

文章编号: 1673-2049(2015)04-0039-07

双层钢板混凝土组合剪力墙滞回性能研究

马恺泽, 阙 昂, 刘伯权

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为研究双层钢板混凝土组合剪力墙的滞回性能,对 4 个剪跨比为 2.5 的组合剪力墙试件进行了拟静力加载试验;通过改变约束拉杆和加劲肋的间距,研究其在往复水平荷载作用下的破坏机理、滞回性能;选用地震分析软件 OpenSees 建立了双层钢板混凝土组合剪力墙的纤维模型,进行了低周反复荷载作用下的非线性分析。结果表明:该种剪力墙的破坏形态为墙底部截面钢板被压曲,核心混凝土被压碎的弯曲型破坏;在轴压比相同条件下,设置加劲肋试件的抗震性能优于设置约束拉杆的试件,且随着约束拉杆和加劲肋间距的减小,试件的变形能力增加,表现出较好的耗能能力;纤维模型计算得到的抗弯承载力、延性系数与试验值之间误差较小,纤维模型能较好地模拟剪力墙的抗震性能;随着轴压比的增大,剪力墙的极限承载力有所提高,而变形能力有明显的下降;随着混凝土强度的增加,剪力墙的承载力提高,变形能力减小;随着钢板厚度的增加,剪力墙的承载力和变形能力都明显增加。

关键词:双层钢板混凝土组合剪力墙;拟静力试验;滞回性能;纤维模型;延性系数

中图分类号: TU398.2 **文献标志码:** A

Research on Hysteretic Behavior of Dual Steel Concrete Composite Shear Walls

MA Kai-ze, QUE Ang, LIU Bo-quan

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to research the hysteretic behavior of dual steel concrete composite shear walls, the quasi-static tests of four specimens were carried out. The shear-span ratio of all specimens was 2.5. The failure mechanism and hysteretic behavior under lateral cyclic loading were investigated by changing the spaces of binding bars and stiffeners. Based on the seismic analysis software OpenSees, the fiber model method was used to establish numerical simulation model of dual steel concrete composite shear walls, and the nonlinear analysis under low cyclic loading was carried out. The results show that the failure patterns of the shear wall include the buckle of the steel tube and the crash of core concrete at the base of the specimens. Under the same condition of axial compression ratio, the specimens with stiffeners show better seismic performance than the ones with binding bars. Moreover, the deformation of the specimen is significantly improved when the spaces of stiffeners and binding bars decrease, and the specimens show better energy dissipation capacity. It makes no difference between the theoretical and experimental values of flexural load-bearing capacity and ductility coefficient, and the fiber model can better simulate the seismic performance of shear walls. With increase of the axial compression

收稿日期: 2015-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308052); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G1281068)

作者简介: 马恺泽(1981-), 男, 内蒙古包头人, 副教授, 工学博士, E-mail: topmkz@126.com.

ratio, the deformation of the shear walls decreases, and the ultimate load-bearing capacity is improved. With increase of the concrete strength, the load-bearing capacities are improved, the deformation of the shear walls decreases. With increases of the steel thickness, the deformation and load-bearing capability of the shear walls are significantly improved.

Key words: dual steel concrete composite shear wall; quasi-static test; hysteretic behavior; fiber model; ductility factor

0 引言

双层钢板混凝土组合剪力墙是一种新型钢-混凝土组合剪力墙,它是通过在剪力墙外侧设置外包钢板,混凝土填充于钢板之间而形成。双层钢板混凝土组合剪力墙具有很高的抗弯、抗剪承载能力和延性,从而有效地提高结构的整体抗震性能。这种剪力墙可以有效地减小剪力墙的厚度,减轻结构自重,增加建筑使用面积;此外,在施工时该组合剪力墙的双层钢板作为混凝土浇筑的模板,可以减少施工的工序^[1-3]。

