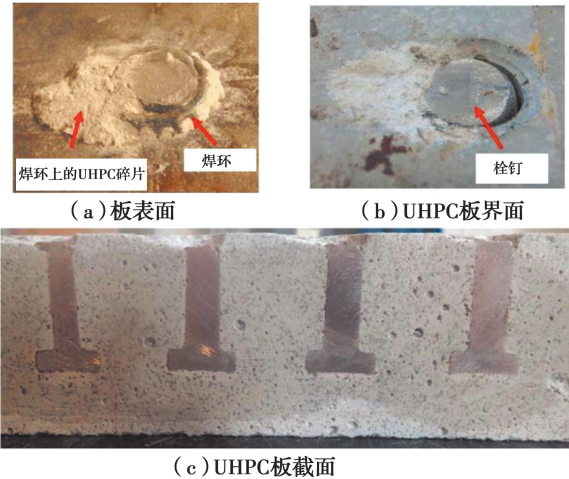


图 11 UHPC 中栓钉剪力键^[25]

Fig. 11 Stud connectors in UHPC^[25]

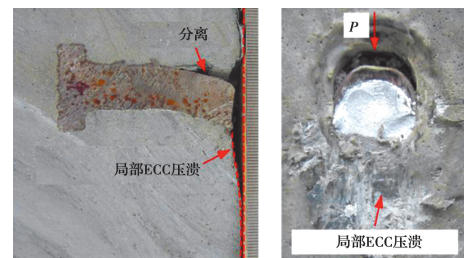


图 12 ECC 中栓钉剪力键^[26]

Fig. 12 Stud connectors in ECC^[26]

2.4 装配式剪力键

为适应桥梁快速施工(ABC)要求,解决湿法施工技术带来的较多现场作业的问题,装配式剪力键(Prefabricated Composite Shear Connectors)正受到关注,主要有各种形式螺栓装配,也有螺旋销式,可装配式剪力键促进了桥梁建设施工方法湿法向干法施工的转变,可以减少现场浇筑作业,同时,由于装配式剪力键安装方便及其可拆卸性,在桥梁加固方面,对于旧桥加固以及部分区域损伤加固都有用武之地,装配式剪力键力学性能仍在研究^[27-30],部分研究表明,其可以取得较好抗滑移和组合效应,且疲劳性能高于焊接栓钉,如图 13~图 15 所示。此外,通过预制板+集束式剪力钉布置的施工设计方法也可以加快施工,减少现场作业,但对相关方法的适用性和耐久性仍需进一步研究。



图 13 装配式螺栓剪力键^[27]

Fig. 13 Assembled bolt shear connectors^[27]

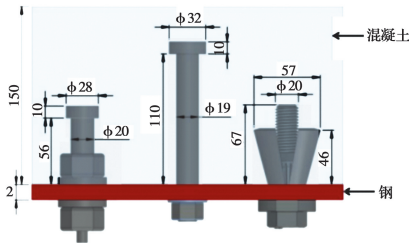


图 14 可拆卸的栓钉剪力键(单位:mm)^[28]

Fig. 14 Removable stud connectors(units:mm)^[28]

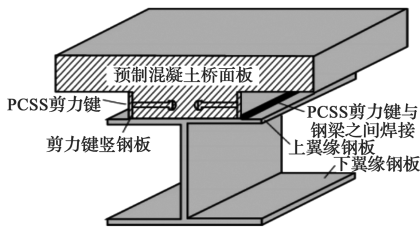


图 15 PCSS 剪力连接构件^[29]

Fig. 15 PCSS shear connectors

2.5 剪力键耐久性

为适应不同使用环境,保证组合结构桥梁的耐久性,剪力键耐久性能研究成为必然要求。腐蚀环境^[31](如图 16)、低温环境^[32]及冻融环境下^[33]剪力键力学性能逐渐得到关注,研究内容主要集中在栓钉剪力连接件的耐久性。模拟栓钉锈蚀的手段一般是通过将推出试件或者梁式试件浸泡在 NaCl 溶液中,进行通电,电流作用下加快栓钉锈蚀过程;也可将试件放置在实验室内,通过调节湿度与温度,模拟大气腐蚀。前者常表现为较均匀腐蚀;后者表现为不均匀腐蚀,与实际情况更为匹配,但耗时更长。研究表明,栓钉锈蚀后,其疲劳寿命下降更为突出,单调荷载下梁式试件仍表现为局部失效,但疲劳荷载下表现为栓钉剪断,随着腐蚀速率的增加,残余弯曲刚度和滑动刚度随着疲劳循环的进行而降低;冻融与低温环境主要影响的是混凝土强度,它是栓钉连接件抗剪承载力的主要影响因素,控制着栓钉推出试验的破坏形式。在冻融循环下,混凝土内部结合

水不断地膨胀融化,加速表面砂浆层脱落,使混凝土出现损伤,混凝土弹性模量和立方体抗压强度以及栓钉连接件性能下降,且试验表明,冻融循环次数对开裂荷载的影响大于极限荷载。



SSCB-0 SSCB-1 SSCB-2 SSCB-3 SSCB-4 FSCB-0 FSCB-1 FSCB-2 FSCB-3 FSCB-4

图 16 锈蚀栓钉剪力键^[31]

Fig. 16 Corroded shear stud connectors^[31]

3 钢-UHPC 组合结构

为提高组合结构桥梁耐久性和受力性能,超高性能混凝土 UHPC 及高性能钢材逐渐在桥梁工程中得到研究和应用,目前,钢-UHPC 组合结构研究重点集中在静力承载力、疲劳性能两个方面。

3.1 静力承载力

关于钢-UHPC 组合结构静力承载力,研究对象包括 UHPC 板+正交异性钢桥面组合结构和 UHPC 华夫板+钢梁组合结构,见图 17、图 18。

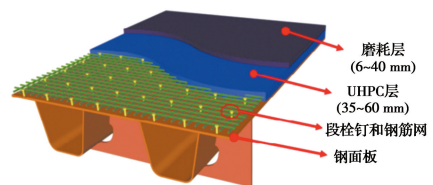


图 17 钢-UHPC 闭口肋轻型组合桥面板^[34]

