

一种新型装配式轻质人字支撑抗震墙抗震性能数值分析

李 浩¹, 王金刚¹, 李 可², 管东芝³, 游杰勇⁴

¹西安诺博尔稀贵金属材料股份有限公司, 陕西 西安

²郑州大学土木工程学院, 河南 郑州

³东南大学土木工程学院, 江苏 南京

⁴中国建筑第五工程局有限公司, 河南 郑州

收稿日期: 2025年2月28日; 录用日期: 2025年3月20日; 发布日期: 2025年3月31日

摘 要

为解决传统剪力墙自重大, 延性差等问题, 本文提出了一种将剪力墙受力较小的中间部分开洞、并加入人字支撑的新型“装配式轻质人字支撑抗震墙”, 进而研究其抗震性能。以传统剪力墙的水平低周反复试验为基础, 采用开发有限元软件OpenSees, 对其进行数值模拟分析, 和试验结果比较吻合良好, 验证了本文采用的数值分析方法的合理性。设计装配式轻质人字支撑抗震墙BJZC、采用OpenSees进行数值模拟研究其抗震性能, 结果表明: 装配式轻质人字支撑抗震墙BJZC的抗震性能满足设计要求, 但自重明显减轻; 且由于支撑的作用, 可形成具有多道抗震防线的结构。

关键词

装配式轻质人字支撑抗震墙, 水平低周反复荷载试验, 抗震性能, 数值分析

Numerical Analysis of Seismic Performance of a New Assembled Shear Wall with Lightweight Herringbone Brace

Hao Li¹, Jingang Wang¹, Ke Li², Dongzhi Guan³, Jieyong You⁴

¹Xi'an Noble Metal Material Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan

³School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

⁴China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd., Zhengzhou Henan

Received: Feb. 28th, 2025; accepted: Mar. 20th, 2025; published: Mar. 31st, 2025

文章引用: 李浩, 王金刚, 李可, 管东芝, 游杰勇. 一种新型装配式轻质人字支撑抗震墙抗震性能数值分析[J]. 土木工程, 2025, 14(3): 578-587. DOI: 10.12677/hjce.2025.143063

Abstract

In order to solve the problem of the traditional shear wall, such as the major weight and poor ductility, a new “assembled shear wall with lightweight herringbone brace” was designed, and the seismic performances were studied. Based on the horizontal low cycle loading test for the traditional shear wall, the OpenSees was used to analyze the seismic performance of the shear wall. The analysis results fit well with the test results, which show that the numerical analysis method is reasonable in this paper. Furthermore, the assembled shear wall with lightweight herringbone brace BJZC was designed, and the seismic performance of which was analyzed by using OpenSees. The results show that the seismic performance of assembled shear wall with lightweight herringbone brace can meet design requirement. Compared to the traditional shear wall, the mass of the new-type wall is lighter. And because of the brace function, it can form a structural system with multi-channel seismic defenses.

Keywords

Assembled Shear Wall with Lightweight Herringbone Brace, Horizontal Low Cyclic Loading Test, Seismic Performance, Numerical Analysis

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

伴随着新型建筑工业化理念正在建筑领域得到广泛的接受和应用, 预制装配式混凝土结构[1][2]作为一种工业化建筑主要结构形式成为学者的研究对象。预制装配式剪力墙结构是以预制或半预制墙板为主要构件, 经现场装配、部分现浇而成的混凝土结构, 其具有建造质量好、生产速度快、保护环境、节约资源、有利于社会可持续发展等优点。

传统预制钢筋混凝土剪力墙由于自重较大, 给吊装和安装带来极大不便, 同时增加结构的自重和地震作用。因此, 本课题组提出一种新型轻质抗震墙, 即将墙体受力较小部分用较小截面的斜撑代替, 从而大幅度减轻构件自重。已有的框架支撑结构[3]和复合结构[4]研究表明, 支撑在地震作用下先屈服, 增加了抗震墙结构的耗能能力, 并使抗震墙具有多道抗震防线。本文采用大型开放有限元软件 OpenSees, 针对所提出的轻质人字支撑抗震墙, 研究其是否满足抗震设计要求, 将其抗震性能与传统实体剪力墙进行对比分析。

