

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.11.001

# 预制钢桁架-混凝土组合剪力墙抗震性能研究

王卫永<sup>1</sup>, 陈博海<sup>1</sup>, 欧 应<sup>2</sup>, 姜先春<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆宜府住工科技有限公司, 重庆 400084)

**摘要:**将型钢桁架代替普通钢筋配置在钢筋混凝土剪力墙中形成钢桁架-混凝土组合剪力墙, 该剪力墙便于预制和安装, 适合用于装配式建筑。采用 ABAQUS 有限元分析建立了钢骨-混凝土剪力墙的抗震分析模型, 利用试验数据进行了验证。进而使用该模型研究了钢桁架-混凝土组合剪力墙的抗震性能, 对 5 个不同设计参数的钢桁架-混凝土剪力墙进行了往复加载模拟, 研究轴压比和型钢含钢率对其滞回性能、变形能力、刚度退化以及耗能能力的影响。结果表明: 轴压比增大对于钢桁架-混凝土组合剪力墙的变形能力和耗能能力均不利; 增加型钢柱的含钢率能有效提高剪力墙的抗剪承载力, 增加型钢腹杆的含钢率对剪力墙耗能能力的提高明显, 对承载能力提高较小。

**关键词:** 钢桁架-混凝土组合剪力墙; 有限元分析; 轴压比; 含钢率; 抗震性能

中图分类号: TU392

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)11-001-09

## Study on seismic performance of prefabricate steel truss-concrete composite shear wall

WANG Weiyong<sup>1</sup>, CHEN Bohai<sup>1</sup>, OU Ying<sup>2</sup>, JIANG Xianchun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Chongqing YifuZhugong Science and Technology Limited Company, Chongqing 400084, P. R. China)

**Abstract:** The steel trusses can be used to replace the normal reinforcement to form the precast steel truss-concrete composite shear wall, which is conveniently prefabricated and installed and very suitable for prefabricated constructions. Seismic analysis model of steel-concrete shear wall was established by ABAQUS and validated by test data. Thus, the seismic performance of precast steel truss-concrete composite shear wall was studied by the model, and the cyclic loading simulation on five steel truss-concrete shear walls with different design parameters was carried out to investigate the influence of axial compression ratio and steel content on its hysteretic performance, deformation capacity, stiffness degradation and energy dissipation capacity. The results show that the increase of axial compression ratio is disadvantageous to the deformation capacity and energy dissipation capacity of the shear wall. Increasing the steel ratio of the truss chord can effectively improve the shear bearing capacity of the shear wall, and increasing the steel ratio of the truss web has significant effects on improving the energy dissipation capacity of the shear wall, but has little effect on the load bearing capacity.

**Keywords:** steel truss-concrete composite shear wall; finite element analysis; axial compression ratio; steel ratio; seismic performance

收稿日期: 2019-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878096)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51878096).

作者简介: 王卫永(1982—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事结构防灾减灾研究, (E-mail) wywang@cqu.edu.cn.

钢筋混凝土剪力墙承载能力高、刚度大,但延性较差。国内外学者<sup>[1-5]</sup>在改善剪力墙延性方面做了很多研究。曹万林等<sup>[6-8]</sup>提出了带暗支撑剪力墙并对其进行研究,结果表明暗支撑可限制斜裂缝的发展,增大塑性铰耗能区域高度,抗震性能良好。王志浩,乔彦明等<sup>[9-10]</sup>对型钢剪力墙进行了抗弯、抗剪的性能研究,蓝宗建等<sup>[11-12]</sup>对钢筋混凝土墙内设置型钢钢架的低剪力墙进行研究,结果表明型钢骨架的配筋率对混凝土剪力墙的承载力、刚度及延性均有重要影响。陈默然等<sup>[13]</sup>对内置钢板带加强型钢混凝土低矮剪力墙进行试验,结果表明钢板带的设置对承载能力有显著提高。王玉镯等<sup>[14]</sup>对 3 个不同支撑形式的剪力墙进行试验,发现在墙体中加入竖向平行型钢支撑对剪力墙抗震性能提升效果最优。伍云天等<sup>[15-17]</sup>对内置不同冷弯薄壁型钢桁架形式的高强混凝土剪力墙进行研究,试验表明其位移延性以及后期侧向刚度退化都有明显改善,且增加暗支撑配筋率能显著改善剪力墙的延性。

当前,装配式剪力墙因具有施工速度快、抗震性能好、现场湿作业少等优点而成为了当前研究的热点,提高建筑的装配率是建筑工业化的一个重要体现。在内藏钢斜撑混凝土组合剪力墙的基础上,笔者提出了一种新型的预制钢桁架-混凝土组合剪力墙,其特点是将混凝土剪力墙与钢桁架进行优势组合,增大结构刚度和稳定性,提高钢结构的耐火性能和防腐性能,减少现场焊接工作量与缩短施工工期。这种新型的预制钢桁架-混凝土剪力墙的受弯承载能力主要由混凝土墙体和桁架的立柱承担,其受剪承载力主要由混凝土墙体、桁架立柱和腹杆承担,其中桁架立柱和水平腹杆截面类型可选用方钢管、H 型钢或槽型截面,斜腹杆可选用 H 型钢、槽型或双角钢截面。承载力计算方法可以参考《组合结构设计规范》JGJ 138—2016<sup>[18]</sup>中带钢斜撑混凝土剪力墙进行计算。为了推广这种新型的预制钢桁架-混凝土剪力墙,通过 ABAQUS 分析了该剪力墙在往复荷载作用下的抗震性能,通过参数分析,研究其在受压作用下的滞回性能、变形能力和耗能能力。

