

基于CiteSpace的碳纤维增强聚合物(CFRP)震后加固研究进展与热点

梁庆文, 朱 杰, 关纪文, 但 宇*

南宁学院土木与建筑工程学院, 广西 南宁

收稿日期: 2025年9月10日; 录用日期: 2025年9月30日; 发布日期: 2025年10月15日

摘 要

本研究基于Web of Science核心合集1998至2025年间收录的371篇文献, 借助CiteSpace科学图谱工具, 从时序演进、关键词、期刊共被引与文献共被引等多个维度展开可视化分析, 系统揭示了CFRP在震后加固领域的研究发展路径与热点主题。研究表明: 该领域发文量呈指数增长趋势, 持续成为土木工程学科的热点议题; 研究主题呈现出从基础构件向整体结构体系性能拓展、由宏观性能提升逐渐转向更深层次的力学性能研究的演变特征; 在方法层面, 振动台试验、数值模拟及新型加固工艺构成主要研究手段; 近年来, 应力应变本构模型、循环荷载下的结构行为以及土壤液化效应等方向逐渐成为新兴前沿。本研究为该领域的研究脉络梳理和未来趋势判断提供了理论参考与数据支撑。

关键词

碳纤维增强聚合物(CFRP), 震后加固, CiteSpace, 知识图谱, 研究热点

Research Progress and Hotspots of Post-Earthquake Strengthening with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Based on CiteSpace

Qingwen Liang*, Jie Zhu, Jiwen Guan, Yu Dan

College of Civil and Architectural Engineering, Nanning University, Nanning Guangxi

Received: September 10, 2025; accepted: September 30, 2025; published: October 15, 2025

*通讯作者。

文章引用: 梁庆文, 朱杰, 关纪文, 但宇. 基于 CiteSpace 的碳纤维增强聚合物(CFRP)震后加固研究进展与热点[J]. 土木工程, 2025, 14(10): 2357-2369. DOI: 10.12677/hjce.2025.1410254

Abstract

This study analyzes 371 publications from the Web of Science Core Collection, spanning 1998 to 2025, employing CiteSpace for visual analysis across multiple dimensions, including temporal evolution, keyword co-occurrence, journal co-citation, and document co-citation. It systematically uncovers the research development trajectory and hot topics in the field of CFRP for post-earthquake structural strengthening. The results indicate a consistent exponential growth in publications, reflecting sustained academic interest in civil engineering. The research focus has evolved from fundamental component behavior to the holistic structural system performance, shifting from macro-level performance enhancement toward deeper-level mechanical properties. Methodologically, shake table testing, numerical simulation, and innovative strengthening techniques represent the primary research approaches. Recent emerging frontiers include stress-strain constitutive modeling, structural behavior under cyclic loading, and soil liquefaction effects. This study provides theoretical and empirical support for understanding research trends and forecasting future developments in this field.

Keywords

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), Post-Earthquake Reinforcement, CiteSpace, Knowledge Mapping, Research Hotspots

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

地震灾害对建筑结构造成的损伤呈现复杂多样的特点，甚至会给人民生命财产带来巨大的损失，因此震后结构的修复与加固始终是土木工程领域的重要研究课题。碳纤维增强聚合物(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)材料因高强度、轻量化、耐腐蚀及施工便捷等优势，在结构震后加固中展现出巨大的应用潜力[1]-[3]。自 20 世纪 90 年代以来，国内外学者针对 CFRP 材料进行震后结构加固开展了大量研究，涉及材料性能、构件行为、结构整体响应等多个方面，深入理解 CFRP 材料的震后性能演化规律，对于优化结构加固方案、提升结构抗震性能具有重要的意义。

随着研究成果的持续增长，传统的文献综述方法已难以全面、高效地梳理研究领域的发展脉络、识别研究热点与前沿方向。而知识图谱作为科学计量学的新方法，以知识域为对象，凭借“图”与“谱”的双重特性，可视化呈现知识单元间的复杂关联，为大规模文献的系统性分析提供了新路径[4]。其中，由陈超美教授团队开发的 CiteSpace 软件能够将知识领域进行多元、分时、动态的引文可视化分析并绘制成知识图谱，自动标识图谱上作为知识基础的引文节点和共引聚类所表征的研究前沿[5]，使得 CiteSpace 成为了学科领域文献计量分析的主流工具。

本文以 CFRP 材料的震后加固为研究对象，基于 Web of Science 核心数据库文献，运用 CiteSpace 软件从时间分布、关键词、期刊共被引、文献共被引等维度展开可视化分析，系统梳理近几十年国内外相关研究的进展与热点，为该领域后续研究方向的选择提供数据支撑。

2. 数据来源

本研究以 Web of science 核心数据库为数据来源，以“CFRP”和“earthquake”进行主题检索，数据

截止至 2025 年 7 月,共检索出 447 条文献信息。并在 Article 和 Review Article 的文献类型中筛选出与主题相关的文献,最终获取有效文献 371 篇。

CiteSpace 各项参数设置为: 1) 时区分割(Time Slicing)为 1998 年至 2025 年,时间切片(Years Per Slice)设置为 1,表示以每 1 年作为一个时间分区进行数据的提取分析; 2) 根据所需分析的图谱内容选择节点类型(Node Types)为关键词(Keyword)、被引期刊(Cited Journal)、文献(Reference); 3) 采用 g-index 设定数据提取的阈值,规模因子 k 值越大,纳入分析的节点越多,但过大的 k 值可能会导致图谱过于杂乱,重点不突出,不利于分析;反之,k 值越小,纳入分析的节点越少,但过小的 k 值可能会导致关键节点的缺失,造成分析误差;因此需要根据数据量和运行分析效果,选取适当的 k 值,确保图谱的可读性并保证关键数据的纳入。最终根据运行图谱后的 S 值和 Q 值保证数据的可靠度,确定 k 值取 15; 4) 为突出网络重点,采用寻径网络(Pathfinder)和对合并后的网络进行裁剪(Pruning the merged network)复选进行网络裁剪(Pruning)。