Fig. 17 Steel-UHPC lightweight composite deck with closed ribs^[34]

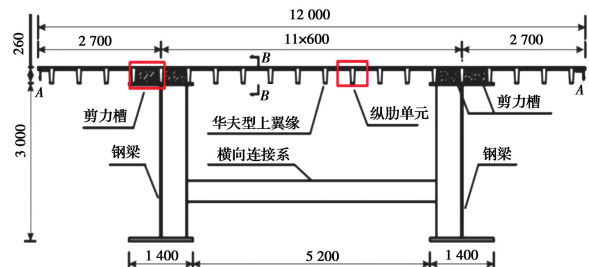


图 18 UHPC 华夫板+钢梁组合结构^[35]

Fig. 18 Steel-UHPC composite beams with waffle slab^[35]

为研究 UHPC+正交异性钢板组合结构的挠曲开裂行为,文献^[34]测试了 40 根钢-UHPC 复合板和 8 根钢-UHPC 复合梁,分别研究了它们在横向和纵向的开裂特性。研究表明,配筋率和保护

层厚度对开裂应力影响较大,且当保护层厚度较小时,通过提高配筋率可以大幅度提高开裂应力,减小栓钉间距也可以提高开裂应力,但提高幅度有限,UHPC 层厚度对开裂应力影响较小。由此可见,对于一般较薄的 UHPC 层而言,改善配筋率是一种有效提高其开裂应力的加强方式。

钢-混凝土组合结构因混凝土桥面板自重大,且负弯矩区易开裂,因而引入 UHPC 华夫板代替普通混凝土桥面板来解决上述问题,文献[35]提出一种新型组合梁,即装配式 UHPC 华夫型上翼缘组合梁,并以某典型 3 跨连续梁桥为研究对象进行研究。研究表明,在荷载作用下,中支座负弯矩段华夫型上翼缘纵肋底缘和面板最大拉应力均小于配筋 UHPC 的抗拉强度设计值。研究中采用的 UHPC 华夫板可有效降低桥面板自重,且强度较高,可推广至一般钢-混组合结构负弯矩区域。

3.2 疲劳性能

随着交通量增加,正交各向异性钢桥面板(OSD)疲劳已成为近年来桥梁运营的关键问题。文献[36](如图 19)对 UHPC-正交异性钢复合桥面板负弯曲段进行了疲劳试验研究,研究表明,在复合桥面板所有易疲劳细节中,仅发现纵肋腹部出现纵向裂纹,裂纹具体位于纵肋与横向隔板焊趾相交处,而且复合桥面板还因 UHPC 和钢桥面板分层发生疲劳剪切破坏,疲劳剪切破坏是受短头栓钉剪力键疲劳剪切强度控制,该强度远大于规范中规定的疲劳强度值。

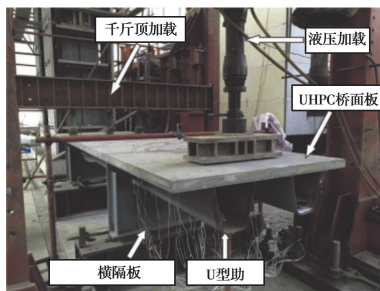


图 19 UHPC 板+正交异性钢桥面^[36]

Fig. 19 UHPC-orthotropic steel plate^[36]

文献[37]对钢-UHPC 桥面板的横向疲劳行为进行了研究,研究表明,该组合结构桥面板力学性能退化加速了 OSD 易疲劳细节损伤累积,在疲劳强度评估中必须考虑结构力学性能的退化。

4 钢管混凝土结构

钢管混凝土结构作为组合结构桥梁重要组成部分,自 20 世纪 90 年代初在中国桥梁工程中应用以来,已修建完成超过 400 座不同类型的钢管混凝土桥梁。由于良好的受力性能,钢管混凝土较多地应用于拱桥,此外,钢管混凝土桁架在梁式桥中也有不少应用。2019 年关于钢管混凝土桥梁的研究主要包括钢管混凝土构件基本力学性能研究、钢管混凝土桥梁总体力学行为、钢管混凝土桁架关键节点力学行为、新型钢管混凝土结构力学性能。

4.1 构件基本力学性能

钢管混凝土构件基本力学性能主要有钢管混凝土受单轴压力作用性能,其中包括偏心和非偏心受压。偏心受压下钢管混凝土 $N-M$ 曲线和构件延性是研究钢管混凝土柱受压性能的重点,由于混凝土与钢管自身特性,可能发生徐变收缩效应,导致内壁钢-混分离和钢管壁局部屈曲等组合性能降低的现象。

Wang 等^[38]研究了混凝土非线性徐变对钢管混凝土柱受力的影响(如图 20),钢管混凝土中钢管对内嵌混凝土约束,达到充分发挥混凝土抗压性能的目的,但由于混凝土收缩徐变效应,常常引起内力重分布。研究表明,按线性蠕变考虑会低估蠕变作用效果,经蠕变作用后,试件极限承载力没有发生较大变化,但变形能力较未经蠕变作用的试件有所降低。基于试验结果,提出了可用于钢管混凝土非线性蠕变预测的模型。总体而言,常用徐变理论为线性徐变理论,对于受压构件来说,其应力水平一般较高,会出现超出线性徐变理论适用范围的情况,学者们对非线性徐变研究较少,且一般以试验研究为主。

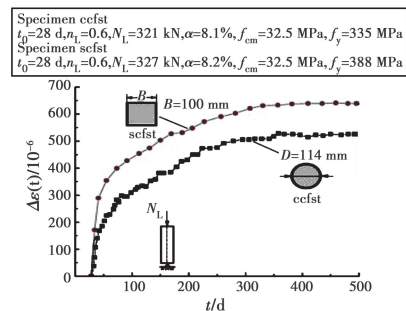


图 20 钢管混凝土柱徐变应变^[38]

Fig. 20 Creep strain of concrete-filled steel tube columns^[38]

