

# HPFRCC装配整体式叠合柱抗震性能研究

顾九毓, 贾 杭, 庞扬扬, 陈怡廷

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年3月27日; 录用日期: 2023年4月22日; 发布日期: 2023年4月29日

## 摘 要

随着我国建筑工业的快速发展, 对建筑结构的抗震性能的要求也随之越来越高。装配整体式是利用钢筋混凝土预制成的模板, 模壳内浇筑混凝土后形成叠合柱。使用装配整体式叠合柱不仅仅可以节省用于制作模板的材料, 更能减少支设模板的时间, 更加减少了模壳的自重, 更有利于工程吊装使用。同时, 装配整体式叠合柱的核心后浇区采用现浇的方式与试件中的其他构件连接成整体, 大大地改善了装配整体式结构中存在的整体性不足的缺点。为了改善装配整体式的抗震性能, 将其外壳用HPFRCC制成。本文主要概括国内外装配整体式与HPFRCC的研究现状, 并且基于研究现状得到相应的结论。

## 关键词

装配整体式, 高性能水泥基复合材料, 抗震性能

# Research on Seismic Performance of Monolithic Composite Column Assembled by HPFRCC

Jiuyu Gu, Hang Jia, Yangyang Pang, Yiting Chen

College of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 27<sup>th</sup>, 2023; accepted: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2023; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

With the rapid development of building industry in our country, the requirement of seismic performance of building structures also becomes higher and higher. The assembly integral is the pre-fabricated form of reinforced concrete, and the composite column is formed after pouring concrete into the mold shell. The use of assembly of integral composite column can not only save the

material used to make the template, but also reduce the time of setting up the template, and reduce the dead weight of the mold shell, which is more conducive to the engineering hoisting use. At the same time, the core post-casting area of the assembled integral composite column is connected with other components in the specimen by the way of cast-in-place, which greatly improves the shortcomings of the lack of integrity in the assembled integral structure. In order to improve the seismic performance of the whole assembly, the shell is made of high performance cement matrix composite material. This paper mainly summarizes the research status of assembled monolithic and high performance cement matrix composites at home and abroad, and draws corresponding conclusions based on the research status.

## Keywords

Assembly Integral Form, High Performance Cement Based Composite, Anti-Seismic Property

Copyright © 2023 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

地震, 又称地动、地振动, 是地壳快速释放能量过程中造成的振动, 期间会产生地震波的一种现象。地球上板块与板块之间相互挤压碰撞, 造成板块边沿及板块内部产生错动和破裂, 是引起地震的主要原因。高震级除了会造成大量人员伤亡, 对人们所建造的建筑物损伤也是极高的, 通常会使建筑物或者路桥倒塌。柱子在桥梁和建筑物中是必不可少的, 并且在建筑物中起到支撑作用, 柱子一旦破坏, 建筑物的整体就变得十分危险, 因此柱的抗震性能的提升变得十分重要。剪切破坏、扭转破坏和弯剪破坏, 是在地震情况下的钢筋混凝土柱的最常见三个损坏类型。扭转破坏则是在地震作用下, 损失很小。一般出现于柱顶部及柱底部, 并伴随有较大的变形。发生破坏时混凝土发生压碎、剥落, 并伴随钢筋弯曲, 钢筋可能达到屈服强度。然而剪切破坏在设计中最应该避免, 因为剪切破坏是脆性特征, 脆性破坏导致延性和耗能能力很差, 因此剪切破坏也被称为材料的破坏, 一旦发生材料破坏, 结构会突然性地倒塌, 不止如此, 还会给结构修复带来特别大的困难; 虽然弯剪破坏也会造成结构的倒塌, 可是破坏前有一定的破坏先兆。为了避免桥梁与建筑物失稳破坏, 减少剪切、弯曲与弯剪破坏发生且增大柱的承载力, 国内的学者对高延性水泥基复合材料力学性能及其在结构上的应用进行了大量的研究。

