

短肢剪力墙节点扭转性能的有限元分析

蒋国维, 杨晓华, 曾莹莹, 李小岗

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 由于混凝土塑性变形的影响, 短肢剪力墙节点在受到扭转作用加剧时, 与按弹性理论计算的结果相差较大。因此, 利用 ANSYS 有限元计算软件, 模拟在水平低周反复荷载作用下的 T 型短肢剪力墙节点, 通过分析其结构变形、裂缝和混凝土应力情况等研究节点的扭转性能。研究表明: 在梁端施加水平作用力可以对节点造成扭转破坏, 且梁与墙连接处因出现应力集中而最先出现裂缝, 裂缝出现后因部分混凝土退出工作, 节点的受力性能发生质的改变; 在一定范围内, 适当增加轴压比可以提高短肢剪力墙节点的耗能能力, 增加其延性; 对于容易受到扭转作用的短肢剪力墙节点, 可以适当加强节点配筋布置以承受全部的外扭作用, 避免节点被过早破坏。

关键词: 短肢剪力墙; 节点; 有限元分析; 扭转

中图分类号: TU398⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)02-0001-07

Finite Element Analysis of Torsion Performance of Short-Leg Shear Wall Joints

JIANG Guowei, YANG Xiaohua, ZENG Yingying, LI Xiaogang

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

Abstract: Due to the plastic deformation of the concrete, when the torsion effect is aggravated of the short-leg shear wall joints, the results of the short-leg shear wall joints are quite different from the results worked out by elasticity theory. Therefore, by using ANSYS finite element calculation software, a simulation test can be done of the T-shaped short-limb shear wall joints under the horizontal low cyclic loading. Based on an analysis of its structural deformation, crack and concrete stress, a study has been carried out of the torsional behaviors of the joints. The research results show that the horizontal force exerted on the beam ends can cause torsional failure to the joints, which will lead to cracks at the connection points between the beams and the walls. Due to the appearance of the cracks, some concrete is out of work, with a qualitative change in the mechanical properties of the joints. Within a certain range, a proper increase in the axial pressure ratio can increase the energy dissipation capacity of the short leg shear wall joints, thus further increasing the ductility of the joints. For short torsional shear wall joints, which are easy to be torsional, the reinforcement layout of joints can be properly strengthened to withstand all external torsion and avoid premature destruction of joints.

Keywords: short-leg shear wall; joint; finite element analysis; torsion

0 引言

短肢剪力墙是指各墙肢横截面最大高度与厚度

之比在 4~8 之间的剪力墙^[1]。短肢剪力墙墙肢厚度一般为 200~300 mm, 墙肢长度一般为 800~2 400 mm。

由于短肢剪力墙可以灵活布置, 克服了框架结构形态

收稿日期: 2017-10-25

作者简介: 蒋国维 (1992-), 男, 江苏扬州人, 湖南工大学硕士生, 主要研究方向为混凝土结构设计原理,

E-mail: 2268312643@qq.com

固定的缺点,因而在当今建筑中广泛应用。

许多学者致力于短肢剪力墙的理论 and 试验研究。如张敏^[2]提出了局部设缝短肢剪力墙,为解决短肢剪力墙抗震性能的不足提供了一个解决方向。黄东生等^[3]在考虑剪切变形的影响下,对短肢剪力墙进行了弹塑性分析,得知通过合理搭配调整翼缘宽度、整体性系数、肢强系数和连梁配筋的参数,可以明显增加短肢剪力墙的延性并提高其承载力。傅剑平等^[4]运用异形柱节点抗剪公式,研究了短肢剪力墙节点的延性能力、承载能力和破坏特点,证明了用异形柱节点设计公式对短肢剪力墙节点设计是可行的。苏益声等^[5]以配钢形式、轴压比和连梁结构为变化参数,研究了短肢剪力墙节点抗裂性能,得知在一定范围内适当提高轴压比能提高节点的抗裂承载力。李青宁等^[6-7]制作了14组1/2比例的L型和T型短肢剪力墙模型,并对其进行施加低周反复荷载试验,分析对比各模型的抗震性能后,得出了短肢剪力墙轴压比对构件的延性影响关系,即随着轴压比的提高,短肢剪力墙的延性降低。易祺等^[8]对2组4个短肢剪力墙试件施加扭转加载试验,分析了扭转状态下的扭矩-扭转角($T-\theta$)曲线,得出需要修正规范公式才能准确计算开裂扭矩和极限扭矩的结论。