各国学者对双层钢板混凝土组合剪力墙进行了一些试验研究。Emori^[4]设计了6个双层钢板内填混凝土剪力墙模型,研究了试件的轴压性能以及抗剪性能,其中3个试件双层钢板之间既设置横向加劲肋,也设置纵向加劲肋,加劲肋与钢板采用焊接连接,研究表明组合剪力墙具有较高的承载力和良好的延性,并基于承载力叠加原理初步计算得到这种组合剪力墙的承载力。Wright^[5]采用较薄的双层压型钢板,研究了该组合剪力墙的轴压性能、抗剪性能,研究结果表明这种组合剪力墙的力学性能在很大程度上依赖于压型钢板的屈曲和钢与混凝土之间的连接形式。Clublely等^[6]对双层钢板混凝土组合剪力墙进行了试验研究,试验结果表明双层钢板组合剪力墙受剪承载力较高,变形能力良好。Eom等^[7]对带约束拉杆的矩形和T形截面的双层钢板混凝土组合剪力墙进行了往复加载试验,变化参数为墙体类型(单、双肢)、截面形式、钢板厚度以及剪力墙底部的加强措施,剪力墙最终破坏模式为剪力墙底部钢板焊缝拉断和钢板局部屈曲等。聂建国等^[8-10]试验研究了双钢板-混凝土组合剪力墙的抗震性能,包括该结构的受力机理及典型破坏形态,试件滞回曲线饱满稳定,呈现出较好的延性和耗能能力。程卫红等^[11]完成了8片双层钢板混凝土组合剪力墙内抗震性能试验,研究了组合剪力墙的承载力、抗震性能和破坏模式以及剪跨比、含钢率和栓钉间距对其性能的影响。朱立猛等^[12]对10个采用

八螺母螺栓连接的钢板-混凝土组合剪力墙试件进行了试验研究,结果表明钢板之间采用八螺母螺栓连接是可行的,带约束拉杆钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能较好,随着高宽比降低和钢板厚度增大,其抗震性能增强,端部增设型钢可显著提高试件承载力,减小约束拉杆间距可显著提高试件延性。纪晓东等^[13]设计了5个矩形截面钢管-双层钢板-混凝土组合剪力墙试件,试件高宽比均为2.5,双层钢板通过设置对拉螺栓加强连接,对试件进行了拟静力试验,研究结果表明试件均发生压弯破坏,矩形钢管混凝土约束构件沿墙肢的长度越大,试件变形能力和耗能能力越大,钢板含钢率基本不影响试件变形能力,并提出了该种组合剪力墙的正截面承载力计算公式,与试验结果吻合良好。

本文通过4个双层钢板高强混凝土组合剪力墙试件的拟静力加载试验,研究组合剪力墙的破坏形态、滞回特性,分析不同抗震构造措施对组合剪力墙承载能力和延性的影响。在试验研究的基础上,选用地震分析软件OpenSees建立双层钢板混凝土组合剪力墙的纤维模型^[14],进行剪力墙试件在低周反复加载工况下的荷载-位移全过程分析,对影响组合剪力墙滞回性能的主要影响参数进行分析。

1 试验研究

1.1 试件设计

试验共设计了4个双层钢板高强混凝土组合剪力墙试件,且均为一字形矩形截面,在试件顶部和底部分别设置有加载梁以及基础梁,试件参数如表1所示,其中, H 为剪力墙加载点至墙底部的高度, h_w 、 b_w 分别为截面的高度和厚度, λ 为剪跨比, N 为轴压力设计值, n 为实际轴压比。试件截面尺寸如图1所示。

1.2 材料性能

试件所使用混凝土设计强度等级为C60,实测混凝土强度为61.3 MPa。钢板厚度为3.6 mm,屈服强度和极限强度分别为306.2,429 MPa。

表1 试件参数

Tab. 1 Parameters of Specimens

试件编号	H/mm	h_w /mm	b_w /mm	λ	N/kN	n	构造措施
SCW-1	2 000	800	100	2.5	1 200	0.32	约束拉杆
SCW-2	2 000	800	100	2.5	1 200	0.32	约束拉杆
SCW-3	2 000	800	100	2.5	1 200	0.32	加劲肋
SCW-4	2 000	800	100	2.5	1 200	0.32	加劲肋