## 1 构件概况

预制钢桁架混凝土组合剪力墙主要由型钢桁架和外包混凝土构成,型钢桁架由 2 根钢骨架边柱(即桁架弦杆)、若干根水平杆和斜杆(腹杆)组成;腹杆两端均与边柱焊接连接从而形成一榀牢固的型钢桁架。为了防止混凝土收缩开裂及增加混凝土与钢桁架的粘结性能,钢桁架外围设置钢筋网,钢筋网与钢桁架进行点焊连接,剪力墙组成如图 1 所示。构件的截面尺寸取 1 700 mm×250 mm,高度取 3 200 mm;分布钢筋采用一级钢 HPB300;墙内设置纵向分布钢筋 $\phi 8@200$ ,水平分布钢筋 $\phi 8@200$ ;为了研究剪力墙在不同轴压比下的抗震性能差异,设计 3 组轴压比,为了研究型钢柱和型钢腹杆的含钢率对剪力墙抗震性能的影响,设计了 3 组不同厚度的型钢柱和型钢腹杆,分析中混凝土强度等级为 C30,钢材强度为 Q235,材料强度均取其标准值,剪力墙极限承载力根据有限元分析结果确定,构件的详细参数见表 1。

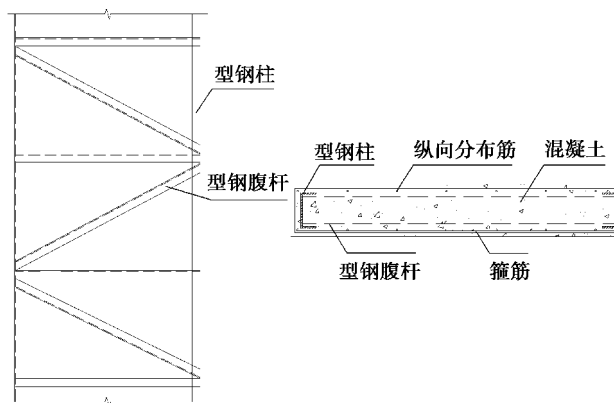


图 1 预制钢桁架混凝土组合剪力墙

Fig. 1 Prefabricated steel truss concrete composite shear wall

表 1 构件参数信息表

Table 1 The information of component parameters

研究内容	试件编号	轴压力/kN	轴压比	端部型钢截面/mm	斜撑截面/mm	含钢率/%
	SRCW-1	3 000	0.3	C170×80×10	C140×70×6	2.86
轴压比	SRCW-2	4 000	0.4	C170×80×10	C140×70×6	2.86
	SRCW-3	5 000	0.5	C170×80×10	C140×70×6	2.86
	SRCW-2	4 000	0.4	C170×80×10	C140×70×6	2.86
含钢率	SRCW-4	4 200	0.4	C170×80×14	C140×70×6	3.41
	SRCW-5	4 000	0.4	C170×80×10	C170×80×10	3.74

注:轴压比  $n=N/(f_{ck}A_c+f_{sk}A_s)$ ,其中  $N$  为轴压力, $f_{ck}$ 、 $f_{sk}$  分别为混凝土和墙体两侧钢骨架边柱钢材强度标准值, $A_c$ 、 $A_s$  分别为混凝土剪力墙横截面积和墙体两侧钢骨架横截面积。

## 2 有限元模型及验证

### 2.1 有限元模型

有限元模型中的尺寸按照表 1 中的构件参数建立。其中混凝土墙体采用实体单元,单元类型选择八节点线性六面体单元(C3D8R),型钢骨架采用考虑大变形的线性缩减薄壳单元(S4R),钢筋部分采用两节点线性三维桁架单元(T3D2)。

混凝土材料选用 ABAQUS 中提供的损伤塑性模型,此模型可以模拟混凝土在低围压状态下,单调荷载、循环荷载、动力荷载下的力学行为。其中,混凝土的本构关系按照现行《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010<sup>[19]</sup>取值,损伤因子的计算采用 Sidiroff 的能量等价原理<sup>[20]</sup>,泊松比取 0.2,密度取 2 400 kg/m<sup>3</sup>。型钢选用弹塑性强化模型,钢筋选用理想弹塑性模型。通常认为钢材的受拉和受压的应力-应变曲线一致,所以钢材的抗拉、抗压强度和弹性模量取相同值。钢材的抗拉和抗压强度按照现行《钢结构设计标准》GB 50017—2017<sup>[21]</sup>取值,钢材的密度取 7 800 kg/m<sup>3</sup>,泊松比取 0.3,弹性模量取  $2.06 \times 10^5$  MPa。为了便于施加荷载及设置边界条件,在剪力墙上下两端分别设置了高为 200 mm 的刚性加载梁。以便荷载能够均匀传递到剪力墙上,剪力墙的顶部和底部分别与加载梁绑定,并且约束底部加载梁 6 个方向上的自由度。

