

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.211



# 钢-混组合结构桥梁 2020 年度研究进展

卫星, 肖林, 温宗意, 康志锐

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

**摘要:**钢-混组合结构桥梁作为能实现可持续桥梁工程的结构形式之一,有良好的综合技术经济效益和社会效益,日益受桥梁工程界欢迎。钢-混组合结构能充分发挥混凝土和钢材各自的材料性能优势,以其整体受力的合理性、经济性、便于施工等突出优点,已广泛应用于结构工程许多领域。为促进桥梁建设向装配化、绿色化及智能化的转型升级,在中小跨度桥梁中推广使用钢-混组合结构面临机遇与挑战。从两大类方向对 2020 年度文章进行搜集、分类、回顾、综述,包括各式常用剪力件研究以及组合梁研究。剪力连接件研究内容涵盖栓钉连接件、PBL 连接件、螺栓连接件、连接件的基本力学性能,以及连接件的耐久与退化性能;组合梁研究进展包括理论模型、组合效应与空间行为、组合梁负弯矩区性能、组合梁动力特性、组合梁劣化性能与检测加固、组合梁施工方法等方面的研究。

**关键词:**钢-混组合结构;剪力连接件;组合梁;

**中图分类号:**U448.38 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0107-13

## State-of-the-art review of steel-concrete composite bridges in 2020

WEI Xing, XIAO Lin, WEN Zongyi, KANG Zhirui

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

**Abstract:** Steel-concrete composite bridges, one of the sustainable structural forms, have excellent composite technical, economic and social results, and are increasingly popular in the bridge engineering. The steel-concrete composite structure can give full play to the material advantages of concrete and steel, and has been widely used in many fields of structural engineering, because of the reasonable load transfer, the economic efficiency, and the ease of construction. In order to accelerate bridge construction to assemblage, greening and intellectualization, promoting the use of steel-concrete composite structures in small and medium-span bridges faces opportunities and challenges. Two major categories, including research on commonly used shear connectors and steel-concrete composite girders in 2020, are collected, categorized and reviewed. Research on shear connectors covers the basic mechanical properties of stud connectors, PBL connectors, bolt connectors, and improved connectors, as well as the durability and degradation properties of connectors. Research on composite beams includes theoretical models, combined effects and spatial behavior, performance in the negative moment zone, dynamic characteristics of composite beams, deterioration performance, detection and reinforcement, construction methods.

**Keywords:** steel-concrete composite structure; shear connector; composite girder

对 2020 年组合结构桥梁的相关进展进行搜集,内容从剪力件相关研究出发,再到组合桥整体性能研究,分类占比如图 1 所示。统计的文献研究主要集中于钢-混组合结构整体性能研究,以组合梁式桥为研究对象;同时剪力件研究作为组合构件中的关键部位,相对占比也达到一定程度。

笔者将依次梳理、总结以上两大类以及各自细分小类下的内容在 2020 年取得的研究进展,包括栓钉连接件及其新型连接件、PBL 连接件与钢-混常用接头、螺栓连接件、连接件耐久性能、组合梁理论模型、组合效应与空间受力行为、组合梁负弯矩性能、组合梁基本动力特性、组合梁劣化性能与

收稿日期:2021-07-28

基金项目:国家自然科学基金(52078424)

作者简介:卫星(1976-),男,博士,教授主要从事钢-混组合结构桥梁力学行为研究,E-mail:we\_star@home.swjtu.edu.cn.

检测、组合梁施工方法、组合梁其他常用构件。研究总结为今后相关的研究及工程应用提供参考,并提出钢-混组合结构的发展热点方向。

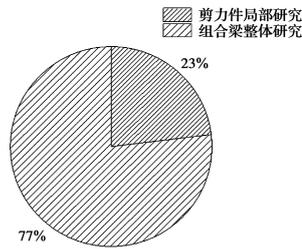


图 1 文献研究分类占比

## 1 剪力连接件研究进展

搜集整理了 2020 年度剪力连接件性能研究的相关文献,如图 2 所示,主要研究手段以推出试验和有限元模拟为主,研究对象为焊接栓钉连接件、PBL 剪力连接件、螺栓连接件。同时,还有一些对常用于桥梁结构中的新型连接件的探索,如用于加固的螺栓抗剪连接件的性能研究,以及特殊应用场景中剪力滞后抗剪连接件的使用。此外,对于抗剪连接件在新型混凝土材料中的性能研究也受到了很大的关注。除基本的抗剪性能外,研究者们根据连接件的主要应用场景,对压-剪、拉-剪,以及其他工作环境,如腐蚀环境、冻融环境等特殊工作环境下的使用性能进行了研究,其中连接件的静力性能研究较多。

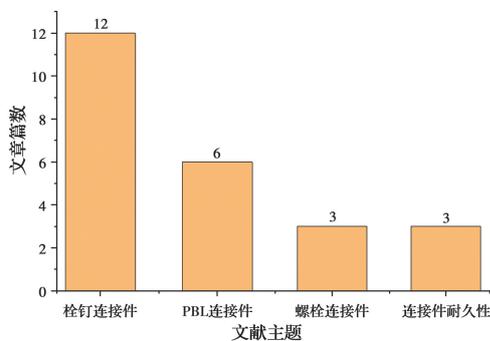


图 2 剪力连接件研究方向分类

### 1.1 栓钉连接件与改进连接件

焊接栓钉连接件是最常用的一种连接件,其与高性能混凝土材料的应用在组合结构中已是发展的大趋势,往年对于连接件在高性能混凝土材料中的抗剪性能已有部分研究,其中主要采用 UHPC,使用 UHPC 的桥面板较薄,使得栓钉的变形特点与嵌入普通混凝土的连接件较为不同。

Tong 等<sup>[1]</sup>研究了高强度钢( $f_y = 690 \text{ MPa}$ )-UHPC 组合梁中栓钉连接件的抗剪性能,进行了 6 个推出试件,并分为 3 组,研究参数包括直径和栓钉的布置(单个栓钉/栓钉群),对滑移曲线经验公式、破坏模式、群钉效应等进行了研究,其中栓钉失效模式见图 3。Zhao 等<sup>[2]</sup>研究了钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面板性能,提出了一种用于 UHPC 薄桥面板的短槽钢连接件,如图 4 所示,并通过推出试验和

有限元参数分析来研究其力学性能和适用性。



图 3 栓钉失效模式<sup>[1]</sup>

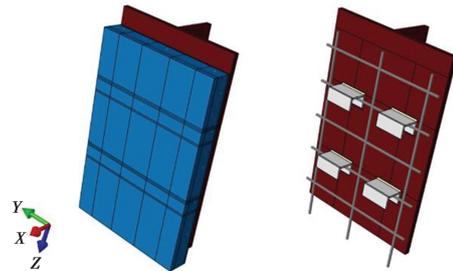


图 4 短槽钢连接件<sup>[2]</sup>

林明畅等<sup>[3]</sup>通过对 8 组试件进行推出试验,对带环氧胶层的钢-UHPC 栓钉剪力连接件(图 5)的极限承载状态进行了研究。邵旭东等<sup>[4]</sup>提出了一种新型剪力连接件-短钢筋连接件,如图 6 所示,并对其开展了静力推出试验和疲劳推出试验。

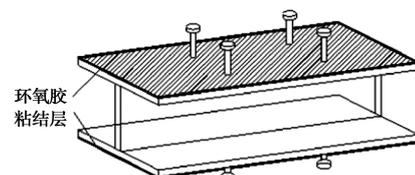
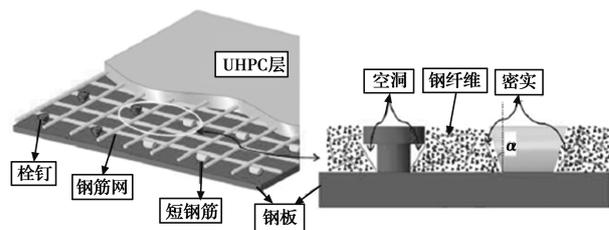


图 5 带胶层栓钉连接件<sup>[3]</sup>



(a) 实桥布置 (b) 剪力件构造细节

图 6 栓钉短钢筋连接件<sup>[4]</sup>

不同于以往进行的直剪(推出)试验,研究者们越来越关注剪力件的实际使用状态以精细化研究目标,依据不同的使用特点研究其与一般抗剪性能的区别,如拉-剪性能、存在剪力滞后效应的连接件性能、低温条件下的栓钉性能以及其他劣化性能的研究。

