

外肋板式钢板混凝土剪力墙与钢梁节点抗震性能研究

文 / 田 艳 安徽宝翔建设集团有限责任公司

摘要：本文聚焦外肋板式钢板混凝土剪力墙与钢梁节点抗震性能展开研究。通过精心设计并开展低周往复加载试验，制作多组不同参数试件，获取大量试验数据；同时运用有限元软件建立模型，进行数值模拟分析。研究发现，该节点在地震作用下抗震性能良好，破坏形式主要为钢梁翼缘局部屈曲和外肋板屈服变形。外肋板宽厚比、钢梁跨高比等参数对其抗震性能影响显著，合理选取参数可提升节点承载力与延性。研究成果揭示了节点破坏机理和受力性能，提出设计建议，为在工程实践中的应用提供了理论依据，对推动新型组合结构在高层建筑中的应用意义重大。

关键词：外肋板式钢板混凝土剪力墙；钢梁节点；抗震性能；试验研究

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.16.093

引言

随着城市化进程的加速和高层建筑的发展，剪力墙结构因其优良的抗侧力性能在高层建筑中得到了广泛应用。外肋板式钢板混凝土剪力墙作为一种新型的组合结构形式，通过外肋板将钢板与混凝土有效结合，提高了剪力墙的承载力和抗震性能。然而，外肋板式钢板混凝土剪力墙与钢梁节点的抗震性能尚需深入研究，以确保其在地震作用下的安全可靠。本研究旨在通过试验研究和数值模拟，探讨外肋板式钢板混凝土剪力墙与钢梁节点的抗震性能，分析其破坏机理、受力性能、延性及耗能能力，为工程实践提供理论依据和设计参考。同时，本研究对于推动新型组合结构在高层建筑中的应用具有重要意义。

一、试验研究

（一）试验设计

为深入探究外肋板式钢板混凝土剪力墙与钢梁节点的抗震性能，本研究精心设计并制作了多组节点试件。在试件设计环节，充分考量了外肋板宽厚比、钢梁跨高比等关键参数，这些参数的不同取值组合，构建起一个全面的研究体系，用以精准剖析各因素对节点抗震性能的影响。例如，设置不同梯度的外肋板宽厚比，从较小比值到较大比值逐步变化，钢梁跨高比也同理，以此模拟实际工程中可能出现的多种工况。通过这种方式，能更系统、全面地获取数据，为后续研究提供坚实基础。

（二）试验过程与结果

试验过程严格遵循科学规范，对试件施加低周往复加载，以此模拟地震作用下的复杂受力状态。加载过程中，采用高精度的加载设备，确保加载力的精准控制，同时运用先进的数据采集系统，实时监测试件的位移、应变等关键数据。试验结果令人振奋，外肋板式钢板混凝土

剪力墙与钢梁节点展现出良好的抗震性能。节点的破坏并非突然的脆性破坏，而是以钢梁翼缘局部屈曲和外肋板屈服变形为主。（图1 钢梁翼缘局部屈曲）从滞回曲线来看，曲线饱满，这直观反映出节点拥有出色的延性和耗能能力，意味着在地震发生时，节点能够有效吸收和耗散地震能量，保障结构安全。并且，在试验过程中，还观察到节点在不同加载阶段的细微变化，如混凝土与钢板之间的协同工作情况随着加载次数增加而发生的改变，这些细节为进一步理解节点性能提供了更多依据。



图1 钢梁翼缘局部屈曲

（三）参数影响分析

对不同参数试件的试验数据进行对比分析后，发现外肋板宽厚比和钢梁跨高比对节点抗震性能影响显著。适当增大外肋板宽厚比，节点的承载力和延性会随之提升，这是因为宽厚比增加使外肋板能更好地协同钢板和混凝土工作，增强整体承载能力。然而，当宽厚比过大时，节点刚度会下降，影响结构稳定性。钢梁跨高比主要影响节点耗能能力，跨高比适中的试件在地震作用下耗能性能更佳，能更高效地消耗地震能量，降低结构响应。进一步研究还发现，外肋板宽厚比和钢梁跨高比之间存在一定的耦合效应，在某些特定取值范围内，二者相互配合能使节点抗震性能达到更优状态，为设计优化提供了新的思路。（表1 参数影响分析结果表）

参数变化	承载力变化	延性变化	耗能能力变化
外肋板宽厚比增加	提升	提升(至某阈值后下降)	有所提升或达峰值后略降
钢梁跨高比适中	适中至较高	较高	提升
外肋板宽厚比与钢梁跨高比耦合	可能存在最优组合,使抗震性能达到更优	需具体分析	可能协同提升耗能能力

