

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.01.005

短肢剪力墙节点推覆力模拟分析

曾莹莹, 杨晓华, 蒋国维, 李小岗

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 通过改变短肢剪力墙节点模型的轴压比, 利用 ANSYS 软件对其节点做推覆力分析。通过 5 组(轴压比分别为: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5) 节点模拟实验, 对比分析各轴压比下节点的耗能性能、刚度退化、裂缝的发展、极限承载力、极限承载力下对应的极限位移、延性等的变化规律。研究表明: 反向加载时裂缝的发展速度远大于正向加载时裂缝的发展速度; 连梁与墙肢交接处为其薄弱环节; 轴压比在 0.3 左右时节点的耗能性质最优, 极限承载力、极限位移最大, 抗震性能最好。

关键词: 短肢剪力墙; 裂缝; 轴压比

中图分类号: TU398⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)01-0022-07

Simulation Analysis of the Thrust Force of Short-Pier Shear Wall Joints

ZENG Yingying, YANG Xiaohua, JIANG Guowei, LI Xiaogang

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

Abstract: By changing the axial compression ratio of the model of short-pier shear wall joints, the ANSYS software has been used to analyze the thrust force of the joints. Based on the simulation experiment on 5 groups of nodes (with an axial compression ratio of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 respectively), a comparative analysis has been made of the change patterns of the energy consumption performance, stiffness degradation, crack development, ultimate bearing capacity, ultimate displacement and ductility of the joints under different axial compression ratios. The research shows that the development speed of cracks under reverse loading is far greater than that under forward loading; the shear wall joint is the weak link of the whole process; the optimal energy dissipation of nodes can be achieved with 0.3 being the axial compression ratio, where the ultimate bearing capacity and the ultimate displacement reach their maximums with the best seismic performance.

Keywords: short-pier shear wall; crack; axial compression ratio

1 研究背景

短肢剪力墙结构是一种常见的结构形式, 它本身布置灵活, 建筑功能良好, 其应用可减轻结构自重、降低建设成本, 但其本身的抗震性能存在优劣的争议, 限制了其在抗震设防较高地区的推广和使用。这种结构体系并不是一种新型的结构体系, 它早在

1997年由荣柏生院士^[1]提出, 是剪力墙结构体系的一种。在《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2010)^[2]中将墙肢厚度不超过 300 mm, 肢厚比在 4~8 之间的剪力墙定义为短肢剪力墙结构。

近年来国内很多学者对剪力墙结构做出了大量的研究, 对短肢剪力墙结构体系同样进行了很多研究与分析。杨晓华等^[3]对三层短肢剪力墙空间结构

收稿日期: 2017-04-21

作者简介: 曾莹莹(1990-), 男, 河南永城人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为混凝土结构设计原理,

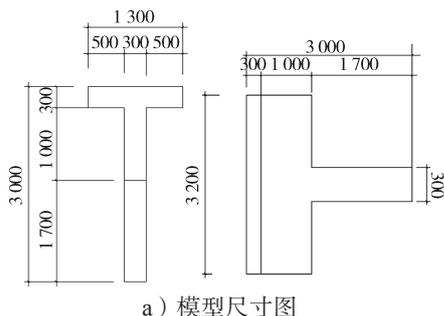
E-mail: 17166867304@qq.com

施加偏心荷载,进行了结构的扭转分析。程文灏等^[4]提出应用截面高度限值来判别对称双肢短肢剪力墙的方法。黄东升等^[5-6]应用有限元程序对结构体系施加倒三角形水平荷载、均布荷载,确定结构整体变形反弯点,判定结构为弯剪型还是强肢弱梁型。李青宁等^[7]在考虑轴压比、高厚比等情况下制作了14个短肢剪力墙试件(6个L型短肢剪力墙试件、6个T型短肢剪力墙试件和2个T型普通剪力墙试件),观察了这些试件从受力到屈服、破坏的整个过程,详细描述了短肢剪力墙的破坏特征和耗能性质。周云等^[8]制作了9片一字型短肢剪力墙(6片不同轴压比试件、3片不同配筋方式试件),通过实验研究提出:一字型短肢剪力墙设计一般应采用带暗柱及X型交叉配筋,并且严格控制轴压比限制。很多学者对短肢剪力墙结构进行研究,主要集中在墙肢、连梁和板组合体在竖向荷载作用下的承载能力等方面的研究,而对墙肢节点在水平地震荷载作用下的抗震性能研究较少。所以,研究短肢剪力墙墙肢节点在水平地震荷载作用下的抗震性能,可为其在实际工程中的应用提供更加充分的依据。

