

顶底角钢节点抗震性能有限元分析

马成浩, 董锦坤

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年3月3日; 录用日期: 2026年3月23日; 发布日期: 2026年4月3日

摘要

为助力装配式建筑实现高质量发展, 解决传统现浇梁柱节点施工效率偏低、抗震性能欠佳的问题, 本文以加强型顶底角钢(SAS)装配式梁柱节点为研究对象, 结合不同加劲肋宽厚比与螺栓孔径设计参数, 开展相关有限元模拟与抗震性能研究工作。

关键词

加强型顶底角钢节点, 有限元分析, 抗震性能

Finite Element Analysis of Seismic Performance for Top Bottom Angle Steel Joint

Chenghao Ma, Jinkun Dong

College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: March 3, 2026; accepted: March 23, 2026; published: April 3, 2026

Abstract

To promote the high-quality development of prefabricated buildings and address the shortcomings of low construction efficiency and insufficient seismic performance of traditional cast-in-place beam-column joints, this study focuses on stiffened top-and-seat angle (SAS) prefabricated beam-column joints and conducts finite element simulation and performance research based on different stiffener width-thickness ratios and bolt hole diameters.

Keywords

Stiffened Top-and-Seat Angle Joint, Finite Element Analysis, Seismic Performance

Copyright © 2026 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

在全球地震灾害频繁发生与装配式建筑快速发展的双重背景下, 钢结构因具备轻质高强、装配效率高、回收利用率佳等优势, 已成为多高层建筑、大跨度建筑的优选结构形式。我国位于环太平洋地震带与地中海-喜马拉雅地震带的交汇区域, 是全球地震灾害影响最为严重的国家之一。唐山地震、汶川地震等重大地震灾害实践反复证明, 建筑结构的抗震安全核心在于节点设计。节点作为梁柱构件的连接核心, 承担着荷载传递与内力分配的关键作用, 其受力性能直接决定了整个建筑结构在地震作用下的稳定性与抗倒塌能力。

2. 钢结构的优点和应用

2.1. 钢结构的优点

轻质高强是钢结构最突出的优势。钢材的密度约为混凝土的三分之一, 但其抗拉、抗压强度远高于混凝土, 在满足相同承载力要求的前提下, 钢结构构件的截面尺寸更小、自重更轻。这一特性不仅能大幅降低结构基础的设计荷载, 减少地基开挖的工程量与工程造价, 还能有效提升结构的抗震性能。由于地震作用与结构自重呈正相关, 轻质结构在地震中受到的惯性力更小, 变形能力更强, 可显著降低结构倒塌风险, 尤其适用于地震高发区域的建筑工程建设。

2.2. 钢结构的应用

在现代大型公共建筑、交通枢纽及城市地标工程建设中, 钢结构凭借轻质高强、大跨度跨越能力强、造型可塑性高、施工工业化程度高、抗震性能优异以及绿色可循环等核心优势, 成为突破传统结构设计限制、实现建筑功能与美学高度融合的关键支撑。从体育场馆、机场航站楼到超高层地标建筑, 钢结构的应用贯穿于建筑设计、施工建造、运营维护的全生命周期。本文结合国内外多个经典工程案例, 系统阐述钢结构在大型建筑工程中的应用实践与工程价值。

