

T形截面柱框架节点试验及非线性有限元分析

陈昌宏¹, 黄莺², 马乐为², 吴敏哲², 单建¹

(1. 东南大学土木工程学院, 南京 210096; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055)

[摘要] 对6个T形截面柱框架节点试件进行了试验, 分别以梁截面高度、柱轴压比和节点区水平箍筋体积配箍率为变量参数, 研究了节点区裂缝的形成与开展、节点的破坏机理; 提出在低周期反复荷载作用下T形柱框架节点的裂缝呈反“K”型, 而不是类似于常规矩形节点的“X”型交叉裂缝, 其受力机理偏于较陡的斜压杆受力模型; 运用大型通用有限元软件 ANSYS 的二次开发语言 APDL 对T形截面柱节点进行非线性有限元分析, 结果表明离散型非线性有限元模型计算结果与试验结果有很好的吻合。改变有限元程序参数使节点发生核心区剪压破坏, 对节点裂缝的形成与开展, 节点区破坏机理做进一步论证。

[关键词] T形节点; 裂缝; 破坏机理; ANSYS; 非线性有限元

[中图分类号] TU37; O241.82 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)11-0092-04

1 引言

由T形、I形、Z字形以及十字形截面柱与梁所组成的异形柱框架结构, 由于其填充墙与柱腹板及翼缘的厚度相同, 室内不出现楞角, 有利于美观要求, 并增加了使用面积, 取得了明显的经济和社会效益, 目前在民用住宅建设的范围内已广泛使用。国家建设部1996年11月发布的《住宅产业现代化技术发展要点》(试行)中, 将其列为住宅技术发展要点之一。T形截面柱框架由于柱子截面高宽比大且梁柱交接处钢筋密集, 混凝土不容易振捣密实。同时由于梁截面宽度与柱的肢厚相等, 梁中纵向钢筋须弯折一定角度后才能伸入柱中锚固, 可导致梁端混凝土外鼓剥落, 因此梁柱节点比矩形梁柱节点薄弱, 其震害可能更为严重^[1]。笔者对6个钢筋混凝土T形截面柱节点进行试验, 研究节点核心区混凝土的裂缝分布及其开展规律; 运用大型通用有限元软件 ANSYS 的二次开发语言 APDL 对T形截面柱节点进行非线性有限元分析, 结果表明非线性有限元计算结果与试验结果有很好的吻合。改变有限元程序参数使节点发生核心区剪压破坏, 对节点裂缝

的形成与开展, 节点破坏机理做进一步论证。

2 试验设计

2.1 试件模型

采用2/3比例缩尺模型试验。节点试件共6个, 编号分别为T-1~T-6, 分为三组。其中, 试件T-1, T-2和T-3为第一组, T-2和T-4为第二组, T-2, T-5和T-6为第三组, 分别以梁截面高度、柱轴压比和节点区水平箍筋体积配箍率为变量参数。T形截面柱的高厚比 h_c/b_c 取3.75, 节点试件尺寸及配筋见表1。试验节点试件模板和梁纵筋深入节点构造分别如图1和图2所示。

2.2 加荷程序及数据观测

试验采用荷载-位移双控制的加载制度, 即首先在柱端施加轴向荷载到事先设计的预定值, 加荷点位于T形柱的形心上以保证柱子轴心受压, 并在以后的加载过程中保持不变(恒定轴压力), 然后在梁端用拉压千斤顶施加上下往复荷载。试件屈服以前, 采用荷载控制; 试件屈服以后, 采用位移控制^[2]。

梁自由端挠度通过位移传感器测量。梁预计塑性铰区截面平均曲率 Φ 通过测量梁上部百分表的

[收稿日期] 2006-03-15; 修回日期 2006-05-25

[基金项目] 陕西省自然科学研究计划资助项目(2001C33); 陕西省教育厅专项科研计划项目(02JK122)

[作者简介] 陈昌宏(1980-), 男, 安徽东至县人, 东南大学博士研究生, 从事结构工程研究(cch_hy@sina.com, 13852297980)

