

文章编号: 1000-4750(2015)08-0058-08

往复荷载作用下异形柱节点抗震性能改善措施

戎 贤^{1,2}, 张健新^{1,2}, 李艳艳^{1,2}

(1. 河北工业大学土木工程学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘 要: 在节点核心区加入 T 形钢筋、槽形钢筋或 X 形配筋以改善异形柱节点这一薄弱部位, 研究往复荷载作用下异形柱框架节点的抗震性能, 对比不同改善措施对节点的破坏特征及承载性能、滞回性能、耗能能力及累积损伤等抗震性能指标的影响。结果表明: 在异形柱节点核心区加入 T 形钢筋、槽形钢筋或 X 形配筋均能改善异形柱节点的滞回特性, 提高节点的承载能力和变形能力, 减缓节点的累积损伤程度, 从而提高异形柱节点的抗震性能。与 T 形钢筋、槽形钢筋增强的异形柱框架节点试件相比, X 形配筋对改善节点的抗震性能指标效果更显著。

关键词: 异形柱节点; 抗震性能; 改善措施; 往复荷载; 累积损伤

中图分类号: TU375 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.01.0029

IMPROVEMENT MEASURE ON ASEISMIC BEHAVIOR OF SPECIALLY SHAPED COLUMN JOINTS UNDER CYCLE LOADING

RONG Xian^{1,2}, ZHANG Jian-xin^{1,2}, LI Yan-yan^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China)

Abstract: The T-shaped steel reinforcement, groove-shaped steel reinforcement, or X-shaped reinforcement to the weak part of a specially shaped column joint is proposed. The aseismic behavior of a joint was investigated under low cyclic loading. The effect of different improvement measures on aseismic behaviors in terms of damage characteristic, bearing characteristic, hysteretic characteristic, energy dissipation and cumulated damage were analyzed. The results show that the hysteretic characteristic of a joint reinforced by T-shaped steel, groove-shaped steel or X-shaped reinforcement is improved, the bearing capacity and deformation capacity are enhanced and the degree of cumulated damage is lightened. Therefore, the aseismic behavior of a specially shaped column joint with T-shaped steel, groove-shaped steel or X-shaped reinforcement is improved. The aseismic behavior of a joint reinforced by X-shaped reinforcement is better than that of a joint reinforced by T-shaped steel, or groove-shaped steel.

Key words: specially shaped column joint; seismic behavior; improvement measure; cycle loading; cumulated damage

节点作为框架结构中的传力枢纽, 在保证结构整体性中发挥着重要的作用。由于异形柱的柱肢较矩形柱的更薄弱、节点核心区的钢筋更密集导致施工过程中混凝土质量难以保证和节点的受力更复

杂等问题的存在, 其抗剪能力较矩形柱节点差, 因此, 在复杂的地震作用下, 异形柱节点更容易发生破坏^[1-3]。曹祖同、柯晓军、熊黎黎、陈昌宏、王丹等学者进行了异形柱及其节点方面的相关研

收稿日期: 2014-01-09; 修改日期: 2014-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878141); 河北省自然科学基金项目(E2011202013; E2015202035); 河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(Q2012083)

通讯作者: 张健新(1986—), 女, 河北唐山人, 博士生, 主要从事结构抗震研究(E-mail: zhangjianxin505@126.com)。

作者简介: 戎 贤(1965—), 男, 河北定州人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构抗震研究(E-mail: xrong@hebut.edu.cn);

李艳艳(1979—), 女, 广西上林人, 副教授, 博士, 主要从事结构工程研究(E-mail: nicole_820@163.com)。

究^[4-8], 研究成果已经写入《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ149-2006)中^[9], 但是由于异形柱节点是结构抗震中的薄弱部位, 限制了异形柱楼层高度及进一步的推广应用。因此, 研究增强异形柱节点薄弱部位的方法以提高异形柱结构的抗震性能具有十分重要的意义。文中提出在异形柱框架节点核心区加入 T 形钢筋、槽形钢筋或 X 形配筋对节点薄弱部位进行增强, 研究 T 形钢筋、槽形钢筋或 X 形配筋对异形柱节点薄弱部位的增强效果, 为异形柱框架结构进一步推广及应用提供试验及理论研究依据。

