

基于高延性混凝土的装配式梁柱节点抗震性能研究综述

韩 剑¹, 杨超超¹, 黄镇斌^{2,3}, 潘姣姣^{2,3*}

¹中建海创(陕西)建设有限公司, 陕西 西安

²西京学院土木工程学院, 陕西 西安

³陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2025年6月8日; 录用日期: 2025年6月29日; 发布日期: 2025年7月9日

摘 要

装配式混凝土结构的发展是建筑工业化的必由之路, 装配式结构能够提高机械化水平、加快施工速度、实现建造过程中低排放低耗能, 实现建筑业的绿色发展。装配式梁柱节点是框架结构中梁和柱构件连接的纽带。在地震作用下, 节点核心区处于一个对角受压、一个对角受拉的剪压复合应力状态, 节点核心区极易发生剪切破坏, 耗能能力降低。高延性混凝土(HDC)是一种具有高韧性、高抗裂性能、高耐久性和高耐损伤能力的新型结构材料, 在拉伸和剪切荷载作用下具有多裂缝开展和应变硬化特征。采用HDC作为装配式框架的节点, 可以显著改善传统混凝土材料的脆性, 提高装配式框架的抗震性能和变形能力。另外, 将高延性混凝土用于装配式领域, 具有施工方便、节省材料, 综合造价低等明显优势, 具有广泛的运用前景。

关键词

装配式梁柱节点, 高延性混凝土(HDC), 装配式

A Review on Seismic Performance of Precast Beam-Column Joints Using High Ductility Concrete

Jian Han¹, Chaochao Yang¹, Zhenbin Huang^{2,3}, Jiaojiao Pan^{2,3*}

¹China Construction Haichuang (Shaanxi) Construction Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Department of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

³Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 8th, 2025; accepted: Jun. 29th, 2025; published: Jul. 9th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 韩剑, 杨超超, 黄镇斌, 潘姣姣. 基于高延性混凝土的装配式梁柱节点抗震性能研究综述[J]. 土木工程, 2025, 14(7): 1648-1656. DOI: 10.12677/hjce.2025.147177

Abstract

The development of prefabricated reinforced concrete structures is an inevitable path for the building industrialization. Prefabricated reinforced concrete structures can improve the mechanization levels, accelerate the construction speed, and achieve the low emissions and the low energy consumption during the construction process, thereby promoting the green development in the construction industry. Prefabricated beam-column joints serve as the connecting links between beams and columns in frame structures. Under the earthquake action, the core region of the joint is subjected to a shear-compression stress state, with one diagonal under compression and the other under tension. This core region is highly prone to the shear failure, leading to reduced the energy dissipation capacity. High Ductility Concrete (HDC), also known as Engineered Cementitious Composite (ECC), is an innovative structural material featuring exceptional toughness, crack resistance, durability, and damage tolerance. It exhibits distinctive strain-hardening behavior and multiple micro-cracking characteristics under tensile and shear loading. The application of HDC in precast joint systems can effectively mitigate the brittleness inherent in conventional concrete materials, thereby enhancing both seismic performance and deformation capacity of precast frame structures. Furthermore, the implementation of HDC in prefabricated construction offers notable benefits including simplified construction procedures, material efficiency, and cost-effectiveness, demonstrating broad application prospects in modern structural engineering.

Keywords

Precast Beam-Column Joints, High Ductility Concrete (HDC), Precast

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混凝土作为全球应用最广泛的不可替代性土木工程材料，其技术发展向以工业固废资源化利用为核心的演进路径。通过粉煤灰、硅灰等工业副产物对水泥熟料的替代，在实现资源能源集约化利用的同时，构建了兼具环境效益与性能提升的可持续发展模式。高性能混凝土展现出高工作性、高耐久性、优异抗渗性能等优势[1]-[4]。但混凝土的抗压强度提高后，其抗拉、抗剪强度和粗骨料的强度相对较低，材料脆性增大，因而降低了混凝土结构的抗震性能，使高性能混凝土在高烈度地震区的应用受到限制。

