

竖向低周反复荷载作用下短肢剪力墙节点 滞回性能的有限元分析

李小岗, 杨晓华, 曾莹莹, 蒋国维

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 利用 ANSYS 软件建立有限元模型, 分析短肢剪力墙节点在竖向低周反复荷载作用下的耗能特性。根据所建立的有限元模型, 得到结构模型在不同轴压比下的梁端荷载-位移滞回曲线和骨架曲线。研究表明: 在一定范围内增大轴压比能提高节点的耗能能力。

关键词: 短肢剪力墙节点; 轴压比; 滞回曲线; 骨架曲线; 耗能性能

中图分类号: TU398^{+.2}

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)03-0030-07

Finite Element Analysis of the Hysteretic Behavior of Short Shear Wall Joints Under the Vertical Low Cyclic Loading

LI Xiaogang, YANG Xiaohua, ZENG Yingying, JIANG Guowei

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A finite element model established by ANSYS software is to be used for the analysis of the energy dissipation characteristics of short leg shear wall joints under vertical cyclic loading. Based on the analysis of the established finite element model, the load displacement hysteretic and skeleton curves of the structural model under different axial compression ratios can be successfully obtained. The results show that the increase of the axial compression ratio to a certain extent helps to improve the energy dissipation capacity of nodes to some degree.

Keywords: short shear wall joint; axial compression ratio; hysteretic curve; skeleton curve; dissipation capacity

1 研究背景

短肢剪力墙^[1]作为一种新型结构体系, 因具有异形柱和剪力墙的优点, 被广泛应用于高层民用住宅、商场、宾馆等建筑中。自容柏生^[2]院士提出短肢剪力墙这一新型结构体系以来, 学者们又做了大量的试验以及理论研究。学者们对短肢剪力墙结构体系的研究主要有3种情形: 短肢剪力墙单一构件、短肢剪力墙平面框架、短肢剪力墙整体结构。

黄东升等^[3]借助弹性有限元程序, 推导了反弯点的相对高度确定的理论公式。张晋等^[4]对短肢剪力墙-筒体结构模型进行了振动台试验, 验证了该结构体系具有较好的抗震性能。况建刚^[5]通过对短肢剪力墙的拟静力试验, 研究了T型短肢剪力墙端节点在低周往复荷载作用下的破坏特征。郭棣^[6]对宽肢异形柱的力学性能进行了理论分析和试验研究, 并得出了异形柱破坏形式随截面肢长宽比变化的规

收稿日期: 2017-10-08

作者简介: 李小岗(1990-), 男, 河南周口人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为短肢剪力墙结构,

E-mail: 1205089997@qq.com

律。李杰等^[7]对12根截面肢宽厚比分别为4:1、5:1和6:1的L形异形柱进行了拟静力试验,结果表明,L形异形柱由于其截面不对称,只有处于受压状态下的部分翼缘混凝土具有抵抗弯矩的作用,并指出在异形柱端部和转角处设暗柱,可以明显改善试件的抗弯性能和延性。肖良丽等^[8]对短肢剪力墙构件进行了单调荷载作用下的有限元计算,发现计算结果与试验结果吻合较好。傅剑平^[9]从整体结构中选取中间层上下柱反弯点之间梁柱节点进行拟静力试验,得出了节点构件的受力机理。卢学臣等^[10]对竖向荷载作用下短肢剪力墙结构的承载能力进行了试验研究,结果表明,在竖向荷载作用下墙肢整体受弯,连梁端部和墙板连接处为短肢剪力墙结构的薄弱区。M. Nabil等^[11]利用有限元软件建立了模型试件的非线性模型,根据试验数据与模拟数据的比对,得出了节点边界条件和配筋率的改变对节点核心区的承载能力有一定影响的结论。

