

文章编号:1674-2974(2016)09-0010-08

## 带约束拉杆双钢板-混凝土组合剪力墙 抗震性能数值模拟及参数分析\*

程春兰<sup>1†</sup>, 周德源<sup>1</sup>, 朱立猛<sup>2</sup>

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘要:**为了研究带约束拉杆的双钢板-混凝土组合剪力墙的抗震性能,进行了16个该形式组合剪力墙的反复加载试验,并采用OpenSees程序对带约束拉杆的双钢板-混凝土组合剪力墙试件进行数值模拟。在试验及数值模拟的基础上,对影响该形式组合剪力墙抗震性能的主要参数进行分析。结果表明,高宽比、轴压比以及约束拉杆间距对剪力墙的抗震性能影响显著。随着高宽比的增大,组合剪力墙的初始刚度以及屈服荷载和峰值荷载减小显著,其后期刚度退化和耗能能力降低;轴压比对组合剪力墙抗震性能的影响主要表现在后期刚度的退化程度;约束拉杆间距的减小可以提高组合剪力墙的承载力,减弱后期的刚度退化程度,增大其耗能能力。

**关键词:**双钢板-混凝土组合剪力墙;抗震性能;数值模拟;高宽比;轴压比;约束拉杆间距

中图分类号:TU392.3

文献标识码:A

## Numerical Simulation and Parameter Analysis on Seismic Behavior of Composite Concrete and Double Steel Plates Shear Walls with Binding Bars

CHENG Chun-lan<sup>1†</sup>, ZHOU De-yuan<sup>1</sup>, ZHU Li-meng<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji Univ, Shanghai 200092, China;  
2. College of Civil Engineering, Qingdao Technological Univ, Qingdao, Shandong 266033, China)

**Abstract:** In order to study the seismic behavior of composite concrete and double steel plate shear walls with binding bars, sixteen specimens were tested under reversed cyclic lateral load, and the numerical simulation by using the analytical software OpenSees was also conducted for the composite concrete and double steel plate shear walls. On the basis of experimental and numerical analysis, the main parameters affecting on the seismic behavior of the composite shear walls were evaluated. All the results indicate that the factors of aspect ratios, axial compression ratios, and binding bar spacing significantly affect the seismic behavior of the composite shear walls. As the aspect ratios of the composite concrete and steel plate shear walls increase, the initial stiffness, peak load, yield load, post-yield stiffness, and energy dissipation capacity decrease obviously. The axial compression ratios exhibit an effect on the degradation of the post-

\* 收稿日期:2015-11-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178333), National Natural Science Foundation of China(51178333)

作者简介:程春兰(1983-),女,河南信阳人,同济大学讲师,博士生

† 通讯联系人, E-mail: cclan83@126.com

yield stiffness. In addition, the close spacing of binding bars can improve the bearing capacity and energy dissipation capacity of the composite shear walls, and reduce the degradation of the post yield stiffness.

**Key words:** composite concrete and double steel plates shear walls; seismic behavior; numerical simulation; aspect ratio; axial compression ratio; binding bar spacing

作为抵抗风或者地震作用的有效抗侧力构件,剪力墙广泛应用于高层建筑结构中,通常混凝土是传统剪力墙结构体系中的主要材料,但随着建筑高度的增加和建筑功能需求的提升,传统的混凝土剪力墙需通过增大截面厚度来提高承载力和改善抗震性能,以此满足结构设计的需要,但墙体厚度的增加不仅增加了结构的自重,使其在风或地震工况下的内力增大,而且对下部基础设计提出了更高的要求,增加了建筑的总造价,同时过厚的墙体使建筑的使用面积减小,降低了建筑功能的使用效率。

双钢板-混凝土组合剪力墙通过连接件将钢板和混凝土有效地连接,使二者协同工作,相比传统的混凝土剪力墙,减小了墙体的厚度;在结构受力上,双钢板-混凝土组合剪力墙中混凝土作为钢板的支撑,防止了钢板的侧向失稳,而钢板的存在又约束了混凝土,使混凝土开裂后仍具有较好的承载力;同时,钢板还可以作为浇筑混凝土时的模板,大大提高了施工的效率。对双钢板组合剪力墙的相关研究均表明其具有较好的承载力、较优越的抗震性能<sup>[1-8]</sup>,而该形式组合剪力墙在盐城电视塔<sup>[9]</sup>以及核电工程领域<sup>[10]</sup>工程中的使用证明了其工程应用的可行性。