1 模型设计及试验概况

试验设计的 8 个异形柱节点试件的参数如表 1 所示。各异形柱框架节点试件的尺寸及配筋情况如图 1 所示。钢筋及 X 形配筋均位于节点核心区, 钢筋高度为 225 mm, 三分点处用直径为 6 mm HPB235 连接。

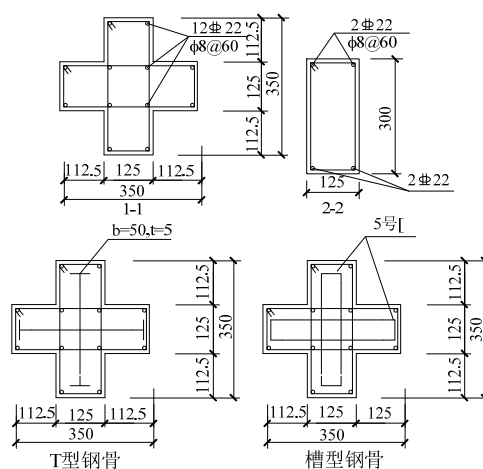
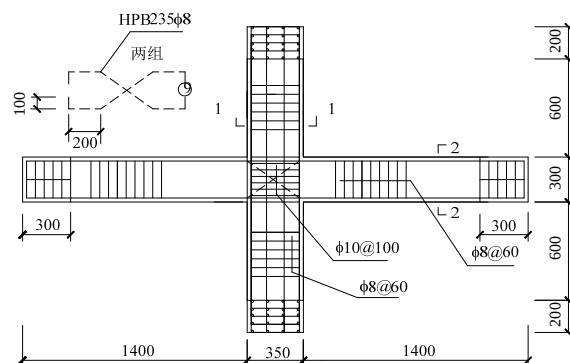
表 1 节点试件参数

Table 1 Joint specimen parameter

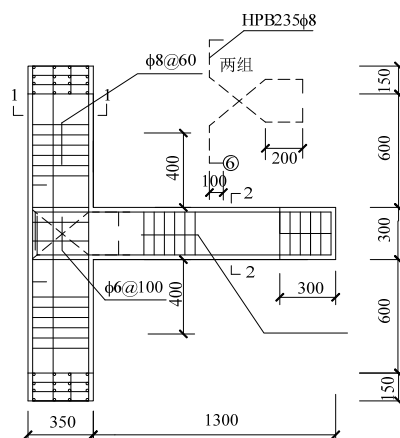
节点类型	试件编号	节点核心区改善方法
中节点	J-+	未增强
	J-T	加入 T 形钢筋
	J-[]	加入槽形钢筋
	J-X	X 形配筋
边节点	J-T	未增强
	J-TT	加入 T 形钢筋
	J-T[]	加入槽形钢筋
	J-TX	X 形配筋

试件梁柱纵筋采用 HRB400, 其中直径为 18 mm 的钢筋屈服强度为 445 MPa, 极限强度为 613 MPa; 直径为 22 mm 的钢筋屈服强度为 480 MPa, 极限强度为 623 MPa; 箍筋采用 HPB235, 直径为 6 mm 钢筋屈服强度为 295 MPa, 极限强度为 449 MPa; 直径为 10 mm 钢筋屈服强度为 333 MPa, 极限强度为 432 MPa。混凝土的强度等级为 C50, 混凝土浇筑时, 预留 100 mm×100 mm×300 mm 的 3 个混凝土棱柱体试块和 3 个边长为 150 mm 的混凝土立方体试块, 测定钢筋增强节点试件的混凝土立方体抗压强度为 45.8 MPa, 轴心抗压强度为 31.3 MPa; X 形配筋增强的节点试件的混凝土立方体抗压强度为 51.6 MPa, 轴心抗压强度为 31.6 MPa; 未增强的节点试件的混凝土立方体抗压强度为 70.4 MPa, 轴心抗压强度为 39.0 MPa。