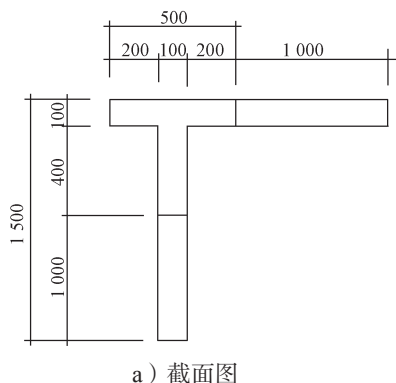
在地震作用下,短肢剪力墙节点受梁柱传来的弯矩、轴力和剪力作用,是结构体发生应力集中破坏的薄弱处。因此,本文对单一地震荷载作用下,短肢剪力墙节点进行拟静力试验,同时借助ANSYS有限元分析软件建立有限元模型^[12],研究在不同轴压比下节点的耗能性能。

2 试验概况

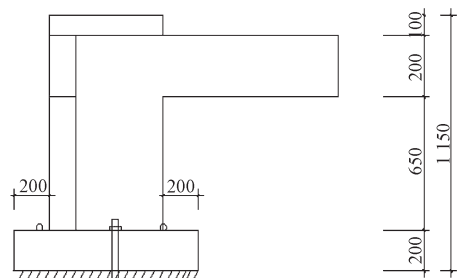
利用PKPM软件计算得到20层的短肢剪力墙框架结构民用住宅建筑,作为本试验研究的工程背景。结构的层高为3 200 mm,开间为6 000 mm,进深为6 000 mm。其角柱采用L形短肢剪力墙,中间柱采用T形短肢剪力墙。取上述民用建筑顶层节点结构,研究其耗能特性。

2.1 试验模型参数

将上述所取的节点结构按1:3的比例做成试验模型。该模型高为1 150 mm,翼缘墙截面和墙肢宽均为100 mm,模型尺寸见图1,图中单位为mm,后同。



a) 截面图

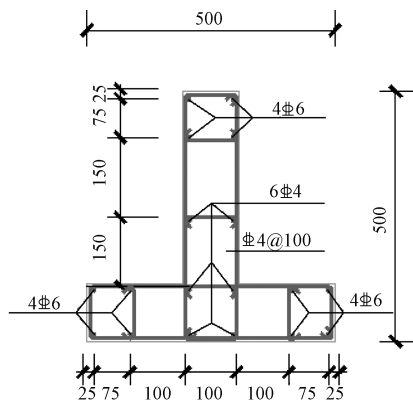


b) 立面图

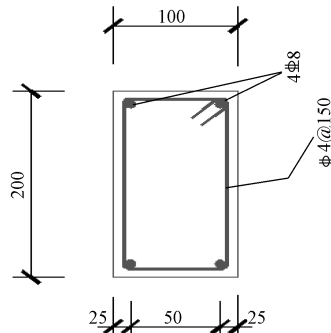
图1 模型尺寸

Fig. 1 Model dimensions

参照混凝土结构设计的规范与技术规程^[13-14]设计试验模型,并且按照1:3的相似比配筋。足尺短肢剪力墙节点结构竖向配筋为 $24\Phi 14$,钢筋面积为 $3\,693.6\text{ mm}^2$;试验模型实配竖向钢筋为 $12\Phi 6+6\Phi 4$,钢筋面积为 $1\,357.2\text{ mm}^2$ 。足尺短肢剪力墙节点结构钢筋分布为 $\Phi 10@200$,每米宽板的钢筋面积为 393 mm^2 ;模型实配钢筋分布为 $\Phi 6@200$,钢筋面积为 141 mm^2 。足尺短肢剪力墙节点结构连梁配筋为 $2\Phi 25+2\Phi 22$,钢筋面积为 $1\,742\text{ mm}^2$;模型实配连梁钢筋为 $4\Phi 8$,钢筋面积为 565 mm^2 。足尺短肢剪力墙节点结构连梁箍筋为 $\Phi 8@200$,每米宽板的钢筋面积为 251 mm^2 ;模型实配箍筋为 $\Phi 4@150$,钢筋面积为 83.8 mm^2 。模型的配筋如图2所示。



a) 短肢剪力墙



b) 连梁

图2 模型配筋图

Fig. 2 Model reinforcement diagram

2.2 测点布置

根据受力弯矩的大小,沿短肢剪力墙节点模型纵向截面高度布置纵筋应变片,以测量竖向钢筋的受力应变。根据箍筋的疏密程度,在模型腹板和翼缘板上布置适量应变片,以检测箍筋对模型的约束变形。腹板和连梁的交接处是结构发生塑性变形的部位,故在此部位对纵筋、箍筋增加测量点,增加应变片的布置。应变片的分布位置如图3所示。