本文通过对 16 个带约束拉杆连接的双钢板-混凝土组合剪力墙的反反复加载试验研究以及数值模拟,进行相关参数分析,给出了影响该形式组合剪力墙抗震性能的主要因素。

## 1 试验结果

### 1.1 试件参数

试验共设计了 16 个带约束拉杆双钢板-混凝土组合剪力墙试件,试件编号为 SC1~SC16。试件端部采用槽钢连接两侧钢板,其翼缘通过四或八螺母全牙拉杆与钢板螺栓连接;试件中部两侧钢板采用无牙约束拉杆对穿连接;试件腹侧钢板伸入基础梁,同基础以满足固定边界条件。其中 SC8~SC10, SC15, SC16 试件端部内置 C 型钢对墙体端部进行

加强。试件参数详见表 1。试验加载装置如图 1 所示,典型试件横截面构造如图 2 所示。试验均设计为水平低周反复加载拟静力试验,在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行。

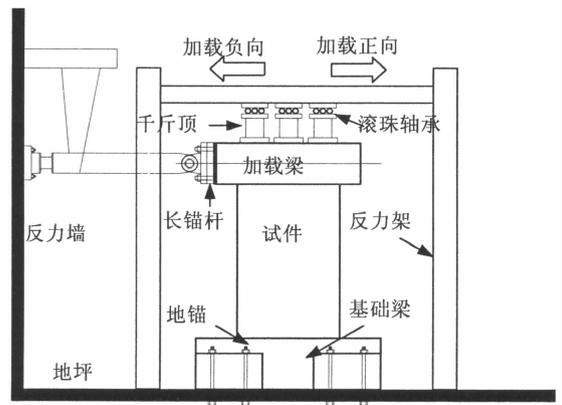
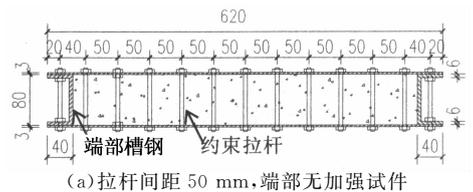
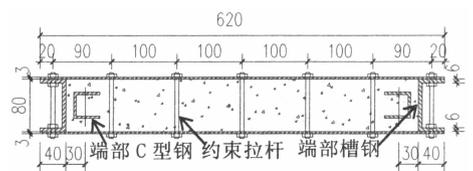


图 1 试验加载装置  
Fig. 1 Test setup



(a) 拉杆间距 50 mm, 端部无加强试件



(b) 拉杆间距 100 mm, 端部加强试件

图 2 试件截面  
Fig. 2 Cross section

### 1.2 试验结果

在低周往复荷载作用下,从各试件的试验现象可以看出,约束拉杆对墙体性能改善明显,使墙体钢板与内部混凝土协同工作。在内部混凝土破坏加剧,发生横向膨胀后,由于拉杆的拉结,钢板很好地限制了墙体的变形,而端部内置型钢可有效提高对混凝土的约束,改善端部槽钢的屈曲性能。试件随高宽比的变化,呈现出较为不同的破坏模式:高宽比为 2.5

的试件破坏集中在试件墙底截面端部,腹侧钢板局部屈曲,端部槽钢翼缘或腹板局部屈曲,核心混凝土墙底截面两端部位压碎,墙底截面中间位置混凝土基本完好,混凝土墙身底部分布有横向裂缝,呈“弯曲型破坏”;高宽比 1.5 与部分高宽比 1.0 的试件破坏集中在墙体底部整个截面区域,腹侧钢板局部屈曲甚至撕裂,端部槽钢屈曲明显甚至拉断,核心混凝土

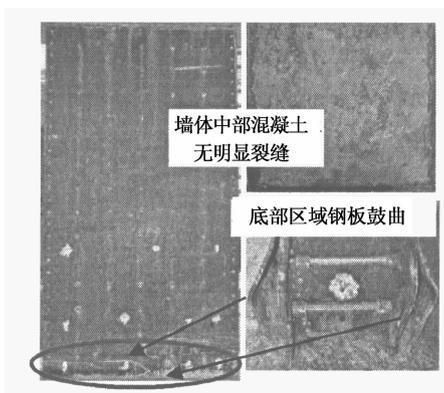
土墙体全截面压碎,墙身分布有斜向受剪裂缝,呈“弯剪型破坏”;而部分高宽比 1.0 的试件,在试验结束后剥除外侧钢板可以看出内部混凝土墙身出现明显的对角斜向裂缝,呈“剪切破坏”.典型试件的破坏形态如图 3 所示,各试件水平荷载-位移滞回曲线见图 7.

