

# 内套钢管的装配式钢板 - 混凝土组合剪力墙抗震性能研究

谢志文, 汪小平, 吴宏睿, 吴汉彬

(江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

**摘要:**为满足高层装配式建筑的需求,提出一种新型内套钢管的装配式钢板-混凝土组合剪力墙。该剪力墙不仅具备优异的抗震性能,还便于运输和装配。通过有限元软件 ABAQUS 对内套钢管的装配式钢板-混凝土组合剪力墙和普通双钢板-混凝土剪力墙进行数值模拟对比分析,并研究了各参数对内套钢管的装配式钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能的影响。结果表明:1)与普通双钢板-混凝土组合剪力墙相比,内套钢管的装配式钢板-混凝土组合剪力墙(CSW3 试件)的水平承载力提高了 26.9%,耗能能力提升了 28.6%,具有更高的承载力和更好的抗震性能;2)在高轴压比的情况下,新型剪力墙仍保持良好的水平承载力;3)减小钢管间距能够提高新型剪力墙的耗能能力;4)降低剪跨比可以提高新型剪力墙的承载能力和整体刚度,但耗能能力有所下降。本文研究成果可为未来高层装配式建筑的建设和发展提供一定的借鉴与参考。

**关键词:**装配式钢板-混凝土组合剪力墙;内套钢管;抗震性能;低周期往复荷载;有限元模拟

中图分类号:TD398

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)03-0038-06

doi:10.13402/j.gcs.2025.03.034

## Research on seismic performance of prefabricated steel plate-concrete combined shear wall with inner steel pipe

XIE Zhiwen, WANG Xiaoping, WU Hongrui, WU Hanbin

(School of Civil Engineering and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

**Abstract:** In order to meet the needs of high-rise prefabricated buildings, a new type of prefabricated steel plate-concrete combined shear wall with inner steel pipe is proposed. The shear wall not only has excellent seismic properties, but is also easy to transport and assemble. The finite element software ABAQUS is used to conduct numerical simulation and comparison analysis of the prefabricated steel plate-concrete combined shear wall and ordinary double steel plate-concrete shear wall of the inner steel pipe, and the influence of each parameter on the seismic resistance of the prefabricated steel plate-concrete combined shear wall of the inner steel pipe is studied. The results show that: 1) Compared with ordinary double steel plate-concrete combined shear walls, the horizontal bearing capacity of the prefabricated steel plate-concrete combined shear wall (CSW3 specimen) with inner steel pipes is increased by 26.9%, and the energy consumption capacity is increased by 28.6%, which has higher bearing capacity and better seismic resistance; 2) Under the high axial pressure ratio, the new shear wall still maintains a good horizontal bearing capacity; 3) Reducing the steel pipe spacing can improve the energy consumption capacity of the new shear wall; 4) Reducing the shear span ratio can improve the load capacity and overall stiffness of the new shear wall, but the energy consumption capacity has been reduced. The results can provide a certain reference for the construction and development of high-rise prefabricated buildings in the future.

**Key words:** prefabricated steel plate-concrete combined shear wall; inner steel pipe; seismic resistance; low-period reciprocating load; finite element simulation