刘永健等<sup>[5]</sup>通过有限元分析法研究了车轮荷载下加肋与横梁形式对双工字钢组合梁栓钉剪力键的拉拔应力的影响,如图 7 所示。安然等<sup>[6]</sup>针对栓钉连接件在拉剪复合作用下栓钉剪力键的承载能力及其计算公式进行了研究,如图 8 所示,并通过理论分析推导出拉剪复合作用下栓钉剪力件

极限承载能力的计算模型。

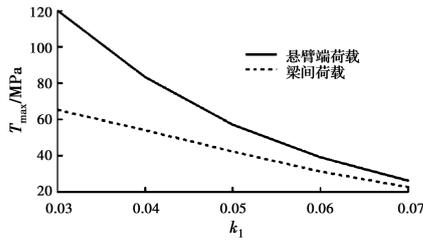


图 7 最大拉拔应力随  $k_1$  变化<sup>[5]</sup>

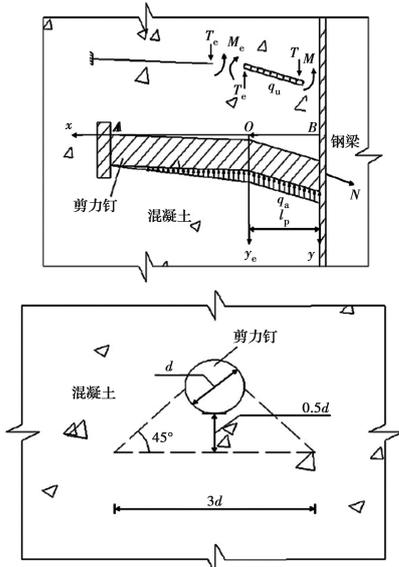


图 8 拉剪复合作用下栓钉剪力键<sup>[6]</sup>

Deng 等<sup>[7]</sup>采用凝胶覆盖的剪力钉(图 9)作为钢混结合装置,对 3 组梁柱节点进行了动力试验。Xu 等<sup>[8]</sup>对 9 个不同橡胶套高度的栓钉连接件进行了疲劳推出试验,研究了套橡胶管的栓钉连接件的剪切疲劳性能,建立了套橡胶管栓钉连接件的静力滑移公式和疲劳 S-N 曲线。带橡胶栓钉的失效模式见图 10。Zhuang 等<sup>[9]</sup>研究了索塔锚固区钢-混凝土组合界面中套橡胶管的剪力连接件(RSS)抗剪机理,进行了节段模型试验和有限元(FE)模拟,分析了不同 RSS 配置下的连接件、钢-混相对滑移和混凝土塔应力。

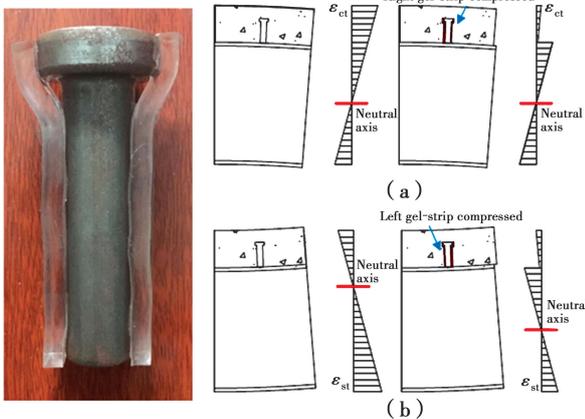


图 9 凝胶覆盖栓钉<sup>[7]</sup>

黄彩萍等<sup>[10]</sup>针对橡胶-剪力钉群钉连接件开展了推出试



图 10 带橡胶栓钉失效模式<sup>[8]</sup>

验,探究其对改善群钉剪力件受力不均匀性的效果。谢宜琨等<sup>[11]</sup>对低温环境下栓钉连接件的破坏形态、荷载-位移曲线、抗剪承载力和抗剪刚度进行了研究。所使用的低温装置如图 11 所示。



图 11 低温保温装置<sup>[11]</sup>

汪劲丰等<sup>[12]</sup>通过 24 个栓钉连接件推出试验研究了栓钉长度对其抗剪承载能力的影响,结合其他学者的栓钉连接件推出试验结果,拟合出了考虑栓钉高度的栓钉承载能力计算公式。刘双等<sup>[13]</sup>依托一座六塔钢-混凝土组合梁矮塔斜拉桥对现浇桥面板的钢-混组合梁界面栓钉参数进行了敏感性分析。

### 1.2 PBL 剪力连接件与钢-混接头

Zhan 等<sup>[14]</sup>考虑了 PBL 连接件、栓钉连接件在有外部压力下推出试验的性能,以模拟如塔柱内有长期较大侧向压力时连接件的性能问题。Liu 等<sup>[15]</sup>研究了 PBL 的平面外剪切行为,以应对截面横向弯曲的情况。

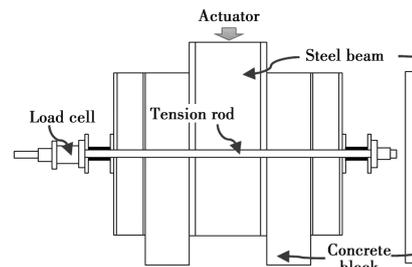


图 12 压剪推出试验<sup>[14]</sup>

Németh 等<sup>[16]</sup>对波形钢腹板与混凝土板之间的混凝土榫剪力键做了推出试验。通过在波形腹板的平板板段挖孔,再放入横向钢筋的方式形成混凝土榫剪力键。He 等<sup>[17]</sup>研究了有无钢槽约束下的 PBL 连接件性能,以模拟真实的斜拉桥钢-混混合段接头处的受力传递模型,探究了栓钉与 PBL 等多种连接件共同存在时的受剪模式。压剪推出试验示意图如图 13 所示。Zou 等<sup>[18]</sup>着重分析了受力传递与破坏模式,以及钢-混摩擦力的影响,钢-混接头如图 14 所示。

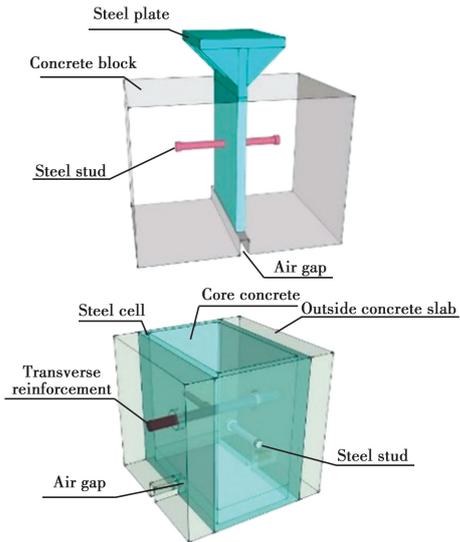


图 13 压剪推出试验<sup>[17]</sup>

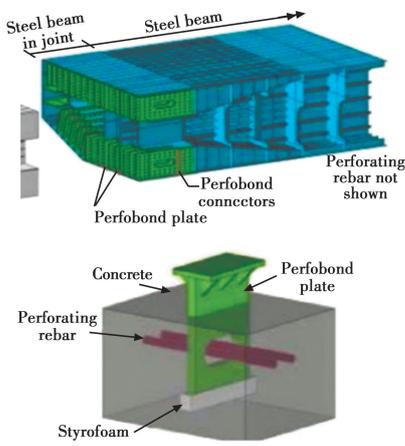


图 14 钢-混接头<sup>[18]</sup>

### 1.3 螺栓连接件

螺栓连接件相较于普通的焊接栓钉连接件,有易操作施工、快捷等优点,对于其作为抗剪连接件的性能也是广受关注,在桥梁加固和快速施工方面已有一些实际的研究成果,但抗剪性能仍需进一步细化探究。

Yang 等<sup>[19]</sup> 试验了十个螺栓抗剪连接件的推出试件,并研究了多螺栓抗剪连接件的布置形式、螺栓的间距以及钢筋混凝土板加固措施下连接件的剪切强度。Hosseini 等<sup>[20]</sup> 通过静载试验研究了螺栓剪力连接件的刚度、极限强度和延性;通过高周疲劳试验,得出了螺栓剪力连接件的 S-N 曲线,确定了这种剪力连接件的失效模式,认为螺栓连接器具有替代传统焊接栓钉的优势。Li 等<sup>[21]</sup> 研究了高强螺栓连接件(图 15)在腹板开孔的组合梁中的性能,试验了 6 个带腹板开口的高强度螺栓连接的组合梁(3 个带有节段混凝土板的试样,3 个带有整体混凝土板的试样),对失效模式、组合刚度、开口附近应变分布、螺栓公差等影响进行了分析。