2. 实体剪力墙 OpenSees 有限元模型建立

OpenSees 全称是 Open System for Earthquake Engineering Simulation (地震工程模拟开源系统)[5], 是结构工程和岩土工程地震反应分析的一个开源式模拟系统和软件开发框架。OpenSees 的显著特点: 程序开放, 便于改进, 易于协同开发; 其可以实现的分析包括: 简单的静力线弹性分析, 静力非线性分析, 模态分析, Pushover 拟动力分析, 动力线弹性分析和复杂的动力非线性分析等; 还可用于结构和岩土体系在地震作用下的可靠度及灵敏度的分析。

本文首先针对文献[6]的实体剪力墙试件, 利用 OpenSees 软件对其进行数值模拟分析, 并和其试验结果[6]比较, 以验证 OpenSees 软件及所选模型参数的合理性。

2.1. 实体剪力墙截面及配筋[6]

图 1 为文献[6]中现浇的实体钢筋混凝土剪力墙试验试件(编号 W-1)的截面配筋及尺寸, 文献[6]对 W-1 进行了水平低周反复荷载的试验。

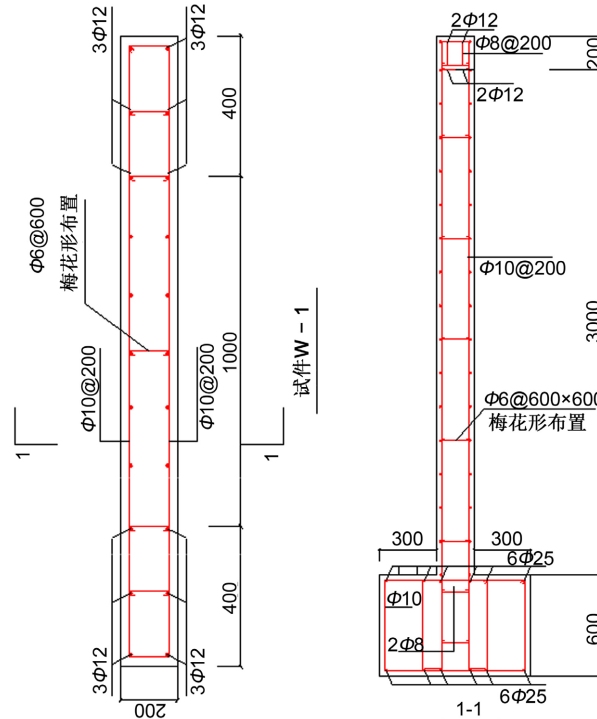


Figure 1. Specimen W-1 reinforcement section
图 1. 试件 W-1 截面配筋

2.2. 基于 OpenSees 有限元建模

2.2.1. 混凝土本构关系

混凝土采用 Concrete01 Material (如图 2)。由于 OpenSees 不能对箍筋直接建模, 所以用修正过的 Kent-Park [7]模型计算混凝土参数来考虑横向箍筋对约束区混凝土的增强作用。

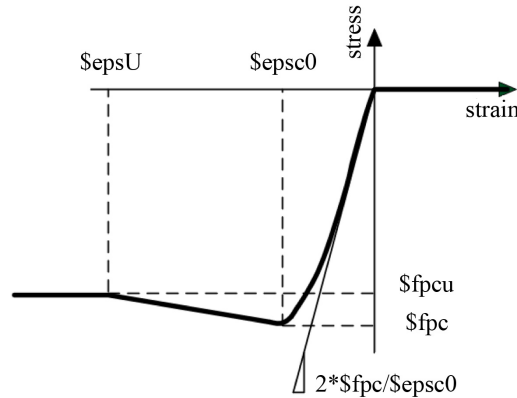


Figure 2. Constitutive relationship of Concrete01
图 2. Concrete01 本构关系

2.2.2. 钢筋本构关系

本文采用 Steel102 模型(如图 3)模拟钢材的力学性能, 该模型采用随动强化理论模型, 在反复荷载的作用下考虑了钢筋的刚度退化, 加载和卸载过程考虑了包辛格效应。