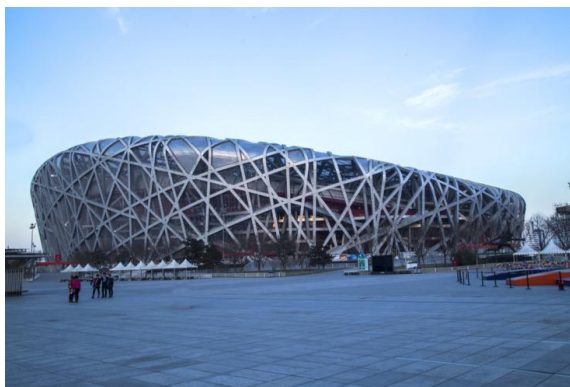


Figure 1. National Grand Theater

图 1. 国家大剧院

文化艺术地标类建筑往往追求独特的建筑造型, 钢结构的造型可塑性在该类工程项目中得到了充分

发挥。中国国家大剧院(见图 1)采用椭球形双层钢网壳结构, 壳体长 212 米、宽 144 米, 总重量约 6750 吨, 整个壳体无内部支撑点, 完全依靠钢结构自身的受力体系承载, 外部覆盖钛金属板与玻璃幕墙, 塑造出“水上明珠”的独特建筑造型。钢网壳结构受力均匀, 既满足了剧院内部大跨度、大空间的声学设计与使用功能需求, 又实现了建筑造型的创新突破。巴黎埃菲尔铁塔作为近代钢结构建筑的经典代表作, 采用镂空桁架式钢结构, 总用钢量约 7300 吨, 依托钢结构的轻量化设计与高效受力体系, 在 19 世纪便实现了 324 米的建筑高度, 充分彰显了钢结构在跨越能力与结构效率方面的革命性优势, 至今仍是验证钢结构耐久性与可靠性的经典工程案例。

3. 研究现状

3.1. H 型钢梁外肋环板节点

匡祯斌[1]通过有限元软件构建方钢管混凝土柱-H 型钢梁外肋环板节点模型(见图 2), 对其受力特性展开分析, 研究发现该类外肋环板节点具备良好的受力性能, 且加工制作便捷, 不易发生脆性破坏, 并基于分析结果推导得出节点屈服承载力的计算公式。

杨立国[2]采用试验研究方法, 对方钢管混凝土柱-H 型钢梁节点(见图 3)的力学性能进行研究, 结果表明, 结构整体发生破坏的主要原因是节点连接部位的损坏, 而 H 型钢梁局部出现屈曲或拉裂现象, 也可能引发结构整体破坏。



Figure 2. Test deformation condition
图 2. 试验变形情况

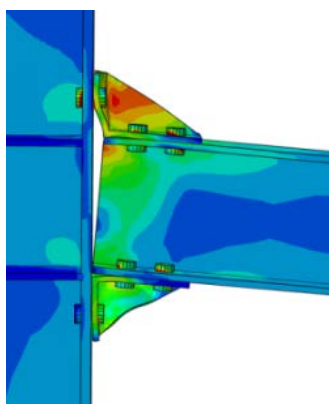


Figure 3. Finite element deformation condition [3]
图 3. 有限元变形情况[3]

王路遥[3]针对腹板开孔式梁柱连接节点的抗震性能展开探究,通过对 12 个试件进行加载试验后发现,节点进入破坏阶段时,钢梁区域会出现相应的受力变形现象。在腹板开孔节点的失效过程中,塑性铰主要形成于节点域外的梁翼缘部位,表明此类节点具备优良的抗震性能。

李文翰[4]将试验测试与数值模拟相结合,对自行设计的外套板式连接节点进行破坏机理分析及抗震性能评估。研究表明,外套板式节点具备良好的抗震能力,且该节点形式可归属于半刚性连接节点。

管东芝[5]为明确梁端翼缘扩大型梁柱节点的力学特性,采用试验手段对其抗震性能进行系统分析。研究显示,该类节点在破坏时,塑性铰会出现在翼缘扩大段的端部截面,且节点塑性转角可大于 0.03 rad。在此基础上,结合现行规范中翼缘宽厚比的相关规定,对梁端侧板宽度与梁翼缘宽度的比值给出了可供工程设计参考的建议。

3.2. 方钢管混凝土柱型钢梁节点

韩伟[6]借助数值模拟手段,针对方钢管混凝土柱与型钢梁所构成的节点,开展断裂性能及延性特征分析。研究表明,若方钢管柱对型钢梁形成较强约束效应,节点区域内的对接焊缝处易产生显著的应力集中。当该处应力场参数达到相应临界状态时,焊缝部位将出现断裂破坏。

王沛怡[7]将试验实测与数值模拟相结合(见图 4),针对多种连接形式下的梁柱节点抗震性能进行对比研究。分析结果显示,为使节点拥有优良的抗震表现,施工阶段应对焊接工艺与安装精度进行严格控制;此外,在钢管柱内部浇筑混凝土,可显著提升节点的整体承载力与刚度性能。