试验加载时采用拟静力加载方案, 将竖向千斤顶安装在反力梁下用于施加柱顶轴向力, 中节点试件设计轴压比为 0.23, 设计轴力为 350 kN; 边节点试件设计轴压比是 0.17, 设计轴力为 250 kN。在中节点试件梁端施加反对称荷载的两个拉压千斤顶分别固定在反力横梁和静力台座上, 在边节点试件的梁端施加荷载的拉压千斤顶固定在静力台座上。异形柱节点试件的试验加载装置见图 2。试验的加载程序为荷载-位移混合控制, 如图 3 所示。屈服前以荷载控制, 屈服后以位移控制, 当荷载降至 85% 的极限荷载时, 试件破坏。



(a) J-+



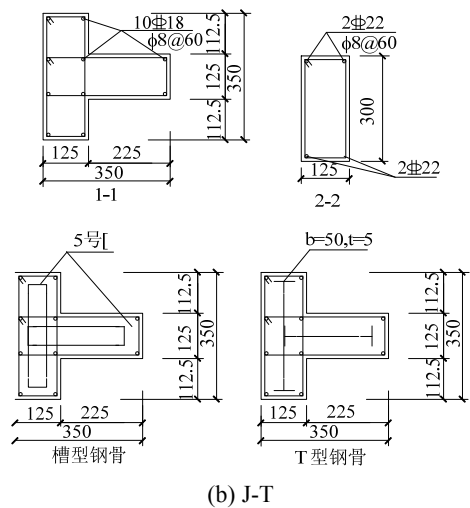


图 1 模型配筋情况 /mm
Fig.1 Details of specimen

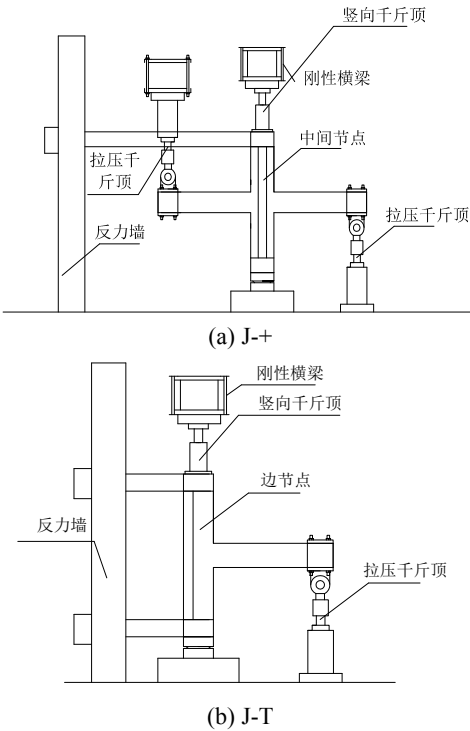


图 2 试验装置
Fig.2 Test setup

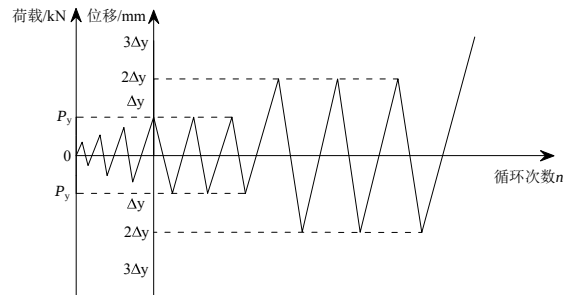
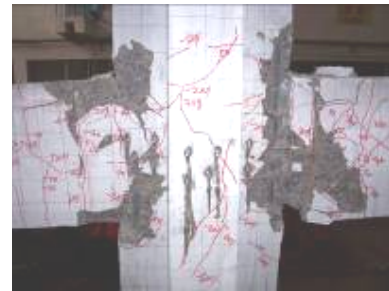


图 3 加载程序
Fig.3 Program of test loading

2 试验结果分析

2.1 破坏特征

8 个异形柱节点的破坏特征如图 4 所示。



(a) J-+



(b) J-+



(c) J-+



(d) J-+



(e) J-+



(f) J-TT



(g) J-T[



(h) J-TX

图 4 节点的破坏形态

Fig.4 Failure pattern of joint

比较 8 个节点试件的受力破坏过程可以看出：节点的破坏形态类似。首先梁端的受拉区有少量弯曲裂缝出现，又有交叉斜裂缝出现在节点核心区腹板的中部。随着荷载的继续增加，裂缝不断延伸发展，与未增强的节点试件相比，T 形钢骨、槽型钢骨、X 形配筋增强的节点试件腹板处的斜裂缝数量较多而宽度较小。试件破坏时，与未增强的节点试件相比，T 形钢骨、槽型钢骨、X 形配筋增强的节点试件的裂缝宽度减小，试件破坏形态得到较明显的改善，可见，T 形钢骨、槽型钢骨或 X 形配筋在混凝土异形柱框架节点核心区混凝土受力性能方面发挥了较为重要的作用，满足了节点核心区“强节点弱构件”的设计原则。

