

超高性能混凝土在房屋建筑结构中的研究与应用进展

樊健生^{1,2}, 丁 然^{1,2}

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学, 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 近年来, 超高性能混凝土(UHPC)发展迅速, 已较广泛应用于桥梁工程等领域, 在提升耐久性、减轻自重、简化配筋、缩短工期等方面展现出很大优势, 取得了良好的综合经济技术效益。然而, 目前 UHPC 在房屋建筑结构中的研究还比较少, 应用情况尚不尽如人意。本文以 UHPC 建筑结构为对象, 对 UHPC 结构特征及目前的工程应用概况进行总结, 分析了 UHPC 结构的基本设计原理和方法。着重介绍了本课题组近年来有关 UHPC 建筑结构构件和节点的相关研究成果, 包括新型轻质保温夹芯屋面板、新型夹芯楼板-墙板装配式结构、双向 waffle 板、装配式混凝土框架后浇梁柱节点等, 总结了 UHPC 在建筑结构中的合理应用方式和效果。最后, 提出了 UHPC 建筑结构发展的建议, 以期推动 UHPC 在房屋建筑中的应用, 提升其综合性能和品质。

关键词: 超高性能混凝土建筑结构; 夹芯板; waffle 板; 装配式结构连接; 免配筋或少配筋

中图分类号: TU37 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)05-1246-13

网络出版时间: 2023-04-03



Development on Ultra-high Performance Concrete in Building Structures

FAN Jiansheng^{1,2}, DING Ran^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 10084, China; 2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The ultra-high performance concrete materials (UHPC) are developed rapidly and are widely used in bridge engineering and other fields. The corresponding advantages involve the reducing dead weight, simplifying reinforcement details, shortening construction period, and improving durability. The comprehensive economic and technical benefits are achieved. This review represented recent development on the UHPC building structures. The characteristics of UHPC structure and the current engineering application were summarized, and the basic design principles and methods were analyzed. Recent studies on the UHPC building structural components and joints were introduced, including lightweight thermal insulation sandwich roof panels, sandwich floor/wall panel-based prefabricated structures, two-way waffle slabs, post-poured beam-column joint in precast reinforced concrete frame, prefabricated frames based on the UHPC connections, etc.. Some methods and benefits of UHPC application in building structures were concluded. In addition, the future research aspects of UHPC building structure were also given to promote the application of UHPC in building structure and improve its comprehensive performance and quality.

Keywords: ultra-high performance concrete materials building structure; sandwich panel; waffle slab; connection in precast structures; no or less reinforcement

近年来, 超高性能混凝土(UHPC)得到了快速发展。由于其基体材料的高度致密性以及钢纤维的掺入, 相比普通混凝土, UHPC 具有高抗压和抗拉强度, 表现出一定的受拉应变硬化特性和很好的延性,

并且具有低 2 个数量级的氯离子渗透系数^[1-4]。UHPC 的上述材料性能优势, 使其在提升结构耐久性、减轻结构自重、简化构件配筋、便于预制装配、增强极端荷载抵御能力等方面均有很大潜力, 因而

收稿日期: 2022-09-23。 修订日期: 2022-10-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52293433, 51890901)。

第一作者: 樊健生(1975—), 男, 博士, 教授。

通信作者: 丁 然(1988—), 男, 博士, 副研究员。

Received date: 2022-09-23. Revised date: 2022-10-05.

First author: FAN Jiansheng (1975—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: fanjsh@mail.tsinghua.edu.cn

Correspondent author: DING Ran (1988—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: dingran@mail.tsinghua.edu.cn

在建筑、桥梁、防护、海洋等工程结构中有着广阔的应用前景^[5-10]。

UHPC 在桥梁领域已有 20 余年的应用,但在建筑领域则相对滞后,其中对于 UHPC 材料成本的认识是制约其应用的主要因素。对于桥梁工程,国内以正交异性钢桥面的疲劳和铺装病害为典型切入点^[11-13],使用 UHPC 桥面后,虽然一次性投入成本可能有所增加,但考虑到全寿命期维修和交通中断的代价,整体上仍具有较好的综合经济优势,所以 UHPC 较高的材料成本没有成为其在大跨桥梁桥面中应用推广的障碍。对于房屋建筑而言,“安全、经济、美观、适用”是其基本方针。虽然价格是工程材料的重要指标,但 UHPC 由于抗拉、韧性等关键性能有质的提升,通过节省材料、减轻自重、增强耐久性、节省施工费用、提升美观性等,在很多场景下实际上具备综合效益和全寿命经济性方面的很强竞争力。因此,如果以“全寿命费效比”而不是“单位价格”来衡量工程的“经济性”,价格未必构成 UHPC 材料应用的短板,况且随着原材料范围的扩大、生产规模的增加,UHPC 价格也具备很大的下降空间。

本文重点介绍了典型 UHPC 建筑结构构件和节点的研究与应用进展,为 UHPC 在房屋建筑结构中的应用提供参考。首先对 UHPC 结构特征及目前的工程应用概况进行总结,随后分析了 UHPC 结构的基本设计原理和方法,并介绍了本课题组近年来在 UHPC 建筑结构构件和节点的代表性研究成果,分析总结了 UHPC 在建筑结构中的合理应用方式、应用效果和前景,最后提出了 UHPC 建筑结构的发展建议。

1 UHPC 结构性能特征及应用概况

1.1 材料与结构性能特征

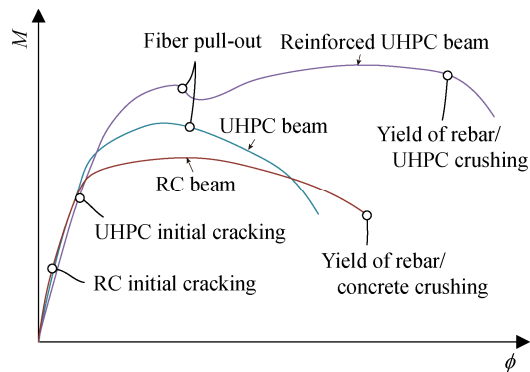
UHPC 通常采用大掺量的钢纤维或其他有机纤维来进行增韧,使其受拉开裂后可表现为应变硬化特征,从而使得 UHPC 的抗拉强度和延性明显提升^[14-17],这也导致 UHPC 结构与普通钢筋混凝土(RC)结构的性能特征存在明显差异。

对于 RC 结构,设计时通常会忽略混凝土的抗拉强度,这一方面是由于混凝土的抗拉强度通常较低(1.5~3.0 MPa),同时又由于其受拉脆性,且极限拉伸应变与钢筋屈服应变相去甚远,从而导致结构无法可靠有效地利用这部分强度。当然需要说明的是,混凝土受拉开裂后,由于受拉刚化作用,裂缝

间的混凝土仍能起到很大作用,受拉区混凝土对结构刚度的贡献通常在设计时是需要考虑的。

对于 UHPC 结构,由于具有相对较高的抗拉强度(6~12 MPa)和极限拉伸应变(微应变可达 10 000),其受拉时对结构强度和刚度都有很大贡献,设计时通常应予以考虑。除纤维外,在 UHPC 中配置钢筋,由于 UHPC 的拉伸变形能力与钢筋相当,因此能够很好地实现协同受力^[18]。虽然 UHPC 抗拉强度与钢筋相比仍然较低,但考虑到构件中 UHPC 的截面积较大,在常规 1%~2% 的配筋率范围,UHPC 的总体抗拉贡献甚至高于钢筋。

如图 1 所示,以梁受弯为例,UHPC 高抗拉强度可显著提升其开裂弯矩,即使是不配筋 UHPC 梁的抗弯承载力也可能高于常规配筋的 RC 梁。当进一步配置钢筋时,UHPC 梁将会表现出更高的承载力和更强的变形能力。



ϕ is curvature; M is bending moment.

