

钢框架-覆竹木碳纤维板轻钢剪力墙结构 抗震性能研究

张 铮*, 林 韩, 陈南龙
(福建理工大学 土木工程学院, 福州 350118)

摘要: 为研究钢框架-覆竹木碳纤维板轻钢剪力墙结构的抗震性能,利用有限元软件ABAQUS对低周往复荷载作用下的冷弯薄壁型钢骨架墙体试件、覆竹木碳纤维板冷弯薄壁型钢墙体试件和钢框架-冷弯薄壁型钢骨架墙体试件进行分析,并通过试验验证了分析的合理性。对钢框架-覆竹木碳纤维板轻钢剪力墙结构进行全过程非线性分析,揭示其不同应力阶段的发展过程及破坏模式,研究冷弯薄壁型钢骨架壁厚、竹木碳纤维板厚度、竖向荷载和斜撑布置等因素对该类框剪结构抗震性能的影响。结果表明,结构的抗剪承载力和抗侧刚度随着冷弯薄壁型钢骨架壁厚、竹木碳纤维板厚度的增加而增大。提出了该类框剪结构的多拉杆简化模型,可为整体结构抗震分析提供参考。

关键词: 钢框架-轻钢剪力墙结构; 竹木碳纤维板; 轻钢墙体; 抗震性能; 简化模型

中图分类号: TU352.1, TU392.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)02-0115-08

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20230910001

Seismic Performance of Steel Frame Infilled with Cold-Formed Thin-Walled Steel Shear Wall with Bamboo Carbon Fiber Board Cladding

ZHANG Zheng*, LIN Han, CHEN Nanlong

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

*Corresponding author: 465156155@qq.com

Abstract: In order to study the seismic performance of the steel frame infilled with cold-formed thin-walled steel shear wall structures with bamboo carbon fiber board cladding, the finite element software ABAQUS was used to simulate and analyze the cold-formed thin-walled steel skeleton wall specimen, the cold-formed thin-walled steel wall with bamboo carbon fiber board cladding specimen and the steel frame-cold-formed thin-walled steel skeleton wall specimen under low cycle reversed loads, and to verify the reasonableness of the finite element model through experimental results. To reveal the development process and failure mode at different stress stages, a whole-process nonlinear analysis was carried out on the steel frame infilled with cold-formed thin-walled steel shear wall structure with bamboo carbon fiber board cladding. The effects of cold-formed thin-walled steel skeleton wall thickness, bamboo carbon fiber board thickness, vertical load and diagonal brace arrangement on the seismic performance of this type of frame shear structure were investigated. The results show that the structural shear capacity and lateral stiffness increase with the increase of wall thickness of cold-formed thin-walled steel skeleton and thickness of bamboo carbon fiber board. A

收稿日期: 2023-09-10

基金项目: 福建省自然科学基金(2022J01927)

作者简介:

张 铮(1978—),男,博士,教授,主要从事钢结构、轻钢结构、铝合金结构等方面的研究。E-mail:465156155@qq.com。(通信作者)

林 韩(1999—),男,硕士研究生,主要从事钢框架-剪力墙结构方面的研究。

simplified model of multi-tie rods for this type of frame shear structure was proposed to provide a reference for the overall structural seismic analysis.

Keywords: steel frame-cold-formed thin-walled steel shear wall structure; bamboo carbon fiber board; lightweight steel wall; seismic performance; simplified model

钢框架-剪力墙结构多采用混凝土剪力墙和钢板剪力墙等材料,剪力墙刚度高于钢框架刚度,容易导致框架先于墙体发生破坏,与“强框架、弱墙体”的设计理念不符^[1-4]。轻钢墙体由冷弯薄壁型钢骨架与覆面墙板连接而成,具有抗震性能好、经济效果佳以及轻质高强等优点^[5],当其嵌入钢框架时可发挥剪力墙的作用^[6-7]。目前国内企业已自主研发了竹木碳纤维板(竹木碳纤维高镁质胶凝结构板)作为覆面墙板^[8],此类墙板是以竹纤维或木纤维为主原料,加入碳纤维、胶粉、氧化镁、氯化镁、工业盐和生石灰等材料后,经过搅拌、浸泡、辊压和烘干等步骤形成的多功能人工板材,在实际工程中具有广泛的应用前景。

目前,国内外学者对钢框架内嵌冷弯薄壁型钢墙体的抗剪、抗弯、抗震性能等进行了大量研究^[9-10],结果表明,结构整体的承载力大于墙体与钢框架独立工作时承载力的线性叠加,墙体与钢框架的剪力分担比例证明其存在明显的组合效应^[11],整体结构具有较好的抗震性能^[12],内嵌冷弯薄壁型钢墙体能够发挥出剪力墙的作用^[7,13],因此可将其称为“轻钢剪力墙”。近年来国内学者开展了几种钢框架-冷弯薄壁型钢墙体结构新型体系的研究^[14-15],为覆竹木碳纤维板时该类框剪结构的力学性能分析提供了较好的基础。现阶段对于此类框剪结构的研究多集中在试验与微观有限元分析上,而在多层结构中,缺乏具有先验性质的宏观有限元模型,因此有必要进一步探究框剪结构中轻钢剪力墙的简化方法。