假定型钢之间的焊缝连接可靠,在 ABAQUS 中选用绑定来模拟型钢之间的焊缝连接;假定型钢骨架与钢筋骨架在混凝土墙体中没有滑移,将型钢骨架和钢筋骨架内置在混凝土实体内部。剪力墙的竖向荷载通过折算成均布压应力施加在加载梁的上表面;水平荷载采用位移加载的方式,施加到加载梁上。得到了钢桁架混凝土组合剪力墙的整体有限元模型如图 2 所示。

### 2.2 试验验证

为了验证文中模型的可靠性,采用有限元建模方式对文献<sup>[22]</sup>中的第 2 片剪力墙试验进行拟静力加载数值模拟。该试验试件外形、截面特征如图 3 所示。试件的参数为:高度 3 000 mm、宽度 800 mm、轴压比 0.095、墙边缘箍筋配箍率 0.62%、全截面含钢量 1.63%、暗柱含钢量 5.91%、C45 混凝土立方体抗压强度实测值 50.4 MPa、钢板及钢筋材料性能见表 2 所示。

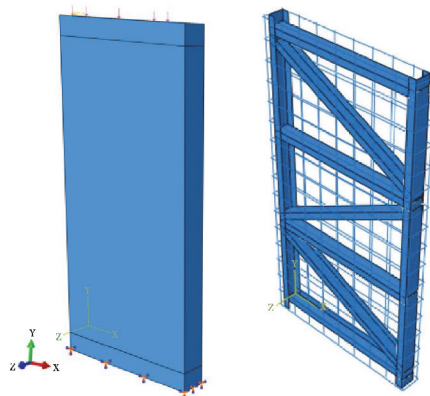


图 2 钢桁架混凝土组合剪力墙有限元模型  
Fig. 2 Finite element model of steel truss concrete composite shear wall

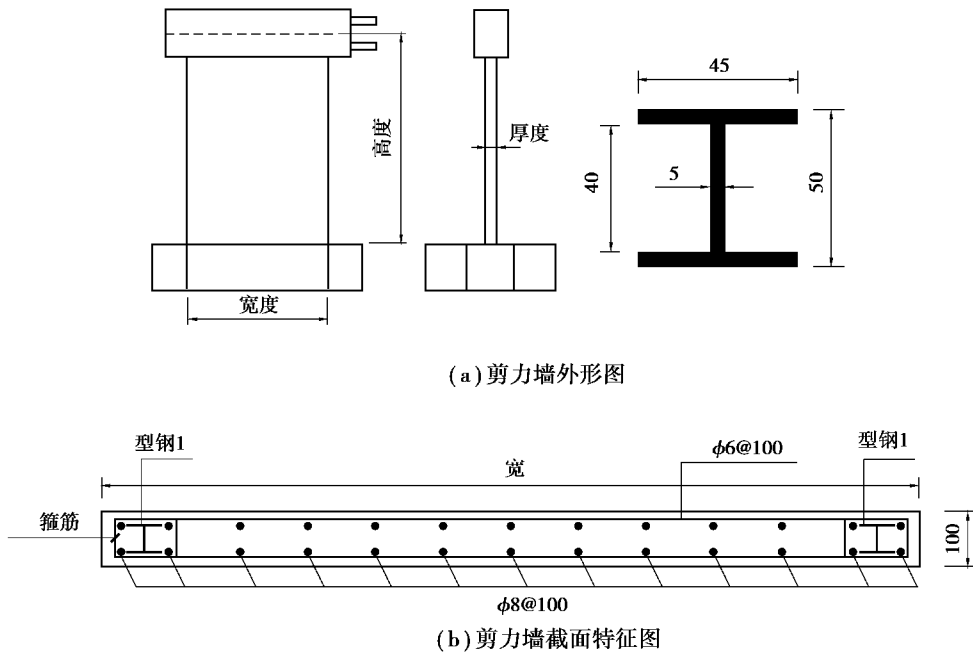


图 3 试验试件设计方案

Fig. 3 Test specimen design

表 2 钢板及钢筋材料力学性能  
Table 2 Mechanical properties of steel plates and steel bars

钢材料	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ $10^5$ MPa
5 mm 钢板	312.62	450.02	2.01
φ6 钢筋	307.11	441.53	2.19
φ8 钢筋	265.92	389.27	2.02

