

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.218



超高性能混凝土(UHPC)在桥面板体系中的应用 2020 年度研究进展

夏嵩, 陈柳, 杨旭

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:超高性能混凝土(UHPC)与正交异性钢桥面板的组合是近年来桥梁工程中新材料、新构造研究的典型范例。UHPC 桥面板的刚度较大,可以有效减小桥面板中的局部变形,从而明显降低正交异性钢桥面板中的疲劳应力幅,改善其抗疲劳性能。从新构造、剪力连接件性能、组合桥面板基本力学性能、组合桥面板疲劳性能及 UHPC 材料与构件力学性能等几个方面对 UHPC-正交异性钢桥面板组合体系的研究进展进行综述,其内容主要为 2020 年以来发表的工作,部分兼及更早的研究成果。

关键词:超高性能混凝土;正交异性钢桥面板;组合结构桥梁;疲劳损伤

中图分类号:U441 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0175-10

State-of-the-art review of advances in the implementation of UHPC-OSD system in 2020

XIA Song, CHEN Liu, YANG Xu

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

Abstract: Ultra High Performance Concrete (UHPC) is combined with the Orthotropic Steel Deck (OSD) in a lot of projects nowadays. That is a typical example of the implementation of new materials and new structures in bridge engineering. Benefitting from its high stiffness, UHPC slab can evidently reduce the local deformation of OSD. In this way, we can greatly reduce the fatigue stress amplitude and the fatigue resistance is increased. In the present work, we reviewed the research advances on the composite UHPC-OSD system from five aspects: the new structures, the shear connectors, the basic static behaviors of the composite deck, the fatigue performance of the composite deck and the basic mechanical properties of UHPC or UHPC members. Most of the concerned literature was published in 2020 or 2021. However, some works reported in a few other recent years were still mentioned in the present work.

Keywords: UHPC; orthotropic steel deck; composite bridge; fatigue damage

交通系统是现代文明的血脉,在中国国民经济高速发展的 40 余年间,交通事业的飞跃式发展在其中起到了至关重要的作用。如今交通土建事业将迎来新的大发展时期,这个时期的土木建筑结构将与过往的年代有着本质的不同。新材料与信息技术的应用、智能化发展都将成为新的发展趋势,桥梁结构在这一发展潮流中也概莫能外,UHPC 等新材料在桥面结构中的应用就是这种趋势的具体体现之一。

传统正交异性钢桥面体系是由纵向加劲肋和横隔板支

撑正交异性钢桥面板,然后在正交异性钢桥面板上再铺装沥青混凝土磨耗层。这种体系的强度-自重比相对较高,施工较为简便,因此在现代大跨度桥梁桥面系中十分常见。然而,此类桥面结构中却始终普遍存在正交异性钢桥面的疲劳与桥面铺装易损等问题。这些问题主要来源于桥梁第二、第三体系的刚度不足、局部变形偏大这一现象。UHPC 是一种刚度与强度较大,韧性和耐久性较好的材料。若将其用作刚性铺装参与承受桥面交通荷载,可以较好地解决钢桥面板疲劳

收稿日期:2021-08-02

基金项目:国家自然科学基金(Q110120Q02002)

作者简介:夏嵩(1974-),男,博士,副教授,主要从事组合结构桥梁研究,E-mail:xiasong@swjtu.edu.cn.

破坏以及桥面铺装易损坏等问题^[1]。目前较为普遍的做法是在正交异性钢桥面板上铺装一层较薄(相对传统沥青混凝土铺装而言)的 UHPC 层,然后再在其上铺设沥青混凝土或其他材料制成的磨耗层。由于 UHPC 层一般较薄,所以此类桥面结构的自重一般明显低于传统的正交异性钢桥面板+沥青混凝土磨耗层的结构。本文所述主要基于 2020 和 2021 年的中文与英文文献,兼及部分 2019 年文献,对钢-UHPC 组合桥面板结构的若干相关研究方向进行总结。

1 钢-UHPC 组合桥面板结构与工艺的创新

装配式桥梁结构是现代桥梁工程技术的重要发展方向之一。装配式桥梁的构件在工厂环境下预制,质量易得到保证,养护条件好,收缩徐变变形较小,生产效率高,现场安装工期较短。自南京第五长江大桥大规模采用以燕尾榫形的湿接缝连接的装配式 UHPC 桥面板后^[2],装配式 UHPC 桥面板逐渐得到重视。桥面板与钢结构之间、桥面板与桥面板之间的可靠连接问题成为该领域内的研究热点。

赵灿晖等^[3]在南京长江第五大桥的相关工作基础之上进一步开发了一种新的全预制的桥面板体系。在这种桥面板体系中,他们不再采用湿接缝连接相邻的 UHPC 桥面板,而是在预制桥面板时预留了特殊的连接结构,该结构由带栓钉的钢板或预应力钢筋组成。

张清华等^[4]提出了一种新型装配式 UHPC 华夫型上翼缘组合梁。UHPC 华夫型上翼缘由顺桥向预制板单元通过现浇湿接缝连接而成,其纵、横肋均采用上宽下窄的梯形截面,以方便脱模。在工字钢与 UHPC 华夫型上翼缘相连处,设置了剪力槽。张清华等分别研究了槽内采用组合榫连接件或剪力钉两种情况。研究表明,装配式 UHPC 华夫型上翼缘组合梁在有效解决传统钢-混凝土组合梁负弯矩区的抗裂问题的同时可实现预制装配式施工,在连续梁桥中具有较好的适用性。

白午龙等^[5]发现 UHPC 层中的密布剪力键和钢筋网不仅会增加施工和养护维修难度,还可能造成浇筑不密实的后果,因此提出解决方案:在钢桥面板和 UHPC 层之间采用局部剪力键与环氧粘结的方式连接,并通过设置变形缝等构造措施消除较高的温度、较大的收缩应力。这种方式降低了施工难度,保证了 UHPC 层的成型质量。为了解决在钢桥面板上现浇 UHPC 造成的养护困难、施工工期长等问题。白午龙等针对采用这种新型桥面铺装的组合梁进行了疲劳试验研究。试验结果表明:采用新型桥面铺装的组合梁结构的薄弱部位为环氧黏结层,疲劳试验时首先发生脱层,且破坏形式为脆性破坏;不同应力水平下,组合梁在疲劳试验过程中没有明显的刚度退化,且在经历疲劳试验之后仍然具有相当高的抗弯承载力,说明该新型 UHPC 桥面铺装具有良好的抗弯性能和抗疲劳能力。

惠清高速公路麻埔停车区跨线桥为首座全预制装配式钢-UHPC 组合梁桥,其负弯矩区的 UHPC 预制板与钢结构

的连接采用“T”形接缝方案。李志峰等^[6]以该桥为背景建立了全桥有限元模型进行了钢梁和 UHPC 层应力分析、组合梁稳定性分析、承载能力极限状态和正常使用极限状态分析,各项验算都满足规范要求,可知 UHPC 可很好的适用于组合结构,形成的装配式钢-UHPC 组合梁可满足工程设计要求。

冯峥等^[7]设计了 4 种桥面板方案:矮胖型带肋板方案、瘦高型带肋板方案、矩形平板方案、华夫板方案。其利用 ABAQUS 软件建立有限元模型,进行桥面板影响线及静承载能力分析,得出了以下结论:带肋桥面板方案板肋下缘纵向应力的影响线峰值最大,各方案桥面板的主拉应力值较大区域均集中在跨中肋(面)板下底缘以及与纵隔板相接处的面板顶缘;截面形式对桥面板的抗弯承载能力影响较大。瘦高型带肋板方案相较于矮胖型带肋板方案抗弯承载能力更优;相较于矩形平板方案,其板肋下缘、面板上下缘应力均得到显著减小;相较于华夫板方案,桥面板最大主拉应力值相差不多,华夫板横肋的存在对减小带肋桥面板板肋下缘的最大主拉应力几乎没有帮助。