高延性水泥基复合材料在早期的英文名称为“ECC”, 又称 HPRCC, 最初是由密歇里根学院的 Li 教授们通过断裂力学基本原理和细观力学理论给出的关于这种复合材料的主要设计思想。美国、加拿大和日本等国家政府已经开展了大规模的实验工作, 而且, 一些国家已经开始应用在实际操作中。国内的一些学者对高延性水泥基复合材料的力学性能也进行了一定的研究试验, 李贺东用此材料做成的矩形薄板进行了直接拉伸试验, 并且概括了薄板开裂, 还用了应力与应变的曲线示意图表示出来。试验表明, 纤维必须均匀分散是高性水泥基复合材料达到理想的、稳定的应变硬化性能的重要前提。高栋也做了类似的研究, 试验表明较厚的板的纤维力更均匀, 更可以体现纤维的关联作用。大连理工的研究者徐世焱用立方体和棱柱体试验确定了材料的电抗特性, 实验结果证实棱柱体表面发生了斜方向的剪切损伤, 而不是和钢筋材料或混凝土棱锥体损伤程度相同, 而是在立方体表面上有了一些破坏的裂纹。

基于之前学者研究的现状, 仅仅研究 HPRCC 材料的力学性能及在构件中的部分使用状况, 如将

HPFRCC 应用于构件的塑性铰区或框架节点处,但是将 HPFRCC 运用在装配整体式叠合构件中是较少的。本文主要概括国内外装配整体式与高性能水泥基复合材料的研究现状,并且总结国内当前面临的困难并提出相应的想法。

## 2. 装配整体式结构研究现状

### 2.1. 装配整体式建筑发展

装配式结构整体框架和装配式结构砼框架的概念一样,都指以预制构件为主体抗力部件组装连接的混凝土框架。与传统水泥的现浇施工方法比较,由于装配式建筑施工装配式结构简单便于绿色施工,促进中国建设工业化进程,提升企业效益,节约能源,开展绿色建筑和环保,都可以改善环境并提高施工效率。因此比装配式施工方法更能达到节土、节能、节材、节水、环保的绿化施工特点,同时降低了对环境污染的影响。在欧美等发达国家,装配式混凝土结构占建筑的绝大部分:美国约 35%,欧洲 35%~40%,日本 50%以上,在瑞典高达 85%。这些国家建造了大量的装配式建筑。装配式混凝土结构体系主要用于法式建筑,配备钢结构和木结构。框架或板柱结构体系应用广泛,并逐渐向大跨度发展。法国装配式房屋主要采用焊接或栓接等作业。20 世纪中叶以来,德国(尤其是东德)建造了大量的预制混凝土板结构房屋,但自 1990 年代以来,由于各种原因,板结构逐渐被废弃。此后,德国的装配式房屋大多采用装配式混凝土结构体系(预制层压板体系和装配式混凝土外墙体系)、钢结构体系和木结构体系。

国内的装配式建筑在 1950 年,在 1950 年到 1960 年初,那时候刚好新中国成立没有多久,国家实力并没有那么充足,所以我国只能借鉴前苏联的技术和经验,在了解苏联的经验后,我们便提出建筑工业化发展的思路,到了 1960 年至 1970 年,国内开始建造大量的预制构件加工厂,生产的东西真的是五花八门,不仅仅有预制混凝土屋架屋面梁、F 型模板等。到了 1990 年至 21 世纪初,在当时 1976 年的唐山大地震统计后发现预制构件在地震作用下遭到十分严重的破坏,当时的人们开始逐渐对预制装配式结构的抗震性能产生巨大的怀疑。不仅仅如此,我国因为研究装配式建筑应用起步太晚而且还面临技术与经济落后等一系列的困难的处境。这也是导致装配式建筑的衰退的原因之一。以至于,在 1990 年之后,许多原先装配式建筑逐渐被整浇代替。近些年,随着国家经济的飞速的发展、环保理念的深入、劳动力成本日趋上升,从而导致装配式建筑重新重视,而且以全方位的研究进入新的发展阶段。当前的装配式建筑是以预制与现浇相结合的装配整体式混凝土建筑结构体系。

