

# 狗骨式钢框架子结构节点的累积变形 及耗能能力

孙国华<sup>1</sup>,冯进<sup>2</sup>,方有珍<sup>1</sup>,何源<sup>3</sup>

(1. 苏州科技大学江苏省结构工程重点实验室,江苏 苏州 215011; 2. 苏州科技大学建筑与城市规划学院,江苏 苏州 215011; 3. 北京建工土木工程有限公司苏州分公司,江苏 苏州 215104)

**摘要** 目的 研究在不同加载制度下狗骨式钢框架子结构中节点的累积塑性转角、累积延性比及累积耗能能力的计算方法,为钢框架结构基于性态的抗震设计理论提供参考. 方法 基于所完成的6榀狗骨式钢框架子结构的拟静力试验,给出了钢框架子结构中典型狗骨式节点的滞回曲线,归纳了所有狗骨式节点的破坏模式、累积塑性转角、累积延性比及累积耗能能力,重点考察加载制度、板件宽厚比对其性能的影响. 结果 钢梁板件宽厚比对钢框架子结构中狗骨式节点的显著屈服转角有一定影响,钢梁板件宽厚比越大,则狗骨式节点越易发生先屈曲后屈服现象. 加载制度对钢框架子结构中狗骨式节点的累积塑性转角及累积耗能能力有显著影响,所施加的循环位移越小,其累积塑性转角及累积耗能能力越大. 结论 通过统计分析回归了狗骨式节点的累积塑性转角、累积延性比及累积塑性耗能能力的计算公式,对提出狗骨式钢框架结构基于性态的抗震设计方法具有指导意义.

**关键词** 狗骨式节点;抗弯钢框架;子结构;加载制度;耗能能力

中图分类号 TU973.13 文献标志码 A

## Cumulative Deformation and Energy Dissipation Capacity of RBS Connections in Steel Frame Substructures

SUN Guohua<sup>1</sup>, FENG Jin<sup>2</sup>, FANG Youzhen<sup>1</sup>, HE Yuan<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Structure Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, China, 215011; 2. School of Architectural and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, China, 215011; 3. BCEG Civil Engineering Co., Ltd., Suzhou Branch, Suzhou, China, 215104)

**Abstract:** The approach for calculating the cumulative plastic rotation, cumulative ductility, and cumulative energy dissipation of reduced beam section (RBS) connections in steel frame under differ-

收稿日期:2016-11-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51578355);江苏省自然科学基金项目(BK20151200);江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人资助项目

作者简介:孙国华(1978—),男,副教授,博士,主要从事钢结构、组合结构抗震研究.

ent loading protocol was investigated, which can provide some useful references for improving performance-based seismic design (PBSD) method of steel frame. Based on the previous cyclic tests of steel frame substructures with RBS connections, the hysteretic curves of typical RBS connections were proposed. The failure mode, cumulative plastic rotation, cumulative ductility, and cumulative energy dissipation of RBS connections were concluded. Additionally, the influences of loading protocol and width-to-thickness of steel plate were also compared. The analytical results show that the width-to-thickness of steel plate has a certain effect on the significant yielding rotation of RBS connection. With the increase of steel plate width-to-thickness, the RBS connection easily produces local buckling. The loading protocol has an important influence on the cumulative deformation capacity and cumulative energy dissipation capacity of RBS connection. With the decrease of controlled loading displacement, the cumulative plastic rotation and cumulative energy dissipation capacity of RBS connection show the increasing tendency. The calculating formula of cumulative plastic rotation, cumulative ductility, and cumulative energy dissipation of RBS connections were constructed through statistic analysis, which had guiding significance for the PBSD method of steel frame.

**Key words:** reduced beam section (RBS) connection; moment-resisting steel frame; substructure; loading protocol; energy dissipation