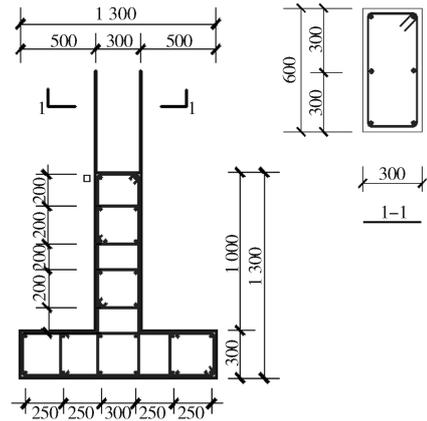
2 有限元模型的建立

2.1 有限元模型的设计

T型短肢剪力墙节点试件取自4跨20层短肢剪力墙中间跨(第3轴),第15层短肢剪力墙的上下反弯点处,连梁取自15层3轴处的连梁反弯点处,第15层的配筋,4跨20层短肢剪力墙的开间和进深都为6000mm,层高为3200mm。设计比例为1:1,试件高度为3200mm,翼缘墙截面和墙肢厚度均为300mm,翼缘截面和墙肢的宽度为1300mm,试件的模型尺寸如图1a所示。钢筋等级全部采用HRB400级,短肢剪力墙的墙肢和翼缘的竖向分布钢筋配置22根直径为14mm的钢筋;墙肢和翼缘的箍筋均采用直径为14mm间距为200mm的钢筋,连梁的受力钢筋配置4根直径为25mm的钢筋,架立筋采用2根12mm的钢筋,连梁箍筋间距200mm,直径为12mm,试件的配筋详图如图1b所示。混凝土的强度等级为C30。



a) 模型尺寸图



b) 配筋图

图1 模型尺寸及配筋图

Fig. 1 Illustration of the model sizes and reinforcement

2.2 材料的性质

本文模型设计中的材料均采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[9]规定的强度设计值。混凝土立方体的抗压强度标准值 $f_{cu,k}=30$ MPa,单轴抗压强度 $f_c=14.3$ MPa,单轴抗拉强度 $f_t=1.43$ MPa,张开裂缝的剪力传递系数 $\beta_s=0.5$,闭合裂缝的剪力传递系数 $\beta_c=0.95$,弹性模量 $E_c=30\ 000$ MPa,泊松比 $\nu_c=0.2$,拉力应力系数采用缺省值 $T_c=0.6$ 。混凝土单轴应力应变关系上升段采用GB 50010—2010规定的公式,而单轴应力应变关系下降段则采用Hognestad的处理方法,即:

当 $\varepsilon_c \leq \varepsilon_0$ 时,

$$\sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n \right];$$

当 $\varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$ 时,

$$\sigma_c = f_c \left[1 - 0.15 \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_0} \right) \right].$$

式中: σ_c 为混凝土压应力;

ε_c 为混凝土压应变;

f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值;

ε_0 为混凝土压力达到 f_c 的压应变;

ε_{cu} 为正截面混凝土极限压应变;

n 为系数。

由规范中的公式求得 $n=2$, $\varepsilon_0=0.002$, $\varepsilon_{cu}=0.0033$,应用一系列数据点拟合,采用多线性等向强化模型(multilinear isotropic, MISC)模拟。图2所示为混凝土应力应变关系曲线。

实验中,钢筋屈服强度 $f_y=300$ MPa,弹性模量 $E_s=200\ 000$ MPa,泊松比 $\nu_s=0.3$ 。采用双线性等向强化模型(bilinear isotropic, BISO)模拟。