收稿日期: 2024-06-03

作者简介: 谢志文(1998—),男,硕士研究生,从事建筑结构抗震分析研究。

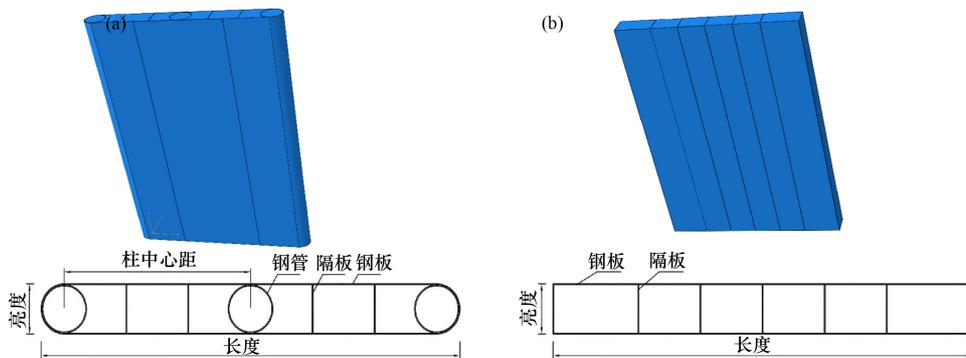
钢 - 混凝土组合剪力墙是一种新型抗侧力构件的统称。此类剪力墙由多种钢构件与混凝土组合而成, 结构形式多样, 具备更出色的抗震性能和高承载力, 逐渐取代了普通钢筋混凝土剪力墙<sup>[1-3]</sup>。近年来, 已有许多建筑应用了钢 - 混凝土组合剪力墙结构<sup>[4-5]</sup>, 目前工程中常用的形式包括内置单层钢板或外包双层钢板的钢板混凝土组合剪力墙<sup>[6-7]</sup>、以及在钢筋混凝土剪力墙内置钢管或钢管联排设计的钢管混凝土组合剪力墙<sup>[8-9]</sup>。张振等<sup>[10]</sup>研究了间隔钢管混凝土组合剪力墙在不同轴压比下的性能, 发现该新型剪力墙具有优异的抗震性能; 张鹏等<sup>[11]</sup>研究了钢管在剪力墙内部的联排作用, 提出了一种新型钢管束混凝土组合剪力墙, 并通过拟静力试验表明, 该剪力墙具有优异的抗震性能, 且随着轴压比的增大, 其初始刚度有所降低, 但承载能力逐步提高; 熊枫等<sup>[12]</sup>研究了装配式内置双钢套管混凝土组合剪力墙抗震性能, 发现其抗震性能良好, 且该新型装配方式可以提高剪力墙的整体性; 李兆杰等<sup>[13]</sup>研究了薄壁钢管装配式混凝土剪力墙力学性能, 发现与传统现浇剪力墙相比, 其抗震性能有所提高; GUO 等<sup>[14]</sup>讨论了一种新型平行圆钢管混凝土柱外包钢板混凝土剪力墙的抗震性能, 发现该复合墙体具有良好的承载力和变形能力。本文提出一种新型内套钢管的装配式钢板 - 混凝土组合剪力墙。采用有限元软件 ABAQUS 对该新型剪力墙与普通双钢板 - 混凝土剪力墙进行了数值模拟对比分析, 并研究了各参数对新型剪力墙抗震性能的影响, 以期为高层装配式建筑的建设和发展提供一定的参考。

## 1 内套钢管的装配式钢板 - 混凝土组合剪力墙构造及实例

内套钢管的装配式钢板 - 混凝土组合剪力墙通过在内部间隔布置钢管和隔板的方式在一定程度上解决了传统装配式结构存在的整体性问题; 同时, 其安装施工也较为简捷高效, 且具有良好的承载性能。该新型剪力墙由边部构件和中部构件两部分组成, 结构为平行设置的双层钢板。在双层钢板间形成中空夹层, 并且在中空夹层中均匀设置内填混凝土的钢管, 而钢管与双层钢板通过径向螺栓固定连接。在钢管混凝土柱之间, 按照一定间隔布置隔板, 内部中空部位在工厂填充混凝土, 将边部构件和中部构件连接后现场填充混凝土, 以此方式形成统一整体。

共设计 7 个内套钢管的装配式钢板 - 混凝土组合剪力墙模型 (CSW1 ~ CSW7) 和 1 个普通双钢板 - 混凝土组合剪力墙模型 (SW1), 如图 1 所示。墙体混凝土等级为 C30, 钢材为 Q235。试验参数如表 1 所示。

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50011—2010) 要求, 剪力墙的轴压比范围为 0.4 ~ 0.6。为了更全面地展现轴压比的影响, 选择轴压比为 0.2、0.4、0.6 进行新型剪力墙的评估。钢管间距分别设置为 450、600、750 mm, 以考察不同钢管间距的影响。设置 3 种剪跨比 (1.2、1.5、1.7)。模型 CSW1、CSW2、CSW3 轴压比分别取 0.2、0.4、0.6, 其余样本 (CSW4 ~ CSW7、SW1) 取 0.4。模型 CSW3 ~ CSW5 的中钢管间距分别取 600、450、750 mm。



(a) 内套钢管的装配式钢板 - 混凝土组合剪力墙; (b) 普通双钢板 - 混凝土组合剪力墙

图 1 不同装配式剪力墙结构布置

表 1 各试件主要参数

mm

试件编号	高度	长度	厚度	轴压比	板厚	钢管间距	剪跨比
CSW1	2025	1 350	150	0.2	3	600	1.5
CSW2	2025	1 350	150	0.4	3	600	1.5
CSW3	2025	1 350	150	0.6	3	600	1.5
CSW4	1575	1 050	150	0.4	3	450	1.5
CSW5	2475	1 650	150	0.4	3	750	1.5
CSW6	1620	1 350	150	0.4	3	600	1.2
CSW7	2295	1 350	150	0.4	3	600	1.7
SW1	2025	1 350	150	0.4	3	—	1.5