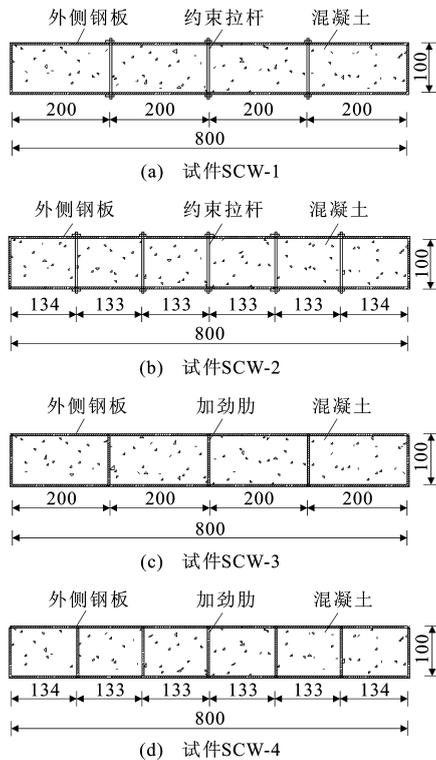


图1 试件截面尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Cross Section Dimensions of Specimens (Unit:mm)

1.3 试验装置和加载方案

4片双层钢板高强混凝土组合剪力墙试验加载装置如图2所示。基础梁锚固在试验台座上,加载梁通过端板和连接装置一侧与水平作动器端部相连。试件顶部放置刚性分配梁,将竖向千斤顶轴向压力均匀分配到墙体。水平荷载的加载点位于距基础梁顶面2 000 mm高度。为防止平面外变形,在墙体南北面中部设置有平面外支撑。

试验全程采取位移控制加载,在加载初期每级位移增量为 ± 2 mm,每级循环1次,屈服后每级位移增量为 ± 4 mm且每级循环3次,当水平荷载下降到峰值水平荷载的85%以下时试验结束。

1.4 试验现象

剪力墙试件的破坏过程和破坏形态相似,均发生弯曲破坏,如图3所示。破坏过程大体可分为3个阶段:弹性阶段、塑性阶段以及破坏阶段。弹性阶段试件无明显试验现象,钢板与混凝土协同工作,弹

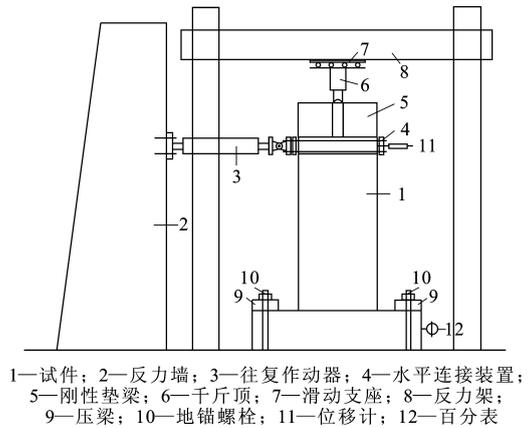


图2 试验加载装置

Fig. 2 Test Loading Setup

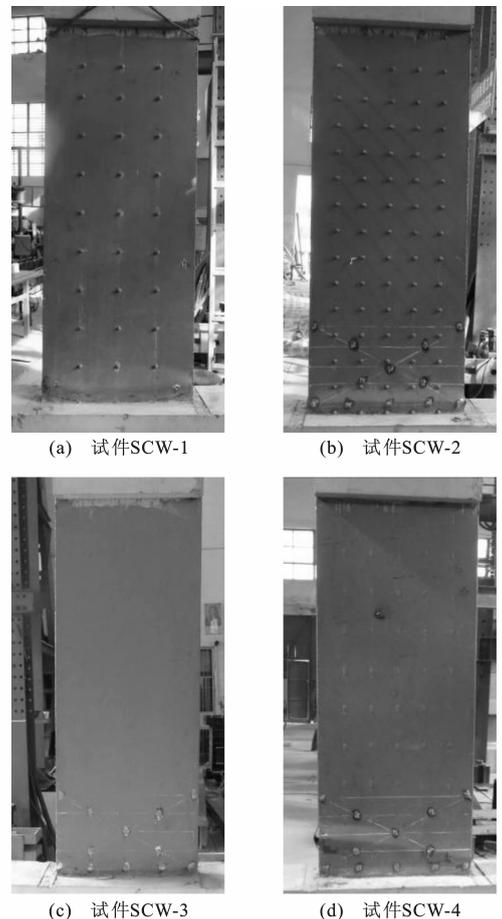


图3 试件最终破坏模式

Fig. 3 Final Failure Patterns of Specimens

性阶段的临界状态为钢板与混凝土的界面发生粘结破坏,发出嘶嘶剥离声;塑性阶段荷载-位移曲线明显折点到峰值荷载点,这个阶段钢板底部发生鼓曲,随着加载位移的增大,鼓曲不断加剧;破坏阶段钢板焊接处焊缝撕裂,内部混凝土压碎。破坏部位均在距墙体根部10~20 cm之间的塑性铰区,破坏方式符合受力特点。从钢板开裂处可见试件破坏时