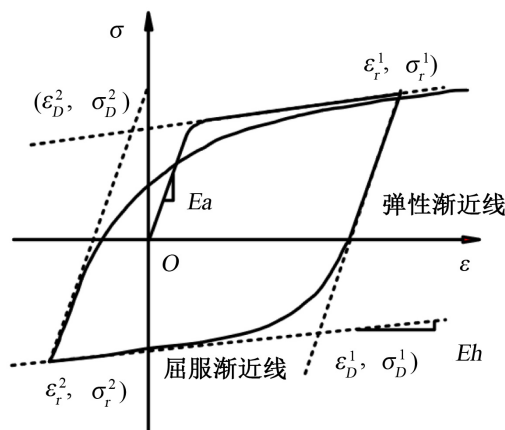


Figure 3. Constitutive relations of Steel102
图 3. Steel102 本构关系模型

2.2.3. 截面类型

本文选用 Fiber Section [8]——纤维截面, 截面划分成包括混凝土纤维和钢筋纤维在内的很多细小纤维, 对每根纤维只考虑其轴向本构关系, 且假定截面在变形过程中始终保持平面, 故只需知道构件截面的弯曲应变和轴向应变就可以得到截面每一根纤维的应变, 从而计算得到截面刚度。图 4 为 W-1 试件有限元分析的单元和截面划分。

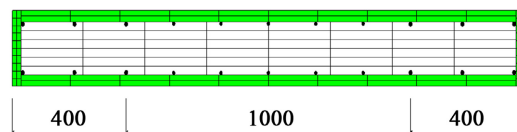


Figure 4. Section division of finite element model
图 4. 有限元模型截面划分

2.2.4. 单元类型

本文选用 OpenSees 中基于刚度法的梁柱单元模型——DispBeamColumn, 其算法是根据各节点的位移采用 3 次 Hermit 函数构建其形函数, 然后对构件的形函数求导得到构件的应变, 再利用虚功原理计算构件的刚度矩阵。由于构件进入屈服状态后曲率一般都不再是线性分布, 而基于位移的单元所采用的形函数确定的曲率分布是线性的, 所以一般需将构件再细分为数个小的单元, 使得在一定范围内近似满足曲率线性分布。

3. 基于 OpenSees 的实体剪力墙数值分析与试验结果的比较分析

3.1. 滞回曲线的数值模拟结果与试验结果对比

采用 OpenSees 对 W-1 进行水平低周反复荷载作用的数值模拟分析, 和试验方法相同[6], 首先在墙体顶部施加预定的竖向荷载(730 kN), 然后进行水平低周反复荷载的加载至破坏。得出其滞回曲线如图 5 所示, 曲线形状规律表明, 在剪力墙屈服前, 结构加载时的变形和卸载时的残余变形均较小, 正反向加

载, 卸载构成的滞回环基本不明显, 墙体在此阶段耗能能力较小; 达到屈服强度后, 滞回环面积逐渐增大, 随着位移幅值的增大, 卸载时结构残余变形显著增加, 滞回曲线明显向坐标轴偏移, 荷载—水平位移关系不再保持线性关系, 且加载曲线的斜率在逐渐减小, 表明结构已进入弹塑性阶段; 随着荷载的继续增大, 滞回曲线出现“捏缩”现象, 表明刚度不断退化, 当经历较大的位移后, 剪力墙逐渐接近塑性状态, 滞回环向弓形过渡。与图 6 试验结果的滞回曲线[6]比较, 二者的滞回环形状、包围的面积均吻合良好, 说明所提数值建模方法可以较准确地模拟构件的滞回曲线和耗能能力。