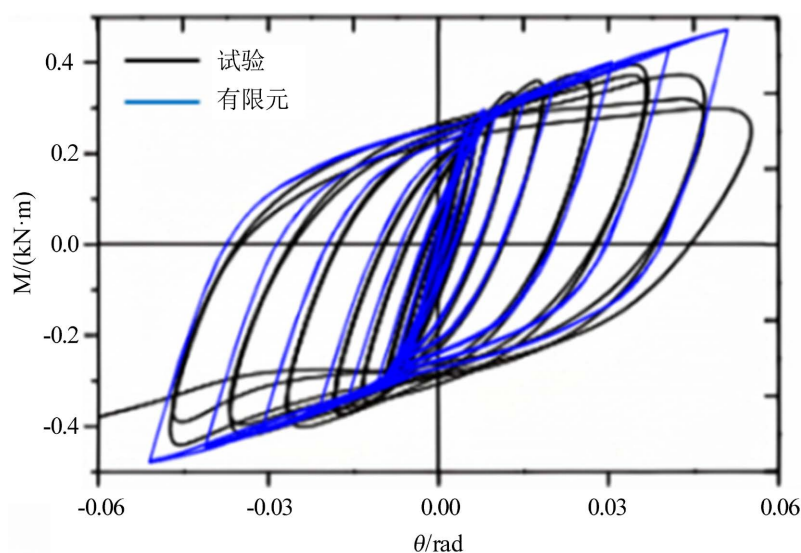


Figure 4. Hysteresis curve [7]

图 4. 滞回曲线[7]

张艳霞[8]借助 ABAQUS 有限元程序,对两类外形存在差异的方钢管混凝土柱钢框架环梁节点开展数值计算与对比分析(见图 5)。由计算结果可知,在外部荷载作用下,上述两种节点均展现出优异的耗能特性与抗震性能,其构造形式同样满足现行抗震设计规范的相关规定。

张大帅[9]通过试验研究手段,针对外加强环式节点的抗震性能展开系统探究,共选取 5 个构造位置存在差异的节点试件,并在多种加载制度下进行加载测试。研究表明,节点的刚度与承载性能,会受到方钢管柱截面宽厚比以及加载方式的共同影响。

张磊等[10]为评估梁柱节点在地震作用后的可修复性能,对 6 个已产生损伤的方钢管柱与 H 型钢梁

全螺栓双夹板连接节点实施简易修复, 并在此基础上开展拟静力加载试验。试验结果表明, 经修复后的节点, 其承载能力与转动性能均得到明显改善, 可满足结构抗震设计的基本要求。

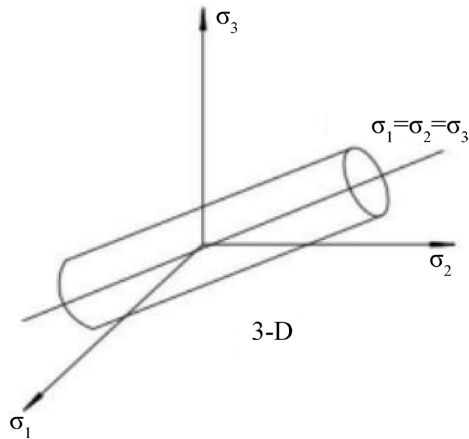


Figure 5. Yield criterion [8]

图 5. 屈服准则[8]