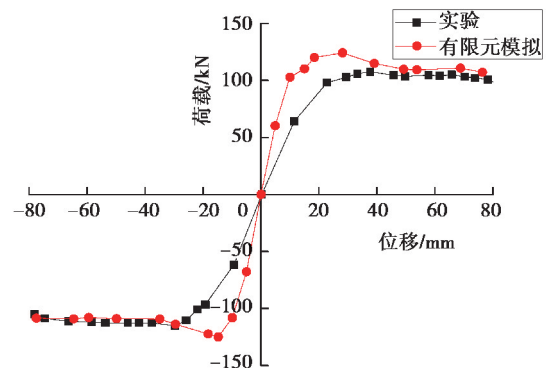


图 4 有限元分析结果和试验结果对比

Fig. 4 Comparison of results between finite element analysis and test

剪力墙模拟的骨架曲线与相对应的试验实测骨架曲线对比如图 4 所示。由图 4 可以看出,该有限元建模方法与试验结果在加载初期有一定的差异,这是因为有限元模拟未考虑到试件在力控制阶段已经形成了一些裂缝,未考虑材料本身的缺陷,而有限元模拟计算是基于材料无缺陷和各向同性的理想状态下,使得模拟结果比试验值初始刚度偏大,承载力偏大,总体误差在 15% 以内,但曲线达到峰值之后,两者之间的差异逐渐减小,2 条骨架曲线趋于一致。

比较试验和有限元模拟的加载与破坏过程,试验先采用荷载控制加载,待屈服后采用位移控制加载。在反复荷载作用下,墙体下部 200 mm 范围内两侧出现水平裂缝,随着反复荷载加载的增加,裂缝相向扩展,两端型钢屈服后,根部周围混凝土受压剥落,形成范围较大的破碎带,剪力墙呈现弯曲破坏形态。有限元模拟中,荷载采用位移控制,裂缝先从两侧剪力墙墙角处出现,然后向中间扩展,形成通长的弯曲主裂缝(见图 5),模拟过程剪力墙呈弯曲破坏的形态与试验过程基本一致。

基于以上的比较分析,验证了文中所建立的模型能够用于分析型钢桁架剪力墙的承载能力与破坏形态。

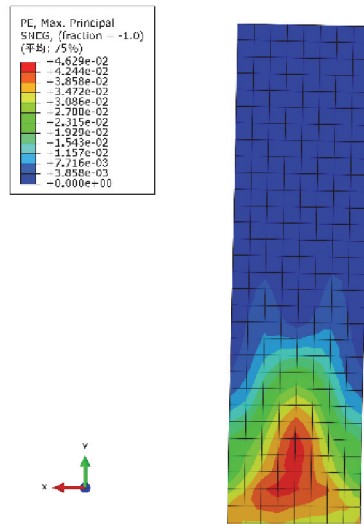


图 5 剪力墙破坏时的塑性应力

Fig. 5 Plastic stress of shear wall at failure state

### 3 抗震性能分析

#### 3.1 滞回曲线

利用 ABAQUS 有限元软件模拟各试件的滞回曲线如图 6 所示。对比试件 SRCW-1、SRCW-2 和 SRCW-3 滞回曲线的饱满程度可以看出, SRCW-1 最优, SRCW-2 次之, SRCW-3 最差, 表明轴压比的增加使得该剪力墙的耗能能力和变形能力降低。对比试件 SRCW-2 和 SRCW-4 的滞回曲线, 型钢腹杆的含钢率相同时, 型钢柱含钢率大的试件 SRCW-4 峰值荷载比试件 SRCW-2 高; 对比试件 SRCW-2 和 SRCW-5 的滞回曲线可以看出, 两者的承载能力很接近, 但 SRCW-5 滞回曲线更加饱满, 这表明增加型钢腹杆的含钢量能提高剪力墙的耗能能力。