图 1 超高性能混凝土(UHPC)梁与普通钢筋混凝土(RC)梁弯曲性能比较

Fig. 1 Comparison of flexural performances between ultra-high performance concrete materials (UHPC) and reinforced concrete (RC) beam

此外, UHPC 具有显著高于普通混凝土的抗冲击能力和耗能能力,其耗能能力高于普通混凝土 50 到 100 倍,因此在防护工程^[19]、抗震结构^[20-22]等领域也有很大应用潜力。

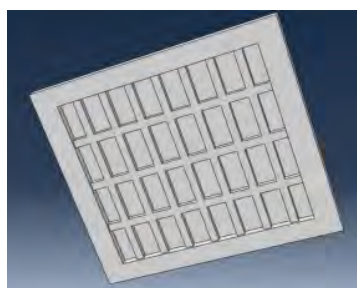
1.2 工程应用领域

目前 UHPC 的工程应用主要集中在桥梁领域,在房屋领域则以装饰、造型等公共建筑的围护结构为主,也包括一些建筑部件(如楼梯)、建筑小品等,在主要受力构件方面的应用较少。此外,在海洋结构等也有少数尝试性的应用。

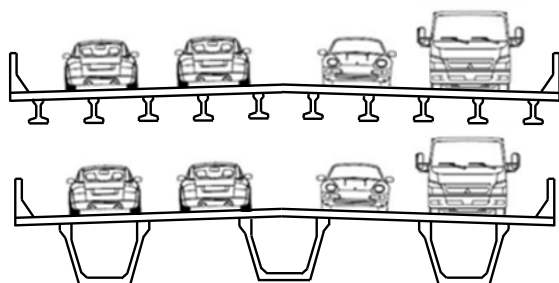
1.2.1 桥梁工程 UHPC 在桥梁尤其是桥面结构中,得到了较好的推广应用,在耐久性、建造效率、全寿命周期性能和综合成本等方面展现出

了明显优势, 目前全世界应用 UHPC 的桥梁数量已约千座^[8–9]。

美国在 UHPC waffle 型桥面板(图 2a)、UHPC 预应力 π 形梁、UHPC 湿接缝、UHPC 加固桥面等方面开展了研究和工程实践^[5, 9, 23], 目前应用 UHPC 的桥梁已达约 350 座, 其中将 UHPC 作为现场预制 RC 构件的连接接头材料最为广泛; 瑞士最早在 2004 年开始应用 UHPC 进行桥面板修复, 到 2020 年应用了接近 150 座桥梁^[9, 23]; 法国于 2001 年建成了世界上最早的 UHPC 公路桥-Bourg-lès-Valence OA4 和 OA6 跨线桥^[9, 23]; 马来西亚是将 UHPC 应用于桥梁上部主受力结构最多的国家, 2010—2020 年期间, 已建成了超过 120 座桥^[9], 其中应用最广泛的是 UHPC 工字梁、U 形梁和混凝土桥面板组合的结构形式(图 2b)。



(a) UHPC waffle deck panel



(b) UHPC I-beam/U-beam - RC deck composite structure

图 2 典型 UHPC 桥梁结构形式

Fig. 2 Typical UHPC bridge structure

国内研究人员在 UHPC 桥面铺装(新建和加固)等领域开展了大量研究和应用工作, 目前已应用于几十座桥梁的桥面^[23–26], 典型工程是岳阳洞庭湖大桥, 为主跨 1 480 m 悬索桥。国内在预应力 UHPC 箱梁^[27]、钢-UHPC 组合梁^[28–32]、UHPC 拱桥^[33–35]等桥梁主要受力结构方面也开展了大量应用和研究。2016 年, 长沙建成了一座长 70.8 m (主跨 36.8 m)的 UHPC 跨街天桥^[36], 上部结构采用预应力 UHPC 鱼腹式单箱三室连续箱梁。2021 年贯通的广东英德北江四桥大站镇岸跨堤引桥是国内首座大跨

径 UHPC 公路梁桥^[37–38], 由 4 幅 102 m 跨径单向预应力 UHPC 简支箱梁组成。2021 年国内首座 UHPC 箱形拱桥-八丘田车行天桥在云南正式通车, 该桥为上承式 UHPC 无铰拱桥, 计算跨径 34 m, 主拱为等截面分离双箱单室截面, 每根拱肋分 3 段预制, 节段采用干式连接^[34]。2021 年通车的湖南益阳青龙洲大桥^[39], 为主跨 260 m 自锚式悬索桥, 采用 UHPC 矮肋桥面板。广东惠清高速麻埔停车区跨线桥采用先简支后结构连续的钢-UHPC 轻型组合 π 梁^[39], 全桥四跨一联, 共长 100 m。

1.2.2 建筑工程 目前国内 UHPC 在建筑工程领域的研究和应用相对较少, 而法国最早于 1996—1998 年在 Cattenom 核电站冷却交换设备支撑结构维修中应用了超过 2 600 根预应力 UHPC 梁^[9, 40], 此后则鲜有相关报道。

UHPC 在房屋建筑中的应用主要集中于预制 UHPC 部件(如楼梯和外墙板)和 UHPC 小品(如桌椅)。欧洲发展了不少 UHPC 轻量化楼梯^[41–42], 国内也有研制^[43], 同样尺寸和功能前提下, 楼梯重量比 RC 结构可减小一半以上。由于 UHPC 强度高, 应用于外墙板这种受力不大的围护装饰部件时, 往往可以免配筋或少配筋, 因而可以在造型上具有更大的灵活性, 适合于镂空、曲面等建筑效果。另一方面, UHPC 墙板厚度通常较小, 能够做成尺寸较大的预制部件, 适用于快速安装。此外, UHPC 耐久性好, 表面可做颜色和材质处理。

法国 Stade Jean Bouin 体育场外围幕墙采用了 3 600 片 UHPC 三角形镂空板件(平均尺寸长 8~9 m、宽 2.5 m、厚 45 mm), 总覆盖面积达 23 000 m²^[44–45]。法国的欧洲和地中海文明博物馆外围幕墙和屋顶采用了 UHPC 格栅结构, 表面积共计 15 000 m², 其中外立面由一系列不同构型的“Y”和“N”形树状细长柱构成^[44–45]。国内 2018 年建成的杭州余杭大剧院应用了总计 20 000 m²的外墙挂板^[36, 45]、2019 年建成的上音歌剧院使用了 300 余块 UHPC 镂空外墙挂板^[36, 45]。

UHPC 有助于实现建筑部品化和构件轻量化, 保障高品质、高效率和低资源消耗, 由于减轻自重和提高连接性能, 也有利于抗震。在房屋建筑领域, UHPC 具备很大的技术发展潜力和广阔的市场发展空间。

1.2.3 其他工程领域 UHPC 可在腐蚀性环境建造高耐久结构或为结构提供防护。例如, 日本东京的羽田机场扩建跑道采用了 6 939 块 UHPC 预

制板^[46], 大幅降低结构自重, 降低桩基础的建设成本, 并显著提升了结构在海洋环境里的使用寿命。

此外, UHPC 在防爆、防侵彻或防撞结构^[47-50]、隧道衬砌^[51]、水利工程抗冲磨^[52]、管廊^[38]、地铁^[38]、杆柱^[38]等诸多领域, 都为提升工程结构性能提供了更好的解决方案。

1.3 国内外标准规范

国际上, 法国和瑞士已经正式颁布了 UHPC 材料性能与结构设计标准, 其中: 法国在 2013 年发布了正式指南^[53], 此后又进一步按照欧洲标准体系模式, 发布了设计标准^[54]、材料标准^[55]和施工标准; 瑞士在 2016 年发布了相关标准^[56], 涵盖 UHPC 材料性能、结构设计和施工, 全面而简洁; 日本^[57]、德国^[58]、加拿大^[59-60]、韩国^[61]等也有相关指南发布。

国内近 10 年从材料到结构层面编制了针对不同工程领域的多部 UHPC 相关规范, 总体上国标还比较少, 主要是 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》^[62]。团体标准发展较快, 如 T/CBMEF 37—2018《超高性能混凝土基本性能与试验方法》^[63]、T/CECS 10107—2020《超高性能混凝土(UHPC)技术要求》^[64]、T/CBMEF 96—2020《超高性能混凝土预混料》^[65]、T/CHTS 10036—2021《高韧性混凝土组合桥面结构技术指南》^[66]等。其它则多为地方标准^[67-71], 特别是针对桥梁领域, 依托相关工程实践进行了总结。

此外, 目前还有多部标准在编或已完成审查待发布, 如中国工程建设标准协会标准《超高性能混凝土结构设计技术规程》^[72]、交通运输部公路行业标准《公路桥涵超高性能混凝土应用规范》和《钢-高韧性混凝土组合桥面设计与施工规范》等。

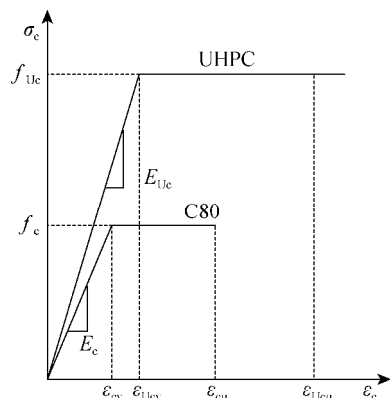
总体上看, 国内 UHPC 材料规范标准发展较快, 结构方面则以地方标准和桥梁工程为主, 团体和行业标准编制也已启动。

2 UHPC 结构基本设计原理和方法

UHPC 在材料力学性能方面与普通混凝土差异很大, 其结构基本设计原理和方法也与 RC 结构有显著区别。本节从材料本构、构件受弯、构件受剪和钢筋锚固设计 4 个方面进行阐述。

2.1 材料本构

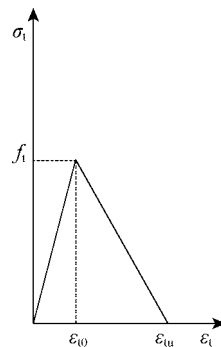
如图 3 和图 4 所示, UHPC 材料单轴拉压本构与普通混凝土差别明显^[73-74]。对于设计用单轴受压曲线, UHPC 材料峰值强度 f_{uc} (轴心抗压强度设计值) 超过 60 MPa, 普通 C80 混凝土峰值强度 f_c



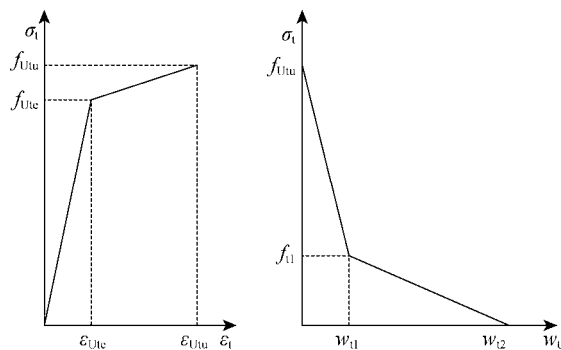
σ_c is compressive stress; ϵ_c is compressive strain; f_{Uc} and f_c are design value of axial compressive strength of UHPC and C80 concrete; E_{Uc} and E_c are elastic modulus of UHPC and C80 concrete; ϵ_{Ucy} and ϵ_{cy} are peak compressive strain of UHPC and C80 concrete; ϵ_{Ucu} and ϵ_{cu} are ultimate compressive strain of UHPC and C80 concrete.