2.2 承载能力

8 个异形柱节点的荷载如表 2 所示。

从表 2 中可以看出，T 形钢骨增强的异形柱中节点试件 J-+T 和边节点试件 J-TT 的开裂荷载平均

值分别比未增强的中节点试件 J-+和边节点试件 J-T 的提高约 22%和 2.5%，屈服荷载平均值分别提高约 11%和 19%，极限荷载平均值分别提高约 18%和 5%。槽形钢骨增强的异形柱中节点试件 J-+T 的开裂荷载、屈服荷载及极限荷载平均值比 J-+的分别提高约 20%、5.6%、12%，槽形钢骨增强的异形柱边节点试件 J-TT 的开裂荷载、屈服荷载及极限荷载平均值比 J-T 的分别提高约 2.5%、22%、9%，中节点 J-+X 的开裂荷载平均值比 J-+的提高 13.5%，屈服荷载平均值提高 45%，极限荷载平均值提高 27%；X 形配筋增强的边节点的开裂、屈服及极限荷载也比未增强的高。这表明 T 形钢骨、槽形钢骨或 X 形配筋的加入均能够提高节点的承载能力。在提高节点承载能力方面，不同改善措施中 X 形配筋的效果更显著。

表 2 节点承载能力

Table 2 Bearing capacity of joints

试件 编号	加载 方向	荷载/kN		
		开裂	屈服	极限
J-+	正向	37.50	45.40	58.00
	反向	33.00	56.85	74.50
	平均	35.25	51.13	66.25
J-+T	正向	44.50	60.03	83.50
	反向	41.50	53.67	73.00
	平均	43.00	56.85	78.25
J-+[	正向	40.00	51.17	71.00
	反向	44.50	56.77	77.50
	平均	42.25	53.97	74.25
J-+X	正向	40.50	78.50	87.00
	反向	39.50	70.00	81.00
	平均	40.00	74.25	84.00
J-T	正向	36.00	55.30	70.00
	反向	35.00	56.70	80.00
	平均	35.50	56.00	75.00
J-TT	正向	40.00	70.12	81.00
	反向	40.00	62.88	76.00
	平均	40.00	66.50	78.50
J-T[	正向	41.00	72.70	86.00
	反向	41.00	64.27	77.00
	平均	41.00	68.49	81.50
J-TX	正向	39.00	75.00	85.00
	反向	40.00	74.00	84.00
	平均	39.50	74.50	84.50