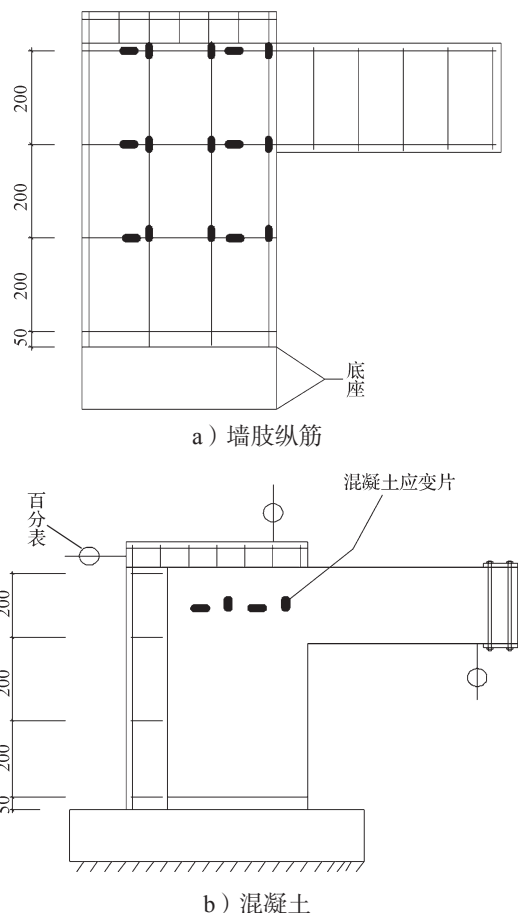


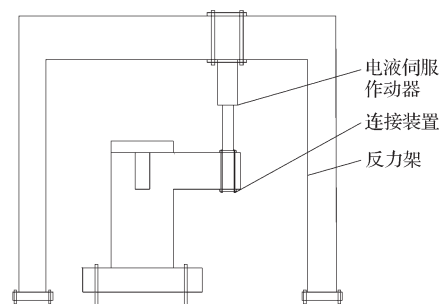
图3 模型应变片布置图

Fig. 3 Model strain sheet layout

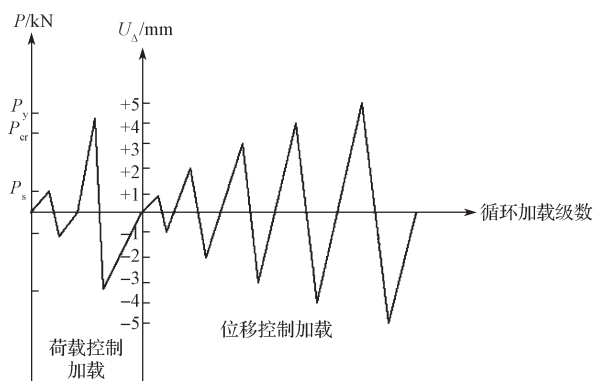
2.3 加载方式

试验加载前,在模型表面涂刷一层白浆,并在其上面绘制 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的网格,以便于对试验现象的观察。通过竖向反力循环加载装置,给模型腹板的连梁端施加低周反复荷载。先利用力控制法逐级增加正、反向荷载,且控制加载进程。在加载过程中,每级荷载峰值增加 20 kN ,并且单次循环加载,直到梁与腹板交界面出现较多明显宽裂缝后停止加载;将力控制加载改为位移控制加载,并且每级单次循环加载,直到荷载下降到极限荷载值的 80% ,试验终止。结构模型加载示意图如图4所示,图中 P 为梁端施加力荷载, P_y 为正向梁端屈服荷载, P_{cr} 为正向梁端开裂荷载, P_e 为正向预荷载, U_Δ 为