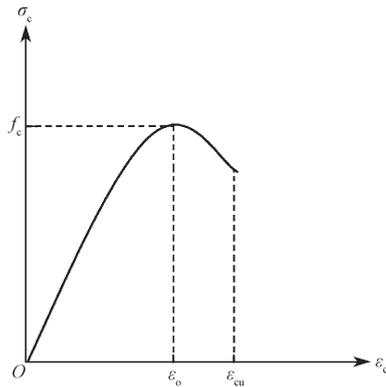


图2 混凝土应力应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of the concrete

2.3 建立有限元模型

课题组利用有限元分析软件 ANSYS 建立分离式有限元模型，分别建立了钢筋和混凝土的分析单元，钢筋网格和混凝土网格如图 3~4 所示。

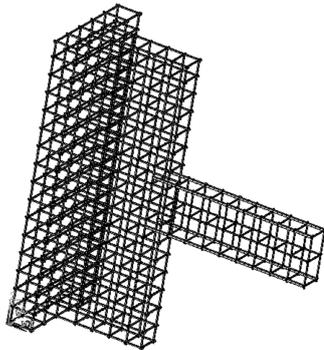


图3 钢筋网格

Fig. 3 Steel grids

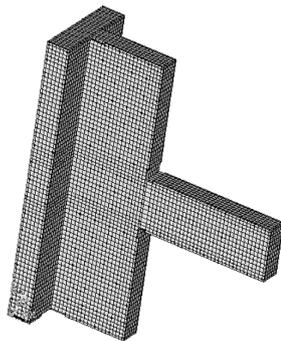


图4 混凝土网格

Fig. 4 Concrete grids

模型中，钢筋采用的是 Link8 单元，混凝土采用 Solid65 单元进行模拟，不考虑混凝土和钢筋之间的粘结滑移。因本模型取自 20 短肢剪力墙结构的第 15 层和第 14 层的上下反弯点处，连梁取跨中反弯点处，其受力的力学简图如图 5 所示。因此对本模型底端施加铰支座约束，限制其位移，不限制其转角。在本模型连梁的端部施加竖向约束，只限制竖向位移，不限制水平位移和转角。对短肢剪力墙节点的顶部施加正

负两方向的位移，并且控制位移的大小呈递增形式，对本模型做推覆力的分析。

课题组根据不同的轴压比建立了 5 组对比模型，对比模型的轴压比分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5。

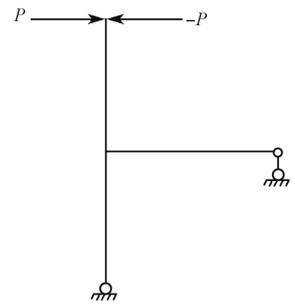


图5 受力简图

Fig. 5 A diagram of forces

3 计算结果

课题组共建立了 5 组不同轴压比下的模型，通过模型模拟计算并分析最后得到的数据，可以得到不同轴压比下的滞回曲线和骨架曲线，以及后处理得到的短肢剪力墙节点的裂缝图，由此来分析模型节点在水平地震荷载作用下的耗能性质、延性及其破坏形式。通过裂缝的不断发展情况，分析节点的薄弱处以及不同轴压比对裂缝发展的影响。

3.1 模型裂缝分析

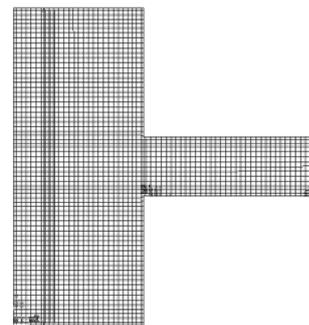
3.1.1 同轴压比下裂缝的分析

本模型在下部底面施加铰接力，而在连梁的端部施加竖向荷载，并且不限制其水平运动。当在模型的顶端施加侧向位移后，在节点与连梁的交接处形成弯矩，连梁的端部受到竖向挤压，可使本模型形成如图 6 所示的裂缝。各图所受轴压比及位移值的大小如表 1 所示。

