

装配式钢管混凝土束剪力墙抗震性能研究综述

李永涛, 孙洪军, 王 晨

(辽宁工业大学 土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 装配式钢管混凝土束剪力墙作为一种新型结构体系, 因其优异的承载力和抗震性能而在当前工程中得到广泛应用。为进一步推动装配式钢管混凝土束剪力墙在可持续发展战略中的应用, 通过对相关装配式钢管混凝土束剪力墙的试验及模拟文献进行深入研究, 总结其在抗震性能方面的研究进展, 并对当前研究领域中复杂环境下抗震性能、结构优化、连接方式等方面存在的不足进行了分析。结果表明: 装配式钢管混凝土束剪力墙在承载力与抗震性能方面展现出显著优势, 但需重点突破复杂环境适应性、用钢量优化及节点连接高效性等问题, 以实现工业化建造与可持续发展目标的共赢。本文研究成果可为实现建筑业的绿色转型与可持续发展提供参考。

关键词: 钢管混凝土束剪力墙; 装配式; 抗震性能; 绿色转型; 可持续发展

中图分类号: TU398.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)08-0006-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.08.095

A review on seismic performance of prefabricated reinforced concrete bundle shear wall

LI Yongtao, SUN Hongjun, WANG Chen

(College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract: As a new structural system, prefabricated reinforced concrete bundle shear wall is widely used in current engineering due to its excellent bearing capacity and seismic performance. In order to further promote the application of prefabricated reinforced concrete bundle shear wall in the sustainable development strategy, the research progress of prefabricated reinforced concrete bundle shear wall in terms of seismic performance through in-depth research on the test and simulation literature is summarized, and the shortcomings in seismic performance, structural optimization and connection methods in complex environments in the current research field are analyzed. The results show that the prefabricated reinforced concrete bundle shear wall shows significant advantages in bearing capacity and seismic performance, but it is necessary to focus on breaking through the problems of adaptability to complex environment, optimization of steel consumption and efficient node connection, so as to achieve a win-win situation between industrial construction and sustainable development goals. The results can provide reference for the green transformation and sustainable development of the construction industry.

Key words: reinforced concrete bundle shear wall; prefabricated; seismic performance; green transformation; sustainable development

收稿日期: 2025-02-26

基金项目: 2023 年辽宁省教育厅高等学校基本科研资助项目 (JYTMS20230865); 2022 年辽宁省研究生联合培养示范基地资助项目 (YJD202204)

作者简介: 李永涛 (1999—), 男, 硕士研究生, 从事装配式结构方面的研究与开发。

通信作者: 孙洪军 (1973—), 男, 博士, 教授, 从事岩土工程相关教学与科研工作。

由于城市空间的日益紧张和土地资源的有限性,对高层建筑的深入探讨变得尤为重要。剪力墙作为高层和超高层建筑中常用的抗侧力构件^[1-3],如何提高其在外部载荷作用下的承载能力成为当今亟待解决的问题。杭萧钢构于2016年在钢管混凝土剪力墙的基础上,提出了钢管混凝土束剪力墙^[4]。

钢管混凝土束剪力墙由多个U形钢管焊接排列而成^[5],在内部浇筑混凝土后共同形成墙体。在高层钢结构建筑中,钢管混凝土束剪力墙是关键的支撑结构,能够承受垂直和水平压力。此外,这种结构可以在工厂中标准化生产,施工速度快,布局灵活,可以满足建筑功能的需求,避免了室内露梁露柱的问题,并适应了建筑空间的多样化需求。在施工过程中,钢管充当模板的角色,浇筑完成后无需拆除。

本文旨在探讨钢管混凝土束剪力墙在高层建筑中的应用,总结并归纳其在试验和模拟条件下的抗震性能。与此同时,在装配式这一新兴施工技术背景下,该结构体系的工业化程度及其改进方法也逐渐成为大众关注的重点。通过对这些问题的研究,一方面期望在丰富高层建筑抗震设计的理论体系方面提供新的见解和思路;另一方面期望为实际工程提供建议,以改善高层建筑的抗震性能和施工效率。