梁端施加位移荷载。



a) 加载装置



b) 加载制度

图4 结构模型加载图

Fig. 4 Structure model loading diagram

3 有限元分析模型的建立

3.1 建模原理

因试验模型的钢筋布置比较均匀,且考虑钢筋和混凝土的黏结和滑移,故对试验模型进行有限元分析时采用分离式建模。混凝土材料单元选用 SOLID 65,采用 W-W 破坏准则判别混凝土的开裂和压碎,采用 von-mises 屈服准则判别混凝土是否进入塑性变形。钢筋单元采用 LINK 8,钢筋的本构关系采用 BISO-双线性等向强化模型,弹性模量为 $2 \times 10^4\text{ MPa}$,钢筋屈服强度为 300 N/mm^2 ,泊松比为 0.30 。混凝土本构关系采用 MISO-多线性等向强化模型,泊松比为 0.23 。节点结构模型采用 ANSYS 内部设定的 8 节点六面体映射划分结构网格,考虑大变形效应,关闭混凝土压碎计算程序,从而减少计算分析程序。

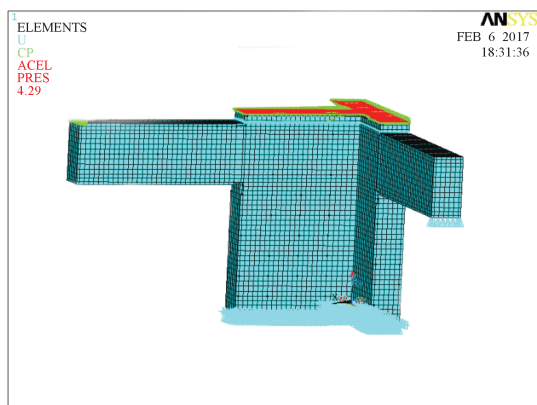
3.2 边界条件

在整体楼层结构中,短肢剪力墙的上下两个反弯点截面受到平面内刚度极大的楼层板的约束,其截面变形主要为竖向压缩和横向的相对侧移。竖向荷载作用引起的压缩变形和应力符合平截面的假定,属于静力平衡问题,而上下两个反弯点截面的相对侧移最能反映模型结构的实际工作状况。所以,将

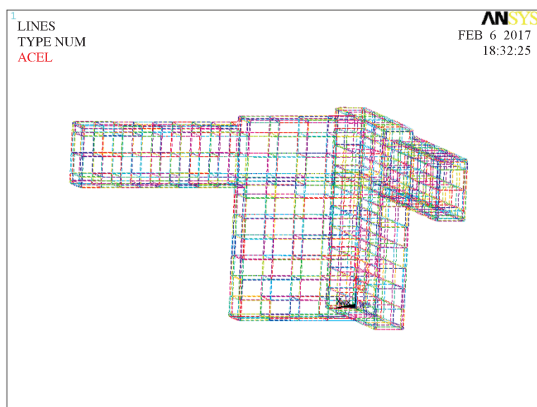
结构复杂的力学边界条件用位移边界条件代替,在短肢剪力墙下端截面施加完全约束,上端截面根据轴压比大小施加均布轴向压力。翼缘板连梁末端施加 UX 、 UY 、 UZ 3 个方向的约束,腹板连梁端作为加载端无施加约束。

3.3 有限元模型

按照足尺短肢剪力墙节点结构实际尺寸,采用分离式法建立有限元模型,如图 5 所示。计算时单元边长取为 50 mm,子步数取 300。根据工程实际情况对有限元模型墙肢底部截面所有节点施加固定约束,对与翼缘板相连的梁端截面上的节点施加 3 个方向上的位移约束;然后在与腹板交接的连梁端施加逐级增加的循环往复竖向集中荷载。