### 2.2. 装配整体式研究现状

传统的装配整体式混凝土结构是指由预制混凝土构件或部件通过钢筋、连接件或施加预应力加以连接并现场浇筑混凝土。随着国家大力发展装配式建筑,越来越多的学者研究并设计新型的装配式结构。新型装配整体式构件是基于传统的装配整体式构件制作而且设计的。

Cheok 和 Lew [1]对预应力预制接头和现浇接头进行了反复加载试验。结果表明,预制节点的位移延性系数在合适的位置高于浇注节点,预应力节点的破坏模式为梁端混凝土压碎、预应力筋受拉屈服和梁端裂缝。预制梁和预制柱节点预应力对裂缝宽度的影响很大,预制节点的累积能耗约为现有缠绕节点破坏时的 90%。

段东超[2]对两柱预应力预制混凝土框架梁柱组件进行了低周重复加载试验。结果表明,梁的滞回曲线在高荷载时趋于满,表明其具有很强的耗能性能。反向加载时,试件具有举升作用,为避免构件过度转动和位移,应降低法向截面受弯承载力,梁端的剪力可以由梁端承受。压力摩擦在梁的末端。梁端构件形成的塑料绞线具有良好的转向能力,可考虑对框架弯矩进行调幅。在预应力作用下,试件具有很强的变形恢复能力。

宋玉璞、王军[3]等设计和制造现浇钢筋混凝土桁架接头组件和两个预制钢 RC 框架接头组件,用于具有恒定轴轴向力的准静态加载。试验表明,轴压比对预制钢筋混凝土桁架节点的破坏形态没有明显影响,但随着轴压比的增加,预制钢筋混凝土承载力和刚度的下降速度桁架连接加速,延性加速,耗能能力降低,而梁节点区和节点核心区的应变与轴压比成反比。与现浇钢筋混凝土桁架连接相比,预制钢筋混凝土桁架连接的承载能力和延展性有所提高,预制钢筋混凝土桁架连接具有很强的塑性变形能力和耗能能力。桁架梁与芯结区连接区的钢架和钢筋尚未达到屈服强度,钢板对焊连接方式可行。

Restrepo、Park 和 Chanan [4]对 6 个组装的整体混凝土框架接头进行了反复加载试验。预制构件的端部用钩子或直条从钢筋中伸出,然后布置在接合区。结果表明,关节的具体结构差异对整体性能没有明显影响;六个试件的延展性、强度和耗能性能均表现良好,水平间的横向位移均超过 2.4。组装的整体节点达到或超过当前绕节点。

李忠献和张雪松[5]对两组两个全尺寸试件进行低周重复加载,研究装配式整体钢-混凝土框架节点的抗震性能。结果表明,构件均满足抗震设计延性要求。在极限载荷下,4 个试件的等效粘滞阻尼系数在 0.19~0.34 之间,具有很强的耗能能力。理论分析结果表明,在相同轴压比下,试件均具有较高的延性,将桁架梁从梁根端位置移至薄弱部位,可有效提高桁架连接的抗震性能。

新型装配整体式构件具有较高的强度和刚度,能够承受较大的荷载和变形,适用于跨度大、荷载重的工程。其中,预应力装配整体式构件具有较好的耐久性和抗裂性能,能够在长期使用中保持较好的结构稳定性和安全性。相较于现浇混凝土结构,预应力装配整体式构件的生产和施工周期较短。但是,装配整体式叠合构件的生产和施工工艺比预应力装配整体式更简单,同时也具有与现浇混凝土构件同样的力学性能,更是可以在现场快速组装,并且,装配整体式叠合构件采用的是免拆模板,大大降低了模板工程成本,降低废弃物的产出。

张大长[6]等人对装配整体式叠合构件进行了一系列试验研究,其中叠合柱见图 1,包括钢筋混凝土梁 U 型预制壳的抗弯性能、混凝土柱的抗震性能、混凝土柱的抗弯性能等。进行了拟静力试验研究这种新型的装配整体式叠合构件的抗震性能。实验研究证明,该构件的力学性能与现浇构件的力学性能略有不同。