狗骨式连接具有优良的塑性转动能力,非常适合在地震设防区的钢结构体系中使用<sup>[1]</sup>,也是我国现行《建筑抗震设计规范GB50011—2010》推荐使用的主要节点形式之一。目前,国内外学者已对狗骨式节点的抗震性能进行了大量试验及理论研究。Chen等<sup>[2]</sup>对5个翼缘呈锥型削弱的足尺狗骨式节点进行了低周往复加载试验,结果表明破坏时节点的塑性转角均已超过0.04 rad,表现出良好的塑性转动能力。Engelhardt等<sup>[3]</sup>进行了5个钢梁翼缘削弱型节点的循环加载试验,重点研究了削弱类型、削弱位置及削弱深度对变形能力的影响。Uang等<sup>[4-6]</sup>基于试验研究了采用混凝土楼板、钢柱截面、钢柱布置方式对狗骨式节点滞回性能的影响。此外, Jones等<sup>[7]</sup>也进行了8个足尺狗骨式节点的低周往复加载试验,重点研究了节点域厚度、混凝土楼板参数的影响。试验结果表明除1个试件由于钢梁面外扭转外,其余7个试件的最终塑性转角均超过0.04 rad,但研究发现狗骨式节点翼缘削弱区的钢梁腹板易发生局部屈曲。Nakashima等<sup>[8]</sup>试验研究了狗骨式节点在低周往复荷载作用下的钢梁整体稳

定性及平面外支撑对其稳定的影响,研究证实了美国钢结构协会规定的钢梁平面外支撑距离能完全确保狗骨式节点塑性转动能力的充分发展。Chen S J等<sup>[9]</sup>试验研究发现采用高强钢材的狗骨式节点在破坏时的塑性转角仍可达0.03 rad。Lee等<sup>[10]</sup>重点研究了节点域厚度及腹板连接类型对采用圆弧削弱的狗骨式节点滞回性能的影响。试验结果表明采用中、厚节点域的全焊狗骨式节点可获得较理想的变形能力,钢梁腹板采用螺栓连接的狗骨式节点变形能力较差。Zhang X F等<sup>[11]</sup>完成了6个足尺翼缘采用圆弧削弱型狗骨式节点的低周往复加载试验,主要考虑了钢柱截面及设置楼板的影响。研究证实了混凝土楼板可显著增大钢梁的面外刚度,减小钢梁翼缘削弱区的面外位移和钢柱的扭转变形,所有节点的塑性转角均能满足AISC规范的要求。Pachoumis等<sup>[12-13]</sup>基于试验及数值模拟证实了按欧洲规范设计的端板式、全焊狗骨式节点均实现良好的滞回性能和变形能力。美国学者Lignos等<sup>[14]</sup>对已完成的狗骨式节点试验结果进行了统计分析,建立了狗骨式节点的宏观弯矩-转角恢复力模型及地

震易损性曲线<sup>[15]</sup>,这对采用狗骨式节点钢结构体系的抗震性能分析及评估有重要参考价值.国内学者杨尉彪等<sup>[16-22]</sup>对狗骨式节点的翼缘削弱位置、削弱形状及深度等进行了系统试验及理论研究,进一步证实狗骨式节点的变形能力显著大于传统的栓焊混合节点.

目前,已有的狗骨式节点抗震性能试验不能真实地反映周边梁柱构件的影响.此外,不同加载制度对钢框架结构中狗骨式节点累积变形及耗能能力影响的研究也尚未涉及.基于此,笔者结合课题组已完成的6榀狗骨式钢框架子结构的拟静力试验,重点分析加载制度、钢梁板件宽厚比对钢框架子结构狗骨式节点累积变形及耗能能力的影响规律,研究成果可为完善狗骨式钢框架结构基于性

态的抗震设计方法提供参考.

## 1 试验概况

试验共设计了6榀狗骨式钢框架子结构试件,编号分别从Frame-1~Frame-6.试件Frame-1~Frame-5梁柱截面均相同,钢柱为HW150×150×7×10,钢梁为HM150×100×6×9.试件Frame-6的钢梁采用了较大板件宽厚比的截面,即HM150×100×3.2×4.5.所有试件参数见表1,几何尺寸见图1.试件的梁柱节点均采用梁端削弱型的狗骨式连接,翼缘采用对接焊接,钢梁腹板同钢柱翼缘上焊接的连接板通过3个10.9级M16高强螺栓连接,具体构造见图2.