3.3. 方钢管柱 - 工字钢连接节点

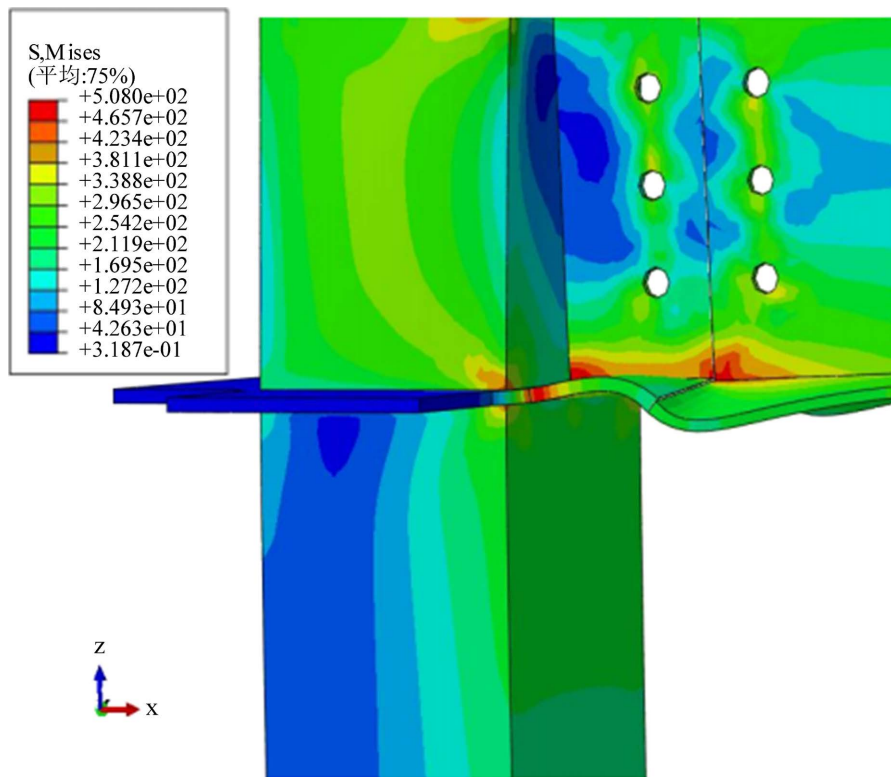


Figure 6. High-stress zone at the upper ring plate-beam joint in numerical simulation [13]

图 6. 数值模拟中上环板与梁拼接处高应力区[13]

Han 等[11]围绕多种构造形式的梁柱节点力学性能展开研究, 通过对 11 个不同构造的节点试件进行静力加载试验。结果显示, 各类试件的破坏模式较为相近, 主要表现为柱身部位在节点区域内出现屈服

现象；钢材强度对节点承载力具有明显作用，二者呈正相关关系，而钢材强度与节点延性则呈负相关关系。如图 6 所示。

Fang 等[12]以方钢管柱与工字钢所构成的连接节点为研究对象，针对美国北岭地震前广泛应用的同类节点开展试验分析。研究表明，该类节点出现破坏的主要诱因，是连接部位存在明显的应力集中现象，焊缝质量缺陷与焊接残余应力进一步加剧了应力分布的复杂程度，最终导致节点发生脆性断裂。

Liu 等[13]通过试验手段对梁翼缘骨型节点展开分析(见图 6)，重点探讨加劲肋厚度与布设位置对节点抗震性能的影响规律。试验结果表明，在节点区域增设加劲肋有助于提升节点强度，但加劲肋厚度的变化对强度的影响效果相对有限。

Dong 等[14]针对外套环梁肋式连接节点开展低周往复加载试验，研究发现，此类节点可将应力经由箱型柱翼缘传递至腹板部位，从而有效降低节点域的应力集中程度，同时具备较高的承载能力与稳定的耗能性能。

Chen 等[15]为探究双角钢连接与端板连接两类梁柱节点的抗震性能，对不同角钢厚度、端板厚度以及螺栓布置方式的多组试件进行试验。结果表明，端板连接节点的强度高于双角钢连接节点，而双角钢连接节点则拥有更优的抗震性能；合理设置螺栓位置与间距，能够有效提升节点的延性与耗能能力。

3.4. 荷载 - 位移关系模型

Chowdhury 等[16]提出一种简洁且具有创新性的荷载 - 位移关系模型(见图 7)，可用于预测矩形钢管混凝土柱与钢梁偏心连接件在内隔板或延伸翼缘内隔板构造下的局部受拉弹塑性性能。该模型将法兰管简化为具有四线型荷载 - 变形关系的网格梁，将管壁腹板模拟为同类拉伸构件，并将内隔板强度叠加至整体力学模型中。在大变形条件下，模型计算结果与试验数据具有较高的一致性。如图 7 所示。