综观已有文献,大部分学者致力于短肢剪力墙结构在竖向和横向荷载下的抗震性能研究,而关于短肢剪力墙节点在扭转作用下的抗震性能方面的研究较少。随着时代进步,材料强度不断提高、设计计算方法不断改进、受扭构件的应用越来越多,工程界已注重扭转效应对结构使用功能的影响,并深入研究如何保证结构在扭转作用下的安全稳定。为了在实际工程中减少设计盲区,有必要针对短肢剪力墙节点的抗扭性能进行有限元分析。因此,本研究利用ANSYS有限元分析软件,模拟在水平低周反复荷载作用下的T型短肢剪力墙节点,通过分析其结构变形、裂缝和混凝土应力情况等研究节点的扭转性能。

1 有限元分析模型

1.1 有限元模型设计

钢筋混凝土结构或构件在受到由外荷载作用产生的扭矩作用下发生了扭转,且扭矩与其本身刚度无关,其值可通过静力平衡条件算得,称为平衡扭转。本次模拟,选取某20层短肢剪力墙结构中间跨的第15层T型短肢剪力墙上下反弯点处、短肢剪力墙腹板和翼缘两处连梁反弯点处,建立相同比例大小的模型,模拟模型在外荷载作用下产生的扭转。为了能够

直观地反映短肢剪力墙节点的扭转性能,对连梁施加水平低周反复荷载,模拟出短肢剪力墙节点在受到纯扭转作用下工作状态的全过程。模型按1:1的比例设计,墙体高均为3200 mm,宽度均为1500 mm,截面厚度均为300 mm;连梁高均为600 mm,长度均为1700 mm,截面厚度均为300 mm。模型的肢厚比为5:1,尺寸和形式如图1所示。模型的设计按照《混凝土结构设计规范》^[9]中的要求进行。

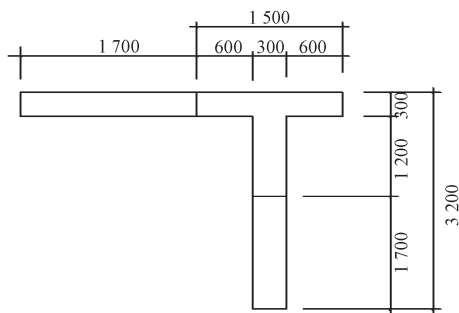


图1 模型的平面尺寸图

Fig. 1 A dimensional drawing of the model

1.2 试件配筋

为避免结构或构件在受到平衡扭转作用时过早被破坏或崩塌,应该给其配置足够数量的钢筋以抵抗扭转作用,维持结构平衡。钢筋等级采用HRB400级,短肢剪力墙的竖向配筋面积 $A_s=3693\text{ mm}^2$,配筋为20 Φ 14;每米宽板分布钢筋面积 $A_s=393\text{ mm}^2$,配筋为 Φ 10@300。连梁的配筋面积 $A_s=1742\text{ mm}^2$,配筋为4 Φ 25,配架立筋为2 Φ 12;每米宽板箍筋配筋面积 $A_s=251\text{ mm}^2$,配筋为 Φ 8@200。模型的配筋图如图2所示。模型选择的混凝土强度等级为C30。