表 1 各图轴压比及位移值

Table 1 Axial compression ratio and its corresponding displacement value in each diagram

图名	轴压比	顶点位移 (正值正向、负值反向) /cm
6a	0.3	1.5
6b	0.3	-1.5
6c	0.3	3.0
6d	0.3	-3.0
6e	0.2	7.0
6f	0.3	7.0
6g	0.4	7.0



a) 轴压比为 0.3 下正向加载 1.5 cm

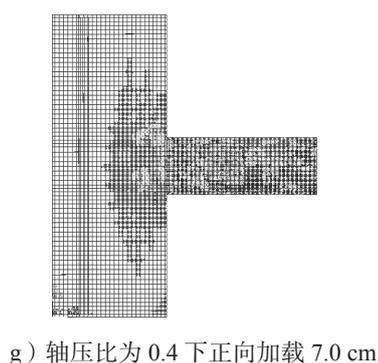
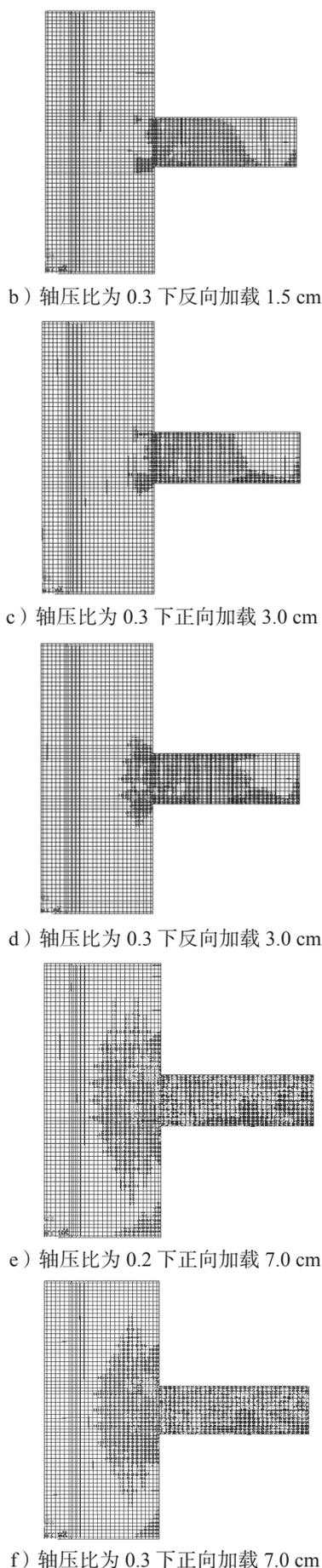


图6 不同轴压比下裂缝图

Fig. 6 Cracks under different axial compression ratios

当施加正向推覆位移(轴压比为 0.3, 正向加载 1.5 cm)时, 裂缝的开展如图 6a 所示, 节点以及连梁的上部受压, 混凝土抗压性能较好, 上部无裂缝出现; 墙肢与连梁交接的节点处, 下部受弯矩力作用出现了裂缝, 同时, 连梁的端部受竖向约束, 在连梁的端部有应力集中因而出现裂缝。当反向施加位移(轴压比为 0.3, 反向加载 1.5 cm)时, 裂缝发展图如图 6b 所示, 反向施加位移连梁受拉, 节点及连梁上的裂缝明显增多。

对比图 6a、6b 两裂缝图可以得知, 相同轴压比(轴压比为 0.3)下, 正反两方向施加 1.5 cm 位移。施加正向位移时, 裂缝集中在节点下部及梁端处; 而施加反向加载位移时, 节点处裂缝明显增多, 且裂缝大多出现在连梁上, 梁与短肢剪力墙交接处的墙肢下部裂缝比上部裂缝多。对比图 6c 和图 6d(轴压比为 0.3 时, 正反方向施加 3 cm 位移), 裂缝均进一步发展。正向加载位移时(图 6c), 节点处的墙肢下部及连梁下部裂缝都较上部裂缝发展得明显。当反向加载位移时(图 6d), 节点处墙肢及连梁上的裂缝都发展明显, 比图 6c 的裂缝发展明显。对比图 6b 与图 6c: 同轴压比(轴压比为 0.3)下, 先施加负向位移为 1.5 cm 得到图 6b, 在施加正向位移 3.0 cm 得到图 6c。两图相比, 图 6c 的裂缝进一步发展, 但不是特别明显。