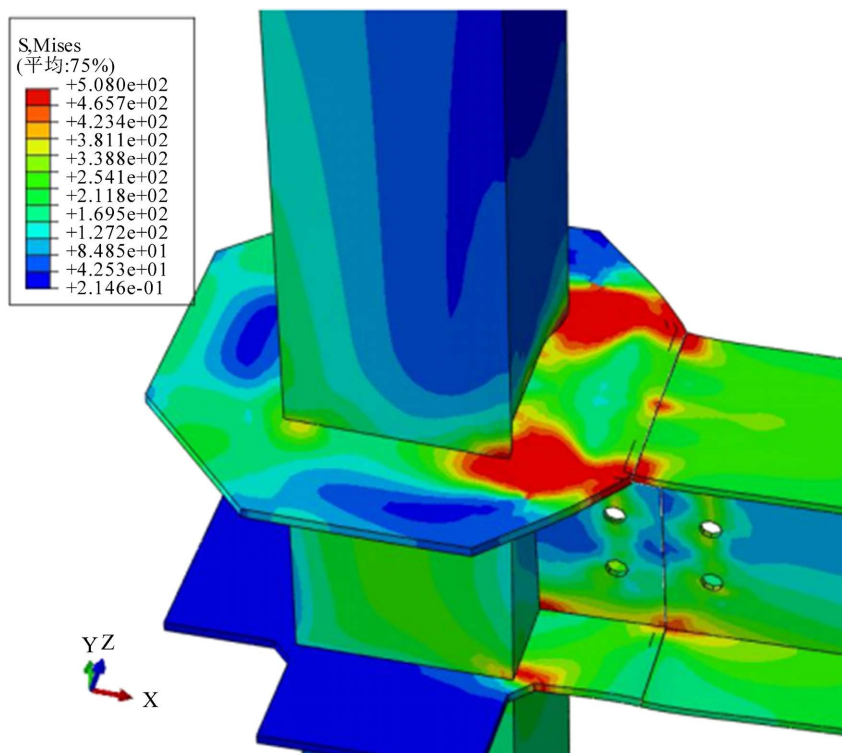


Figure 7. Flange buckling of the beam in numerical simulation [16]

图 7. 数值模拟中梁下翼缘屈曲[16]

Liu 等[17]为探究新型梁柱节点在循环荷载下的破坏机制与抗震性能,对 4 个节点试件开展试验研究。结果表明,该新型节点的滞回曲线形态饱满,具备优良的抗震性能,可满足现行抗震设计规范的相关要求。

Ashrafifar 等[18]采用数值模拟手段构建端板螺栓连接梁柱节点的计算模型,基于有限元结果对节点初始转动刚度进行预测,并给出两种刚度计算模型。将所提模型引入欧洲规范体系用于同类节点的刚度预测,通过与试验结果对比,证实所建模型的精度优于已有模型。

Yang 等[19]为探究新型梁柱节点在循环荷载下的破坏机制与抗震性能,对 4 个节点试件开展试验研究(见图 8)。结果表明,该新型节点的滞回曲线形态饱满,具备优良的抗震性能,可满足现行抗震设计规范的相关要求。



Figure 8. Flow criterion diagram
图 8. 流动准则示意图

4. 结论

1) 建立了包含材料、几何、接触非线性的精细化有限元模型,通过与现有试验数据对比,验证模型误差 $\leq 5\%$,可可靠模拟节点在低周反复荷载下的力学行为,为该类节点抗震性能分析提供了高效、精准的建模方法。

2) 揭示了关键参数对节点抗震性能的影响规律:节点板厚度与钢材牌号主要提升节点抗侧承载力,柱轴压比过高会削弱节点延性、改变破坏模式,螺栓规格决定节点连接可靠性,其中 16 mm 节点板 + Q355 钢材 + M24 螺栓 + 0.3 柱轴压比为最优参数组合,满足规范抗震要求。

3) 该类节点作为典型半刚性连接,其抗震优势显著,可通过自身塑性变形耗散地震能量,实现“强柱弱梁、强节点弱构件”的设计理念,相比传统简化节点模型,更贴合工程实际受力状态,填补了常规半刚性节点多参数协同分析的空白。

5. 展望

1) 补充试验验证,制作顶底钢结构梁柱节点试件,开展低周反复加载试验,进一步验证有限元模型的准确性,完善节点破坏机理的研究。

2) 拓展研究工况,考虑施工缺陷(如焊接气孔、螺栓松动)、钢材腐蚀等实际工程因素,以及主余震等复杂荷载作用,分析节点长期抗震性能退化规律。

3) 优化研究方法与应用范围,结合机器学习算法建立节点抗震性能预测模型,探索新型耗能材料在该类节点中的应用,并将研究成果与工程设计规范进一步衔接,推动其标准化应用。

参考文献

- [1] 匡祯斌. 钢结构螺栓端板连接节点的受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [2] 杨立国. 轻型钢框架端板连接节点受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2005.