3. 文献的时间分布

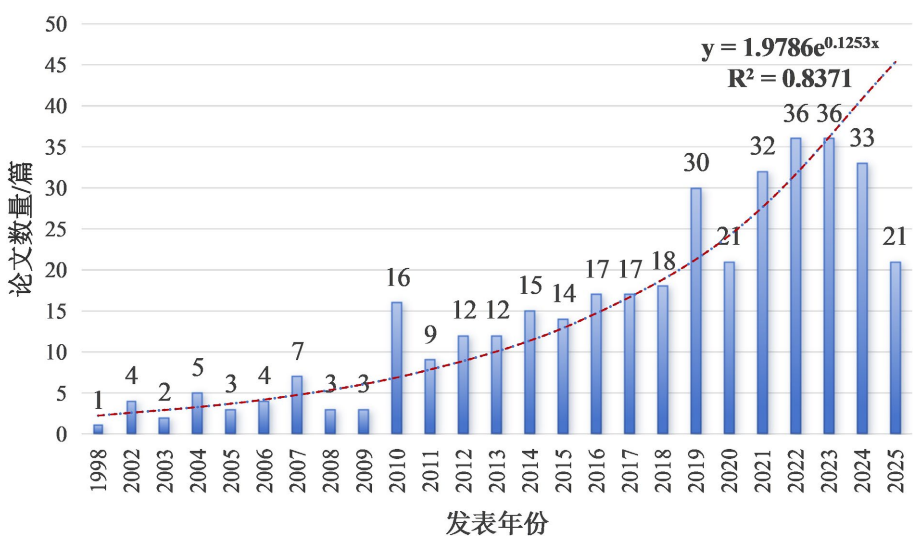


Figure 1. Statistical analysis of annual publication volume on post-earthquake strengthening research of CFRP

图 1. CFRP 震后加固研究年发文量统计

图 1 为关于 CFRP 材料震后加固研究的年发文量统计图,由发文量统计可以直观地反映研究热度的变化趋势。由图可知,相关研究的年发文量整体呈指数增长趋势, R^2 值为 0.8371,表明趋势线对数据的拟合程度较高;数据显示,发文量在 2010 年后进入较快发展阶段,2020 年前后出现明显高峰。这一发文趋势与全球范围内地震频发后对结构修复需求的增加有关;如 2008 年 5 月的汶川地震,为新中国成立以来破坏性最强、波及范围最广、灾害损失最重、救灾难度最大的一次地震,造成直接经济损失 8451.4 亿元,其中建筑物和基础设施的损失很大,占到了总损失的七成[6];2010 年 1 月的海地地震,使海地首都太子港遭到毁灭性破坏,医院、港口、机场、道路等基础设施破坏严重,造成约 31.6 万人死亡,直接经济损失达 140 亿美元,占 2009 年海地 GDP 的 120% [7];2015 年 4 月发生在尼泊尔的 7.8 级地震,对廓尔喀地区造成了毁灭性的破坏,共计 8700 多人死亡,49 万间房屋和 3 万间教室被毁[8]。另外,研究热度上升也与 CFRP 材料技术的成熟以及抗震相关标准的修订完善密切相关;如美国混凝土协会编制的美国 ACI318 规范在 2019 年对地震剪力的放大进行了较为重要的修订[9]。以上趋势整体反映出该领域的研

究随着工程的需求和技术、标准的完善而逐步升温。

4. CFRP 震后加固研究关键词分析

关键词的聚类、共现与突现特征可分别揭示领域知识体系结构、概念关联强度与热点演化轨迹，本章将从这三个维度展开分析，系统解析 CFRP 震后加固研究的热点。Citespace 软件用于进行关键词分析的来源是数据集内的作者和数据库提供的关键词，为了提高分析的准确性，首先对软件原始分析生成的关键词中相同词语的不同写法以及相近词汇进行合并。

4.1. 关键词聚类分析

关键词作为文献主题的核心凝练，其聚类特征可反映领域知识体系的结构。通过对相近关键词进行合并后，最终共生成编号为#0~#13 的 14 个聚类，如图 2 所示。由图可知，本次生成聚类的平均轮廓值(S 值)为 0.9262，S 值是 CiteSpace 用于表征聚类清晰度的指标，当 S 值在 0.5 以上时，被认为聚类结果是合理的，当 S 值达 0.7 时，聚类是高效率令人信服的[5]，由此可知本聚类的效果显著，分析结果可信度高。同时，本聚类的网络模块化指标(Q 值)为 0.7013，Q 值越大表明网络取得的聚类越好，Q 的取值范围为 [0,1]，当 $Q > 0.3$ 时表明网络社团结构是显著的[10]，因此本次生成的聚类结构显著。

进一步将编号前十的聚类信息汇总入表 1，并分析该研究领域的核心主题及时间特征。

由表 1 可知，在研究对象方面，聚类#0 bridge column(桥梁柱)、#3 columns(柱)、#2 rc beam(钢筋混凝土梁)、#9 masonry wall(砌体墙)共同构成 CFRP 震后加固性能研究的核心对象体系。其中柱、桥梁柱这两个聚类出现得比较早，平均出现年份分别为 2010 年和 2011 年，表明在研究初期，主要关注的是抗侧力的核心构件——柱，作为建筑结构的抗侧力关键构件，柱的震后损伤修复直接决定结构整体安全性，因此成为早期研究的优先方向；之后到 2016 年和 2019 年又相继形成了钢筋混凝土梁和砌体墙这两个聚