建立钢框架-覆竹木碳纤维板轻钢剪力墙结构的有限元模型,进行水平低周往复荷载分析,并在验证有限元模型准确性及有效性的基础上,分析不同因素对框剪结构的影响。根据等效多拉杆原理^[16],提出该类框剪结构的简化模拟方法,以期为工程实际提供参考。

1 试验概况

在钢框架-冷弯薄壁型钢墙体抗震性能试验^[17]中对1榀冷弯薄壁型钢骨架墙体SW、1榀覆竹木碳纤维板冷弯薄壁型钢墙体CW和1榀钢框架-冷弯薄壁型钢骨架墙体FW进行水平低周往复加载。试件所用钢材牌号为Q235B。框架柱规格为HW200 mm×200 mm×8 mm×12 mm,框架梁规格为HM300 mm×200 mm×8 mm×12 mm。墙体骨架采用C形和U形冷弯薄壁型钢通过自攻螺钉连接而成,其中C形冷弯薄壁型钢规格为

C97 mm×38 mm×12 mm×1.2 mm,U形冷弯薄壁型钢规格为U100 mm×42 mm×1.2 mm。覆板采用单面6块规格为2 440 mm×1 220 mm×9 mm的竹木碳纤维板进行拼接,其中竹木碳纤维板的材料性能和具体制作流程分别如表1和图1所示。墙面板与冷弯薄壁型钢骨架间通过间距为250 mm的ST4.8自攻螺钉连接,螺钉长度为36 mm。试件详细尺寸如图2所示,加载制度和装置如图3所示。

表1 竹木碳纤维板材料性能

Table 1 Mechanical properties of bamboo carbon fiber board

方向	静曲强度 O_b /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E_s /MPa	泊松比 ν
纵向	10.06	4.76	5 368	0.13
横向	9.82	3.90	4 424	0.13

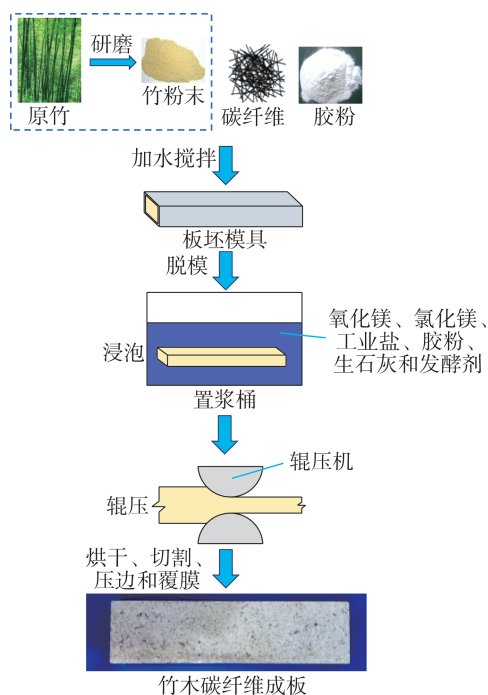


图1 竹木碳纤维板制作流程

Fig. 1 Production process of bamboo carbon fiber board

在钢框架-冷弯薄壁型钢墙体试验的加载前期,钢框架与冷弯薄壁型钢墙体表现出了良好的整体性,未出现明显破坏现象。加载中期,冷弯薄壁型钢杆件及

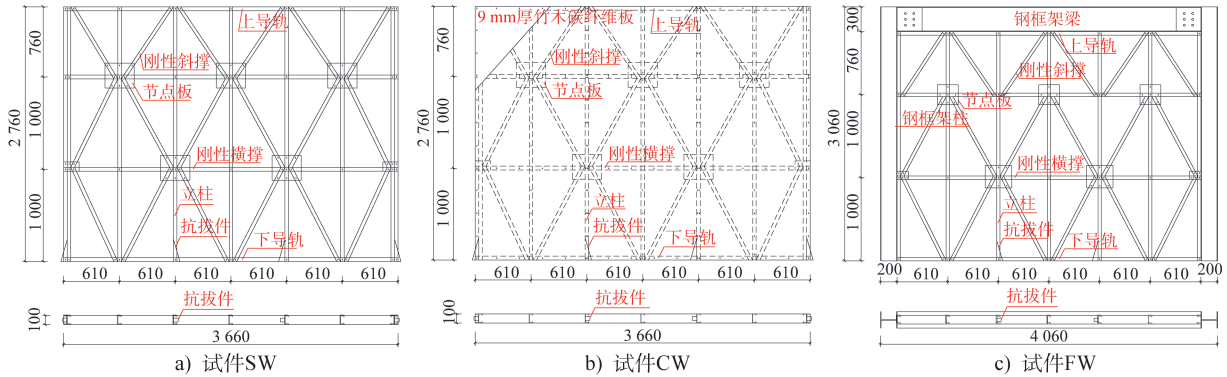


图2 试件尺寸及构造(单位:mm)