图 3 UHPC 与 C80 混凝土单轴受压本构对比

Fig. 3 Comparison of uniaxial compressive constitutive relations between UHPC and C80 concrete



(a) C80 concrete



(b) UHPC tensile hardening

σ_t is tensile stress; ϵ_t is tensile strain; w_t is crack width; f_t is design value of axial tensile strength of C80 concrete; ϵ_{t0} is peak tensile strain of C80 concrete; ϵ_{tu} is ultimate tensile strain of C80 concrete; f_{Ute} and ϵ_{Ute} are cracking tensile strength and strain of UHPC; f_{Utu} is design value of axial tensile strength of UHPC; ϵ_{Utu} is ultimate tensile strain of UHPC; f_{t1} is characteristic tensile stress in descending branch; w_{t1} is characteristic crack width in descending branch; w_{t2} is crack width when tensile stress drops to zero.

图 4 UHPC 与 C80 混凝土单轴受拉本构对比

Fig. 4 Comparison of uniaxial tensile constitutive relation between UHPC and C80 concrete

约为 35.9 MPa; UHPC 材料弹性模量 E_{Uc} 超过 4.3×10^4 MPa, 普通 C80 混凝土弹性模量 E_c 则为 3.8×10^4 MPa; UHPC 材料峰值微压应变 ε_{Ucy} 超过 2 600, 普通 C80 混凝土峰值微压应变 ε_{cy} 为 2 150; UHPC 材料极限微压应变 ε_{Ucu} 超过 3 900, 普通 C80 混凝土极限微压应变 ε_{cu} 为 3 000^[75-76]。

而对于设计用单轴受拉曲线, 在钢纤维掺量合适的情况下(一般不低于 1.5%), UHPC 材料峰值强度 f_{Utu} (轴心抗拉强度设计值)约为 4.5~9.0 MPa, 显著高于普通 C80 混凝土峰值强度 f_t (为 2.22 MPa), 且还会表现出明显的受拉应变硬化特征, 极限微拉应变 ε_{Utu} 不低于 1 000^[75-76]。普通混凝土开裂后强度则会迅速下降, 其抗拉作用通常可以忽略。

2.2 受弯构件计算方法

基于 UHPC 与普通 C80 混凝土单轴拉压本构的显著区别, UHPC 受弯构件的承载力计算方法也与普通 RC 构件有很大区别, 主要体现在需要考虑 UHPC 抗拉强度的贡献, 如图 5 所示, 在平截面假定成立的前提下, 相关计算原理仍然与 RC 构件类似。

由于 UHPC 抗拉延性好, 自身抗拉强度也较高, 在建筑结构中可以考虑不配筋或少配筋的情形, 以充分发挥 UHPC 的强度优势。配筋量的减小对于预制构件的生产、运输和安装往往会带来很多便捷。这一点与 RC 构件有较大区别, 因为实际工程中一般不会应用素混凝土梁和少筋梁。但是, 由于 UHPC 抗压强度很高, 在不配筋或少配筋情况下, 很可能受压区高度较小, 甚至在受拉区 UHPC 丧失抗拉能力和钢筋屈服的情况下, 受压边缘仍达不到极限压应变, 这需要在设计中予以关注。

2.3 受剪构件计算方法

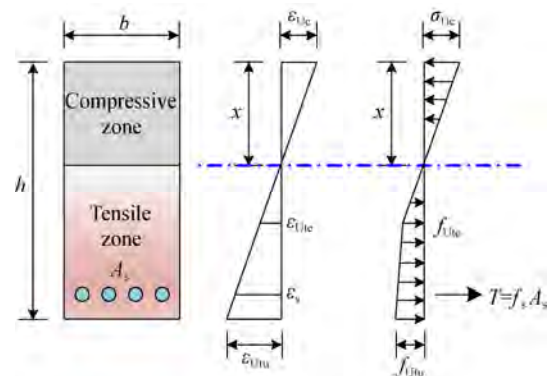
UHPC 优越的抗压和抗拉能力也同样带来构件抗剪能力的显著提升^[77]。在规范设计体系下^[76], 可表现为抗剪截面限制条件的放松、抗剪承载力的提升以及箍筋配置要求的降低。具体变化的程度有赖于相关试验数据的支撑, 简单的处理方法是沿用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[76]中的公式形式, 采用 UHPC 的强度进行替换, 并考虑纤维特征进行修正。

2.4 钢筋锚固相关规定

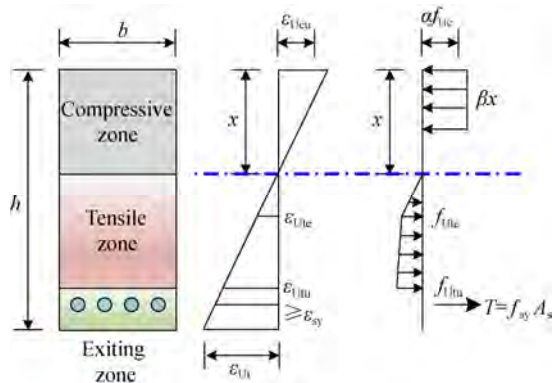
国内外学者开展了大量关于钢筋在 UHPC 中的粘结滑移和锚固性能研究^[78-82], 总体上证明钢筋与 UHPC 的粘结强度显著高于普通混凝土, 某些试验结果甚至认为锚固长度仅需要 3~5 倍钢筋直径, 高

强钢筋的锚固长度甚至可小于 3 倍钢筋直径。因此, UHPC 构件中钢筋的锚固计算和构造规定与 RC 构件也应当有较大变化。具体简化的程度同样需要大量试验数据的支撑, 简单的处理方法是沿用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[76]中的公式形式, 采用 UHPC 的抗拉强度进行替换, 并对外形系数进行修正。由于 UHPC 的抗拉强度设计值是混凝土的 2~5 倍, 由此带来的锚固长度的减小也相当可观, 另一方面是锚固构造的变化, 如端部弯钩和平直段尺寸, 也应进行相应简化。

采用合适的 UHPC 材料本构、弯剪设计方法和钢筋锚固规定, 将显著减小 UHPC 构件尺寸、降低配筋率、简化配筋构造。



(a) Edge UHPC reaches the ultimate tensile strain



(b) Steel bar yields and the edge UHPC reaches the ultimate compressive strain

h and b are height and width of section; A_s is section area of tensile reinforcement; σ_{Uc} is compressive stress of UHPC; ε_{Uc} and ε_{Ue} are compressive strain and tensile strain of UHPC; x is compressive zone height of UHPC; ε_s and f_s are tensile strain and stress of reinforcement; T is tensile force of steel rebar; α and β are equivalent rectangular stress graph coefficient; ε_{Ut} is tensile strain of UHPC; f_{sy} and ε_{sy} are yield stress and strain of reinforcement.