## 2 基于实例的数值模拟分析

### 2.1 模型设定

利用有限元软件 ABAQUS 进行模型非线性仿真。工程中,由于大部分钢筋仅发生屈服,很少出现断裂,因此选择采用双折曲线模型来描述其力学性能;采用塑性损伤模型来描述混凝土材料的行为。对于钢板、钢管、加劲肋和混凝土,使用八节点减缩积分的实体单元 C3D8R 进行模拟。在接触定义方面:钢板与钢管之间采用面对面的接触定义,切向摩擦系数为 0.3;钢板与混凝土采用面面接触,切向摩擦系数取 0.6,法向采用硬接触;钢板与钢板之间,以及钢板与加劲肋之间采用绑定约束。在边界条件方面:在剪力墙顶部和底部分别建立名义参考点,并与对应表面耦合;底部设置为固定约束;顶部施加轴力和水平荷载。

模型加载步骤:1)在剪力墙顶部施加预定的轴力并保持恒定;2)在侧向施加按位移控制的低周期往复荷载;3)当位移角分别为 1/1 000、1/500 时,每级循环 1 次;4)在位移角为 1/1 000、1/500、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50、1/40、1/30 的情况下,每级循环两次。

网格划分:模型所有部件均为实体部件,因此所有部件均划分成六面体网格;钢板与混凝土采用面面接触时,钢板为主面,混凝土为从面。

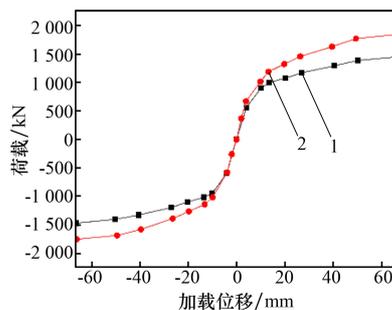
### 2.2 SW1、CSW3 模型对比分析

将新型剪力墙与普通双钢板-混凝土组合剪力墙进行数值模拟分析。

#### 2.2.1 承载能力分析

两种模型所反映的骨架曲线如图 2 所示。由图 2 可知:两种模型在水平荷载作用下均逐渐进

入塑性阶段。在较小荷载下,两种模型的承载力相近,主要由钢板和混凝土提供支撑。随着荷载增加,两种模型进入塑性阶段,其中 CSW2 试件的承载力优于 SW1 试件。在加载后期,与 SW1 相比,CSW2 试件在正反水平位移下的极限承载力分别提高了 26.9%、19.2%,对应的加载位移分别为 67.5、64.0 mm。由于内部间隔布置了钢管,钢管加强了外部钢板对内部混凝土的约束作用,提高了混凝土对承载力的贡献,使钢材和混凝土更好地协同工作。这说明相对于普通双钢板-混凝土组合剪力墙,新型剪力墙具有更高的水平承载力。

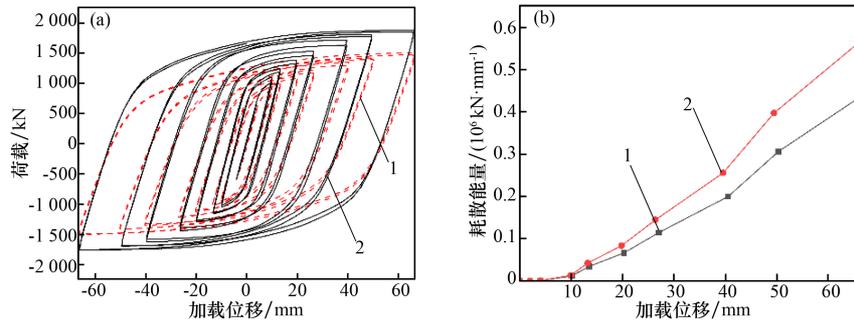


1—SW1; 2—CSW2。

图 2 SW1 与 CSW3 骨架曲线对比

#### 2.2.2 滞回曲线及耗能能力分析

两种剪力墙的滞回曲线和耗能曲线如图 3 所示。由图 3 可知:在加载过程中,两种模型的累计耗能逐渐增大。在初期阶段,两种模型耗能能力大致相当;随后,CSW2 试件的耗能能力增长速率大于 SW1 试件;在加载后期,与 SW1 试件相比,CSW2 试件的耗能能力增长了 28.6%,此时加载位移为 67.5mm。综上,相对于普通双钢板-混凝土组合剪力墙,新型剪力墙可以显著提高墙