根部内填混凝土已被压碎,钢板最后是被压曲的。

1.5 承载力

表 2 给出 4 个试件各特征点的荷载。由表 2 可见:试件 SCW-3 与试件 SCW-1 相比,承载力提高了 4.8%;试件 SCW-4 与试件 SCW-2 相比,承载力提高 9.4%。这说明设置加劲肋相对比设置约束拉杆更能提高试件承载力。相同条件下,随着加劲肋或约束拉杆间距的减小,试件的承载力也将提高。

表 2 试件荷载

Tab. 2 Loads of Specimens

试件编号	屈服荷载 F_y/kN	峰值荷载 F_m/kN	85%峰值荷载 F_u/kN
SCW-1	306.2	409.2	347.8
SCW-2	313.0	430.0	365.5
SCW-3	328.5	429.0	364.7
SCW-4	343.4	470.3	399.8

1.6 变形能力

试验各特征点对应的顶点位移与延性系数如表 3 所示。由表 3 可知:轴压比相同的条件下,设置加劲肋的试件延性高于设置约束拉杆试件的延性,如试件 SCW-4 比试件 SCW-2 延性增加 22.8%,试件 SCW-3 比试件 SCW-1 延性增加 19.3%。

表 3 顶点位移与延性系数

Tab. 3 Top Displacements and Ductility Coefficients

试件编号	屈服位移 Δ_y/mm	峰值位移 Δ_m/mm	极限位移 Δ_u/mm	延性系数 μ
SCW-1	9.1	18.1	28.3	3.11
SCW-2	9.3	18.4	33.1	3.56
SCW-3	9.7	22.1	36.0	3.71
SCW-4	9.8	22.0	42.8	4.37

2 非线性有限元模型的建立

2.1 钢材的本构关系

钢材本构关系采用双折线的随动强化模型^[15],如图 5 所示。该模型充分考虑了等向应变硬化影响。强化段的弹性模量 $E_1 = 0.01E_0$, E_0 为钢材初始弹性模量,钢材屈服强度根据材性试验结果取值, $E_0 = 2.05 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$ 。

2.2 混凝土的本构关系

本文选取 OpenSees 中 Concrete02 Material 作为混凝土本构模型。它是将混凝土受拉下降段简化成线性变化,受压段的骨架曲线则采用修正后的 Kent-Park 模型^[16]。本文参考蔡健等^[17-18]基于 Mander 模型提出的约束混凝土本构关系。

2.3 模型的建立

本文采用基于位移的梁-柱单元作为有限元分析模型。为保证刚度法的梁-柱单元插值函数计算结果的精确度,采取了加密网格的方法,即在塑性铰区采用增加单元数量的方法来达到提高问题求解精度的目的。不考虑粘结滑移,基础梁底部全部节点固接,有限元分析模型如图 4 所示。

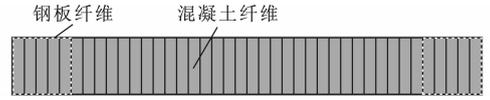


图 4 有限元分析模型

Fig. 4 Finite Element Analysis Model

2.4 结果对比

图 5 为模拟得到的 4 个试件与试验得到的底部剪力-顶点位移滞回曲线,表 4,5 分别为各试件特征点承载力、位移有限元分析结果。

由图 5 可知,试件 SCW-1, SCW-2 模拟曲线比试验曲线饱满得多,而试件 SCW-3, SCW-4 的滞回曲线与试验曲线形状比较接近。这表明有限元模拟得出的剪力墙耗能能力大于试件在试验加载情况下所表现出的耗能能力。