a) 混凝土单元



b) 钢筋单元

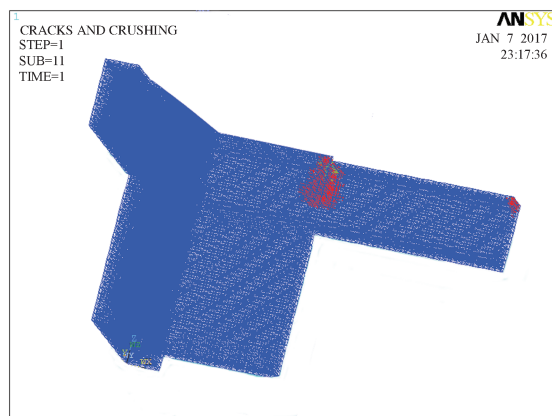
图 5 钢筋混凝土结构有限元模型

Fig. 5 Finite element model of reinforced concrete structure

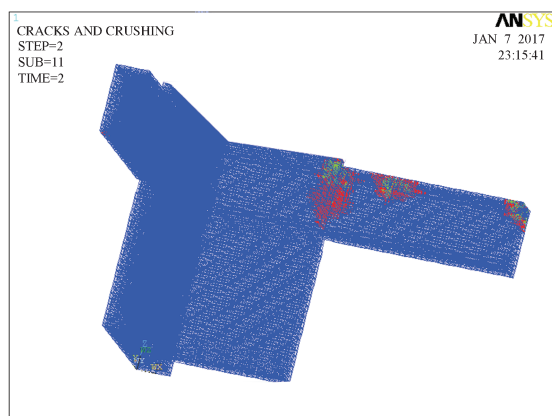
4 有限元计算结果分析

4.1 裂缝发展过程分析

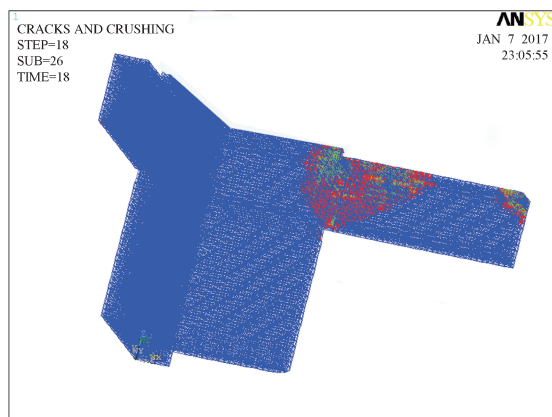
结构模型在不同荷载作用下的裂缝发展云图如图 6 所示。从图中明显发现, T 形短肢剪力墙腹板与连梁的交接点处,在竖向荷载作用下发生弯剪变形而出现裂缝。最早的裂缝标为红色,第二次产生的裂缝标为绿色。