钢-UHPC 组合桥面板不仅对新建桥梁意义重大,在修复在役正交异性桥面板方面的应用也已成为一种趋势。然而,现场浇筑的 UHPC 需要长达 72 h 的高温养护,不仅影响交通,并且养护时的升温降温极易对钢结构的安全使用造成不利影响。为改善这一问题,陈李峰等^[8]研发出一种免蒸养 UHPC,从抗压强度和干燥收缩对免蒸养 UHPC 及蒸养 UHPC 进行对比,发现免蒸养 UHPC 早期强度发展迅速,满足施工要求,28 d 收缩为 340 μe ,略高于蒸养 UHPC。此外,对免蒸养 UHPC 钢桥面铺装试验段的跟踪监测未发现免蒸养 UHPC 有何不良影响,因此,免蒸养 UHPC 可应用于钢桥面的修复工程中。

2 组合桥面体系中剪力连接件的性能研究

UHPC 与钢桥面板的有效连接是充分发挥两种材料性能的前提。常规结构中最常用的钢-混凝土剪力连接件是剪力钉。剪力钉的抗剪承载力与剪力钉材料的抗拉强度、混凝土强度及剪力钉的几何参数有关。在一般钢-混凝土组合结构中,为了限定剪力钉的破坏形态,要求剪力钉的长径比不应小于 4:1。但在钢-UHPC 桥面板中,由于 UHPC 层一般较薄,所以往往无法保证满足这样的剪力钉长径比要求。正因如此,在钢-UHPC 桥面板中一般采用短剪力钉或其他剪力连接件。

张清华等^[4]在提出前述装配式 UHPC 华夫型上翼缘组合梁时,采用了组合榫型连接件来连接 UHPC 华夫板与钢结构。该类连接件的刚度与承载力均高于剪力钉,且采用组合榫型剪力槽时华夫型上翼缘纵肋底缘拉应力更小,钢混界面纵横向滑移处于弹性阶段。

田壮等^[9]针对在建的佛山富龙西江 UHPC 桥面板组合梁斜拉桥,建立斜拉桥的空间有限元模型,并结合已有的钢-UHPC 组合结构的推出试验,确定了该斜拉桥的栓钉抗剪刚

度,并对栓钉进行简化,同时考虑滑移效应对斜拉桥成桥阶段的主梁受力影响,分别研究了栓钉抗剪刚度折减以及UHPC桥面板收缩徐变对主梁的受力影响。分析表明:成桥阶段的滑移量均符合规范的限值;刚度折减0.5倍时,滑移量满足要求且受力变化不大,可以减少栓钉布置,提高经济性。

Tong等^[10]为了研究高强度钢-UHPC组合梁剪力钉连接件的抗剪性能,制作了6个推出试验,分为3组在静载荷下进行推出试验。考察参数包括剪力钉直径(13 mm/19 mm)和剪力钉布局(单剪力钉/剪力钉群)。由于试验中采用的UHPC板厚达150 mm,故剪力钉的长度均取为80 mm,长径比超过4.0。试验结果表明,所有高强度钢-UHPC推出试件的破坏模式均为剪力钉杆破坏。剪力钉直径对其抗剪性能有显著影响。直径为19 mm的剪力钉抗剪承载力和抗剪刚度分别比直径为13 mm的剪力钉大82.4%和46.0%,剪力钉的布置对其抗剪承载力影响不大,但会降低单个剪力钉的剪切刚度;高强度钢对剪力钉的抗剪性能影响不显著,与普通混凝土相比,UHPC可以提高剪力钉的抗剪承载力和抗剪刚度,但由于其高弹性模量,会降低剪力钉的延性。通过建立理论模型,提出了单剪力钉和组剪力钉布置的高强度钢-UHPC推顶试件剪力钉抗剪刚度的计算公式。计算结果与实验结果吻合较好。研究认为,产生群钉效应的主要原因是剪力钉间距过短导致混凝土抗剪能力低下。

由于剪力连接件的焊接缺陷、意外过载、疲劳等原因导致的剪力钉损伤可能会降低组合梁的使用性能,甚至威胁结构安全,因此Qi等^[11]对嵌入在UHPC中的含损伤剪力钉的静力性能进行了有限元模拟,参数包括损伤程度和损伤位置。研究表明:当损伤位置为距剪力钉根部 $2/3d$ (d 为剪力钉直径)时,即使剪力钉的面积显著减小,剪力钉的抗剪强度对损伤程度也不敏感,然而当损伤位置距离剪力钉根部的距离增大时,剪力钉抗剪面积增大,破坏截面发生倾斜,且不垂直于剪力钉高度方向,导致抗剪强度和抗剪刚度的降低幅度减小;继而提出了考虑损伤剪力钉抗剪强度退化的折减系数计算方法。结果表明,该方法较好地预测了具有初始损伤的剪力钉的抗剪强度。

石广玉等^[12]采用Schwartz-Neuman交替法建立钢-UHPC组合结构中剪力钉焊缝表面裂纹的三维断裂力学模型,研究焊接剪力钉疲劳寿命的高效评估方法和剪力钉的疲劳寿命预测,并与钢-UHPC组合结构的推出疲劳试验结果进行对比,结果表明:在钢-UHPC组合结构的层间剪力作用下,钢-UHPC组合结构的剪力钉焊缝裂纹属于I型、II型和III型复合的混合型裂纹,且裂纹呈非平面扩展;剪力钉的疲劳破坏位置主要取决于剪力钉焊缝2个焊趾处初始裂纹相对于裂纹驱动力的方位和裂纹尺寸之比;基于剪力钉焊缝表面裂纹三维扩展得到的剪力钉疲劳寿命预测值与推出试件疲劳试验给出的剪力钉疲劳寿命实测结果吻合良好,证明基于Schwartz-Neuman交替法的表面裂纹三维扩展可高效、可靠地用于钢-UHPC组合桥面板中剪力钉的疲劳寿命评估。

3 钢-UHPC组合桥面体系在静载作用下的基本力学性能研究

邵旭东等^[13]为研究钢-UHPC轻型组合桥面结构的裂缝特征,并评估现有规范公式对钢-UHPC轻型组合桥面结构裂缝宽度计算的适用性,综合考虑配筋率、保护层厚度、UHPC层厚度和栓钉间距4个因素,对40个钢-UHPC组合板进行正交试验。试验中采用Rafiee的建议,以裂缝宽度达到0.05 mm时的荷载作为开裂荷载^[14]。试验结果表明:未配筋钢-UHPC组合构件裂缝数量较少,且开裂后裂缝发展较快,密集配筋钢-UHPC组合构件裂缝细而密;减小保护层厚度可以提高构件开裂应力,且配筋率较大时减小保护层厚度开裂应力提高幅度更大,UHPC层厚度对其影响不大。

彭学理等^[15]为提高铁路钢桥面铺装的使用寿命,保护钢桥面免受道砟的磨损和雨水的侵蚀,对铁路钢-UHPC组合桥面铺装体系进行研究。以沪通长江大桥主航道桥为背景工程,制作带UHPC铺装层的正交异性钢桥面板单U肋梁模型,采用机械加压法装置进行抗水渗性能试验。试验结果表明,UHPC组合桥面体系在无裂缝时抗渗性能满足使用要求,可有效保护钢板免受雨水侵蚀,带裂缝的组合桥面运营过程中裂缝会逐渐闭合防止雨水进一步渗透,具有较强的抗渗能力储备。

