

# RC 框架变梁变柱中节点抗裂性能试验

吴 涛,刘伯权,邢国华,姚显贵,杨 乐

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

**摘 要:**为了研究 RC 框架变梁变柱中节点的抗裂性能,进行了 6 个变梁变柱中节点试件在低周反复荷载作用下的拟静力试验,分析了节点核心区尺寸、轴压比等因素对异型中节点抗裂性能的影响。研究表明:异型节点初裂时斜裂缝主要出现在由小梁和上柱构成的小核心区,小核心区开裂荷载为极限荷载的 50%~60%;抗裂性能较常规节点劣化,初裂阶段的剪力基本由小核心区混凝土承担,增大轴压比可以提高异型中节点的抗裂承载能力。提出的变梁变柱中节点抗裂承载力计算公式,可供结构工程设计时参考。

**关键词:**结构工程;RC 框架;异型中节点;抗裂性能

**中图分类号:**TU375.4 **文献标志码:**A

## Crack resistance test of interior joints with abrupt reduction in beam and column section in reinforced concrete frame

WU Tao, LIU Bo-quan, XING Guo-hua, YAO Xian-gui, YANG Le

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** Six specimens of abnormal interior joints were tested under reversed cyclic loading. Experiments were carried out to investigate the influence of joint core dimensions and axial compression ratio on crack resistance of abnormal joints. The results show that: cracks mainly appear in the minor core (determined by the small beam and the top column); the crack resistance loads are from 50% to 60% of the ultimate load of abnormal interior joints, and the crack resistance is worse than that of ordinary joints; the crack resistance capacity is chiefly provided by the minor core concrete, and axial compression ratio is a significant parameter to increase the crack resistance capacity. A theoretical formula of crack resistance capacity was proposed, and it can be served as reference for engineering practice. 5 tabs, 2 figs, 9 refs.

**Key words:** structure engineering; RC frame; abnormal interior joint; crack resistance

## 0 引 言

近年来,随着建筑结构向大型、大跨方向发展,梁柱截面发生变化的异型节点大量出现。该类非常规节点的特点是节点核心处两侧梁截面和上下柱截

面尺寸变化较大,其受力特征明显不同于常规节点。中国现行规范<sup>[1-2]</sup>中有关该类节点的处理,仅是从经验或概念意义上考虑,缺乏充足的试验依据<sup>[3-5]</sup>和深入的理论分析。由于异型中节点部位出现裂缝后修复很困难,所以必须对含有该类非常规节点的重要

建筑物<sup>[6-7]</sup>进行节点核心区抗裂度验算。因此,本文对 6 个钢筋混凝土异型中节点进行试验研究,分析了节点核心区尺寸、轴压比等因素对异型中节点抗裂性能的影响,并提出变梁变柱异型中节点抗裂承载力的实用计算公式。

1 试验概况

1.1 试件设计

本次试验制作了 6 个钢筋混凝土框架异型中节点梁柱组合体,模型的缩尺比为 1:3,试件的配筋大、小均按现行规范进行计算。主要研究参数为:大、小梁刚度比、节点区配箍率、轴压比和上柱截面变化等,具体试件尺寸及参数如表 1 所示;典型试件的配筋如图 1 所示。试验假定梁柱反弯点均位于跨

中及柱中,所有试件按照“强构件弱节点”的原则进行设计,预期破坏模式为节点核心区剪切破坏。

1.2 加载装置

试验加载装置如图 2(见下页)所示。试验时,在柱顶用液压千斤顶对试件施加轴力并保持恒定,随后用 MTS 伺服作动器在梁端施加同步反对称低周往复荷载。在试验加载全过程中均采用位移控制。大、小梁端荷载-位移滞回关系曲线由 MTS (Mechanical Testing & Simulation,力学试验模拟加载系统)加载系统自动进行采集,钢筋、混凝土的应变及电测百分表均与 DH-3816 数据采集系统相连,试验时可连续量测与记录,并在每一循环峰值时描绘裂缝的位置及走向。当大、小梁端荷载降低至峰值荷载的 80%以下时,停止加载,终止试验。

表 1 中节点试件尺寸及参数

试件编号		WJ-1	WJ-2	WJ-3	WJ-4	WJ-5	WJ-6
大梁	$b\times h$	180×500	180×500	180×500	180×500	180×500	180×500
	纵筋	2×3Φ16	2×3Φ16	2×3Φ16	2×3Φ16	2×3Φ16	2×3Φ16
小梁	$b\times h$	180×400	180×400	180×350	180×300	180×250	180×250
	纵筋	2×3Φ16	2×3Φ16	2×3Φ16	2×3Φ16	2×2Φ16	2×2Φ16
柱	$b\times h$	260×260	220×260(上柱) 260×260(下柱)	260×260	260×260	260×260	220×260(上柱) 260×260(下柱)
	纵筋	2×3Φ20	2×3Φ20	2×3Φ20	2×3Φ20	2×3Φ20	2×3Φ20
节点区	箍筋	Φ6@120	Φ6@100	Φ6@120	Φ6@120	Φ6@120	Φ6@100
	体积配箍率/%	0.363	0.435	0.363	0.363	0.363	0.435
	轴压比	0.152	0.163	0.203	0.152	0.203	0.201