### 1.4 连接件耐久性与退化性能

赵根田等<sup>[22]</sup> 通过试验模拟和数值模拟,研究了低周往复荷载作用下群钉连接件的栓钉直径、混凝土强度和加载方式

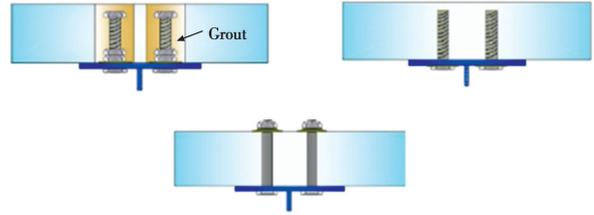


图 15 高强螺栓连接件<sup>[21]</sup>

对群钉剪力连接件抗剪承载能力的影响,总结了其破坏形态和刚度退化曲线。

荣学亮等<sup>[23]</sup> 基于考虑构件初始缺陷影响的断裂力学方法对受反复剪力作用的栓钉连接件的极限承载能力退化程度进行了研究,建立了栓钉连接件疲劳寿命分析模型,并通过试验确定了模型中的未知参数,提出了栓钉剩余承载能力与等幅循环荷载加载次数之间的计算方法。极限承载力退化规律如图 16 所示。张建东等<sup>[24]</sup> 利用外加电流对间断式开孔板 PBL 连接件进行快速锈蚀处理,并对锈蚀处理后的连接件进行了推出试验,探究锈蚀对其抗剪性能的影响。

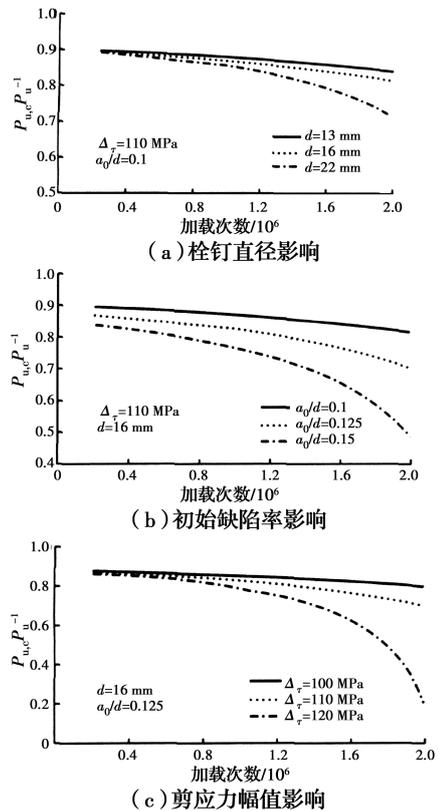


图 16 极限承载力退化规律<sup>[23]</sup>

## 2 钢-混组合梁研究进展

汇总 2020 年组合梁桥的相关研究文献,主要是组合梁式桥的相关研究,梁式桥中又以工字钢-混凝土组合梁桥为研究目标较多,其他如波形钢腹板组合梁桥、钢管混凝土桁架梁桥等较少。如图 17 所示,内容包括 6 个部分:1) 组合梁理论模型建立,主要指有限元理论的应用,以及自编程序的建立用于计算组合梁桥的力学特性;2) 组合梁组合效应与空间受力行为研究,主要包括组合梁弯曲性能、抗弯承载力、弯

扭,弯剪,弯-扭-剪等空间力学行为,其中,组合梁有组合板梁、波形钢腹板组合箱梁、钢管混凝土桁架梁等梁式桥;3)组合梁负弯矩区性能研究,包括了负弯矩区裂缝控制与负弯矩区组合梁刚度研究;4)组合梁动力特性研究,主要是考虑连接件柔性特性时组合梁的动力特性;5)组合梁劣化性能与检测加固研究,包括疲劳、腐蚀、高温等特殊环境下结构的退化性能,以及结构损伤后检测的相关研究;6)组合梁施工方法研究。

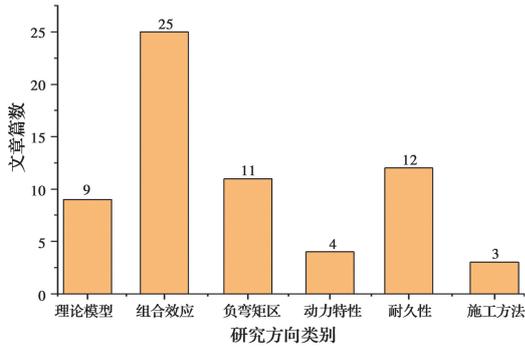


图 17 钢-混组合梁桥研究方向分类

### 2.1 组合梁理论模型

为避免复杂的三维建模,研究者们通过提出不同的组合梁单元模型,利用不同的静力分析方法,以达到高效率的求解,也有研究者通过现有的有限元软件,进一步简化建模程序,达到求解的目的,以求解组合梁的长、短期组合性能。

Das 等<sup>[25]</sup>考虑粘结滑移和轴弯剪共同作用,提出了一种新的组合梁单元,通过对材料实施耦合多轴本构关系以及新的稳定性准则,将 Ayoub 和 Filippou(2000)的双场混合变分原则扩展到考虑复合材料构件剪切问题中。Uddin 等<sup>[26]</sup>采用高阶梁理论(HBT)建立了一维有限元模型,以预测钢-混凝土组合梁的可靠响应。剪力连接件被理想化为连接钢梁与混凝土板连接的界面分布弹簧,HBT 在沿梁高度方向上提供了剪切应力的真实抛物线变化。Henriques 等<sup>[27]</sup>建立了基于广义梁理论(GBT)的时变有限元模型,考虑了混凝土徐变和截面变形(剪力滞和扭转)的影响,徐变的影响通过线性粘弹性定律和徐变函数的 Dirichlet 级数逼近进行建模,裂缝模型遵循标准的固定弥散型裂缝方法。Zhu 等<sup>[28]</sup>建立了每个节点具有 11 个自由度的曲线结合梁的理论模型,如图 18 所示。自由度包括钢与混凝土之间的纵向位移、横向位移、挠度、扭转角、翘曲角和双轴滑移。Lin 等<sup>[29]</sup>提出了一种基于配点法的组合梁静力分析方法,与解析法中复杂的微分方程推导不同,控制方程的解首先假定为具有待定系数的 Fourier 级数,然后通过满足控制方程和配置点处的边界条件来确定系数,这些配置点沿梁的跨度均匀分布,建立了无需进一步空间离散的梁模型。Feng 等<sup>[30]</sup>综合考虑波形钢腹板箱型组合梁(CBBCW)的特性,包括剪切滞后、界面滑移、剪切变形等因素,基于 Hamilton 原理开发了一种用于计算 CBCCW 固有频率的改进分析方法(IMA)。Lin 等<sup>[31]</sup>使用考虑了粘结和摩擦的多折线模式内聚区模型来描述钢-混结合界面的切线滑移和法向裂纹,通过 ABAQUS 中的用户定义

的单元子程序 UEL 实现了零厚度的粘合单元,并使用该方法对两跨连续箱形梁进行了数值模拟分析。Silva 等<sup>[32]</sup>使用顺序线性规划算法优化了具有部分相互作用的钢-混凝土组合梁的有限元模型。Ji 等<sup>[33]</sup>通过等效刚度原则,将组合梁的波形钢腹板等效为正交异性板(图 19),推导了等效后钢板的弹性模量和剪切模量,通过试验和有限元结果的对比,验证了等效的可行性。

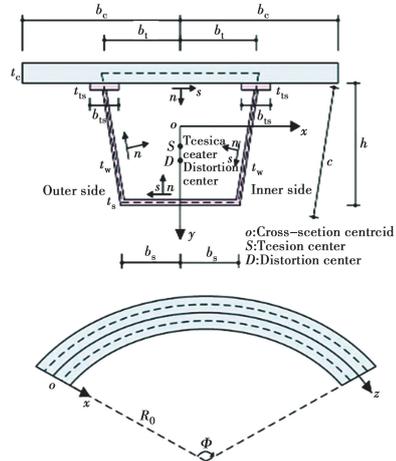


图 18 曲线结合梁<sup>[28]</sup>

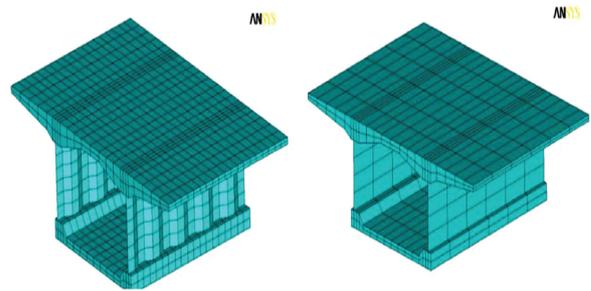


图 19 等效波形钢腹板<sup>[33]</sup>

### 2.2 组合效应与空间力学行为

组合结构梁由钢-连接件-混凝土组合而成,其受力形式除受到钢、混凝土自身截面、材料特性影响外,剪力连接件的配置、滑移等也使得组合梁的特性与其他结构显得不同,不仅需要研究者们研究组合梁的整体空间性能,还要对梁式结构中参与受力的剪力钉性能进行研究。