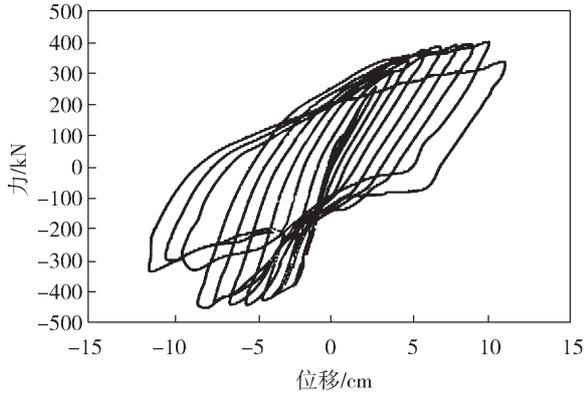
由图 6a 与图 6b, 图 6c 与图 6d 及图 6b 与图 6c 的对比结果可知, 施加负向位移比施加正向位移时裂缝发展得更明显。

3.1.2 不同轴压比下裂缝的分析

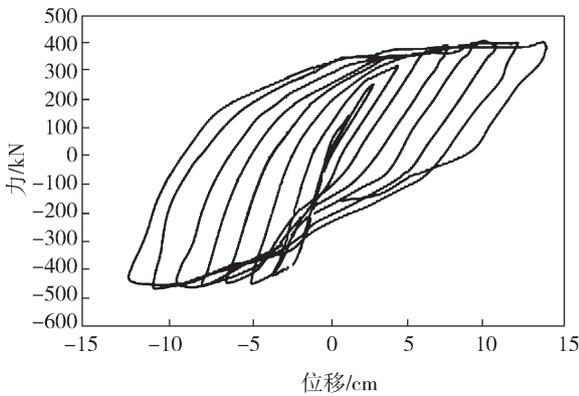
对模型试件施加 7.0 cm 的位移时, 模型节点已经进入屈服状态, 模型节点的轴压比分别为 0.2, 0.3, 0.4 时的裂缝图, 如图 6e、6f、6g 所示。对比模型裂缝的发展可以发现, 模型节点的上部在轴压比为 0.3 时, 裂缝开展的面积小于轴压比为 0.2 和 0.4 时的裂缝面积, 而连梁上裂缝的发展基本相同。以上实验结果表明, 轴压比的改变对节点处墙肢的承载力有影响, 而对连梁的影响不大。