刘新华等^[16-17]在负弯矩区桥面板采用UHPC代替传统普通混凝土,对其抗裂性能展开了研究,并设计3根不同负弯矩区连接形式的钢-UHPC组合连续梁,每根连续梁是由两片钢梁通过焊接其上翼缘板及部分腹板的方式连接在一起而形成的。采用了一种独特的转角加载方式进行全过程静力加载试验,获得转角、临界开裂荷载、应变等关键试验数据;基于ABAQUS的混凝土塑性损伤模型建立试验梁的非线性有限元模型,并对试验过程进行模拟。研究表明:UHPC能提高负弯矩区组合梁的开裂荷载,且裂缝间距较小,可明显抑制混凝土裂缝的发展,解决负弯矩区的开裂问题;根据3根试验梁的弯矩-位移曲线试验结果与仿真结果对比,可看出试验梁SCB-3承载能力较高,安全储备大,建议采用;桥面板拉应力集中在负弯矩区桥面连续处,从降低造价角度看,可将UHPC仅布置在拉应力超过普通混凝土抗拉强度的区域,建议负弯矩区UHPC纵向铺设长度为0.1倍跨径。

王立国等^[18]为了满足对自重敏感的大跨桥梁钢桥面的翻修与加固需求,提出采用超短栓钉作为连接件的钢-超薄UHPC轻型组合桥面结构(简称“新超薄体系”)。其通过新超薄体系负弯矩试验,研究关键设计参数对超薄UHPC层抗裂性能的影响。试验结果表明:当UHPC最大裂缝宽度小于0.15 mm时,裂缝宽度的增长近似呈线性,在钢筋屈服以后,裂缝宽度迅速增大;配筋率和钢筋直径对名义开裂应力的影响较大。并以某特大跨径悬索桥为工程背景,进行整体和局部有限元分析,论证了方案应用于实际工程的可行性。计算结果表明:新超薄体系的自重与常规60 mm厚的钢桥面铺装

基本持平,主缆和吊索内力变化小于 3.0%;钢桥面(OSD)各典型疲劳细节的应力幅值降低了 10.1%~52.0%,且均小于 200 万次疲劳强度;UHPC 层中最大拉应力为 8.4 MPa,远小于试验得到的名义开裂应力,具有足够的安全储备。

卜一之等^[19]基于平截面假定和双折线 UHPC 拉伸本构模型,提出了能够描述 UHPC 结构层实际应力分布的截面应力法,用于计算钢-UHPC 桥面板在纯弯曲作用下的开裂荷载。通过 2 组 4 个模型试验并结合相关文献试验结果对所提出的计算方法进行了验证。研究表明:利用截面应力法能够较为准确地描述受纯弯曲作用的钢-UHPC 组合板在即将开裂时的截面实际应力分布情况,计算给出的开裂荷载与实测值比值平均为 0.95;UHPC 的开裂强度仅取决于其自身材料特性,钢-UHPC 组合板开裂荷载则与其结构体系有关,后者的提高不会影响前者;UHPC 层在可视裂缝出现时的应变硬化高度是组合效应及配筋对其约束的直观体现;减小纵筋保护层厚度或提高配筋率能够提高 UHPC 应变硬化区域高度,提高钢-UHPC 组合板抗弯性能。

李传习等^[20]为研究钢-UHPC 胶结组合桥面系的横向受弯性能,采用 2 种方案对 20 块钢-UHPC 胶接组合板进行了静力正/负弯矩加载试验。他们分析了不同参数对其界面与承载性能的影响,研究表明:在负弯矩作用下,若能保证胶黏层界面性能,则适当提高配筋率可提高该组合板面系的横向抗弯拉性能;现浇板纯弯段裂纹分布较密集,配筋率越高裂纹越密,而预制板裂纹较稀疏。正弯矩作用下的弹性极限与开裂荷载较负弯矩作用下的更大。因超高性能混凝土和钢板组合板之间的界面黏结强度较大,在 2 种界面处理方式下,组合板达到屈服时,其界面仍未脱离。组合板的开裂强度为 8.9~22.2 MPa,整体大于 6.41 MPa,可满足实际工程要求。

Zhu 等^[21]通过试验研究了带节点的钢-UHPC 组合梁在负弯矩作用下的抗弯性能,为 UHPC 组合梁翼缘板的分析和设计提供依据。为了研究在负弯矩作用下组合梁的性能,通过对含/不含节点(即首尾相连的两片梁的梁端结合点)的组合梁的力学性能进行试验研究;对钢筋和钢梁的试验观测结果、裂缝形态、破坏模式、开裂荷载、刚度、延性和应变进行了测量和计算,以了解钢-UHPC 组合梁的横向节点的力学性能。试验结果表明:钢-UHPC 组合梁在承载能力和裂缝宽度控制方面具有较好的力学性能,相对普通混凝土桥面体系而言也具有较高的弹性刚度和抗裂能力;对钢-UHPC 组合梁而言,若其内部存在节点则会降低其刚度与抗裂能力;T 型截面的节点相对矩形截面的节点而言具有更高的刚度与抗裂能力;不同节点构型对屈服载荷的影响不显著,对极限荷载也仅有较轻微的影响。

朱劲松等^[22-23]为研究钢-UHPC 华夫板组合梁在静载作用下的竖向抗剪性能,对组合梁试件进行了静力试验,主要研究了华夫板平板厚度、肋高、翼板宽度、剪跨比等参数的影响。通过分析试件破坏形态、荷载-跨中挠度曲线、应变分布规律,研究了不同参数下试件的破坏模式和承载能力。结果

显示:由于掺入了钢纤维,在剪跨区 UHPC 翼板出现多条细而密的斜裂缝同时开展的现象,并在板肋交界处裂缝角度发生改变,可见钢纤维“桥接作用”提高了组合梁抗剪承载力与延性;增加华夫板等效高度和翼板宽度都有助于提高组合梁极限承载力,但增加等效高度降低了其变形能力;考虑 UHPC 抗剪作用时所得剪应变分布、各点剪应变数值及最大剪应变位置等方面均与试验曲线吻合更好,表明组合梁抗剪计算时 UHPC 的作用不可忽略。试验结果表明:钢梁腹板仅占抗剪能力的 50%左右,UHPC 翼板对组合梁的竖向抗剪承载力有较大的贡献;剪跨比对钢-UHPC 华夫板组合梁的破坏形态(受弯破坏或受剪破坏)具有重要影响。此外,他们还建立了钢-UHPC 组合梁的极限抗弯和抗剪理论模型。

4 组合桥面体系疲劳性能研究

周尚猛^[24]采用低收缩免蒸养 UHPC 设计制作单 U 肋和多 U 肋组合桥面试验梁进行静力试验,研究了低收缩免蒸养 UHPC 层的抗裂性能和疲劳性能。结果表明该组合桥面 UHPC 的开裂应力达 10.79 MPa,极限荷载约为设计荷载的 14 倍,并且降低了活载作用下的钢桥面板的疲劳应力幅,提高了结构的疲劳性能。

詹健等^[25]采用有限元法研究了钢-UHPC 组合桥面系统的疲劳性能。他们主要计算了在疲劳荷载作用下的各疲劳细节应力幅,相关疲劳细节如图 1 所示。詹健等采用多参数分析的方法研究了 UHPC 板厚度、横隔板厚度和剪力钉间距对各疲劳细节的影响。计算结果表明:细节 4 是组合桥面板系统的控制细节;UHPC 板厚度增大时各疲劳细节应力幅均降低;横隔板厚度加大时,细节 4、5 的应力幅大幅度下降,但细节 3 的应力幅则略有上升;减小剪力钉间距可以明显降低细节 3~5 的应力幅。