Figure 1. Prefabricated RC shell formed by core pulling  
图 1. 抽芯成型的预制 RC 外壳

张昌舜[7]用组装好的整体混凝土模板壳代替了自己公司浇注标本的传统木模板。在测试中,他们首先制作了“1”形梁模板和柱等其他形式。不仅如此,他们还在模板中安装抗拉钢筋,以增加模板的刚度。根据他们的最终结论,采用这种施工方式,不仅可以节省大量模板,还可以降低维护成本,实现双重节省。

可以看到,不论是国外学者还是国内学者都对装配整体式构件进行了大量的研究。对各种样式的装配整体式构件的力学性能有了全面的认识。从最初的预应力装配整体式梁柱节点的研究再到各种新型的装配整体式构件研究,相较于现浇混凝土构件,新型装配整体式中外壳预制核心现浇的装配整体式叠合构件拥有与其几乎一致的抗震性能。相较于其他新型装配整体式构件,制作这种装配整体式叠合构件可

以采用免拆模板来大大降低制作成本，同时达到可持续发展的目的。但是，研究装配整体式叠合构件力学性能文献较少，而且如何在此构件基础之上大大提升其抗震性能的有关研究更是少之又少。

### 3. HPFRCC 研究现状

混凝土是世界范围内的主导材料，其具有良好的耐久性、耐火性等特点。但是，混凝土的抗拉强度低，尤其在地震反复荷载作用下，混凝土极易开裂，如果不及时对其裂缝进行有效的控制，则会导致大量的有害介质侵入混凝土内部，直接影响混凝土结构的耐久性。为了缓解混凝土结构面临严峻的耐久性和安全性问题，在工程水泥基复合材料中加入一定量的纤维起到高延性、高韧性和阻止裂缝展开等作用，本文将这种纤维增强水泥基复合材料称为 HPFRCC。

#### 3.1. HPFRCC 力学性能研究现状

徐世焯[8]等人利用聚乙烯醇纤维，以特致水泥砂浆为基体来制备 HPFRCC，并且进行力学性能试验。试验结果表明，高延性水泥基复合材料极限拉伸应变大于 3%，具有高韧性、高延展性、吸能性好等特点；裂纹控制能力好，最大裂纹宽度为施加压缩载荷时，试样的完整性好，具有良好的抗压强度。

鲍文博[9]利用矿石废料代替石英砂制备 HPFRCC，并且进行了相关材料的力学性能测试。试验结果表明，纤维成分适量可以显著提高材料的抗弯强度以及其综合性能。

王必元[10]利用硅灰，来制备高性能的工程 HPFRCC。并采用整浇方式以确保纤维能够分散。试验结果表明，水泥与粉煤灰掺量相同时，水胶比增大时，试件抗压强度减小。

车佳玲[11]等人利用腾格里沙漠砂代替河砂来制备 HPFRCC，以低成本国产纤维与粉煤灰为主要材料开展相关研究。试验结果表明：高性能水泥基复合材料基体中的纤维在荷载作用下发生脱黏、纤维性能增强等现象明显。

米渊[12]等人利用拉拔试验研究钢筋与 HPFRCC 之间的粘结破坏机理和破坏形态，试验结果表明：钢筋与高性能水泥基复合材料的粘结应力主要由粘结力、摩阻力和机械咬合力组成，并且试件的极限荷载随钢筋锚固长度的增大而增大。

Wang S [13]通过将大比例的粉煤灰代替水泥，制成 PVA-HPFRCC 材料，并对其进行力学性能分析，研究结果表明，所制得的 HPFRCC 材料，它的极限拉应变均在 3% 以上，抗拉强度超过 5 MPa，抗弯强度超过 15 MPa，抗压强度达到 70 MPa，具有良好的抗拉性能和抗弯性能，而且有着很好的绿色发展道路的前景。

邓宗才[14]等对外加筋玻璃钢加固的腐蚀钢筋混凝土柱进行了抗震性能试验，研究了 FRC、混凝土和 HPFRCC 三种材料应力应变曲线见图 2，研究了箍筋比和轴压比等因素对柱抗震性能影响。试验结果表明，钢筋的腐蚀会加速钢筋混凝土柱的破坏和脆性破坏。特征明显；FRP 加固可以提高腐蚀柱的延性和耗能能力，提高腐蚀柱的抗震性能。