Fig. 2 Dimensions and details of specimens (unit: mm)

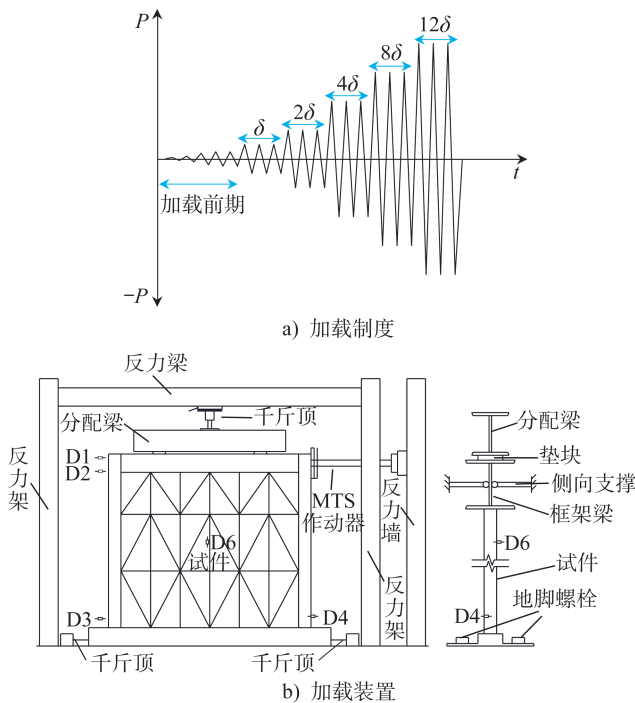


图3 加载制度及装置

Fig. 3 Loading system and loading setup

其连接的螺钉发生屈曲和剪切破坏。加载后期,两侧框架柱柱顶腹板发生扭曲撕裂,整体结构发生侧向失稳破坏。

2 有限元模型的建立与验证

2.1 有限元模型的建立

通过有限元分析软件ABAQUS对3榀试件SW、CW和FW进行拟静力分析。图4以FW为例给出了其有限元模型。建模时,模型尺寸与试验试件尺寸一致,热轧型钢和冷弯薄壁型钢本构关系采用双线性模型,竹木碳纤维板采用各向同性的双线性模型^[8]。根据材性试验结果得到热轧型钢、冷弯薄壁型钢和竹木碳纤维板的弹性模量、屈服强度和泊松比,如表2所示。钢框架采用实

体单元C3D8R模拟,冷弯薄壁型钢与竹木碳纤维板采用壳单元S4R模拟。框架梁与框架柱之间的全焊接连接采用Tie绑定模拟,钢框架和墙体的接触部分采用Tie绑定连接,墙体骨架与竹木碳纤维板接触部分以及骨架各杆件之间均采用Coupling耦合连接。在框架梁中心位置施加低周往复荷载。

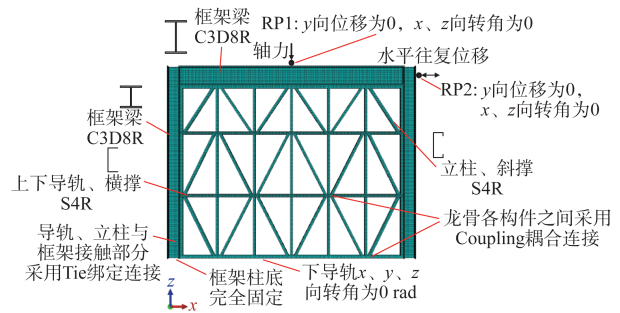


图4 试件FW有限元模型

Fig. 4 FE model of specimen FW

表2 材料参数

Table 2 Material parameters

部件名称	弹性模量/ MPa	屈服强度/ MPa	泊松比
框架柱	207 117	236.6	0.3
框架梁	206 966	551.3	0.3
冷弯薄壁型钢骨架	209 406	486.2	0.3
竹木碳纤维板	4 424	3.9	0.1

2.2 有限元模型的验证

为验证有限元模型的合理性,将有限元计算得到的骨架曲线和典型破坏形态与试验结果进行对比,如图5所示。对比结果表明,试件SW、CW和FW的有限元与试验所得的骨架曲线吻合较好。试件SW的破坏形态表现为斜撑和下导轨连接处螺钉严重倾斜以及边立柱