组合梁的抗弯性能一直是研究者们关注的重点,其与实际的工程需求息息相关,研究者们对不同的荷载类型、梁结构和截面尺寸、剪力件配置、剪力件连接种类等各种参变量下的组合梁抗弯性能进行了研究。Kalibhat 等<sup>[34]</sup>提出了一个简化的数值计算模型对钢混组合梁(SCC)梁进行建模,并进行了参数化研究,考虑了剪力连接度、跨度、载荷类型、栓钉连接件的分布、钢梁的几何形状、钢的屈服强度和混凝土等级。Hillhouse 等<sup>[35]</sup>考虑了集束和均布两种剪力钉布置形式与不同摩擦结合面,对组合梁进行了疲劳试验。采用压力应变片(PMS40)对剪力钉-混凝土之间的压力规律进行测量,从而得到剪力钉承受剪力的大小。Razzaq 等<sup>[36]</sup>通过三维有限元建模,确定了静载荷作用下简支斜交复合工字梁的弯矩和剪力分布系数,针对梁弯矩和剪力分布因子开发了两

组经验表达式,与 CHBDC (Commentary of the Canadian highway bridge design code) 设计指南进行了比较。Zhang 等<sup>[37]</sup>进行了梁试验和推出试验,以研究横向钢筋配筋率、抗剪连接度、纵向单排和双排栓钉以及栓钉直径对组合梁的纵向剪切性能和破坏形态的影响。李杨等<sup>[38]</sup>对 2 个两跨连续钢-混组合梁进行了静力加载试验(图 20),以研究钢-混凝土双面组合梁的基本性能。

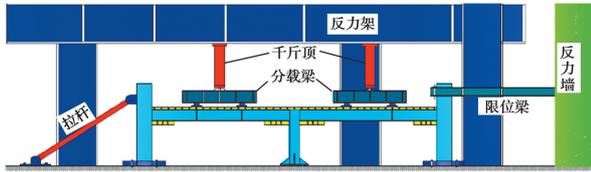


图 20 连续梁加载图<sup>[38]</sup>

在考虑连接件纵向抗剪对结构性能的作用时,当采用柔性连接件,研究者们也关注了组合梁的横向受力行为。Zhu 等<sup>[39]</sup>研究了考虑受压薄膜效应的组合箱梁中桥面板的横向性能(图 21),提出了一种计算不同边界条件下板承载能力的新方法。Kong 等<sup>[40]</sup>使用刚性梁法(RJG)评估了 AASHTO 公式,以获得多箱室组合梁的弯矩分配系数(LDF),并通过两次现场试验验证。通过参数分析,提出了一种由粗略和精细计算组成的遍历算法来获得桥梁的 LDF。Xiang 等<sup>[41]</sup>对已有的双工字钢梁桥梁进行了有限元分析,以研究其混凝土板在外部荷载下的横向弯矩分布,横向弯矩示意图如图 22 所示。提出了一种基于框架模型的横向矩分布系数的简化预测方法,还通过参数分析研究了几何参数和混凝土板开裂对横弯矩分布系数的影响。

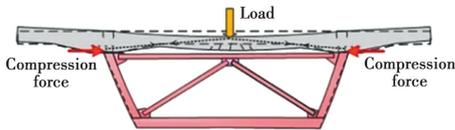


图 21 组合箱梁面板受压的膜效应<sup>[39]</sup>

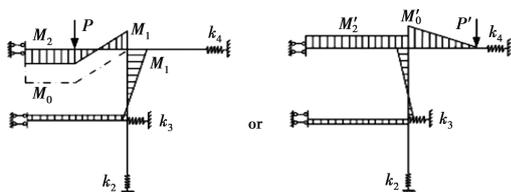


图 22 横向弯矩示意图<sup>[41]</sup>

李立峰等<sup>[42]</sup>通过建立一座 40 m 跨径组合桥梁的有限元模型对框内横向联结密布、框间横向联结的不等横向联结系钢-混组合梁桥的荷载横向分布效应展开研究,着重分析了不同桥面板厚度下横向联结数量对荷载横向分布的影响规律。闫林君等<sup>[43]</sup>采用杠杆原理法、刚性横梁法、修正刚性横梁法、铰接梁法和有限元法等多种方法,对 14、18 m 宽、不同跨径、不同主梁数及不同主梁高度的 6 种钢-混组合梁桥的荷载横向分布系数进行计算比较,探究了装配式多主梁钢-混组合梁桥的荷载横向分布规律。

对于引入新材料,尤其是高强钢、高性能混凝土,其结构的刚度、破坏形式、理论极限状态、承载力等性能优化的研

究,以及与传统普通混凝土之间的对比也是研究的热点。Zhu 等<sup>[44]</sup>对两种不同类型的混凝土(钢纤维混凝土, SFRC; 工程水泥基复合材料, ECC)和剪力连接件(抗剪栓钉; 抗拔不抗剪连接件, URSP)(图 23)的曲线组合箱梁进行了静载荷试验,建立了详细的有限元模型,以预测整体荷载-位移关系和应变结果。Liu 等<sup>[45]</sup>通过试验和有限元数值计算研究了 3 种组合梁的性能,包括钢-钢筋混凝土组合(S-RC)、钢-超高性能混凝土组合(S-UHPC)、钢-钢筋混凝土-超高性能混凝土组合(S-RC-UHPC)。Haber 等<sup>[46]</sup>对使用 UHPC 的两个创新预制桥面板-梁连接细节的性能进行了试验研究,变量包括空腔的几何形状、栓钉配置、定位销配置和定位销长度。Hu 等<sup>[47]</sup>通过试验和数值方法研究了钢-UHPC 组合梁中集束式栓钉的剪切特性和梁的抗弯性能。结果表明,钢-UHPC 组合梁的屈服荷载、极限荷载和弹性刚度分别比钢-NC 组合梁提高了 4.6%、11.3% 和 10.8%。



图 23 普通栓钉与抗拔不抗剪栓钉<sup>[44]</sup>

马印平等<sup>[48]</sup>对钢管混凝土组合桁梁的受弯性能进行了研究,给出了在单点荷载及双点对称荷载下简支组合桁梁各构件的效率系数,在此基础上推导出组合桁梁的破坏模式判定方法和受弯承载力的计算方法,并对此方法的精确性进行了检验。

除去较常研究的抗弯性能,对于组合梁的其他空间受力行为,包括非对称弯曲、扭转、弯扭、弯-剪-扭组合、不同的荷载模式、钢筋配置、剪力连接度设置等参数条件下,研究者们对其破坏形态和传力机理进行了研究。

Lin 等<sup>[49]</sup>对钢-混凝土组合双工字钢梁桥进行了静载试验,加载试验采用对称加载和非对称加载两种加载条件。Rossi 等<sup>[50]</sup>研究了钢-混凝土组合梁的横向屈曲(LDB)承载力。Suzuki 等<sup>[51]</sup>对工字钢-混结合梁同时受弯扭作用时的受力性能进行了试验研究(图 24),研究了其极限旋转强度、旋转刚度和极限剪切强度。

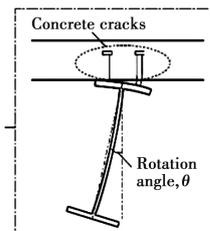


图 24 弯扭钢-混梁<sup>[51]</sup>

Soto 等<sup>[52]</sup>研究了箱型组合梁承受弯-剪-扭复合作用下的性能,试验观察到混凝土中的应变低于 Navier-Bernouilli

平面应变假设所预期的应变;着重分析了混凝土板在抗剪、抗扭中的作用,采用组合截面广义 Cardiff 模型确定了更精确的极限抗剪承载能力。Zhu 等<sup>[53-54]</sup>对 6 个华夫板(图 25)的组合梁(SUCBWS)进行了试验和有限元分析,研究了 SUCBWS 的剪弯受力机理,研究参数包括:钢材强度、肋高与华夫板厚度比、横向配筋率以及肋的布置,提出了 SUCBWS 抗弯承载力的计算方法;研究了组合梁的典型挠曲、剪切模式以及极限行为。