注: $b$ 为梁宽; $h$ 为梁高;单位为 mm。

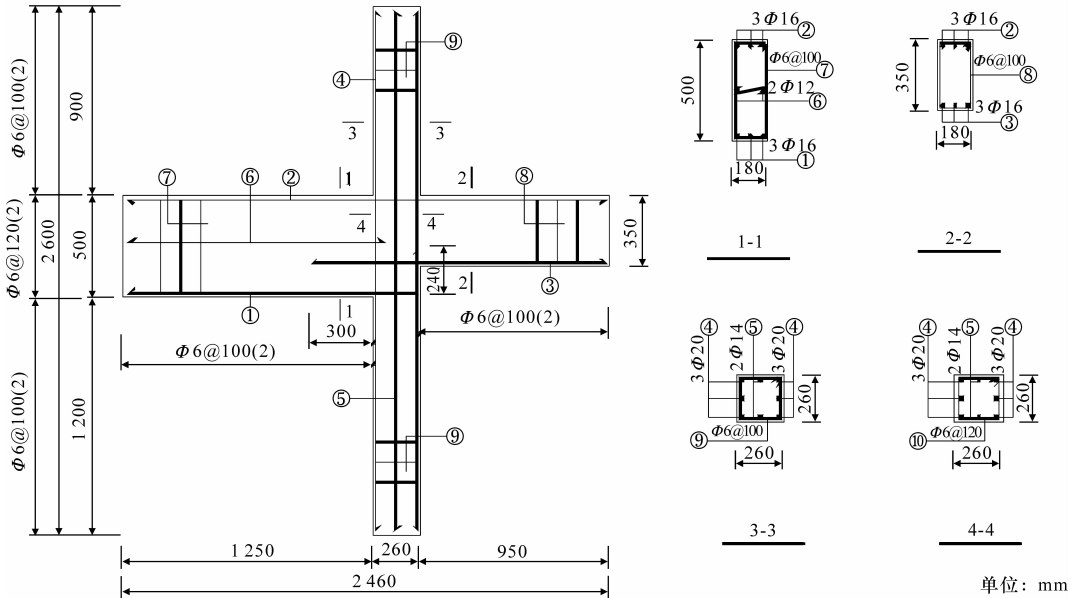


图 1 试件配筋

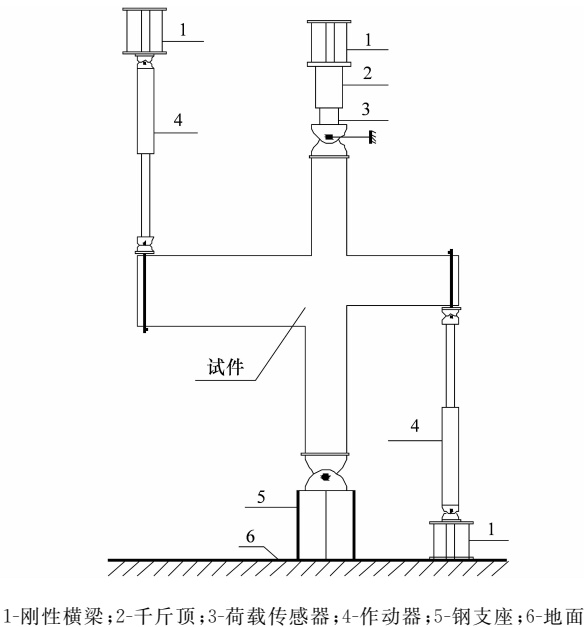


图 2 试验装置

## 2 试验结果分析

### 2.1 节点裂缝的开展情况

在反复荷载作用下,试件破坏的历程和形态经历了初裂、通裂、极限和破坏 4 个阶段。节点开裂以前基本处于弹性工作阶段,刚度变化很小,虽经反复荷载,残余变形甚微。节点开裂时,第一条对角斜裂缝出现在小核心区(小梁与上柱构成的区域)中心位置附近,宽度一般为 0.04 mm;箍筋应力在跨越裂缝处有较大增长,应变为  $(200\sim300)\times10^{-6}$ 。核心区裂缝一旦出现,荷载略增或稍经反复荷载,裂缝迅速发展,斜裂缝很快裂通对角,宽度可达 0.3~0.5 mm,此时平行于对角线方向出现 2~5 条新裂缝,但裂缝的宽度及长度均较小。试件通裂后,荷载继续增加,核心区裂缝在原有基础上明显加宽,可达到 1 mm 以上;几次加载循环后,节点区变形急剧增大,承受外荷载的能力达到极值,此时小核心区混凝土开始剥落。试件破坏后,柱筋和箍筋外露。