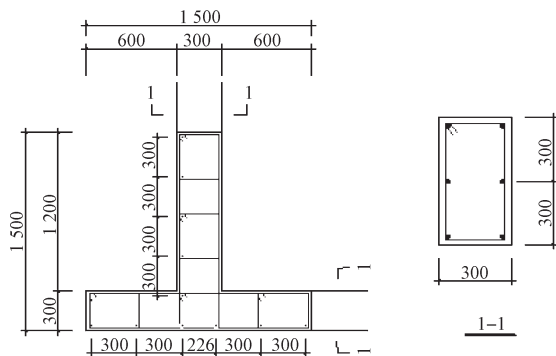


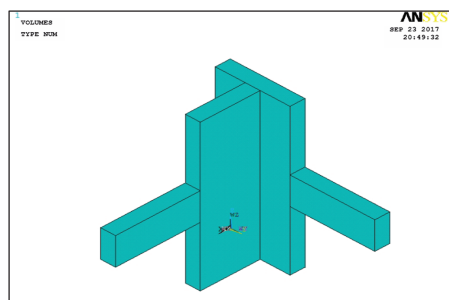
图2 试件配筋图

Fig. 2 Specimen reinforcement diagram

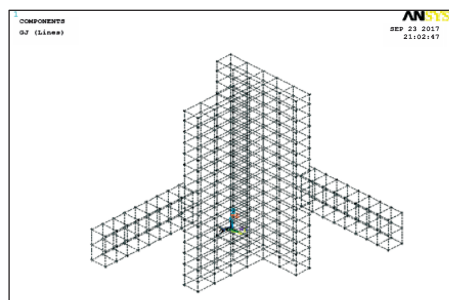
1.3 有限元模型建立

本文运用有限元数值分析软件ANSYS,采用分离式的方法,先建立短肢剪力墙几何实体,再将几何实体以钢筋位置进行切分,以边线为钢筋。其中混凝土和钢筋单元分别采用SOLID65单元和LINK8单元,

所有单元尺寸定为 50 mm, 模型的几何实体 (图 a) 和钢筋单元 (图 b) 如图 3 所示。



a) 几何实体



b) 钢筋单元

图 3 有限元模型图

Fig. 3 Finite element model

因本次短肢剪力墙模型上下两端取自两层短肢剪力墙的反弯点处, 连梁取跨中反弯点处, 所以对本模型下段施加竖向约束, 对主梁端施加水平约束, 并在侧梁端施加垂直于约束的水平推力, 对墙梁节点造成正负两方向反复的弯矩, 研究节点的抗扭性能。模型的受力简图如图 4 所示, 其中 N 为竖向轴压力, P 为水平往返推力, 且 P 按位移荷载来确定, 梁端正负两方向循环控制位移进程, 每一循环后增加固定位移量, 具体加载制度如图 5 所示。

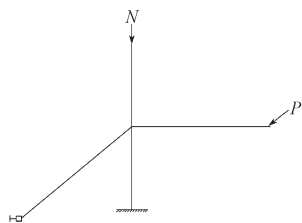


图 4 模型受力简图

Fig. 4 A force diagram of the model

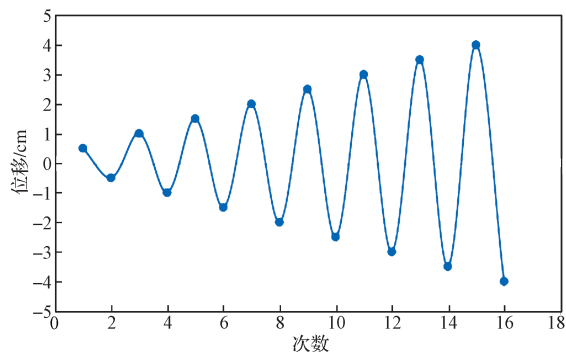


图 5 位移加载图

Fig. 5 Displacement loading diagram

本模拟试验中, 选取同一模型在不同轴压比下进行节点扭转试验, 轴压比 u 的取值为 0.1~0.5, 共进行 5 次模拟。

2 有限元分析结果

本研究中, 一共获得 5 组在 5 种不同轴压比下的短肢剪力墙节点扭转数据, 依据这些数据可以绘制出模型的滞回曲线和骨架曲线, 并且通过对数据的进一步计算和处理, 得到模型的刚度退化曲线和 $T-\theta$ 曲线。通过分析模型的刚度退化曲线、 $T-\theta$ 曲线及裂缝发展图, 探讨轴压比的大小对短肢剪力墙节点抗扭性能的影响规律。

