

不同配钢形式 RC 组合剪力墙抗震性能分析

蒋欢军^{1,2}, 王斌², 吕西林^{1,2}, 古泉³

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092;

3. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 超高层结构底部的钢筋混凝土剪力墙承受较大的轴力、弯矩和剪力, 强震作用下易发生剪切或压溃破坏, 通常采用钢-混凝土组合剪力墙以提高结构的抗震性能。以当前实际工程中常用的内置钢板组合剪力墙和内藏钢桁架剪力墙为研究对象, 针对典型的剪力墙构件建立数值分析模型, 对比了不同配钢形式剪力墙的滞回特性、承载力和耗能特性。研究表明: 在相同含钢率的情况下, 与提高构件配筋率的传统方法相比, 钢板组合剪力墙和钢桁架剪力墙均能显著提高构件的承载力和耗能能力, 改善剪切破坏模式。将配钢集中布置在剪力墙塑性铰区域时, 钢板组合剪力墙的承载力和耗能能力明显优于钢桁架组合剪力墙。

关键词: 内置钢板组合剪力墙; 内藏钢桁架组合剪力墙; 抗震性能; 滞回耗能; 捏拢效应; OpenSees

中图分类号: TU973.14; TU398.2

文献标志码: A

Seismic performance of RC composite shear walls with different steel embedded layout

JIANG Huanjun^{1,2}, WANG Bin², LU Xilin^{1,2}, GU Quan³

(1. State Key laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Reinforced concrete (RC) shear walls located on the bottom zone of the ultra-high-rise buildings are subjected to large axial load, shear force and moment, and the shear failure or crushing of concrete usually occurs during severe earthquakes. The seismic performance of such structures is improved by steel-concrete composite shear walls generally. Two typical composite shear walls commonly used in practice construction, steel plate-reinforced concrete composite shear walls (SPRCW) and steel concealed truss-reinforced concrete composite shear walls (STRCW), were studied in the paper. The numerical analytical models were developed to investigate the influence of typical shear walls with different steel layout on hysteretic response, carrying capacity and energy dissipation. The results indicate that SPRCW and STRCW can clearly increase carrying capacity and energy dissipation, and reduce the likelihood of shear failure model compared to the conventionally RC wall with the same steel ratio. When the steel concentrated in plastic hinge region of shear wall, the carrying capacity and energy dissipation of SPRCW are significantly better than STRCW.

Key words: steel plate-reinforced concrete composite shear walls; steel concealed truss-reinforced concrete composite shear walls; seismic performance; pinch effect; OpenSees

收稿日期: 2014-04-25; 修订日期: 2014-05-30

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAJ13B02); 中央高校基本科研业务费专项资金资助课题

作者简介: 蒋欢军(1973-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为高层及超高层结构抗震。E-mail: jhj73@tongji.edu.cn

通讯作者: 王斌(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事高层结构抗震研究。E-mail: 2008wangbin@tongji.edu.cn

引言

剪力墙构件或核心筒体是超高层结构重要的抗侧力构件。剪力墙不仅承担了大部分的地震剪力,还起到耗散地震能量的重要作用,是结构体系中抗震设计的关键构件。位于结构底部的剪力墙承受较大的轴力、弯矩和剪力,在强震作用下普通钢筋混凝土剪力墙容易形成受压剪切破坏,构件强度和耗能呈明显下降趋势^[1]。如何改善底部剪力墙的抗震性能,是超高层结构基于性能抗震设计的关键问题之一。

钢-混凝土组合剪力墙同时具有钢与混凝土两种材料的优点,可以有效地增加剪力墙构件的承载力、延性和耗能能力,减小构件的截面尺寸。当前实际工程中钢-混凝土组合剪力墙主要分为3类:(1)型钢混凝土组合剪力墙:将型钢布置在剪力墙的边缘约束区域,以降低墙体边缘约束区混凝土的压应力,减缓墙肢混凝土压碎剥落。(2)内藏钢桁架混凝土组合剪力墙:在剪力墙中布置X向内藏钢桁架,改善剪力墙的内部剪力传力机制。(3)钢板混凝土组合剪力墙:将钢板内置于钢筋混凝土剪力墙或者双层钢板外包混凝土剪力墙,既能有效提高构件轴向承载力,也能改善构件的承载力和耗能能力。