1 钢管混凝土束剪力墙抗震试验研究现状

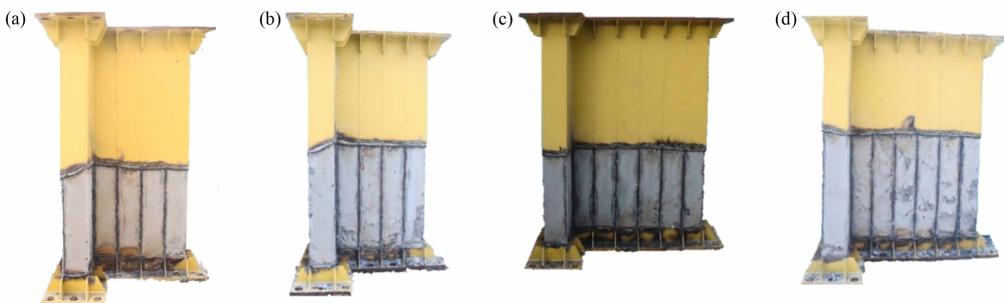
自2016年以来,许多学者^[6-8]陆续针对钢管混凝土束剪力墙这一结构体系开展了多项力学性能研究。采用钢管混凝土束剪力墙的结构,其自重较传统钢筋混凝土剪力墙减轻了20%~30%。随着建筑行业对结构安全性和经济性的不断追求,钢管混凝土束剪力墙凭借其独特的力学性能和施

工便利性,逐渐成为研究的热点。本文将重点探讨不同设计参数对结构抗震性能的影响。

1.1 截面形式

钢-混凝土组合剪力墙的截面形式对结构整体性能的影响起到关键性作用。在钢管混凝土束剪力墙的研究进展中,截面形式多表现为一字形,L形和T形^[5]等。ZHANG等^[9-10]对一种T型钢管混凝土复合剪力墙试件进行了循环荷载试验,试验结果表明,这种新型结构剪力墙具有良好的耗能能力和抗震性能。陈志华等^[11-12]对12组不同截面形式的钢管混凝土束剪力墙进行了足尺拟静力试验,结果显示,该恢复力模型吻合度较高,清楚地体现了构件抗震性能。WANG等^[13]设计了4组L形钢管混凝土束剪力墙试件,如图1所示,并对试件进行低周往复加载试验。李昕^[14]通过设计5组L形钢管混凝土束剪力墙试件,控制不同参数,研究了L形钢管混凝土束剪力墙在拟静力加载试验中的抗震性能。以上试验结果均表明,这种L形新型结构形式剪力墙的优越性得到了强有力的验证。

同时,相比于上述3种截面形式,张振等^[15]提出了一种新型的间隔钢管混凝土组合剪力墙,通过在两个钢管之间采用缀板进行连接,对3组试件进行加载试验。结果表明,这种墙体钢管间隔布置方式不仅展示了良好的抗震性能,同时也为钢管混凝土束剪力墙的经济化提供了新思路。张文元等^[16]认为,控制试件腔体数量的变化会对结构抗震性能产生一定影响。为了进一步探究其参数影响,对3组缩尺多腔钢板混凝土组合剪力墙进行了低周往复加载试验。结果显示,随着腔体数量的增加,试件滞回曲线呈现出更加饱满的状态,刚度退化曲线略有些差异,延性也随之有所提升。



试件编号:(a) 1;(b) 2;(c) 3;(d) 4

图1 L形钢管混凝土束剪力墙

1.2 轴压比

在结构工程领域,轴压比是一个关键参数,它直接影响着结构构件的稳定性和承载能力。轴压比对剪力墙的性能有着显著的影响,尤其是在高层建筑中,剪力墙作为主要的抗侧力构件^[3],其稳定性和延性直接关系到整个结构的安全性能。

张鹏等^[17]为研究钢管混凝土束剪力墙在不同轴压比影响下所展现的力学性能,对 3 组不同轴压比下的钢管混凝土束剪力墙 (steel tube wall, STW) 试件和 3 个底部加强的底部双层钢管混凝土束剪力墙 (stiffened steel tube wall, SSTW) 试件进行抗震性能试验,试件参数如表 1 所示^[17]。