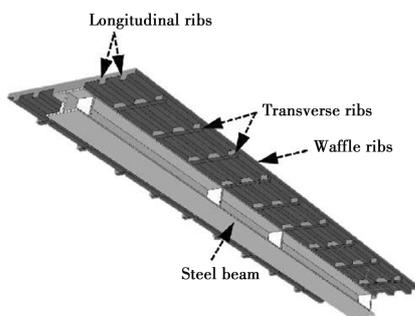


图 25 UHPC 华夫板<sup>[53-54]</sup>

上述研究的主体结构多以工字钢组合梁为主,且连接件多为栓钉连接件,对于其他组合梁,如带有波形钢腹板的组合箱梁、钢管混凝土翼缘组合梁,以及其他连接件的梁式试验研究相对较少。Cong 等<sup>[55]</sup>研究了变截面波形钢腹板组合箱型梁 CBGCSW 在弹性阶段的剪力滞效应,提出了一种理论计算方法以改进钢筋模拟方法,评估了钢筋数量对改进的钢筋模拟方法计算精度的影响。基于所提出的理论方法,对 CBGCSW 与相应的混凝土箱形梁的剪力滞效应进行了比较,并得出了宽跨比、梁高比、梁高变化曲线等各种参数的影响。Chen 等<sup>[56]</sup>对带有波形板和下桁梁连接的顶板混凝土、底板钢管混凝土组合箱形梁(图 26)的抗弯性能进行了数值分析研究。Zhang 等<sup>[57]</sup>对顶板为混凝土板,底板为平板,腹板为波形钢板的组合梁的扭转力学行为进行了试验研究。Anko ğlu 等<sup>[58]</sup>提出了一种钢-混凝土组合系统,使用槽钢剪力连接件结合混凝土面板和 I 型钢,关注了直剪切试验以确定连接件的抗剪能力,并对结合梁进行试验,认为实际使用中,面板可以由采用纵向和横向接头的多个块形成,并用接缝连接。Suwaed 等<sup>[59]</sup>研究了带有抗摩擦的螺栓剪力连接件(FBSC)组合梁性能,对 9.0 m 长的预制钢混凝土组合梁进行了带有六个循环荷载的四点弯曲试验,与焊接螺栓剪力钉不同,FBSC 可以快速提供刚度,测量挠度、滑移等,同时还包括失效模式、有效宽度、裂纹拓展等其他研究结论。



图 26 钢管混凝土组合箱形梁<sup>[56]</sup>

## 2.3 组合梁负弯矩区性能

组合梁的负弯矩区性能一直是研究热点,负弯矩区混凝土容易开裂,对于裂后的刚度退化以及耐久性问题,研究者们做了很多工作,以探究如剪力连接件形式、连接件分布、配筋等不同参数下,组合梁的初始开裂荷载、裂缝拓展模式、负弯矩区性能优化等。

其中最直接的方法是使用高性能混凝土材料改善混凝土板的开裂性能,从而提高抗裂性能。Zhu 等<sup>[60]</sup>对 UHPC-钢组合梁进行了负弯矩弯曲试验研究,对比了不同的负弯矩区接头配置。刘新华等<sup>[61]</sup>用超高性能混凝土代替传统普通混凝土来解决钢-混组合梁负弯矩区混凝土桥面板开裂问题,提出了建议的 UHPC 裂缝计算公式,给出了建议的混凝土接口形式和纵向铺设长度。Qi 等<sup>[62]</sup>研究了钢-钢纤维混凝土(UHPFRC)组合梁,并与普通组合梁进行了比较。Zhang 等<sup>[63]</sup>研究了负弯矩下采用螺栓(SU-B)和栓钉(SU-S)两种连接件的钢-UHPC 组合梁的抗裂性、弯曲性能和变形特性,对结构的破坏形态、裂纹发展、曲率变化等进行了详尽的分析。负弯矩区破坏形式如图 27 所示。

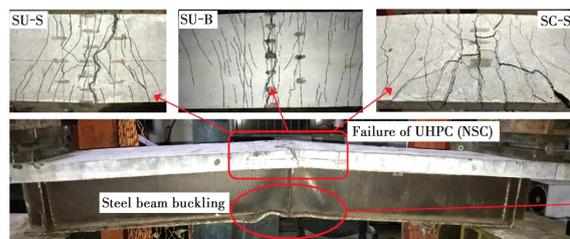


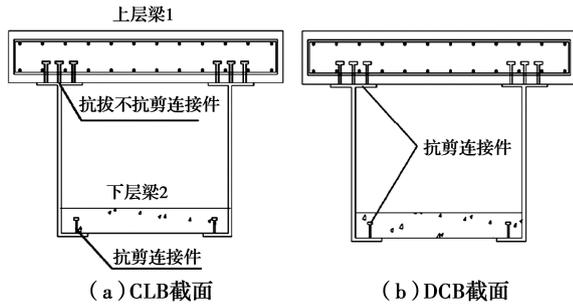
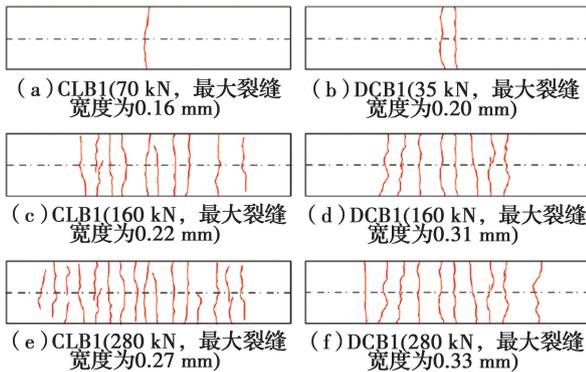
图 27 负弯矩区破坏形式<sup>[63]</sup>

Fan 等<sup>[64]</sup>对应用工程水泥基复合材料(ECC)的钢-混组合梁负弯矩区性能进行了研究。对具有不同混凝土板材料和配筋率的 3 根梁进行了弯曲试验,建立了一个实用的四参数纤维连接模型来描述不同 ECC 材料的应变硬化行为。

在其他方面,如精细化计算模式、优化结构形式、优化计算程序等,Zhou 等<sup>[65]</sup>通过试验和数值分析,研究了组合梁负弯矩作用下的竖向抗剪性能。Kalibhat 等<sup>[66]</sup>提出了一种简化的数值程序来研究连续钢混组合梁(SCC)的整体性能。段树金等<sup>[67]</sup>通过试验梁的反向加载试验对钢-混凝土组合与叠合梁(CLB)的受弯性能进行了研究,并将其与钢-混凝土双面组合梁(DCB)进行对比,如图 28、图 29 所示。莫时旭等<sup>[68]</sup>通过分析受载状态下填充式窄幅钢-混组合梁裂缝分布、发育过程和宽度等特征研究了配筋率、抗剪连接度和钢箱梁混凝土填充形式对钢-混组合梁抗裂能力及裂缝开展状况的影响。Wang 等<sup>[69]</sup>讨论了装配整体式预应力混凝土组合梁(AMS-PCCB)在负弯矩下的性能。研究了预应力、混凝土桥面宽度、抗剪连接件类型和桥面加工工艺对 AMS-PCCB 抗负弯矩承载力的影响。

## 2.4 组合梁动力特性

组合梁的动力特性一方面影响着行车的舒适性,一方面影响着结构的安全性。当各方向产生较大振动时,不仅影响行车安全,同时,冲击系数过大可能导致结构的应力水平,位

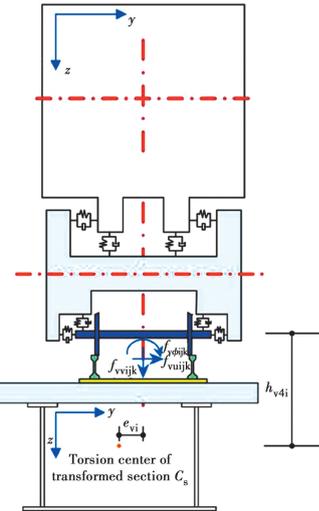
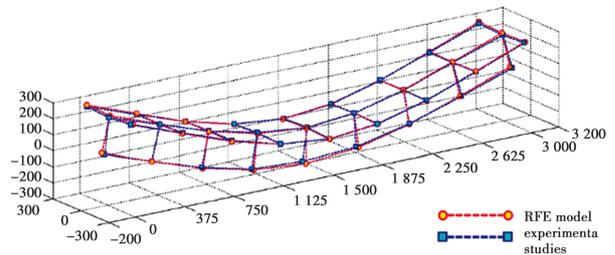
图 28 叠合与组合形式<sup>[67]</sup>图 29 破坏形式<sup>[67]</sup>