Lee 等^[39]研究了偏心加载作用下 CEFT 钢管混凝土柱延性和破坏状态(如图 21); Song 等^[40]研究了钢管局部屈曲行为下钢管混凝土受力状态(如图 22),考虑了钢管几何缺陷和残余应力用以预测屈曲后极限强度,由于混凝土灌注后,混凝土收缩导致了钢管壁和内嵌混凝土表面分离或者其他受力状态导致了分离,这种分离现象降低了钢管约束作用,同时,钢管侧向约束的降低增大了局部屈曲风险,对此类失效模式的研究有助于不利状态下钢管混凝土承载能力的评估。

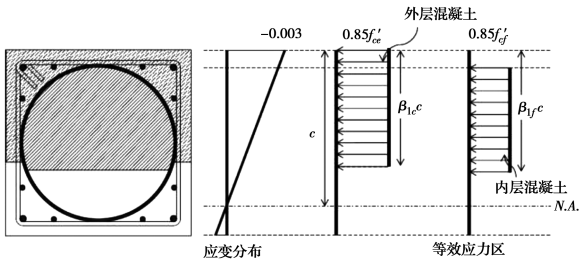


图 21 偏心受压钢管混凝土柱^[39]

Fig. 21 Eccentrically pressed concrete-filled steel tube columns^[39]

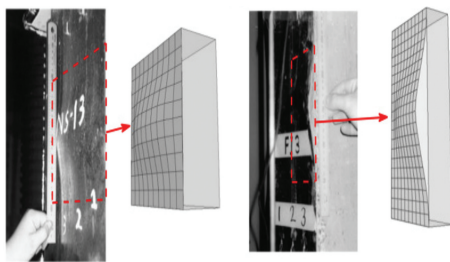


图 22 钢箱混凝土钢板局部屈曲^[40]

Fig. 22 The steel plate local buckling of steel box concrete^[40]

4.2 整体力学性能

钢管混凝土拼接后形成钢管混凝土桁架,可用作钢管混凝土桁架桥上部结构或钢管混凝土格构柱等结构。钢管混凝土桁架杆件较多,各个管节点施工工艺复杂,近年来也颇有应用,如干海子特大桥等。由于复杂的杆件关系,可能存在较多因素制约其性能发挥,如管节点疲劳,制造缺陷等问题。钢管混凝土格构柱施工便捷、承载能力高、延性好,在桥墩中应用较为合适,因此,十分有必要对其抗震特性进行研究。目前,对钢管混凝土格构柱在地震作用下响应行为的研究还不够充分。

Chen 等^[41]研究了考虑初始缺陷的钢管混凝土桁架力学行为(如图 23),由于缺陷具有随机性特性,研究了不同初始缺陷影响的可靠度指标,针对随

机初始缺陷,提出了可靠性和相关系统阻力因素,研究中着重分析了钢管内填充混凝土后的制造缺陷(混凝土与钢管的间隙)对桁架梁可靠性的影响,未考虑混凝土相关的时变效应,给多变量的可靠性评估提供了框架。袁辉辉等^[42]对钢管混凝土格构柱振动特性及抗震性能进行了研究,验证了此类结构具有良好的强度储备和变形能力,多次强震后仍具有一定承载力,适用于高烈度地区桥梁工程。

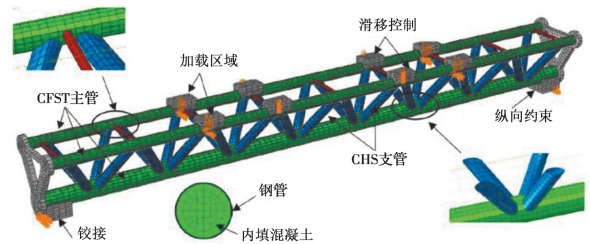


图 23 带缺陷的钢管混凝土桁架^[41]

Fig. 23 CFST trusses with initial imperfections^[41]

4.3 管节点

管节点是钢管混凝土桁架桥梁的关键受力部位,管节点应力集中程度高,轴向径向刚度变化大,再加上焊接初始缺陷、残余应力等影响,反复荷载作用下容易产生疲劳开裂,是管结构研究重点之一。一些学者采用应力集中系数评估疲劳性能,如热点应力、切口应力,也有通过断裂力学研究方法对产生疲劳裂纹后的裂纹拓展进行的研究。2019 年,学者们^[43]对管节点应力集中系数的研究仍在继续(如图 24),研究管-管相贯节点、管-板节点和扫把型节点的热点应力集中系数,结果显示管-板节点热点应力系数较低。Jin 等^[44]和周凌宇等^[45]对两类可拆卸式新型管节点的受力特性进行了研究,分别研究了可拆卸式管-管 K 型节点的失效模式与接头强度和外接板式 K 型节点的初始刚度(如图 25、图 26)。可拆卸式管节点有利于结构元素的重复利用,是促进减少能源消耗和建设排放的可持续发展的有效途径。

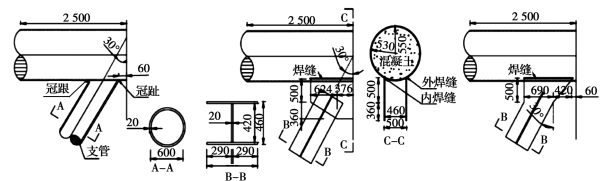
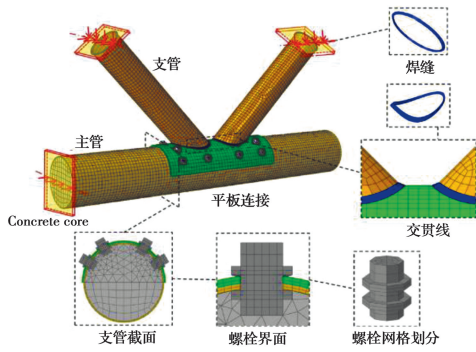
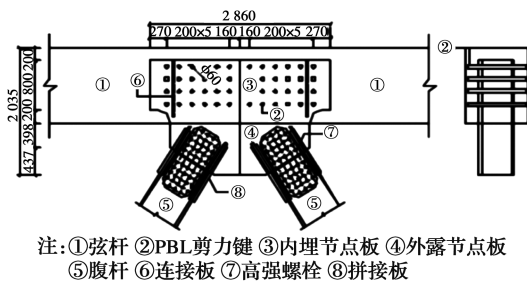