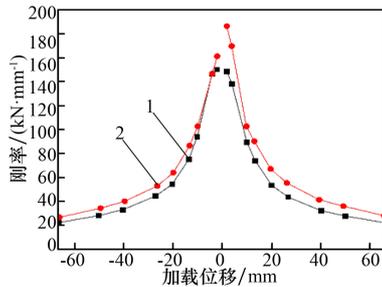
(a) 滞回曲线; (b) 耗能曲线  
1—SW1; 2—CSW2。

图 3 SW1 与 CSW3 滞回曲线和耗能曲线

体的耗能能力。

### 2.2.3 刚度退化

图 4 为两模型剪力墙的刚度退化曲线。由图 4 可知: 随着负载量的增加, 两种模型的刚度逐步降低。SW1 试件的初始刚度比 CSW2 试件高约 25%。起初, SW1、CSW2 试件的刚度退化速率较快, 随后趋于平缓; 达到 67.5 mm 的极限加载位移时, 与 SW1 试件相比, CSW2 试件的剩余刚度提高了 28.0%。由此可见, 新型剪力墙可有效提高墙体的初始刚度和剩余刚度。



1—SW1; 2—CSW2。

图 4 SW1 与 CSW3 刚度退化曲线

## 3 参数对新型剪力墙的影响

在轴力和水平往复荷载共同作用下, 通过改变新型剪力墙的轴压比、钢管间距和剪跨比参数变量, 研究各参数对该剪力墙的影响。

### 3.1 轴压比

控制剪力墙的其他参数不变, 顶部施加轴力的轴压比分别取 0.2、0.4、0.6。新型剪力墙的轴压比采用《钢管混凝土叠合柱结构技术规程》(T/CECS 188—2019) 提出的计算公式。

$$n_d = \frac{1.2N_d}{f_{cc}A_{cc}/1.4 + f_{co}A_{co}(1 + 1.8\xi)/1.4 + f_{sp}A_{sp}/1.11} \quad (1)$$

式中:  $n_d$  为轴压比;  $N_d$  为轴向力, N;  $\xi$  为钢管环箍指数;  $f_{cc}$ 、 $f_{co}$  分别为核心混凝土和填充混凝土的抗压强度, MPa;  $f_{sp}$  为钢板的屈服强度, MPa;  $A_{cc}$ 、 $A_{co}$ 、 $A_{sp}$  分别为混凝土、填充混凝土、钢板的截面面积,  $\text{mm}^2$ 。

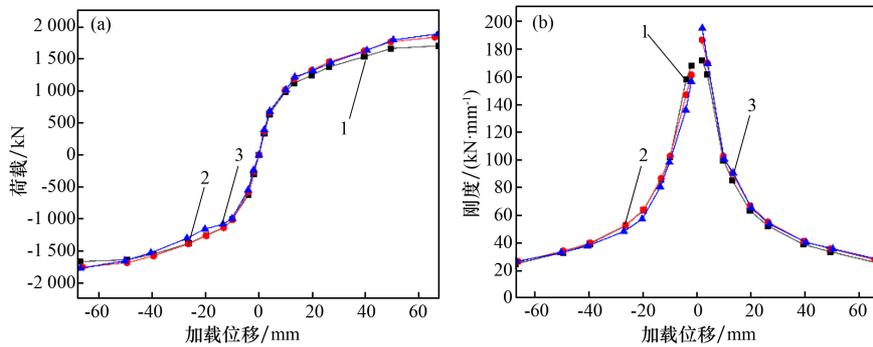
探究新型剪力墙不同轴压比的性能, 结果如图 5 所示。由图 5 可知: 当轴压比逐渐增加时, 墙体的骨架曲线变化大致相同。当加载位移为 13.5 mm 时, 随着轴压比的增大, 对应模型的承载力有所提高。CSW3 试件的极限荷载比 CSW1 试件提高了 10.9%。改变轴压比对刚度的影响较小。具体而言, CSW3 试件的初始刚度比 CSW1 试件提高了 13.6%, 而在加载位移为 67.5 mm 时, CSW3 试件的刚度相比 CSW1 试件增加了 11.3%。表 2 为模型总耗能情况。由表 2 可知: 改变轴压比对剪力墙的耗能能力影响不大。与 CSW1 试件相比, CSW2 试件总耗能能力提高了 6.4%, 而 CSW3 试件总耗能能力提高了 14.9%。综上, 轴压比对内套钢管的装配式钢板-混凝土组合剪力墙承载力及刚度的影响有限, 表明在高轴压情况下, 该剪力墙仍具有高水平的承载力。