图 5 UHPC 受弯构件计算方法示意

Fig. 5 Schematic diagram of calculation method of UHPC flexural member

3 UHPC 建筑结构构件研究进展

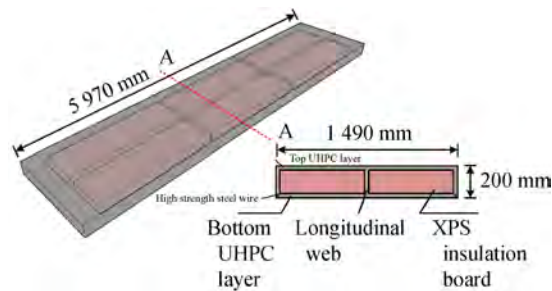
UHPC 在建筑结构中的应用较少, 尤其是在主受力结构中的应用还少有报道。本文总结了本课题组在 UHPC 房屋建筑结构构件方面的研究进展, 以期展示 UHPC 作为房屋结构构件的可行性和优势。

3.1 新型轻质保温夹芯屋面板

国内现存大量平房粮仓, 其采用的复合彩钢瓦屋面板或大型混凝土屋面板, 面临锈蚀损坏和保温效果差等问题, 亟需升级改造。为避免加固屋架钢结构, 对替代屋面板的要求包括轻质、保温、防水、耐久等多个方面。典型工程屋面板尺寸为 $1.5\text{ m} \times 6\text{ m}$, 要求自重不大于 $35\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 能够承受的附加均布荷载标准值不低于 $200\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

如图 6 所示, 本课题组提出了 1 种新型预应力 UHPC 轻质保温夹芯屋面板。板厚 200 mm , 板内填充保温板, UHPC 顶板、底板和腹板厚度分别仅有 5 mm 、 6 mm 和 7 mm 。在板底角部分别设置一根直径 5 mm 预应力钢丝, 采用先张法在构件预制过程中完成张拉, 构件自重不超过 $35\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

根据堆载试验结果, 采用的 UHPC 抗拉强度为 10 MPa 时, 开裂荷载达到了 $255\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 满足设计要求。由此可以看出, 采用预应力 UHPC 夹芯板, 在满足设计承载力要求前提下能够大幅减轻结构自重, 且由于不开裂, 耐久性也非常可靠, 大幅提升了普通钢筋混凝土或预应力混凝土构件的技术水平。



XPS—Extruded polystyrene foam; A is section line.

图 6 UHPC 保温夹芯屋面板

Fig. 6 UHPC insulation sandwich slab

3.2 新型夹芯楼板/墙板

针对装配式低层-多层建筑的发展需求, 本课题组研发了一种基于 UHPC 夹芯楼板和墙板的以干式连接为主的装配式墙板结构体系^[83-84], 如图 7 所示。其基本板件构造如图 8 所示, 包括上下面层, 周边一圈实心区域用于设置预埋件与其他板件连接, 内部采用开孔的挤塑聚苯乙烯(XPS)泡沫保温板形成了大量 UHPC 短柱以连接上下 UHPC 面层。整块板可不配置钢筋或预应力筋。典型应用场景中, UHPC 夹芯楼板的长度为 4700 mm , 厚度为 150 mm , 其中夹芯层的厚度为 110 mm , 上下 UHPC 薄层的厚度分别为 20 mm 。夹芯板四周的实心封边区域沿楼板长边方向宽度为 215 mm , 沿短边方向为 100 mm 。典型楼板与上下墙板连接如图 7 所示, 上下墙板对应位置分别设置预埋件, 通过螺栓实现连接, 中间墙板拼缝处预留孔洞, 便于螺栓穿过, 并将上下墙板与中间楼板压紧连成整体。

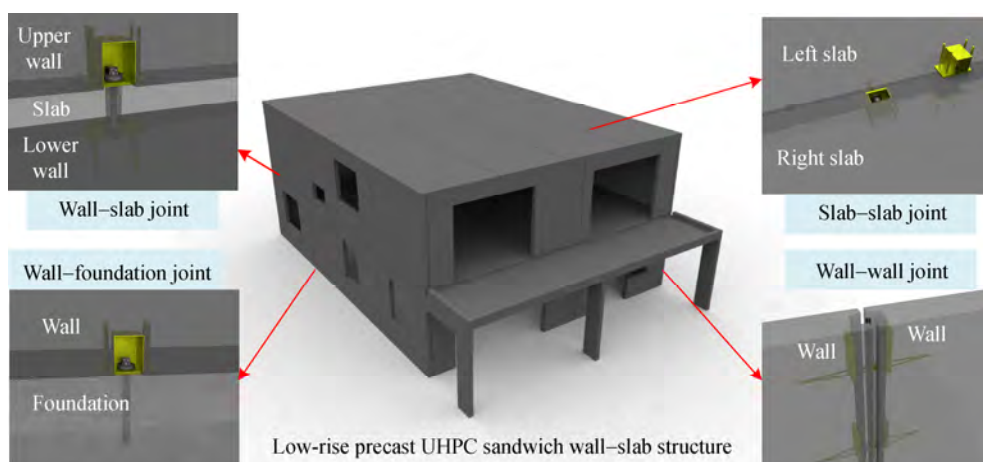


图 7 UHPC 装配式墙板结构体系

Fig. 7 Precast UHPC sandwich wall-slab structure

该结构的优点包括: 1) 综合密度可低于水, 质量轻, 便于运输吊装; 2) 四面不出筋, 且形状规则

便于自动化生产及大规模运输, 尺寸灵活可适配多种户型; 3) 构件采用干法连接, 能有效减少现场施

工时间,易于控制施工质量;4)实现了结构功能与保温功能一体化,可进一步缩短施工周期;5)结构不开裂,耐久性能优异。

由于夹芯板中 XPS 保温板带有孔洞,浇筑过程中容易出现排气不畅等问题而导致拆模后出现脱空

现象,为此,Ding 等^[83]开展 UHPC 夹芯板的浇筑工艺测试,以探索出 1 种可靠的浇筑方法,保证产品质量,其在实验室进行的工艺试验表明:使用平模法浇筑能够确保空气排出,不会造成脱空现象,产品质量可靠可控。

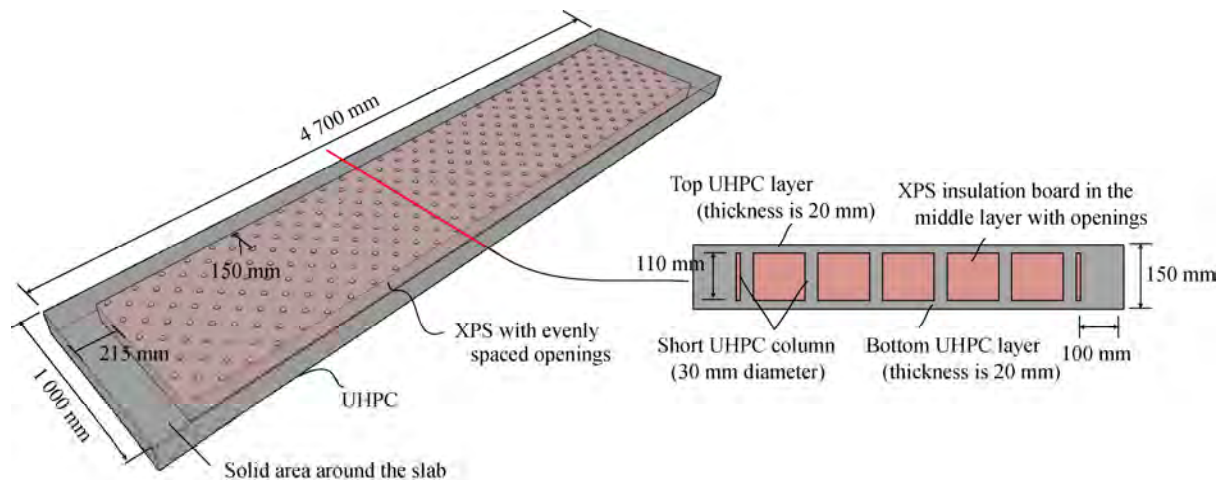


图 8 UHPC 夹芯楼板-墙板构造图

Fig. 8 UHPC sandwich slab-wall construction drawing

随后通过四点弯曲试验研究了 UHPC 夹芯楼板的抗弯能力(图 9),考察了配筋率、短柱间距等参数的影响^[83],结果表明:1) UHPC 夹芯板的破坏模式为受弯破坏,即使不配筋,在构件开裂之后也能继续承受荷载,具有一定的延性;2) 不配筋夹芯楼板可承受 $9 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 的换算附加均布荷载,能保证构件在正常使用过程中不开裂;3) 配置适量钢筋(直径 6 mm、间距 150 mm)可进一步增强构件的延性及承载能力,且不会带来构件加工制作的困难。

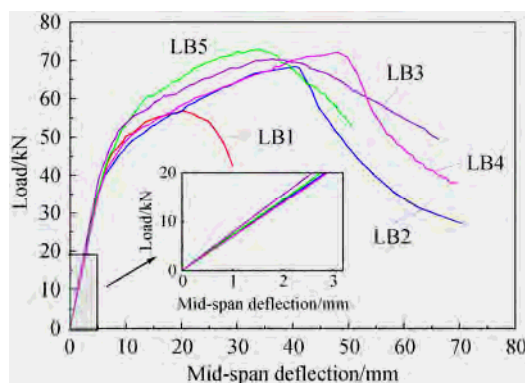


图 9 UHPC 夹芯楼板跨中荷载-挠度曲线^[83]

Fig. 9 Mid-span load-deflection curves of the UHPC sandwich slab

进一步通过往复加载试验研究了不配筋 UHPC 夹芯墙板的抗震性能(图 10),试件尺寸为 $1425 \text{ mm}\times$

$1550 \text{ mm}\times 150 \text{ mm}$ 。试件通过 1 个水平作动器在墙顶施加往复荷载,由于 UHPC 夹芯墙板应用场景为低、多层装配式建筑,墙板轴力小,因此试验中不施加轴力。结果表明:墙板破坏模式为受拉区 UHPC 开裂,水平裂缝变宽延伸导致试件受弯破坏,且所有试件的水平主裂缝高度均位于夹芯墙板实心截面与空心截面的交界处。试件达到峰值承载力后荷载下降较快,峰值位移角约为 0.21%。