为提升混凝土基材的韧性特征与抗裂性能，纤维增强技术促进了高延性纤维混凝土(High Ductile Fiber Reinforced Concrete, 以下简称 HDC)这一新材料的发展。该材料通过纤维协同增强机制，展现出卓越的抗拉强度、显著的变形能力及高能量耗散特性，其拉伸应变硬化效应与多缝开裂特征可有效改善混凝土结构的抗震韧性与抗剪承载性能，为土木工程结构功能升级提供了新型材料解决方案。

传统现浇混凝土建造模式存在工业化水平低、资源消耗高、环境污染突出等短板，与建筑产业现代化转型需求存在显著矛盾。在此背景下，预制装配式混凝土结构技术成为“十四五”期间建筑工业化的重点发展方向，其标准化生产、模块化施工特性更契合绿色建造与可持续发展战略要求。

钢筋混凝土框架的震害集中于梁柱节点与塑性铰区域，结构抗震设计本质是对关键损伤区的有效控制。基于高延性混凝土优异的抗剪性能、变形协调性及多级耗能机制，在装配式框架结构的预期损伤区域实施 HDC 局部增强设计，既能充分发挥其材料性能优势提升结构抗倒塌能力，又可通过损伤集中控制

降低震后修复成本,这种差异化材料应用策略对提升装配式混凝土结构的灾害具有重要理论价值与工程推广意义。

因此,本文对高延性混凝土的装配式梁柱节点抗震性能进行综述,符合国家节能、环保和可持续发展需要,符合我国建筑产业现代化发展的需要,将为高延性混凝土在预制装配式框架结构潜在损伤部位应用提供理论依据,还将为高烈度区预制装配式混凝土结构的开发与应用提供重要保障,具有重要的理论意义和实财价值。

2. 高延性混凝土研究现状

2.1. 高延性混凝土材料性能研究

高延性纤维水泥基复合材料(HDC)作为一种新型高性能结构材料[5],其特征就在于采用低纤维体积掺量的非连续短纤维作为增强相,通过常规混凝土制备工艺实现材料性能的跨越式提升[6]。该材料体系自20世纪初[7]启动纤维增强混凝土基础理论研究以来,经20世纪60年代首次引入复合材料力学框架进行机理阐释[8],逐步发展为现代土木工程领域的重要创新方向[9][10]。

尽管学术界 Ultrahigh Toughness Cementitious Composite [11]、High Performance Fiber Reinforced Cement Composite [12]、Engineered Cementitious Composite [13]等多种命名方式,但其核心特性均表现为显著的拉伸应变硬化效应及优异的延性耗能特征(图1),并伴随典型的多缝开裂机制。材料发展进程中,早期以聚乙烯(PE)纤维增强体系(PE-ECC)开展工程化验证,1997年V. C. Li团队与日本学者Kanda合作,创新性地引入聚乙烯醇(PVA)纤维,成功开发出PVA-ECC材料体系[14]。该材料以水泥基胶凝材料或粒径 $\leq 5\text{ mm}$ 的细骨料为基体,通过 $\leq 2\%$ 体积率的PVA纤维实现应变硬化特性,极限拉应变突破3%并呈现稳定的多缝开裂模式。

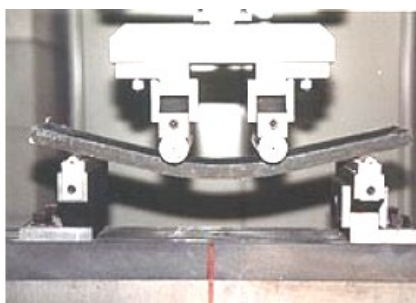


Figure 1. Ductility performance of HDC under flexural loading
图 1. 弯曲荷载作用下 HDC 的延性性能