移水平超出预期。动力特性受界面刚度、结构与材料特性、移动荷载自身等多种因素影响。

Zhu 等<sup>[70]</sup>提出了考虑滑移和剪力滞的车-钢-混凝土组合桥耦合系统的有限元数值模型,如图 30 所示。研究了滑移和剪力滞对钢-混凝土组合桥梁系统动力响应的影响,并与既有结果进行了对比验证。严战友等<sup>[71]</sup>基于建立的两跨钢-混组合连续梁桥的有限元模型,通过改变移动荷载的速度、载重、跨数、轴数和剪力钉位置等参数,分析了不同工况下两跨钢-混组合连续梁铺装层的挠度、应力和冲击系数等相应变化。Zhang 等<sup>[72]</sup>研究了具有大 U 肋的钢-UHPC 组合桥面板的动力特性,利用橡胶锤的冲击对模态参数进行了评估;对比了传统的正交异性钢板和钢-混凝土组合桥面板,研究了三者的动力特性;关注板中的振动传递特性,提出了两种减少振动的对策并验证。Abramowicz 等<sup>[73]</sup>开发了用于确定基本动力特性的复合梁空间刚性模型,其包含自然振动的频率、自然振动模式和频率响应函数。采用已开发的识别算法可用于估算模型的刚度参数,包括连接刚度、混凝土的弹性、确定性参数可用于模型。自振频率对比见图 31。项贻强等<sup>[74]</sup>为了探究体外预应力束对钢-混组合小箱梁自振频率的影响,基于 Timoshenko 梁理论,考虑群钉受力机理,推导了单折线型布筋、双折线型布筋和直线布筋 3 种情况下钢-混组合单箱梁结构的自振特性计算公式,并进行了有限元验证,进一步分析了预应力大小和预应力束位置对其自振频率的影响。

## 2.5 组合梁劣化性能与检测加固

组合梁的劣化性能表现在服役阶段刚度退化、承载能力下降等几个方面,主要使用环境有疲劳、腐蚀、高低温、冻融、

图 30 车桥模型<sup>[70]</sup>图 31 自振频率对比<sup>[73]</sup>

日照等劣化环境,尽管现在研究者们和设计者们多关注结构的全寿命周期性能,但是由于结构部件退化的随机性、多耦合作用下试验难实现等因素,相关研究较少。

Pham 等<sup>[75]</sup>研究了不同受损形态的双钢箱梁桥在集中荷载作用下(轻载、重载、循环荷载)的冗余承载力。其中,组合桥面板如图 32 所示。项贻强等<sup>[76]</sup>引入考虑栓钉初始缺陷的基于断裂力学的承载力退化模型及经典钢梁、混凝土板承载力退化模型,结合考虑不同疲劳荷载后退化为非完全抗剪结构的剩余极限承载力计算模型,提出了常幅疲劳荷载下组合梁剩余承载能力的预测方法,如图 33 所示,并通过 5 组试验梁数据验证了此方法的准确性。

图 32 组合桥面板<sup>[75]</sup>

Han 等<sup>[77]</sup>通过建立平衡方程考虑分段浇筑连续组合梁的长期徐变效应,采用龄期调整的有效模量法的代数方程对徐变效应进行了描述,并在有限元中采用蠕变效应与理论结果进行了对比。Liu 等<sup>[78]</sup>采用 Ansys 蠕变率法(RCM)分析

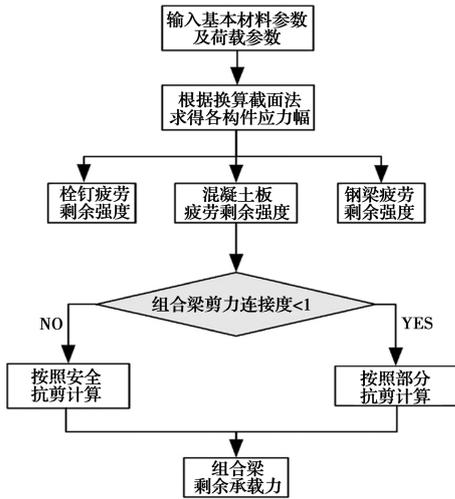


图 33 剩余承载力计算<sup>[76]</sup>

为了推出试验下混凝土板、钢梁和双头螺栓的长期应力分布。周大为等<sup>[79]</sup>对日照作用下大型钢管混凝土拱桥的温度效应进行了研究。Zhang 等<sup>[80]</sup>研究了真实桥梁的温度场,开发并验证了阴影识别算法和仿真模型,以用于未来研究中确定复合桥的温度作用特征,测量和计算结果之间的一致性证明了模型在模拟桥梁长期热负荷和阴影效应方面的准确性(图 34)。Zhou 等<sup>[81]</sup>研究了预应力结合梁(PCCBs)的抗火性能,对临界温度、临界挠度、预紧力损失等进行了探讨。Kang 等<sup>[82]</sup>提出了一种结构火灾破坏指数,该指数反映了由于高温引起的材料强度变化在钢混凝土组合梁破坏评估中的适用性,火灾破坏指数使用了高温下的材料强度。Zhang 等<sup>[83]</sup>利用瞬态有限元分析程序研究了组合箱梁在火灾暴露与荷载作用下的行为,其抗火性能如图 35 所示。

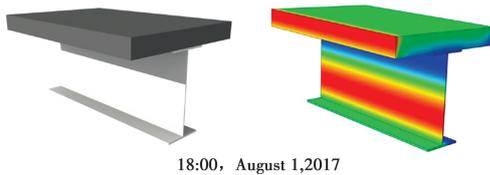


图 34 组合梁阴影效应<sup>[80]</sup>

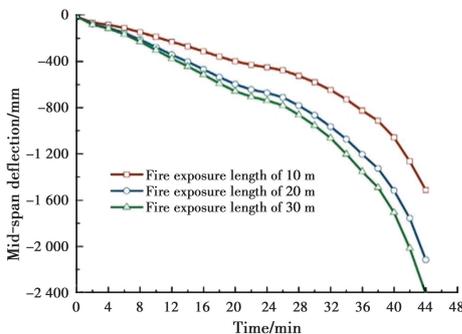


图 35 抗火性能<sup>[83]</sup>

康俊涛等<sup>[84]</sup>利用有限元软件以一座跨径为 40 m 的钢混组合连续梁桥为研究对象,模拟了不同落石速度、落石质量、接触面积和碰撞位置下,山区落石撞击下钢-混组合梁桥上部结构的动力响应。McMullen 等<sup>[85]</sup>建立了 4 个足尺试验来

评估 UHPC 加固钢板梁的方法(图 36),对全高修补和半高修补的情况进行了分析。同时,确定了焊接螺栓的位置,为快速修补钢板梁桥提供了理论支持和修补思路。

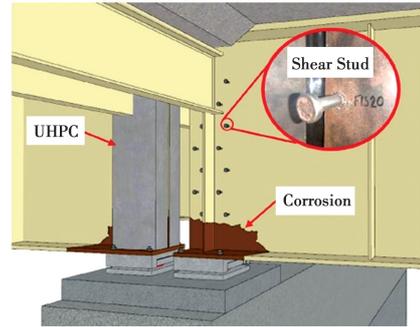


图 36 钢板梁加固<sup>[85]</sup>

### 2.6 组合梁施工方法

Wang 等<sup>[86]</sup>、He 等<sup>[87]</sup>、Zhou 等<sup>[88]</sup>提出了一种针对波形钢腹板组合梁桥的新型异步挂篮施工方法,见图 37。总体而言,新型的异步施工方法减小了挂篮自重,扩大了施工空间,缩短了工期,提高了效率。

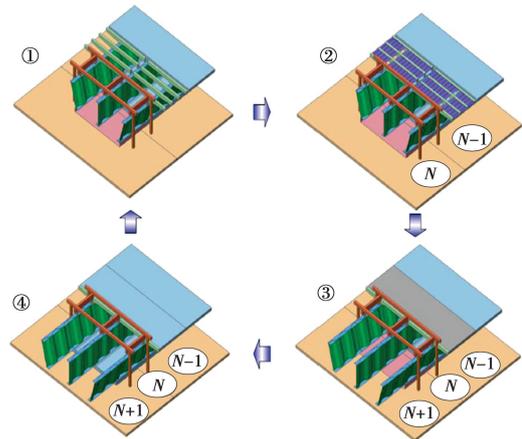


图 37 钢板梁加固<sup>[88]</sup>

## 3 结语与展望

通过对 2020 年学者们在钢-混组合梁桥方面所作研究的综述,主要分为两大类:一类是对抗剪连接件力学性能的研究;一类是钢-混组合梁力学行为研究。研究者们对高性能混凝土材料下剪力件性能、不同力学边界条件下剪力件力学性能、新型改进连接件性能以及连接件自身抗剪性能的耐久与性能退化等方面研究较多;对于钢-混组合梁构件,主要集中在工字形钢-混凝土板组合梁,其他如组合箱梁、桁架组合梁形式研究相对较少,其中波形钢腹板组合箱梁相比其他形式而言研究较多,这与中国的发展是密不可分的。在所汇总的研究中,研究者们对组合梁所做的工作着眼于 6 个方面,其中最关注的仍然是组合结构的静力行为、极限承载力特征,对不同配置下梁的正、负弯矩抗弯性能的探究,以及多种受力状态下结构破坏形式与承载力研究;其次是对负弯矩区性能的研究,以及裂缝控制等相关研究,也包括高性能混