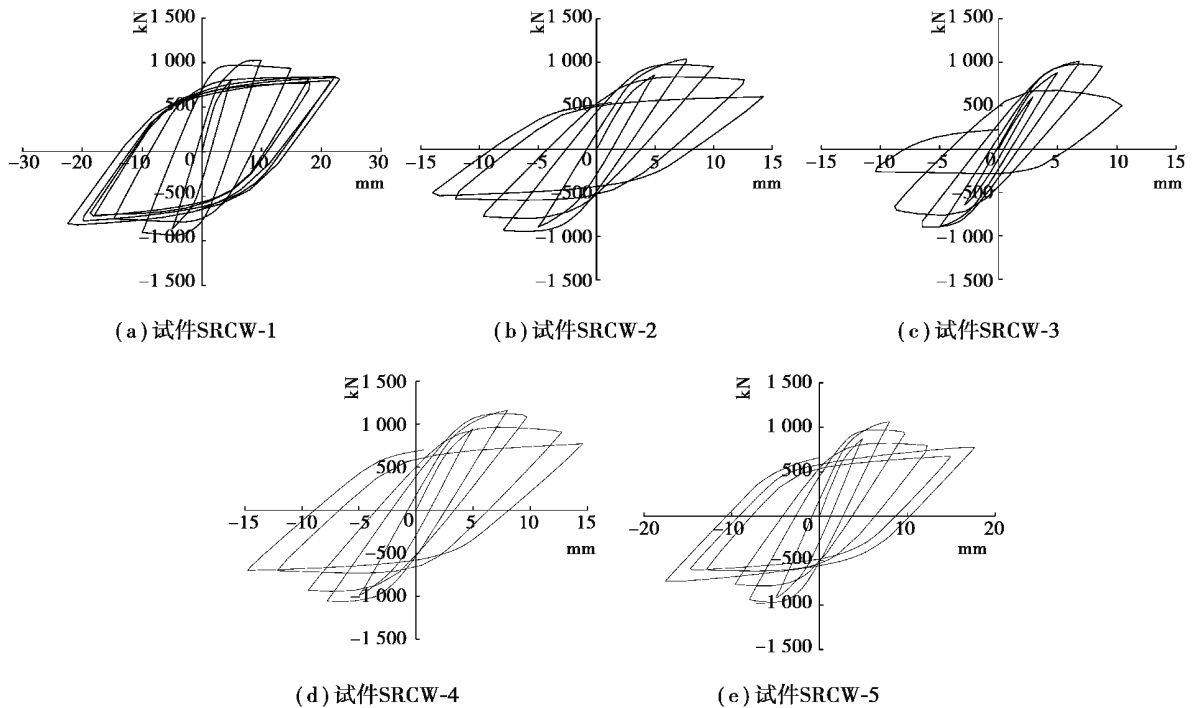


图 6 荷载-位移滞回曲线

Fig. 6 Load-displacement hysteresis curve

需要说明的是,文中的数值模拟得到的滞回曲线比较饱满,捏拢效应较小,这是因为分析中将钢筋与钢骨架内嵌在混凝土中,并假定混凝土剪力墙和钢桁架之间的粘结是可靠的,不产生粘结滑移。实际的钢-混凝土剪力墙的滞回曲线都存在一定程度的捏拢现象。文中重点研究了轴压比和含钢率对剪力墙抗震性能指标的影响。

### 3.2 骨架曲线

图 7 为各试件的骨架曲线,由图可见,构件在上升阶段基本保持一致,且均无明显屈服点。为此,采用割线刚度法来确定剪力墙的屈服点,采用位移延性系数  $\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$  来评价试件的变形能力,其中  $\Delta_u$  为极限荷载,取剪力墙水平荷载下降至峰值荷载 85% 时对应的屈服位移。各构件的模拟结果见表 3 所示。

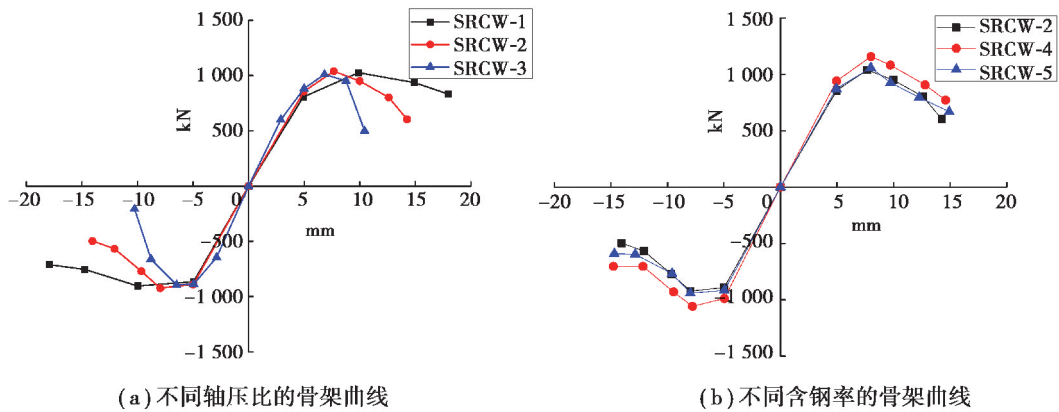


图 7 骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curve

由图 7(a)和表 3 可以看出,不同轴压比下试件的骨架曲线在弹性阶段基本一致,3 个试件峰值荷载差异较小,比较 3 个试件骨架曲线的下降阶段可以看出:试件 SRCW-3 下降最为陡峭, SRCW-1 下降较平, SRCW-2 处于两者之间。试件 SRCW-3、SRCW-2 与试件 SRCW-1 相比,其延性分别降低了 35% 和 28%,表明轴压比越大,剪力墙的延性和变形能力越差。由图 7(b)及表 3 可以看出,试件 SRCW-4 与 SRCW-2 相比,峰值荷载增加了 11.4%,延性下降了 4.6%;试件 SRCW-5 与 SRCW-2 相比,峰值荷载增加了 2%,延性系数差异很小。表明增加型钢柱的含钢率可以明显提高剪力墙的承载能力,但对于延性和变形能力会有所削弱;增加型钢腹杆的含钢率对于剪力墙承载能力略有提高,而对延性系数的影响很小。