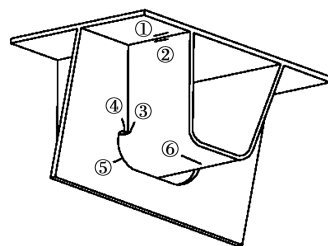


图 1 詹健等所关注的典型疲劳细节^[25]

秦世强等^[26]以军山长江大桥为背景,对比了冷拌环氧沥青(ERE)钢桥面铺装和钢-UHPC 组合桥面铺装的疲劳性能。军山长江大桥加固改造方案中,上游侧采用 ERE 铺装,下游侧采用钢-UHPC 组合桥面。选取对称位置,同时采集上游侧和下游侧各疲劳易损细节的应变时程数据。通过比较发现,钢-UHPC 侧正交异性桥面板各疲劳易损细节的等效应力幅值均小于 ERE 侧,且峰值应力明显降低,表明钢-UHPC 组合桥面刚度更大,抗疲劳性能更好。

Chen 等^[27]以江苏宜兴范蠡大桥为工程背景,对两片承受负弯矩的多跨钢-UHPC 组合桥面板进行了试验研究,试验时以作动器在边跨加载。疲劳试验过程中,纵向裂缝首先

在 U 肋与横隔板间焊缝下方焊趾附近的 U 肋上出现,然后向 U 肋两端方向延伸。此后将在 UHPC 层与正交异性钢桥面板之间的界面上出现开裂现象,造成两种材料的分离。发生界面开裂时,界面上的剪力钉在靠近其根部处被剪断,而剪力钉剪断处的 UHPC 也会发生局部破坏。

Yuan 等^[28]结合有限元分析对某钢-UHPC 组合桥面板足尺试件进行了疲劳试验研究。试验的第一阶段采用无铺装的正交异性钢桥面板进行疲劳加载。当加载到大约 383 万周循环时,在 U 肋与顶板相连的焊趾处开始出现裂缝。此后停止加载,裂缝被焊接修复,然后在正交异性钢桥面板上浇筑 UHPC 层。试验的第二阶段,疲劳加载将在新得到的钢-UHPC 组合桥面板上进行。在第二阶段疲劳加载过程中,结构中的应力幅逐渐加大,但应力始终没有超出材料的疲劳极限。直到循环 500 万周时,仍然没有疲劳裂缝出现。

顾萍等^[29]为了研究钢-UHPC 组合桥面的疲劳裂纹类型和发展规律,分析了疲劳裂纹对组合桥面板结构受力特性的影响,依据实桥主桥钢桥面的构造参数设计制作了 2 个足尺试验模型,进行静载、疲劳试验,并与有限元计算结果进行对比分析得知:有限元模型计算的各测点应力和位移与实测值基本吻合;纵肋与横隔板连接焊缝处容易发生疲劳裂纹,所有试件均在此处发现了裂纹;纵肋腹板裂纹较小时,对钢桥面受力性能影响较小,随着纵肋腹板裂纹、UHPC 与钢桥面板脱层扩展,试件刚度显著下降,最大挠度增量达 33%;纵向配筋不同的两个构件其受力特性和疲劳性能差异不大,建议 UHPC 层中纵向钢筋可按直径 10 mm 密配筋布置。

凌立鹏等^[30]以武汉军山大桥改造工程为背景,开展了钢-UHPC 组合桥面移动车辆加载试验研究。试验加载过程分为改造前、后两个阶段,车辆移动加载过程中,采用单向应变片对钢桥面板典型疲劳裂纹细节的控制应变进行观测。合桥面移动车辆加载试验研究。试验结果表明,改造后各处疲劳细节控制测点的应力幅均降至改造前的 1/2~1/10。若大桥原钢桥面板抗疲劳设计寿命按 5 年计,改造后有望解决其顶板疲劳开裂问题。

霍宁飞等^[31]考虑铺装体系焊接造成的残余应力和各种缺陷以及运营车辆的快速增长、车型变化和超载车辆等因素的综合影响造成的焊缝疲劳裂纹问题,以华北地区某桥为基础,选取五轴标准疲劳荷载车和三联轴轮载及超载工况,研究了钢-UHPC 桥面铺装体系的肋-面板焊缝疲劳影响,得出最不利加载位置下 UHPC 铺装层肋-面板焊缝裂纹处应力峰值。通过分析得出结论:超载对纵肋-面板焊缝细节处应力影响较大,以标准荷载车双轴加载时作为参照,超载车双轴加载时最大拉应力增大 2.2 倍,超载车三轴加载时最大拉应力增大 1.8 倍,这对钢桥疲劳寿命有较大影响,会明显加速钢桥面板的疲劳损伤,很大程度上减少肋-面板焊缝裂纹处的疲劳寿命;采用新型钢-UHPC 轻型组合桥面板后,肋-面板焊缝细节处应力峰值及应力幅大幅降低,拉应力平均降幅达 70%,对应肋-面板焊缝细节处的疲劳寿命将大幅增加,

基本可消除纵肋-面板焊缝开裂的风险。

裴必达^[32]通过条带模型静力加载实验数据与 3 种有限元模型(完全滑移模型、部分滑移模型和无滑移模型)分析结果的对比,确定了适用于疲劳分析的模型,在此基础上建立了枫溪大桥有限元分析模型。通过与实测结果的对比,证实了有限元模型的正确性,同时还分析了不同车速和多车辆等因素对轻型组合桥面板的动力响应的影响,确定了车速和多车辆等因素对疲劳评估的影响很小。基于实桥测试数据和子模型分析技术,采用了名义应力法、热点应力法以及等效结构应力法对钢-UHPC 轻型组合桥面板结构常见疲劳细节进行了疲劳评估,并给出了 3 种方法详细的评估流程以及相应的细节评估结果;对比分析了 3 种疲劳评估方法的适用性,并针对不同的细节推荐了不同的疲劳评估方法;同时还推荐了一种用于弧形切口自由边疲劳评估的方法。

Abdelbaset 等^[33]通过试验研究了钢-UHPC 组合桥面易疲劳破坏细节部位热点应力的影响,制作并测试了 3 个全尺寸肋-面板焊接连接试件,采用车轮荷载加载,可考虑到腹板面内和面外变形的影响,同时还进行了有限元分析,在对有限元模型与实验结果进行验证的基础上进行了参数化研究,以研究主要影响热点应力的关键结构参数的影响。试验结果表明:车轮荷载作用下,由于横隔板的内面和面外变形,横隔板切口周围的应力略高于 U 形肋上考虑位置的热点应力;应用 60 mm 厚 UHPC 层有效地降低了试件考虑位置 26%~83% 的热点应力。参数化研究结果表明:一方面,增加 UHPC 层厚度可以显著提高桥面刚度,从而有效降低考虑点的热点应力;另一方面,增加 UHPC 弹性模量对考虑位置热点应力的影响较小,其影响可以忽略不计。

5 UHPC 材料及构件基本性能研究

5.1 UHPC 基本力学性能

邵旭东、李芳园等^[34-35]对同一纤维体积掺量(2%)下不同纤维长径比(59~100)、不同纤维类型(端钩型与平直型)及无钢纤维的 UHPC 试件分别开展了轴拉试验与四点弯拉试验。根据拉伸全曲线上的初裂点、峰值点及其他几个特征点,定量地分析了 UHPC 拉伸过程中的轴拉性能与弯拉性能,并对 2 种拉伸试验下的初裂强度与峰值强度进行了对比与分析。最终得到一些比较有意义的结论:随着一定范围内的纤维长径比的增加,与轴拉试验相比,UHPC 试件的拉伸强度和拉伸韧性在弯拉试验中提升得更明显;两种类型纤维试件在轴拉应变达到 3 000 $\mu\epsilon$ 时的应力均高于 7 MPa;有无钢纤维对 UHPC 的拉伸力学性能具有不同程度的裂后增强效果,弯拉受力模式优于轴拉受力模式;在 UHPC 结构设计中可用考虑尺寸效应修正后的弯拉初裂强度来估算轴拉初裂强度。