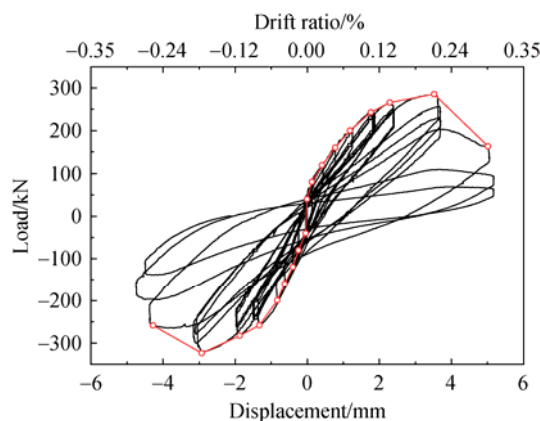


图 10 UHPC 夹芯墙板加载点荷载-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves at the loading point of the UHPC sandwich wall panel

为进一步揭示 UHPC 预制夹芯板装配式建筑结构体系的整体抗震性能,对 1 个包含墙板(含门窗洞

口)、楼板、墙板-基础节点、墙板-墙板节点和墙板-楼板节点等所有基本构件和连接形式的二层子结构进行抗震性能试验^[84](图 11), 分析结构整体的承载能力、刚度、耗能性能、破坏模式等。考虑实验室的场地条件以及加载能力, 按照 UHPC 预制夹芯板构件平面尺寸缩尺比为 1:2 且厚度不变的方式确定子结构构件尺寸如图 11a 和图 11b 所示。子结构由 8 块墙板和 4 块楼板组成, 构件之间采用软索连接、预埋钢板焊接或螺栓连接。试验结果表明: 整个结构安装耗时少, 需要的人工少, 所有节点连接的安装方便快捷; 楼板靠近墙板的两端未出现裂缝, 裂缝主要出现在墙板上, 正负向加载的开裂荷载在峰值荷载的 70% 以上, 此时开裂荷载值约为结构重力荷载代表值的 7 倍; 在承载力到达峰值之前, 所有节点均未出现明显的破坏现象。综上所述, 新型 UHPC 夹芯板装配式墙板结构即使在大震下也不开裂, 具有优越的抗震性能。

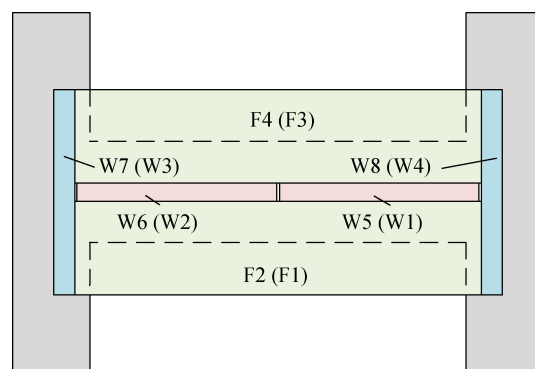
3.3 Waffle 板试验

UHPC waffle 板在桥梁工程中得到了一定的应用^[85], 具有自重轻、用料省、刚度大、耐久性好等优势, 在建筑结构大跨度楼面和屋面中也有良好的应用前景。如图 12a 所示, 对一块四边支承的 waffle 板开展 1:2 缩尺加载试验。纵向长 2 796 mm, 计算跨径 2 500 mm, 横向宽 2 400 mm, 计算跨径 2 100 mm, 顶板厚 40 mm, 纵横肋高 102 mm(含板厚), 宽 79 mm, 纵横边梁高 132 mm(含板厚)。横肋 7 道, 纵肋 3 道。顶板内配置单层双向直径 8 mm 的分布钢筋, 间距 75 mm; 肋中配置 2 根直径 8 mm 的底筋, 以及间距 225 mm、直径 6 mm 的箍筋; 边梁配置 4 根直径 8 mm 的底筋。

采用四边简支方式, 分两阶段加载。第一阶段, 加载方式为通过分配梁实现四点加载, 近似均布荷载, 每级荷载 10 kN, 且仅在弹性段范围内进行加载, 出现裂缝后停止加载, 并拆除分配梁转入第二阶段加载。第二阶段加载方式为板中间单点加载, 为避免应力集中, 在千斤顶和试验板之间添加一块 250 mm×500 mm 的垫板。在弹性段内, 按照 10 kN 每级进行加载, 进入塑性段后, 则采用位移控制的方式进行加载, 直至试验板发生破坏。

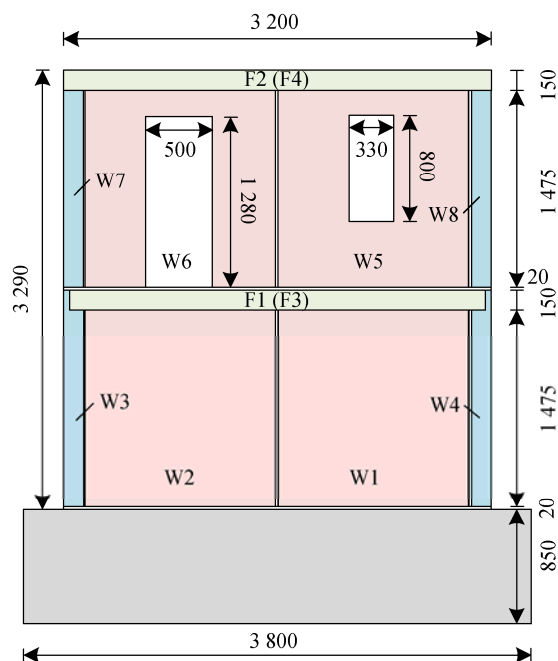
在四点加载过程中(图 12b), 加载到 60 kN 之前, 试验板底部无明显现象; 加载至 60 kN 时, 加载点附近的纵肋上开始出现裂缝; 加载至 100 kN 时, 加载点附近的横肋上开始出现裂缝; 加载到 180 kN 时, 纵肋上的最大裂缝宽度为 0.11 mm, 此时试验

板跨中挠度 5.87 mm, 停止第一阶段的加载。



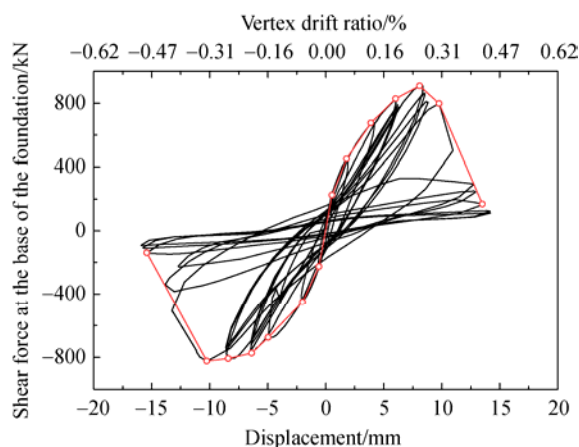
F1-F4: floor panel; W1-W8: wall panel.

(a) Top view size of substructure specimen



Note: unit is millimeter.

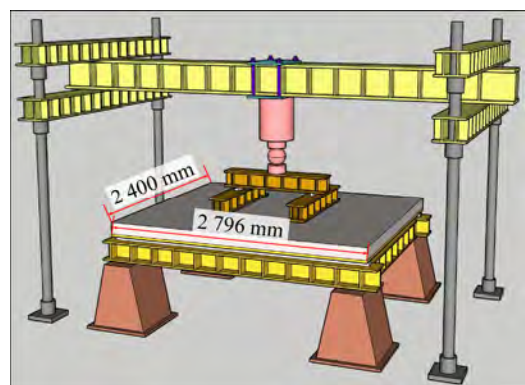
(b) Front view size of substructure specimen (mm)



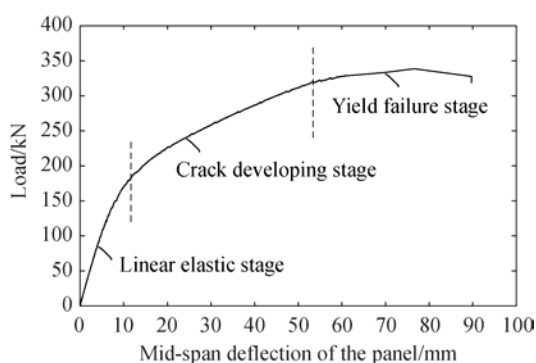
(c) Load-displacement curves at the top of specimen

图 11 UHPC 子结构整体抗震性能试验

Fig. 11 Seismic performance test of UHPC substructure



(a) Four-sided simply supported loading pattern



(b) Mid-span load-deflection curve

图 12 UHPC waffle 板静力加载试验

Fig. 12 Static loading test of UHPC waffle slab

在单点加载过程中, 加载至 322 kN, 板中心挠度 62 mm 时, 顶部加载垫板周围出现环状剪切裂缝; 试验板最终发生冲切破坏, 极限荷载是 338.4 kN, 达到极限荷载时板的跨中挠度为 76.7 mm, 此时试件尚未发生严重破坏, 仍可继续加载; 当荷载下降到 327.6 kN, 板跨中挠度达到 89.69 mm 时, 荷载突然开始大幅下降, 停止加载。