图 24 典型钢管混凝土桁架节点(单位:mm)^[43]

Fig. 24 Typical CFST truss joints(units:mm)^[43]

4.4 新型结构研发

前述内容多为普通性能钢-混组合结构,近年

图 25 钢管混凝土螺栓连接节点^[44]Fig. 25 The bolted joint of concrete-filled steel tube structures^[44]

注:①弦杆 ②PBL剪力键 ③内埋节点板 ④外露节点板 ⑤腹杆 ⑥连接板 ⑦高强螺栓 ⑧拼接板

图 26 外接式组合桁架节点(单位:mm)^[45]Fig. 26 External composite truss joint(units:mm)^[45]

来,随着材料的发展,高强钢和特种混凝土的应用也逐渐广泛,如再生混凝土、橡胶混凝土、超高性能混凝土、纤维混凝土等。不仅在材料上种类繁多,在复合结构形式上也层出不穷,除了钢管内嵌混凝土,还有不同型钢外包混凝土,不同型钢外包混凝土再内嵌入钢管内,以及多个钢管混凝土柱组合外包混凝土再内嵌入钢管内,根据不同承压需求,耐高温、耐久性等要求,形式多样。同时,为保证内填混凝土的约束作用以及与钢管的协同作用,内置钢筋形式也是设计者研究的方向。

Mohd Raizamzamani 等^[46]研究了钢管+泡沫混凝土组合柱对填充有泡沫混凝土的圆形钢管在轴向推力和弯曲作用下的约束作用进行研究,并估计了填充泡沫混凝土钢管柱的最佳轴向和抗弯能力。Dong 等^[47]对钢管+橡胶混凝土钢管混凝土柱进行了研究,利用橡胶具有资源二次利用和改善混凝土延展性的优点,尽管牺牲了部分强度和刚度,内填橡胶混凝土对有大变形需求的构筑物,如地震活动区结构中的立柱等,提供了良好的解决方案。Xu 等^[48]对钢管+再生混凝土进行了研究,重点研究了再生混凝土替代率对组合结构复合弹性模量的影

响。研究表明,复合弹性模量对结构尺寸的敏感性高于再生混凝土替代率,再生混凝土的利用减少了废混凝土对环境的影响,具有发展前景。在结构组合多样性方面,Liang 等^[49]研究了双钢管混凝土工作性能。Wang 等^[50]验证了一种用于替代钢管混凝土的新型波纹钢管混凝土结构,利用外镀锌波纹钢管优异的耐腐蚀性解决钢管混凝土耐久性问题,波纹管具有较高侧向刚度,可与混凝土牢固结合。并测试了短柱轴压性能,如图 27 所示。组合管结构依照其使用性能的不同,组合结构形式和材料的选用也十分丰富,其研究内容多集中于抗压性能和变形能力,研究中较多地比较了其力学性能,如若推广使用,仍需考虑其经济性和获取材料的便捷性。

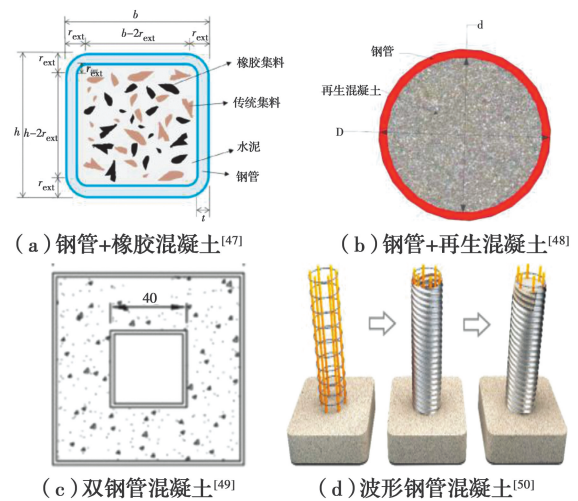
(a) 钢管+橡胶混凝土^[47](b) 钢管+再生混凝土^[48](c) 双钢管混凝土^[49](d) 波形钢管混凝土^[50]

图 27 新型钢管混凝土组合结构

Fig. 27 Novel concrete-filled steel tube structures

5 波形钢腹板-混凝土组合结构力学行为

波形钢腹板 PC 组合箱梁以波形钢板代替普通混凝土作为腹板,可有效减轻桥梁自重,提高跨越能力,近些年来得到广泛关注和深入研究。对于波形钢腹板组合结构桥梁力学行为的研究主要集中在波形钢腹板抗剪性能、抗弯性能、空间行为及动力性能 4 个方面。

5.1 抗剪性能

波形钢腹板组合结构桥梁中,截面剪力由波形钢板承担,波形钢板剪切屈曲行为一直是该类桥梁的主要研究方向之一。2019 年,学者们对变截面波形钢腹板、设置加劲肋波形钢腹板(如图 28)和曲线

波形钢腹板剪切性能进行了研究。

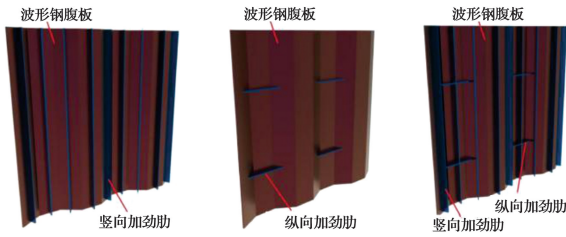


图 28 设置加劲肋的波形钢腹板^[52]

Fig. 28 Corrugated steel web with stiffeners^[52]