试验结果表明:随着轴压比的增加,该组合剪力墙表现出良好的承载力和耗能能力;此外,墙体底部设置的加强板明显提高了试件的峰值能力。GUO 等^[18]为深入研究钢管混凝土束剪力墙在较高轴压比下的抗震性能,以不同轴压比为主要变量对试件进行拟静力加载试验。试验结果显示,在较高轴压比情况下,试件仍展现出优异的承载能力。此外,通过与 Eurocode 4、AISC 360-16 和《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159—2004)等规范对比发现,试件性能均符合要求。由此可见,钢-混凝土组合不仅显著提升了剪力墙的承载能力和耗能能力,而且钢管能够更好地约束核心混凝土,从而提高其在结构中的工作效能。ZHENG 等^[19]、芦贵强^[20]提出了一种新型联肢钢管混凝土束剪力墙结构,如图 2 所示。

为了研究这种新型剪力墙结构的抗震性能,设计了 29 组试件,并通过控制不同的轴压比进行加载试验。试验结果显示,在轴压比逐渐增大的过程中,钢管混凝土束剪力墙试件的破坏形式由弯曲破坏转为剪切破坏。同时,在保证延性的前提下,钢

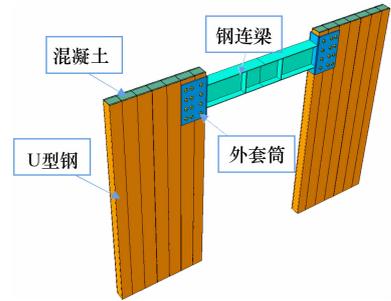


图 2 新型联肢钢管混凝土束剪力墙

连梁可作为整个结构在抗震工作中的“第一道防线”,且明显提升了整体结构的抗震性能。

1.3 加劲肋

在钢管混凝土束剪力墙的研究中,加劲肋和连接件的应用已得到一些学者进行研究与证实。宋维国^[21]提出了一种在钢管混凝土束剪力墙两侧钢管内壁设置加劲肋的加强方式。为研究其结构的抗震性能,通过控制不同剪跨比、轴压比等参数设置进行了拟静力加载试验。试验结果表明,在钢管束内壁设置加劲肋明显提升了墙体抗屈曲能力,同时也改善了墙体的抗震性能和耗能能力。李欢欢^[22]为进一步探究不同加劲肋对钢管混凝土束剪力墙抗震性能的影响,分别设置了栓钉、一字形(竖向贯穿)加劲肋和 L 形加劲肋 3 种连接件,并通过控制加劲肋间距进行拟静力加载试验。结果显示,随着间距的减小,各钢管混凝土束剪力墙的抗震性能均有所提升,其中 L 形加劲肋的抗震性能提升效果最为明显,而栓钉的影响最小。以上研究分析均显著证明,在钢管混凝土束剪力墙中使用加劲肋能够有效提升承载能力和抗震性能。

1.4 节点连接

李杰等^[23]通过设计 4 组足尺模型滞回试验,对两种墙梁刚接节点的破坏特征和抗震性能进行了深入分析。试验数据有力地证实,这些节点设

表 1 试件参数

试件编号	轴压比	剪跨比	单根钢管尺寸/mm	加强区(外贴加强板)	
				高度/mm	厚度/mm
STW1	0.1	1.5	140 × 200	—	—
STW2	0.2	1.5	140 × 200	—	—
STW3	0.3	1.5	140 × 200	—	—
SSTW1	0.2	1.5	140 × 200	150	3
SSTW2	0.2	1.5	140 × 200	300	3
SSTW3	0.2	1.5	140 × 200	450	3

计不仅符合国内外的规范要求,而且在实际工程应用中具有显著的发展潜力,为钢管混凝土束剪力墙技术的进一步发展和应用奠定了坚实的基础。LIU等^[24]针对钢管混凝土束结构体系中剪力墙与梁之间的连接方式展开研究,提出了一种新型的H型钢螺栓连接方案,如图3所示,并进行了6组试件的低周往复加载试验。结果表明,端板厚度和锚固长度等参数对试件的抗震性能和耗能能力有显著影响。目前,国内外学者普遍采用焊接或高强螺栓作为钢-混凝土组合结构构件的连接方式。与焊接相比,高强螺栓连接具有施工效率高、灵活性好以及耐腐蚀性强等优点。