由表 4,5 可知,模拟的承载力与试验结果比较接近,承载力相对误差不超过 11.3%。有限元模拟得到的延性系数均比试验值大,这主要是因为纤维模型在计算过程中忽略了钢板与混凝土的粘结滑移,并且在模拟计算时也没有考虑钢板的屈曲。

3 参数分析

本文利用前述有限元模型,选用轴压比、混凝土强度以及钢板厚度这 3 个影响因素作为分析参数,对组合剪力墙承载力及延性进行分析。试件模型的墙体高度为 2 000 mm,横截面高度为 800 mm,截面厚度为 100 mm,混凝土立方体抗压强度为 60 MPa,外包钢板为 Q235 钢。各参数均在基本模型基础上变化,当某个参数发生变化时,其他参数与基本模型相一致。

3.1 轴压比

选定设计轴压比范围为 0.2~0.5,不同轴压比下的荷载-位移曲线及轴压比对承载力、延性的影响曲线如图 6 所示。由图 6 可知,组合剪力墙的承载力随着轴压比增加而增加,但增加幅度不明显,轴压比对试件延性影响比较大,试件延性随轴压比增大而明显减小。

3.2 混凝土强度

混凝土强度等级范围为 C30~C70,不同混凝土

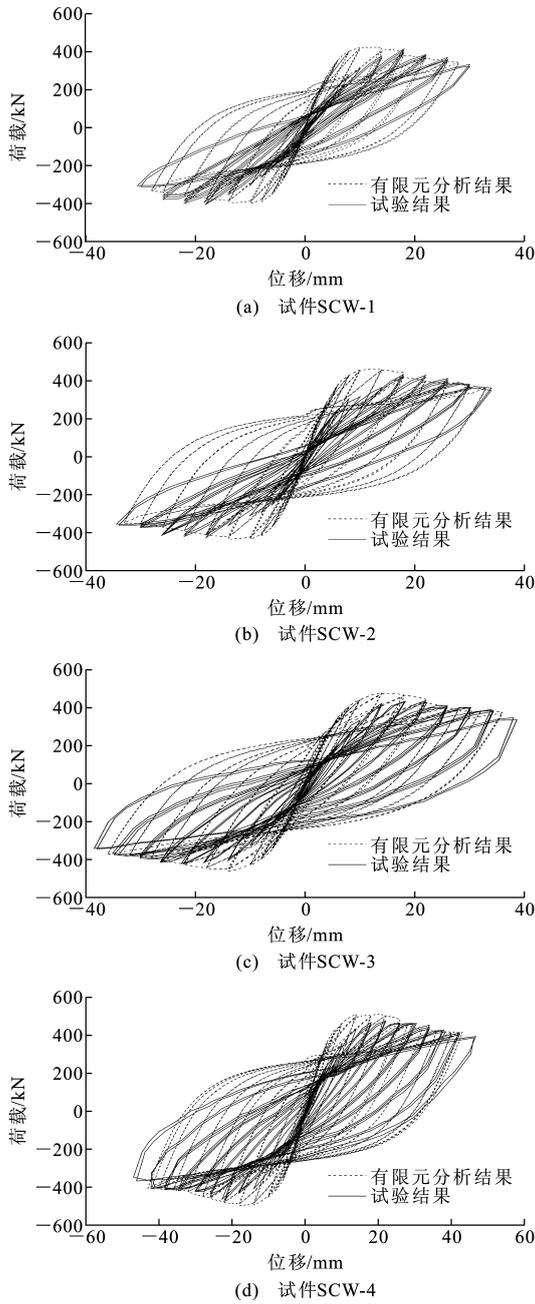


图 5 有限元分析结果与试验结果对比

Fig. 5 Comparisons of Finite Element Analysis Results and Experimental Results

表 4 各试件特征点承载力的有限元分析结果

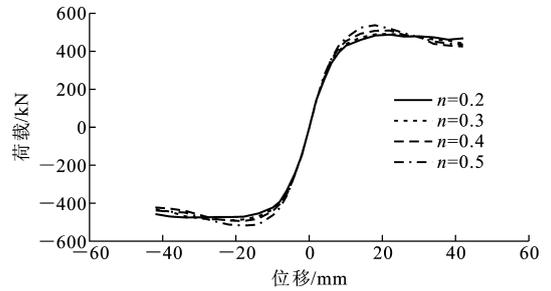
Tab. 4 Finite Element Analysis Results of Load-bearing Capacity of Characteristic Point for Each Specimen