发生局部屈曲,试件CW的破坏形态表现为斜撑与横撑连接处发生局部屈曲以及竹木碳纤维角部发生破碎,试件FW的破坏形态为立柱与横撑连接处发生屈曲以及钢框架柱柱顶发生扭曲撕裂,有限元模拟结果与试验破坏形态均一致。

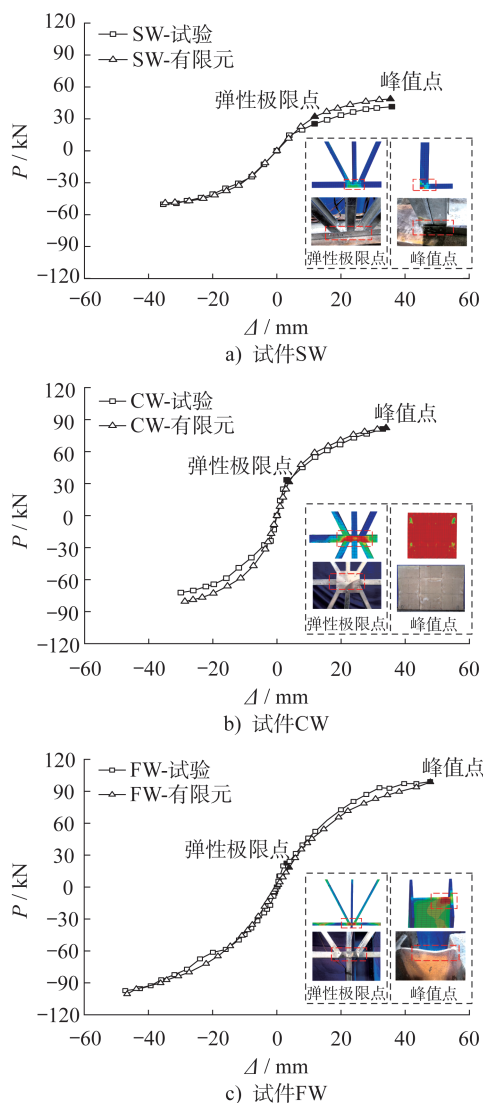


图5 有限元与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between finite element and test results

3 全过程非线性分析

为分析钢框架-覆竹木碳纤维板轻钢剪力墙结构在水平低周往复荷载作用下的受力性能,对框剪结构进行全过程非线性分析。以基准模型为例,框架层高层为3300 mm、跨度为2840 mm,柱截面尺寸为200 mm×200 mm×8 mm×12 mm,梁截面尺寸300 mm×150 mm×6.5 mm×9 mm,墙体宽度为2440 mm、高度为3000 mm、厚度为60 mm,竹木碳纤维板尺寸为2440 mm×3000 mm×9 mm,钢材牌

号均为Q235。由于有限元计算得到的骨架曲线在正负方向上表现出良好的对称性,因此图6仅展示了框剪结构 $P-\Delta$ 曲线正方向上的特征点和应力分布云图。在OA段,模型各部分均处于弹性阶段,曲线近似为线性。在AB段,剪力墙进入屈服阶段发挥耗能作用,而此时钢框架仍处于弹性阶段,竹木碳纤维板的角部区域应力发展迅速,率先进入塑性状态,然后向四周发展,最后向中间扩散,曲线呈现出非线性发展的特征。在BC段,钢框架梁柱连接处及柱脚应力逐渐增大,并超过屈服应力,结构进入塑性工作阶段。当到达C点时,结构已经产生了较大的水平位移,框架柱柱顶出现扭曲撕裂现象,柱脚焊缝亦发生断裂。试验和有限元分析结果表明,该类框剪结构的破坏模式经历了剪力墙杆件屈服、竹木碳纤维板角部破碎、框架梁端翼缘局部屈曲、框架柱柱脚焊缝撕裂等过程。由于覆竹木碳纤维板轻钢剪力墙的刚度一般弱于钢框架的刚度,在满足设计要求的情况下,剪力墙总是先发生屈服,且能够在钢框架破坏前保持较好的整体性和较强的耗能能力,从而使得整体结构的破坏模式易于实现“强框架、弱墙体”的抗震设计理念。