近年来,针对内置钢板混凝土组合剪力墙(以下简称钢板组合剪力墙)和内藏钢桁架剪力墙(以下简称钢桁架组合剪力墙)构件进行了广泛的试验研究和数值模拟。曹万林^[2-3]针对不同类型的内藏钢桁架组合剪力墙进行了系列试验研究。孙建超等^[4]进行了不同连接形式的钢板-混凝土组合墙受剪性能试验。吕西林等^[5]进行了多参数钢板组合剪力墙的试验研究。Kassem^[6]针对钢板组合剪力墙进行了试验研究和参数化分析。陈涛、蒋冬启等^[7-8]针对高轴压比和高强混凝土钢板组合剪力墙进行了系列试验研究。张文江^[9]针对钢管混凝土钢板组合剪力墙和型钢混凝土钢板组合剪力墙进行了试验和理论分析研究。本文作者^[10]针对不同轴压比和配钢率的钢板组合剪力墙进行了数值模拟分析。

这些研究表明,和普通剪力墙相比,组合剪力墙可以明显提高构件的承载力和耗能能力,可以改善构件破坏模式。但是针对不同配钢形式组合剪力墙抗震性能对比研究相对较少,本文以钢板组合剪力墙和钢桁架组合剪力墙为分析对象,主要从构件的滞回能力、承载力和耗能能力等方面进行对比分析,为此类组合剪力墙构件在实际工程应用中提供参考。

1 分析模型与构件参数

1.1 分析模型

采用 OpenSees 分析程序^[11]建立不同配钢形式组合剪力墙的数值分析模型,如图1所示,所采用的分析单元和材料本构见表1所示。模型中考虑边缘约束构件中核心区混凝土的约束效应。由于实际工程中内置钢板和钢桁架上都布置抗剪栓钉,本文分析中不考虑钢桁架、钢板与RC墙体之间的粘结滑移,采用共节点建模方式。边缘约束构件与剪力墙板之间采用 equalDOF 命令组合,协调二者之间的变形。

文献[12]对本文所提出的分析方法的适用性和准确性进行了参数验证,表明在模拟不同类型的RC剪力墙和组合剪力墙构件的非线性行为方面具有较高的准确度。

表1 组合剪力墙构件分析参数
Table 1 Analytical parameters of composite shear wall

组成部分	分析单元	材料本构
边缘约束构件	Displacement Based Beam-Column Element	混凝土: Concrete02 钢筋和型钢: Steel02
剪力墙板	Quad Element	Cyclic soften membrane model
内藏钢桁架	Truss Element	Steel02
内置钢板	Quad Element	J2 Plasticity Material

1.2 构件参数设计

参考实际工程中典型的型钢剪力墙构件,参数设计满足现行规范《高层建筑混凝土结构技术规程》

(JGJ3-2010)^[13]和即将颁布实施的《组合结构设计规范》(JGJ138-2011)的相关要求,构件设计参数与配筋参数见图2所示。可以看出构件抗剪承载力小于抗弯承载力,预测构件的破坏形式以剪切破坏为主。

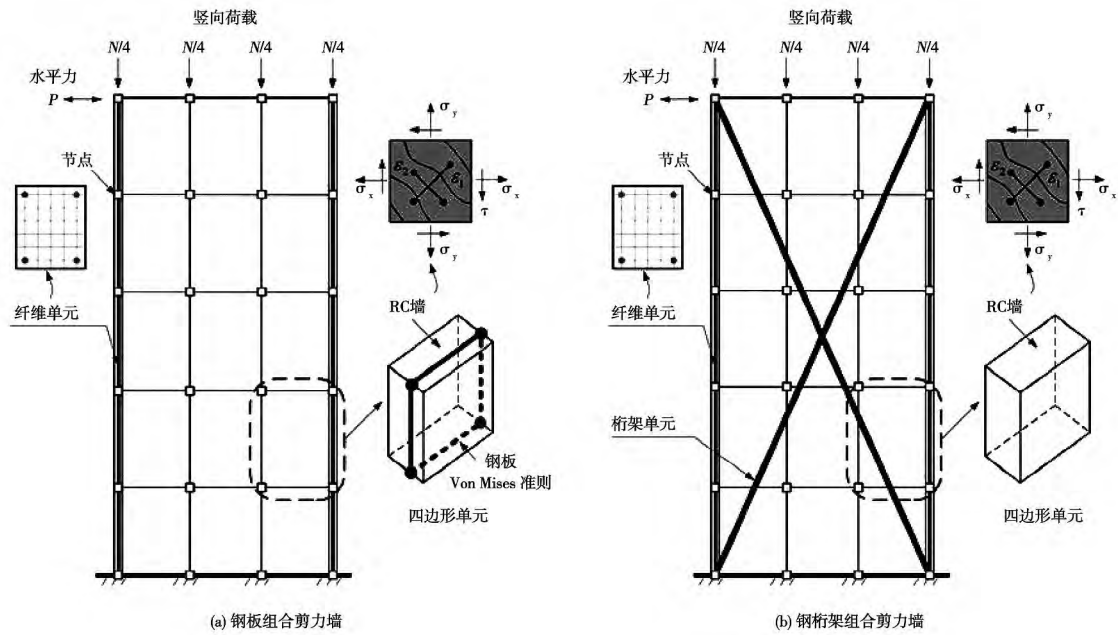


图1 不同类型组合剪力墙数值分析模型

Fig. 1 Numerical model of Composite Shear Walls with Different Shaped-Steel Layout