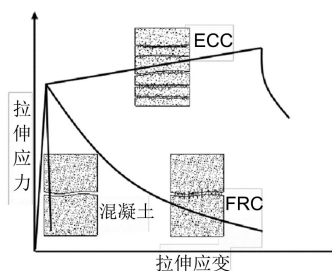


Figure 2. Stress strain curves for concrete, FRC, and ECC (HPFRCC) materials  
图 2. 混凝土、FRC 和 ECC (HPFRCC) 材料的应力应变曲线

宋文[15]等研究了工程 HPFRCC 和纤维增强复合材料加固钢筋混凝土柱的抗震性能,研究了大尺度条件下的加固效果。研究表明,加筋试件的承载能力、柔韧性和耗能能力均有提高,且提高程度随着横截面积的增加而减小;加筋柱的延展性可以恢复到以前的水平。损伤和承载力恢复效果取决于样品的初始损伤。目前对腐蚀钢筋混凝土柱的研究主要集中在腐蚀钢筋混凝土柱的抗震性能和钢筋混凝土柱的抗震性能上,该领域已经取得了一定的研究成果,但 ECC 钢筋的抗震性能在锈蚀钢筋混凝土柱和混凝土柱尚不确定,因此有必要对锈蚀钢筋混凝土柱不同加固方法的抗震性能进行相关研究。

Li [16]等人研究了钢筋混凝土柱的抗震性能,并对 HPFRCC 加固的矩形钢筋混凝土柱的抗震性能进行了评价。试验结果表明,钢筋的腐蚀降低了钢筋混凝土柱的强度、柔韧性和能耗,而使用 HPFRCC 加固可以大大提高腐蚀和未腐蚀柱的强度,HPFRCC 加固后的承载力仍低于未腐蚀的柱子,但柔韧性和整体耗能能力更好。

Chao [17]等研究了纤维增强水泥基复合材料对变形钢筋粘结强度和粘结应力-应变曲线的影响,试验结果表明纤维增强水泥基纤维具有约束和架桥作用。复合材料可以有效地限制裂缝的宽度,从而提高试件的结合强度;使用高性能增强复合材料可以显著提高钢筋在反向循环载荷下的粘结能力,提高耗能能力。滑移和裂缝宽度,以减少试样和试样的残余滑移。

Kyung-Joon Shin [18]等通过四点弯曲试验对 HPFRCC 材料研究其弯曲行为,研究表明,在荷载作用下,HPFRCC 构件逐渐形成几乎均匀分布的裂纹,HPFRCC 材料具有良好的抗弯强度和延展性。

综上所述,HPFRCC 具有假应变硬化、多缝开裂特性、高延性、高韧性和高能量吸收能力,以及该材料在的极限拉伸应变在 3%以上,相较于混凝土其受压变形能力更大。同时,该材料与钢筋之间也有着良好的粘结力。

### 3.2. HPFRCC 应用研究现状

Li [19]通过四点弯曲试验研究了 HPFRCC 梁的受弯性能的影响,试验研究表明,HPFRCC 梁与普通混凝土梁相比,具有良好的受弯承载力和变形能力。

Canbolat [20]等开展了预制 HPFRCC 连梁抗震性能试验,试验结果表明,HPFRCC 连梁可以减少钢筋的使用,并且还能保证足够的抗震性能。

Fukuyama [21]等通过低周反复荷载试验,研究了 HPFRCC 梁的受剪性能,试验结果表明,HPFRCC 梁具有良好的延性性能,试件能够避免脆性的剪切破坏和粘结劈裂破坏。

俞家欢[22]通过对 HPFRCC 梁进行了四点抗弯试验,试验结果表明,HPFRCC 这种材料具有良好的力学性能,HPFRCC 梁要比普通钢筋混凝土梁具有更好的极限承载力和变形能力。

唐文涵[23]通过静力加载试验,对钢筋混凝土/HPFRCC 叠合梁剪切性能试验展开了研究,试验表明,钢筋混凝土/HPFRCC 叠合梁的裂缝形态细而密,体现出 HPFRCC 优秀的裂缝控制能力,具有良好的延性性能,还有极强的抗剪承载力和极限变形能力。