表 1 试件参数

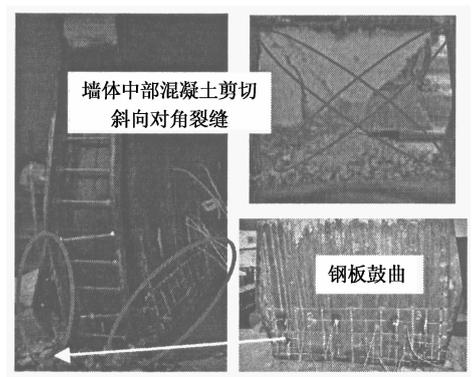
Tab. 1 Parameters of the specimen

试件编号	截面尺寸/mm (包括钢板厚度)	轴压比 $n$	高宽比	短边钢板厚度/mm	长边钢板厚度/mm	约束拉杆间距/mm	端部设置型钢
SC1	620×86	0.4	1.5	6.0	3.0	50	无
SC2	620×86	0.3	1.5	6.0	3.0	50	无
SC3	620×86	0.3	1.5	6.0	3.0	100	无
SC4	620×86	0.3	1.5	6.0	3.0	150	无
SC5	620×86	0.3	2.5	6.0	3.0	100	无
SC6	620×86	0.3	2.5	6.0	4.0	100	无
SC7	620×106	0.3	2.5	6.0	3.0	100	无
SC8	620×86	0.3	2.5	6.0	3.0	100	C40×40×4
SC9	620×86	0.3	1.5	6.0	3.0	100	C40×40×4
SC10	620×86	0.4	1.5	6.0	3.0	100	C40×40×4
SC11	620×86	0.4	1.0	6.0	3.0	50	无
SC12	620×86	0.3	1.0	6.0	3.0	50	无
SC13	620×86	0.3	1.0	6.0	3.0	100	无
SC14	620×86	0.3	1.0	6.0	3.0	150	无
SC15	620×86	0.3	1.0	6.0	3.0	100	C40×40×4×4
SC16	620×86	0.4	1.0	6.0	3.0	100	C40×40×4×4

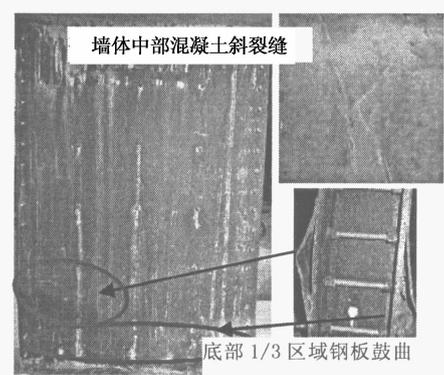
注:表中轴压比  $n$  为试验轴压比,按照  $n = N / (f_c A_c + f_y A_s)$  计算,其中,  $N$  为竖向荷载;  $f_c$  为混凝土强度实测值;  $f_y$  为钢材屈服强度;  $A_c$  为混凝土截面面积;  $A_s$  为钢材截面面积.



(a) SC5 试件



(c) SC14 试件



(b) SC4 试件

图 3 典型试件破坏过程及破坏形态

Fig. 3 Failure process and modes

## 2 OpenSees 数值模拟与试验对比

剪力墙受剪破坏的数值模拟分析一直是该类型构件非线性分析的难点,考虑到剪力墙构件其受力的平面特性,本文采用 OpenSees 非线性分析程序对带约束拉杆双钢板-混凝土组合剪力墙试件在低周往复荷载作用下的过程进行数值模拟.

### 2.1 本构模型

OpenSees 分析程序中提供了多种分析剪力墙构件的模型,本文采用文献[11,12]中提出的循环加载软化模型 CSMM 进行分析,该软化模型是在软化模型的基础上考虑了循环加载的影响。

混凝土本构模型如图 4 所示,该模型不仅可以考虑混凝土受压时由竖向拉应变引起的软化效应,而且可以考虑往复荷载作用下的软化效应以及加载过程中裂缝的开裂和闭合。

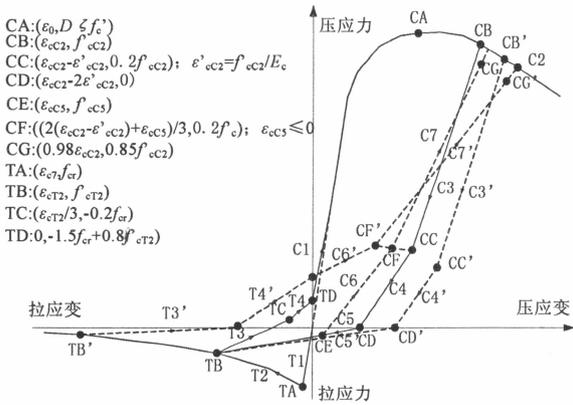


图 4 混凝土本构关系模型

Fig. 4 Cyclic stress-strain relationship of concrete

剪力墙端部采用纤维单元模拟,其“纤维”由端部型钢以及型钢范围内的混凝土构成,混凝土本构采用图 4 所示模型。型钢用等效钢筋等代,考虑到嵌入混凝土中的型钢受拉时,其周边混凝土开裂后,裂缝之间的混凝土对型钢的强化作用,参照 OpenSees 中对钢筋的强化定义,采用平均应力和平均应变来定义纤维单元中型钢的应力-应变关系,如图 5 所示。