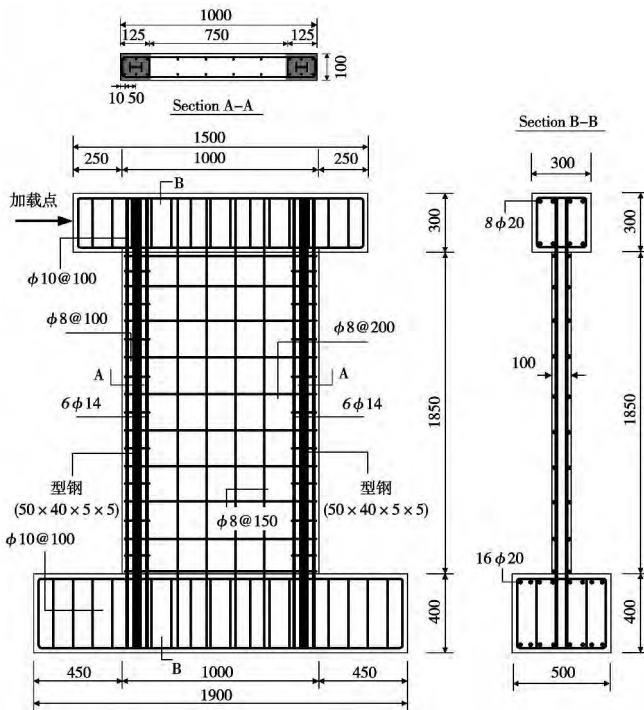


图2 试件设计与配筋参数(单位: mm)

Fig. 2 Design and Reinforcement details of specimen (dimensions in mm)

设计参数:

混凝土强度 C60 $f_c = 38.5$ MPa; 钢筋 HRB335 $f_y = 335$ MPa

钢材 Q345 $f_y = 345$ MPa

腹板配筋率: $\rho_t = 0.50\%$ $\rho_l = 0.67\%$

边缘约束区: $\rho_{bl} = 6.33\%$ $\rho_v = 2.21\%$ $\rho_{\text{钢}} = 5.20\%$

设计轴压比: $n = 0.4$; 剪跨比 $\lambda = 2$

抗弯承载力设计值:

$$M_n = T \left(d - \frac{a}{1} \right) + N_u \left(\frac{l_w - a}{2} \right) = 527.8 \times \left(937.5 - \frac{445.5}{2} \right) + 1181.9 \times \left(\frac{1000 - 445.5}{2} \right) = 706.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$P = 706.2 / 2 = 303.1 \text{ kN}$$

抗剪承载力设计值:

$$V = \frac{1}{\lambda - 0.5} \left(0.5 f_t b h_w + 0.13 N_u \frac{A_w}{A} \right) + f_{yv} \frac{A_{sk}}{s} h_w + \frac{0.4}{\lambda} f_{\alpha} A_{\alpha}$$

$$= \frac{1}{2 - 0.5} \times 167 \ 125 + 300 \times \frac{100.48}{200} \times 937.5 + \frac{0.4}{2} \times 315 \times 650 = 293.7 \text{ kN}$$

图3为构件整体滞回曲线,可以看出墙体达到峰值承载后强度退化较快,延性较差,变形曲线捏拢效应明显。破坏模式为剪切破坏,与预期破坏模式一致。考察构件的剪切变形,计算范围取构件塑性铰区高度,剪切变形滞回曲线见图4所示。可以看出剪切变形捏拢效应明显,卸载过程中构件剪切刚度迅速退化。这主要是由于构件在卸载过程中,由于开裂的混凝土尚未完全闭合,施加的荷载不能有效地形成传递路径,导