材料性能验证方面,Y. M. Lim [15]等通过基础设施修补对比试验证实,ECC在延性性能及裂缝控制方面显著优于传统混凝土及钢纤维混凝土。V. C. Li团队[16]开展的轴拉试验表明,ECC极限拉伸应变可达普通混凝土的300倍以上,且在饱和多缝开裂状态下裂缝间距稳定控制在3 mm以内。P. Suthiwarapirak和T. Matsumoto [17][18]等通过四点弯曲疲劳试验揭示,PVA-ECC的疲劳失效过程包含裂缝萌生与扩展双阶段特征,展现出超长的疲劳寿命和显著的延性退化抗性。

国内研究领域,学者们针对PVA-ECC开展了系统性研究。庞超明团队[19]通过胶砂比优化及粉煤灰掺量调控,开发出基于矿山尾砂的生态型ECC(ECO-ECC);高淑玲[20]构建了PVA-FRCCs双线性和三线性拉伸本构模型;蔡向荣[21]通过抗压试验证实ECC弹性模量为普通混凝土的 $1/3 \sim 1/2$,但峰值应变提升2倍,并据此提出专项韧性评价标准;李艳则系统建立了HPFRCC材料的非线性本构方程体系。这些研究为HDC材料的工程应用提供了坚实的理论基础与技术支撑。

2.2. 高延性混凝土构件性能研究

1988 年, Marshall 和 Cox [22]通过配置钢筋的 ECC 矩形试件试验揭示:在钢筋屈服前, ECC 构件与普通钢筋混凝土构件力学响应相似;当钢筋进入屈服阶段后, ECC 材料凭借其优异的准应变硬化特性开始主导承载过程,其极限拉应变能力较普通混凝土得到显著提升。

1992 年, LiVC [23]在抗剪性能研究中指出, ECC 材料独特的剪切变形能力可实现抗剪钢筋的部分或完全替代。后续开展的 Ohno 剪切梁试验[24]进一步证实:垂直主拉应力方向, ECC 梁呈现高密度裂缝分布特征,其剪切响应呈现显著的延性特征,这使得钢筋增强 ECC 梁(R/ECC)的抗剪配筋量可大幅削减。

1995 年, LiVC 团队[25] [26]针对 ECC 悬臂梁的断裂特性试验表明: ECC 材料对构件几何缺陷具有极强包容性,凹槽构造未引发明显的承载力退化,验证了该材料体系优异的工程适用性。1997 年 Kabele 等[27]通过墙体构件对比试验发现: PVA-ECC 墙体较普通混凝土墙体承载力提升 30%以上,变形能力提高 2 倍,这主要归因于 ECC 基体优异的应力扩散与损伤重分布机制。

1998 年 Kanda 等[28]开展的循环剪切试验揭示: R/ECC 梁裂缝密度达钢筋混凝土梁的 4 倍,裂缝宽度控制在 0.1 mm 以内,破坏模式由脆性斜拉破坏转为延性剪切滑移破坏,这种转变源于 ECC 材料对剪应力的有效承担。2002 年 Xia 等[29]通过预制 HPFRCC 填充墙改进钢框架的地震模拟试验表明:设置弱化截面的 HPFRCC 墙板可实现 1.5%的层间位移角,显著提升结构耗能能力;同期 Kesner 等[30] [31]的数值模拟与试验验证: R/ECC 预制墙板较普通混凝土墙板抗剪强度提升 35%,其延性特征在大变形阶段仍可维持结构整体性。

2007 年 Parra-Montesinos 等[32]的 FRCC 梁试验表明:当塑性铰转角达 6.0%时,试件仅出现毛细裂缝并保持 2.7 MPa 的峰值剪应力,这种优异的抗损伤特性使其具备替代部分抗剪箍筋的潜力。本课题组 2014 年开展的剪力墙抗震试验[33] [34]进一步证实:塑性铰区采用 HDC 的墙体构件变形能力提升 50%以上,弯剪斜裂缝开展得到有效控制,最终破坏时受压区呈现密集微裂缝分布,保护层完整性优异,表现出卓越的耐损伤性能。