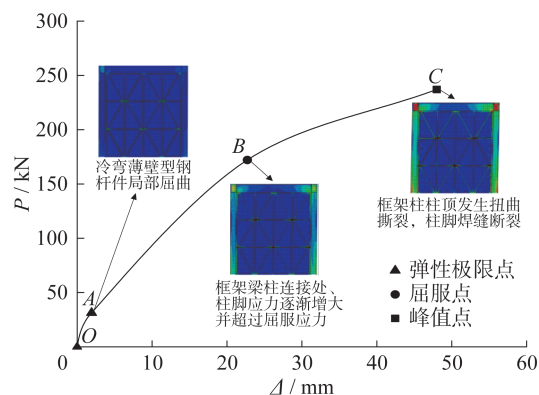


图6 基准算例破坏过程

Fig. 6 Failure processes of benchmark example

4 影响因素分析

为进一步探究该结构的抗震性能,对冷弯薄壁型钢骨架壁厚、竹木碳纤维板厚度、竖向荷载和斜撑布置等参数进行分析,如图7和表3所示。

4.1 冷弯薄壁型钢骨架壁厚

如图7a)所示,冷弯薄壁型钢骨架壁厚的变化对该类框剪结构的抗剪承载力和刚度有显著影响。与基准模型相比,冷弯薄壁型钢杆件厚度为2.0 mm、3.0 mm、4.0 mm、5.0 mm和6.0 mm的框剪结构,其抗剪承载力分别提高了8.8%、21.2%、32.1%、41.2%和52.2%,抗侧刚度分别提高了12.0%、25.0%、38.8%、50.5%和61.0%。

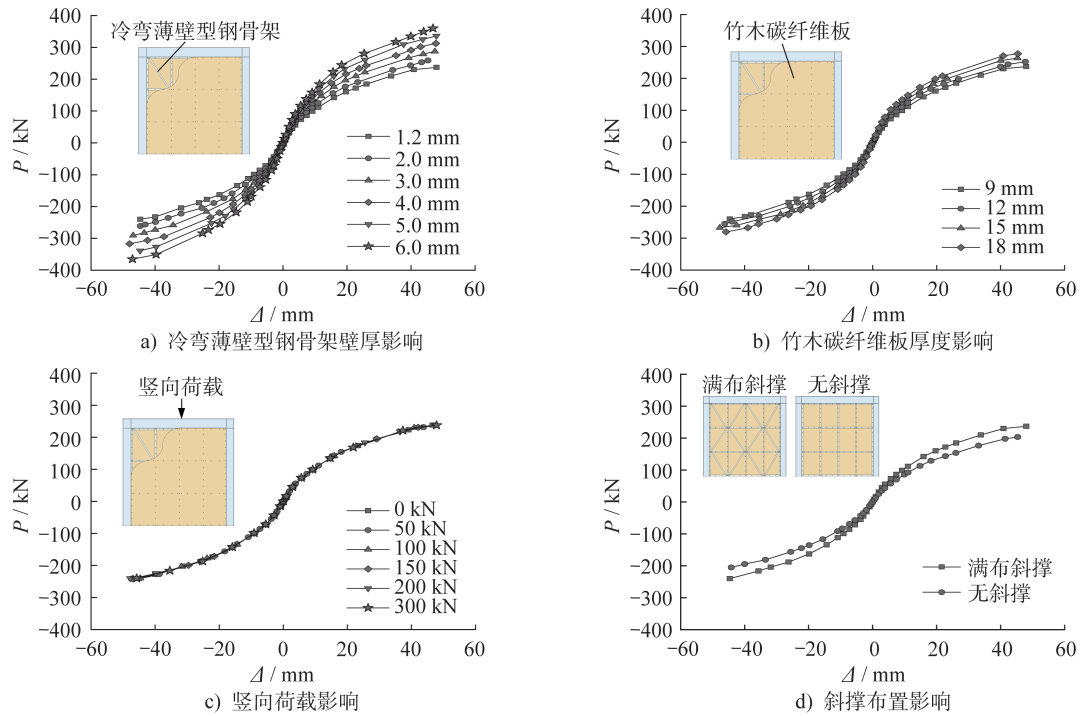


图7 不同参数对钢框架-覆竹木碳纤维板轻钢剪力墙结构骨架曲线的影响

Fig. 7 Influence of different parameters on skeleton curves of steel frame infilled with cold-formed thin-walled steel shear wall with bamboo carbon fiber board cladding

表3 框剪结构有限元计算结果

Table 3 FE calculation results of frame-shear wall structures

影响因素	轻钢骨架 壁厚/mm	竹木碳纤维板 厚度/mm	竖向荷载/ kN	斜撑布置 数量	极限抗侧 承载力/kN	抗侧刚度/ (kN·m ⁻¹)
冷弯薄壁型 钢骨架壁厚	1.2	9	100	12	239.85	10.184
	2.0	9	100	12	260.99	11.407
	3.0	9	100	12	290.69	12.734
	4.0	9	100	12	316.90	14.134
	5.0	9	100	12	338.65	15.326
	6.0	9	100	12	338.65	16.398
竹木碳纤 维板厚度	1.2	9	100	12	239.85	10.184
	1.2	12	100	12	254.82	11.236
	1.2	15	100	12	267.33	12.299
	1.2	18	100	12	280.50	13.370
竖向荷载	1.2	9	0	12	240.63	10.186
	1.2	9	50	12	241.64	10.191
	1.2	9	100	12	239.85	10.184
	1.2	9	150	12	240.73	10.186
	1.2	9	200	12	239.91	10.185
	1.2	9	300	12	240.50	10.186
斜撑布置	1.2	9	100	0	205.00	8.349
	1.2	9	100	12	239.85	10.184