致反向加载时位移增大的速率远大于荷载增加的速率, 从而形成捏拢效应。

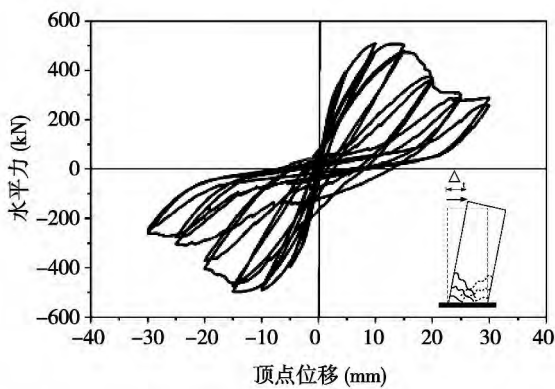


图3 构件滞回曲线

Fig. 3 The hysteresis curve of specimen

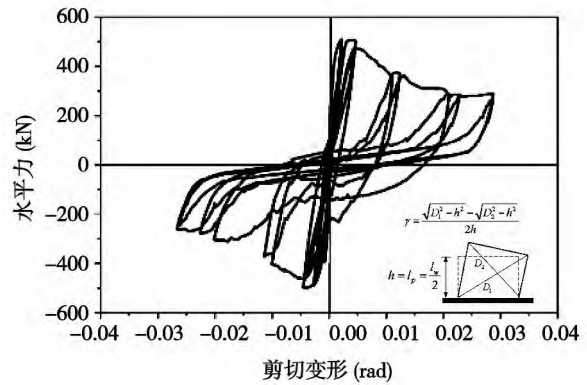


图4 剪切变形曲线

Fig. 4 Shear deformation response of specimen

1.3 不同配钢构件模型

从现行设计规范的公式表达来看^[13], 增加墙体腹板的水平配筋、钢板和斜向钢桁架, 都会提高构件的抗剪承载力。以往研究表明, 单纯增加构件的配筋, 并不能显著地提高构件的耗能能力和延性^[14-15]。但是改变构件腹板的配筋形式, 如采用与墙体主应力方向一致的斜向配筋方式, 能显著改善构件的破坏模式和耗能能力^[16-18]。针对当前实际工程常用的配钢剪力墙形式, 本文设计了4组不同的组合剪力墙模型 (Model-1 为提高配筋率的传统模型), 见图5所示。参考当前实际工程中钢板组合剪力墙的参数, 分析模型中含钢率取为2%, 详细配钢参数见表2所示, 其余参数与图2中参数一致。

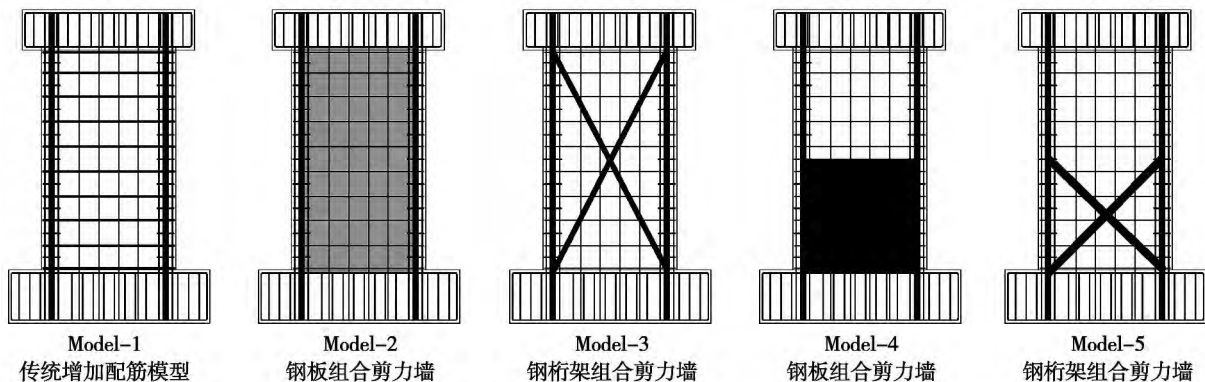


图5 不同配钢分析模型示意

Fig. 5 Analytical models with different shaped-steel layout

表2 剪力墙构件腹板配筋参数

Table 2 Web reinforcement parameters of shear wall

模型	竖向配筋率 (%)	水平配筋率 (%)	钢板配筋率与位置	钢桁架配筋率、位置和角度
原构件 (即图2模型)	0.67	0.05	—	—
Model-1	0.67	2.50	—	—
Model-2	0.67	0.50	2% ,全截面	—
Model-3	0.67	0.50	—	2% ,全截面 66°
Model-4	0.67	0.50	4% ,半截面	—
Model-5	0.67	0.50	—	4% ,半截面 48°

注: 含钢率为2%时, Model-2中钢板厚度为2mm, 等效为Model-3中单根桁架面积为802 mm², 其他情况依此类推。

2 分析结果与讨论

2.1 构件滞回曲线与剪切变形

不同分析模型的荷载-顶点位移滞回曲线与剪切变形见图6所示。可以看出,通过提高构件的水平配筋率(Model-1),虽然可以提高构件的承载力,但没有明显改善构件的破坏模式,滞回曲线捏拢效应明显,加载后期构件强度和刚度退化较快。相同配筋率的情况下,采用钢板组合剪力墙(Model-2)和钢桁架组合剪力墙(Model-3)则不但可以有效提高构件的承载力,同时能改善滞回曲线的捏拢效应,加载后期构件强度和刚度退化缓慢。相比而言,Model-2的整体滞回耗能优于Model-3,这主要是由于钢板可以保证与剪力墙单元的主应力方向在反复加载过程中一致,但钢桁架的受力受其布置的角度影响较大。将配钢集中布置在剪力墙塑性铰区范围内时,Model-4的承载力和滞回耗能明显优于Model-5。