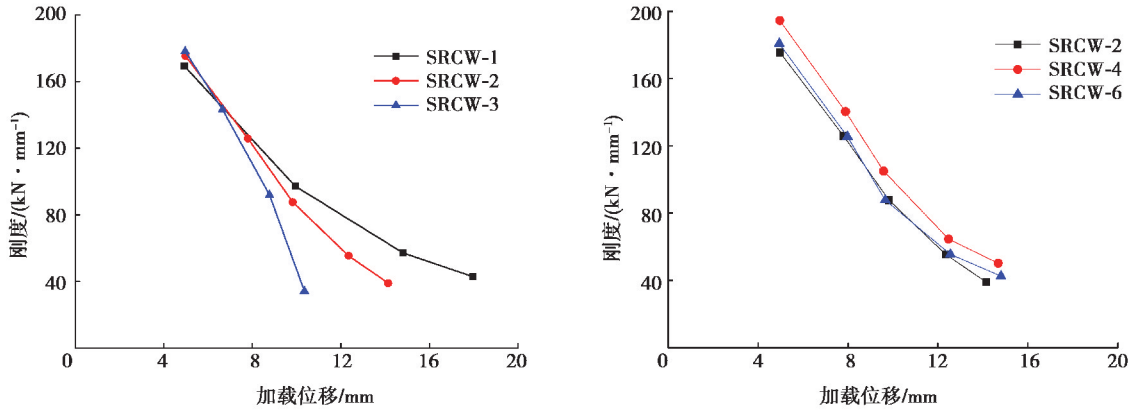
表 3 模拟结果

Table 3 Simulation result

试件编号	加载方向	$P_y / \text{kN}$	$\Delta_y / \text{mm}$	$P_m / \text{kN}$	$\Delta_m / \text{mm}$	$\Delta_u / \text{mm}$	$\mu_{\Delta}$
SRCW-1	正向	865.5	6.27	1 026.1	9.88	16.77	2.72
SRCW-1	负向	-867.4	-5.17	-904.9	-9.98	-14.26	2.72
SRCW-2	正向	928.3	6.03	1 038.8	7.66	12.49	1.95
SRCW-2	负向	-892.1	-5.17	-923.9	-7.94	-9.50	1.95
SRCW-3	正向	912.9	5.43	1 011.4	6.84	9.11	1.78
SRCW-3	负向	-792.1	-4.13	-894.2	-6.47	-7.80	1.78
SRCW-4	正向	1 022.7	6.10	1 157.6	8.00	11.43	1.86
SRCW-4	负向	-997.5	-5.31	-1 057.8	-7.79	-9.83	1.86
SRCW-5	正向	937.2	6.00	1 059.0	7.98	12.50	1.96
SRCW-5	负向	-916.9	-5.09	-941.4	-7.97	-9.34	1.96

### 3.3 刚度退化

各试件割线刚度退化曲线如图 8 所示。由图 8 可见,6 个试件的刚度退化曲线总体趋势相似,加载前期刚度退化快,加载后期刚度退化放缓。从图 8(a)可以看出:试件 SRCW-3 的刚度退化速率明显比试件 SRCW-1 和 SRCW-2 快,表明轴压比的增加会加速剪力墙的刚度退化。从图 8(b)可以看出:3 个构件的退化曲线基本一致,型钢柱含钢率大的试件 SRCW-4 的刚度比型钢柱含钢率小的 SRCW-2 和 SRCW-5 大,表明提高型钢柱的含钢率能有效提高剪力墙的抗剪刚度。



(a) 不同轴压比的刚度退化曲线

(b) 不同含钢率的刚度退化曲线

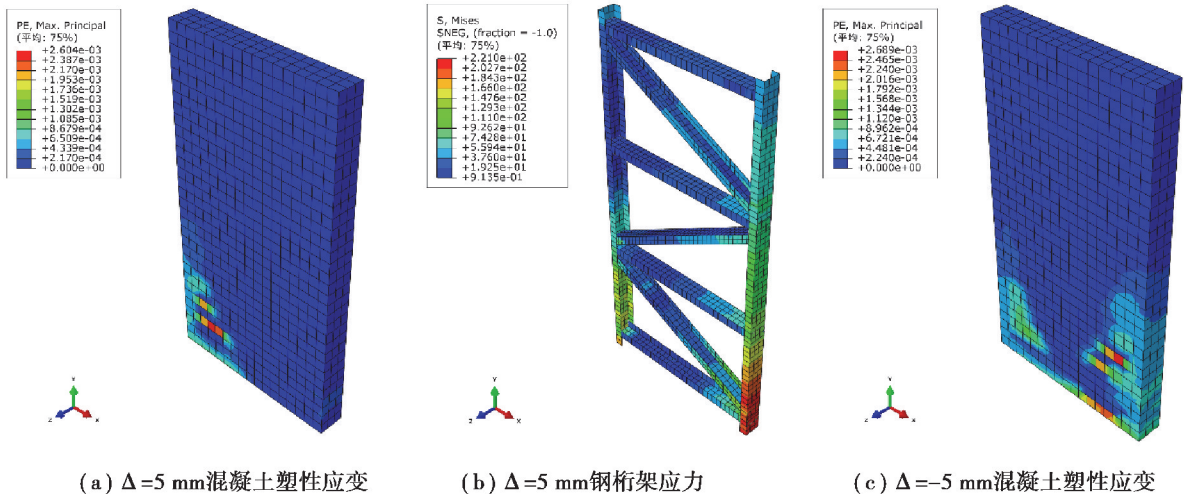
图 8 刚度退化曲线

Fig. 8 Stiffness degradation curve

### 3.4 破坏模式

试件 SRCW-1、SRCW-2、SRCW-3 的破坏情况均为弯曲型破坏,以 SRCW-1 构件为例介绍钢桁架混凝土剪力墙在往复荷载作用下的破坏模式。在水平位移  $\Delta=5 \text{ mm}$  正向加载过程中,混凝土和墙受拉区距底部约 30 cm 的位置混凝土出现受拉损伤(见图 9(a)),受压区距底部约 20 cm 的区域内,型钢柱跟局部钢筋的应力较大(见图 9(b)),在  $\Delta=-5 \text{ mm}$  负向加载过程中,混凝土受拉区距底部约 50 mm 的位置出现受拉损伤(见图 9(c)); $\Delta=10 \text{ mm}$  的正向加载过后,受拉区的混凝土损伤面积进一步加大,受拉区型钢柱与钢筋网底部都出现了屈服(见图 9(d))。