4.2 竹木碳纤维板厚度

如图7b)所示,随着竹木碳纤维板厚度的增加,结构的抗剪承载力和抗侧刚度均有不同程度的提高。与基准模型相比,竹木碳纤维板厚度为12 mm、15 mm和18 mm的框剪结构,其抗剪承载力分别提高了6.2%、11.5%和16.9%,抗侧刚度分别提高了10.3%、20.8%和31.3%。

4.3 竖向荷载

如图7c)所示,竖向荷载为0~300 kN时对框剪结构抗剪承载力和抗侧刚度的影响较小。

4.4 斜撑布置

图7d)给出了满布斜撑与无斜撑的框剪结构的骨架曲线,由图可知,满布斜撑的框剪结构的抗剪承载力和抗侧刚度分别比无斜撑的框剪结构的相应值提高了22.0%和17.0%。满布斜撑能够提高该类框剪结构的抗剪承载力和抗侧刚度。

5 钢框架-轻钢剪力墙结构简化模型

虽然精细有限元模型具有较高的计算精度,但不太适用于整体建筑结构的分析计算,此时一般采用简化有限元分析模型。

内嵌于钢框架的剪力墙与高厚比较大的钢板剪力墙的受力机理相似^[17],因此等效多拉杆简化模型更适用于模拟该类框剪结构。

关于等效多拉杆简化模型,需要满足以下3点假设:

- (1) 钢框架承担所有竖向荷载;
- (2) 轻钢剪力墙只承担水平荷载,不承担竖向荷载;
- (3) 各拉杆与钢框架之间的连接均为铰接。

取立柱、横撑与钢框架的相连位置作为多拉杆简化模型的主要受力节点,并生成多根斜拉杆,简化过程如图8所示。

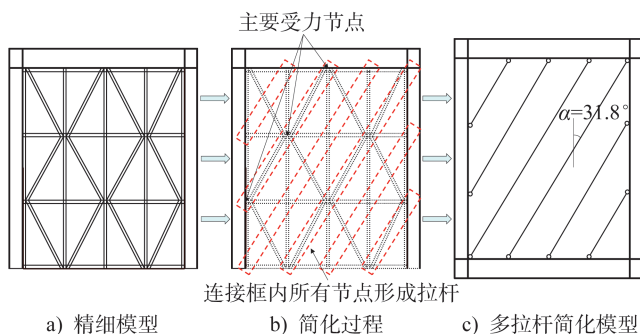


图8 简化过程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of simplified processes

根据钢框架-钢板剪力墙结构多拉杆简化模型的计算公式^[16],可以得到斜拉杆的截面积 A 。

$$A = \frac{(L \cos \alpha + H \sin \alpha)t}{n} \quad (1)$$

式中: L 为剪力墙宽度; H 为剪力墙高度; α 为斜拉杆倾斜角度; t 为钢板剪力墙厚度; n 为斜拉杆数量。

式(1)未考虑冷弯薄壁型钢骨架壁厚和竹木碳纤维板厚度对剪力墙抗震性能的影响,因此为了更准确地预测剪力墙的抗震能力,利用影响因素分析中的数据进行回归分析,得到如式(2)所示的修正公式。

$$A = \frac{\gamma_1 \gamma_2 (L \cos \alpha + H \sin \alpha)t_c}{6n} \quad (2)$$

式中: γ_1 为考虑冷弯薄壁型钢骨架壁厚的增大系数; γ_2 为考虑竹木碳纤维板厚度的增大系数; t_c 为冷弯薄壁型钢骨架壁厚。

根据基准算例进行多拉杆简化模型的建立,其中框架柱与框架梁为刚接,冷弯薄壁型钢骨架壁厚为1.2 mm,竹木碳纤维板厚度为9 mm。在实际建模中,钢框架选用C3D8R单元模拟,斜拉杆选用T3D2单元模拟,斜拉杆与钢框架之间的连接采用MPC-Pin约束以模拟铰接。钢框架和斜拉杆均选用Q235钢,钢材的本构关系选用强化段斜率为 $0.02E_s$ 的二折线本构模型,采用多线性随动强化准则输入。

为验证多拉杆简化模型的合理性,将其与精细模型的计算结果进行对比,如图9和图10所示,多拉杆简化模型的抗侧刚度、屈服点承载力和峰值点承载力分别为 $9.74 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 、161.3 kN和236.0 kN,与精细模型的结果相比,差异均在7%以内,可见二者计算结果基本一致,吻合度较高,采用多拉杆模型来实现该类框剪结构的抗震设计简化是可行的。