3.2 各轴压比下的滞回曲线分析

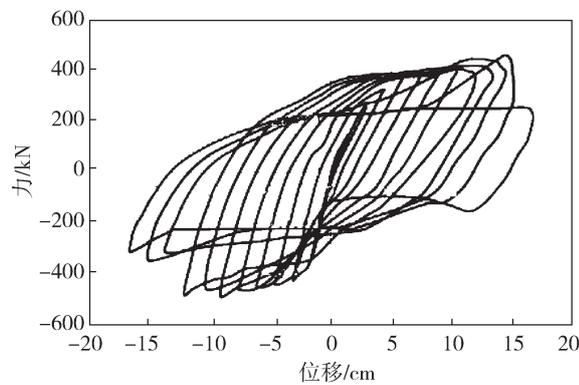
各轴压比下的滞回曲线如图7所示。



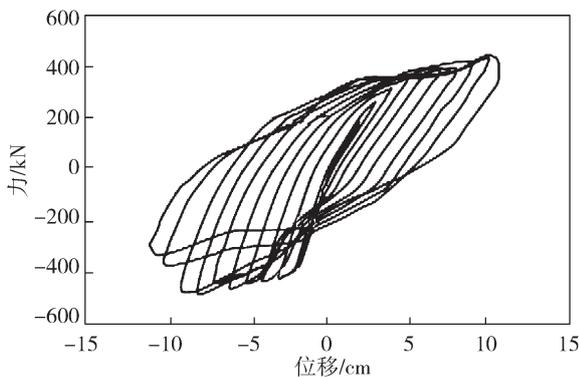
a) 0.1



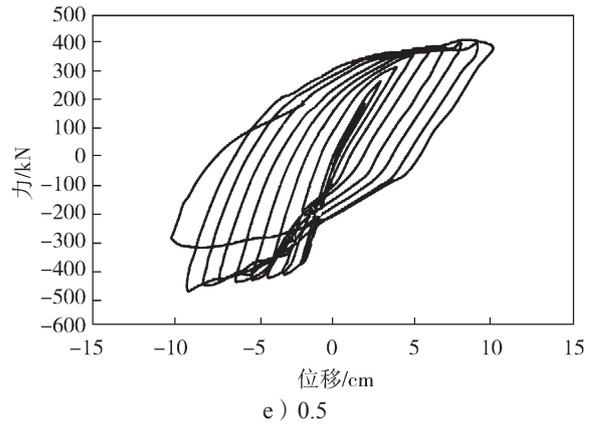
b) 0.2



c) 0.3



d) 0.4



e) 0.5

图7 不同轴压比下滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis loops of different axial compression ratios

从各轴压比下滞回曲线的饱满程度来看，轴压比为0.3的滞回曲线（图7c）相对饱满，其耗能能力比其他轴压比下的能力强。分析其原因，随着轴压比由0.1提高到0.3，节点受到的竖向轴力增大，竖向轴力的增大延迟了混凝土裂缝的发展，提高了耗能性质。但并不是轴压比越大，其耗能能力越强，轴压比由0.3提高到0.5，轴压比为0.3的滞回曲线（图7c）要比轴压比为0.4, 0.5（图7d、图7e）相对饱满。原因是轴压比过大使节点的刚度增大，延性减小，节点的耗能能力降低。由此可知轴压比为0.3的节点比其它节点耗能性质较强。

3.3 骨架曲线对比分析

各轴压比下的节点骨架曲线对比如图8所示。图中，“zyb-0.1、zyb-0.2、zyb-0.3、zyb-0.4、zyb-0.5”表示在轴压比分别为0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5下的骨架曲线。

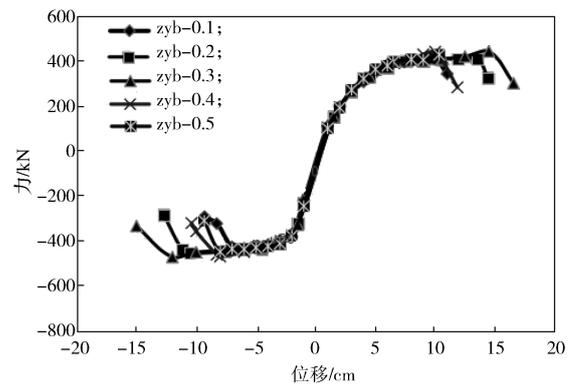


图8 不同轴压比下节点骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curves under different axial compression ratios

取极限承载力和极限承载力下对应的位移值进行分析，并以轴压比为0.3的极限承载力和其对应的位移为基数做对比，对比结果列于表2。

表2 轴压比不同对节点承载力及位移的影响

Table 2 Influence of axial compression ratios on the bearing capacity and displacement of joints

轴压比	极限承载力		极限力下 位移/cm	力相对值	位移相对值
	方向	大小/N			
0.1	正向	408 079	10.00	0.92	0.69
	反向	-447 213	-5.00	0.92	0.41
0.2	正向	404 215	9.86	0.93	0.68
	反向	-454 646	-7.62	0.95	0.63
0.3	正向	438 507	14.49	1.00	1.00
	反向	-485 950	-12.00	1.00	1.00
0.4	正向	436 598	10.00	0.99	0.69
	反向	-483 227	-8.00	0.99	0.67
0.5	正向	423 147	10.32	0.96	0.71
	反向	-462 109	-8.00	0.96	0.67