2.3 滞回特性

8 个节点试件的弯矩-转角滞回曲线如图 5 所示。弯矩根据试验测得的梁端剪力对梁柱节点交界处取矩得到，转角指梁端位移与梁柱节点交界处至梁端长度之比。

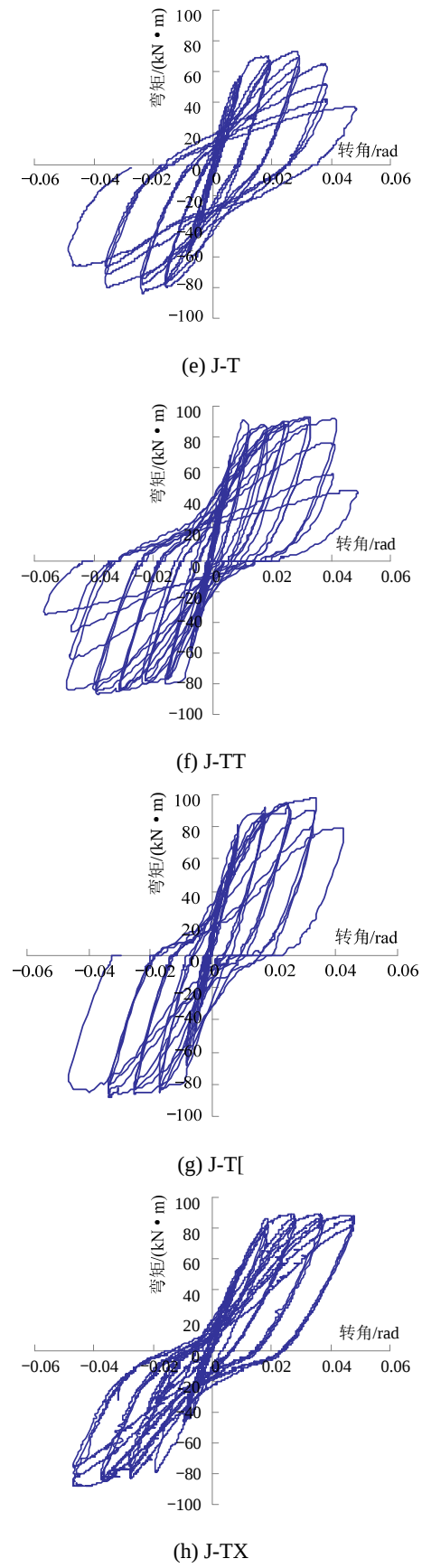
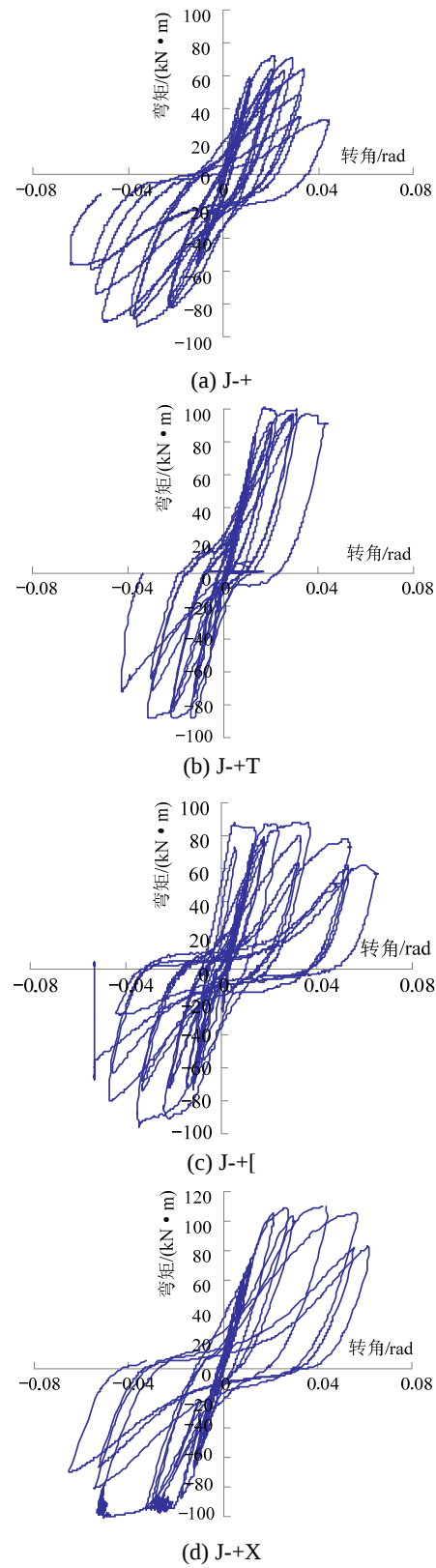


图 5 滞回曲线
Fig.5 Hysteretic curves

从图 5 可以看出, 三种改善措施所对应的滞回曲线均比未进行增强的异形柱节点的饱满, 节点的弯矩转角也大于未改善的异形柱节点试件。未增强的异形柱节点试件的滞回曲线加载前期滞回性能较好, 后期承载力下降较快, 强度退化较快, 卸载后的残余变形也较大, 说明在低周往复荷载作用下, 未增强的异形柱节点试件的累积损伤程度不断增加, 出现的不可恢复的塑性变形较大。而在节点核心区加入钢骨及 X 形配筋的节点试件的滞回曲线较为饱满, 试件的刚度退化较为缓慢, 滞回曲线中部“捏缩”效应得到改善, 这表明在 T 形钢骨、槽形钢骨或 X 形配筋均能改善节点的滞回特性。与 T 形钢骨、槽形钢骨增强的异形柱节点试件相比, X 形配筋增强的试件的弯矩转角得到进一步的提高, 效果更为显著。