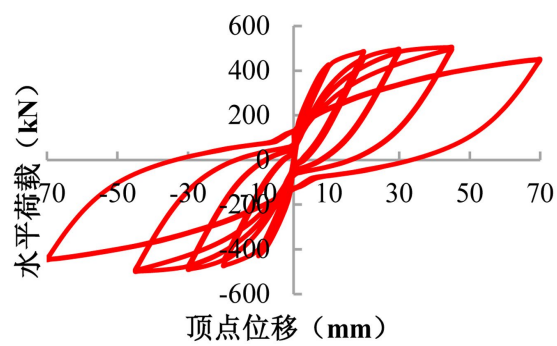


Figure 5. Hysteresis curve of finite element analysis
图 5. 滞回曲线有限元分析结果

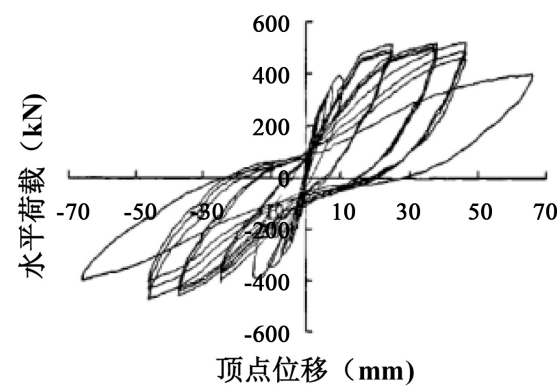


Figure 6. Hysteresis curve of the experiment
图 6. 滞回曲线试验结果

3.2. 数值模拟的骨架曲线与试验结果比较

试件 W-1 的数值模拟结果和试验结果的骨架曲线如图 7 所示, 从图中可以看出, 二者在上升段基本重合、最大荷载和对应的位移均吻合良好。在受力开始阶段, 基本为线性变化, 呈现出弹性特征; 达到开裂荷载时, 骨架曲线上出现第一个拐点, 曲线斜率变小, 表明剪力墙进入带裂缝工作状态; 当荷载增加至屈服荷载时, 骨架曲线出现明显的转折, 表明受力钢筋开始屈服, 剪力墙进入塑性阶段, 之后结构水平位移大幅度增加, 而荷载增加很少, 反映出剪力墙明显的刚度退化。

3.3. W-1 数值模拟的特征值与试验结果比较

表 1 分别列出了数值模拟及试验所得到的 W-1 开裂荷载、屈服荷载和极限荷载及相应的位移, 可以看出, 数值模拟结果与试验值均符合较好。说明本文采用的基于 OpenSees 的有限元建模方法可以很好分析实体剪力墙抗震性能。

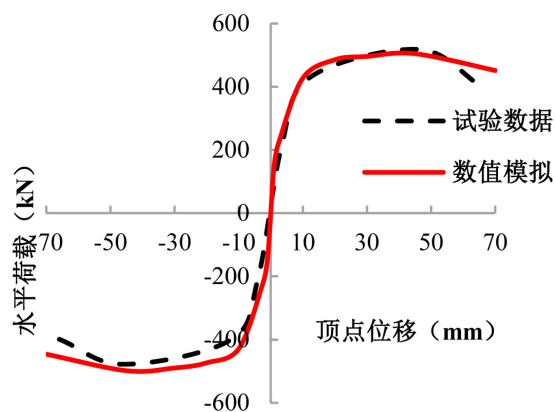


Figure 7. The skeleton curve of the numerical simulation and experiment of Specimen W-1
图 7. 试件 W-1 数值模拟和试验实测的骨架曲线

Table 1. Comparison of characteristic values of the numerical simulation and experiment results
表 1. 试件 W-1 数值模拟特征值与试验结果比较

试件 W-1	开裂点		屈服点		峰值点	
	P_{cr}	Δ_{cr}	P_y	Δ_y	P_m	Δ_m
	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)
试验值	210	3.3	430	12.3	518	46.1
模拟值	199	2.0	435	11.0	504	45.0

4. 装配式轻质人字支撑抗震墙 OpenSees 模拟分析

针对实体剪力墙自重大的缺点，本文提出了装配式轻质人字支撑抗震墙，见图 8，将剪力墙中间受力较小部位的钢筋混凝土去掉、由人字支撑代替，支撑截面尺寸和配筋确定原则是：宽度同剪力墙宽度、高度和配筋根据计算结果确定。