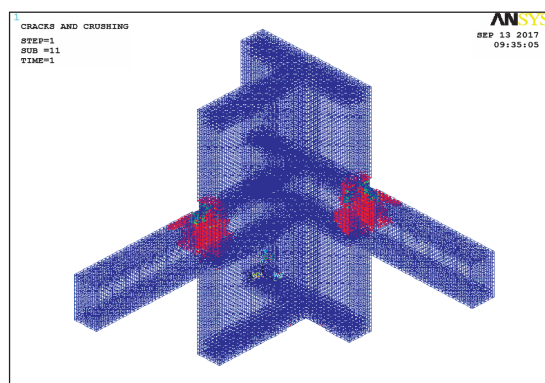
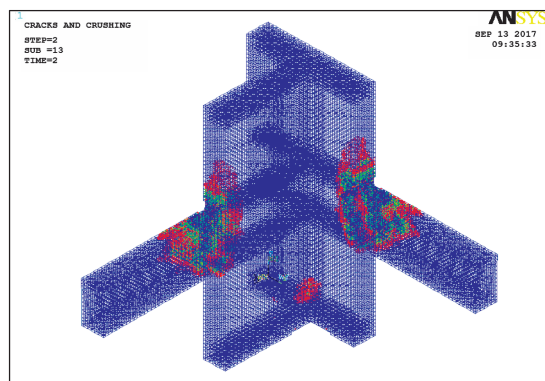
2.1 模型裂缝分析

与裂缝图相对应的轴压比和梁端位移信息如表 1 所示, 裂缝图如图 6 所示。

表 1 轴压比与位移信息表

Table 1 Information table of the axial pressure ratio and its displacement

图名	轴压比 u	梁端位移 /cm	图名	轴压比 u	梁端位移 /cm
a	0.4	0.5	f	0.2	3.0
b	0.4	-0.5	g	0.3	3.0
c	0.4	1.5	h	0.4	3.0
d	0.4	-1.5	i	0.5	3.0
e	0.1	3.0			