3. 高延性混凝土装配式框架梁柱节点研究现状

3.1. 纤维混凝土梁柱节点研究现状

密歇根大学早期开展的纤维增强混凝土节点研究,通过采用该材料作为后浇增强层,显著提升了节点的能量耗散能力。为验证纤维增强效应对钢筋-混凝土界面性能的影响,该校开展了系统的黏结滑移试验,结果表明:在较大位移变形条件下,界面黏结强度维持率超过 85%,且混凝土保护层保持完整无剥落,这种界面黏结特性对提升结构地震耗能能力及整体性具有重要工程价值。

2000 年, Para-Montesinos 等[35]针对 9 个钢筋混凝土柱-钢梁组合节点开展拟静力试验,研究证实:采用 ECC 材料替代传统混凝土进行节点加固后,可实现抗剪箍筋配置量减少 50%以上;破坏形态表现为 R/ECC 柱基体仅出现微裂缝扩展,而普通混凝土柱呈现显著的保护层剥落与主裂缝开展。2005 年, Parra-Montesinos [36]系统阐述了应变硬化型 HPFRCC 材料的抗震应用技术,指出该类材料在框架结构中可实现:高剪力作用下的变形容许度提升 3 倍以上,单周循环耗能能力提高 40%~60%,并具备替代结构抗剪钢筋的潜力。

国内研究方面,湖北工业大学研究团队[37] [38]针对 UHTCC 梁柱节点开展试验表明:节点核心区裂缝密度较普通混凝土提高 3~5 倍,配箍率增加对节点抗剪承载力提升幅度不足 5%,但轴压比参数对抗剪强度存在 15%~20%的增强效应。大连理工大学路建华[39]的节点试验进一步验证:在节点核心区及邻近梁端区域采用 UHTCC 材料后,抗剪承载力提升 25%~30%,箍筋配置量可减少 40%;极限状态下节点剪

切变形贡献的梁端位移占比达 50%~65%。陈红光[40]的补充研究则表明：UHTCC 节点塑性铰区裂缝宽度控制在 0.2 mm 以内，轴压比提高虽可增强抗剪强度，但会导致变形能力降低 10%~15%。

上述研究体系化地验证了高延性混凝土材料在节点构件中的技术优势：通过多缝开裂机制实现裂缝宽度精细化控制，凭借优异的界面黏结性能维持结构整体性，最终达成抗剪钢筋配置需求显著降低与结构耗能能力大幅提升的双重技术目标。

3.2. 装配式框架梁柱节点研究现状

常见的装配式混凝土框架节点连接形式包括后浇整体式、预应力拼接、焊接连接及螺栓连接等类型，其力学性能受构造细节影响存在显著差异。针对不同连接形式的抗震性能，国内外学者开展了系统化试验与理论研究，主要研究进展如下：

(1) PRESSS 项目节点研究

1990 年启动的 PRESSS 国际合作项目(预制混凝土结构抗震研究计划)对装配式混凝土抗震技术发展产生深远影响。该项目聚焦高效预制抗震体系开发，为规范修订提供技术支撑，其框架节点研究取得以下突破[41]：

德克萨斯大学创新提出库仑摩擦连接与非线性弹性连接方案。非线性弹性连接节点通过梁体连续配筋与无粘结预应力技术，在 2%层间位移角内保持低残余变形特性($\leq 0.5\%$)，超过该阈值后耗能能力提升 30%~40%；库仑摩擦连接节点采用摩擦耗能机制，试验测得单周循环耗能密度达普通节点的 2.3 倍，残余变形降低 60%以上。

加利福尼亚大学针对预应力拼接节点开展深化研究。1993 年 Priestley 建立理论分析模型，揭示非粘结预应力筋在节点区保持弹性的力学机制，提出该类节点残余变形可控制在最大位移的 2.2%以内。1996 年完成的 8 个足尺节点试验表明：当层间位移角达 4%时，节点刚度退化率不足 15%，抗剪承载力保持率超过 90%，箍筋用量较现浇节点减少 40%。基于试验数据，研究团队构建了考虑不考虑残余变形的双参数滞回模型，为结构分析提供关键工具。