伸长和下部百分表的缩短来计算。节点核心区的剪切变形通过测量核心区对角线长度计算剪切角 γ 。梁上下两排纵筋贴上两个电阻应变片,弯折段每个

纵筋贴两个应变片。节点核心区沿对角线方向箍筋(估计裂缝开展方向)、T形柱两垂直方向的箍筋均贴上应变片^[2,3]。

表1 试件尺寸及节点配筋表

Table 1 Specimens size and joint distributed steel chart

No. of specimens		T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6
beam	$b \times h/\text{mm}$	133 × 333	133 × 400	133 × 500	133 × 400	133 × 400	133 × 400
	longitudinal steel	4Φ20	4Φ20	4Φ20	4Φ20	4Φ20	4Φ20
	stirrup	Φ6.5@80	Φ6.5@80	Φ6.5@80	Φ6.5@80	Φ6.5@80	Φ6.5@80
column	$b_c \times h_c/\text{mm}$	133 × 500	133 × 500	133 × 500	133 × 500	133 × 500	133 × 500
	$b_f \times h_f/\text{mm}$	500 × 133	500 × 133	500 × 133	500 × 133	500 × 133	500 × 133
	longitudinal steel	12Φ14	12Φ14	12Φ14	12Φ14	12Φ14	12Φ14
height ratio of beam and column	stirrup	Φ8@80	Φ8@80	Φ8@80	Φ8@80	Φ8@80	Φ8@80
	stirrup	Φ6.5@80	Φ6.5@80	Φ6.5@80	Φ6.5@80	concrete	Φ8@80
joint core	stirrup ratio	0.67%	0.67%	0.67%	0.67%	0	1.53%
	axis - pressed ratio	0.12	0.12	0.12	0.22	0.12	0.12

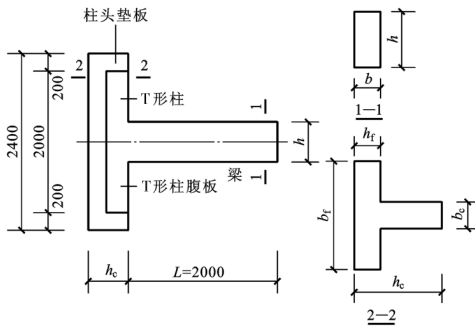


图1 试件模板图

Fig.1 Specimen form board

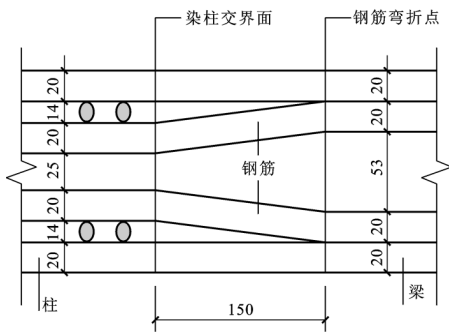


图2 梁纵筋伸入节点构造详

Fig.2 Constitution detail of beam steel extending joint

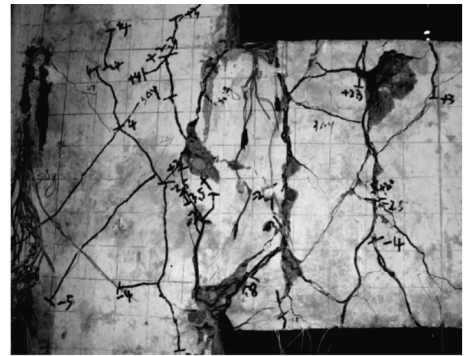


图3 T-5破坏形态与节点裂缝图

Fig.3 T-5 specimen failure shape and joint crack

3 试验结果

试验从开始加载到试件破坏,6个试件节点区破坏过程大致相同,节点试件典型裂缝如图3所示。

荷载较小时,梁端首先出现竖向正裂缝,节点核心区剪切变形很小,节点核心区翼缘板和腹板没有开裂,仍处于弹性状态。随着荷载的增加,梁端裂缝进一步发展,在节点区腹板处出现近60度的斜裂缝;此时节点核心区翼缘板上无任何裂缝,梁端纵筋随后

进入弹塑性工作阶段。随着荷载进一步增加,节点核心区斜裂缝逐渐增多,形成一个似反“K”字型裂缝。荷载(梁端位移)继续增加,节点核心区腹板上斜裂缝明显增多,梁端形成塑性铰且混凝土保护层外鼓酥松剥落。节点核心区翼缘板上箍筋的最大应力值仅为屈服强度的41%,柱腹板上箍筋均未屈服,节点宣告破坏。在反复荷载作用下,柱保护层没有剥落现象发生。柱纵向钢筋应变值在梁端屈服时为200 $\mu\epsilon$ 左右,在试件发生梁端弯曲破坏时为800 $\mu\epsilon$ 左右,试验过程中没有达到屈服极限,呈弹性。