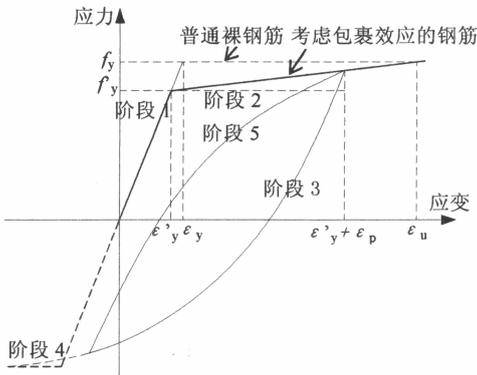


图 5 钢筋本构关系模型

Fig. 5 Cyclic stress-strain relationship of steel

对于受平面应力为主的腹侧钢板,其材料属性采用  $J_2$  (应力张量的第二不变量) 材料本构,在 OpenSees 中为  $J_2$  Plasticity Material (Plane Stress Simplified  $J_2$ )

计算模型中,端部槽钢及截面端部内埋的型钢采用基于位移的梁柱单元 (Displacement Based Beam-Column Element); 腹侧钢板及核心混凝土均采用四节点平面单元 (Quad Element)。模型底部节点设置为固结约束以模拟试件底座的边界条件,端部槽钢单元节点与同位置的混凝土单元边缘部位的节点设置 X 及 Y 方向的位移约束; 组合剪力墙中,混凝土墙与腹侧钢板在拉杆位置采用共节点连接,不考虑二者之间的粘结滑移。模型如图 6 所示。

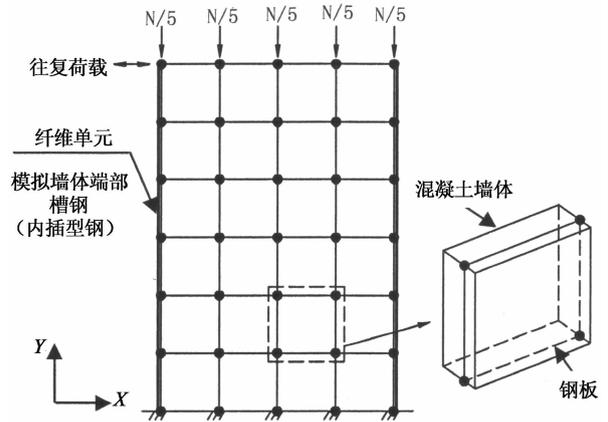


图 6 OpenSees 分析模型

Fig. 6 Finite element model by OpenSees

### 2.2 数值计算结果与试验对比

带约束拉杆的双钢板-混凝土组合剪力墙试件试验滞回曲线与 OpenSees 数值计算结果对比如图 7 所示。在组合剪力墙屈服之前,数值计算得出的滞回曲线与试验滞回曲线基本吻合,二者相差不大,能较好地模拟试件的滞回特性; 超过屈服荷载后的滞回环,数值计算得到的滞回曲线较试验值略微饱满,其原因可能为数值计算模型未能考虑钢板和混凝土之间的粘结滑移,使曲线捏拢效应减小; 同时,水平力达峰值进入下降段后,试验曲线的退化刚度较计算结果偏大,其差值在 18% 左右,其原因可能为计算模型不能考虑钢板的屈曲变形及螺栓连接破坏的影响,导致数值计算结果过高估计了剪力墙的后刚度,使其耗能增加。