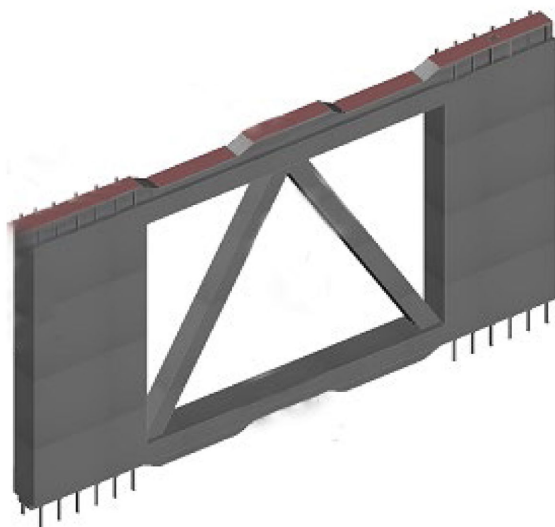


Figure 8. Composite structure seismic wall
图 8. 复合结构抗震墙

4.1. 装配式轻质人字支撑抗震墙有限元模型建立

仍然以实体剪力墙 W-1 试件[6]为对象, 将墙体中间开洞、并加入人字支撑, 初步选择洞口位置及尺寸如图 9 所示, 该试件编号为 BW-1, 所采用的支撑截面尺寸为 200×300 mm, 截面配筋设计为 $3\Phi 14$ 。为了同时分析人字支撑作用, 将墙体开洞后不加支撑的试件编号为 HW-1, 如图 10 所示。

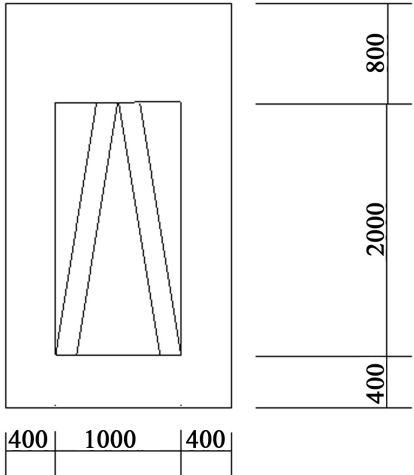


Figure 9. BW-1
图 9. BW-1

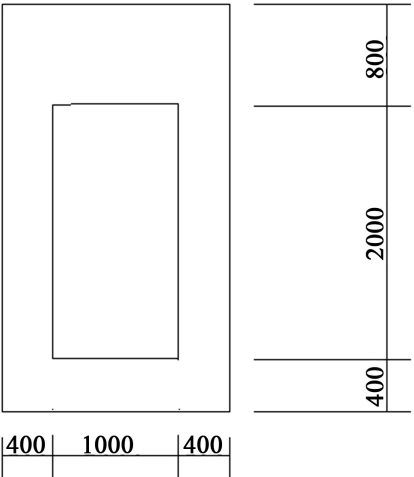


Figure 10. HW-1
图 10. HW-1

同样采用 OpenSees 分别对 BW-1 和 HW-1 建模、进行数值模拟分析, 其有限元模型图如图 11(a)、图 11(b)所示。

4.2. BW-1 和 HW-1 抗震性能分析比较

图 12 为 BW-1 和 HW-1 数值模拟计算的滞回曲线, 从中可以看出: 在结构屈服前, 二者的荷载一位移关系曲线都近似于直线; 达到屈服强度后, 随着加载位移的增大, 结构残余变形开始增大, 滞回环面积逐渐变大, 相比而言, BW-1 的耗能能力明显好于 HW-1, 且其结构刚度的退化也相对较慢。图 13 为