a) $u=0.4$, 位移为 0.5 cmb) $u=0.4$, 位移为 -0.5 cm

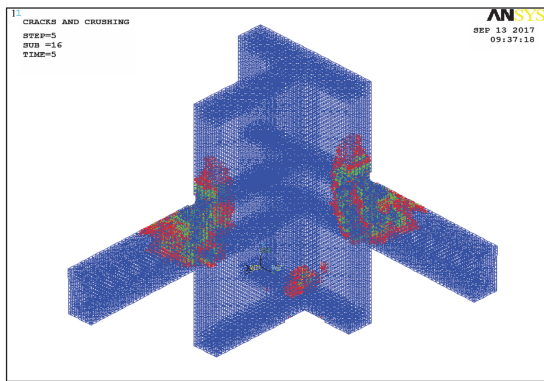
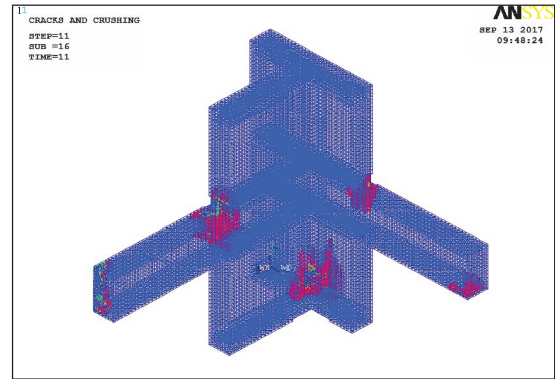
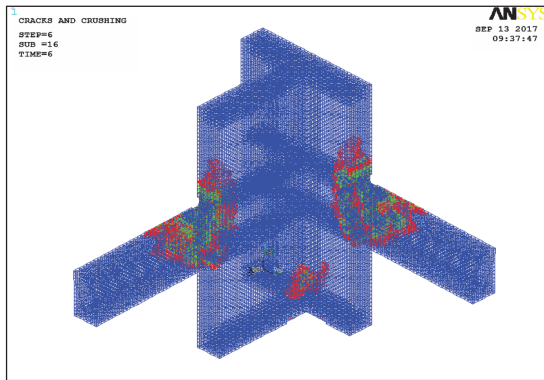
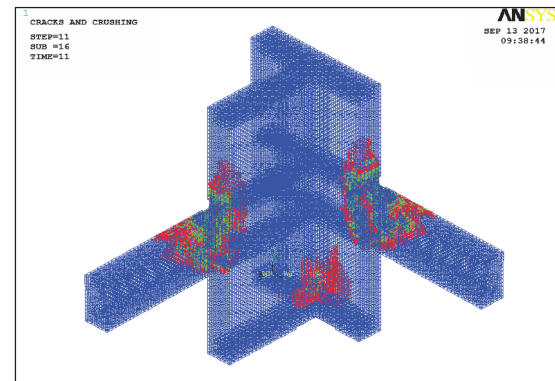
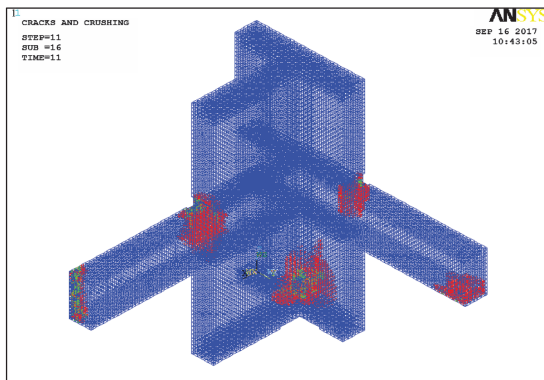
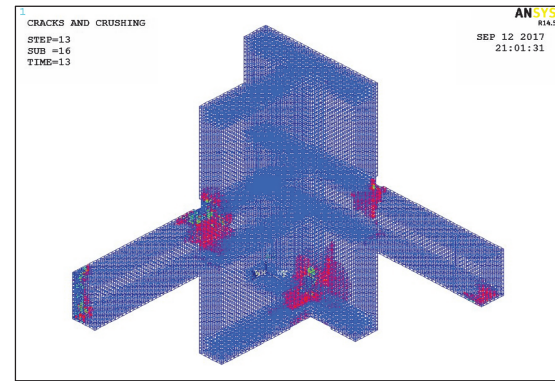
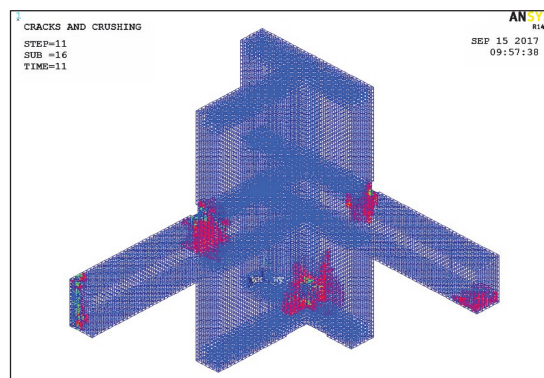
c) $u=0.4$, 位移为 1.5 cmg) $u=0.3$, 位移为 3.0 cmd) $u=0.4$, 位移为 -1.5 cmh) $u=0.4$, 位移为 3.0 cme) $u=0.1$, 位移为 3.0 cmi) $u=0.5$, 位移为 3.0 cm

图6 模型裂缝图

Fig. 6 Model crack patterns

f) $u=0.2$, 位移为 3.0 cm

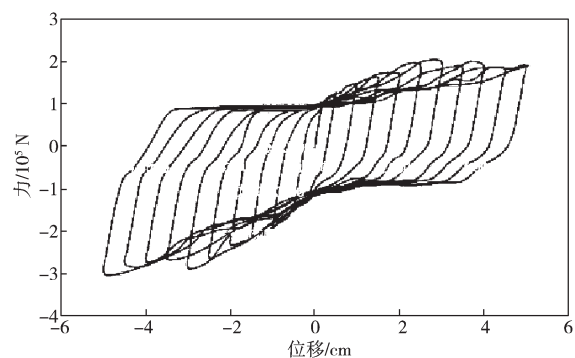
当轴压比为 0.4 时, 对模型裂缝随位移的变化情况进行分析。观察图 a 可知, 当主梁端施加正向位移 0.5 cm 时, 在墙和主梁连接节点处产生最大弯矩, 节点处最先出现裂缝; 同理, 侧梁端的反力也在侧梁和墙连接处产生最大弯矩, 出现裂缝。再对比图 b 可以看出, 相同的轴压比下, 在主梁端施加反向位移 0.5 cm 时, 反向位移比正向位移所造成的裂缝多, 且墙与连梁连接处出现的裂缝数量明显增多, 范围扩大, 在短肢剪力墙的腹板和翼缘交接底部也出现了裂缝。分析图 a~d 可知, 随着梁端位移的继续增加, 在墙和