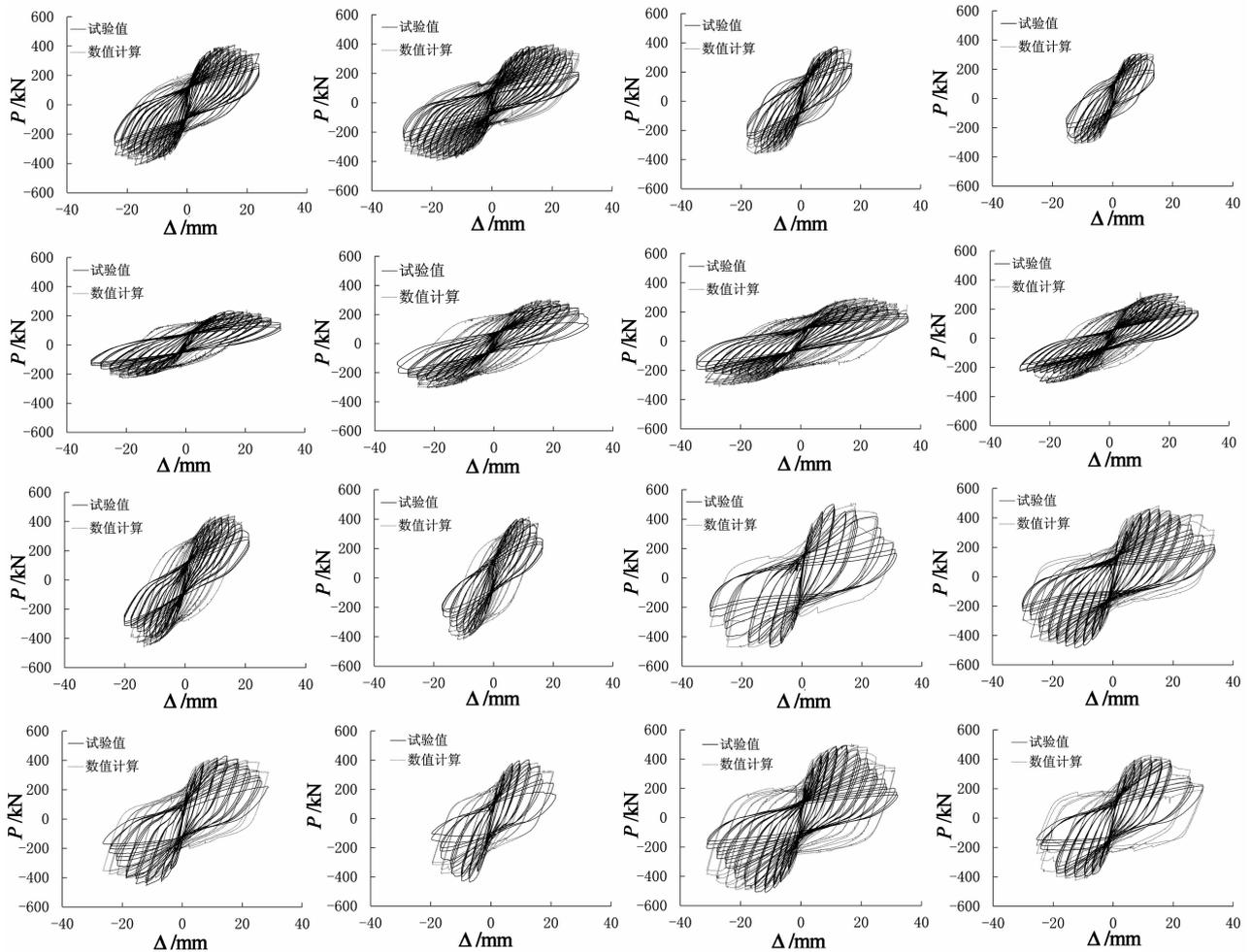
图7 荷载 $P$ -位移 $\Delta$ 滞回曲线

Fig. 7 Lateral force-displacement hysteretic loops

### 3 带约束拉杆双钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能参数分析

基于数值计算和试验结果,对带约束拉杆的双钢板-混凝土组合剪力墙进行参数分析,以得出影响该类剪力墙抗震性能的因素。

#### 3.1 高宽比的影响

以试件 SC2 参数为基础,保持轴压比及其它参数均不变,仅改变各计算模型的高宽比进行计算分析,得到各模型的滞回曲线,其骨架曲线示于图 8(a)中,图 8(b)为各模型峰值荷载  $P_u$ 、屈服荷载  $P_y$  和初始刚度  $K_0$  随高宽比变化的规律,图 8(c)为各计算模型退化刚度  $K^-$  以及位移延性  $\mu$  随高宽比变化的规律。其中,屈服荷载  $P_y$  采用 Park 法计算结果;将骨架曲线荷载下降到峰值荷载  $P_u$  的 85% 左右的荷载定义为试件的极限荷载,  $\Delta_d$  为荷载下降

到 85%  $P_u$  时对应的位移,则  $K^-$  为各计算模型达到峰值荷载后卸载至 0.85 的平均刚度,位移延性系数  $\mu$  为  $\Delta_d$  与  $\Delta_y$  的比值(下同)。

数值计算过程显示,各模型顶点水平力达峰值时,腹侧钢板及端部槽钢均发生屈曲,随着高宽比的减小,各计算模型钢板的屈曲范围增大,屈服荷载和峰值荷载逐渐增大,相应的屈服位移以及峰值荷载所对应的位移也增大。从图 8(b)可以看出,高宽比对剪力墙的初始刚度和承载力影响显著,当高宽比  $a$  从 0.5 增大到 3.0 时,各模型的峰值荷载和屈服荷载降低幅度达 70% 左右;在承载力达到峰值荷载后,各模型刚度总体上呈退化状态,高宽比从 0.5 增大到 1.0 时刚度退化最为显著,其降低幅度在 50% 左右,而高宽比从 1.0 增大到 2.5 的模型,刚度退化较小,其降低幅度在 15% 左右,可见,高宽比的减小,使剪力墙的相对耗能降低;从图 8(c)中延性系数随高宽比的变化可以看出,计算模型所计算的位