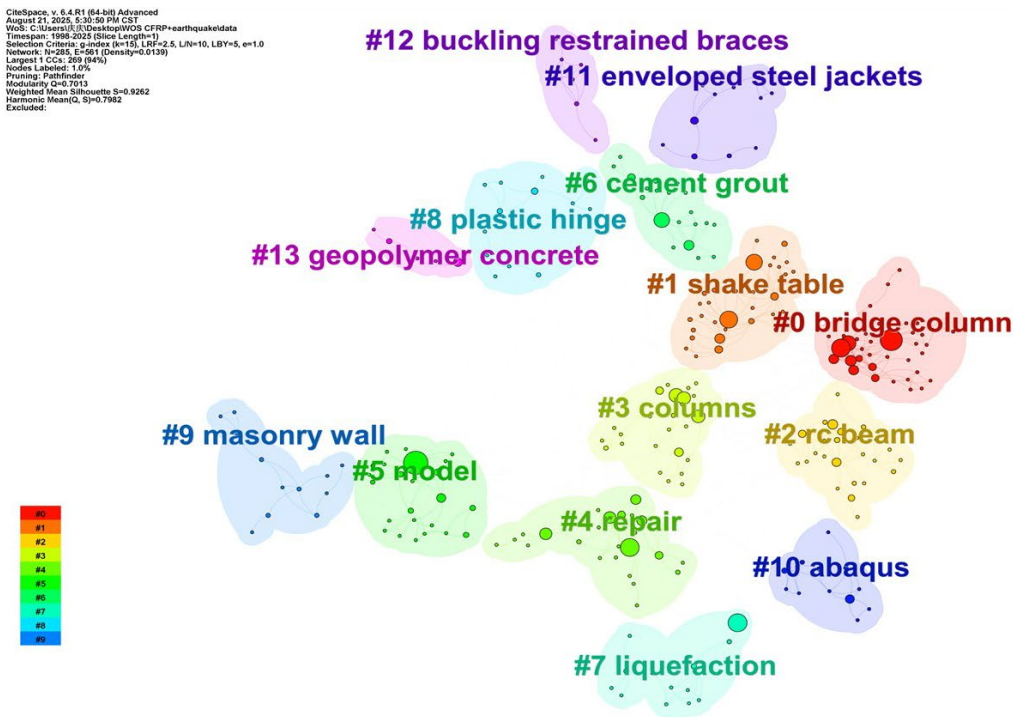


Figure 2. Keyword clustering map
图 2. 关键词聚类图

类,表明研究对象扩展到梁受弯性能恢复、砌体墙的抗震加固,研究的范围从主要的承重构件延伸到了与抗震相关的整体结构体系。

在研究方法方面,聚类#1 shake table (振动台)、#6 cement grout (水泥浆)、#5 model (模型)反映了该领域的主要研究路径。其中,“振动台”试验是模拟地震作用的核心手段,是较早确立的标准化研究方法,通过振动台加载测试可以得到加固构件的地震响应,为后续理论与工程应用提供了关键的实验依据;“水泥浆”作为界面黏结材料,其力学性能直接影响到 CFRP 与混凝土基材之间的协同工作性能,反映出早期研究已开始重视加固系统的界面协同问题;“模型”聚类则涵盖了应力应变模型、数值模拟模型等多种理论建模方法,是实验数据转换为理论模型的关键阶段。

Table 1. Top 10 keyword clustering IDs

表 1. 关键词聚类编号前十

聚类编号	包含节点数	平均轮廓值(S 值)	平均出现年份	聚类名称
#0	38	0.949	2011	bridge column (桥梁柱)
#1	34	0.955	2010	shake table (振动台)
#2	27	0.854	2016	rc beam (钢筋混凝土梁)
#3	26	0.923	2010	columns (柱)
#4	24	0.927	2014	repair (修复)
#5	24	0.895	2010	model (模型)
#6	20	0.952	2010	cement grout (水泥浆)
#7	13	0.929	2020	liquefaction (土壤液化)
#8	13	0.862	2016	plastic hinge (塑性铰)
#9	12	0.898	2019	masonry wall (砌体墙)

在研究深度与场景方面,聚类#7 liquefaction (土壤液化)、#8 plastic hinge (塑性铰)是较后期形成的聚类,标志着震后修复研究扩展至更为复杂的场景和精细化研究方向。“土壤液化”研究反映出该领域已从单纯关注上部结构抗震加固,延伸至土壤-地基-结构相互作用的层面,强调在地基失效条件下评估 CFRP 加固的有效性;“塑性铰”是结构在地震中形成耗能的关键区域,通过 CFRP 的布置来引导塑性铰出现在非关键区域,能够避免脆性破坏,体现出研究重点正由宏观层面的整体性能提升,转向更深层次的力学性能研究与破坏模式优化。

4.2. 关键词共现分析

关键词间的共现关系可进一步揭示不同主题的关联强度与核心节点,表 2 汇总了共现频次排名前十的关键词,反映了热门的核心研究概念。

从表 2 可知,关键词“cfrp (碳纤维增强聚合物)”共现频次为 149 次,为共现频次最高的关键词,是整个研究领域的“中心节点”,大部分主题均围绕其展开。

关键词“retrofit (加固)”的中介中心性为 0.30,为中介中心性最高的关键词。中介中心性是评估节点在网络中重要程度的指标,当中介中心性大于 0.1 时表明该关键词可能是连接两个不同领域的枢纽[5]。