试件编号	屈服荷载 F_y /kN	峰值荷载 F_m /kN	85%峰值荷载 $F_{0.85}$ /kN
SCW-1	314.22	418.96	356.12
SCW-2	319.47	447.56	380.43
SCW-3	358.05	477.39	405.78
SCW-4	382.69	510.25	433.71

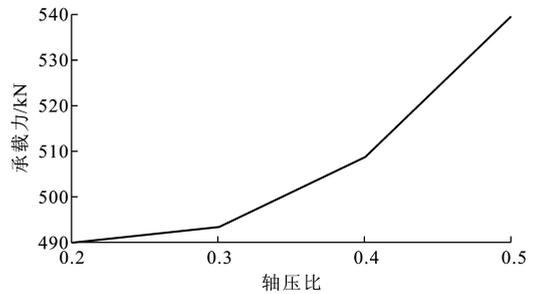
表 5 各试件变形能力有限元分析结果

Tab. 5 Finite Element Analysis Results of Deformation Capacity for Each Specimen

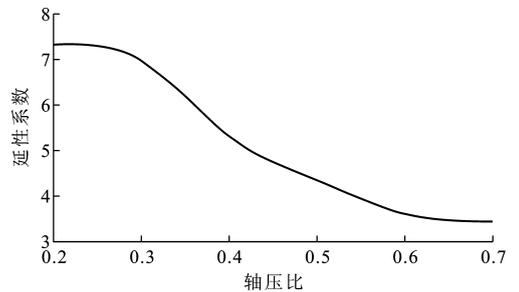
试件编号	屈服位移 Δ_y /mm	峰值位移 Δ_m /mm	极限位移 Δ_u /mm	延性系数 μ
SCW-1	6.21	10.0	22.78	3.67
SCW-2	6.35	14.0	26.40	8.00
SCW-3	6.40	14.3	25.92	4.05
SCW-4	6.90	15.0	31.13	4.51



(a) 不同轴压比下的骨架曲线



(b) 轴压比对承载力的影响



(c) 轴压比对延性系数的影响

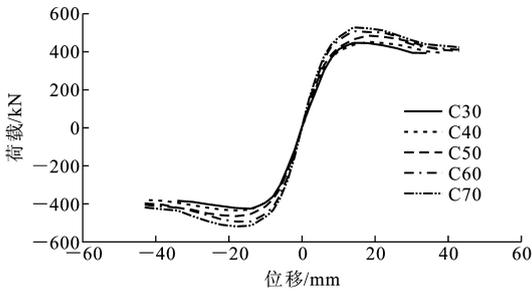
图 6 轴压比对承载力和延性系数的影响

Fig. 6 Influences of Axial Compression Ratio on Load-bearing Capacity and Ductility Factor

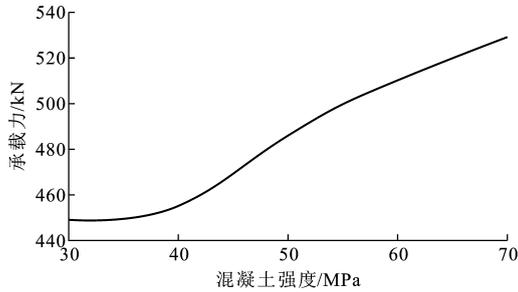
强度等级对剪力墙的荷载-位移曲线以及对承载力、延性的影响曲线如图 7 所示。由图 7 可知,随着混凝土强度的增加,组合剪力墙的承载力呈线性增大,而试件的延性逐渐减小。

3.3 钢板厚度

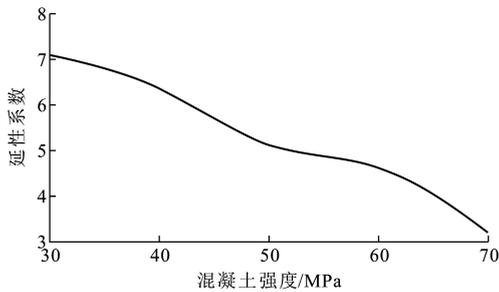
不同钢板厚度对剪力墙的荷载-位移曲线以及对承载力、延性的影响曲线如图 8 所示,其中, t 为钢板厚度。由图 8 可知,随着钢板厚度的增加,组