表 2 模型总耗能情况  $10^6 \text{ kN/mm}$

CSW1	CSW2	CSW3	CSW6	CSW7
1.41	1.50	1.62	1.47	1.57

### 3.2 钢管间距

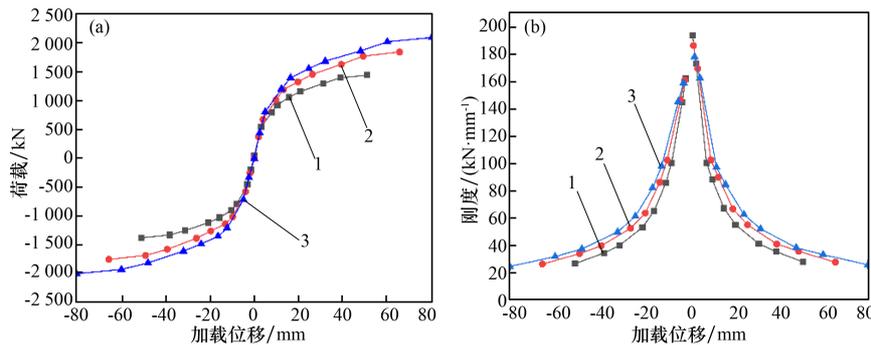
为研究钢管布置间距对新型剪力墙的影响, 控制其他参数不变, 分别设置钢管间距为 450、600、750 mm, 结果如图 6 所示。由图 6 可知: 随着钢管间距的增加, 承载力逐渐提高。CSW2 试件的承载力相比 CSW4 试件提高了 27.8%, 而 CSW5



(a) 骨架曲线; (b) 刚度退化曲线

1—CSW1; 2—CSW2; 3—CSW3。

图 5 CSW1、CSW2 和 CSW3 骨架曲线和刚度退化曲线



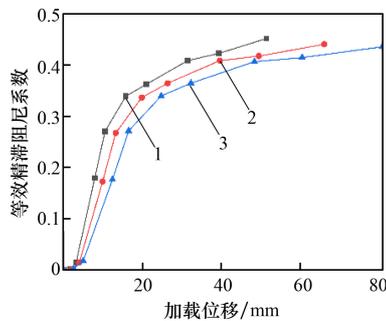
(a) 骨架曲线; (b) 刚度退化曲线

1—CSW4; 2—CSW2; 3—CSW5。

图 6 CSW2、CSW4 和 CSW5 的骨架曲线和刚度退化曲线

试件的承载力相比 CSW4 试件提高了 45.4%。改变钢管间距对刚度的影响很小, 3 种钢管间距对模型刚度影响趋同且数值差异不大。

各试件的等效黏滞阻尼系数随位移的变化关系如图 7 所示。由图 7 可知: 随着加载位移的增大, 各模型等效黏滞阻尼系数逐渐提高, 且表现出相似的变化趋势。其中, CSW4 试件的等效黏滞阻尼系数最大, 而 CSW5 试件的等效黏滞阻尼系数