4 非线性有限元分析

4.1 单元本构关系及计算模型

混凝土采用 ANSYS 软件中为其专门设定一种单元 Solid65,钢筋采用 Link8 三维二节点杆单元,每个节点有三个平动自由度。钢筋与混凝土之间的界面粘结滑移采用非线性弹簧单元 Combine39,每个节点有三个平动自由度和三个转动自由度^[4]。

混凝土受压应力-应变在受压区采用 Hognest-ed 关系式,下降段为线性。混凝土采用多线性等硬化模型,不考虑包兴格效应的影响。钢筋本构关系采用二折线弹性强化模型,粘结单元本构关系采用 Hawkins 计算模型^[5,6]。

采用弥散式和分离式两种有限元模型^[5]。混凝土受拉开裂采取半脆性开裂模式^[4]——应力释放和自适应下降相结合的方法。在单向、双向和双向受压过程中,混凝土积分点发生压碎,将视为脆性材料,压碎点刚度为零,计算时将压碎点定义为在此积分点的完全退化,不考虑其对单元刚度的贡献。弥散型模型钢筋参数(纵筋和箍筋)通过其在混凝土单元中的体积率来确定。

4.2 计算结果对比分析

4.2.1 试件破坏形态对比 试件破坏均为梁端弯曲破坏,节点区存在裂缝,裂缝宽度较小,均为斜向。但非线性有限元计算结果中斜向裂缝倾角比试验结果偏陡,原因是在有限元分析中没有考虑梁末端弯钩处斜压力的影响。节点区裂缝均在柱腹板上形成,在翼缘板上都没有形成裂缝。

4.2.2 计算结果对比 试件 T-1 ~ T-6 的初始开裂荷载和极限荷载与试验结果对比如表 2 所示。离散模型核心区初裂荷载与试验结果有很好的吻合,梁端极限荷载有一定偏差,原因是在非线性有限元计算过程中混凝土单元出现过多裂缝和压碎时,

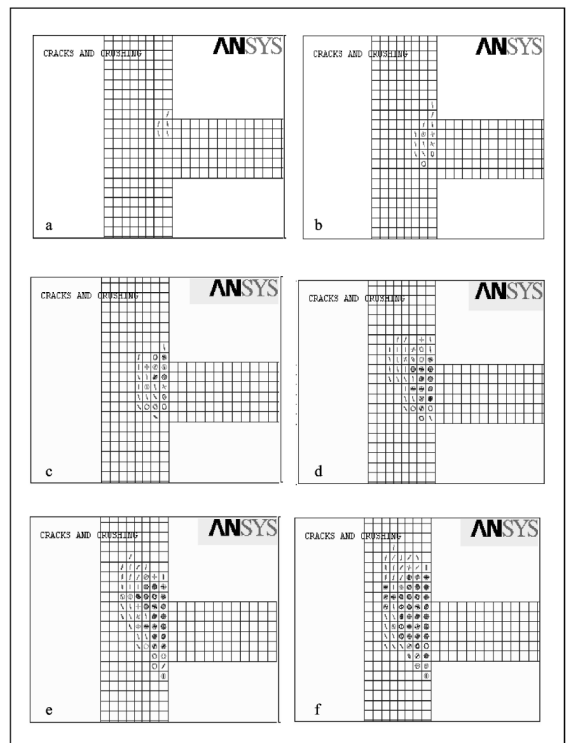
导致计算过程发散所致。弥散计算模型荷载值高于离散模型计算值,较试验值有偏高,因此,在节点非线性有限元模拟过程中应采用离散模型。

表 2 节点试验结果

No. of specimens		T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6
Test of Pcr	↓	30	35	45	40	35	35
	↑	35	35	45	45	40	45
FEM of Pcr	discrete model	35	40	45	50	40	45
	smeared model	38	45	49	53	45	52
Test of Pu	↓	41	50	62	51	49	43
	↑	50	62	76	59	55	67
FEM of Pcr	discrete model	51	79	87	69	66	78
	smeared model	52	63	89	70	66	81