试验表明:初裂前试件节点区基本处于弹性阶段,梁端荷载与位移曲线呈直线;异型节点的初裂荷载为极限荷载的 50%~60%;节点初裂时斜裂缝主要出现在小核心区,宽度为 0.02~0.04 mm,极限阶段前节点试件剪力主要由小核心区混凝土承担,由此可见,对异型中节点抗裂性能分析时,应以小核心区为主要研究对象。

### 2.2 影响因素分析

节点试件初裂的主要试验结果如表 2 所示。

表 2 节点试件初裂的主要试验结果

试件编号	混凝土强度/MPa	轴向力/kN	初裂剪力/kN	
			正向	反向
WJ-1	49.6	330	207.1	164.5
WJ-2	49.6	300	212.2	206.8
WJ-3	49.6	440	255.1	258.8
WJ-4	49.6	330	200.0	231.5
WJ-5	49.6	440	266.4	266.1
WJ-6	49.6	370	240.9	211.8

由表 2 可以看出,钢筋混凝土框架异型节点的抗裂性能主要受以下几个因素的影响。

(1)节点初裂时,抗剪承载力主要由小核心区混凝土承担,箍筋承担的剪力甚小,小梁截面高度变化对承载力的影响不明显;节点的开裂实质上是由于核心区存在应力集中现象,与小梁断面高度无直接关系,仅与核心区参与抵抗剪力的面积有关。

(2)轴压比增大后,不仅可以提高异型节点的初裂剪力(提高幅度正向为 16.8%~21.5%,反向为 10.5%~36.1%),还可以增大交叉斜裂缝与水平轴线的夹角。这主要是因为轴压比增大后,可以增大斜压杆机构中的压应力。

(3)节点试件正向加载与反向加载的受力性能有差异,表现出一定的非对称性。其原因是,模型本身为不对称结构,故在反复荷载作用下性能也必然不一致。

## 3 异型中节点抗裂承载力计算

### 3.1 抗剪承载力公式的建立

在异型节点抗裂计算<sup>[8-9]</sup>时,可假定:①节点初裂前处于弹性工作状态;②核心区开裂前节点剪力全部由混凝土承担;③以小核心区为控制节点初裂的基本计算单元。

按照弹性体在双向应力作用下斜截面上的主拉应力计算公式,可得到核心区裂缝出现时节点的剪应力为

$$\tau = \sqrt{f_{tk}^2 + f_{tk}\sigma'_c + f_{tk}\sigma_b + \sigma'_c\sigma_b} \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为斜截面裂缝出现时节点的剪应力; $f_{tk}$ 为节点区混凝土的抗拉强度标准值; $\sigma_b$ 为梁上的轴向应力,对于本次试验可以忽略不计; $\sigma'_c$ 为上柱的轴向应力, $\sigma'_c = \alpha\sigma_c = \alpha N/(b_ch_c)$ ;其中  $\sigma_c$  为上柱的轴向压应力; $b_c$ 、 $h_c$  分别为上柱的宽度和高度; $N$  为轴压力; $\alpha$  为加载时竖向产生的附加荷载对轴向应力的影响系数(表 3),建议取值为 0.93。

表 3 轴向应力影响系数

试件编号	轴向力 /kN	荷载差 /kN	轴向应力影响系数 $\alpha$	
			试验值	建议值
WJ-1	330	28.26	0.914	0.93
WJ-2	300	32.11	0.893	
WJ-3	440	9.94	0.975	
WJ-4	330	36.77	0.888	
WJ-5	440	17.85	0.959	
WJ-6	370	18.73	0.949	

在核心区出现裂缝时,异型节点的名义剪应力  $\tau_j$  为

$$\tau_j = V_j / (b_j h_j)$$

(2)

式中: $V_j$  为异型节点区水平剪力; $b_j$ 、 $h_j$  分别为异型节点小核心区的有效宽度和高度,可分别取上柱的宽度和高度。

传递到节点的水平方向剪应力,是通过梁筋与节点核心区混凝土之间的粘结力传递的,这一粘结应力的分布是不均匀的,所以节点的剪应力分布也不均匀。对此,可用剪应力影响系数  $\eta$  来考虑,还要考虑到箍筋、垂直钢筋等对核心区初裂的影响。 $\eta$  值根据试验确定,建议取值为 0.60,如表 4 所示。

在临界状态,即核心区出现裂缝时,框架异型节点开裂时的剪力  $V_{jc}$  为

$$V_{jc} = \eta b_j h_j f_{tk} \sqrt{1 + \frac{\alpha \sigma_c}{f_{tk}}}$$

(3)