2.4 耗能能力

试件各级位移下最后一次循环时的等效粘滞阻尼系数—梁端位移曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 在加载初期各异形柱节点试件等效粘滞阻尼系数一般很小。当异形柱节点的位移达到屈服后, 等效粘滞阻尼系数随位移增加而快速增加。在加载过程中, 在相同位移处, 未增强的异形柱节点试件的等效粘滞阻尼系数比钢骨或 X 形配筋增强的等

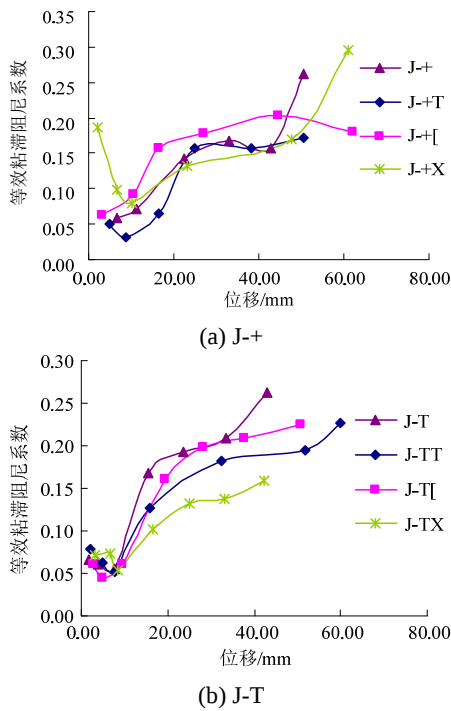


图 6 等效粘滞阻尼系数-位移曲线

Fig.6 Equivalent viscous damping coefficient-displacement curve

效粘滞阻尼系数高, 说明异形柱节点的非弹性的耗能能力强, 结构的弹塑性变形大, 节点试件的破坏比较严重。

2.5 刚度退化

8 个异形柱节点的刚度-梁端位移曲线如图 7 所示。

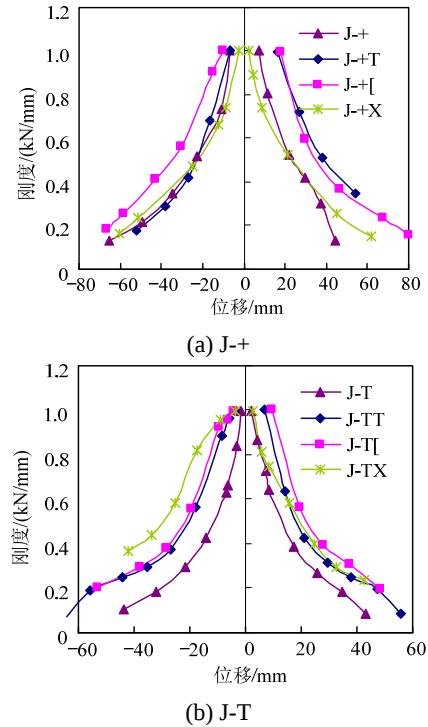


图 7 刚度退化曲线

Fig.7 Curves of stiffness degradation

从图 7 中可以看出在异形柱中节点核心区加入 T 形钢骨、槽形钢骨及 X 形配筋的试件刚度退化曲线比未被增强的试件刚度退化曲线平缓; 异形柱边节点核心区加入 T 形钢骨、槽形钢骨及 X 形配筋的节点试件刚度退化曲线在加载后期比未被增强的试件刚度退化曲线平缓, 这说明在节点核心区加入 T 形钢骨、槽形钢骨及 X 形配筋可以减缓试件裂缝的发展, 从而减缓试件的刚度退化。