由图8中的骨架曲线的对比可知, 改变轴压比对提高节点的水平方向极限承载能力有限, 但对极限承载能力下对应的位移有很大的影响。分析表2中的对比数据可知, 轴压比由0.1增加到0.3时, 正、反向水平极限承载力增加8%, 正向水平位移增加31%, 反向水平位移增加59%。表明轴压比增加到0.3时, 对极限承载力的提高有限, 但是对水平方向位移有显著的增加。但当轴压比由0.3增加到0.5时, 极限承载力正向降低4%, 反向降低5%; 水平位移正向降低29%, 反向降低33%。由此可知轴压比为0.3时, 节点的极限水平承载能力和对应的水平方向位移都为最大, 节点的水平抵抗能力和延性都较优, 其耗能性质比其他轴压比下强。

3.4 刚度退化分析

对节点施加水平往复荷载, 节点的刚度随着荷载的施加而逐渐减小叫做刚度退化。试件的刚度可用割线刚度来表示, 割线刚度 K_i 按下式计算^[10]:

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|},$$

式中: $+F_i$ 、 $-F_i$ 为第 i 次正、反向峰值点的荷载值;
 $+X_i$ 、 $-X_i$ 为第 i 次正、反向峰值点的位移值。

由以上公式计算各轴压比下的割线刚度, 将计算结果绘制于图9, 图中“zyb-0.1、zyb-0.2、zyb-0.3、zyb-0.4、zyb-0.5”表示在轴压比分别为0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5下的割线刚度曲线。

由图9所示刚度退化曲线可知, 对节点顶部施加的位移小于60 mm时, 即施加的力小于节点的屈服值时, 轴压比的变化对刚度的退化基本无影响; 当加载位移大于70 mm时, 使各轴压比下的模型节点达到屈服时, 刚度退化的速度明显不同; 轴压比为0.3时的刚度退化较慢, 该轴压比下结构的耗能能力强于其他轴压比下的耗能能力, 也表明轴压比为0.3的节点模型的延性强于其他轴压比下的延性。

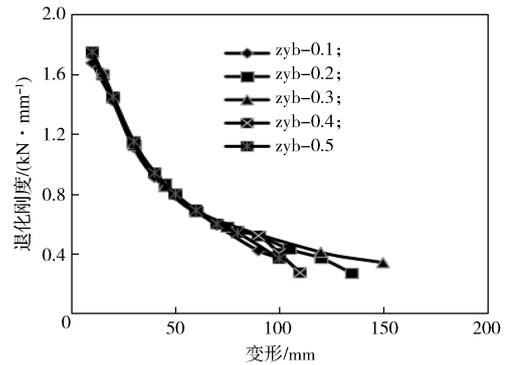


图9 刚度退化曲线

Fig. 9 Stiffness degradation curves

4 结论

课题组通过改变轴压比对短肢剪力墙节点做有限元分析, 通过研究节点裂缝的发展、各轴压比下的滞回曲线以及骨架曲线、对刚度退化的计算等, 进一步分析了节点的耗能性质、刚度、延性、抗震性能等的变化, 得出如下结论:

- 1) 轴压比的变化对短肢剪力墙节点破坏时极限水平位移的影响明显;
- 2) 轴压比不是越大就对短肢剪力墙节点的耗能性质越有利, 而是在轴压比为0.3左右时节点的极限承载力和极限水平位移都最大, 节点的耗能性能最优, 最有利于节点的抗震;
- 3) 反向加载节点裂缝的发展速度远大于正向加载时的节点裂缝的发展速度。且连梁与墙肢交接处裂缝发展较快, 为短肢剪力墙节点的薄弱处。

参考文献:

- [1] 荣柏生. 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.
- [2] 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: JGJ3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 79.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building: JGJ3—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 79.
- [3] 杨晓华, 周磊, 卢学臣. 短肢剪力墙结构扭转效应试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(3): 1-7.
YANG Xiaohua, ZHOU Lei, LU Xuechen. An Experimental Study on the Torsion Effect of Short-Pier