对比各构件所对应的剪切变形,可以看出采用组合剪力墙时,构件剪切变形刚度退化较小,构件剪切变形小于同等配筋率的传统剪力墙。将配钢集中布置在塑性铰区范围内时,钢板组合剪力墙(Model-4)的剪切变形滞回曲线比较饱满,刚度退化不明显,表明构件具有较好的抗剪性能;钢桁架组合剪力墙(Model-5)在加载初期剪切变形较小,但在加载后期,由于混凝土的破坏导致构件剪切变形明显增大。

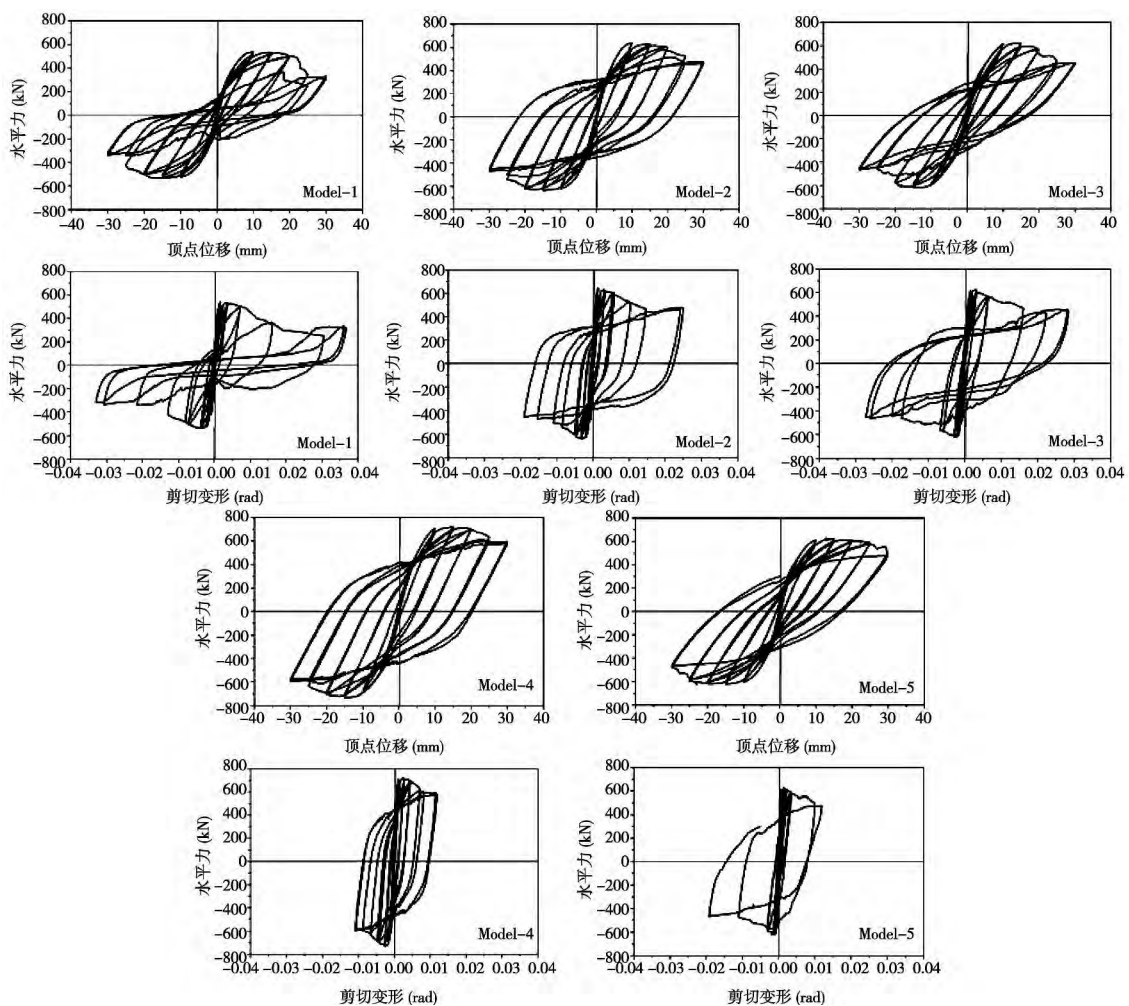


图6 不同分析模型滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic response of different analytical model

2.2 骨架曲线

不同分析模型水平荷载-顶点位移骨架曲线见图7所示。从骨架曲线上可以看出,增加配筋率均有效地能提高构件的峰值承载力,但是传统增加配筋率的方式仅提高6.5%(Model-1),加载后期承载力下降明