江佳斐[24]等通过力学性能试验,将 HPFRCC 材料包裹混凝土柱的加固机制进行了研究,试验结果表明,该加固方法可以有效改善素混凝土柱脆性破坏模式和提高混凝土柱承载力和抗压延性。

汪梦甫[25]等通过对 HPFRCC 柱进行低周反复加载试验研究了高轴压比下对 HPFRCC 柱抗震性能的影响,研究表明,HPFRCC 柱在低周反复荷载作用下均发生弯曲破坏,没有出现普通钢筋混凝土柱的劈裂、剥落与黏结破坏。

蔡景明[26]通过试验研究和有限元分析,对 HPFRCC 材料取代钢管叠合柱外层的混凝土层,所提出的钢筋增强 HPFRCC-钢管混凝土组合柱进行研究,研究表明,HPFRCC 材料取代混凝土外层,可以有效提高该组合柱的极限承载力;钢筋增强 HPFRCC-钢管混凝土组合柱具有良好的延性性能和较高的耗

能能力。

吴桐[27]通过单调加载试验,对在复合受力状态下,钢筋 HPFRCC 构件的受扭性能进行了研究,研究表明,HPFRCC 试件受力过程均经历了弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段;HPFRCC 试件具有良好的承载能力和变形能力。

韩建平[28]通过对钢-PVA 混杂纤维增强混凝土棱柱体试块进行轴心受压的力学性试验,研究其破坏形态、轴心抗压强度、峰值应变变化规律及延性性能等。研究表明,采用 HPFRCC 材料可以有效提高构件的耐久性、变形能力和抗压强度。

梁兴文[29]等通过将 HPFRCC 材料代替连梁中的普通混凝土,研究小跨高比连梁的抗震性能,试验结果表明,采用 HPFRCC 材料可有效提高连梁的承载能力、延性和耗能能力。

Qudah [30]等将 HPFRCC 材料代替中节点区混凝土,对其进行抗震性能研究。研究表明,采用 HPFRCC 可以有效提高结构的抗震性能。

Said [31]等通过低周往复试验,对 HPFRCC 边节点的抗震性能进行了研究,与普通混凝土节点相比,节点出采用 HPFRCC 材料可以有效提高构件承载力、变形能力和损伤控制。

吕相蓉[32]研究普通混凝土和 HPFRCC 对装配式节点抗震性能的影响,进行了拟静力试验和有限元分析,研究表明,HPFRCC 应用于装配式节点核心区,可以提高节点处的抗剪承载力和耗能能力。

袁方[33]提出一种在塑性铰区域采用高延性纤维增强水泥基复合材料(HPFRCC)替代混凝土来改善 FRP 筋-钢筋增强混凝土柱抗震性能的新方法。对 FRP 筋-钢筋增强 HPFRCC-混凝土构件进行了低周往复荷载试验,结果表明,将 HPFRCC 替代塑性铰区域混凝土能够有效避免 FRP 筋的受压屈曲,进而显著提升组合柱的抗震性能。

潘钻锋[34]等人使用增强水泥基复合材料(HPFRCC)用钢筋制作了永久性模板壳,核心区浇筑了素混凝土。他们设计并进行了 4 个不同组合柱和 1 个普通钢筋混凝土对比柱的水平方向低周交变荷载试验。试验结果表明,HPFRCC 复合柱的延性系数大于现浇柱,同时裂缝宽度明显减小;增大剪跨比,试件滞后曲线的“夹断”现象减弱,试件的位移延性和耗能系数减弱,退化越慢,变形能力越大。

东南大学苏浩[35]对钢筋 ECC-CFST 组合柱的抗震性能进行了实验研究,得出以下结论:提高纵筋和钢管的性能,不仅可以提高钢筋的峰值承载力。对柱子也是有效的。增加柱子的延展性。但提高管内外混凝土强度只能提高构件的峰值承载力,对构件的延性影响不大。