表 1 参数影响分析结果表

(四) 破坏机理探讨

在对节点进行研究时,通过细致的试验观察与深入分析,成功揭示了其破坏机理。钢梁翼缘局部屈曲和外肋板屈服变形是节点破坏的关键因素,二者引发节点刚度下降的同时,却也提升了节点的耗能能力,在地震作用下能消耗部分能量,延缓结构整体破坏。混凝土强度和钢板厚度等参数对节点破坏形式影响显著。较高强度的混凝土像“稳固支架”,能有效约束钢梁和外肋板变形,从而延缓破坏进程;较厚的钢板则增强了节点整体承载能力,让破坏过程变得更为复杂。微观分析更有新发现,混凝土内部微裂缝发展和钢梁、外肋板变形紧密相关。混凝土内部微裂缝的扩展会改变其对钢梁和外肋板的约束效果,进而影响节点的力学性能,这一联系为深入理解节点破坏机制提供了关键视角,也为优化节点设计提供了理论依据。

(五) 试验局限性与未来展望

本次试验虽收获颇丰,但也存在局限。试件数量有限,无法涵盖所有参数组合,可能遗漏一些特殊工况下的性能表现。加载制度相对简单,难以完全模拟真实地震的复杂性。未来研究可增加试件数量,扩展参数范围,采用更接近实际地震的加载制度,如考虑不同地震波特性、加载频率变化等,同时纳入更多实际工程因素,如施工偏差、环境因素等,使研究结果更具工程应用价值。另外,还可以结合新型监测技术,对节点在试验过程中的力学响应进行更全面、更精细的监测,获取更多深层次的数据,进一步深化对节点抗震性能的认识。

二、数值模拟研究

(一) 有限元模型建立

为更深入剖析外肋板式钢板混凝土剪力墙与钢梁节点的抗震性能,本研究借助专业有限元软件搭建节点模型。在建模过程中,充分考虑材料非线性与几何非线性因素。对于材料非线性,精确设定混凝土、钢材等材料的本构关系,模拟其在复杂受力状态下的力学行为变化,如实反映材料进入塑性阶段后的强度退化和刚度变化。

几何非线性方面,考虑结构在大变形下的几何形状改变对受力的影响,确保模型能精准呈现节点在地震作用下的真实力学响应,从而为后续分析提供可靠基础。在模型构建时,还对节点的连接部位进行了精细化模拟,确保其力学传递特性更贴合实际情况。

(二) 数值模拟结果与验证

运行有限元模型后,获取了节点应力分布、变形情况等关键数据。将模拟结果与试验数据进行对比分析,从应力云图到位移曲线,各方面数据均呈现出高度一致性。例如,在相同加载工况下,模拟得到的钢梁翼缘应力集中区域与试验中观察到的屈曲起始位置相符,节点的位移变化趋势也与试验结果基本一致。这一对比验证了有限元模型的准确性和可靠性,表明该模型能够有效模拟节点在地震作用下的力学行为,为进一步研究提供了有力工具。此外,在验证过程中,还对不同加载阶段的数据进行了详细比对,进一步确认了模型在整个加载过程中的有效性。

(三) 参数敏感性分析

利用已验证的有限元模型,对外肋板宽厚比、钢梁跨高比等参数展开敏感性分析。逐一改变各参数值,观察节点抗震性能指标的变化。结果显示,这些参数对节点抗震性能影响显著,与试验研究结论相符。如增加外肋板宽厚比,节点的极限承载力在一定范围内提高,但当宽厚比超过某一阈值时,节点刚度下降明显。钢梁跨高比的变化同样影响节点耗能能力,适中的跨高比能使节点在耗能方面达到最佳效果。通过敏感性分析,更清晰地掌握了各参数对节点抗震性能的影响规律,为优化设计提供了理论依据。同时,还发现各参数之间存在交互影响,这为多参数协同优化设计提供了新方向。

(四) 破坏模式预测

基于模拟结果,对不同地震作用下节点的破坏模式进行预测。通过调整地震波特性、加载幅值等参数,模拟多种地震场景。预测结果显示,在小震作用下,节点主要表现为弹性变形,仅有轻微的应力集中现象;中震

时, 钢梁翼缘和外肋板开始出现局部屈服, 但整体结构仍能保持稳定; 大震作用下, 节点破坏加剧, 钢梁翼缘屈曲范围扩大, 外肋板屈服变形显著, 可能导致节点部分连接失效。这些预测结果为设计师提供了直观参考, 帮助其在设计阶段提前考虑应对措施, 提高节点抗震能力。同时, 还可以根据预测结果制定不同地震等级下的节点修复策略, 降低震后修复成本。