在水平加载位移  $\Delta=15 \text{ mm}$  时,混凝土的损伤区域向墙体中下部扩散,且此时墙体底部的型钢腹杆应力较大,墙体两端的型钢柱底部均出现屈服(见图 9(e)); $\Delta=18 \text{ mm}$  时,距底部 40~50mm 的区域内局部混凝土从表面凸起;随着水平加载位移的增加,底部出现贯通的裂缝,且底部混凝土出现大面积凸起(见图 9(f)),型钢柱、纵向钢筋和型钢腹杆受压屈曲,试件的承载力下降,模拟加载结束。



(a)  $\Delta=5 \text{ mm}$  混凝土塑性应变

(b)  $\Delta=5 \text{ mm}$  钢桁架应力

(c)  $\Delta=-5 \text{ mm}$  混凝土塑性应变

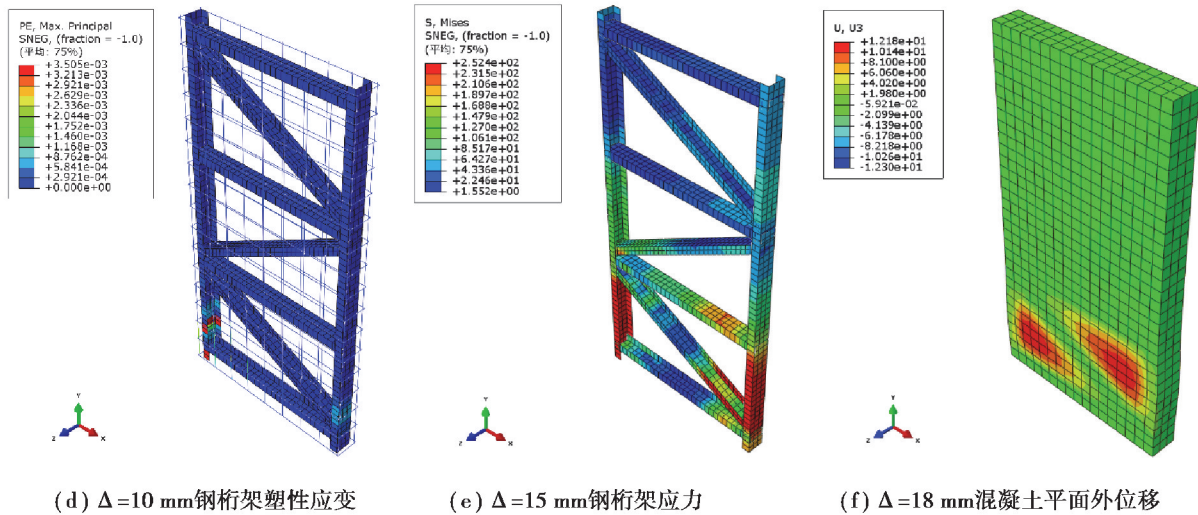


图 9 剪力墙内力云图

Fig. 9 Stress state of shear wall

## 4 结 论

通过对钢桁架混凝土组合剪力墙的抗震性能进行有限元模拟和分析,得到以下结论:

- 1) 建立的有限元模型可以较好地模拟钢桁架混凝土剪力墙的抗剪承载力。
- 2) 钢桁架混凝土剪力墙在往复荷载作用下的主要破坏模式为弯曲破坏。
- 3) 增加轴压比,钢桁架混凝土中剪力墙的耗能能力和变形能力降低。
- 4) 增加剪力墙中型钢立柱的含钢率能够提高剪力墙的抗剪承载力,但对于剪力墙的延性和变形能力会有所削弱;增加剪力墙中型钢腹杆的含钢率,能提高剪力墙的耗能能力。
- 5) 增加轴压比会加快剪力墙的刚度退化;增加剪力墙中型钢的含钢率对于剪力墙的刚度退化影响较小。
- 6) 提高型钢柱的含钢率能提高剪力墙的抗剪刚度。