(a) 骨架曲线; (b) 刚度退化曲线

1—CSW4; 2—CSW2; 3—CSW5。

图 7 等效黏滞阻尼系数 - 加载位移曲线

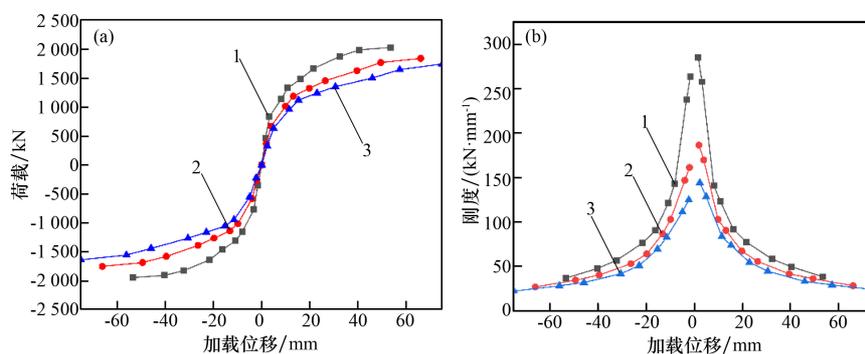
最小。综上, 减小钢管间距可以提高该剪力墙的耗能能力。

### 3.3 剪跨比

为研究剪跨比对新型剪力墙的影响, 控制其他参数不变, 分别设置剪跨比为 1.2、1.5 和 1.7, 结果如图 8 所示。由图 8 可知: 不同试件的骨架曲线变化相似。CSW6 试件的最大承载力比 CSW7 试件提高了 16.3%, 其初始刚度比 CSW7 试件提高了 98.43%。随着加载位移的增加, CSW7 试件的刚度大于 CSW2 试件, 但整体下降幅度较大。由表 2 可知: 随着剪跨比的增大, 剪力墙的耗能能力有所提高。CSW7 试件的总耗能相比 CSW6 试件提高了 6.8%。综上, 降低剪跨比可以提高新型剪力墙的承载能力和整体刚度, 但总耗能能力有所下降。

## 4 结 论

(1) 与 SW1 试件(普通双钢板 - 混凝土组合剪力墙)相比, CSW3 试件(内套钢管的装配式钢



(a) 骨架曲线; (b) 刚度退化曲线

1—CSW6; 2—CSW2; 3—CSW7。

图 8 CSW2、CSW6 和 CSW7 骨架曲线和刚度退化曲线

板-混凝土组合剪力墙)的水平承载力提高了 26.9%,耗能能力提升了 28.6%。这表明 CSW3 试件具有更高的承载力和更好的抗震性能,能够有效抑制墙体屈曲。

(2) 在高轴压比的情况下,内套钢管的装配式钢板-混凝土组合剪力墙仍能保持良好的水平承载力。

(3) 通过对 CSW2、CSW4、CSW5 模型的对比分析,发现减小钢管间距可以提高内套钢管的装配式钢板-混凝土组合剪力墙的耗能能力。

(4) 通过对 CSW2、CSW6、CSW7 模型对比分析,发现降低剪跨比可以提高内套钢管的装配式钢板-混凝土组合剪力墙的承载能力和整体刚度,但其耗能能力有所下降。

## 参考文献:

- [1] 聂建国,陶慕轩,樊健生,等. 双钢板-混凝土组合剪力墙研究新进展[J]. 建筑结构,2011,41(12):52-60.
- [2] 徐如楠,刘新领,张弘洋. 钢板-混凝土组合剪力墙研究[J]. 工程与建设,2016,30(2):155-157.
- [3] 曹万林,杨兆源,周绪红,等. 装配式轻钢组合结构研究现状与发展[J]. 建筑钢结构进展,2021,23(12):1-15.
- [4] 张小良,郭达文,陈蛟龙,等. 珠西金融中心结构设计中的关键技术研究[J]. 建筑结构,2021,51(13):22-27.
- [5] 郭达文,马玉宏,郑佳凯,等. 排钢管钢板混凝土剪力墙转钢管混凝土剪力墙体系设计方法及应用[J]. 建筑结构学报,2023,44(增刊1):274-281.
- [6] 陈宗平,周济,莫琳琳,等. 双波纹钢板混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(10):199-213.
- [7] 张壮南,李珊珊,王春刚,等. 设置混合连接件的双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(增刊1):92-100.
- [8] 何翰翔. 钢板-联排钢管混凝土组合剪力墙[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [9] 武立伟,于斐凡,郭雪源,等. 装配式圆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,2022,43(增刊1):186-195.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 熊枫,黄炎生,周靖,等. 装配式内套双钢管混凝土组合剪力墙的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2021,54(4):8-18.
- [13] 李兆杰,孟凡林,战美秋,等. 基于薄壁钢管的装配式混凝土剪力墙抗震性能研究[J]. 施工技术,2023,52(20):122-128.
- [14] GUO D W, MAY H, ZHAO G F, et al. Seismic behavior of steel-plate encased concrete shear wall with paralleled circular CFST columns: Laboratory test and numerical simulation[J]. Structures,2023,49:240-255.