2.6 变形能力

8 个节点各阶段的位移如表 3 所示。

从表 3 中可以看出, T 形钢骨增强的 J-+T、槽形钢骨增强的 J-+I 或 X 形配筋增强的 J-+X 的极限位移比未增强的节点试件 J-+ 的极限位移分别提高约 1.5%、1.8% 和 46.8%, 同时破坏位移分别提高约 4.8%、39.9% 和 20.2%, 边节点核心区加入钢骨的试件 J-TT、J-TI 和加入 X 配筋的试件 J-TX 的各项荷载对应的位移平均值也均大于未增强的异形柱边节点 J-T 的位移平均值, 这说明在异形柱节点核

心区加入钢骨及 X 形配筋均能提高异形柱节点的变形能力。

表 3 节点位移
Table 3 Displacement of joint

试件 编号	位移/mm			
	开裂	屈服	极限	破坏
J-+	7.17	13.47	32.62	50.66
J-+T	8.93	13.40	33.10	53.10
J-+[	10.69	14.98	33.21	70.85
J-+X	7.45	16.97	47.89	60.88
J-T	3.77	8.17	23.76	37.41
J-TT	4.86	12.85	41.07	60.01
J-T[	4.81	11.93	37.74	50.71
J-TX	6.87	14.84	33.58	—

3 累积损伤

累积损伤模型综合反映了混凝土结构在低周往复荷载作用下变形过程中能量耗散和刚度退化等累积损伤性能。结构在任意循环下累积损伤程度可用累积损伤指标 D_{ey} 表示^[10]。按式(1)计算异形柱结构构件的累积损伤指标。公式中符号表示的意义如图 8 所示。

$$D_{ey} = \frac{K_0 \Delta_i^2 - (\Delta_{i0} f_1(\Delta_i) d\Delta_i + \Delta_{il} f_2(-\Delta_i) d\Delta_i)}{K_0 \Delta_i^2} \quad (1)$$

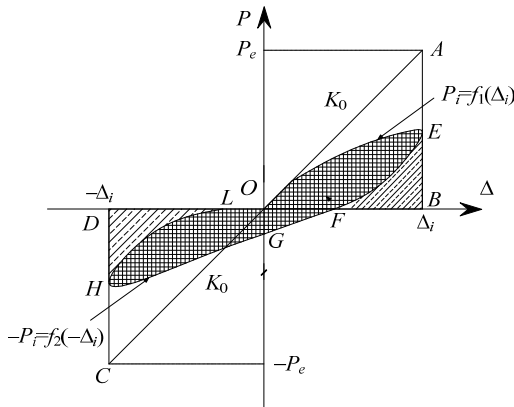


图 8 试件受力状态

Fig.8 Mechanical state of specimens

式中： K_0 为结构构件初始刚度； $f_1(\Delta_i)$ 、 $f_2(-\Delta_i)$ 表示第 i 次循环正向和反向的加载函数； $\pm\Delta_i$ 表示第 i 次循环正反向加载至峰值点荷载对应变形。

根据外力做功以及能量守恒定律，累积损伤指标 D_{ey} 又可以按式(2)计算。8 个节点的累积损伤指标如表 4 所示。

$$D_{ey} = \frac{(S_{\Delta OAB} + S_{\Delta OCD}) - (S_{OEFHGL} + S_{BEF} + S_{DHL})}{S_{\Delta OAB} + S_{\Delta OCD}} \quad (2)$$

表 4 累积损伤指标

Table 4 Cumulative damage index

试件编号	初 裂	0.2 mm 裂缝	屈服	极限	破坏
J-+	0.02	0.38	0.53	0.73	0.93
J-+T	0.06	0.59	0.51	0.70	0.88
J-+[	0.01	0.57	0.50	0.71	0.89
J-+X	0.01	0.58	0.42	0.69	0.87
J-T	0.06	0.39	0.51	0.79	0.95
J-TT	0.02	0.57	0.45	0.78	0.86
J-T[	0.03	0.50	0.48	0.75	0.82
J-TX	0.08	0.57	0.46	0.67	—

由表 4 可知，与屈服时累积损伤指标值相比，三种不同的改善措施的均比未进行改善的节点的值小，表明在节点核心区加入 T 形钢骨、槽形钢骨或 X 配筋的改善措施对混凝土开裂和裂缝宽度的发展起到了延缓的作用。极限阶段及破坏阶段，T 形钢骨、槽形钢骨或 X 配筋三种改善措施的累积损伤指标分别比未进行改善的节点试件的小，说明三种改善措施均能起到减轻节点的累积损伤的作用。对比 T 形钢骨、槽形钢骨或 X 配筋改善措施，加入 X 形配筋的累积损伤指标值分别小于加入 T 形钢骨和槽形钢骨的，表明 X 形配筋在减缓累积损伤程度方面效果更显著。