文献[51]在对变截面波形钢腹板箱梁剪应力的研究过程中发现,剪力、弯矩和轴力均会产生剪应力,并且后两者仅仅在变截面时产生剪应力,研究结果表明,变截面波形钢腹板截面顶板剪应力很小,底板剪应力相对顶板较大。在无弯矩或弯矩很小的区域仅由腹板承剪是可以接受的,但当弯矩较大时,顶、底板承剪比例能达到 50% 以上,因此,应考虑顶、底板的承剪能力。研究中考虑到变截面处顶、底板承剪能力较传统计算理论和规范更加充分、全面,进而可优化波形钢腹板及混凝土顶、底板截面设计。

大跨度波形钢腹板组合梁支撑段剪切稳定性是影响结构安全主要控制因素之一,一般是通过将混凝土浇筑到波形钢腹板内侧以提高其剪切稳定性,但内衬混凝土增大了梁体重量,增加了施工难度。文献[52]通过在支撑段采用竖向或水平加劲肋代替内衬混凝土达到提高钢腹板剪切稳定性,是一种新型增强方法。研究结果表明,波形钢腹板剪切强度可通过垂直和水平加劲肋来提高,竖直加劲肋不会影响波纹钢腹板“手风琴效应”,同时,水平加劲肋会增加波纹钢腹板在局部区域的轴向刚度,并抵抗上下翼缘所传递的弯矩。与内衬混凝土相比,采用垂直和水平加劲肋,可有效降低自重,且保证梁体剪切稳定性。

5.2 空间力学行为

2019 年,在波形钢腹板组合结构桥梁的研究中,空间力学行为研究占比较多,集中在剪力滞效应、横向受力行为(如图 29)。此外,腹板采用钢管混凝土桁架的特殊波形钢腹板组合梁也被关注(如图 30)。

文献[53]对波形钢腹板组合箱梁剪力滞影响因素进行了研究,结果表明,结构宽跨比是其主要影响因素,波形钢腹板厚度和顶、底板厚度影响较小,其

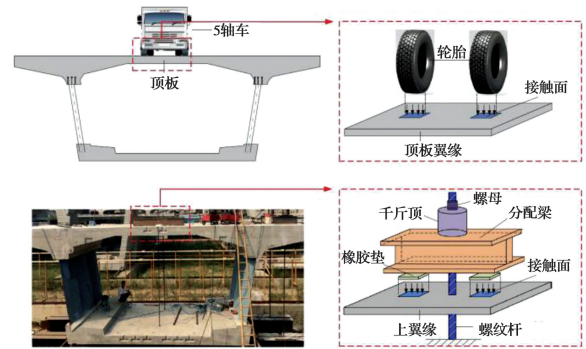


图 29 波形钢腹板组合梁横向受力^[54]

Fig. 29 Transverse analysis of composite beams with corrugated steel webs^[54]

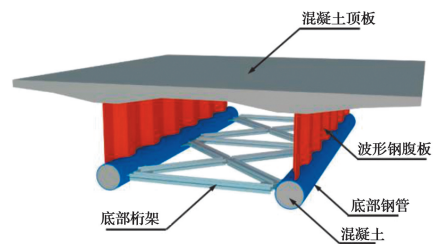


图 30 波形钢腹板+钢管桁架+混凝土组合梁^[55]

Fig. 30 Composite box girder bridges with corrugated steel webs and trusses^[55]

余参数在常规设计范围内可不予考虑,进而研究组合箱梁剪力滞影响因素可重点着眼于结构宽跨比。

波形钢腹板组合箱梁可通过预制拼装方式进行施工,文献[54]在对车辆荷载作用下节段组合箱梁横向力学性能的研究中发现,组合箱梁横向弯曲刚度比具有混凝土腹板结构的横向弯曲刚度弱,同时,相关研究结果表明,组合箱梁发生破坏是顶板混凝土发生弯曲破坏,而不是腹板剪切屈曲破坏。此外,预制分段组合箱形梁具有较高的安全系数和良好的塑性变形能力。研究揭露了另外一种组合箱梁破坏形态,顶板混凝土弯曲破坏,因此,可对其受力破坏机理深入研究。

底板采用钢管混凝土桁架的特殊波形钢腹板组合梁,是一种增强改进组合结构,文献[55]对其剪力滞效应进行了研究,发现钢管内部是否填充混凝土对剪力滞效应影响不大,剪力滞效应与宽跨比有关,宽跨比越大,剪力滞效应越大。因而在计算该种组合梁剪力滞效应时,对内填混凝土可不予考虑。

5.3 动力特性

对波形钢腹板组合结构桥梁动力特性的研究侧重于两方面,一方面,作为焊接钢结构反复荷载作用

下其连接细节疲劳性能是该类桥梁研究热点,文献[56](如图 31)对波纹腹板进行了大型四点弯曲疲劳试验,试验结果表明,在恒定弯矩区域内腹板与翼缘焊接部位焊趾处产生了多条裂纹,但临界裂纹还是在弯曲-剪切组合区域内产生。另一方面,随着多跨波形钢腹板组合结构桥梁的应用,其动力特性也需要深入探讨,文献[57]研究表明,钢腹板波折角度增大会导致结构竖向弯曲振动频率递减,且波形钢腹板波折角度增大会导致结构横向弯曲振动频率和扭转频率呈先增大后减小的趋势,波折角度为 60° 时,二者频率均达到最大值。由此可见,在设计多跨波形钢腹板组合结构时,需对钢腹板的波折角度予以考虑,尤其是涉及到结构动力特性方面。

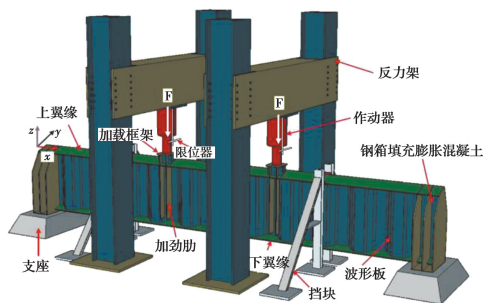


图 31 波形钢腹板疲劳易损部位^[56]

Fig. 31 The fatigue and vulnerable parts of corrugated steel webs^[56]