### 参考文献:

- [1] 叶列平, 方鄂华. 钢筋混凝土构件的受力性能研究综述[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 1-12.  
YE Lieping, FANG Ehua. State-of-the-art of study on the behaviors of steel reinforced concrete structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5): 1-12.(in Chinese)
- [2] Matsumoto T. The structural performance of SRC multi-story shear walls with infilled precast concrete panels[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1998, 20: 187-194.
- [3] Liao F Y, Han L H, Tao Z. Performance of reinforced concrete shear walls with steel reinforced concrete boundary columns[J]. Engineering Structures, 2012, 44: 186-209.
- [4] Guo L H, Rong Q, Qu B, et al. Testing of steel plate shear walls with composite columns and infill plates connected to beams only[J]. Engineering Structures, 2017, 136: 165-179.
- [5] Wang J, Wang W, Xiao Y, et al. Cyclic test and numerical analytical assessment of cold-formed thin-walled steel shear walls using tube truss[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 134: 442-459.
- [6] 曹万林, 张建伟, 田宝发, 等. 钢筋混凝土带暗支撑中高剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(6): 26-32, 55.  
CAO Wanlin, ZHANG Jianwei, TIAN Baofa, et al. Experimental study on seismic behavior of mid-rise RC shear wall with concealed bracings[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(6): 26-32, 55.(in Chinese)
- [7] 曹万林, 庞国新, 董宏英, 等. 带暗支撑剪力墙中暗支撑型式及其合理设计研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 73-79.  
CAO Wanlin, PANG Guoxin, DONG Hongying, et al. Studies of form and reasonable design of concealed bracings in R. C. shear walls[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(4): 73-79.(in Chinese)
- [8] Cao W L, Xue S D, Zhang J W. Seismic performance of RC shear walls with concealed bracing[J]. Advances in Structural



- Engineering, 2003, 6(1): 1-13.
- [9] 王志浩, 方鄂华. 钢筋混凝土剪力墙的抗弯性能[J]. 建筑结构, 1998, 28(2): 13-16, 21.  
WANG Zhihao, FANG Ehua. Flexural behavior of steel reinforced concrete shear walls[J]. Building Structure, 1998, 28(2): 13-16, 21. (in Chinese)
- [10] 乔彦明, 钱稼茹, 方鄂华. 钢筋混凝土剪力墙抗剪性能的试验研究[J]. 建筑结构, 1995, 25(8): 3-7.  
QIAO Yanming, QIAN Jiaru, FANG Ehua. Experimental study on shear behavior of steel reinforced concrete shear wall [J]. Building Structure, 1995, 25(8): 3-7. (in Chinese)
- [11] 王中华, 蓝宗建. 底框砖房结构的应用和抗震性能分析[J]. 江苏建筑, 2001(1): 14-16.  
WANG Zhonghua, LAN Zongjian. The application and seismic analysis of multistory masonry building with large space in its bottom[J]. Jiangsu Construction, 2001(1): 14-16. (in Chinese)
- [12] 温峰, 孟昭沛, 蓝宗建. 底层框剪结构多层砖房抗震设计建议[J]. 江苏建筑, 1998(3): 10-12.  
WEN Feng, MENG Zhaopei, LAN Zongjian. Seismic design suggestion for multi-storey brick houses with frame shear structure [J]. Jiangsu Construction, 1998(3): 10-12. (in Chinese)
- [13] 陈默然, 高永, 周珉, 等. 钢板带加强型钢混凝土低矮剪力墙抗震性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(6): 30-36.  
CHEN Moran, GAO Yong, ZHOU Min, et al. Experimental analysis of seismic behavior of steel reinforced concrete squat shear walls with steel plates[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(6): 30-36. (in Chinese)
- [14] 王玉钊, 高希虎, 许德建, 等. 不同支撑形式的型钢混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(5): 44-53.  
WANG Yuzhuo, GAO Xihu, XU Dejian, et al. Experimental analysis on seismic performance of steel reinforced concrete shear wall with different types of steel bracing[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2018, 40(5): 44-53. (in Chinese)
- [15] 伍云天, 杨永斌, 杨伟, 等. 内置轻钢桁架混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 12-19.  
WU Yuntian, YANG Yongbin, YANG Wei, et al. Experimental study on seismic behavior of concrete composite shear walls with lightweight shaped steel truss[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 12-19. (in Chinese)
- [16] Wu Y T, Yang W, Xiao Y. Seismic behavior of high strength concrete composite walls with embedded steel truss [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 118: 180-193.
- [17] Wu Y T, Zhang J, Yang Y B, et al. Seismic performance of reinforced concrete squat walls with embedded cold-formed and thin walled steel truss[J]. Engineering Structures, 2017, 132: 714-732.
- [18] 组合结构设计规范: JGJ 138-2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Code for design of composite structures: JGJ 138-2016[S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2016. (in Chinese)
- [19] 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Code for design of concrete structures: GB 50010-2010[S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2010. (in Chinese)
- [20] 孙庆昭. ABAQUS 混凝土塑性损伤模型概述[J]. 重庆建筑, 2014, 13(11): 70-72.  
SUN Qingzhao. An overview of plastic damage model of ABAQUS concrete[J]. Chongqing Architecture, 2014, 13(11): 70-72. (in Chinese)
- [21] 钢结构设计标准: GB 50017-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
Standard for design of steel structures: GB 50017-2017 [S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2017. (in Chinese)
- [22] 吕西林, 董宇光, 丁子文. 截面中部配置型钢的混凝土剪力墙抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(6): 101-107.  
LV Xilin, DONG Yuguang, DING Ziwen. Study on seismic behavior of steel reinforced concrete wall[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(6): 101-107. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)