基于试验结果并还原到实际结构中, 对于 5~6 m 跨度的双向板, 换算成约 $9 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 的均布压力作用下, waffle 板不开裂, 即常规荷载条件下能够实现正常使用阶段不开裂。如果按照裂缝宽度 0.1 mm 和挠跨比 1:400 进行控制, 则可换算成约 $27 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 的均布压力作用。板的极限承载力对应约 $50 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 的均布压力作用, 承载力非常高。总体上 UHPC waffle 板优化空间还很大, 可以适用于重载大跨的工程需求, 并且自重很轻, 仅为 $2.6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, 相当于约 100 mm 厚的混凝土板。结合便捷的接缝构造, 在装配式组合楼盖中也有良好的应用前景。

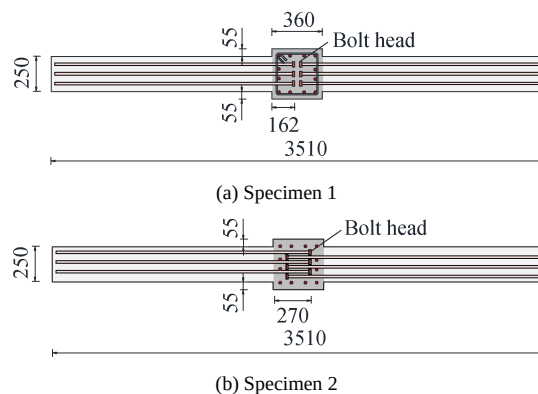
4 UHPC 建筑结构节点研究进展

UHPC 与钢筋的粘结强度显著高于混凝土, 以下简要介绍近年来 UHPC 建筑结构节点方面的研究

进展, 以期展现 UHPC 用于建筑结构节点的可行性和优势。

对于常用的装配整体式 RC 框架, 其梁柱构件在节点处后浇混凝土连接成整体。在高烈度区, 其节点区配筋通常极其复杂, 包括抗剪所需的密集箍筋、4 个方向梁上部纵筋贯穿、下部纵筋锚固所需的锚固段及弯钩或端锚等构造、柱纵筋贯穿, 导致施工困难且施工质量难以保证。将 UHPC 应用于梁柱节点处, 有望显著简化配筋构造, 包括减少箍筋、降低纵筋锚固长度、简化端部锚固构造等。同时将 UHPC 局部应用于节点核心区, 用量较少, 具有较好的综合经济效益。

如图 13 所示, 设计 2 个节点试件^[86], 柱和梁的截面的尺寸分别为 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ 和 $250 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$, 柱高 1 450 mm, 梁长 3500 mm。柱内钢筋布置相同, 包括 12 根直径 20 mm 的纵筋和间距 80 mm、直径 10 mm 的四肢箍筋(配箍率为 1.12%)。梁的双肢箍筋直径为 10 mm, 其中塑性铰区箍筋间距为 80 mm, 其余位置间距为 150 mm。梁顶纵筋为 4 根通长布置的直径 16 mm 钢筋, 梁底纵筋为 3 根直径 18 mm 的钢筋。在图 13 中: 试件 1 在节点核心区布置柱内一半的箍筋(配箍率为 1.12%), 梁底纵筋锚固长度为 9 倍直径; 试件 2 在节点核心区未布置箍筋(配箍率为 0%), 梁底纵筋锚固长度为 15 倍直径。为避免发生预制混凝土和后浇 UHPC 界面剪切滑移破坏, 在梁与节点核心区交界处布置了 U 型加强筋。



Note: unit is millimeter.

图 13 装配式 RC 框架后浇 UHPC 梁柱节点试件

Fig. 13 UHPC beam-column joint specimen in prefabricated RC frame

2 个试件的试验结果相似, 均发生了典型的梁端弯曲塑性铰破坏。节点核心区整体完好, 呈现密集分布的细微斜裂缝, 试件 1 的节点区斜裂缝最大

宽度为 0.13 mm, 试件 2 为 0.07 mm。试验结果表明: UHPC 具有较高的抗剪强度, 在节点区未布置箍筋的情况下(试件 2), 仍然保持节点完好, 滞回曲线饱满(图 14), 与试件 1 几乎没有区别, 说明 UHPC 可完全替代节点区的箍筋。梁底纵筋采用螺栓锚头方式所需锚固长度只需要 9 倍纵筋直径甚至更低, 对于常规建筑尺寸的节点, 可避免节点 2 个方向梁底纵筋的冲突问题, 能有效减少施工困难, 保证施工质量。

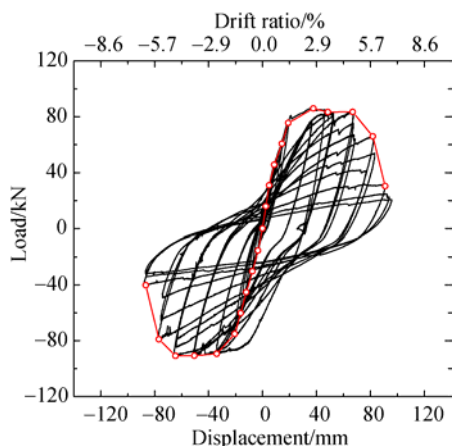


图 14 南侧梁端荷载-位移曲线

Fig. 14 Load-displacement curves of southern beam end

5 结论与展望

1) UHPC 能够有效提升房屋建筑结构的综合性能, 包括但不限于: UHPC 高强轻质的特点有助于建筑部品化、构件轻量化; UHPC 高耐久性的优势使其在全寿命成本方面具有很强的竞争性; UHPC 高延性和优异的耗能能力使其运用于结构关键受力部位时, 可较大幅度减少构件配筋, 简化施工, 并有效提高结构整体抗震性能。

2) UHPC 在房屋建筑中的应用目前主要集中于非主受力构件, 如预制 UHPC 部件(楼梯、外墙板)和 UHPC 小品。由于现阶段房屋建筑结构对直接建造成本的敏感性, UHPC 的应用仍不尽人意。

3) UHPC 材料方面的研究已较为全面, 但缺乏与结构专业之间的衔接和协调, 许多材料层面的研究成果无法有效转化应用于结构层面, 而结构层面对材料真正的性能需求也没有得到充分的认识。材料结构一体化设计方面的滞后在很大程度上限制了 UHPC 的应用推广。

4) 针对建筑结构造型体系多变、功能需求复杂等特点, 建议未来加强针对专门应用场景、以需求为导向的工程化研究。由于 UHPC 具有良好的可设

计性, 应当结合特定条件下特定需求的具体工程结构开展针对性研究, 充分发挥 UHPC 性能优势, 解决工程难题, 提升结构性能。例如针对建筑结构中存在的复杂受力构件、复杂连接节点、大跨重载梁、异形构件等可利用 UHPC 结合高强钢筋、预应力、钢板组合等技术取得良好的效果。此外针对建筑工业化、低碳绿色化等新的需求, UHPC 也能够发挥意想不到的作用。

参考文献:

- [1] WILLE K, NAAMAN A E, EL-TAWIL S. Optimizing ultra-high performance fiber-reinforced concrete[J]. *Concr Int*, 2011, 33(9): 35-41.
- [2] WILLE K, NAAMAN A E, PARRA-MONTESINOS G J. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way[J]. *ACI Mater J*, 2011, 108(6): 46-54.
- [3] HUNG C C, CHEN Y T, YEN C H. Workability, fiber distribution, and mechanical properties of UHPC with hooked end steel macro-fibers[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 260: 119944.
- [4] 赵筠, 廉慧珍, 金建昌. 钢-混凝土复合的新模式: 超高性能混凝土(UHPC/UHPFRC)之二: 配制、生产与浇筑, 水化硬化与微观结构, 力学性能[J]. *混凝土世界*, 2013(11): 60-71.
ZHAO Yun, LIAN Huizhen, JIN Jianchang. *China Concr (in Chinese)*, 2013(11): 60-71.
- [5] THERESA M A. Ultra-high-performance concrete: An emerging technology report[R]. ACI 239R, Detroit: ACI (American Concrete Institute), 2018: 1-21.
- [6] AGHDASI P, HEID A E, CHAO S H. Developing ultra-high performance fiber-reinforced concrete for large-scale structural applications[J]. *ACI Mater J*, 2016, 113(5): 559-570.
- [7] HUNG C C, EL-TAWIL S, CHAO S H. A review of developments and challenges for UHPC in structural engineering: behavior, analysis, and design[J]. *J Struct Eng* 2021, 147(9): 03121001.
- [8] 邵旭东, 樊伟, 黄政宇. 超高性能混凝土在结构中的应用[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(1): 1-13.
SHAO Xudong, FAN Wei, HUANG Zhengyu. *China Civil Eng J (in Chinese)*, 2021, 54(1): 1-13.
- [9] GRAYBEAL B, BRÜHWILER E, KIM B S, et al. International perspective on UHPC in bridge engineering[J]. *J Bridge Eng*, 2020, 25(11): 04020094.
- [10] GU C P, SUN W, GUO L P, et al. Ultrahigh performance concrete: A potential material for sustainable marine construction in view of the service life[J]. *Appl Mech Mater*, 2013, 2733(438/439): 108-112.
- [11] ZHU Z W, YUAN T, XIANG Z, et al. Behavior and fatigue performance of details in an orthotropic steel bridge with UHPC-deck plate composite system under in-service traffic flows[J]. *J Bridge Eng*, 2018, 23(3): 04017142.
- [12] QIN S Q, ZHANG J B, HUANG C L, et al. Fatigue performance evaluation of steel-UHPC composite orthotropic deck in a long-span cable-stayed bridge under in-service traffic[J]. *Eng Struct*, 2022, 254: 113875.
- [13] 王洋, 邵旭东, 沈秀将, 等. 钢板条-UHPC组合桥面结构静力及疲