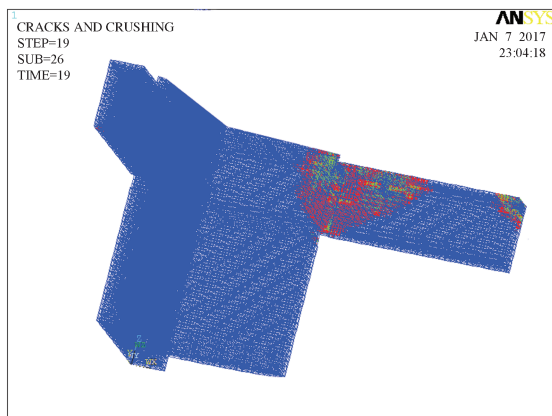
a) 初始裂缝



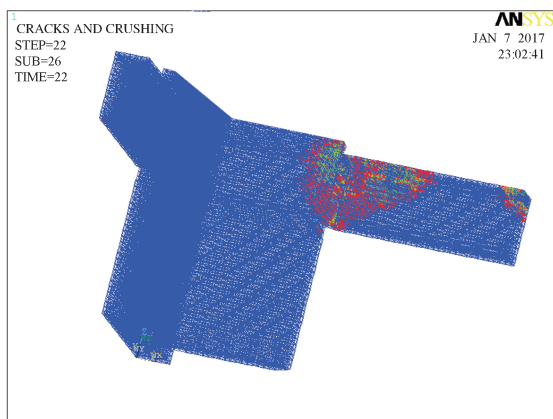
b) 发展裂缝



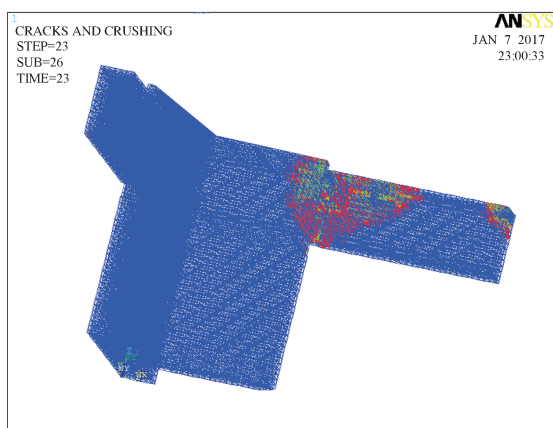
c) 横向延伸裂缝



d) 塑性铰区裂缝



e) 极限裂缝



f) 破坏裂缝

图6 模型裂缝云图

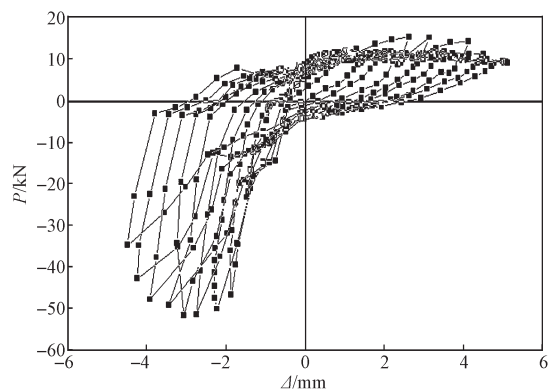
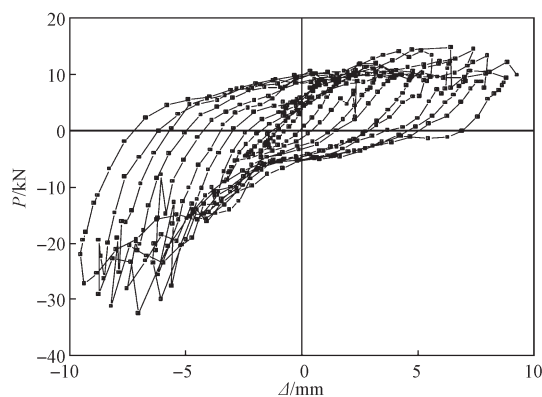
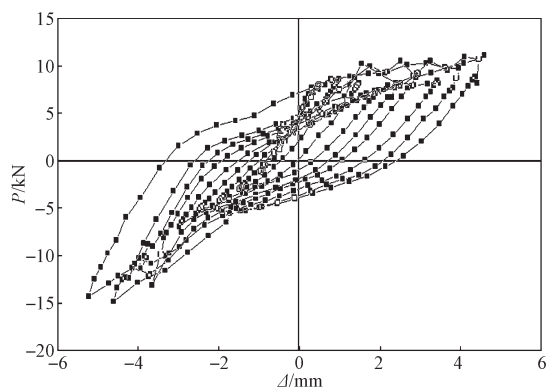
Fig. 6 Model fracture nephogram

如图 6a、b 所示,短肢剪力墙节点的连梁端部是受力弯矩最大处,当荷载达到混凝土开裂强度时,出现许多横向发展的细密斜裂缝。随着竖向荷载的增加,横向斜裂缝逐渐变长、变宽,形成一个塑性变形区域,即塑性铰区,如图 c 所示。随着短肢剪力墙节点核心区受剪承载力的增大,节点核心区表面的斜裂缝开始沿腹板向翼缘板侧面纵向发展,裂缝长度缓慢增加,而宽度和深度逐渐增大,塑性铰区的范围扩大,塑性转角也不断增大,如图 d 所示。当继续增大竖向荷载时,节点核心区斜裂缝逐渐向腹板内部交叉延伸,腹板表面形成了明显的斜向交叉裂缝,如图 e 所示。随着塑性铰区的扩大,新的纵向裂缝在初始裂缝上部墙肢表面出现,裂缝的长度增加并且出现位置的高度不断向墙肢顶部靠近,如图 f 所示。可见,在腹板梁端达到塑性破坏之前,节点核心区的钢筋屈服变形随加载级别的增加而增大,箍筋的约束强度将达到极大值,使得钢筋与混凝土间的销接作用被破坏,裂缝间的受拉钢筋应变趋于均匀变化。