梁连接节点处的裂缝变化不明显, 但墙肢底部裂缝逐渐增多。可以认为连梁与墙的节点在水平扭转作用下, 会快速产生裂缝。

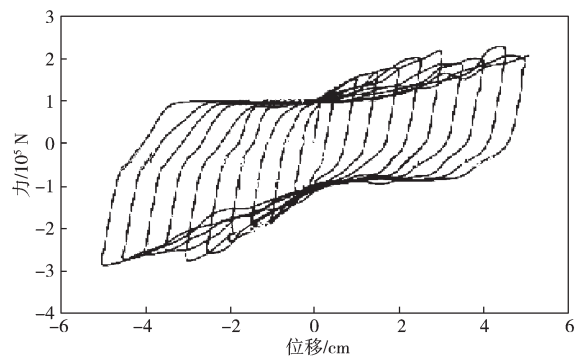
图 e~i 为在不同轴压比下, 梁端位移为 3.0 cm 时的裂缝图。对比各图可以发现, 裂缝主要出现在连梁与短肢剪力墙节点处、短肢剪力墙墙角处和两处梁端。在轴压比为 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 时, 各裂缝图发展较为接近; 当轴压比为 0.4 时, 墙角处裂缝发展情况与其他轴压比下类似, 但连梁与墙节点处的裂缝明显增多, 范围更大。

2.2 滞回曲线分析

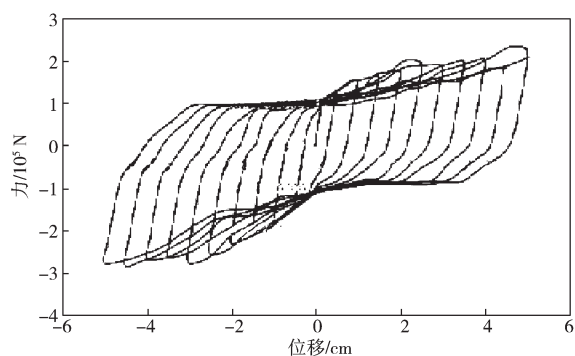
设定的 5 组轴压比下的滞回曲线如图 7 所示, 其中 a~e 分别对应轴压比 u 为 0.1~0.5, 观察图 7 可以得知, 各滞回曲线均呈弓形, 符合混凝土压弯构件的滞回曲线形状。



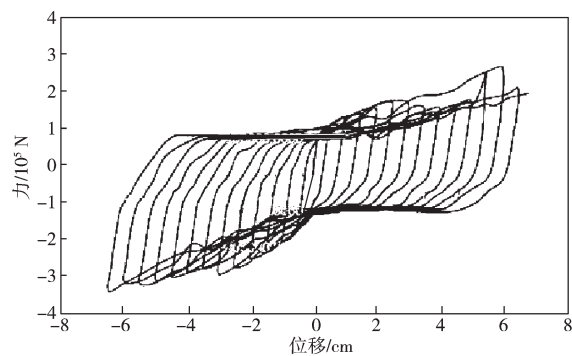
a) $u=0.1$



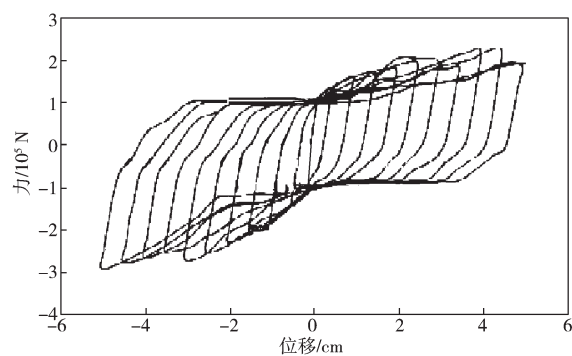
b) $u=0.2$



c) $u=0.3$



d) $u=0.4$



e) $u=0.5$

图 7 不同轴压比下模型的滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curves of the model under different axial compression ratios