移延性系数均在 2.6 以上,延性较好,尽管随着高宽比的增大,计算模型的延性系数呈降低趋势,但从屈服以及峰值位移的绝对量来看,高宽比大的模型,其值均大于高宽比较小的模型,因此计算所得的位移延性系数值反而可能降低,但其相对比值的降低并不能表明高宽比较大的剪力墙,其延性较差。

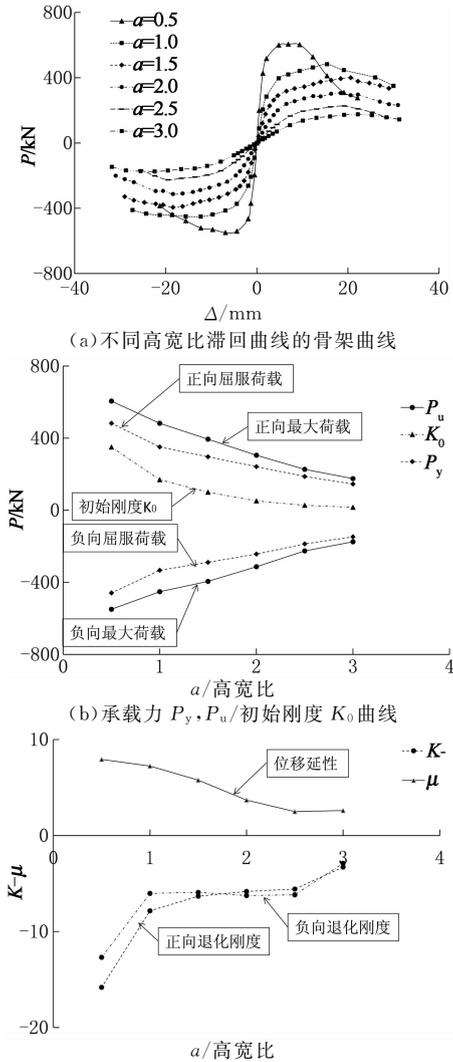


图 8 高宽比变化性能关系曲线

Fig. 8 Changes in the relationship between different aspect ratios

### 3.2 轴压比的影响

以试件 SC3 参数为基础,保持高宽比及其它参数均不变,仅改变各计算模型的轴压比进行计算分析,得到各模型的滞回曲线,其骨架曲线示于图 9 (a)中,图 9(b)为各模型峰值荷载  $P_u$ , 屈服荷载  $P_y$  和初始刚度  $K_0$  随轴压比  $n$  的变化规律,图 9(c)为各计算模型退化刚度  $K^-$  以及位移延性  $\mu$  随轴压比变化的规律。

从数值计算结果可以看出:轴压比的变化对模型

的水平承载力有一定的影响,但影响程度有限:轴压比从 0.1 增大到 0.5,增大了 4 倍,计算模型的正向峰值荷载仅增大了约 16%,负向峰值荷载仅增大了约 8%,正向屈服荷载仅增大了约 15%,负向屈服荷载仅增大了约 12%,增长较小;而从图 9(b)中可以看出,各模型的初始刚度  $K_0$  随轴压比的变化不明显,轴压比的增大对剪力墙的初始刚度影响不大.从图 9(c)各模型的退化刚度以及位移延性曲线可以看出,随着轴压比的增大,各模型的刚度退化趋势加大,位移延性也相应地降低,从其数值计算过程也可以看出,当轴压比较高时,竖向荷载作用下,剪力墙的  $P-\Delta$  效应增大,使其在达到峰值荷载后,墙体中下部变形加大,底部混凝土有压溃趋势,同时钢板面外变形加大,导致各计算模型荷载下降明显,但其位移延性系数仍在 2.5 以上,仍具有较好的变形能力,安全储备较高。