4.2 滞回效应分析

在地震作用下,短肢剪力墙节点核心区受到梁柱

传来的弯矩、剪力和轴力作用,受力状态比较复杂,节点核心区通过塑性铰区对梁提供支承和约束,节点核心区的应力变形损伤程度也直接影响梁端的滞回性能。因此,可以通过短肢剪力墙墙肢与梁的组合体来研究其节点的耗能性能。短肢剪力墙节点核心区在梁端施加的竖向低周反复荷载作用下,其受力变形与破坏过程可划分为初裂阶段、通裂阶段、极限阶段和破坏阶段^[15]。由于影响短肢剪力墙节点的因素比较多,本文对同组结构模型在配筋率、肢厚比、混凝土强度一定的条件下,研究不同的轴压比 u 对短肢剪力墙节点耗能性能的影响。图 7 为同组结构模型在轴压比分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 下的梁端荷载(P)—位移(Δ)滞回曲线。

a) $u=0.1$ b) $u=0.2$ c) $u=0.3$

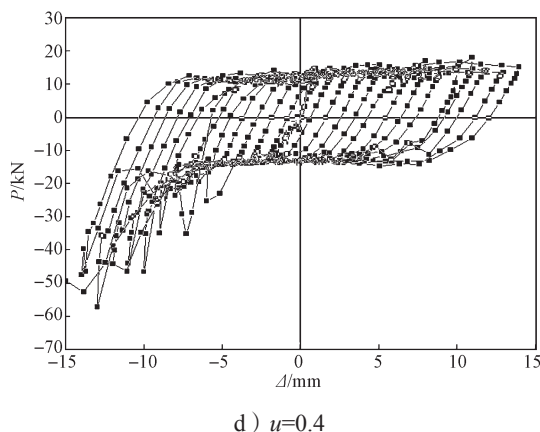


图7 不同轴压比下的荷载-位移滞回曲线

Fig. 7 Load displacement hysteretic curves under different axial compression ratios

由图7可知,反复加载的前3个循环,其滞回曲线几乎呈直线变化。这表明节点核心区处于弹性工作状态,并且滞回曲线所围的面积很小,说明此时的结构耗能能力较小,结构的刚度退化很小。增大循环级数,滞回曲线呈捏缩形状,这说明节点核心区进入通裂阶段,内部斜裂缝扩展延伸;滞回曲线所围的面积较大,耗能能力较好,刚度退化比率增大。后期循环加载中,滞回曲线进一步过渡到S型,节点核心区发生剪切变形,内部产生很多交叉裂缝,并且梁中纵筋出现明显的黏结滑移现象。

4.3 骨架曲线分析

图8是轴压比 u 分别为0.1, 0.2, 0.3, 0.4时结构模型的梁端荷载-位移骨架曲线。

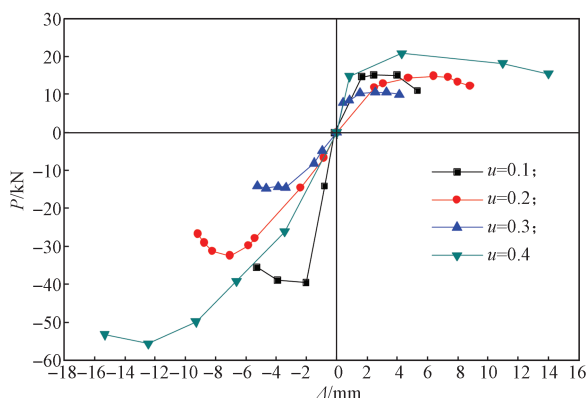


图8 不同轴压比下的荷载-位移骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curves of load-displacement under different axial compression ratios

对比图8中的荷载-位移骨架曲线可以发现,随着轴压比的增大,曲线的斜率增大,其所对应的滞回环更饱满,结构的耗能性能更好。但当荷载 P 增大到一定值时,曲线的斜率增加不明显,这一结果表

明,增大轴压比可以在一定程度上提高短肢剪力墙节点的耗能性能。

5 结论

综上所述,可得以下结论:

- 1) 有限元分析结果表明,随着轴压比的增大,结构模型的梁端荷载-位移滞回曲线越饱满,这说明增大轴压比能够提高结构的耗能性能。
- 2) 结构模型的骨架曲线分析表明,在一定取值范围内,增大轴压比能提高结构的耗能性能,但超出该范围反而会降低结构的耗能性能。

参考文献:

- [1] 蒋国维, 杨晓华, 曾莹莹, 等. 短肢剪力墙节点扭转性能的有限元分析[J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(2): 1-7.
JIANG Guowei, YANG Xiaohua, ZENG Yingying, et al. Finite Element Analysis of Torsion Performance of Short-Leg Shear Wall Joints[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(2): 1-7.
- [2] 容柏生. 高层住宅建筑中的短肢剪力墙结构体系[J]. 建筑结构学报, 1997, 18(6): 14-19.
RONG Baisheng. Short-Leg Shear Wall Structural System Used in Tall Residential Buildings[J]. Journal of Building Structures, 1997, 18(6): 14-19.
- [3] 黄东升, 程文灏, 彭飞. 对称双肢短肢剪力墙的低周反复荷载试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 51-56.
HUANG Dongsheng, CHENG Wenrang, PENG Fei. Low-Cycle Loading Experiment Study on Symmetric Double Pier-Shear Walls[J]. Journal of Building Structure, 2005, 26(3): 51-56.
- [4] 张晋, 吕志涛. 短肢剪力墙-筒体结构模型振动台试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(6): 4-8.
ZHANG Jin, Lü Zhitao. Earthquake Simulation Test of Short-Leg Shear Wall-Tube Model[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2001, 31(6): 4-8.
- [5] 况建刚. T型短肢剪力墙中间层端节点抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
KUANG Jiangang. Experimental Research on Seismic Behavior of Exterior Joints of T-Shaped Short Pier Shear Walls[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [6] 郭棣. 宽肢异形柱的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2001.

- GUO Di. Experiment Study on the Broad-Limb Special-Shaped Columns[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2001.
- [7] 李杰, 吴建营, 周德源, 等. L形和Z形宽肢异形柱低周反复荷载试验研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 9-15.
- LI Jie, WU Jianying, ZHOU Deyuan, et al. Experimental Research on Wide Flange Specially Shaped Section Columns Subjected to Cyclic Loading[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 9-15.
- [8] 肖良丽, 陈萌, 孟会英. ANSYS分析短肢剪力墙抗震性能[J]. 世界地震工程, 2007, 23(2): 171-175.
- XIAO Liangli, CHEN Meng, MENG Huiying. ANSYS Analysis of Earthquake-Resistant Behavior of Short Limbed Walls[J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(2): 171-175.
- [9] 傅剑平. 钢筋混凝土框架节点抗震性能与设计方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- FU Jianping. Seismic Behavior and Design of Joints in a Reinforced Concrete Frame[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.
- [10] 卢学臣, 杨晓华, 周磊. 竖向荷载作用下短肢剪力墙结构承载能力试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(3): 6-11.
- LU Xuechen, YANG Xiaohua, ZHOU Lei. Experimental Research on Bearing Behavior of Short Limb Shear Wall Structures Under Vertical Load[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2017, 31(3): 6-11.
- [11] NABIL M, HAMDY O, ABOBEAH A. Affecting Aspects on the Behaviour of Frame Joints[J]. HBRC Journal, 2016, 12(2): 147-162.
- [12] 曾莹莹, 杨晓华, 蒋国维, 等. 短肢剪力墙节点推覆力模拟分析[J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(1): 22-28.
- ZENG Yingying, YANG Xiaohua, JIANG Guowei, et al. Simulation Analysis of the Thrust Force of Short-Pier Shear Wall Joints[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(1): 22-28.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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: 35.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010: 35.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 80.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Concrete Structures of Tall Buildings: JGJ 3—2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010: 80.
- [15] 赵国藩. 高等钢筋混凝土结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 380-413.
- ZHAO Guofan. High Reinforced Concrete Structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 380-413.

(责任编辑: 邓光辉)