吴晓龙等^[36]对应变强化型 UHPC(具有塑性力学定义中的硬化段,钢纤维体积掺量较高)和应变软化型 UHPC(无硬化段)进行了单调和循环荷载作用下的直接拉伸试验。试验发现:应变强化型 UHPC 基体开裂后进入多点微裂纹分布的

应变强化段,达到极限抗拉强度后进入单缝开裂的应变软化段;同时,应变强化 UHPC 的极限抗拉应变平均值高于 HRB400 钢筋的屈服应变,能够有效保证钢筋屈前 UHPC 与钢筋的协同工作性能,对提升配筋 UHPC 结构构件的承载力和变形能力具有重要的意义。对于应变软化型 UHPC,基体开裂后直接进入单缝开裂的应变软化段。另外,循环荷载下 2 种类型 UHPC 的轴拉应力-应变曲线包络线与单调荷载下的应力-应变曲线基本一致。

王俊颜等^[37]在 UHPC 基础上,降低水胶比、添加轻质细骨料制成超高性能轻质混凝土(Ultra-high Performance Lightweight Concrete, UHPLC)并分 4 种加载条件(循环应变分别是 $200\ \mu\epsilon$ 、 $500\ \mu\epsilon$ 、 $1\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $1\ 500\ \mu\epsilon$)研究了其循环拉伸力学性能。试验结果表明:不同加载条件的 UHPLC 的循环拉伸应力应变曲线的包络线与单调拉伸应力应变全曲线具有较高的重合度;循环加载曲线的残余应变、加载刚度、卸载刚度均反映了桥接微裂纹的纤维脱黏状态,残余应变越大,说明纤维的脱黏长度越长,将导致 UHPLC 的加载、卸载刚度降低。UHPLC 的循环加载刚度退化率与累积残余应变的关系符合幂函数关系,退化率越低材料刚度退化现象越严重。

Qiu 等^[38]以配筋率、纤维取向、纤维化学处理方式作为试验变量设计了 UHPC 直接拉伸对照试验,测试得到无筋 UHPC、配筋 UHPC 的轴向拉伸应力-应变曲线和荷载-挠度曲线。试验结果表明:配筋 UHPC 在钢筋断裂后出现拉伸失效现象,试件从宏观裂缝处断开,周围紧密分布细微裂纹;纵向钢筋加入后可提高试件开裂刚度,抑制裂缝增长,同时增加配筋率可显著提高屈服荷载和承载力,但对开裂荷载和预开裂刚度影响较小。另外,对比钢纤维随机分布的 UHPC,钢纤维平行加载方向分布的 UHPC 可显著提高试件开裂刚度、屈服荷载并抑制裂缝宽度的增长。

方志等^[39]为明确常温和低温环境下 UHPC 材料弯拉性能的不同特征,对 $-20\ ^\circ\text{C}$ 和 $20\ ^\circ\text{C}$ 两种温度下 UHPC 的弯曲性能进行了研究。结果表明,随着温度的降低,UHPC 的强度和弹性模量均有所提高,且强度的提高幅度更为显著。与 $20\ ^\circ\text{C}$ 时的相应值相比, $-20\ ^\circ\text{C}$ 时 UHPC 的立方体抗压强度、棱柱体抗压强度、劈裂抗拉强度、弯拉开裂强度、弯拉极限强度和轴压弹性模量分别提高了 7.3%、8.0%、10.8%、13.7%、9.0% 和 4.1%;随着温度的降低,UHPC 材料的变形性能和延性性能总体上有所降低。

聂洁等^[40]研究了钢纤维体积掺量、长径比、形状、同形及异形纤维混掺对 UHPC 力学性能的影响,通过相关实验得到了 UHPC 抗压强度、能量吸收、及弯曲应力挠度曲线,并开展了最佳纤维混掺比例的研究。结果表明:纤维掺量每增加 0.5%,抗压强度平均增幅为 5.79%,弯曲韧性指数和能量吸收则先增后减(临界掺量为 3.5%)。随着纤维长径比的增大,UHPC 抗压强度、弯曲韧性指数、能量吸收值基本呈递增趋势;相同长径比时,端钩形纤维 UHPC 弯曲韧性指数优于平直形纤维,抗压强度、能量吸收低于平直形纤维。同形纤维混掺 UHPC 抗压强度稍低于对应的单掺纤维,弯曲韧性、

能量吸收总体上优于单掺试件;异形纤维混掺 UHPC 抗压强度稍低于单掺试件,弯曲韧性、能量吸收绝大多数优于单掺纤维。纤维混掺最佳组合为 18 mm 平直形 16 mm 端钩形,且两者混掺比例为 1:1 时,UHPC 的综合力学性能较优。

赵人达等^[41]从钢纤维的取向与分布、形状特征、掺量、改性及与其他纤维的混杂等方面出发,对 UHPC 中钢纤维研究的一些重要成果进行了介绍和评述。他们认为:关于钢纤维顺向及乱向分布下的力学模型、纤维取向的无损检测技术及其流变控制技术有待进一步研究;发展有效、合理的数值方法来预测钢纤维 UHPC 的断裂行为等仍处于探索阶段,具有较高的研究价值;在一定纤维掺量和性能前提下,纤维长径比对该性能提升的临界点等方面还有待进一步研究;基于多种不同尺度和不同性能耦合的混杂纤维组合的研究具有良好的研究价值。

李传习等^[42]探究了 UHPC 配合比中的水胶比因素对其力学性能的影响规律,通过相关试验得到了 UHPC 的抗压、四点弯曲应力-挠度曲线、四点弯曲出现可视裂纹时下缘等效拉应力。结果表明:UHPC 抗压强度、抗折强度及弯曲韧性指标随水胶比的增大皆呈先增后减趋势,当水胶比分别为 0.18、0.16 和 0.16 时达到最优;应力峰值前的应力-挠度曲线并不是典型全凸形曲线;为保证 UHPC 兼顾良好施工与力学性能,建议湿拌时间、水胶比分别为 6 min、0.18 或 0.185 (质量比)。

苏捷等^[43]通过不同强度等级、不同钢纤维体积掺量的 UHPC 立方体试件的抗压试验,研究了强度等级和钢纤维体积掺量等对 UHPC 立方体抗压强度及尺寸效应的影响。结果表明:UHPC 立方体试件抗压强度的尺寸效应随强度等级的增加而趋于明显;钢纤维掺量对 UHPC 抗压强度尺寸效应有较大影响;提出了 UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数建议值,建立了 UHPC 抗压强度尺寸效应律中参数的计算公式。

雒敏等^[44]探究了不同 PVA 纤维、钢纤维、混杂纤维体积掺量及不同水胶比的 UHPC 试件单轴受压力学性能规律,根据试验结果具体分析各试件单轴受压破坏形态、韧性等力学特性。结果表明:随着纤维掺量的增加,试件的破坏形态由脆性向塑性转变,UHPC 试件开裂后韧性增加;相同纤维掺量下,钢纤维对 UHPC 的阻裂效果优于 PVA 纤维;经无量纲化处理的 UHPC 受压应力-应变曲线具有明显的非弹性段,纤维掺量较高时部分试件的曲线会出现应力台阶。