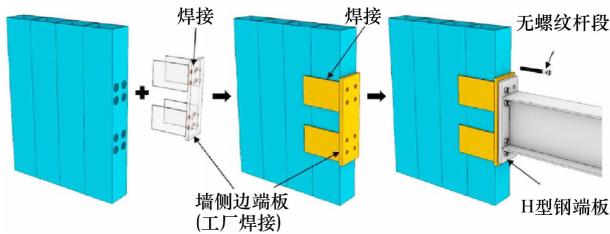


图3 新型的H型钢螺栓连接

2 钢管混凝土束剪力墙有限元模拟抗震分析

早在20世纪五六十年代,有限元分析(FEA)就开始应用于土木工程行业。凭借其高效性、灵活性以及可视化等优点,它迅速引起了学者们的广泛关注。薛亮等^[25]利用有限元软件对装配式混凝土剪力墙的力学性能进行了深入的数值模拟研究。模拟结果验证了有限元软件在分析装配式混凝土剪力墙各项性能指标方面的准确性和可靠性,为后续的模拟方法研究提供了有力的参考依据;伍日荣^[26]基于文献[27]的试验基础,利用ABAQUS建立了几组内置玻璃纤维增强塑料(glassfiber reinforced plastic, GFRP)管钢管混凝土束剪力墙模型,并通过控制不同层数的GFRP管进行有限元模拟分析。模拟结果显示,模型的抗震性能与原试验结果基本吻合,进一步验证了有限元模型在分析处理中的准确度。

当前,针对钢管混凝土束剪力墙结构体系,国内多地已开展了建筑示范工程的有限元分析。王承凤等^[28]针对襄阳水墨江南钢结构项目工程中的5#楼进行了深入研究,并采用SATWE和YJK这两种业界广泛认可的结构分析软件进行精准计

算,为钢结构在现代建筑中的优势提供了有力的数据支持和理论依据;章金波^[29]以宁波某工程项目中的6#楼为例,对结构体系、地震计算等方面进行了深入分析,通过PKPM软件的弹性方法模拟多遇地震下的内力分配和位移情况,计算结果均满足相关设计规范要求;毛剑等^[30]综合运用PKPM与YJK两款专业软件,对位于昆明的某工程项目中的1#楼进行了弹性性能分析;赵广韬等^[31]运用SAUSAGE软件对包头市某高层住宅楼进行动力弹塑性分析,这也是钢管混凝土束结构在高烈度带开展抗震性能研究的一项非常具有前瞻性和实用性的工作;受非闲等^[32]使用PKPM软件针对杭州一高层住宅楼项目深入开展了弹性结构分析,精心构思并阐述了其结构特殊转换层的设计策略;张彬等^[33]结合烟台市芝罘区2#高层住宅楼工程项目为例,探讨钢管混凝土组合剪力墙结构的优势,通过SATWE和YJK两款软件进行结构分析,发现两种软件得出的结构周期、层间位移角、剪重比和刚重比等关键参数吻合,均符合规范要求,并实现了预期的抗震性能;孟梅影等^[34]利用SAP2000软件对一栋21层的钢管混凝土束剪力墙结构进行了抗震分析。研究发现,通过在结构的不同跨数中布置黏滞阻尼墙,可以有效地提高结构的减震效果。陈志华等^[12]对比文献中的试验建立了有限元分析模型,通过与试验结果对比,发现试件承载力误差均控制在10%以内。根据上述试验,文献[13-14]、[19-20]均采用ABAQUS软件对各自剪力墙试件建立相应的有限元模型,与试验结果对比后发现,试件破坏形态基本一致。宋维国^[21]在建立的有限元模型中,对墙板两侧的加劲肋进行了分析,结果表明,加劲肋很好地抑制了剪力墙底部钢板的屈曲。于洪冉等^[35]为进一步提升钢管混凝土束组合剪力墙-梁连接节点的抗震性能,提出了一种新型锚固装配式墙-梁连接节点,并通过控制其端板厚度、锚固长度以及混凝土强度等级进行有限元模拟分析,如图4所示。