表 4 剪应力影响系数  $\eta$

试件编号	加载方向	试验值 /kN	计算值 /kN	$\eta$ 的试验值	$\eta$ 的建议值
WJ-1	正向	207.1	359.1	0.577	0.60
	反向	164.5		0.458	
WJ-2	正向	212.2	310.2	0.684	
	反向	206.8		0.667	
WJ-3	正向	255.1	391.4	0.652	
	反向	258.8		0.661	
WJ-4	正向	200.0	359.1	0.557	
	反向	231.5		0.645	
WJ-5	正向	266.4	391.4	0.681	
	反向	266.1		0.680	
WJ-6	正向	240.9	330.5	0.729	
	反向	211.8		0.641	

3.2 抗剪承载力公式的验证

为了保证建筑物在“小震”情况下,不影响结构的正常使用,应验算“小震”时节点的抗裂度。按照文献[2],可对一般的框架梁柱节点核心区截面进行抗震验算。

表 5 为抗剪承载力试验值与计算值的比较。由表 5 可知,按本文公式所计算的值与试验结果非常

接近,且偏重于安全,可供实际工程设计时参考。

表 5 抗剪承载力试验值与计算值的比较

试件编号	加载方向	轴压力 N/kN	$\alpha$	$\eta$	$V_{exp}/\text{kN}$	$V_{cal}/\text{kN}$	$V_{exp}/V_{cal}$
WJ-1	正向	330	0.93	0.64	207.1	215.4	0.96
	反向				164.5		0.76
WJ-2	正向	300	0.93	0.64	212.2	186.1	1.14
	反向				206.8		1.11
WJ-3	正向	440	0.93	0.64	255.1	234.8	1.09
	反向				258.8		1.10
WJ-4	正向	330	0.93	0.64	200.0	229.8	0.87
	反向				231.5		1.01
WJ-5	正向	440	0.93	0.64	266.4	215.5	1.24
	反向				266.1		1.23
WJ-6	正向	370	0.93	0.64	240.9	198.3	1.21
	反向				211.8		1.07

注: $V_{exp}$ 、 $V_{cal}$  分别为抗剪承载力的试验值和计算值。

4 结 语

(1) 试验研究表明,异型节点初裂时斜裂缝主要出现在小核心区,小核心区开裂荷载为极限荷载的 50%~60%,其抗裂性能较常规节点的抗裂性能劣化。

(2) 异型节点初裂阶段的剪力主要由小核心区混凝土承担,增大轴压比可以提高试件的抗裂承载能力,增大交叉斜裂缝与水平轴线的夹角。

(3) 根据试验和分析,推导出钢筋混凝土框架异型中节点抗裂承载力计算公式,通过试验值与计算值的对比,说明该计算公式是实用的。

参考文献:

References:

[ 1 ] GB 50010—2002,混凝土结构设计规范[S].

[ 2 ] GB 50011—2001,建筑抗震设计规范[S].

[ 3 ] 吴 涛,刘伯权,白国良,等.大型厂房钢筋混凝土框排架结构中异型节点的抗震性能和设计方法研究[J].土木工程学报,2006,39(4):1-6.

WU Tao,LIU Bo-quan,BAI Guo-liang,et al. A study on the seismic behavior and the design method for irregular reinforced concrete frame joints of large-scale plant structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006,39(4):1-6.

[ 4 ] 吴 涛,刘伯权,白国良,等.大型厂房框排架结构变形与耗能性能试验[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(5):62-65.

WU Tao,LIU Bo-quan,BAI Guo-liang,et al. Experiment of deformation and dissipation property of major

[ 9 ] Taylor H P J, Clarke J L. Some detailing problems in concrete frame structures [J]. Structural Engineer, 1976, 54(1):19-32.

- [5] GBJ 5007—2002, 建筑地基基础设计规范[S].
- [6] JTJ 250—98, 港口工程地基规范[S].
- [7] Serguey A. Strength analysis in geomechanics[M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [8] 王志亮, 高峰, 殷宗泽, 等. 考虑侧向变形的路堤沉降—维法计算修正系数研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 763-768.
- WANG Zhi-liang, GAO Feng, YIN Zong-ze, et al. Study on modified factors for 1-D calculation of embankment settlement considering soil lateral deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 763-768.
- [9] 王志亮, 孙锡杰. 考虑土体应力历史影响的沉降修正初探[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1723-1726.
- WANG Zhi-liang, SUN Xi-jie. Discussion of settlement modification considering stress history of soil mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1723-1726.
- [10] 郑为中, 史其信. 基于贝叶斯组合模型的短期交通量预测研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 85-89.
- ZHEN Wei-zhong, SHI Qi-xin. Study of short-term freeway traffic flow prediction based on BAYESIAN combined model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 85-89.