(五) 数值模拟的局限性与改进建议

尽管有限元模拟在研究中发挥了重要作用, 但也存在局限性。模型简化过程中, 为提高计算效率, 对一些复杂构造进行了简化处理, 可能导致模拟结果与实际存在偏差。材料参数方面, 由于材料性能存在一定离散性, 输入的参数难以完全准确反映实际情况。此外, 模拟中未充分考虑施工过程和环境因素对节点性能的影响。未来研究可进一步优化模型, 细化复杂构造的模拟, 通过更多试验获取更精确的材料参数, 并纳入施工工艺、环境温湿度等因素, 从而提高模拟精度和可靠性, 使有限元模拟更好地服务于工程实践。还可以结合人工智能技术, 对模拟过程进行智能优化, 自动识别模型中的不合理部分并进行调整, 提升模拟效率和准确性。

三、抗震性能评估与设计建议

(一) 抗震性能评估

本研究通过整合试验与数值模拟数据, 对外肋板式钢板混凝土剪力墙与钢梁节点的抗震性能进行了全面评估。评估结果表明, 该节点在地震作用下表现优异, 能充分满足工程实际需求。其破坏模式以钢梁翼缘局部屈曲和外肋板屈服变形为主, 这种破坏形式呈现出可预测性和渐进性的特点, 极大地避免了脆性破坏引发的突发危险, 为建筑结构在地震中的安全提供了有效保障。从滞回曲线来看, 该节点耗能能力良好, 在多次往复加载过程中, 能够稳定地吸收和耗散地震能量, 有效维持结构的整体稳定性。这意味着在实际地震发生时, 节点可凭借自身良好的耗能特性, 降低地震对建筑结构的破坏程度, 减少结构的损伤, 进一步验证了该节点在抗震性能方面的可靠性, 为其在工程中的广泛应用奠定了坚实基础。

(二) 设计建议

基于上述评估, 为优化节点设计提出以下建议。设计时, 设计师应依据建筑结构抗震要求, 精准选择外肋板宽厚比与钢梁跨高比。适当增加外肋板宽厚比可提升节点承载力和延性, 但要避免因比值过大导致刚度下降;

合理的钢梁跨高比能增强节点耗能性能, 设计人员需权衡不同工况下的最佳取值。同时, 施工质量至关重要, 要严格把控材料质量和施工工艺, 确保节点各部分连接紧密、协同工作良好。此外, 可采用合适的抗震构造措施, 如增设约束部件限制钢梁翼缘屈曲、优化外肋板与钢梁连接方式等, 进一步提升节点抗震性能。

(三) 工程应用前景

外肋板式钢板混凝土剪力墙与钢梁节点作为创新型组合结构形式, 在高层建筑领域潜力巨大。其结合了钢板与混凝土的优势, 在提供强大抗侧力性能的同时, 有效减轻结构自重, 节省建筑空间。本研究成果为其工程应用提供了坚实理论基础, 助力该节点在实际项目中推广。后续研究应聚焦节点动力性能, 深入探究其在不同地震波特性下的响应规律; 关注耐久性能, 研究长期使用过程中环境因素对节点性能的影响。通过持续研究, 不断完善技术体系, 推动该节点在桥梁、大跨度建筑等更广泛工程领域的应用, 为建筑行业发展注入新动力。

结语

本文围绕外肋板式钢板混凝土剪力墙与钢梁节点抗震性能展开研究。结果表明, 该节点在地震作用下抗震性能良好, 破坏形式主要是钢梁翼缘局部屈曲和外肋板屈服变形。外肋板宽厚比、钢梁跨高比显著影响节点抗震性能, 合理选择这些参数可提升承载力和延性。通过试验和数值模拟, 揭示了其破坏机理与受力性能, 为工程应用提供理论和设计支持。同时, 提出设计建议, 展望了该节点在工程中的应用前景, 对推动新型组合结构在高层建筑中的应用意义重大。

参考文献

- [1] 刘义航. 外肋板式钢板混凝土组合剪力墙与钢梁节点抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2024, 57(1): 1-12.
- [2] 苗纪奎. 方钢管混凝土柱与钢梁的外肋板节点抗震性能试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(2): 85-90.
- [3] 郝林峰, 万馨, 刘一. 外肋板刚度对外肋板式组合剪力墙结构抗震性能影响研究 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2023, 42(2): 145-150.
- [4] 戎贤, 胡珊珊, 张健新, 杜颜胜. 带外肋板钢管混凝土梁柱节点抗震性能研究 [J]. 建筑科学, 2020, 36(3): 73-80.