5.4 抗弯性能

波形钢腹板管翼缘组合梁较一般工字型组合结构刚度更高、承载力更大、稳定性更好。文献[58]研究表明,波形钢腹板高度及翼缘钢管管壁厚度对组合梁跨中截面应变影响较大,且组合截面含钢率对其承载力也有较大影响,研究结果表明,钢腹板高度及翼缘管壁厚度变化最大可减少跨中截面应变的 59%,含钢率变化最大可提高承载力的 78%。

对于波形钢腹板组合梁挠度计算方法一般有 5 种,即经典梁法、Timoshenko 梁法、弹性剪切变形法、有效刚度法、三角级数理论。文献[59]研究结果表明, Timoshenko 梁法适用于跨高比大于 10 的简支梁(跨中集中力荷载工况),跨高比大于 14.5 的简支梁(均布荷载工况),三角级数理论适用于跨高比大于 4.5 的悬臂梁(跨中集中力荷载工况和均布荷载工况),其他理论则需具体问题具体分析。该研究全面分析了波形钢腹板组合梁不同挠度计算方法的优缺点,较为清晰地阐释了不同计算方法的适用

范围。

6 结论

随着中国可持续发展战略的深入推进,建立绿色、低碳与可持续交通运输体系的任务日益迫切。钢-混组合结构能充分发挥混凝土和钢材各自材料的性能优势,以其整体受力的合理性、经济性、便于施工等突出优点,广泛应用于结构工程的许多领域。为促进桥梁建设装配化、绿色化及智能化的转型升级,在桥梁工程中推广使用钢-混组合结构也面临着机遇与挑战。

通过对 2019 年钢-混组合桥梁整体力学行为、钢-混组合结构剪力键、钢-UHPC 组合桥梁力学行为、钢管混凝土桥梁力学行为及波形腹板组合梁桥梁力学行为 5 方面的研究回顾可以看出,未来一段时期,新结构(新型组合结构)开发、新材料(高性能材料)应用、新方法(精细分析方法)建立及新环境(复杂环境)影响是组合结构桥梁的重要研究方向,具体研究内容及热点为:

1)在钢-混组合桥梁整体力学行为方面,负弯矩作用下钢-混组合结构桥梁的力学行为及控制;复杂受力模式下钢-混组合结构桥梁的空间受力行为;新型钢-混组合结构传力机理将成为研究热点。

2)在钢-混组合结构剪力键研究方面,复杂环境下剪力键性能的退化;高性能混凝土中剪力键的力学行为;新型剪力键的力学行为将成为新的研究热点。

3)在钢-UHPC 组合结构研究方面,钢-UHPC 组合桥面疲劳性能和新型钢-UHPC 组合结构开发需要予以关注。

4)在钢管混凝土桥梁研究方面,钢管混凝土桁架管节点的力学行为、大跨钢管混凝土桁架的精细分析和新型钢管混凝土组合结构的力学性能将成为研究热点。

5)在波形钢腹板-混凝土组合桥梁研究方面,特殊波形钢板的剪切屈曲行为、波形钢腹板混凝土组合梁的空间受力行为和波形钢腹板混凝土组合梁的焊接细节疲劳性能将成为研究热点。

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(Sup1): 1-10.
- CHEN B C, MU T M, CHEN Y Y, et al. State-of-the-art of research and engineering application of steel-concrete composite bridges in China [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (Sup1): 1-10. (in Chinese)
- [2] NIE J G, WANG J J, GOU S K, et al. Technological development and engineering applications of novel steel-concrete composite structures [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2019, 13(1): 1-14.
- [3] 文强. 高速铁路无砟轨道大跨组合结构桥梁应用研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(2): 54-59.
- WEN Q. Application research on the long-span composite structure bridge on high-speed railway ballastless track [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(2): 54-59. (in Chinese)
- [4] 刘劲, 丁发兴, 蒋丽忠, 等. 负弯矩荷载下钢-混凝土组合梁抗弯刚度研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(9): 2281-2289.
- LIU J, DING F X, JIANG L Z, et al. Flexural stiffness of steel-concrete composite beam under negative moment [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(9): 2281-2289. (in Chinese)
- [5] 万世成, 黄侨, 关键, 等. 预应力碳纤维板加固钢-混凝土组合连续梁负弯矩区试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1114-1123.
- WAN S C, HUANG Q, GUAN J, et al. Strengthening of continuous steel-concrete composite beams in negative moment region using prestressed carbon fiberreinforced polymer plates [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(4): 1114-1123. (in Chinese)
- [6] 冀伟, 孙斌, 邓露, 等. 多因素影响下钢-混连续组合梁的挠度计算分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 30-38.
- JI W, SUN B, DENG L, et al. Calculation and analysis on deflection of steel-concrete continuous composite girder considering effect of multi-factors [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2019, 46(5): 30-38. (in Chinese)
- [7] ZHANG Q H, JIA D L, BAO Y, et al. Flexural behavior of steel-concrete composite beams considering interlayer slip [J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(9): 04019084.
- [8] 郭增伟, 陈汉林, 李龙景, 等. 钢混组合曲线梁桥混凝土桥面板应力空间分布特性[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(4): 586-593.
- GUO Z W, CHEN H L, LI L J, et al. Stress distribution characteristics of concrete slabs of steel-concrete composite girder bridges [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2019, 35(4): 586-593. (in Chinese)
- [9] 郭劲岑, 张玥. 双主梁钢板组合连续梁桥翼缘有效宽度及几何构造参数分析[J]. 力学季刊, 2019, 40(1): 216-222.
- GUO J C, ZHANG Y. Analysis of flange effective width and geometric structural parameters of the double-beam steel plate composite continuous bridge [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2019, 40(1): 216-222. (in Chinese)
- [10] 侯烈, 张龙奇, 师新虎. 近断层脉冲效应对大跨度结合梁斜拉桥地震响应的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(10): 2514-2520.
- HOU L, ZHANG L Q, SHI X H. Influence of near-fault pulse effect on seismic response of long-span composite girder cable-stayed bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(10): 2514-2520. (in Chinese)
- [11] 侯忠明, 夏禾, 李运生, 等. 某高速铁路钢-混连续结合梁桥车桥动力响应分析[J]. 钢结构(中英文), 2019, 34(12): 82-87.
- HOU Z M, XIA H, LI Y S. Vehicle-bridge dynamic response analysis of a steel-concrete continuous composite bridge under high-speed train loading [J]. Steel Construction, 2019, 34(12): 82-87. (in Chinese)
- [12] 张天翼, 孙延国, 李明水, 等. 宽幅双箱叠合梁涡振性能及抑振措施试验研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(10): 107-114, 168.
- ZHANG T Y, SUN Y G, LI M S. Experimental study on vortex-induced vibration performance and aerodynamic countermeasures for a wide-width double-box composite beam [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(10): 107-114, 168. (in Chinese)
- [13] 肖林, 刘丽芳, 卫星, 等. 钢-混组合索塔锚固结构的力学行为及结构优化[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 923-930, 944.
- XIAO L, LIU L F, WEI X, et al. Mechanical behavior and structural optimization of steel-concrete composite