观察图 7 所示 5 组轴压比下的滞回曲线, 可以发现轴压比 $u=0.4$ 的滞回曲线饱满度最高; 轴压比从 0.1~0.4 变化时, 滞回曲线饱满度由低到高逐渐增加; 轴压比从 0.4 到 0.5, 滞回曲线饱满度又呈下降趋势。这表明当轴压比为 0.4 时, 节点抗扭转的耗能能力最强, 相对于轴压比为 0.1~0.3, 提高轴压比对提高节点的抗扭耗能能力有积极作用; 但是相对于轴压比为 0.5, 过度地提高轴压比并不会一直提高节点的耗能能力, 甚至会起到反作用。

2.3 骨架曲线分析

本研究绘制的骨架曲线是往复加载时各次峰值点的连线, 即各组滞回曲线的包络线。为了对比不同轴压比下的骨架曲线, 将曲线绘在一起, 见图 8。

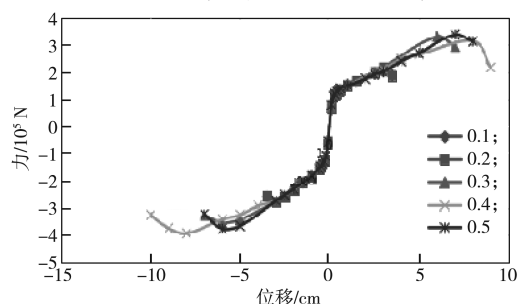


图 8 不同轴压比下模型的骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curves of the model under different axial compression ratios

观察图 8 可以发现,轴压比为 0.1 和 0.2 时的骨架曲线下降段出现得较早,最大承载力也较小,位移变形能力较弱。当轴压比提高到 0.3~0.5 时,可以看到节点的最大承载力和变形能力显著提高。当轴压比为 0.4 时,节点的最大承载力不是最高的,但是其位移变形能力最强。这说明当轴压比为 0.4 时,相对于其他轴压比,节点的抗扭能力最优、延性最好、耗能能力最强。

2.4 刚度退化曲线分析

本研究采用峰值荷载和与之对应的峰值点位移的比值来表示割线刚度^[10],绘制了刚度退化曲线,将得到的轴压比在 0.1~0.5 下的刚度退化曲线绘制在一起,如图 9 所示。

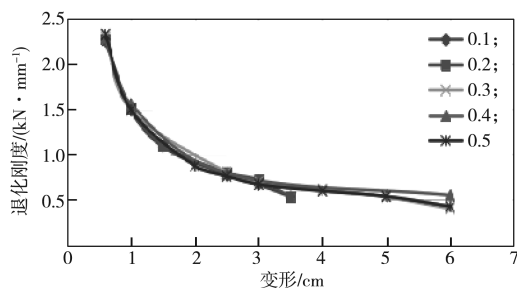


图 9 不同轴压比下的刚度退化曲线

Fig. 9 Stiffness degradation curves of the model under different axial compression ratios

分析各组轴压比下的刚度退化曲线可知,轴压比的变化对节点的刚度影响不大,退化刚度随变形的增加而降低。当变形在 3 cm 以内时,各组刚度退化曲线交叉重合;当变形超过 3 cm 后,轴压比为 0.4 的刚度退化曲线呈现退化速率减小的变化趋势,轴压比为 0.3 和 0.5 的刚度退化曲线则基本重合并呈现略大的退化速率。这一结果说明,当轴压比为 0.4 时,存在最优延性的节点,相比于其他轴压比,此时的节点刚度退化最慢,耗能能力最强。

2.5 $T-\theta$ 曲线分析

根据模拟得到的 5 组数据,整理绘出各轴压比下的 $T-\theta$ 曲线,如图 10 所示。

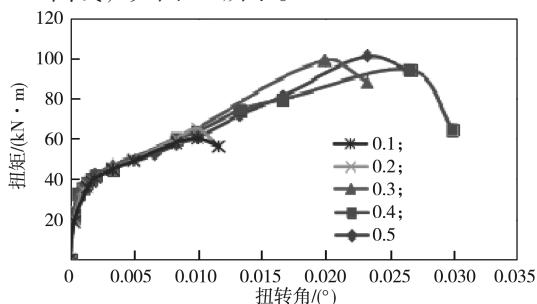


图 10 不同轴压比下的 $T-\theta$ 曲线

Fig. 10 $T-\theta$ curves of the model under different axial compression ratios

观察图 10 可以发现,5 组轴压比下不同的模型初裂扭矩都很相似,但是对应的极限扭矩却显著不同。当轴压比为 0.1 和 0.2 时,极限扭矩和破坏基本相似,但和轴压比为 0.3~0.5 的相比,又小了很多。在轴压比为 0.3~0.5 这 3 组曲线中,极限扭矩大小较为相似,但相对应的极限位移又显著不同,且以轴压比为 0.4 时的极限位移最大。这一结果表明,在轴压比为 0.4 的情况下,节点的延性略优。