上述研究可知,大部分学者对 HPFRCC 的力学性能及其应用于构件的力学性能有所研究,HPFRCC 材料应用于构件大大提升延性、刚度及耗能能力等。但是,针对 HPFRCC 应用于装配整体式叠合构件时的抗震性能的研究较少,研究并不成熟。同时,HPFRCC 的制作成本相对较高,在实际工程的应用有很大的困难,因此也急需通过一定的构造方法,将 HPFRCC 与钢筋混凝土材料共同发挥各自作用,达到经济与性能的平衡。

## 4. 结论

基于上述装配整体式与 HPFRCC 的研究现状,总结国内当前面临的问题且提出自己的想法:

1) 由于国家一直大力发展工业化绿色建筑与产业化绿色住宅,因此装配整体式结构受到国家大力推广,但是怎样提升装配整体式结构的整体性与抗震性能又成为首要问题,从预应力装配整体式结构到新型装配整体式结构,其中外壳预制核心现浇新型装配整体式叠合构件的抗震性能几乎和现浇混凝土构件的抗震性能一样。

2) HPFRCC 具有多种优异性能,但是该材料在应用中依旧存在许多问题,如:材料的价格大概是普通混凝土的 4 倍,急需开展低成本的研究,将材料合理应用到构件的关键部位也是一种降低成本的方法;

HPFRCC 应用于构件中的抗震性能理论并不成熟, 急需深入研究。

3) 结合上述两点待解决问题, 提出 HPFRCC 用作装配整体式叠合构件的免拆模板的想法, 这样既降低 HPFRCC 材料的成本, 又解决了传统工程建设材料普通混凝土自重大、脆性大、拉伸性能差和裂缝宽度难以控制等缺点, 更是提升了传统的现浇结构体系的施工速度, 还改善了施工过程中污染环境严重、劳动力需求量大及劳动者的工作环境恶劣等问题。为验证这一想法, 需对 HPFRCC 装配整体式叠合构件进行力学性能与抗震性能试验。

## 参考文献

- [1] Chamila, G., et al. (2022) Comprehensive Review on Sustainable Fiber Reinforced Concrete Incorporating Recycled Textile Waste. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, **11**, 28-42. <https://doi.org/10.1080/21650373.2021.1875273>
- [2] 段东超. 预制混凝土框架梁柱上锚下栓节点试验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [3] 宋玉普, 王军, 范国玺, 等. 预制装配式框架结构梁柱节点力学性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(4): 438-444.
- [4] I.C. M, L. G, H. A, et al. (2022) A Review of Eggshell Powder and Fly Ash-Based Geopolymers Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **1229**, Article ID: 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1229/1/012011>
- [5] 张雪松, 李忠献. 低周反复循环荷载作用下装配整体式钢骨混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005(S1): 1-4.
- [6] 张大长, 支正东, 卢中强, 等. 外壳预制核心现浇 RC 梁抗弯承载力的试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(5): 164-170.
- [7] 张昌舜. 预制钢筋混凝土永久性模板[J]. 建筑技术, 1985(2): 50.
- [8] 徐世焯, 李贺东. HPFRCC 研究进展及其工程应用[J]. 土木工程学报, 2008(6): 45-60.
- [9] Ismail, A., Mohamed, K., et al. (2021) A Review on Alkali-Activated Slag Concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, **12**, 1475-1499. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.12.003>
- [10] 王必元, 葛文杰, 周静静, 等. 工程水泥基复合材料的制备及力学性能[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2015, 18(3): 64-69.
- [11] 车佳玲, 王俊, 刘海峰, 等. 沙漠砂制备高韧性水泥基复合材料在不同环境下的自愈合性能[J]. 吉林大学学报(工学版): 1-8.
- [12] 米渊, 潘金龙, 周青山. 钢筋与纤维增强水泥基复合材料粘结性能试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(15): 69-73.
- [13] Wang, S. and Li, V.C. (2005) Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites: Material Design and Performances. *Proceedings of Workshop on HPFRCC in Structural Applications*, Honolulu, Hawaii, USA, 23-26.
- [14] 邓宗才, 李建辉, 张小冬. 混杂 FRP 加固腐蚀混凝土柱抗震性能试验[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(10): 1356-1363.
- [15] 宋文, 冯鹏, 黄福胜, 等. 纤维增强复合材料增强和修复加固大尺寸钢筋混凝土柱抗震性能研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(9): 130-138.
- [16] Darwin, R. and Usha, S. (2019) A Review Paper on Sustainable Cost Effective Concrete for Corrosive Environment. *Civil and Environmental Research*, **11**, 40-47.
- [17] Sandhya, K.S., Rajamurugadoss, D. and Prabhu, D.G.G. (2019) A Review Paper on Steel Fibre Reinforced Concrete. *Journal of Trend in Scientific Research and Development*, **3**, 530-532.
- [18] Shin, K.-J., Jang, K.-H., Choi, Y.-C., et al. (2015) Flexural Behavior of HPFRCC Members with Inhomogeneous Material Properties. *ACI Materials Journal*, **8**, 1934-1950. <https://doi.org/10.3390/ma8041934>
- [19] Li, V.C. and Wang, S. (2002) Flexural Behaviors of Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Reinforced Engineered Cementitious Composite Beams. *ACI Materials Journal*, **99**, 11-21. <https://doi.org/10.14359/11311>
- [20] Canbolat, B.A., Parra-Montesinos, G.J. and Wight, J.K. (2005) Experimental Study on Seismic Behavior of High Performance Fiber-Reinforced Cement Composite Coupling Beams. *ACI Structural Journal*, **102**, 159. <https://doi.org/10.14359/13541>