显; 钢板组合剪力墙(Model-2) 和钢桁架剪力墙(Model-3) 可分别提高 26.3% 和 22.7% , 将配钢集中布置在剪力墙塑性铰区范围内时, 钢板组合剪力墙(Model-4) 的承载力增幅最为明显, 提高 42.1% , 但钢桁架组合剪力墙(Model-5) 承载力变化并不明显, 仅提高 22.1% 。不同配钢组合剪力墙在加载后期具有较高的承载力, 表明钢板或钢桁架对构件承载力的贡献较大。

2.3 耗能分析

基于构件的滞回曲线的面积, 可以计算出构件在整个加载过程中的滞回耗能。不同模型的滞回耗能的对比见图 8 所示。可以看出, 增加配钢率均能提高构件的耗能能力, 但采用钢板组合剪力墙时(Model-2 和 Model-4) , 其构件耗能能力增加最为明显, 分别为原模型耗能能力的 2.5 和 4.2 倍。

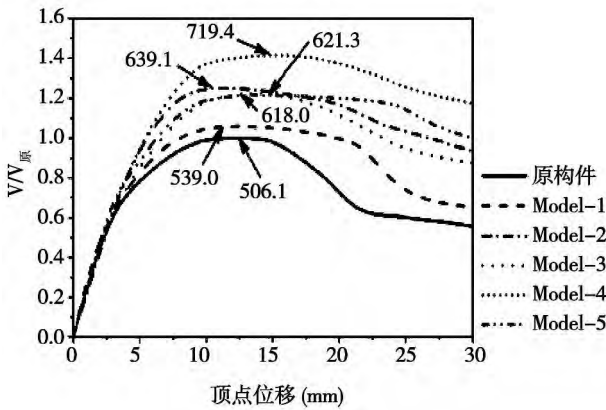


图 7 不同模型骨架曲线对比

Fig. 7 Comparison of skeleton curves for different models

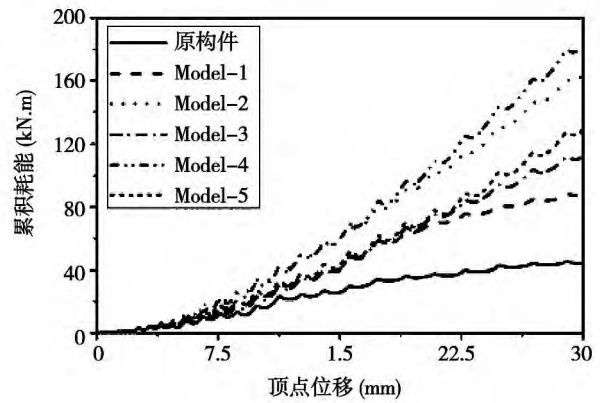


图 8 不同模型累积耗能对比

Fig. 8 Comparison of accumulated energy for different models

2.3 剪切应变分析

本文分析模型中钢筋混凝土单元由混凝土单元和钢筋单元组成, 混凝土单元可承担轴向正应力和剪应力, 而钢筋只承担轴向应力, 如图 9 所示。图中 σ_x 、 σ_y 、 σ_x^c 和 σ_y^c 为 x - y 坐标系下钢筋混凝土单元和混凝土单元的正应力, τ_{xy} 和 τ_{xy}^c 分别为钢筋混凝土单元和混凝土单元的剪应力, $\rho_x f_x$ 和 $\rho_y f_y$ 为钢筋的轴向应力。

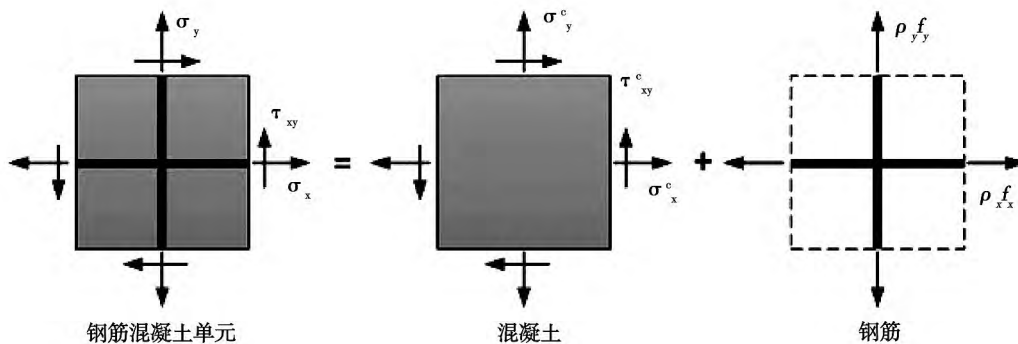


图 9 钢筋混凝土单元应力状态

Fig. 9 Stress state in reinforced concrete element

提取不同分析模型中底层混凝土单元体剪应力和剪应变关系, 见图 10 所示。可以看出由于组合剪力墙中钢板或钢桁架与混凝土的协同工作, 提高了构件的抗剪承载力, 有效地减小了混凝土单元的剪切应变。采用钢板组合剪力墙时(Model-2 和 Model-4) , 单元的剪切应力应变关系中强度和刚度退化较小, 滞回曲线比较饱满, 与前文中所分析构件的剪切变形规律一致。