混凝土材料在这方面的应用;然后汇总了组合梁理论模型相关研究,组合梁不同剪力度下的动力特性研究;对组合梁结构性能退化的研究较少,检测加固研究也较少;同时也汇总了对波形钢腹板组合箱梁悬臂施工方法的几点探究的相关文献。

与 2019 年相比,汇总文献仍以剪力连接件和组合梁式桥为研究对象,延续 2019 年钢-混组合结构桥梁的研究热点方向,仍以新结构——新型组合结构和连接件的开发;新材料——高性能混凝土、钢、其他纤维材料的应用;新方法——精细分析方法的建立、多阶段结构模型分析、多耦合荷载作用的力学行为研究;新环境——复杂环境效应,时变结构特性分析等作为重要研究热点与方向。随着钢-混结合梁桥的建成并投入使用,其结构健康服役的重要性日渐突出。由于结构性能劣化、服役环境变化、车辆冲击振动等内外因素共同作用下,桥梁结构受力状态会发生变化,性能逐步退化,给桥梁结构健康服役状态的判断和预知控制带来了极大困难,亟需开展系统的基础研究。对复杂环境和荷载耦合模式下钢-混组合桥梁结构全寿命周期服役性能演化过程的感知与评估成为必然要求。提升钢-混组合桥梁的耐久性是桥梁基础设施建设的核心技术,从材料性能自然退化、结构原生缺陷劣化和服役环境对损伤的激发等方面入手,研究钢-混结合梁桥服役性能经时演变特征和机理及智能感知和诊断方法,会为该类结构在桥梁工程中的应用提供科技保障。

#### 参考文献:

- [1] TONG L W, CHEN L H, WEN M, et al. Static behavior of stud shear connectors in high-strength-steel-UHPC composite beams [J]. *Engineering Structures*, 2020, 218: 110827.
- [2] ZHAO Q, DU Y, PENG Y F, et al. Shear performance of short channel connectors in a steel-UHPC composite deck [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2020, 20(1): 300-310.
- [3] 林明畅, 李新平, 郑小红, 等. 钢-UHPC 组合梁新型胶栓连接件受力研究[J]. *低温建筑技术*, 2020, 42(3): 48-50.
- [4] 邵旭东, 张瀚文, 李嘉, 等. 钢-超薄 UHPC 轻型组合桥面短钢筋连接件抗剪性能研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(1): 39-51.
- [5] 刘永健, 吴浩伟, 封博文, 等. 车轮荷载作用下双工字钢组合梁横桥向焊钉拉拔效应[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(2): 1-10.
- [6] 安然, 王有志, 周磊, 等. 剪力钉连接件拉剪复合作用试验及计算模型[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(3): 42-52.
- [7] DENG K L, ZENG X Z, KURATA M, et al. Damage control of composite steel beams using flexible gel-covered studs [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(3): 04019216.
- [8] XU X Q, ZHOU X H, LIU Y Q. Behavior of rubber-sleeved stud shear connectors under fatigue loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 244: 118386.
- [9] ZHUANG B Z, LIU Y Q, WANG D L. Shear mechanism of Rubber-Sleeved Stud (RSS) connectors in the steel-concrete interface of cable-pylon composite anchorage [J]. *Engineering Structures*, 2020, 223: 111183.
- [10] 黄彩萍, 黄志祥, 游文峰, 等. 橡胶-剪力钉组合剪力连接件力学性能试验[J]. *土木工程与管理学报*, 2020, 37(3): 85-90.
- [11] 谢宜琨, 方国强, 张宁, 等. 低温下栓钉连接件的抗剪性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2020, 50(9): 86-91.
- [12] 汪劲丰, 张爱平, 王文浩. 栓钉高度对栓钉连接件抗剪性能的影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(11): 2076-2084.
- [13] 刘双, 聂玉东, 张铭, 等. 钢-混组合梁斜拉桥现浇混凝土桥面板关键设计技术研究[J]. *公路*, 2020, 65(7): 359-363.
- [14] ZHAN Y L, YIN C, LIU F, et al. Pushout tests on headed studs and PBL shear connectors considering external pressure [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(1): 04019125.
- [15] LIU Y Q, WANG S H, XIN H H, et al. Evaluation on out-of-plane shear stiffness and ultimate capacity of perfobond connector [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 167: 105850.
- [16] NÉMETH G, KOVÁCS N, JÁGER B, et al. Analysis of the effect of concrete strength in embedded shear connectors of steel-concrete corrugated web composite bridges through push-out tests [J]. *ce/papers*, 2019, 3(5/6): 128-137.
- [17] HE S H, FANG Z, MOSALLAM A S, et al. Behavior of CFSC-encased shear connectors in steel-concrete joints: Push-out tests [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(4): 04020015.
- [18] ZOU Y, DI J, ZHOU J T, et al. Shear behavior of perfobond connectors in the steel-concrete joints of hybrid bridges [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 172: 106217.
- [19] YANG T, LIU S Y, QIN B X, et al. Experimental study on multi-bolt shear connectors of prefabricated

- steel-concrete composite beams [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 173: 106260.
- [20] HOSSEINI S M, MAMUN M S, MIRZA O, et al. Behaviour of blind bolt shear connectors subjected to static and fatigue loading [J]. *Engineering Structures*, 2020, 214: 110584.
- [21] LI L Q, ZHANG H F, ZHOU D H. Experimental study of high-strength bolt connected composite beams with web openings [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2021, 45(1): 1-10.
- [22] 赵根田, 侯智译, 高鹏, 等. 拟静力作用下群钉连接件抗剪性能研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(7): 201-213.
- [23] 荣学亮, 黄侨, 赵品. 考虑疲劳损伤的栓钉连接件抗剪承载力研究[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(4): 88-93, 101.
- [24] 张建东, 毛泽亮, 叶遇春, 等. 锈蚀后间断式开孔钢板连接件的抗剪性能[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(5): 600-607.
- [25] DAS D, AYOUB A. Mixed formulation of inelastic composite shear beam element [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(10): 04020222.
- [26] UDDIN M A, ALZARA M A, MOHAMMAD N, et al. Convergence studies of finite element model for analysis of steel-concrete composite beam using a higher-order beam theory [J]. *Structures*, 2020, 27: 2025-2033.
- [27] HENRIQUES D, GONÇALVES R, SOUSA C, et al. GBT-based time-dependent analysis of steel-concrete composite beams including shear lag and concrete cracking effects [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 150: 106706.
- [28] ZHU L, WANG J J, LI M J, et al. Finite beam element with 22 DOF for curved composite box girders considering torsion, distortion, and biaxial slip [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, 20(4): 1-19.
- [29] LIN J P. Static analysis of composite beams using collocation technique by considering linear and nonlinear partial interactions [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2020, 146(2): 04019125.
- [30] FENG Y L, JIANG L Z, ZHOU W B. Improved analytical method to investigate the dynamic characteristics of composite box beam with corrugated webs [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2020, 20(1): 194-206.
- [31] LIN J P, WU Z B, YIN Y, et al. Analysis of shear connector of steel-concrete composite box-girder bridge considering interfacial bonding and friction [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2020, 20(2): 452-463.
- [32] SILVA A R, DAS NEVES F D A, SOUSA J B M. Optimization of partially connected composite beams using nonlinear programming [J]. *Structures*, 2020, 25: 743-759.
- [33] JI W, LUO K, ZHANG J W. Analysis of continuous PC box girder bridges with CSWs by using equivalent computational model [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2020, 90(12): 2609-2619.
- [34] KALIBHAT M G, UPADHYAY A. Numerical study on the deformation behavior of steel concrete composite girders considering partial shear interaction [J]. *Structures*, 2020, 23: 437-446.
- [35] HILLHOUSE B, PRINZ G S. Effects of clustering and flange surface friction on headed shear stud demands [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(6): 04020026.
- [36] RAZZAQ M K, SENNAH K, GHRIB F. Moment and shear distribution factors for the design of simply supported skewed composite steel I-girder bridges due to dead loading [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(8): 04020060.
- [37] ZHANG J, HU X M, FU W J, et al. Experimental and theoretical study on longitudinal shear behavior of steel-concrete composite beams [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 171: 106144.
- [38] 李杨, 任沛琪, 丁井臻, 等. 钢-混凝土双面组合作用梁基本力学性能试验研究与数值模拟[J]. *工程力学*, 2020, 37(5): 82-93.
- [39] ZHU Y J, WANG J J, NIE X, et al. Structural performance of slabs in composite box girder considering compressive membrane action [J]. *Engineering Structures*, 2020, 212: 110457.
- [40] KONG S Y, ZHUANG L D, TAO M X, et al. Load distribution factor for moment of composite bridges with multi-box girders [J]. *Engineering Structures*, 2020, 215: 110716.
- [41] XIANG D, LIU Y Q, YANG F. Numerical and theoretical analysis of slab transverse-moment distributions in twin-girder crossbeam composite bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(3): 04020004.
- [42] 李立峰, 程子涵, 冯威, 等. 不等横向联结系对钢-混组合梁桥荷载横向分布的影响研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(11): 2832-2839.
- [43] 闫林君, 张经纬, 罗奎. 装配式多主梁钢-混组合梁桥