- [21] Fukuyama, H., Matuzaki, Y., *et al.* (2000) Structural Performance of Engineered Cementitious Composite Elements. *6th ASCCS International Conference on Steel-Concrete Composite Structures*, Los Angeles, 22-24 March 2000, 969-976.
- [22] 俞家欢, 杨楠, 赵同峰, 等. HPFRCC 梁的力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(S1): 553-557+552.
- [23] 唐文涵, 何浙浙. 工程水泥基复合材料叠合层对梁受弯性能的影响[J]. 建筑结构, 2022, 52(6): 76-80+43.
- [24] 江佳斐, 隋凯. 纤维网格增强超高韧性水泥复合材料加固混凝土圆柱受压性能试验[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1957-1967.
- [25] 汪梦甫, 张旭. 高轴压比下 PVA-HPFRCC 柱抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 1-9.
- [26] 蔡景明, 潘金龙, 苏浩. 钢筋增强 ECC-钢管混凝土组合柱抗震性能试验及其数值模拟[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 52-62.
- [27] 吴桐, 邵永健, 李国建. 钢筋 PVA-HPFRCC 柱复合受扭性能试验研究及损伤分析[J]. 建筑结构, 2021, 42(6): 1-9.
- [28] 韩建平, 文旭皓, 韩维丽. 钢-PVA 混杂纤维增强混凝土轴压力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2021(9): 45-49.
- [29] 梁兴文, 邢朋涛, 刘贞珍, 等. 小跨高比纤维增强混凝土连梁抗震性能试验及受剪承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(8): 48-57.
- [30] Qudah, S. and Maalej, M. (2014) Application of Engineered Cementitious Composites (HPFRCC) in Interior Beam-Column Connections for Enhanced Seismic Resistance. *Engineering Structures*, **69**, 235-245.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.03.026>
- [31] Said, S.H. and Razak, H.A. (2016) Structural Behavior of RC Engineered Cementitious Composite (HPFRCC) Exterior Beam-Column Joints under Reversed Cyclic Loading. *Construction and Building Materials*, **107**, 226-234.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.001>
- [32] 吕相蓉, 李秀领, 郭强, 等. 纤维增强水泥基复合材料装配式节点抗震性能研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(9): 80-89.
- [33] 袁方, 赵修远. FRP 筋-钢筋增强 HPFRCC-混凝土组合柱抗震性能研究[J]. 工程力学, 2021, 38(8): 55-65+144.
- [34] 潘钻峰, 刘籍蔚, 吴畅, 等. 外包配筋 ECC 组合柱抗震性能试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(9): 38-45.
- [35] 苏浩. 钢筋增强 ECC-钢管混凝土叠合柱抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2018.