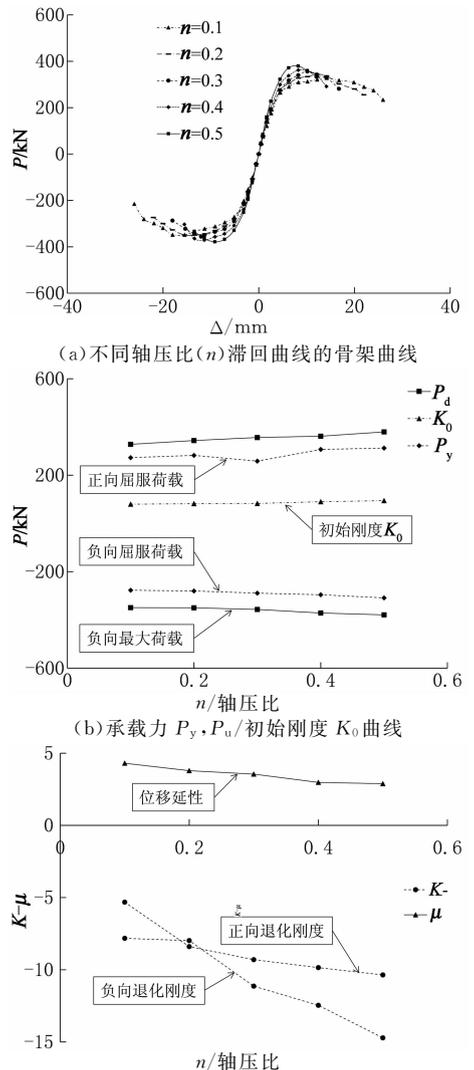


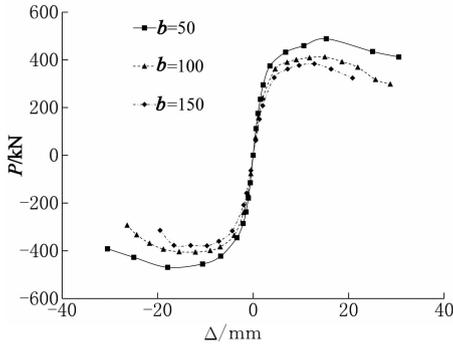
图 9 轴压比  $n$  变化关系曲线

Fig. 9 Changes in the relationship between different axial compression ratios

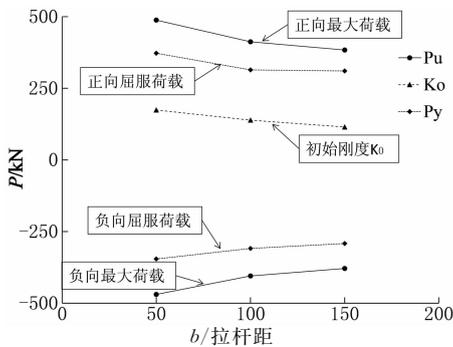
### 3.3 约束拉杆间距的影响

保持轴压比为 0.3 不变,分别考虑高宽比为 1.0 和 1.5 的剪力墙模型,在改变约束拉杆间距  $b$  时的承载力及刚度的变化趋势(拉杆间距  $b$  的变化范围为 50mm,100mm,150mm)。

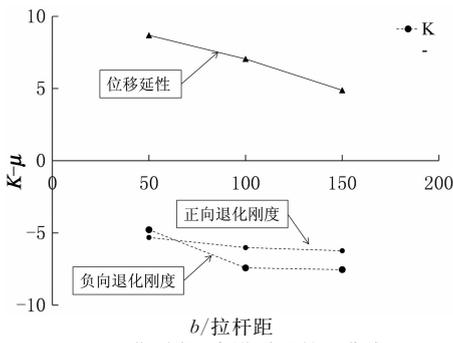
各计算模型滞回曲线的骨架曲线以及承载力、刚度等随约束拉杆间距  $b$  的变化对比结果示于图 10 和图 11 中。



(a)不同约束拉杆间距模型滞回曲线的骨架曲线



(b)承载力  $P_y, P_u$ /初始刚度  $K_0$  曲线

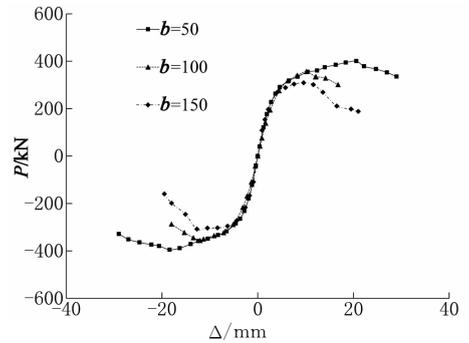


(c)退化刚度  $K'$ /位移延性  $\mu$  曲线

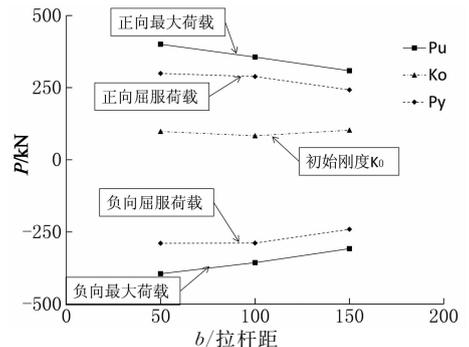
图 10 高宽比为 1.0 模型性能随拉杆间距变化关系曲线  
Fig. 10 Changes in the relationship between different binding bar spacing with 1.0 aspect ratio

从计算结果可知,各模型的承载力随约束拉杆间距的增大而减小,退化刚度随约束拉杆间距的增大而增大,位移延性随约束拉杆间距的增大而降低.对比不同高宽比两组模型的数值计算结果可以看