“retrofit (加固)”首次出现的时间最早(1998 年),表明加固是 CFRP 材料进行震后结构性能改造的核心目标,并由此延伸出对“strength (强度)”、“seismic behavior (抗震性能)”、结构构件,如“column(柱)”等的相关研究。

Table 2. Top 10 keyword co-occurrence frequencies
表 2. 关键词共现频次前十

关键词	首次出现年份	共现频次	中介中心性	聚类编号
cfrp (碳纤维增强聚合物)	2004	149	0.06	#5
behavior (受力行为)	2004	127	0.18	#0
performance (性能)	2011	94	0.02	#7
frp (纤维增强聚合物)	2004	93	0.19	#0
strength (强度)	2002	92	0.13	#4
retrofit (加固)	1998	78	0.30	#1
seismic behavior (抗震性能)	2014	71	0.02	#1
earthquake (地震)	2002	62	0.10	#0
concrete (混凝土)	2002	58	0.22	#6
column (柱)	2002	48	0.17	#3

从聚类归属看,共现频次较高的关键词多出自聚类#0(桥梁柱)与#1(振动台),聚类#0 贡献了“behavior (受力行为)”、“frp (纤维增强聚合物)”、“earthquake (地震)”3 个高频关键词,表明桥梁柱的抗震受力行为是当前研究的核心热点方向;聚类#1 贡献了“retrofit (加固)”、“seismic behavior (抗震性能)”2 个高频关键词,表明振动台试验仍是研究 CFRP 震后加固效果的主流方法。

图 3 为关键词共现网络图。图中的节点大小反映共现频次,共现频次越高,节点越大;带有紫色外圈的节点为高中心性(中介中心性大于 0.1)的节点,图中结果与表 2 的分析结论可以相互印证。

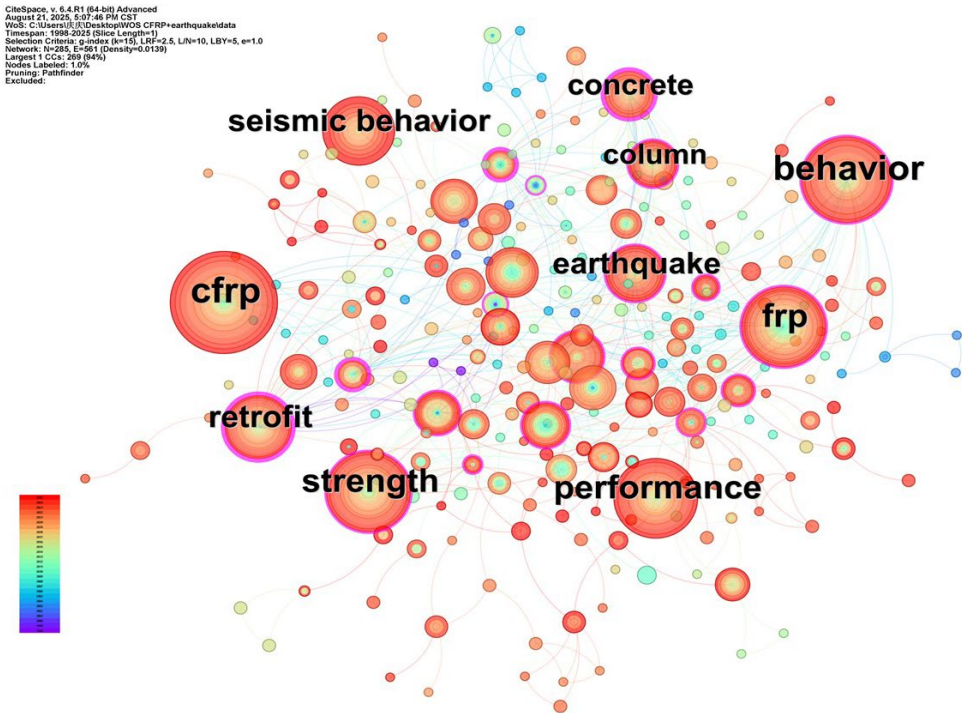


Figure 3. Keyword co-occurrence network map
图 3. 关键词共现网络图

4.3. 关键词突现分析

Table 3. Top 10 keyword burst strengths

表 3. 关键词突现强度前十

关键词	突现开始年份	突现结束年份	突现强度	1998-2025
ductility (延性)	2002	2010	3.37	
composite materials (复合材料)	2004	2011	5.71	
rehabilitation (修复)	2004	2013	4.77	
joints (节点)	2008	2015	3.11	
frp (纤维增强聚合物)	2009	2013	3.69	
seismic (抗震)	2010	2012	3.54	
seismic retrofit (抗震加固)	2017	2018	4.63	
stress strain model (应力应变模型)	2019	2020	3.62	
seismic behavior (抗震性能)	2019	2020	3.37	
cyclic load (循环荷载)	2020	2021	3.25	

突发性分析能够体现关键词的突发性情况，从而反映不同时期关键词的活跃程度，表 3 为关键词突现强度前十的统计。

由表 3 可知，2010 年以前主要进行基础概念和技术的探索，为早期奠基阶段。代表性的关键词为“ductility (延性)”、“composite materials (复合材料)”、“rehabilitation (修复)”、“joints (节点)”和“frp (纤维增强聚合物)”，体现了对于材料对节点修复加固性能的探索。这些关键词的突现时间都较长，体现了这些关键词在那个时段的研究热度是持续影响的。