- Shear Wall Structures[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2017, 31(3): 1-7.
- [4] 程文灏,金向前,吴志彬. 短肢剪力墙的设计与研究[J]. 建筑结构, 2001, 31(7): 51-52.
CHENG Wenrang, JIN Xiangqian, WU Zhibin. The Design and Research of Short Leg Shear Wall[J]. Building Structure, 2001, 31(7): 51-52.
- [5] 黄东升,程文灏,彭飞. 短肢剪力墙的设计与研究(二)[J]. 建筑结构, 2002, 32(8): 10-11.
HUANG Dongsheng, CHENG Wenrang, PENG Fei. The Design and Research of Short Leg Shear Wall(2)[J]. Building Structure, 2002, 32(8): 10-11.
- [6] 黄东升,程文灏,彭飞. 短肢剪力墙的设计与研究(三)[J]. 建筑结构, 2003, 33(9): 24-25.
HUANG Dongsheng, CHENG Wenrang, PENG Fei. The Design and Research of Short Leg Shear Wall(3)[J]. Building Structure, 2003, 33(9): 24-25.
- [7] 李青宁,李晓雷,闫艳伟,等. 钢筋混凝土短肢剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(4): 53-61.
LI Qingning, LI Xiaolei, YAN Yanwei, et al. Experimental Research on Seismic Performance of Reinforced Concrete Short-Leg Shear Wall[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(4): 53-61.
- [8] 周云,刘自力,刘丰,等. 一字型短肢剪力墙抗震性能模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 81-87.
ZHOU Yun, LIU Zili, LIU Feng, et al. Experimental Study on Seismic Performance of the Short-Pier Shear Wall(SPW) with Rectangular Section[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 81-87.
- [9] 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, 2015: 19-27.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 19-27.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 16-18.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Specification for Seismic Test of Building: JGJ/T101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 16-18.

(责任编辑: 申剑)

(上接第21页)

- [8] LIN C S, NI W M. On the Diffusing Coefficient of a Semilinear Neumann Problem[M]. Berlin: Springer, 1986: 160-174.
- [9] XIE Z Q, YUAN Y J, ZHOU J X. On Finding Multiple Solutions to a Singularly Perturbed Neumann Problem[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2012, 34(1): 395-420.
- [10] AMBROSETTI A, RABINOWITZ P H. Dual Variational Methods in Critical Point Theory and Applications[J]. Journal of Functional Analysis, 1973, 14(4): 349-381.
- [11] CHOI Y S, MCKENNA P J. A Mountain Pass Method for the Numerical Solutions of Semilinear Elliptic Problems[J]. Nonlinear Analysis, 1993, 20(4): 417-437.
- [12] DING Z H, COSTA D G, CHEN G. A High-Linking Algorithm for Sign-Changing Solutions of Semilinear Elliptic Equations[J]. Nonlinear Analysis, 1999, 38(2): 151-172.
- [13] LI Y X, ZHOU J X. A Minimax Method for Finding Multiple Critical Points and Its Applications to Semilinear PDE[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2001, 23(3): 840-865.
- [14] XIE Z Q, CHEN C M, XU Y. An Improved Search-Extension Method for Computing Multiple Solutions of Semilinear PDEs[J]. IMA Journal of Numerical Analysis, 2005, 25(3): 549-576.
- [15] YANG Z H, LI Z X, ZHU H L. A Bifurcation Method for Multiple Positive Solutions to Henon Equation[J]. Science in China Series A: Mathematics, 2008, 51(12): 2330-2342.
- [16] E W N, ZHOU X. The Gentlest Ascent Dynamics[J]. Nonlinearity, 2011, 24(6): 1831-1842.
- [17] ZHANG J Y, DU Q. Constrained Shrinking Dimer Dynamics for Saddle Point Search with Constraints[J]. Journal of Computational Physics, 2012, 231(14): 4745-4758.

(责任编辑: 邓光辉)