赵金侠等^[45]采用宏观力学试验与微观电镜技术相结合的方法,开展了 UHPC 流动度试验、轴压试验和扫描电镜试验,分析了水胶比、砂胶率、钢纤维掺量、消泡剂掺量、养护方法、龄期等因素对 UHPC 工作性能、抗压性能及其微观结构的影响规律,以揭示 UHPC 的增强机制。研究表明:凝胶与骨料界面过渡区(ITZ)是 UHPC 内部的薄弱环节,提高 ITZ 的密实度和强度是增强 UHPC 的关键;UHPC 的流动度随着水胶比的提高显著增大,但其抗压强度随着水胶比的提高先增大后降低;过高的砂胶率不利于 UHPC 工作性能,同时会造成其抗压强度下降;掺入消泡剂可以有效提高 UHPC

的表观质量,但可能会降低 UHPC 的流动性和抗压强度;掺入 2.5% 的钢纤维能大幅提高 UHPC 的抗压强度,并明显改善其脆性特征,但会降低工作性能;高温养护能显著激发微硅粉和矿渣的火山灰效应,使 UHPC 早强,但存在后期强度下降的可能。

田会文等^[46]以 FRP 管厚和钢纤维掺量为变量,制作了有 FRP 管约束 UHPC(UHPCFFT)圆柱和无约束 UHPC 圆柱试件,通过单调轴压试验研究钢纤维掺量对不同约束刚度 UHPC-FFT 试件极限应变、抗压强度的影响。结果表明:FRP 管厚是影响 UHPC-FFT 轴压性能的关键因素,增大管厚能大幅提高 UHPC-FFT 的抗压性能,管厚较小的 UHPCFFT 试件变形经历线弹性、软化和线性强化 3 个阶段,而当管厚增大到能提供足够约束时,试件变形将从线弹性阶段直接过渡到线性强化阶段;加入钢纤维能减缓初始峰值荷载后的荷载突降,且试件破坏后仍保持为整体;钢纤维掺量的影响在管壁较薄的试件中表现得较为明显,当管壁足够厚时,钢纤维影响较小。

5.2 UHPC 构件力学性能

由于钢纤维能有效控制裂缝开展并提高 UHPC 的抗拉强度,因此,在进行 UHPC 构件抗弯承载力分析时,一般计入截面受拉区 UHPC 的抗拉作用,但对于如何考虑受拉区 UHPC 的抗弯承载力贡献,国内外相关研究结果间存在较大分歧。

彭飞等^[47]首先编制了配筋 UHPC 梁正截面抗弯承载力数值分析程序,计算分析后认为配筋率、梁高、钢纤维长度、截面形状和预应力水平是影响受拉区 UHPC 抗弯贡献的主要参数。提出了截面受拉区 UHPC 的均匀分布应力折减系数 k 的计算公式,通过引入受拉翼缘面积折减系数 k_f 以考虑不同截面形状的影响;在此基础上,提出了不同弯曲破坏模式下钢筋 UHPC 梁抗弯承载力的简化计算方法。

梁雪娇等^[48]以有无缝、键齿类型及预压应力为主要参数研究了预应力 UHPC 拼装梁的受弯性能,获取了试验梁的破坏模式、受拉区钢筋线增量、荷载-挠度曲线及应变分布规律。试验发现,试验梁均呈现典型的弯曲破坏,受压区 UHPC 均压碎,破坏时受压边缘的最大压应变可达 $7\ 200\ \mu\epsilon$ 以上,无论是否设置拼接缝应变沿截面高度的分布规律基本满足平截面假定。与整浇梁裂缝不同,拼接梁的弯曲裂缝主要集中在拼接缝位置;UHPC 试验梁均具有较好的延性,而且拼接梁的延性优于整浇梁,预压应力会影响试验梁的开裂荷载,但对极限荷载影响较小;UHPC 拼装梁比同条件下整浇梁的抗弯承载能力低 9%~15%,接缝构造对抗弯承载能力也有一定的影响。

姜海波等^[49]以预应力的尺寸、剪跨比、纵向配筋率和钢纤维掺量为试验参数研究了 UHPC 无腹筋梁的抗剪性能,通过四点加载方法分析了试验构件的破坏形态、开裂强度和极限强度。试验结果表明,施加预应力可以使试验梁破坏形态从弯曲破坏转变为剪切破坏,也可提高 UHPC 梁的开裂荷载并有效抑制了裂缝的形成。体外预应力张拉 40% 控制应力,剪跨比为 1.0 和 1.5 时 UHPC 梁均发生剪切破坏,但是剪跨

比增大至 2.0 时,UHPC 梁发生弯曲破坏,受压区混凝土压溃。增大纵向受拉钢筋配筋率能够显著提高无腹筋 UHPC 梁的抗弯性能,可抑制弯曲裂缝的数量、长度和宽度,但对开裂荷载无明显影响,且对斜截面抗剪的贡献作用不大。钢纤维掺量对无腹筋梁的抗剪和抗弯性能均有明显的影响,提高钢纤维掺量能够有效延缓腹剪斜裂缝和弯曲裂缝的发展。

戚家南等^[50]设计制作了试验参数包括纤维率、纤维种类、配筋率、剪跨比和混凝土强度的多片模型梁并开展荷载试验,旨在探究 UHPC 薄腹梁受剪性能和抗剪承载力计算方法。其分析了试验梁破坏形态、裂缝开展过程和主要因素对梁体受力响应影响规律,试验结果表明,UHPC 梁的受力过程分为弯曲开裂前弹性阶段(对应弯曲开裂荷载)、“桥联作用”失效前(对应纵筋屈服)和“桥联作用失效后(对应于梁体破坏)3 个阶段。由于纤维“桥联作用”,UHPC 梁剪切破坏具备一定延性且有明显征兆,梁剪切开裂后呈多条剪切裂缝同时开展现象,配置适量箍筋可使梁体破坏模式从脆性剪切破坏向更具延性的弯曲破坏转变。基于分项叠加思想,建立了考虑混凝土、箍筋和纤维抗剪贡献的 UHPC 梁抗剪承载力理论计算式。

李传习等^[51]进行了以钢纤维掺量、纵筋配筋率和箍筋配筋率为主要参数的 UHPC 矩形梁的纯扭试验。他们获得了裂缝开展及分布情况、失效模式、扭矩-扭率曲线、扭矩-UHPC 应变曲线、扭矩-钢筋应变曲线、开裂扭矩及极限扭矩等数据,分析了不同参数对其扭转性能的影响规律及其主要机理。一些主要的结论如下:配筋及无筋试件的纯扭破坏均表现为多条主裂缝贯通,且裂缝呈空间螺旋状分布,无筋试件破坏过程迅速,配筋试件延性更好;在扭矩不大于无筋 UHPC 试件极限扭矩时,配筋构件抗扭刚度小于无筋构件;钢纤维改善了 UHPC 抗拉特征,使主裂缝开裂角度(裂缝与试件轴线的夹角)增加;钢纤维掺量提高的同时,试件开裂扭矩和极限扭矩也相应提高。在试验的基础上,得到 UHPC 构件开裂扭矩系数值、极限扭矩计算公式的截面抗扭系数值。

大量 UHPC 轴拉试验的应力-应变曲线结果^[34-35,52]表明,在 UHPC 基体开裂后由于钢纤维的桥接作用可使材料应力软化速率(即受拉应力-应变曲线软化段应力随应变的下降速率)大大减慢,以致于 UHPC 表现出较大的残余抗拉强度和抗拉断裂能,自然受拉破坏时的延性也大大增加,这也是目前众多学者在探究截面受拉区 UHPC 对梁或板等构件正截面抗弯承载力贡献的主要原因。