数据显示,采用这种新型节点连接明显提升了钢管混凝土束剪力墙的延性和耗能能力。同时,这种新型节点避免了传统焊接方式带来的麻烦,加快了施工进展,充分体现了装配化的高效特点。

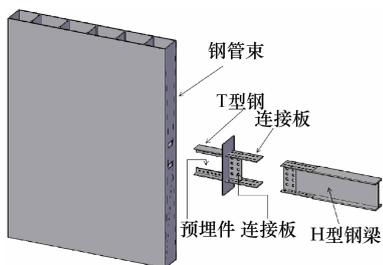


图 4 一种内嵌式新型锚固装配式墙-梁连接节点

3 当前研究存在的不足与展望

通过上述各学者的研究发现,采用钢管束与混凝土组合工作的设计理念极大提升了结构中剪力墙的抗震性能。同时,钢管束的设计方式更加契合装配式施工方法,显著提高了施工效率。然而,这种新型结构仍存在一些不足之处。

(1) 钢管混凝土束剪力墙在试验与模拟中的抗震性能表现较为优异,但这些试验大多是在室温和低应变率条件下进行的。而在实际工程应用中,建筑物可能会遭受高温和高应变率的影响,因此需要进一步开展在高温和高应变率条件下的试验研究。

(2) 在实际工程中,钢管混凝土束剪力墙增强了对混凝土的环向约束能力,但用钢量的增加也带来了一定的经济因素影响。因此,如何合理地简化结构用钢量将成为今后的研究重点。此外,钢管之间的连接质量对于墙体抗震性能具有直接影响,如何进一步优化并提升钢管束之间的连接方式也是未来研究的方向之一。

(3) 现有的钢管混凝土束剪力墙设计方法主要基于经验公式或数值模拟,缺乏系统的理论基础和试验验证。因此,需要进一步完善钢管混凝土束剪力墙的设计理论和方法。

4 结 语

钢管混凝土束剪力墙作为一种新型装配式结构构件,在截面形式、轴压比、加劲肋和节点连接等方面相较于传统剪力墙展现出显著的抗震性能优势。然而,其在极端复杂环境下的性能表现仍有待进一步测试与验证。未来研究应着重于收集更多试验数据,以完善其力学性能指标,并通过有限元分析实现结构模型处理的数字化与可视

化,从而深入理解并预测其行为特性。此外,在优化钢管混凝土束剪力墙结构的基础上,需对比现有理论公式,进一步验证其性能的可靠性与精确性。下一步研究将致力于深化结构分析,为实际工程应用提供更加坚实的理论与实践依据。

参考文献:

- [1] YU J G, FENG X T, HAO J P, et al. Mechanical performance of coupled buckling-restrained steel plate shear walls[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43:103093.
- [2] ZHENG L Q, ZHENG Y T. Seismic behaviour of concrete-filled steel tubular column and precast shear wall connections[J]. Structures, 2020, 27:934-949.
- [3] SONKARA, VERMA S. A Study on seismic effect on high rise building with & without shear wall [J]. International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR), 2023, 5(5):1-5.
- [4] 付波,李文斌. 一种新型工业化住宅结构体系:钢管束组合剪力墙结构体系[C]//钢结构建筑工业化与新技术应用. 北京:中国建筑金属结构协会, 2016: 215-221.
- [5] 钢管混凝土束结构技术标准: T/CECS 546—2018 [S]. 北京:中国计划出版社, 2018.
- [6] 姚攀峰,张义元. 多腔钢管钢筋混凝土剪力墙力学性能初步探讨[J]. 建筑结构, 2017, 47(增刊2):260-267.
- [7] 胡立黎,陈勇敢,尹卫泽. 钢管混凝土束剪力墙内普通混凝土浇筑试验[J]. 建筑结构, 2019, 49(11):77-81.
- [8] LI H B, SUN H, ZHANG W L, et al. Study on mechanical properties of self-compacting concrete and its filled in-line multi-cavity steel tube bundle shear wall [J]. Energies, 2019, 12(18):3466.
- [9] ZHANG X M, QIN Y, CHEN Z H, et al. Experimental behavior of innovative T-shaped composite shear walls under in-plane cyclic loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 120:143-159.
- [10] ZHANG X M, QIN Y, CHEN Z H. Experimental seismic behavior of innovative composite shear walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 116:218-232.
- [11] 陈志华,姜玉挺,张晓萌,等. 钢管束组合剪力墙恢复力模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(1): 115-122.
- [12] 陈志华,姜玉挺,张晓萌,等. 钢管束组合剪力墙变形性能研究及有限元分析[J]. 振动与冲击, 2017,