(a) 不同混凝土强度下的骨架曲线



(b) 混凝土强度对承载力的影响



(c) 混凝土强度对延性系数的影响

图 7 混凝土强度对承载力和延性系数的影响

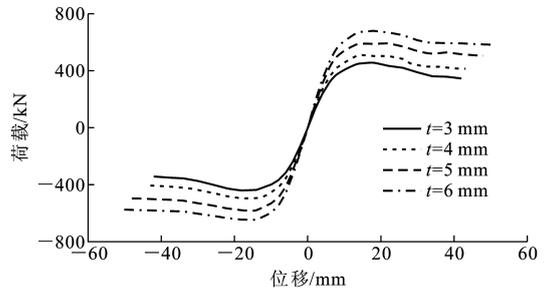
Fig. 7 Influences of Concrete Strength on Load-bearing Capacity and Ductility Factor

合剪力墙的截面承载力以及延性显著提高,且增长幅度近似呈线性。

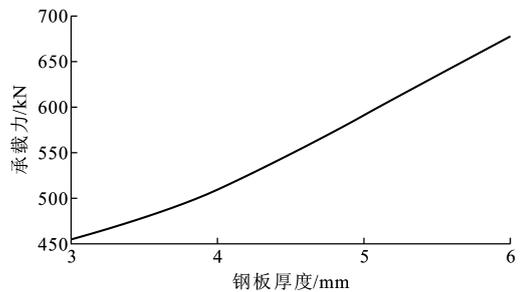
4 结语

(1) 4 个剪跨比为 2.5 的双层钢板-高强混凝土组合剪力墙试件在轴向荷载和水平荷载共同作用下均发生弯曲破坏;相同条件下,设置加劲肋的试件承载力高于设置约束拉杆试件的承载力。随着加劲肋或约束拉杆间距的减小,试件的承载力提高。

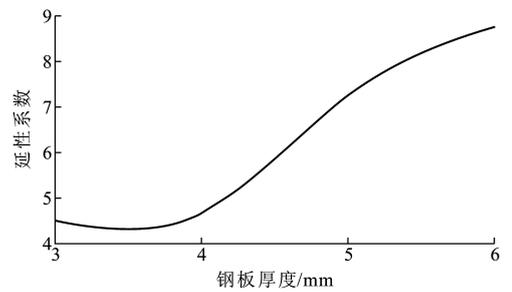
(2) 通过对 4 个试件的模拟,纤维模型计算得到的抗弯承载力、延性系数与试验值之间误差较小,纤维模型能较好地模拟剪力墙的抗震性能。组合剪力墙的承载力随着轴压比增加而增加;随着混凝土强度以及钢板厚度的增加,承载力近似呈线性增加。组合剪力墙的延性随着钢板厚度的增加而显著增大,混凝土强度越大,试件延性越小。轴压比对结构延性影响较大,轴压比越大,延性越小。



(a) 不同钢板厚度下的骨架曲线



(b) 钢板厚度对承载力的影响



(c) 钢板厚度对延性系数的影响

图 8 钢板厚度对承载力和延性系数的影响

Fig. 8 Influences of Steel Thickness on Load-bearing Capacity and Ductility Factor

参考文献:

References:

- [1] 郭家耀,郭伟邦,徐卫国,等. 中国国际贸易中心三期主塔楼结构设计[J]. 建筑钢结构进展,2007,9(5):1-6. KWOK M, GIBBONS C, TSUI J, et al. The Structural Design of the Mega Tower of China World Trade Centre Phase 3 in Beijing China[J]. Progress in Steel Building Structures, 2007, 9(5): 1-6.
- [2] 丁浩民,巢斯,吴宏磊,等. 组合结构构件在上海中心大厦中的应用与研究[J]. 建筑结构,2011,41(12): 61-67. DING Hao-min, CHAO Si, WU Hong-lei, et al. Application and Research of Steel-concrete Mixed Structure in Shanghai Tower[J]. Building Structure, 2011, 41(12): 61-67.
- [3] 丁朝辉,江欢成,曾菁,等. 双钢板-混凝土组合墙的大胆尝试-盐城电视塔结构设计[J]. 建筑结构,2011, 41(12): 87-91.