王景全等^[53]为预测 UHPC 残余抗拉强度,通过细观力学分析,研究了纤维对 UHPC 残余抗拉强度贡献机理,提出了考虑纤维埋深、分布和取向的 UHPC 细观本构模型,该研究比较有特色的地方在于受拉本构应变峰值点之后的方程,该段本构方程的建立详细考虑了纤维与基体的相互作用,将纤维埋深、分布和取向等因素融入了进去。同时,基于 UHPC 细观本构、受力平衡方程和变形协调条件,建立了 UHPC 梁受弯分析模型和受弯承载力理论计算方法。理论计算结果表明:纵筋配筋率从 0 增至 2.5% 时,受拉区混凝土对受弯承载力贡献从 89.6% 降至 2.4%;增加纤维率和纤维

长径比可显著提高受拉区混凝土对受弯承载力的贡献比例; 纵筋屈服强度和混凝土抗压强度对受拉区混凝土对受弯承载力贡献影响不显著。

大量 UHPC 扫描电镜结构试验^[45,54]发现, 在制作 UHPC 试件或构件过程中产生大量气泡导致材料细观结构层面存在诸多孔洞结构。这些初始缺陷在材料受力过程中会长大、汇合甚至连通, 从而导致材料与结构宏观力学性能退化直至破坏。

杨永郑^[55]、章新雨^[56]基于细观损伤力学基本方法, 建立了适用于 UHPC 细观结构特征的孔洞本构模型。该模型最大的特点在于可通过细观结构模型独有的力学理论框架再结合 UHPC 材料试验标定出任意应变发张对应的损伤变量值, 从而具体得到损伤演化规律, 避免了各种材料损伤间接测试手段如声发射试验、循环加载试验等带来的不精确性, 模型计算结果能较好地预测 UHPC 材料应力增长阶段的非线性效应。在该本构模型基础上, 继续探究了 UHPC 无筋板和加筋板的正截面抗弯承载力, 得到以下主要结论: 影响试件开裂荷载的关键因素在于钢纤维, 跟板内是否配筋关系不大; UHPC 板的裂缝发展可分为开裂期, 裂缝稳定发展期和裂缝快速发展期 3 个阶段。素板的裂缝发展趋势较为离散, 各试件之间有较大差异, 加筋板的裂缝发展较为稳定; 应变在截面的高度方向呈线性变化, 基本满足平截面假定; 提出了 UHPC 板正截面受弯承载力的计算公式, 并引入强度有效系数以考虑受拉区的塑性发展, 并建议素板强度有效系数取 0.2; 加筋板的强度有效系数取 0.5; 结合本构模型中的损伤演化方程可计算得到截面任意梁高处的损伤发展情况。另外, 该团队在此本构模型基础之上继续修正并深化了本构模型框架和损伤演化方程, 建立出了能完整预测 UHPC 应力-应变关系发展的本构模型, 具体包括应力增长阶段的非线性效应(如硬化型 UHPC 的硬化特征)以及应力软化阶段的应力-应变曲线形状特征, 同时可结合模型损伤演化方程进行材料损伤状态评估以及结合 ABAQUS 塑性损伤模型进行结构复杂或简单应力状态的力学性能分析^[57]。

6 结论和展望

新材料的发明与发展往往可以为土木工程的科技进步产生革命性的推动作用。新材料可以带来新工艺、新概念, 乃至新的结构体系。以 UHPC 为代表的新材料在桥面结构中的应用是新材料驱动结构发展的典型案例。仅就 UHPC 在桥面结构中的应用这一研究领域而言, 存在下列待解决的问题或可能的发展方向:

1) 装配式桥梁是未来桥梁工程发展的重要方向, 钢-UHPC 组合桥面板的研究也必须向这一方向努力。UHPC 预制板与正交异性钢桥面板之间的连接问题, 以及相邻 UHPC 预制板相互之间的连接问题是这一研究方向的重点课题。若采用湿接缝的方式来加以连接, 那就必须对湿接缝进行特殊的处理, 防止它变成整个体系中的薄弱环节; 若摒弃湿接缝而采用纯机械方式加以连接, 那么这类连接装置的疲劳问题与耐久性问题则必然需要进一步的深入研究; 若

UHPC 桥面板与正交异性钢桥面板之间采用粘结剂来加以连接, 则必须对这类粘结剂的黏结强度、韧性及耐久性等方面做进一步的研究。

2) UHPC 层并非独立承担荷载, 它是整个桥面体系中的一部分, 因此, 钢-UHPC 组合桥面板体系的研究工作中也不应忽视对正交异性钢桥面板等其他部件的考察。从目前的研究来看, 传统桥面结构中的某些合理参数取值(例如 U 肋宽度), 在钢-UHPC 组合桥面板体系中却未必是最优解, 反而原来被认为存在某些问题的参数取值更加合理。因此, 在针对不同需求情况的钢-UHPC 组合桥面板体系开展最优化参数分析与研究方面仍有大量工作需要完成。

3) 当前已经开展的研究中, UHPC 层中的短剪力钉在承载力极限状态下的破坏形态仍然是以剪力钉的剪断为主。然而当剪力钉长径比或其他参数发生进一步变化时, 剪力连接件或组合桥面板中其他构造的破坏形态如何仍然有待进一步的深入研究。

4) 在现有研究工作中, 钢-UHPC 组合桥面板中的 UHPC 层在使用荷载作用下均未发现开裂现象。但相关试验往往仅能体现第二、第三体系下的拉应力作用。若是桥梁第一体系中 UHPC 层本来就受到拉应力作用, 则第一体系应力与第二、第三体系应力叠加作用下的 UHPC 开裂问题仍然值得关注。

5) 钢-UHPC 组合桥面板体系体现出了良好的抗疲劳性能, 在一般使用荷载作用下, 所有已知的疲劳易损细节的应力状态都得到了明显的改善, 然而确定性分析下得出的抗疲劳性能有可能是过于高估的结果。最终仍需针对各种可能的影响因素, 考虑实际情况下可能出现的随机性问题, 采用可靠度理论来确定相关参数的取值。此外, 在新型结构体系中是否会出现与传统桥面体系不同的新疲劳易损细节, 这一点也需留待工程实践检验与进一步的研究。

6) UHPC 构件的各类力学行为计算一般总须基于其本构行为模型进行, 但目前所开展的研究工作中, 无论是 UHPC 构件的力学性能研究, 亦或是关于 UHPC 材料本身力学行为的研究, 仍然主要集中于针对其各种组分或参数的试验研究, 本构模型高度依赖于某些特定的试验, 其普适性仍然有待拓展。从 UHPC 材料细观结构与损伤机理出发建立的力学模型为建立适用性更加广泛、考虑多参数影响的本构关系理论提供了新的途径。而从理性出发深刻认识新材料与新结构性能, 对自材料到构件乃至直到结构的力学行为开展定量分析, 这也是我们开展相关研究的目标之一。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96.
- [2] ZHAO C H, WANG K K, ZHOU Q F, et al. Full-scale test and simulation on flexural behavior of dovetail-shaped reactive powder-concrete wet joint in a composite deck system [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(8): 04018051.