- cable-pylon anchor [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(5): 923-930, 944. (in Chinese)
- [14] 金龙, 杨永伟, 邓露, 等. 混合梁斜拉桥钢-混结合段受力性能的有限元分析[J]. *中外公路*, 2019, 39(2): 70-75.
- JIN L, YANG Y W, DENG L. FEM analysis on mechanical behavior of steel: concrete joint section of hybrid girder cable: stayed bridge [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(2): 70-75. (in Chinese)
- [15] ZHOU H T, HAO C L, ZHENG Z Y, et al. Numerical studies on fire resistance of prestressed continuous steel-concrete composite beams [J]. *Fire Technology*, 2020, 56(3): 993-1011.
- [16] ELZOHAIRY A, SALIM H A, SAUCIER A. Steel-concrete composite beams strengthened with externally post-tensioned tendons under fatigue [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(5): 04019027.
- [17] ATAIEI A, ZEYNALIAN M, YAZDI Y. Cyclic behaviour of bolted shear connectors in steel-concrete composite beams [J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109455.
- [18] 赵根田, 曹亚楠, 贾然, 等. 单调及重复荷载作用下栓钉连接件抗拔性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(Sup1): 418-423.
- ZHAO G T, CAO Y N, JIA R. Experimental study on pull-out performance of studs under monotonic and cyclic loading [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(Sup1): 418-423. (in Chinese)
- [19] KIM J, WILLIAMSON E B. Ultimate behavior of stud connections within haunches [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(1): 04018106.
- [20] 蒲黔辉, 谢宏伟, 樊书文, 等. 拔出破坏的钢混组合结构栓钉连接件承载力的分析方法[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(1): 89-95.
- PU Q H, XIE H W, FAN S W, et al. Analysis method of bearing capacity of stud connector in steel-concrete composite structures under push-out failure [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 89-95. (in Chinese)
- [21] 施洲, 秦搏聪. 2类PBL推出试验破坏机理及承载力影响因素研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(4): 943-952.
- SHI Z, QIN B C. Study on the failure mechanism and bearing capacity influence factors of two kinds of push-out tests of PBL [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(4): 943-952. (in Chinese)
- [22] 胡旭辉, 周洁, 张雪松, 等. PBL剪力键与埋入式剪力键疲劳性能对比研究[J]. *公路*, 2019, 64(11): 134-137.
- HU X H, ZHOU J, ZHANG X S, et al. Comparative study on fatigue performance of PBL shear connectors and embedded shear connectors [J]. *Highway*, 2019, 64(11): 134-137. (in Chinese)
- [23] LI X, HU Z J, FAN L, et al. Experimental investigation of perfobond hoop shear connector's bearing capacity and slip [J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109461.
- [24] LIU Y Q, XIN H H, LIU Y Q. Experimental and analytical study on shear mechanism of rubber-ring perfobond connector [J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109382.
- [25] KRUSZEWSKI D, ZAGHI A E, WILLE K. Finite element study of headed shear studs embedded in ultra-high performance concrete [J]. *Engineering Structures*, 2019, 188: 538-552.
- [26] LIU Y M, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Static and fatigue push-out tests of short headed shear studs embedded in Engineered Cementitious Composites (ECC) [J]. *Engineering Structures*, 2019, 182: 29-38.
- [27] BALKOS K D, SJAARDA M, WEST J S, et al. Static and fatigue tests of steel-precaster composite beam specimens with through-bolt shear connectors [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(5): 04019036.
- [28] TAN E L, VARSANI H, LIAO F Y. Experimental study on demountable steel-concrete connectors subjected to combined shear and tension [J]. *Engineering Structures*, 2019, 183: 110-123.
- [29] 曾德子, 杨未蓬, 高燕梅, 等. 全装配式钢-混凝土组合构件抗剪性能试验研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(12): 45-50, 62.
- ZENG D Z, YANG W P, GAO Y M, et al. Experimental study on shearing resistance of fully assembled steel-concrete composite structures [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2019, 38(12): 45-50, 62. (in Chinese)
- [30] HÄLLMARK R, COLLIN P, HICKS S J. Post-installed shear connectors: Fatigue push-out tests of coiled spring pins [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 153: 298-309.