(2) 后浇整体式节点研究

1995 年新西兰 Restrepo [42]完成 6 个预制框架节点试验，采用直筋与弯钩钢筋混合搭接构造。结果表明：试件位移延性系数突破 6.0，层间侧移容许值达 2.4%，等效粘滞阻尼比提升至 0.35，其抗震性能全面超越现浇对比件。研究提出基于锚固长度系数的设计方法，明确弯钩钢筋最小弯折半径要求。

同期澳大利亚 Loo [43]对 18 个牛腿/无牛腿节点开展对比研究。试验数据显示：无牛腿预制节点较带牛腿节点延性显著提升，耗能能力得到提高。研究建议取消传统牛腿构造以改善节点区应力分布。

(3) 预应力拼接节点研究

1993 年 Cheok [44]在美国 NIST 项目框架下完成 14 个节点试验，系统考察预应力筋布置形式与粘结条件影响。试验表明：预制节点位移延性系数较现浇节点得到提升；纤维砂浆填充界面使裂缝宽度控制率上升，破坏模式呈现预应力筋屈服与混凝土压碎的双重特征，累计耗能达现浇节点的 90%。

国内研究方面，赵斌等[45][46]通过高强混凝土节点对比试验证实：后浇整体式预制节点与现浇节点具有等效抗震能力，而全装配式节点需配置钢纤维混凝土以改善节点核心区抗剪性能，箍筋用量得到减少董挺峰等[47][48]开展的混合连接试验表明：无粘结预应力节点残余变形率下降，较现浇节点降低，延性系数提升；引入非预应力筋后，混合连接节点耗能能力与现浇节点相当，但恢复力特性得到提升。

(4) 其他连接形式研究

1993 年 Ersoy [49]针对焊接连接节点开展研究，采用三面钢板焊接构造。对比试验显示：焊接节点初始刚度较现浇节点显著提升，耗能能力相当，侧板加强措施使节点核心区剪切变形降低。2006 年土耳其

Ertas [50]完成多类型节点对比试验,结果表明:螺栓连接节点和后浇整体节点达到了现浇节点的抗震性能;螺栓节点在强度、延性、耗能等方面优于其他预制节点。张月[51]等提出了一种由耗能螺栓和预应力筋连接的装配式钢管混凝土柱-RC 梁节点,对 8 个十字形梁柱节点进行了低周往复加载试验,结果表明:在加载过程中耗能螺栓的钢棒能够通过受拉耗能,装配式梁柱节点最终由预制梁混凝土塑性铰失效导致承载力下降。

3.3. 装配式混凝土框架结构抗震性能研究

1999 年加利福尼亚大学开展五层预制混凝土结构拟动力试验,系统验证基于位移设计方法的工程适用性。该设计体系通过屈服层间位移角与延性系数确定等效阻尼比,结合弹性反应谱反算需求刚度与抗力,最终完成连接界面构造设计。试验加载至 UBC 规范 4 类地震强度 50%时,结构呈现优异抗震性能。对比研究表明,后浇节点虽具备更高耗能能力,但伴随强度衰减与残余变形增加,验证了 Priestley [52]位移设计法的有效性。

2005 年 Blandón [53]通过 1/2 缩尺双层框架试验揭示关键构造问题。后浇整体式节点在低周反复加载下,梁底弯钩钢筋发生显著滑移,直至结构破坏时钢筋应变仅,未达到屈服应变。压杆-拉杆模型分析表明:当直锚长度 $<8d$ 时,节点抗剪机制由桁架作用退化为摩擦传力,导致纵筋应力重分布,该构造不适用于抗震框架设计。

2006 年吕西林团队[54]完成螺栓连接预制框架拟动力试验,系统评估多维度抗震性能。试验表明:螺栓节点在层间位移角 1/25 时仍保持较高的峰值承载力,滞回环饱满度较好,能量耗散效率较焊接节点得到提升。损伤分布显示:梁柱连接界面保持完整,塑性变形集中于梁端塑性铰区,验证了干式连接体系优异的抗倒塌能力。