2010 年~2017 年为研究与实际工程结合的发展阶段。代表性关键词为“seismic (抗震)”和“seismic retrofit (抗震加固)”，结合图 1 可知，相关研究成果的数量在这个时间段内快速增长，这与全球范围内备受瞩目的地震事件相关，也与重要的地震规范的改编相关，使得跟抗震相关的研究在这个阶段备受关注。

2019 年之后为理论深化阶段。代表性关键词为“stress strain model (应力应变模型)”、“seismic behavior (抗震性能)”、“cyclic load (循环荷载)”，表明现阶段的研究更为深入，对于抗震性能的理论模型进行更深层的力学性能研究将会是该领域的研究热点和方向。

5. CFRP 震后加固研究期刊共被引分析

期刊共被引分析能够揭示某一研究领域的知识基础来源，通过对高频共被引期刊的分析，可以为研究者高效定位高质量文献、把握领域经典与前沿提供明确指引。

表 4 为共被引频次排名前十的期刊，通过对这些期刊影响因子及大类分区进行统计展示期刊的影响力，为研究者提供文献筛选的参考。由表 4 可知，关于 CFRP 震后性能研究的相关文献主要发表在土木工程、复合材料和建筑材料领域的权威期刊上。其中，共被引频次最高的《Engineering Structures》是土木工程结构与复合材料应用领域的顶级期刊，影响因子较高(IF = 6.4)，发表在该期刊的研究成果为 CFRP 加固技术的机理、设计和应用提供了大量基础性理论与实验依据；另外，高共被引期刊中包含了《Construction and Building Materials》《Composite Structures》和《Composites Part B-Engineering》等材料科学类期刊，这表明 CFRP 震后性能研究呈现出显著的材料和结构跨学科融合特征；另外，值得注意的是，美国混凝土协会的《ACI Structural Journal》期刊虽然影响因子不高(IF = 1.5)，但共被引频次较高

Table 4. Top 10 journals by co-citation frequency
表 4. 期刊共被引频次前十

本地共被引频次	期刊名	IF 2024	中科院大类分区 2025
296	Engineering Structures	6.4	工程技术 1 区 TOP
260	Journal of Structural Engineering	3.9	工程技术 3 区
259	Journal of Composites for Construction	3.9	工程技术 3 区
254	Construction and Building Materials	8	工程技术 1 区 TOP
220	Composite Structures	7.1	材料科学 2 区
209	ACI Structural Journal	1.5	工程技术 4 区
156	Composites Part B-Engineering	14.2	材料科学 1 区 TOP
98	Earthquake Engineering & Structural Dynamics	5	工程技术 2 区
89	Journal of Earthquake Engineering	2.7	工程技术 3 区
86	Materials and Structures	3.9	工程技术 3 区

(209 次), 这反映了行业规范、标准对于工程应用研究的影响力。

综上所述, CFRP 震后性能研究的知识体系体现了土木工程与材料科学的融合, 并由一系列高水平学术期刊共同支撑, 研究者应重点关注上述核心期刊上发表的最新成果。

6. CFRP 震后加固研究文献共被引分析

文献共被引分析进一步聚焦于具有里程碑意义的研究成果, 本章将通过多指标综合评价, 筛选出该领域的核心文献并分析其学术贡献。表 5~表 8 从共被引频次、中介中心性、突现强度、Sigma 值这几个指标对指标排序前 10 的共被引文献进行了统计, 在表格中, 将文献总出现频次以不同底色进行标注, 以体现文章的重要程度: 1) 红色: 在分析指标表格中共出现 4 次的文献; 2) 蓝色: 在分析指标表格中共出现 3 次的文献; 3) 黄色: 在分析指标表格中共出现 2 次的文献; 4) 白色: 在分析指标表格中共出现 1 次的文献。最终, 将表 5~表 8 中共出现 2 次及以上的文献汇总至表 9, 总结出该研究领域的关键文献。

表 5 为共被引频次排名前 10 的文献, 需要注意的是, 表中的本地共被引频次指的是在本次分析数据集中的共被引次数, 而非在整个数据库中的引用频次。

表 6 为突现强度排名前 10 的文献。突现分析功能可通过量化追踪文献在特定时间维度内的关注度变化与传播热度突变规律, 精准探测文献的突发性特征。其核心在于依据文献被引频次、下载量或学术讨论热度的异常增长信号, 筛选并识别出不同研究时期内具有高活跃度、强影响力的关键文献, 集中反映了特定阶段的研究热点、技术突破或理论创新方向, 为后续领域研究方向的把握与学术趋势预测提供了重要的客观依据。

中介中心性是衡量文献在网络结构中“桥梁作用”的指标, 高中介中心性文献通常被视为连接不同研究分支、促进知识流动的关键枢纽。表 7 呈现了中介中心性排名前 10 位的文献, 其中排名前 2 的文献中介中心性数值均超过 0.1, 显著高于其他文献, 这类具备高中介中心性的文献在网络结构中占据重要位置, 能够串联起不同领域的研究成果, 大概率是该研究领域内承载核心理论、方法或结论的关键文献, 其研究内容与学术价值对理解领域整体发展脉络、把握知识体系关联具有重要参考意义。

表 8 为 Sigma 值排名前 10 的文献, Sigma 指数(记为 Σ)是 CiteSpace 中用于评估节点新颖性的关键复合指标, 其核心在于整合节点的双重重要性特征, 一方面考量节点在网络结构中的影响力, 即中介中心性(centrality); 另一方面兼顾节点在时间维度上的动态关注度变化, 即突发性(burstness), 通过将中介中心性与突发性进行指数化耦合, 实现对节点“结构重要性”与“时间新颖性”的综合量化评估。该指数由陈