3 结论

本研究利用 ANSYS 有限元分析软件,模拟在水平低周反复荷载作用下的 T 型短肢剪力墙节点的扭转性能,通过分析其裂缝发展图和轴压比在 0.1~0.5 之间的短肢剪力墙节点在纯扭作用下的模拟结果,可以得到以下结论:

1) 在梁端施加水平作用力可以对节点造成扭转破坏;梁与墙连接处出现应力集中,最先出现裂缝;在裂缝出现后,部分混凝土退出工作,节点的受力性能发生质的改变。

2) 在一定范围内,适当增加轴压比可以提高短肢剪力墙节点的耗能能力,增加其延性,但是继续增加轴压比至一定的范围后,反而对节点的耗能能力有反作用。

3) 对于容易受到扭转作用的短肢剪力墙节点,可以适当加强节点配筋布置以承受全部的外扭作用,避免节点被过早破坏。

本文探讨了短肢剪力墙节点与轴压比的关系,实际上节点抗扭性能和节点的配筋也有很大关系,外扭矩从混凝土单独承担转变为钢筋和混凝土共同承担。本文使用施加外荷载来对短肢剪力墙节点产生扭转作用,分析节点在水平扭转状态下的破坏形态,但未对其他扭转状态下的破坏形态进行研究,这将是下一步的工作。

参考文献:

- [1] 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: 79~80.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical Specification for Concrete Structures of High-Rise Building: JGJ 3—2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010: 79~80.
- [2] 张敏. 局部设缝 T 形与 L 形截面短肢剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 世界地震工程, 2014, 30(3): 27~38.

- ZHANG Min. Experimental Research on Seismic Behavior of Short Shear Walls of T-Shaped and L-Shaped Cross Section with Local Joint[J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(3): 27-38.
- [3] 黄东生, 程文灏, 彭 飞. 短肢剪力墙的弹塑性性能研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2003, 33(2): 164-167.
- HUANG Dongsheng, CHENG Wenrang, PENG Fei. Study on Elastoplastic Performances of Shear Walls with Short Piers[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(2): 164-167.
- [4] 傅剑平, 都洪钢, 白绍良. T型截面短肢墙梁中间节点抗震性能试验研究 [J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(6): 25-30.
- FU Jianping, DU Honggang, BAI Shaoliang. Experimental Research on Seismic Behavior of T Shaped Short Pier Shear Wall Interior Joint Under Cyclic Loading[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(6): 25-30.
- [5] 苏益声, 柯晓军, 陈宗平. 型钢高强混凝土短肢剪力墙节点抗裂承载力研究 [J]. 工业建筑, 2012, 42(11): 32-35, 40.
- SU Yisheng, KE Xiaojun, CHEN Zongping. Research on the Anti-Crack Bearing Capacity of Steel Reinforced High-Strength Concrete Short-Leg Shear Wall Joints[J]. Industrial Construction, 2012, 42(11): 32-35, 40.
- [6] 李青宁, 李晓蕾, 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): 53-62.
- 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): 53-62.
- [7] 张品乐, 李青宁. 短肢剪力墙抗震性能试验 [J]. 建筑结构, 2010, 40(12): 98-100.
- ZHANG Pinle, LI Qingning. Experimental Research on Seismic Performance of the Short Pier Shear Wall[J]. Building Structures, 2010, 40(12): 98-100.
- [8] 易 祺, 张 敏. 短肢剪力墙抗扭性能的试验研究 [J]. 重庆科技学院学报 (自然科学版), 2014, 16(5): 118-121, 145.
- YI Qi, ZHANG Min. Experimental Research on Torsional Performance of Reinforced Concrete Short-Leg Shear Wall[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 16(5): 118-121, 145.
- [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, 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.
- [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/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 16-18.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for Seismic Test of Buildings: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015: 16-18.

(责任编辑: 廖友媛)