杜修力等[55]提出基于 SMA 滑动摩擦阻尼器(SMASFD)的自复位摇摆柱,柱底强轴两侧对称布置 SMASFD,为 H 型钢柱提供自复位和耗能能力,经拟静力试验后,SMASFD 和柱身恢复至初始位置,各部件无损伤。

朱张峰等[56]针对预制钢管-混凝土组合柱提出预应力增强的芯管连接方案,通过结构通高设置的后张无黏结预应力筋进行压接增强。研究表明,其装配试件可总体实现“等同现浇”的抗震性能,也应考虑刚度提高导致结构地震力效应增大的不利影响。

4. 结论

本文从高延性混凝土材料性能研究、高延性混凝土构件性能研究、纤维混凝土梁柱节点研究、装配式框架梁柱节点研究现状及装配式混凝土框架结构抗震性能研究五个方面进行了综述分析,得到以下结论:

- (1) 高延性混凝土具有良好的延性和控裂性能,其在极限拉伸应变可达普通混凝土的 300 倍以上。
- (2) 高延性混凝土材料对构件的几何缺陷具有极强包容性,凹槽构造未引发明显的承载力退化,具有优异的工程适用性。
- (3) 纤维增强混凝土节点在较大位移变形条件下,保持着较好的界面粘结性能,且其保护层保持完整无剥落,这种界面黏结特性对提升结构地震耗能能力及整体性具有重要工程价值。
- (4) 总结并分析了 PRESSS 项目节点研究、后浇整体式节点研究、预应力拼接节点研究以及其他连接形式研究。