- DING Zhao-hui, JIANG Huan-cheng, ZENG Jing, et al. An Innovative Application of SCS Composite Wall: Structural Design of Yancheng TV Tower[J]. Building Structure, 2011, 41(12): 87-91.
- [4] EMORI K. Compressive and Shear Strength of Concrete Filled Steel Box Wall[J]. Steel Structures, 2002, 26(2): 29-40.
- [5] WRIGHT H D. The Behavior of Composite Walling Under Construction and Service Loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995, 35(3): 257-273.
- [6] CLUBLEY S K, MOY S S, XIAO R Y. Shear Strength of Steel-concrete-steel Composite Panels. Part II — Detailed Numerical Modelling of Performance [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(6): 795-808.
- [7] EOM T S, PARK H G, LEE C H, et al. Behavior of Double Skin Composite Wall Subjected to In-plane Cyclic Loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(10): 1239-1249.
- [8] 聂建国, 卜凡民, 樊健生. 低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 74-81.
NIE Jian-guo, BU Fan-min, FAN Jian-sheng. Experimental Research on Seismic Behavior of Low Shear-span Ratio Composite Shear Wall with Double Steel Plates and Infill Concrete [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 74-81.
- [9] 卜凡民, 聂建国, 樊健生. 高轴压比下中高剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 91-98.
BU Fan-min, NIE Jian-guo, FAN Jian-sheng. Experimental Study on Seismic Behavior of Medium and High Shear-span Ratio Composite Shear Wall with Double Steel Plates and Infill Concrete Under High Axial Compression Ratio [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4): 91-98.
- [10] 聂建国, 卜凡民, 樊健生. 高轴压比低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙拟静力试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 60-66, 76.
NIE Jian-guo, BU Fan-min, FAN Jian-sheng. Quasi-static Test on Low Shear-span Ratio Composite Shear Wall with Double Steel Plates and Infill Concrete Under High Axial Compression Ratio [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 60-66, 76.
- [11] 程卫红, 田春雨, 王翠坤, 等. 钢板夹心混凝土组合剪力墙试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(1): 40-47.
- CHENG Wei-hong, TIAN Chun-yu, WANG Cui-kun, et al. Experimental Study of Steel-concrete-steel Sandwich Composite Shear Walls[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(1): 40-47.
- [12] 朱立猛, 周德源, 赫明月. 带约束拉杆钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6): 93-102.
ZHU Li-meng, ZHOU De-yuan, HE Ming-yue. Experimental Research on Seismic Behavior of Composite Concrete Steel Plate Shear Walls with Binding Bars [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(6): 93-102.
- [13] 纪晓东, 蒋飞明, 钱稼茹, 等. 钢管-双层钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6): 75-83.
JI Xiao-dong, JIANG Fei-ming, QIAN Jia-ru, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Steel Tube-double Steel Plate-concrete Composite of Shear Walls [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(6): 75-83.
- [14] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. OpenSees Users Manual[R]. Berkeley: University of California, 2004.
- [15] MENEGOTTO M, PINTO P E. Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frame Including Changes in Geometry and Nonelastic Behavior of Elements Under Combined Normal Force and Bending [C]//IABSE. Proceedings of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads. Lisbon: IABSE, 1973: 15-20.
- [16] PARK R, PRIESTLEY M J N, GILL W D. Ductility of Square-confined Concrete Columns[J]. Journal of the Structural Division, 1982, 108(4): 929-950.
- [17] 蔡健, 龙跃凌. 带约束拉杆矩形钢管混凝土的本构关系[J]. 工程力学, 2008, 25(2): 137-143.
CAI Jian, LONG Yue-ling. Constructive Relationship of Rectangular CFT Columns with Binding Bars[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(2): 137-143.
- [18] 蔡健, 孙刚. 方形钢管约束下核心混凝土的本构关系[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2008, 36(1): 105-109.
CAI Jian, SUN Gang. Constitutive Relationship of Concrete Core Confined by Square Steel Tube [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 36(1): 105-109.