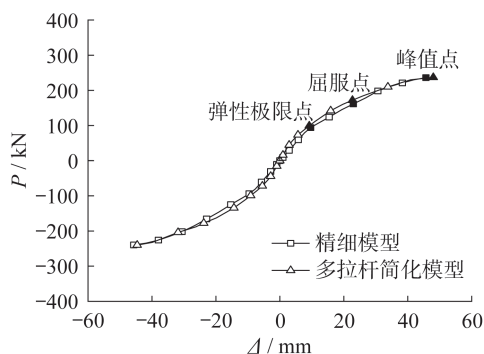


图9 多拉杆简化模型与精细模型 $P-\Delta$ 曲线对比
Fig. 9 Comparison of $P-\Delta$ curves between multi-tie rod simplified model and refined model

6 结论

基于钢框架-覆竹木碳纤维板轻钢剪力墙结构的有

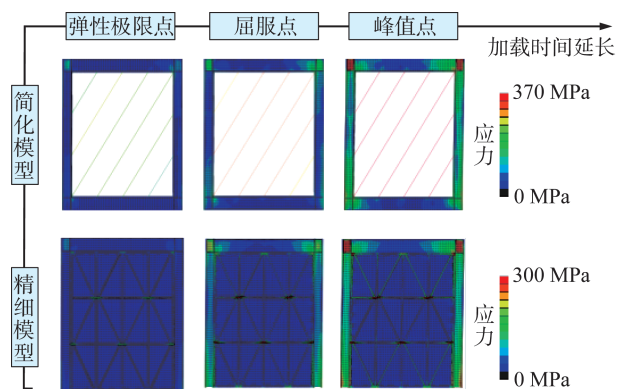


图 10 多拉杆简化模型与精细模型破坏模式对比

Fig. 10 Comparison of failure modes between multi-rod simplified model and refined model

限元分析,可以得到以下主要结论:

(1) 有限元计算结果与试验结果的对比表明,二者的骨架曲线和破坏形态基本吻合,有限元模型可准确反映试件的力学行为并预测局部构件的受力状态。

(2) 该框剪结构在水平往复荷载作用下,剪力墙率先屈服并保持较强的耗能能力,整体结构的破坏模式能够满足“强框架、弱墙体”的设计要求。

(3) 结构抗剪承载力与抗侧刚度在冷弯薄壁型钢骨架壁厚由 1.2 mm 增加至 6.0 mm 时分别提高了 52.2% 和 61.0%,在竹木碳纤维板厚度由 9 mm 增加至 18 mm 时分别提高了 16.9% 和 31.3%。

(4) 提出了钢框架-轻钢剪力墙结构的多拉杆简化模型,该简化模型与精细模型的计算结果基本一致,可为该类框剪结构在实际工程中的应用提供参考。

参考文献:

- [1] 颜鹏. 刚性连接钢框架-内填钢筋混凝土剪力墙结构体系的滞回性能及抗震设计对策[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
YAN Peng. Hysteretic behavior and design criterion of composite steel frame-reinforced concrete infill wall structural system with FR connections[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006. (in Chinese)
- [2] LUBELL A S, PRION H G L, VENTURA C E, et al. Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(4): 453-460. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:4(453).
- [3] WAGNER H. Flat sheet metal girders with very thin metal web. Part I: general theories and assumptions[R]. Springfield: National Technical Information Service, 1931.
- [4] 郭彦林, 周明. 非加劲与防屈曲钢板剪力墙性能及设计理论的研究现状[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 1-16. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2011.01.001.
GUO Yanlin, ZHOU Ming. An overview of current state-of-

the-art in behavior and design theory for unstiffened or buckling-restrained steel plate shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(1): 1-16. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2011.01.001. (in Chinese)