- 劳试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 261–272.
- WANG Yang, SHAO Xudong, SHEN Xiujiang, et al. China J Highw Transp (in Chinese), 2021, 34(8): 261–272.
- [14] HUNG C C, LEE H S, CHAN S N. Tension-stiffening effect in steel-reinforced UHPC composites: Constitutive model and effects of steel fibers, loading patterns, and rebar sizes[J]. Compos B Eng, 2019, 158: 269–278.
- [15] 张文华, 张仔祥, 刘鹏宇, 等. 多尺度纤维增强超高性能混凝土的轴心抗拉和抗压行为[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1155–1167.
- ZHANG Wenhua, ZHANG Zixiang, LIU Pengyu, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1155–1167.
- [16] 刘琼伟, 邵旭东, 邱明红, 等. 超高性能混凝土厚度对轴拉应力–应变–裂缝的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1168–1176.
- LIU Qiongwei, SHAO Xudong, QIU Minghong, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1168–1176.
- [17] 余睿, 范定强, 孙美娟, 等. 钢纤维掺量及其3D空间结构对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2313–2321.
- YU Rui, FAN Dingqiang, SUN Meijuan, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(11): 2313–2321.
- [18] 邱明红, 邵旭东, 胡伟业, 等. 钢筋UHPC矩形截面受弯构件的钢筋应力简化计算[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 106–117.
- QIU Minghong, SHAO Xudong, HU Weiye, et al. China J Highw Transp (in Chinese), 2021, 34(8): 106–117.
- [19] OPPONG K, SAINI D, SHAFEEI B. Ultrahigh-performance concrete for improving impact resistance of bridge superstructures to overheight collision[J]. J Bridge Eng, 2021, 26(9): 4021060.
- [20] HU R, FANG Z, SHI C J, et al. A review on seismic behavior of ultra-high performance concrete members[J]. Adv Struct Eng, 2021, 24(5): 1054–1069.
- [21] ELMORSY M, HASSAN W M. Seismic behavior of ultra-high performance concrete elements: State-of-the-art review and test database and trends[J]. J Build Eng, 2021, 40: 102572.
- [22] 胡锐, 方志, 许宝丹. 不同配箍率和钢纤维掺量UHPC柱抗震性能试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 65–77.
- HU Rui, FANG Zhi, XU Baodan. China J Highw Transp (in Chinese), 2021, 34(8): 65–77.
- [23] 邵旭东, 曹君辉. 面向未来的高性能桥梁结构研发与应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 41–58.
- SHAO Xudong, CAO Junhui. J Archit Civil Eng (in Chinese), 2017, 34(5): 41–58.
- [24] 邵旭东, 邱明红. 基于UHPC材料的高性能装配式桥梁结构研发[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(2): 160–167.
- SHAO Xudong, QIU Minghong. J Xi'an Univ Archit Technol Nat Sci Ed (in Chinese), 2019, 51(2): 160–167.
- [25] 许斌, 童欢, 陈露一. 浩吉铁路洞庭湖大桥钢桥面铺装UHPC性能研究及应用[J]. 世界桥梁, 2022, 50(3): 86–92.
- XU Bin, TONG Huan, CHEN Luyi. World Bridg (in Chinese), 2022, 50(3): 86–92.
- [26] 刘诚, 樊健生, 聂建国, 等. 钢–超高性能混凝土组合桥面系中栓钉连接件的疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 139–146.
- LIU Cheng, FAN Jiansheng, NIE Jianguo, et al. China J Highw Transp (in Chinese), 2017, 30(3): 139–146.
- [27] 邱明红, 邵旭东, 甘屹东, 等. 单向预应力UHPC连续箱梁桥面体系优化设计研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 87–97.
- QIU Minghong, SHAO Xudong, GAN Yidong, et al. China Civil Eng J (in Chinese), 2017, 50(11): 87–97.
- [28] 杨松, 陈钊, 齐兵, 等. 钢–超高性能混凝土组合箱梁静力性能试验研究与数值模拟[J]. 工程力学, 2022, 39(8): 88–102.
- YANG Song, CHEN Fan, QI Bing, et al. Eng Mech (in Chinese), 2022, 39(8): 88–102.
- [29] 樊健生, 王哲, 杨松, 等. 钢–超高性能混凝土组合箱梁弹性弯曲性能试验研究及解析解[J]. 工程力学, 2020, 37(11): 36–46.
- FAN Jiansheng, WANG Zhe, YANG Song, et al. Eng Mech (in Chinese), 2020, 37(11): 36–46.
- [30] WANG Z, NIE X, FAN J S, et al. Experimental and numerical investigation of the interfacial properties of non-steam-cured UHPC-steel composite beams[J]. Constr Build Mater, 2019, 195: 323–339.
- [31] XIAO J L, ZHOU M, NIE J G, et al. Flexural behavior of steel-UHPC composite slabs with perfbond rib shear connectors[J]. Eng Struct, 2021, 245: 112912.
- [32] XIAO J L, DONG B, NIE J G, et al. Full-scale experimental study on continuous UHPC slabs of steel-UHPC composite deck system[J]. Structures, 2022, 43: 1716–1731.
- [33] 邵旭东, 陈玉宝, 何广, 等. 钢-UHPC组合桁式拱桥拱肋与腹杆节点性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(5): 54–66.
- SHAO Xudong, CHEN Yubao, HE Guang, et al. China Civil Eng J (in Chinese), 2022, 55(5): 54–66.
- [34] 韩玉, 翁贻令, 解威威. 超高性能混凝土(UHPC)箱形拱桥关键技术[J]. 公路, 2022, 67(3): 170–175.
- HAN Yu, WENG Yiling, XIE Weiwei. Highway (in Chinese), 2022, 67(3): 170–175.
- [35] 邵旭东, 陈玉宝, 何广, 等. 基于PBL-栓钉组合剪力键的钢-UHPC组合桁式拱桥节点拉拔性能研究[J]. 桥梁建设, 2022, 52(1): 33–40.
- SHAO Xudong, CHEN Yubao, HE Guang, et al. Bridge Constr (in Chinese), 2022, 52(1): 33–40.
- [36] 中国混凝土与水泥制品协会UHPC分会. 2019年度中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告[J]. 混凝土世界, 2020(2): 30–43.
- [37] 中国混凝土与水泥制品协会超高性能水泥基材料与工程技术(CCPA-UHPC)分会. 2021年中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告(上)[J]. 混凝土世界, 2022(2): 24–33.
- [38] 中国混凝土与水泥制品协会超高性能水泥基材料与工程技术(CCPA-UHPC)分会. 2021年中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告(下)[J]. 混凝土世界, 2022(3): 32–38.
- [39] 中国混凝土与水泥制品协会超高性能水泥基材料与工程技术(UHPC)分会. 2020年中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告[J]. 混凝土世界, 2021(4): 20–29.
- [40] Birelli G. Designing and building with UHPFRC[M]. Chichester, UK: Wiley-ISTE, 2011: 21–41.
- [41] Galleo. Ultra-thin hybrid staircase[EB/OL]. <https://www.galleo.co/project/ultra-thin-hybrid-staircase>.
- [42] Szolyd Development. Perkins Will UHPC stair treads[EB/OL]. <https://szolyd.com/portfolio/perkins-will-stair-treads>.
- [43] 欧阳伟, 黄泽. 超高性能混凝土在装配式建筑设计中的应用[J]. 住宅产业, 2022(7): 65–68.
- OUYANG Wei, HUANG Ze. Hous Ind (in Chinese), 2022(7): 65–68.
- [44] CCPA-UHPC分会, CCPA国际合作中心. 欧洲UHPC技术与应用发展调研学习及启示[J]. 混凝土世界, 2020(4): 14–26.
- [45] 吴望苗, 张乐华, 吴界纬, 等. 超高性能混凝土UHPC在装配式的