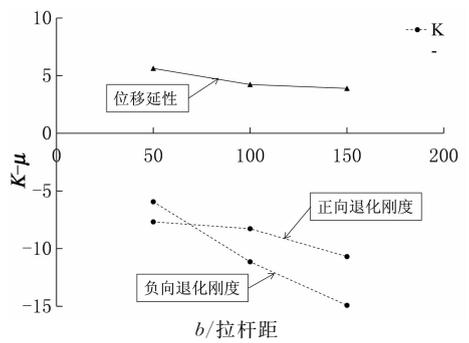
出,约束拉杆间距的增大,对高宽比为 1.5 的模型比高宽比为 1.0 的模型影响稍大:当约束拉杆间距从 50 mm 增大到 150 mm 时,高宽比为 1.5 的模型其峰值荷载和屈服荷载分别下降了约 23%和 20%,而高宽比为 1.0 的模型下降了约 19%和 16%;高宽比为 1.5 的模型达到峰值后的刚度退化趋势也较高宽比为 1.0 的模型稍大,但高宽比增大后,当约束拉杆间距从 100 mm 增大到 150 mm 时,其刚度退化减小,这可能是由于高宽比的增大,使剪力墙在水平荷载作用下的破坏模式发生了变化,结合试验以及数值模拟的过程可以发现,高宽比为 1.5 的剪力墙,其破坏时,呈现出较为明显的弯剪破坏的特征,其耗能能力较高宽比为 1.0 有所提高。



(a)不同约束拉杆间距模型滞回曲线的骨架曲线



(b)承载力  $P_y, P_u$ /初始刚度  $K_0$  曲线



(c)退化刚度  $K'$ /位移延性  $\mu$  曲线

图 11 高宽比为 1.5 模型性能随拉杆间距变化关系曲线  
Fig. 11 Changes in the relationship between different binding bar spacing with 1.5 aspect ratio

## 4 结 论

基于试验研究和 OpenSees 数值模拟,对带约束拉杆的双钢板-混凝土组合剪力墙进行了影响其抗震性能的关键参数分析,主要结论如下:

1) 试验和数值计算的过程表明,组合剪力墙中钢板对其承载力、刚度的贡献显著,随着水平力的增大,钢板分配的剪力逐渐增大,在加载的后期,剪力墙的承载力主要由钢板承担,使其仍保持较高的承载力以及较好的变形能力。

2) 高宽比是影响带约束拉杆的双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能的重要参数。随着高宽比的增大,带约束拉杆的双钢板-混凝土组合剪力的初始刚度以及屈服荷载和峰值荷载减小显著,其后期刚度退化程度也随剪力墙高宽比的增大而降低。

3) 轴压比的影响主要表现在达到峰值荷载后,剪力墙的刚度退化,轴压比较高的墙体,其刚度退化程度加大,而轴压比对剪力墙的初始刚度和承载力的影响均较小。

4) 约束拉杆间距的变化,对高宽比较大的墙体较高宽比小的墙体影响稍大,其承载力随约束拉杆间距的增大而减小,后期的刚度退化随约束拉杆间距的增大而增大。

## 参考文献

[1] 卜凡民. 双钢板-混凝土组合剪力墙的性能研究[D]. 北京:清华大学土木工程系,2007:41-102.  
BU Fan-min. Research on the performance of composite shear wall with double steel plates and infill concrete [D]. Beijing: Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 2007: 41-102. (In Chinese)

[2] 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, ASCE, 2009, 135(10): 1239-1249.

[3] WRIGHT H. The axial load behavior of composite walling [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 45(3): 353-375.

[4] CLUBLEY SIMON K, MOY STUART S J, XIAO ROBERT Y. Shear strength of steel-concrete-steel composite panels:

part I: testing and numerical modelling[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(6): 781-794.

[5] CLUBLEY SIMON K, MOY STUART S J, XIAO ROBERT 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.

[6] 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. (In Chinese)

[7] 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 and steel plate shear walls with binding bars [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(6): 93-102. (In Chinese)

[8] 罗永峰, 李健, 郭小农. 双层钢板-内填混凝土组合剪力墙滞回性能数值分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(6): 57-62.  
LUO Yong-feng, LI Jian, GUO Xiao-nong. Numerical analysis of hysteretic performance of double-steel-layer-concrete composite shear wall[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(6): 57-62. (In Chinese)

[9] 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 JIN, *et al.* An innovative application of SCS composite wall: Structural design of Yancheng TV Tower [J]. Building Structures, 2011, 41(12): 87-91. (In Chinese)

[10] 熊峰, 何涛, 周宁. 核电站双钢板混凝土剪力墙抗剪强度研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(9): 33-41.  
XIONG Feng, HE Tao, ZHOU Ning. Study on the shear strength of double steel plate composite shear wall in nuclear plant [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(9): 33-41. (In Chinese)

[11] MANSOUR M, HSU T. Behavior of reinforced concrete elements under cyclic shear. I: Experiments [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(1): 44-53.

[12] MANSOUR M, HSU T. Behavior of reinforced concrete elements under cyclic shear. II: Theoretical model [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(1): 54-65.