4.3 节点裂缝形成机理

改变有限元模型参数,按照“强构件,弱核心”机制,在梁端发生屈服之前使节点核心区剪压破坏,以模拟节点区裂缝形成机理。节点区裂缝开展过程如图 4 所示。梁柱交界处应力状态复杂,裂



a 节点区第一批裂缝;b 节点区第二批裂缝;c 节点区第三批裂缝;
d 节点区第四批裂缝;e 节点区第五批裂缝;f 节点区第六批裂缝

图 4 节点区裂缝开展过程图

Fig. 4 Joint region cracks development course

缝首先在节点核心区对角处出现。随着荷载的增加,裂缝进一步延伸,竖向垂直裂缝发展的趋势比较

明显,是采用了“强构件、弱核心”机制,梁端塑性铰区位置向节点区移动所致。随着荷载的进一步增加,节点核心区内竖向垂直裂缝的发展趋势逐渐减弱,斜向裂缝发展趋势明显增强,最终形成沿节点腹板对角的斜裂缝,是因为异形柱翼缘板的存在使得梁端塑性铰位置不能继续向内移动。柱翼缘板上没有形成混凝土的拉裂和压碎分布。随着荷载增加,核心区裂缝逐渐向核心区上下方向延伸。这与试验结果相似,在反复荷载作用下,节点区形成一似反“K”型裂缝。

5 结论

进行了6个T形钢筋混凝土异形柱框架节点的试验研究,结果表明节点核心区在低周期反复荷载作用下裂缝呈反“K”型,不是“X”型。裂缝的交叉点向节点区外偏移,使得节点区裂缝逐渐向节点区的上下延伸,而不是向翼缘存在的对角方向延伸。T形柱框架节点的受力机理偏于较陡的斜压杆原理。采用弥散式和分离式模型,运用通用有限元软

件ANSYS对T形截面柱节点进行非线性有限元分析,并与试验结果进行对比。变化有限元程序参数使节点发生核心区剪压破坏,进一步论证节点破坏机理。分析表明基于ANSYS软件的非线性离散式计算模型结果与试验结果有很好的吻合,对试验结果做出了进一步论证。

参考文献

- [1] 黄珏,肖建庄,葛亚杰,等.异形柱框架节点受力性能研究进展与评述[J].结构工程师,2002(1):52~57
- [2] 唐九如.钢筋混凝土框架节点抗震[M].南京:东南大学出版社,1989.142~167
- [3] 曹祖同,陈云霞.钢筋混凝土异形柱框架节点强度的研究[J].建筑结构,1999(1):42~46
- [4] ANSYS Inc. ANSYS APDL Programmer's Guide Release 7.0 [M].1999.197~221
- [5] 吕西林,金国芳,吴晓涵.钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M].上海:同济大学出版社,1997.37~40
- [6] Noguchi H, Uchida K. Finite element method analysis of hybrid structural frames with reinforced concrete columns and steel beams [J]. Journal of Structure Engineering,2004,130(2):328~335

Experimental Study and Nonlinear Finite Element Analysis on the T-shaped Column Frame Structure Joints

Chen Changhong¹, Huang Ying², Ma Lewei², Wu Minzhe², Shan Jian¹

(1. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

[Abstract] The paper makes experiment about six T-shaped cross section column frame joints under low periodic cycle loads. The paper uses variable parameters of beam section height, the axis-pressed ratio and the volume ratio of hoop reinforcement to research cracks formation and development and the failure mechanism of the joints. The paper points out that joints' crack shape appears as reverse “K” but not the common rectangular joints' “X” shape, and the endure mechanism is inclined to the steep press-pole mechanism. At the same time, this paper makes use of a software ANSYS to develop the language APDL two times to T-shaped column joints to carry on nonlinear finite element analysis, adopts discrete cracking model smeared cracking model, and carries on the contrast analysis with experiment result. Analysis enunciates that nonlinear finite element analysis calculation results fit in aill with experiment result. The paper changes procedure parameters to cause the core area shear-press breakage, and to do further argument about the formation of the joints crack and the joints failure mechanism.

[Key words] T-shaped joints; crack shape; failure mechanism; ANSYS; nonlinear finite element