基金项目

西安市科学技术协会青年人才托举计划项目(项目编号: 959202413093); 西京学院高层次人才专项基

金(项目编号: XJ21B21)。

参考文献

- [1] 姚谦峰, 苏三庆. 地震工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
- [2] 梁兴文, 王社良, 李晓文. 混凝土结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 冯乃谦. 高性能混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [4] 王楠. 超高韧性水泥基复合材料与既有混凝土粘结工作性能试验研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [5] 李艳. 高性能纤维增强水泥基复合材料力学性能研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [6] 沈荣熹, 崔琪, 李清海. 新型纤维增强水泥基复合材料[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
- [7] [英]汉南特 D. J. 纤维水泥与纤维混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [8] Krenchel, H. (1964) Fibre Reinforcement. Akademisk Forlag.
- [9] 王晓刚, 毛新奇, 赵铁军. 聚乙烯醇纤维水泥基复合材料[J]. 青岛建筑工程学院学报. 2004, 25(4): 28-31.
- [10] 林晖. 掺 PVA 纤维混凝土的力学及变形性能研究[D]: [博士学位论文] 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [11] 徐世烺, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 45-60.
- [12] Parra-Montesinos, G.J., Peterfreund, S.W. and Chao, S.H. (2005) Highly Damage-Tolerant Beam-Column Joints through Use of High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites. *ACI Structural Journal*, **102**, 487-495.
- [13] Li, V.C. (2003) On Engineered Cementitious Composites (ECC). *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1**, 215-230. <https://doi.org/10.3151/jact.1.215>
- [14] 李艳, 梁兴文, 刘泽军. PVA 纤维增强水泥基复合材料: 性能与设计[J]. 混凝土, 2009(12): 54-57.
- [15] Lim, Y.M. and Li, V.C. (1997) Durable Repair of Aged Infrastructures Using Trapping Mechanism of Engineered Cementitious Composites. *Cement and Concrete Composites*, **19**, 373-385. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00026-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00026-7)
- [16] Li, V.C., Wang, S. and Wu, C. (2001) Tensile Strain-Hardening Behavior of PVA-ECC. *ACI Mater Journal*, **98**, 483-492.
- [17] Suthiwarapirak, P., Matsumoto, T. and Kanda, T. (2002) Flexural Fatigue Failure Characteristics of an Engineered Cementitious Composite and Polymer Cement Mortars. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, **2002**, 121-134. https://doi.org/10.2208/jscej.2002.718_121
- [18] Matsumoto, S.P.T. and Kanda, T. (2002) Mechanism of Multiple Cracking and Fracture of HDCCs under Failure Flexure. *Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (HDCC)-Application and Evaluation*, Takayama, 259-268.
- [19] 庞超明, Leung C K Y, 孙伟. 高掺量粉煤灰高延性水泥基复合材料的制备和性能[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(12): 2071-2077.
- [20] 高淑龄. PVA 纤维增强水泥基复合材料假应变硬化及断裂特性研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [21] 蔡向荣. 超高韧性水泥基复合材料基本力学性能和应变硬化过程理论分析[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [22] Marshall, D.B. and Cox, B.N. (1988) A J-Integral Method for Calculating Steady-State Matrix Cracking Stresses in Composites. *Mechanics of Materials*, **7**, 127-133. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(88\)90011-7](https://doi.org/10.1016/0167-6636(88)90011-7)
- [23] Li, V.C. and Leung, C.K.Y. (1992) Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites. *Journal of Engineering Mechanics*, **118**, 2246-2264. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1992\)118:11\(2246\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1992)118:11(2246))
- [24] Li, V.C., Mishra, D.K., Naaman, A.E., Wight, J.K., LaFave, J.M., Wu, H., et al. (1994) On the Shear Behavior of Engineered Cementitious Composites. *Advanced Cement Based Materials*, **1**, 142-149. [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(94\)90045-0](https://doi.org/10.1016/1065-7355(94)90045-0)
- [25] Maalej, M., Hashida, T. and Li, V.C. (1995) Effect of Fiber Volume Fraction on the Off-Crack-Plane Fracture Energy in Strain-Hardening Engineered Cementitious Composites. *Journal of the American Ceramic Society*, **78**, 3369-3375. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1995.tb07979.x>
- [26] Li, V.C. and Hashida, T. (1993) Engineering Ductile Fracture in Brittle-Matrix Composites. *Journal of Materials Science Letters*, **12**, 898-901. <https://doi.org/10.1007/bf00455611>