BW-1 和 HW-1 数值模拟计算的骨架曲线,从图中可以看出: BW-1 的承载能力、结构刚度明显高于 HW-1。由此说明洞口内支撑具有良好的抗震性能。

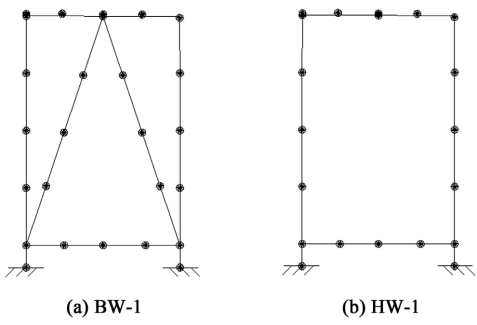


Figure 11. Finite element models BW-1 和 HW-1
图 11. BW-1 和 HW-1 有限元模型

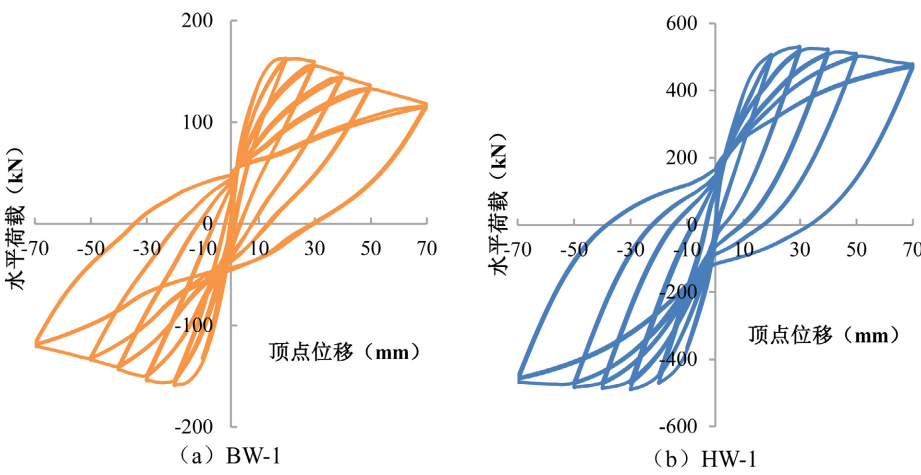


Figure 12. Hysteresis curve of J BW-1 和 HW-1
图 12. BW-1 和 HW-1 数值模拟滞回曲线

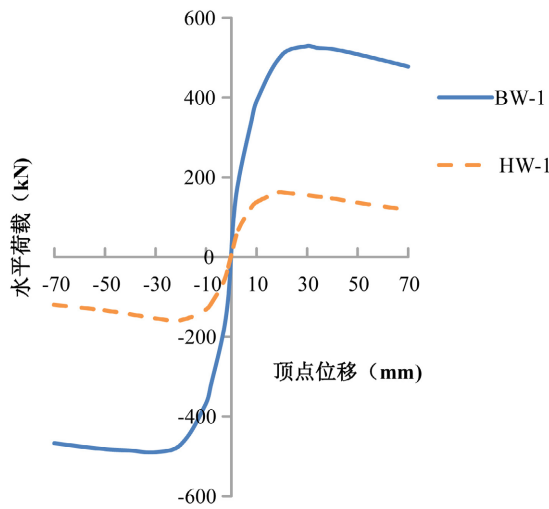


Figure 13. Skeleton curves of BW-1 和 HW-1
图 13. BW-1 和 HW-1 骨架曲线比较

4.3. BW-1 与实体剪力墙 W-1 抗震性能分析比较

图 14 为 BW-1 和试件 W-1 数值模拟计算的骨架曲线,可以看出二者骨架曲线的变化趋势基本重合。

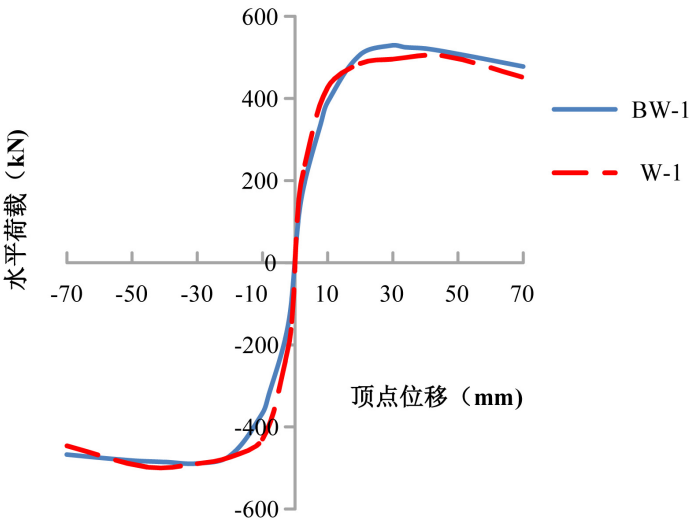


Figure 14. Skeleton curves of BW-1 and W-1
图 14. BW-1 和 W-1 数值模拟计算的骨架曲线

表 2 分别列出了 BW-1 和试件 W-1 数值模拟所得开裂荷载、屈服荷载和极限荷载,从中可以看出,二者的开裂荷载、屈服荷载以及极限荷载值基本相同,相应的开裂位移和屈服位移也基本相同,但 BW-1 达到极限荷载时所对应的位移值低于 W-1。综上分析,说明二者抗震能力基本相同,抗侧移能力在钢筋屈服前二者相当,但达到极限承载力时,本文提出的轻质人字支撑抗震墙具有更好的抗侧移能力,且自重相对较轻,这应该得益于其多重抗震破坏机制:根据模拟分析,发现轻质人字支撑抗震墙的破坏机制为支撑上钢筋先屈服,然后两边墙体屈服,最后结构达到极限承载力,充分发挥了支撑和墙体的抗侧移能力,具有多道抗震防线。

Table 2. Comparison of characteristic values of the numerical simulation of W-1 and JZC
表 2. W-1 和 JZC 数值模拟的特征值比较

试件	开裂点		屈服点		峰值点	
	P_{cr}	Δ_{cr}	P_y	Δ_y	P_m	Δ_m
	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)
W-1	199	2.0	435	11.0	504	45.0
BW-1	159	1.9	390	9.9	529	30.0

5. 结论

本文采用 OpenSees 软件建立有限元分析模型,分析了实体剪力墙、轻质人字支撑抗震墙的抗震性能,得出以下主要结论:

- 1) 基于 OpenSees 模拟实体剪力墙的水平低周反复荷载试验,和试验结果的滞回曲线、骨架曲线的特征值吻合良好,说明本文采用的有限元建模及分析方法合理可行。
- 2) 将实体剪力墙中间受力较小的部分开洞、并加人字支撑形成轻质人字支撑抗震墙,其抗震能力、

耗能能力及延性等抗震性能满足实体剪力墙要求。

3) 本文提出的轻质人字支撑抗震墙自重相对较轻,模拟地震作用的有限元分析表明具有多道抗震防线。

基金项目

国家自然科学基金青年基金项目(52108183)。

参考文献

- [1] 马健, 马斌, 刘明霞. 某装配整体式混凝土剪力墙结构住宅项目的设计与建造[J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 1118-1123.
- [2] 施继余, 胡瑛. 预制装配式剪力墙结构及其连接技术分析[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(7): 8-10.
- [3] 王新玲, 关罡. 强震作用下框架支撑结构的破坏机构及其极限荷载[J]. 世界地震工程, 2000, 16(2): 79-82.
- [4] 王新玲, 白小康, 潘毅, 等. 不同支撑复合结构抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(5): 78-84.
- [5] Guan, M., Hang, X., Wang, M., Zhao, H., Liang, Q.Q. and Wang, Y. (2024) Development and Implementation of Shear Wall Finite Element in Opensees. *Engineering Structures*, **304**, Article ID: 117639. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117639>
- [6] 连星, 叶献国, 王德才, 等. 叠合板式剪力墙的抗震性能试验分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(8): 1219-1223.
- [7] 龚敏锋, 杨栋, 张谨. 箍筋约束混凝土本构模型在弹塑性分析中的应用研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(20): 45-52+111.
- [8] 潘浩. 基于 OpenSees 的预制剪力墙抗震性能数值分析[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2019, 35(9): 103-105.