- 的荷载横向分布研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(3): 59-69.
- [44] ZHU L, WANG J J, LI X, et al. Experimental and numerical study of curved SFRC and ECC composite beams with various connectors [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 155: 106938.
- [45] 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.
- [46] HABER Z B, GRAYBEAL B A, NAKASHOJI B. Ultimate behavior of deck-to-girder composite connection details using UHPC [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(7): 04020038.
- [47] HU Y Q, MELONI M, CHENG Z, et al. Flexural performance of steel-UHPC composite beams with shear pockets [J]. *Structures*, 2020, 27: 570-582.
- [48] 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.
- [49] LIN W W, LAM H, YODA T. Experimental study on steel-concrete composite twin I-girder bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(1): 04019129.
- [50] ROSSI A, NICOLETTI R S, DE SOUZA A S C, et al. Numerical assessment of lateral distortional buckling in steel-concrete composite beams [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 172: 106192.
- [51] SUZUKI A, ABE K, KIMURA Y. Restraint performance of stud connection during lateral-torsional buckling under synchronized in-plane displacement and out-of-plane rotation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(4): 04020029.
- [52] SOTO A G, CALDENTEY A P, PEIRETTI H C, et al. Experimental behaviour of steel-concrete composite box girders subject bending, shear and torsion [J]. *Engineering Structures*, 2020, 206: 110169.
- [53] ZHU J S, GUO X Y, KANG J F, et al. Numerical and theoretical research on flexural behavior of steel-UHPC composite beam with waffle-slab system [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 171: 106141.
- [54] ZHU J S, WANG Y G, YAN J B, et al. Shear behaviour of steel-UHPC composite beams in waffle bridge deck [J]. *Composite Structures*, 2020, 234: 111678.
- [55] ZHOU C, LI L F, WANG J Q. Modified bar simulation method for shear lag analysis of non-prismatic composite box girders with corrugated steel webs [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 155: 106957.
- [56] CHEN Y Y, DONG J C, TONG Z J, et al. Flexural behavior of composite box girders with corrugated steel webs and trusses [J]. *Engineering Structures*, 2020, 209: 110275.
- [57] ZHANG Z, TANG Y, LI J, et al. Torsional behavior of box-girder with corrugated web and steel bottom flange [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 167: 105855.
- [58] ARİKOĞLU P, BARAN E, TOPKAYA C. Behavior of channel connectors in steel-concrete composite beams with precast slabs [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 172: 106167.
- [59] SUWAED A S H, KARAVASILIS T L. Demountable steel-concrete composite beam with full-interaction and low degree of shear connection [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 171: 106152.
- [60] ZHU Y P, ZHANG Y, HUSSEIN H H, et al. Flexural study on UHPC-steel composite beams with joints under negative bending moment [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(10): 04020084.
- [61] 刘新华, 周聪, 张建仁, 等. 钢-UHPC 组合梁负弯矩区受力性能试验[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(5): 110-121.
- [62] QI J N, CHENG Z, WANG J Q, et al. Flexural behavior of steel-UHPFRC composite beams under negative moment [J]. *Structures*, 2020, 24: 640-649.
- [63] ZHANG Y, CAI S K, ZHU Y P, et al. Flexural responses of steel-UHPC composite beams under hogging moment [J]. *Engineering Structures*, 2020, 206: 110134.
- [64] FAN J S, GOU S K, DING R, et al. Experimental and analytical research on the flexural behaviour of steel-ECC composite beams under negative bending moments [J]. *Engineering Structures*, 2020, 210: 110309.
- [65] ZHOU X H, MEN P F, DI J, et al. Experimental investigation of the vertical shear performance of steel-concrete composite girders under negative moment [J]. *Engineering Structures*, 2021, 228: 111487.
- [66] KALIBHAT M G, UPADHYAY A. Numerical modeling of continuous steel concrete composite girders considering cracking of concrete [J]. *Structures*, 2020, 27: 1313-1323.
- [67] 段树金, 王园园, 梁显, 等. 负弯矩作用下钢-混凝土组合与叠合梁静力性能试验研究[J]. *铁道学报*, 2020, 42(9): 120-126.
- [68] 莫时旭, 周梓滔, 李君谊. 不同参数条件对充填式窄幅

- 钢箱-混凝土组合连续梁裂缝的影响[J]. 建筑结构, 2020, 50(2): 101-106, 75.
- [69] WANG Y H, YU J, LIU J P, et al. Experimental study on assembled monolithic steel-prestressed concrete composite beam in negative moment [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 167: 105667.
- [70] ZHU L, WANG H L, HAN B, et al. Dynamic analysis of a coupled steel-concrete composite box girder bridge-train system considering slip and shear-lag [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 157: 107060.
- [71] 严战友, 王旭蕊, 李向国, 等. 移动荷载作用下两跨钢-混组合连续梁桥面铺装动力响应[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33(4): 1-9.
- [72] ZHANG X, LI X, LIU R, et al. Dynamic properties of a steel-UHPC composite deck with large U-ribs: Experimental measurement and numerical analysis [J]. Engineering Structures, 2020, 213: 110569.
- [73] ABRAMOWICZ M, BERCZYŃSKI S, WRÓBLEWSKI T. Modelling and parameter identification of steel-concrete composite beams in 3D rigid finite element method [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20(4): 1-24.
- [74] 项贻强, 邱政, 何百达, 等. 具有体外预应力索的快速施工群钉式钢-混组合小箱梁自振特性分析[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 100-110.
- [75] PHAM H V, YAKEL A, AZIZINAMINI A. Experimental investigation of redundancy of twin steel box-girder bridges under concentrated loads [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 177: 106440.
- [76] 项贻强, 何百达. 考虑疲劳损伤的栓钉式组合梁剩余承载力计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(9): 33-39.
- [77] HAN C X, ZHANG J C, ZHOU D H, et al. Computing creep secondary internal forces in continuous steel-concrete composite beam constructed through segmented pouring [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(3): 04020003.
- [78] LIU R, FENG Z Q, YE H D, et al. Stress redistribution of headed stud connectors subjected to constant shear force [J]. International Journal of Steel Structures, 2020, 20(2): 436-451.
- [79] 周大为, 邓年春, 石拓, 等. 大型钢管混凝土拱桥温度梯度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 2013-2020.
- [80] ZHANG C Y, LIU Y J, LIU J, et al. Validation of long-term temperature simulations in a steel-concrete composite girder [J]. Structures, 2020, 27: 1962-1976.
- [81] 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.
- [82] KANG M S, KANG J W, KEE S H, et al. Damage evaluation of composite beams under fire conditions [J]. International Journal of Steel Structures, 2020, 20(6): 1996-2008.
- [83] ZHANG G, KODUR V, SONG C J, et al. A numerical model for evaluating fire performance of composite box bridge girders [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 165: 105823.
- [84] 康俊涛, 章豪. 落石撞击下钢混组合梁桥上部结构动力响应分析[J/OL]. 中山大学学报(自然科学版), 2020. DOI: 10.13471/j.cnki.acta.snus.2020.04.21.2020B038
- [85] MCMULLEN K F, ZAGHI A E. Experimental evaluation of full-scale corroded steel plate girders repaired with UHPC [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(4): 04020011.
- [86] WANG D, WANG L, TANG C. Mechanical characteristic analysis of corrugated steel webs using asynchronous construction technology [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(1): 185-196.
- [87] HE J, LI X, LI C X, et al. A novel asynchronous-pouring-construction technology for prestressed concrete box girder bridges with corrugated steel webs [J]. Structures, 2020, 27: 1940-1950.
- [88] ZHOU M, LIU Y Y, WANG K J, et al. New asynchronous-pouring rapid-construction method for long-span prestressed concrete box girder bridges with corrugated steel webs [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2020, 146(2): 05019021.

(编辑 颜永松)