- [5] 管宇, 周绪红, 石宇, 等. 冷弯薄壁型钢组合墙体简化计算模型研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 59-68. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2023006.
GUAN Yu, ZHOU Xuhong, SHI Yu, et al. Simplified calculation model of cold-formed thin-walled steel composite wall [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(1): 59-68. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2023006. (in Chinese)
- [6] 张铮, 郭贺贺, 林韩, 等. 钢框架-覆 OSB 板轻钢剪力墙结构抗震性能试验研究[J/OL]. 工业建筑, 2023: 1-12 [2023-08-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2068.TU.20230411.1404.004.html>.
ZHANG Zheng, GUO Hehe, LIN Han, et al. Experimental study on seismic performance of steel frame-clad OSB plate light steel shear wall structure [J/OL]. Industrial Construction, 2023, 1-12 [2023-08-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2068.TU.20230411.1404.004.html>. (in Chinese)
- [7] 张铮, 陈笃海, 江忠画, 等. 钢框架-冷弯薄壁型钢剪力墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(6): 11-19. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.06.002.
ZHANG Zheng, CHEN Duhai, JIANG Zhonghua, et al. Experimental study on seismic performance of steel frame with cold-formed thin-walled steel shear wall structure [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(6): 11-19. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.06.002. (in Chinese)
- [8] 江忠画, 张铮, 陈笃海, 等. 覆竹木碳纤维板冷弯薄壁型钢墙体抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(4): 552-560. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2021.04.012.
JIANG Zhonghua, ZHANG Zheng, CHEN Duhai, et al. Experimental study on seismic performance of cold-formed thin-walled steel wall with bamboo wood carbon fiber board [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2021, 53(4): 552-560. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2021.04.012. (in Chinese)
- [9] 郭彦利. 钢框架-内嵌冷弯薄壁型钢复合墙体抗剪滞回性能研究[J]. 南昌工程学院学报, 2017, 36(4): 13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4869.2017.04.005.
GUO Yanli. Lateral hysteresis performance of cold-formed thin-walled steel framed wall [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2017, 36(4): 13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4869.2017.04.005. (in Chinese)
- [10] 李蕾, 苏明周. 内填冷弯薄壁型钢组合墙体钢框架体系滞回性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(6): 117-120. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2012.06.028.
LI Lei, SU Mingzhou. Research on hysteretic behavior of steel frame filled with cold-formed and thin-walled steel wall [J].

- Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(6): 117-120. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2012.06.028. (in Chinese)
- [11] 黄广印. 薄壁型钢组合填充墙-钢框架受力性能及经济性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
HUANG Guangyin. Study on the mechanical behavior and economic performance of thin-walled steel assembled-infilled wall-steel frame [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [12] 李蕾. 冷弯薄壁型钢组合墙体-钢框架体系滞回性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
LI Lei. Research on hysteretic behavior of steel frame filled with cold-formed steel wall structure system [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012. (in Chinese)
- [13] 田惠文. 新型钢框架-龙骨桁架式复合墙体结构协同工作机理及抗震性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.
TIAN Huiwen. An investigation on teamwork mechanism and seismic behavior of steel frame with new cold-formed steel trussed infill walls [D]. Shanghai: Tongji University, 2016. (in Chinese)
- [14] 王静峰, 赵鹏, 汪皖黔, 等. 钢框架内嵌连接轻钢龙骨注浆复合墙板结构抗震性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(4): 32-42. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.04.005.
WANG Jingfeng, ZHAO Peng, WANG Wanqian, et al. Experimental study on the seismic behavior of steel frames embedded with light steel-framed grouting (LSFG) composite wall panels [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(4): 32-42. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.04.005. (in Chinese)
- [15] 刘深, 冯若强. 钢框架-冷弯薄壁型钢墙体组合结构抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(8): 76-87. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0204.
LIU Shen, FENG Ruoqiang. Seismic performance of a hybrid system of frame and cold-formed steel shear wall [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(8): 76-87. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0204. (in Chinese)
- [16] THORBURN L J, KULAK G L, MONTGOMERY C J. Analysis of steel plate shear walls [R]. No. 107. Edmonton: University of Alberta, 1983.
- [17] 江忠画. 新型轻钢装配式结构抗震性能试验与理论研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2022.
JIANG Zhonghua. Experimental and theoretical study on seismic performance of new light steel fabricated structure [D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2022. (in Chinese)

(上接第73页)

- [22] GANTES C, CONNOR J J, LOGCHER R D. Combining numerical analysis and engineering judgment to design deployable structures [J]. Computers & Structures, 1991, 40(2): 431-440. DOI: 10.1016/0045-7949(91)90368-V.
- [23] LI B, WANG S M, ZHI C J, et al. Analytical and numerical study of the buckling of planar linear array deployable structures based on scissor-like element under its own weight [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 83: 474-488. DOI: 10.1016/j.ymsp.2016.06.025.
- [24] LI B, DUAN C Q, PENG Q, et al. Parametric study of planar flexible deployable structures consisting of Scissor-like elements using a novel multibody dynamic analysis methodology [J]. Archive of Applied Mechanics, 2021, 91(11): 4517-4537. DOI: 10.1007/s00419-021-01997-z.
- [25] CHIKAHIRO Y, ARIO I. Numerical analysis of reinforcing effect for scissors-type bridge with strut members [J]. Applied Sciences, 2022, 12(24): 12906. DOI: 10.3390/app122412906.
- [26] YU X M, YANG Y H, JI Y X, et al. Experimental study on static performance of deployable bridge based on cable-strengthened scissor structures [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 4373486. DOI: 10.1155/2021/4373486.
- [27] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 119.
HUANG Zhen, ZHAO Yongsheng, ZHAO Tieshi. Advanced spatial mechanism [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2014: 119. (in Chinese)
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)