- 36(19):36-45.
- [13] WANG Y H, GUO L H, LI H D, et al. Lateral load response of L-shaped steel: concrete composite shear walls using multi-partition steel tube[J]. Engineering Structures, 2023, 293: 116671.
- [14] 李昕. L型多腔钢管混凝土组合剪力墙力学性能有限元分析[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- [15] 张振, 陈明, 龚顺风, 等. 间隔钢管混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(11): 51-60.
- [16] 张文元, 王柯, 王强, 等. 多腔钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能研究[J]. 工程力学, 2018, 35(11): 125-133.
- [17] 张鹏, 周新刚, 苗志华, 等. 剪跨比1.5的钢管束混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(5): 109-115.
- [18] GUO L H, WANG Y H, ZHANG S M. Experimental study of rectangular multi-partition steel-concrete composite shear walls[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 130: 577-592.
- [19] ZHENG H, MI Y X, CAI L L, et al. Seismic behavior and shear capacity prediction of coupled concrete: filled multicellular steel tube composite shear walls[J]. Structural Concrete, 2024, 25(3): 1999-2019.
- [20] 芦贵强. 联肢钢管束混凝土组合剪力墙滞回性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [21] 宋维国. 两侧带加劲肋的钢管束-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2021.
- [22] 李欢欢. 风机塔筒不同抗剪连接件矩形钢管混凝土束剪力墙抗震性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [23] 李杰, 陈志华, 张晓萌, 等. 无边缘构件钢管束剪力墙的墙梁节点抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(21): 159-165.
- [24] LIU Y F, CAI H H, LIU X G, et al. Cyclic performance of fully assembled joints between H-Beam and CFST shear wall[J]. Structures, 2023, 51: 1655-1669.
- [25] 薛亮, 孙千伟, 任晓丹. 基于内聚单元模型的装配式剪力墙数值模拟研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(4): 174-182.
- [26] 伍日荣. 内置GFRP管的多腔钢混凝土组合剪力墙抗震性能及恢复力模型研究[D]. 广州: 广州大学, 2024.
- [27] 郭佳莹. 内置GFRP管的组合剪力墙抗震性能试验研究[D]. 广州: 广州大学, 2020.
- [28] 王承凤, 刘娅俐. 水墨江南项目钢结构设计介绍[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊1): 1354-1358.
- [29] 章金波. 宁波某项目钢管混凝土束剪力墙结构体系的应用[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊1): 1293-1298.
- [30] 毛剑, 田泽源. 钢管混凝土束剪力墙结构体系在昆明某项目的应用[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊2): 812-815.
- [31] 赵广韬, 钟丽娜, 刘英达. 钢管混凝土束结构在高烈度地区的抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(6): 12-17.
- [32] 段非闲, 姚韡, 金鑫. 钢管混凝土束结构在杭州某高层住宅中的结构设计[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊1): 89-92.
- [33] 张彬, 张红梅, 姚韡, 等. 钢管混凝土束剪力墙结构高层住宅建筑结构设计与分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(增刊1): 60-64.
- [34] 孟梅影, 王森林, 康子恒. 钢管混凝土束剪力墙结构采用粘滞阻尼墙的减震研究[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(6): 139-143.
- [35] 于洪冉, 王燕, 安琦. 钢管束组合剪力墙结构锚固装配式墙-梁连接节点抗震性能分析[J]. 工业建筑, 2021, 51(6): 84-94.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵, 不再另行支付), 对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明, 如有异议请来稿说明, 本刊将作适当处理。