- [3] 王路遥, 张艳霞, 刘金瑶, 等. 钢结构梁柱扩翼型节点抗震性能的有限元分析[C]//中国岩石力学与工程学会工程安全与防护分会. 第2届全国工程安全与防护学术会议论文集(下册). 北京: 北京建筑工程学院; 太原: 山西省建筑科学研究院, 2010: 435-440.
- [4] 李文翰. 新型墙板装配式钢结构住宅体系及其关键技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [5] 管东芝. 梁端底筋锚入式预制梁柱连接节点抗震性能研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
- [6] 韩伟. 新型耗能金属组合件钢框架梁柱连接节点抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2020.
- [7] 王沛怡. 新型震后可修复装配式梁柱连接节点抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [8] 张艳霞, 李宏伟, 黄哲文, 张大为. 装配式钢结构自攻螺栓-芯筒法兰柱连接节点抗震性能有限元分析[J]. 北京建筑大学学报, 2023, 39(2): 98-104.
- [9] 张大帅. 低烈度区多层全装配式钢框架住宅梁柱连接节点抗震性能与设计方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [10] 张磊, 甄伟, 王晓冬, 李伟, 朱斌. 分层装配消能支撑钢结构梁柱节点与子结构抗震性能有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(S2): 257-266.
- [11] Han, F., Zhang, X., Lu, Y., Cao, Y. and Qu, Z. (2026) Seismic Performance of the Elevator Counterweight System Based on a Substructural Shaking Table Test Method. *Engineering Structures*, **348**, Article 121790.
- [12] Fang, S., Wang, Z., Guo, X., Ma, D. and Song, X. (2025) Seismic Performance of Traditional Chinese Timber Structures with Geshan: Numerical and Experimental Study. *Structures*, **82**, Article 110757.
- [13] Liu, F., Zhang, X., Wu, Y., Nie, M., Cui, L., Li, J. and Tian, Q. (2025) Stiffness Compensation and Multi-Objective Parameter Optimization for Seismic Performance of Ancient Timber Structures Retrofitted with Friction Dampers. *Structures*, **82**, Article 110698.
- [14] Dong, B., Wang, H., Zhang, X., Ma, X., Chen, Z. and Zhai, Z. (2025) Seismic Performance and Post-Earthquake Damage Repair Capability of K-Type Eccentrically Braced Hybrid Structures. *Structures*, **82**, Article 110706. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110706>
- [15] Chen, S., Yu, C., Li, Y. and Shu, Z. (2025) Asymmetric Seismic Behavior of the Daikai Subway Station under Obliquely Incident SV-Waves: Insights from 3D Soil-Structure Interaction Modeling. *Structures*, **82**, Article 110776.
- [16] Chowdhury, K. and Karmakar, S. (2025) Inelastic Seismic Performance of Idealised Asymmetric Structures under Bidirectional Ground Excitation. *Structures*, **82**, Article 110801. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110801>
- [17] Liu, W., Zeng, B., Wu, C., Fang, H., Xiao, Z. and Wang, C. (2025) Evaluation of Anti-Progressive Collapse Performance of Locally Corroded Large-Span Steel Structures. *Structures*, **82**, Article 110829. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110829>
- [18] Ashrafifar, J., Azhari, F., Hashemi, J. and Yazdi, H.A. (2026) Effects of Loading Protocols on the Seismic Performance of Non-Structural Drywall Partitions. *Journal of Building Engineering*, **117**, Article 114772. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114772>
- [19] Yang, Y., Du, L., Zhang, B. and Li, N. (2025) Seismic Performance Evaluation of the GFRP-PB Tubular Connector-Lightweight Aggregate Sandwich Wall Panel Structural System. *Construction and Building Materials*, **505**, Article 144763. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144763>