超美教授提出[10], 计算公式为:

$$\text{Sigma} = (\text{centrality} + 1)^{\text{burstness}} \quad (1)$$

Table 5. Top 10 literature by co-citation frequency

表 5. 文献共被引频次前十

序号	本地共被引频次	文献名
1	12	Obaidat YT (2019), CONSTR BUILD MATER, V198, P313-322, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.267
2	9	Ilia E (2019), ENG STRUCT, V194, P300-319, DOI:10.1016/j.engstruct.2019.05.070
3	9	ACI318 (2019), BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE:ACI318-19
4	8	Al-Salloum YA (2007), J COMPOS CONSTR, V11, P575-589, DOI:10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:6(575)
5	8	Sharma R (2019), CONSTR BUILD MATER, V195, P376-389, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.052
6	8	Mostofinejad D (2019), ENG STRUCT, V183, P987-998, DOI:10.1016/j.engstruct.2019.01.038
7	8	Jiang SF (2016), ENG STRUCT, V106, P317-331, DOI:10.1016/j.engstruct.2015.10.037
8	8	Khan MI (2018), COMPOS STRUCT, V200, P103-119, DOI:10.1016/j.compstruct.2018.05.080
9	7	Pampanin S (2007), J COMPOS CONSTR, V11, P211-226, DOI:10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(211)
10	6	Alsayed SH (2010), J COMPOS CONSTR, V14, P195-208, DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000067

Table 6. Top 10 literature by co-citation burst strength

表 6. 文献共被引突现强度前十

序号	突现强度	突现开始	突现结束	文献名
1	4.81	2022	2025	Obaidat YT (2019), CONSTR BUILD MATER, V198, P313-322, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.267
2	4.46	2010	2012	Al-Salloum YA (2007), J COMPOS CONSTR, V11, P575-589, DOI:10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:6(575)
3	3.9	2010	2012	Pampanin S (2007), J COMPOS CONSTR, V11, P211-226, DOI:10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(211)
4	3.9	2010	2012	Alsayed SH (2010), J COMPOS CONSTR, V14, P195-208, DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000067
5	3.45	2020	2025	Ilia E (2019), ENG STRUCT, V194, P300-319, DOI:10.1016/j.engstruct.2019.05.070
6	3.4	2021	2025	ACI318 (2019), BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE:ACI318-19
7	3.18	2009	2010	Mukherjee A (2005), COMPOS STRUCT, V70, P185-199, DOI:10.1016/j.compstruct.2004.08.022
8	3.06	2020	2025	Mostofinejad D (2019), ENG STRUCT, V183, P987-998, DOI:10.1016/j.engstruct.2019.01.038
9	3.06	2020	2025	Sharma R (2019), CONSTR BUILD MATER, V195, P376-389, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.052
10	2.96	2017	2019	Yang Y (2015), CONSTR BUILD MATER, V78, P405-420, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.010

Table 7. Top 10 literature by co-citation centrality
表 7. 文献共被引中介中心性前十

序号	中介中心性	文献名
1	0.12	Ilia E (2019), ENG STRUCT, V194, P300-319, DOI:10.1016/j.engstruct.2019.05.070
2	0.11	ACI318 (2019), BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE:ACI318-19
3	0.08	Parks JE (2016), ACI STRUCT J, V113, P615-626, DOI:10.14359/51688756
4	0.05	Mercimek Ö (2023), ENG FAIL ANAL, V151, P107422, DOI:10.1016/j.engfailanal.2023.107422
5	0.05	Mostofinejad D (2017), J COMPOS CONSTR, V21, P04016116, DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000781
6	0.05	Chopra AK (2020), DYNAMICS OF STRUCTURES: THEORY AND APPLICATIONS TO EARTH-QUAKE ENGINEERING.
7	0.05	Koutas LN (2019), J COMPOS CONSTR, V23, P04018079, DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000911
8	0.05	ASTM International (2021), ASTM E519/E519M-21: STANDARD TEST METHOD FOR DIAGONAL TENSION (SHEAR) IN MASONRY ASSEMBLAGES
9	0.04	Obaidat YT (2019), CONSTR BUILD MATER, V198, P313-322, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.267
10	0.04	Mostofinejad D (2019), ENG STRUCT, V183, P987-998, DOI:10.1016/j.engstruct.2019.01.038

Table 8. Top 10 literature by co-citation Sigma value
表 8. 文献共被引 Sigma 值前十

序号	Sigma	文献名
1	1.48	Ilia E (2019), ENG STRUCT, V194, P300-319, DOI:10.1016/j.engstruct.2019.05.070
2	1.44	ACI318 (2019), BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE:ACI318-19
3	1.18	Obaidat YT (2019), CONSTR BUILD MATER, V198, P313-322, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.267
4	1.12	Mostofinejad D (2019), ENG STRUCT, V183, P987-998, DOI:10.1016/j.engstruct.2019.01.038
5	1.08	Sharma R (2019), CONSTR BUILD MATER, V195, P376-389, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.052
6	1.05	Khan MI (2018), COMPOS STRUCT, V200, P103-119, DOI:10.1016/j.compstruct.2018.05.080
7	1.04	Yang Y (2015), CONSTR BUILD MATER, V78, P405-420, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.010
8	1.02	Mukherjee A (2005), COMPOS STRUCT, V70, P185-199, DOI:10.1016/j.compstruct.2004.08.022
9	1.02	Almusallam TH (2007), J COMPOS CONSTR, V11, P590-600, DOI:10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:6(590)
10	1.02	Alam MI (2015), COMPOS STRUCT, V120, P428-441, DOI:10.1016/j.compstruct.2014.10.022