- 建筑表皮中的应用与展望[J]. 城市建筑, 2021, 18(17): 100–105.
- WU Wangmiao ZHANG Lehua, WU Jiewei, et al. Urban Archit (in Chinese), 2021, 18(17): 100–105.
- [46] 陈宝春, 韦建刚, 苏家战, 等. 超高性能混凝土应用进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(2): 10–20.
- CHEN Baochun, WEI Jiangang, SU Jiazhan, et al. J Archit Civil Eng (in Chinese), 2019, 36(2): 10–20.
- [47] 魏久淇, 李磊, 王世合, 等. 超高性能混凝土临空板接触爆炸破坏效应实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(4): 28–35.
- WEI Jiuqi, LI Lei, WANG Shihe, et al. Explos Shock Waves (in Chinese), 2022, 42(4): 28–35.
- [48] HANIFEZHDEH M, ARYAN H, GENCTURK B, et al. Structural response of steel jacket-UHPC retrofitted reinforced concrete columns under blast loading[J]. Mater (Basel), 2021, 14(6): 1521.
- [49] YOO D, BANTHIA N. Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast[J]. Constr Build Mater, 2017, 149: 416–431.
- [50] 钟锐, 张峰颂. 超高性能混凝土、纤维增强高强及高延性混凝土抗侵蚀性能比较[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2423–2434.
- ZHONG Rui, ZHANG Fengling. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(11): 2423–2434.
- [51] 柳献, 张蛟龙, 蒋子捷, 等. UHPC加固盾构隧道衬砌结构试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 181–190.
- LIU Xian, ZHANG Jiaolong, JIANG Zijie, et al. China J Highw Transp (in Chinese), 2021, 34(8): 181–190.
- [52] 仲从春, 李双喜, 孟远, 等. 超高性能混凝土抗冲磨性能试验研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(1): 129–133.
- ZHONG Congchun, LI Shuangxi, MENG Yuanyuan, et al. Yellow River, 2022, 44(1): 129–133.
- [53] AFGC (French Association of Civil Engineering–French authorities of civil engineering structure design, and control). Ultra high performance fiber-reinforced concretes[S]. Bagneux, France, 2013.
- [54] Association Francaise de Normalisation. NF P18-470 Ultra-high performance fiber-reinforced concrete: Specification, performance, production and conformity[S]. 2016.
- [55] Association Francaise de Normalisation. NF P18-710 National addition to Eurocode 2–Design of concrete structures: Specific rules for ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC)[S]. 2016.
- [56] SIA 2052 Recommendations: Ultra-high performance fiber cement-based composites (UHPFRC) –Construction material, dimensioning and application[S]. 2016.
- [57] JSCE. Recommendations for design and construction of ultra high strength fiber reinforced concrete structures (Draft)[S]. Tokyo, 2006.
- [58] SCHMIDT M, LEUTBECHER T, PIOTROWSKI S, et al. The German guideline for ultra-high performance concrete[C]// Proceedings of the FGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, Montpellier, France, 2017: 2–4.
- [59] CSA standard S806-02, Design and construction of building components with fibre reinforced polymers[S]. Toronto, Canada, 2002.
- [60] CSA S6: 19. Canadian highway bridge design code[S]. Toronto, Canada, 2019.
- [61] KCI-M-12-003, Design recommendations for ultra-high performance concrete K-UHPC[S]. Seoul, Korea, 2012.
- [62] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [63] 中国建筑材料联合会, 中国混凝土与水泥制品协会. T/CB/MF 37—2018 (T/CCPA 7—2018) 超高性能混凝土基本性能与试验方法[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.
- [64] 中国工程建设标准化协会. T/CECS 10107—2020 超高性能混凝土(UHPC)技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [65] 中国建筑材料联合会, 中国混凝土与水泥制品协会. T/CCPA 20—2020 (T/CB/MF 96—2020) 超高性能混凝土预混料[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2020.
- [66] 中国公路学会. T/CHTS 10036—2021 高韧性混凝土组合桥面结构技术指南[S]. 北京: 人民交通出版社, 2021.
- [67] 河北省市场监督管理局. DB 13/T 2946—2019超高性能混凝土制备与工程应用技术规程[S]. 河北, 2019.
- [68] 广东省交通运输厅. GD JTG/T A01—2015 超高性能轻型组合桥面结构技术规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [69] 湖南省质量技术监督局. DB 43/T1173—2016 钢-超高韧性混凝土轻型组合结构桥面技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [70] 四川省住房和城乡建设厅. DBJ 51/T 089—2018 四川省城镇超高韧性组合钢桥面结构技术标准[S]. 四川: 西南交通大学出版社, 2018.
- [71] 四川省住房和城乡建设厅. DBJ 51/T138—2020四川省城镇节段预制超高性能混凝土桥梁技术标准[S]. 四川: 西南交通大学出版社, 2020.
- [72] 中国建筑材料联合会, 中国混凝土与水泥制品协会. 超高性能混凝土结构设计规程(征求意见稿)[S]. 北京, 2020.
- [73] 欧阳雪, 史才军, 史金华, 等. 超高性能混凝土受压力学性能及其弹性模量预测[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 296–304.
- OUYANG Xue, SHI Caijun, SHI Jinhua, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(2): 296–304.
- [74] 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.
- SU Jie, LIU Wei, SHI Caijun, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(2): 305–311.
- [75] 方志, 郑辉, 杨剑, 等. 超高性能混凝土结构的设计方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 59–67.
- FANG Zhi, ZHENG Hui, YANG Jian, et al. J Archit Civil Eng (in Chinese), 2017, 34(5): 59–67.
- [76] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010—2010混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [77] 王晓飞, 周海龙, 王海龙. 超高性能混凝土的抗剪强度[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2190–2195.
- WANG Xiaofei, ZHOU Hailong, WANG Hailong. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(8): 2190–2195.
- [78] QI J N, CHENG Z, MA Z J, et al. Bond strength of reinforcing bars in ultra-high performance concrete: Experimental study and fiber-matrix discrete model[J]. Eng Struct, 2021, 248: 113290.
- [79] WANG D D, SHI Q Q, WANG Y X, et al. Evaluation of bond-slip behavior of reinforcement in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. Struct Concr, 2021, 22(4): 2391–2406.
- [80] 郑七振, 让梦, 李鹏. 超高性能混凝土与钢筋的黏结性能试验研究[J]. 上海理工大学学报, 2018, 40(4): 398–402.
- ZHENG Qizhen, RANG Meng, LI Peng. J Univ Shanghai Sci

- Technol (in Chinese), 2018, 40(4): 398–402.
- [81] 梁芮, 黄远. 高强钢筋与超高性能混凝土黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 294–302.
LIANG Rui, HUANG Yuan. J Build Struct, 2022, 43(9): 294–302.
- [82] 胡翔翔, 梁兴文, 史庆轩, 等. 高强钢筋与超高性能混凝土黏结性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(4): 534–544.
HU Aoxiang, LIANG Xingwen, SHI Qingxuan, et al. J Xi'an Univ Archit Technol Nat Sci Ed (in Chinese), 2021, 53(4): 534–544.
- [83] DING R, SUN Y T, FAN J S, et al. Experimental and theoretical study on flexural behaviour of a new UHPC sandwich slab[J]. Eng Struct, 2022, 267: 114673.
- [84] DING R, SUN Y T, NIE X, et al. Experimental study on seismic behaviour of an unreinforced precast wall-slab structure based on UHPC sandwich panels[J]. J Build Eng, 2023, 68: 106197.
- [85] SRIRAM A, PETERSEN B, SRITHARAN S. Design guide for precast UHPC waffle deck panel system, including connections[R]. No. FHWA-HIF-13-032, U S: Federal Highway Administration, 2013:1-127.
- [86] ZHANG Z Y, DING R, NIE X, et al. Seismic performance of a novel interior precast concrete beam-column joint using ultra-high performance concrete[J]. Eng Struct, 2020, 222: 111145.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



樊健生, 清华大学土木工程系教授。任中国钢结构协会组合结构分会副理事长、中国公路学会桥梁和结构工程分会副理事长、中国建筑学会建筑结构分会常务理事、中国土木工程学会桥梁及结构工程分会常务理事、《建筑结构学报》《中国公路学报》编委等。主要研究方向为组合结构、高性能混凝土结构、工程结构信息化数字化。主持十三五/十四五国家重点研发计划项目、杰出青年基金、基金委重大项目课题、基金委创新研究群体等项目。获国家技术发明一等奖(排名第 2)、国家科技进步奖(创新团队, 排名第 3)、国家科技进步二等奖 2 项(排名第 1、第 8)。



丁然, 清华大学土木工程系副研究员。中国核工业勘察设计协会核工业结构专业委员会委员、中国工程建设标准化协会预应力工程专业委员会委员。主持国家重点研发计划课题和子课题、国家自然科学基金面上项目和青年基金等纵向课题 7 项。发表学术期刊论文 60 余篇, 其中 SCI 论文 30 余篇。授权发明专利 6 项。参编《组合结构通用规范》等 7 部国家和行业协会技术标准。获国家科技进步奖(创新团队)、国家科技进步二等奖各 1 项, 获中国钢结构协会科学技术特等奖和一等奖各 1 项。主要从事高性能组合结构和新材料结构研究。