- [31] CHEN J, ZHANG H P, YU Q Q. Static and fatigue behavior of steel-concrete composite beams with corroded studs [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 156: 18-27.
- [32] 谢宜琨, 方国强, 张宁, 等. 低温下栓钉连接件抗剪承载力的数值模拟研究[J]. *工业建筑*, 2019, 49(10): 175-179, 145.
XIE Y K, FANG G Q, ZHANG N. Finite element analysis of shear capacity of stud connections at low temperature [J]. *Industrial Construction*, 2019, 49(10): 175-179, 145. (in Chinese)
- [33] 李慧, 刘永健, 张宁, 等. 冻融循环作用后栓钉连接件受剪性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(5): 149-155.
LI H, LIU Y J, ZHANG N, et al. Experimental study on shear performance of stud shear connector after undergoing freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(5): 149-155. (in Chinese)
- [34] LUO J, SHAO X D, FAN W, et al. Flexural cracking behavior and crack width predictions of composite (steel + UHPC) lightweight deck system [J]. *Engineering Structures*, 2019, 194: 120-137.
- [35] 张清华, 韩少辉, 贾东林, 等. 新型装配式UHPC华夫型上翼缘组合梁受力性能[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(3): 445-452.
ZHANG Q H, HAN S H, JIA D L, et al. Mechanical performance of novel prefabricated composite girder with top flange of ultra high performance concrete waffle deck panel [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(3): 445-452. (in Chinese)
- [36] CHEN S M, HUANG Y, GU P, et al. Experimental study on fatigue performance of UHPC-orthotropic steel composite deck [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 142: 1-18.
- [37] LIU Y M, ZHANG Q H, MENG W N, et al. Transverse fatigue behaviour of steel-UHPC composite deck with large-size U-ribs [J]. *Engineering Structures*, 2019, 180: 388-399.
- [38] WANG Y Y, GENG Y, CHEN J, et al. Testing and analysis on nonlinear creep behaviour of concrete-filled steel tubes with circular cross-section [J]. *Engineering Structures*, 2019, 185: 26-46.
- [39] LEE H J, PARK H G, CHOI I R. Eccentric compression behavior of concrete-encased-and-filled steel tube columns with high-strength circular steel tube [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 144: 106339.
- [40] SONG Y C, LI J, CHEN Y Y. Local and post-local buckling of normal/high strength steel sections with concrete infill [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 138: 155-169.
- [41] CHEN S L, HOU C, ZHANG H, et al. Structural behaviour and reliability of CFST trusses with random initial imperfections [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 143: 106192.
- [42] 袁辉辉, 吴庆雄, 陈宝春, 等. 平缀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.
YUAN H H, WU Q X, CHEN B C, et al. Pseudo-dynamic test of CFST lattice columns with flat lacing tubes [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(7): 67-78. (in Chinese)
- [43] 吴琛泰, 卫星, 温宗意, 等. 钢管混凝土桁架焊接节点热点应力集中系数研究[J]. *钢结构*, 2019, 34(1): 23-26, 14.
WU C T, WEI X, WEN Z Y, et al. Research on hot spot stress concentration factor of welded concrete-filled steel tubular truss joints [J]. *Steel Construction*, 2019, 34(1): 23-26, 14. (in Chinese)
- [44] JIN D, HOU C, SHEN L M, et al. Numerical investigation of demountable CFST K-joints using blind bolts [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 160: 428-443.
- [45] 周凌宇, 薛宪鑫. 外接式组合桁架节点初始转动刚度研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(5): 100-109.
ZHOU L Y, XUE X X. Study on initial rotational stiffness of external composite truss joint [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(5): 100-109. (in Chinese)
- [46] MOHD RAIZAMZAMANI M Z, AZERAI A R, HANIZAH A H. Confinement effects on circular steel tubes filled with foamed concrete (FCFST) subjected to axial thrust and bending [J]. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2019, 20(7): 1021-1035.
- [47] DONG M H, ELCHALAKANI M, KARRECH A, et al. Behaviour and design of rubberised concrete filled steel tubes under combined loading conditions [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 139: 24-38.
- [48] XU J J, ZHAO X Y, CHEN Z P, et al. Novel prediction models for composite elastic modulus of

- circular recycled aggregate concrete-filled steel tubes [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 144: 106317.
- [49] LIANG W, DONG J F, WANG Q Y. Mechanical behaviour of concrete-filled double-skin steel tube (CFDST) with stiffeners under axial and eccentric loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 138: 215-230.
- [50] WANG Y Y, YANG L G, YANG H, et al. Behaviour of concrete-filled corrugated steel tubes under axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2019, 183: 475-495.
- [51] 刘超, 黄钰豪, 高展. 变截面波形钢腹板箱梁剪应力计算理论[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(4): 475-481.
LIU C, HUANG Y H, GAO Z. Calculation theory of shear stress in variable section box girder with corrugated steel webs [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(4): 475-481. (in Chinese)
- [52] WANG S H, HE J, LIU Y Q, et al. Shear behavior of steel I-girder with stiffened corrugated web, Part I: Experimental study [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 140: 248-262.
- [53] 胡旭辉, 顾安邦, 丁艳超. 波形钢腹板组合箱梁剪力滞影响因素分析[J]. *公路*, 2019, 64(12): 177-181.
HU X H, GU A B, DING Y C. Analysis of influence factors on shear lag of composite box girder with corrugated steel webs [J]. *Highway*, 2019, 64(12): 177-181. (in Chinese)
- [54] ZHOU M, LIU Y Y, DENG W Q, et al. Transverse analysis of full-scale precast segmental box girder segments with corrugated steel webs: Experimental tests and FE modelling [J]. *Engineering Structures*, 2019, 187: 231-241.
- [55] CHEN Y Y, DONG J C, XU T H, et al. The shear-lag effect of composite box girder bridges with corrugated steel webs and trusses [J]. *Engineering Structures*, 2019, 181: 617-628.
- [56] XU J, SUN H H, CAI S Y, et al. Fatigue testing and analysis of I-girders with trapezoidal corrugated webs [J]. *Engineering Structures*, 2019, 196: 109344.
- [57] 李志聪, 张鹏. 波形钢腹板组合连续箱梁动力特性研究[J]. *公路*, 2019, 64(8): 127-130.
LI Z C, ZHANG P. Research on dynamic characteristics of continuous box girder combined with corrugated steel webs [J]. *Highway*, 2019, 64(8): 127-130. (in Chinese)
- [58] 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(Sup1): 325-332.
LIU Z F, WANG Z Y, ZHOU X F. Bending behavior of composite girders with corrugated steel webs and concrete filled steel tube [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(Sup1): 325-332. (in Chinese)
- [59] 叶华文, 王力武, 张庆, 等. 波形钢腹板组合梁弯曲变形的三角级数解[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(4): 701-708, 723.
YE H W, WANG L W, ZHANG Q, et al. Trigonometric series solution of bending deformation for composite beam with steel corrugated webs [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(4): 701-708, 723. (in Chinese)

(编辑 章润红)