Table 9. Summary table of key literature
表 9. 关键文献汇总表

序号	文献名	共被引突现中心性 sigma			
1	Obaidat YT (2019), CONSTR BUILD MATER, V198, P313-322, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.267	√	√	√	√
2	Ilia E (2019), ENG STRUCT, V194, P300-319, DOI:10.1016/j.engstruct.2019.05.070	√	√	√	√
3	ACI318 (2019), BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE:ACI318-19	√	√	√	√
4	Mostofinejad D (2019), ENG STRUCT, V183, P987-998, DOI:10.1016/j.engstruct.2019.01.038	√	√	√	√

续表

5	Sharma R (2019), CONSTR BUILD MATER, V195, P376-389, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.052	√	√	√
6	Al-Salloum YA (2007), J COMPOS CONSTR, V11, P575-589, DOI:10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:6(575)	√	√	
7	Pampanin S (2007), J COMPOS CONSTR, V11, P211-226, DOI:10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(211)	√	√	
8	Alsayed SH (2010), J COMPOS CONSTR, V14, P195-208, DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000067	√	√	
9	Mukherjee A (2005), COMPOS STRUCT, V70, P185-199, DOI:10.1016/j.compstruct.2004.08.022		√	√
10	Yang Y (2015), CONSTR BUILD MATER, V78, P405-420, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.010		√	√
11	Khan MI (2018), COMPOS STRUCT, V200, P103-119, DOI:10.1016/j.compstruct.2018.05.080	√		√

接下来将展开分析表 9 中的红色底纹,即在共被引、突现、中心性、sigma 值这几个核心指标均排名前十的 4 篇文献。

Obaidat YT (2019) [11]的共被引频次(12)和突现强度(4.81)均排在第一,突现开始的时间为 2022 年,结束时间为 2025 年,说明该文章的突现影响仍在持续,仍在引起研究者的持续关注。该研究进行了关于采用 CFRP 板修复部分受损钢筋混凝土梁柱节点的实验研究;研究制备并测试了 8 个试件,其中 1 个试件为对照组,另外 7 个试件先预加载至预期破坏荷载的 80%,随后采用多种 CFRP 板方案进行修复,之后再次测试加固后节点在循环荷载作用下的受力行为。该文章补充了采用 CFRP 板加固的钢筋混凝土构件的循环荷载受力性能的研究,对于进一步理解加固后节点在循环荷载作用下的受力行为具有重要的意义。

Ilia E (2019) [12]的中介中心性(0.12)和 Sigma 值(1.48)均排在第一,表明本文是该领域具有里程碑意义的研究。该文献通过开槽粘贴(EBROG)与 CFRP 锚固系统结合的实验,研究了该组合方式对强梁弱柱型钢筋混凝土梁柱节点的抗震加固效果。研究发现,该复合加固方法能有效避免 CFRP 材料的剥离或屈曲,将塑性铰从柱身和节点核心区转移至梁端,从而将节点的承载力、延性和耗能能力显著提升了 73%、139%和 144%,成功将节点的脆性破坏模式转变为延性弯曲破坏,为既有非抗震节点的抗震加固提供了有效且可靠的解决方案。

ACI318 (2019) [13]是美国混凝土协会编制的美国 ACI318 规范 2019 年修订版,其作为美国混凝土结构设计和施工的最低标准,具有重要的工程规范地位。本研究成果具有高中介中心性(0.11)和 Sigma 值(1.44),表明该成果在连接学术研究与工程实践中起到了桥梁作用,也反映出标准规范对科研的引导价值。其中较重要的修订内容为第 18.10.3.1 条,该条款明确规定,在特定设计场景下,需通过放大地震剪力的方式开展结构设计工作。这一修订源于过去 15 年中对多个核心筒结构进行的系统非线性动力分析,大量实践表明,剪力墙的设计内力存在被放大的可能性,其原因主要包括两方面:一是剪力墙自身所固有的超强度特性,二是高阶模态对结构相应的影响。值得注意的是,在某些下,依据该条款确定的设计剪力数值甚至达到了原规范规定值的 2 倍以上。

Mostofinejad D (2019) [14]研究了采用 EBROG 方法和 X 形 CFRP 片材结合 CFRP 锚固扇系统对三维钢筋混凝土梁柱角节点进行抗震加固的效果。研究发现,EBROG 方法显著延缓了 CFRP 片材的剥离,X 形 CFRP 片材和 CFRP 锚固扇的联合使用有效增强了节点的抗剪能力,并将塑性铰从节点核心区转移到梁上。本研究还针对三维角节点,即考虑了侧向梁的影响,提出了适用于三维节点的 X 形 CFRP 加固方

案,结合 EBROG 方法和 CFRP 锚固扇,解决了传统加固方法中常见的剥离和锚固不足问题,将节点的破坏模式由脆性破坏调整为延性破坏。

从以上分析可知,各项指标均排名靠前的文献是该领域中具有高关注度、具有里程碑意义的文章,这些文献主要涉及的是 CFRP 加固技术的实验创新与机制分析,以及规范的更新。

7. 结论与展望

本研究以 1998~2025 年 Web of Science 核心数据库中“CFRP”与“earthquake”为主题的相关文献为对象,运用 CiteSpace 软件从文献时间分布、关键词、期刊共被引及文献共被引等维度,对 CFRP 震后性能研究领域展开可视化分析,系统梳理了该领域的发展脉络与热点,可得到以下结论:

1、该领域研究发文量呈指数增长态势,其发展与全球重大地震灾害后的工程重建需求,以及 CFRP 材料技术、抗震设计规范的不断完善紧密相关;

2、由对于关键词的分析可知,该领域研究的热点从早期(2010 年前后)聚焦于桥梁柱、柱等核心抗侧力构件的加固,逐步扩展到钢筋混凝土梁、砌体墙等整体结构体系;研究方法从振动台试验、水泥浆界面粘结等实验手段,发展到复杂的数值模型分析;近期(2019 年后)更深入到土壤液化等土-结构相互作用问题以及塑性铰控制、循环荷载下的应力应变模型等更深层次的力学性能研究;

3、期刊共被引分析显示,该领域形成了由土木工程与材料科学顶级期刊(如《Eng. Struct.》《Constr. Build. Mater.》《J. Compos. Constr.》)构成的知识基础。同时,行业规范(如 ACI 318-19)作为连接学术研究与工程实践的桥梁,发挥着至关重要的指导作用;

4、通过共被引分析,本研究识别出包括 Obaidat YT (2019)、Ilia E (2019)在内的多项具有里程碑意义的研究成果。这些研究的主要贡献在于创新性地提出了如 EBROG 和 CFRP 锚固系统等新型加固技术,有效克服了 CFRP 材料易发生剥离破坏的技术瓶颈,成功将结构破坏模式由脆性转变为延性,代表了该领域当前的研究前沿与发展方向。

未来关于 CFRP 材料的震后加固研究仍有具备挑战性的发展方向。

1、从关键词聚类结果可以看到,聚类#7 liquefaction 中包含的节点仍较少,且位于聚类边缘,与其他聚类的连接较弱,表明该方向尚处于起步阶段,未来的研究可以着眼于构建更能准确描述 CFRP 材料和非线性土体耦合作用的力学模型;

2、聚类#6 cement grout 出现的时间较早(2010 年),但从突现性和关键词共现分析来看,该聚类并未形成相关的研究热点;另一方面,从关键文献分析可知,对于 CFRP 与结构连接界面的研究已不局限于传统的水泥浆连接,因此对于更先进的连接材料和创新的界面处理工艺研究将是未来的热点方向;

3、整体的分析结果体现的仍为较传统的研究方法,未见智能方法相关的关键词,未来关于该领域的相关研究可以考虑与机器学习等新兴的研究手段进行结合,如开发机器学习算法,用于快速识别震后结构损伤模型并推荐最佳的 CFRP 加固方案;建立 CFRP 震后加固的数字孪生模型,实现从震后评估、加固设计到长期性能预测的全流程智能化管控等。

另外,由于本研究的数据仅来源于 Web of Science 核心数据库,未纳入 CNKI 等中文数据库,存在研究成果覆盖不全的不足,后续的研究可考虑增加中文数据库的相关研究内容,以提高研究结论的客观性和全面性。

基金项目

南宁学院校级科研项目(2022XJ06); 南宁学院校级科研项目(2022XJ04); 崇左市科技计划项目(崇科 20241211)。

参考文献

- [1] 张永兵, 吴建新, 代柏乐, 等. CFRP 加固震损填充墙 RC 框架结构抗震性能试验研究[J]. 复合材料科学与工程, 2023(1): 85-93.
- [2] Wang, Y., Chen, W., Li, D., Xu, H., Zhang, F. and Guo, X. (2023) Experimental and Numerical Investigations of the Seismic Performance of Reinforced Concrete Frames Strengthened with CFRP Sheets. *Buildings*, **13**, Article No. 2195. <https://doi.org/10.3390/buildings13092195>
- [3] Yang, J., Liang, S., Zhu, X., Dang, L., Wang, J. and Tao, J. (2021) Experimental Research and Finite Element Analysis on the Seismic Behavior of CFRP-Strengthened Severely Seismic-Damaged RC Columns. *Structures*, **34**, 3968-3981. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.015>
- [4] 陈悦, 刘则渊. 悄然兴起的科学知识图谱[J]. 科学学研究, 2005, 23(2): 149-154.
- [5] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [6] 汶川特大地震四川抗震救灾志编纂委员会. 汶川特大地震四川抗震救灾志·总述大事记[M]. 成都: 四川人民出版社, 2017.
- [7] 李云龙. 拉美及加勒比海地区国际救灾合作机制研究——以海地地震为例[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中师范大学, 2015.
- [8] 邝晔旸. 基于机器学习的 2015 年尼泊尔大地震余震活动性分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2024.
- [9] 张志军, 周祥, 梁鑫, 等. 浅谈近年 ACI318 规范抗震设计部分的几个重要修订[J]. 四川建材, 2022, 48(11): 61-62.
- [10] 李杰, 陈超美. CiteSpace 科技文本挖掘及可视化[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2022.
- [11] Obaidat, Y.T., Abu-Farsakh, G.A.F.R. and Ashteyat, A.M. (2019) Retrofitting of Partially Damaged Reinforced Concrete Beam-Column Joints Using Various Plate-Configurations of CFRP under Cyclic Loading. *Construction and Building Materials*, **198**, 313-322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.267>
- [12] Ilia, E. and Mostofinejad, D. (2019) Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Strong Beam-Weak Column Joints Using EBROG Method Combined with CFRP Anchorage System. *Engineering Structures*, **194**, 300-319. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.070>
- [13] ACI Committee 318 (2019) Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19). American Concrete Institute.
- [14] Mostofinejad, D. and Hajrasouliha, M. (2019) 3D Beam-Column Corner Joints Retrofitted with X-Shaped FRP Sheets Attached via the EBROG Technique. *Engineering Structures*, **183**, 987-998. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.038>