4 结论

(1) 在异形柱节点核心区加入 T 形钢骨、槽形钢骨或 X 形配筋均能够延缓混凝土开裂，使试件节点处裂缝多而宽度小，混凝土剥落程度减轻，节点的破坏形态得到改善。

(2) 三种改善措施均能够改善异形柱节点试件的滞回特性，提高节点的承载能力、变形能力，减缓节点后期的刚度退化。

(3) 在异形柱节点核心区加入 T 形钢骨、槽形钢骨或 X 形配筋可以减轻异形柱节点试件屈服以后的累积损伤程度。

(4) 在节点核心区加入 X 形配筋对改善节点的抗震性能的效果优于 T 形钢骨、槽形钢骨增强的异形柱节点，且 X 形配筋在施工中较钢骨空间骨架的连接简单方便。

参考文献：

[1] Laura N, Lowes, Arash Altoontash. Modeling reinforced-concrete beam-column joints subjected to cyclic loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(12): 1686—1697.

- [2] Rong Xian, Zhang Jianxin, Li Yanyan. Experimental research on seismic behavior of interior joints of specially shaped columns reinforced by fiber [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 94-96 : 551—555.
- [3] Wang Wen. Capacity analysis on T-shaped exterior joints of reinforcement concrete column [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(8): 186—189.
- [4] 曹祖同, 陈云霞, 吴戈, 等. 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.
Cao Zutong, Chen Yunxia, Wu Ge, et al. Strength study on joints of steel reinforced concrete special-shaped column frame [J]. Building Structure, 1999(1): 42—46. (in Chinese)
- [5] 柯晓军, 陈宗平, 薛建阳, 等. 反复荷载下型钢混凝土异形柱粘结滑移性能研究[J]. 工程力学, 2013, 30(2): 211—218.
Ke Xiaojun, Chen Zongping, Xue Jianyang, et al. Study on bond slip behavior of src special-shaped columns under cyclic recersed loading [J]. Engingeering Mechanics, 2013, 30(2): 211—218. (in Chinese)
- [6] 熊黎黎, 谢群, 张少钦. 钢筋混凝土异形柱框架顶层边节点受剪承载力的理论分析[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2007, 21(3): 41—46.
Xiong Lili, Xie Qun, Zhang Shaoqin. Theoretical analysis on shearing strength of top story exterior joints in R.C. frame structure with special- shaped columns [J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Science), 2007, 21(3): 41—46. (in Chinese)
- [7] 陈昌宏, 单建, 马乐为, 等. 钢筋混凝土异形柱框架中节点抗震性能试验[J]. 工业建筑, 2007, 37(2): 6—10.
Chen Changhong, Shan Jian, Ma Lewei, et al. Seismic performance experiment on the special-shaped column frame structures joints of reinforced concrete [J]. Industrial Building, 2007, 37(2): 6—10. (in Chinese)
- [8] 王丹, 刘明, 黄承逵. T 形柱框架节点延性及承载力的试验研究[J]. 建筑结构, 2006, 36(2): 36—39.
Wang Dan, Liu Ming, Huang Chengkui. Experimental studies on ductility and shear strength of RC joints with T-shaped columns [J]. Building Structure, 2006, 36(2): 36—39. (in Chinese)
- [9] 《混凝土异形柱结构技术规范》编制组. 天津市异形柱框轻结构的研究及技术规程编制[J]. 建筑结构, 1999(1): 7—10.
Compiler of Specification. Study and compilation of Tianjin technical specification for lightweight framed structures with special-shaped columns [J]. Building Structure, 1999(1): 7—10. (in Chinese)
- [10] 刁波, 李淑春, 叶英华. 反复荷载用下混凝土异形柱结构累积损伤分析及试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 57—63.
Diao Bo, Li Shuchun, Ye Yinghua. Analysis and experiment of cumulated damage of RC structures with special columns under cyclic loading [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 57—63. (in Chinese)