- [27] Kable, P., Li, V.C., Horii, H., Kanda, T., *et al.* (1997) Use of BMC for Ductile Structural Members. *Proceedings of 5th International Symposium on Brittle Matrix Composites (BMC-5)*, Warsaw, 13-15 October 1997, 570-588.
- [28] Kanda, T., Matsuzaki, Y. and Li, V.C. (1998) Application of Pseudo Strain-Hardening Cementitious Composites to Shear Resistant Structural Elements. In: *Fracture Mechanics of Concrete Structures Proceedings*, AEDIFICATIO Publishers, 1477-1490.
- [29] Xia, Z. and Naaman, A.E. (2002) Behavior and Modeling of Infill Fiber-Reinforced Concrete Damper Element for Steel-Concrete Shear Wall. *ACI Structural Journal*, **99**, 727-739.
- [30] Kesner, K.E. and Billington, S.L. (2004) Tension, Compression and Cyclic Testing of Engineered Cementitious Composite Materials. Technical Report MCEER-04-0002, Multi-Disciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York.
- [31] Kesner, K.E. and Billington, S.L. (2003) Experimental Response of Precast Infill Panel Connections and Panels Made with DFRCC. *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1**, 327-333. <https://doi.org/10.3151/jact.1.327>
- [32] Parra-Montesinos, G.J. and Chompreda, P. (2007) Deformation Capacity and Shear Strength of Fiber-Reinforced Cement Composite Flexural Members Subjected to Displacement Reversals. *Journal of Structural Engineering*, **133**, 421-431. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2007\)133:3\(421\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2007)133:3(421))
- [33] 邓明科, 寇佳亮, 等. 延性纤维混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(7): 170-177.
- [34] 党争, 梁兴文, 邓明科, 等. 纤维增强混凝土剪力墙抗震性能试验研究与理论分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(6): 12-22.
- [35] Parra-Montesinos, G. and Wight, J.K. (2000) Seismic Behavior, Strength and Retrofit of RC Column-to-Steel Beam Connections. Report No. UMCEE 00-09, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, 296.
- [36] Parramontesinos, G.J. (2005) High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites: An Alternative for Seismic Design of Structures. *Aci Structural Journal*, **102**, 668-675.
- [37] 程彩霞. PVA 纤维水泥基复合材料增强框架节点抗震性能研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2009.
- [38] 苏骏, 徐世烺. 高轴压比下 UHTCC 梁柱节点抗震性能试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010(7): 53-56.
- [39] 路建华. 超高韧性水泥基复合材料梁柱节点的低周往复试验研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [40] 陈红光. PVA 纤维混凝土增强框架节点的力学性能研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2012.
- [41] 范力. 装配式预制混凝土框架结构抗震性能研究综述[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2007.
- [42] Restrepo, J.I., Park, R. and Buchanan, A.H. (1995) Tests on Connections of Earthquake Resisting Precast Reinforced Concrete Perimeter Frames of Buildings. *PCI Journal*, **40**, 44-61. <https://doi.org/10.15554/pci.07011995.44.61>
- [43] Loo, Y.C. and Yao, B.Z. (1995) Static and Repeated Load Tests on Precast Concrete Beam-to-Column Connections. *PCI Journal*, **40**, 106-115. <https://doi.org/10.15554/pci.03011995.106.115>
- [44] Cheok, G.S. and Lew, H.S. (1991) Performance of Precast Concrete Beam-to-Column Connections Subject to Cyclic Loading. *PCI Journal*, **36**, 56-67. <https://doi.org/10.15554/pci.05011991.56.67>
- [45] 赵斌, 吕西林, 刘海峰. 预制高强混凝土结构后浇整体式梁柱组合件抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(6): 22-28.
- [46] 赵斌, 吕西林, 刘丽珍. 全装配式预制混凝土结构梁柱组合件抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(1): 81-87.
- [47] 董挺峰, 李振宝, 周锡元, 等. 无黏结预应力装配式框架内节点抗震性能研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(2): 144-148.
- [48] 李振宝, 董挺峰, 闫维明, 等. 混合连接装配式框架内节点抗震性能研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(10): 895-900.
- [49] Ersoy, U. and Tankut, T. (1993) Precast Concrete Members with Welded Plate Connections under Reversed Cyclic Loading. *PCI Journal*, **38**, 94-100. <https://doi.org/10.15554/pci.07011993.94.100>
- [50] Ertas, O., Ozden, S. and Ozturan, T. (2006) Ductile Connections in Precast Concrete Moment Resisting Frames. *PCI Journal*, **51**, 66-76. <https://doi.org/10.15554/pci.05012006.66.76>
- [51] 张月, 李冬生. 耗能螺栓连接装配式钢管混凝土柱-RC 梁节点恢复力模型研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(4): 309-318.
- [52] Priestley, M.J.N. (1996) The PRESSS Program Current Status and Proposed Plans for Phase III. *PCI Journal*, **41**, 22-40. <https://doi.org/10.15554/pci.03011996.22.40>
- [53] Blandón, J.J. and Rodríguez, M.E. (2005) Behavior of Connections and Floor Diaphragms in Seismic-Resisting Precast

Concrete Buildings. *PCI Journal*, **50**, 56-75. <https://doi.org/10.15554/pcij.03012005.56.75>

- [54] 范力, 吕西林, 赵斌, 等. 装配式预制混凝土框架结构拟动力试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(6): 97-105.
- [55] 邱灿星, 刘家旺, 杜修力. 设置 SMA 滑动摩擦阻尼器的自复位摇摆柱滞回行为拟静力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(7): 59-69.
- [56] 朱张峰, 王俊, 许凯. 预应力增强的芯管连接组合柱抗震性能试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(11): 110-119.