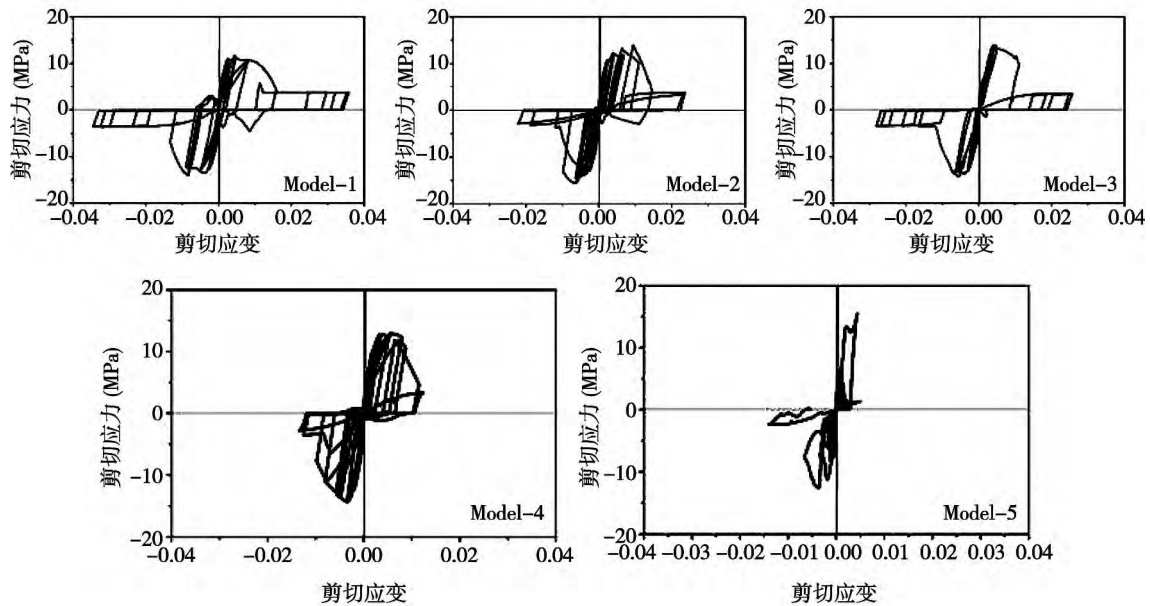


图10 不同模型混凝土单元剪应力和剪应变关系

Fig. 10 Shear stress vs. strain curves of different analytical model

3 结论

本文以当前实际工程中常用的内置钢板组合剪力墙和内藏钢桁架剪力墙为研究对象,针对剪跨比为2的典型剪力墙构件建立数值分析模型,对比了不同配钢形式剪力墙的滞回特性、承载力和耗能特性。主要研究结论如下:

(1) 相比传统提高RC剪力墙配筋率的方法而言,采用钢-混凝土组合剪力墙更能有效地提高构件的承载力,改善构件变形的捏拢效应,提高构件的耗能能力。

(2) 同等配钢率的情况下,钢板组合剪力墙的承载力和耗能能力优于钢桁架剪力墙。这主要是由于钢板可以保证与剪力墙单元的主应力方向在反复加载过程中一致,但钢桁架的受力受其布置的角度影响较大。将配钢主要集中在剪力墙塑性铰区域时,钢板组合剪力墙的承载力和耗能能力明显增大,但钢桁架组合剪力墙承载力和耗能能力变化不明显。

(3) 由于组合剪力墙中钢板或钢桁架与混凝土的协同工作,提高了构件的抗剪承载力,有效地减小了混凝土单元的剪切应变。采用钢板组合剪力墙时,混凝土单元的剪切应力应变关系中强度和刚度退化较小,滞回曲线比较饱满。

(4) 本文以剪跨比为2的剪力墙为研究对象,针对其他剪跨比不同配钢形式的组合剪力墙的抗震性能还需进一步的分析研究。

参考文献:

- [1] 蒋欢军,王斌,吕西林. 提高钢筋混凝土剪力墙抗震性能的思想与方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 167-174.
JIANG Huanjun, WANG Bin, LU Xilin. Concepts and measures for improving seismic performance of reinforced concrete shear wall[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(2): 167-174. (in Chinese)
- [2] 曹万林,张建伟,陶军平,等. 内藏桁架的混凝土组合低剪力墙试验[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(2): 195-200.
CAO Wanlin, ZHANG Jianwei, TAO Junping, et al. Experimental study on low-rise RC shear wall with concealed truss[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(2): 195-200. (in Chinese)
- [3] 曹万林,张建伟,董宏英,等. 内藏桁架混凝土组合高剪力墙抗震性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(4): 153-158.
CAO Wanlin, ZHANG Jianwei, DONG Hongying, et al. Seismic performance of high rise shear wall with concealed truss[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(4): 153-158. (in Chinese)
- [4] 孙建超,徐培福,肖从真,等. 钢板-混凝土组合剪力墙受剪性能试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(6): 1-5.
SUN Jianchao, XU Peifu, XIAO Congzhen, et al. Experimental study on shear behavior of steel plate-concrete composite wall[J]. Building

- Structure ,2008 ,38(6) : 1 - 5.
- [5] 吕西林,干淳洁,王 威. 内置钢板钢筋混凝土剪力墙抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2009,30(5): 89 - 96.
LU Xilin ,GAN Chunjie ,WANG Wei. Study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete shearwalls [J]. Journal of Building Structures , 2009 ,30(5) : 89 -96. (in Chinese)
- [6] Kassem W. Experimental and Theoretical Study of Encased-Plate Composite Structural Walls [D]. Dundee: University of Dundee ,2010.
- [7] 陈 涛,肖从真,田春雨,等. 高轴压比钢-混凝土组合剪力墙压弯性能试验研究[J]. 土木工程学报,2011,44(6):1 - 7.
CHEN Tao ,XIAO Congzhen ,TIAN Chunyu , et al. Experimental study of the compression-bending behavior of composite shear walls of high axial compression ratios [J]. China Civil Engineering Journal 2011 ,44 (6) : 1 -7. (in Chinese)
- [8] 蒋冬启,肖从真,陈 涛,等. 高强混凝土钢板组合剪力墙压弯性能试验研究[J]. 土木工程学报,2011,45(3) : 17 - 25.
JIANG Dongqi ,XIAO Congzhen ,CHEN Tao , et al. Experimental study of the compression-bending behavior of high-strength concrete steel composite shear walls [J]. China Civil Engineering Journal. 45(3) ,17 -25. (in Chinese)
- [9] 张文江. 钢管混凝土边框内藏钢板组合剪力墙抗震性能试验与理论研究[D]. 北京:北京工业大学,2012.
ZHANG Wenjiang. Experimental Study and Theoretical Analysis on Seismic Performance of Embedded Steel Plate Composite Shear Wall with Concrete Filled Steel Tubular Column [D]. Beijing: Beijing University of Technology ,2012. (in Chinese)
- [10] Wang B ,Jiang H J ,Lu X L. Seismic performance of steel plate-reinforced concrete composite shear wall [C]// Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering , September 24 -28 ,2012 ,Lisbon ,Portugal ,Paper No. 1232.
- [11] OpenSees. Open system for earthquake engineering simulation. <http://opensees.berkeley.edu>.
- [12] 王 斌,蒋欢军,吕西林. 内置钢板钢筋混凝土组合剪力墙数值模拟[C]// 第二届全国防灾减灾工程学术会议,哈尔滨,2013.
WANG Bin ,JIANGHuanjun ,LU Xilin. Numerical Simulation of Steel Plate-Reinforced Concrete Composite Shear Wall [C]// The 2nd National Conference on Disaster Prevention and Mitigation Engineering , Harbin ,2013. (in Chinese)
- [13] JGJ 3 -2010,高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
JGJ 3 -2010 Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press ,2011. (in Chinese)
- [14] Oesterle R G ,Aristizabal-Ochoa J D ,Fiorato A E , et al. Earthquake-Resistant Structural Walls-Tests of Isolated Walls ,Phase II[R]. Construction Technology Laboratories ,Portland Cement Association ,1979.
- [15] Lefas I D ,Kotsovos M D ,Ambraseys N N. Behavior of reinforced concrete structural walls: strength ,deformation characteristics ,and failure mechanism[J]. ACI Structural Journal ,1990 ,87(1) : 23 -31.
- [16] Sittipunt C ,Wood S L. Influence of web reinforcement on the cyclic response of structural walls [J]. ACI Structural Journal ,1995 ,92(6) : 745 -756.
- [17] Mansour M ,Hsu T. Behavior of reinforced concrete elements under cyclic shear. I: Experiments [J]. Journal of Structural Engineering ,2005 ,131(1) : 44 -53.
- [18] Shaingchin S ,Lukkunaprasit P ,Wood S L. Influence of diagonal web reinforcement on cyclic behavior of structural walls [J]. Engineering Structures ,2007 ,29(4) : 498 -510.