- [3] ZHAO C H, WANG K K, XU R Y, et al. Development of fully prefabricated steel-UHPC composite deck system [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2019, 145(7): 04019051.
- [4] 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, 442.
- [5] 白午龙. 超高性能混凝土钢桥面铺装疲劳性能试验研究[J]. *城市道桥与防洪*, 2021(2): 169-172, 188, 18.
- [6] 李志锋, 何湘峰, 赵旭东, 等. 装配式钢-UHPC 轻型组合梁设计和整体受力分析[J]. *公路工程*, 2021, 46(1): 98-102.
- [7] 冯峥, 李传习, 邓帅, 等. 钢-UHPC 组合梁桥面板静承载能力比较分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(4): 551-558.
- [8] 陈李峰, 李款, 潘友强, 等. 免蒸养 UHPC 在正交异性钢桥面铺装中的应用[J]. *公路*, 2020, 65(3): 154-159.
- [9] 田壮, 颜全胜. 考虑滑移效应的钢-UHPC 斜拉桥主梁受力分析[J]. *河南科学*, 2020, 38(12): 1951-1959.
- [10] 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.
- [11] QI J N, TANG Y Q, CHENG Z, et al. Static behavior of stud shear connectors with initial damage in steel-UHPC composite bridges [J]. *Advances in Concrete Construction*, 2020, 9(4): 413-421.
- [12] 石广玉, 李广耀. 基于断裂力学的钢-UHPC 组合结构中栓钉的疲劳寿命评估[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(2): 102-113.
- [13] 邵旭东, 罗军, 曹君辉, 等. 钢-UHPC 轻型组合桥面结构试验及裂缝宽度计算研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(3): 61-75.
- [14] RAFIEE J. Computer modeling and investigation on the steel corrosion in cracked ultra high performance concrete [M]. Kassel: Kassel University Press, 2012.
- [15] 彭学理, 王敏. 超高性能混凝土在大跨度铁路桥梁钢桥面铺装中的应用[J]. *世界桥梁*, 2020, 48(2): 77-81.
- [16] 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.
- [17] LIU X H, ZHANG J R, CHENG Z H, et al. Experimental and numerical studies on the negative flexural behavior of steel-UHPC composite beams [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1-15.
- [18] 王立国, 邵旭东, 曹君辉, 等. 基于超短栓钉的钢-超薄 UHPC 组合桥面性能[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(10): 2027-2037.
- [19] 卜一之, 刘欣益, 张清华. 基于截面应力法的钢-UHPC 组合板初裂荷载计算方法研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(10): 209-217.
- [20] 李传习, 胡正, 李游, 等. 钢-超高性能混凝土胶接组合板受弯的界面性能[J]. *交通科学与工程*, 2020, 36(4): 28-35.
- [21] 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.
- [22] 朱劲松, 王永光, 郭晓宇, 等. 钢-UHPC 华夫板组合梁抗剪性能试验研究[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(11): 169-181.
- [23] 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.
- [24] 周尚猛, 王伟. 超高性能混凝土铺装体系在钢桥面中的应用[J]. *桥梁建设*, 2019, 49(Sup1): 20-25.
- [25] ZHAN J, SHAO X D, QU W T, et al. Multiparameter fatigue analysis of a steel-super-toughness-concrete lightweight composite bridge deck [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 2019, 13(1): 50-59.
- [26] 秦世强, 黄春雷, 张佳斌, 等. 基于应力监测的钢-UHPC 组合桥面和环氧沥青钢桥面疲劳性能对比[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(1): 61-70.
- [27] 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.
- [28] YUAN Y, WU C, JIANG X. Experimental study on the fatigue behavior of the orthotropic steel deck rehabilitated by UHPC overlay [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 157: 1-9.
- [29] 顾萍, 鲁凡, 张志强, 等. 钢-UHPC 组合桥面的疲劳性能研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2021, 37(1): 1-8.
- [30] 凌立鹏, 唐亮, 耍荆荆, 等. 钢-UHPC 组合桥面移动车辆加载试验研究[J]. *公路*, 2021, 66(1): 100-107.
- [31] 霍宁飞, 刘培硕, 王哲. 新型组合桥面铺装体系肋-面板焊缝疲劳分析[C]//北京力学学会第二十七届学术年会论文集. 线上会议, 2021: 784-786.
- [32] 裴必达. 钢-UHPC 轻型组合结构构造细节疲劳评估与优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [33] ABDELBASET H, CHENG B, TIAN L, et al. Reduce hot spot stresses in welded connections of orthotropic steel bridge decks by using UHPC layer: Experimental and numerical investigation [J]. *Engineering Structures*, 2020, 220: 110988.

- [34] 邵旭东, 李芳园, 邱明红, 等. 钢纤维特性对UHPC轴拉性能与弯拉性能的影响及对比研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(4): 51-64.
- [35] 李芳园. 钢纤维特性对UHPC抗拉性能的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [36] 杲晓龙, 王俊颜, 郭君渊, 等. 循环荷载作用下超高性能混凝土的轴拉力学性能及本构关系模型[J/OL]. 复合材料学报, <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201218.002>.
- [37] 王俊颜, 刘非凡, 郭君渊. 超高性能轻质混凝土的循环拉伸力学性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(4): 170-176.
- [38] QIU M H, ZHANG Y, QU S Q, et al. Effect of reinforcement ratio, fiber orientation, and fiber chemical treatment on the direct tension behavior of rebar-reinforced UHPC [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 256: 119311.
- [39] 方志, 刘绍琨, 黄政宇, 等. 不同温度下超高性能混凝土的弯拉性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1732-1739.
- [40] 聂洁, 李传习, 钱国平, 等. 钢纤维形状与掺量对UHPC施工及力学特性的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(4): 4042-4052.
- [41] 赵人达, 赵成功, 原元, 等. 超高性能混凝土中钢纤维的应用研究进展[J/OL]. 中国公路学报, 2020, 34(8): 1-22.
- [42] 李传习, 聂洁, 潘仁胜, 等. 水胶比对超高性能混凝土施工与力学性能的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 164-174.
- [43] 苏捷, 刘伟, 史才军, 等. 超高性能混凝土立方体抗压强度尺寸效应[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 305-311.
- [44] 雒敏, 蔺鹏臻, 杨子江. UHPC单轴受压力学性能及本构关系研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(5): 62-67.
- [45] 赵金侠, 黄亮, 谢建和. 不同配比和养护条件对超高性能混凝土微观结构的影响[J]. 中国公路学报, 2019, 32(7): 111-119.
- [46] 田会文, 周臻, 陆纪平, 等. 钢纤维掺量对FRP管约束超高性能混凝土轴压性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(3): 481-487.
- [47] 鹏飞, 方志. 钢筋UHPC梁正截面抗弯承载力计算方法[J]. 土木工程学报, 2021, 54(3): 86-97.
- [48] 梁雪娇, 郑辉, 轩帅飞, 等. 超高性能混凝土节段预制拼接梁受弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(1): 30-36, 72.
- [49] 姜海波, 冯家辉, 肖杰, 等. 体外预应力无腹筋超高性能混凝土梁的抗剪性能试验探索[J/OL]. 复合材料学报, <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210316.001>.
- [50] 戚家南, 王景全, 周凯, 等. UHPC梁受剪性能试验与抗剪承载力计算方法[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 95-103.
- [51] 李传习, 周佳乐, 柯璐, 等. 配筋超高性能混凝土矩形梁抗扭承载性能试验与计算方法[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 118-131.
- [52] 王俊颜, 郭君渊, 肖汝诚, 等. 高应变强化超高性能混凝土的裂缝控制机理和研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 10-17.
- [53] 王景全, 戚家南, 刘加平. 基于细观本构模型的UHPC梁受弯全过程分析[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(9): 137-144.
- [54] 黄伟. 矿物掺合料对超高性能混凝土的水化及微结构形成的影响[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [55] 杨永郑. 基于损伤理论的超高性能混凝土本构关系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [56] 章新雨. 考虑孔洞效应的超高性能混凝土抗弯性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [57] 杨旭. 基于连续-细观损伤力学的超高性能混凝土本构模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.

(编辑 袁虹)