表1 试件一览表

Table 1 Summary of test specimens

试件编号	层高/m	跨度/m	钢梁截面/mm	钢柱截面/mm	节点	加载制度
Frame-1	0.5+1+0.5	2	HM150×100×6×9	HW150×150×7×10	狗骨式	单向加载
Frame-2	0.5+1+0.5	2	HM150×100×6×9	HW150×150×7×10	狗骨式	标准加载
Frame-3	0.5+1+0.5	2	HM150×100×6×9	HW150×150×7×10	狗骨式	2Δ <sub>y</sub> 循环
Frame-4	0.5+1+0.5	2	HM150×100×6×9	HW150×150×7×10	狗骨式	4Δ <sub>y</sub> 循环
Frame-5	0.5+1+0.5	2	HM150×100×6×9	HW150×150×7×10	狗骨式	近场+标准加载
Frame-6	0.5+1+0.5	2	HM150×100×3.2×4.5	HW150×150×7×10	狗骨式	近场+标准加载

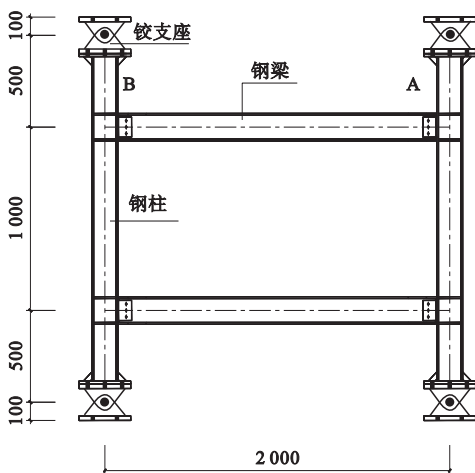


图1 狗骨式钢框架子结构的几何尺寸

Fig. 1 Dimensions of steel frame substructure with RBS connections

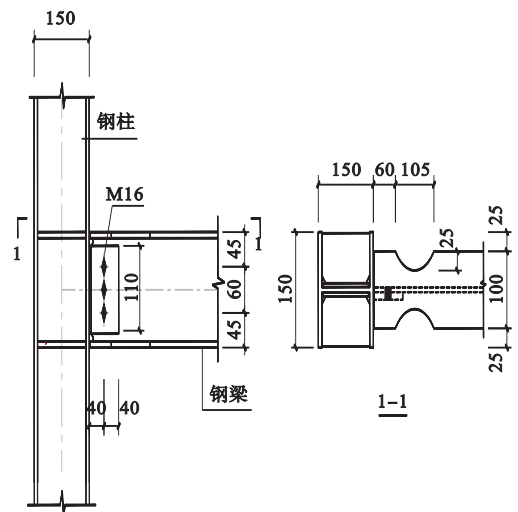


图2 狗骨式节点的几何尺寸

Fig. 2 Dimensions of RBS connection

试验加载装置及位移计布置见图3. 水平荷载通过连接在反力墙上的1 000 kN液压伺服作动器施加,钢柱上、下端均设置铰接支座与加载顶梁及地梁连接,铰接支座位于顶部及底部楼层一半的位置处,用于模拟反弯点的性

能.此外,设置了一套侧向限位装置,以避免在加载过程中试件出现面外失稳现象.

试验主要测试了楼层位移、所有节点的转角、节点域的剪切变形以及钢柱、钢梁关键部位的局部应变,具体布置见图3.

图4给出了本次试验所采用的4种加载制度.其中, $\Delta$ 为加载点水平位移; $N$ 为循环次数.试件Frame-1采用全程单向加载,直至试件破坏;试件Frame-2采用标准加载制度;试件Frame-3、Frame-4分别采用 $2\Delta_y$ 、 $4\Delta_y$ 等位移循环( $\Delta_y$ 为试件的显著屈服位移,根据试件Frame-1的试验结果确定),直至试件破坏.试件Frame-5、Frame-6采用两阶段加载,首先采用近场加载制度,如试件未破坏,则继续按试件Frame-2的标准加载制度施加,直至试件破坏.试件的详细信息、材性试验结果及整体性能分析结果见文献[22].

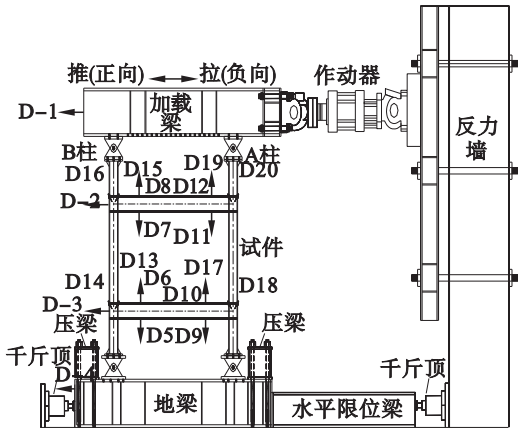
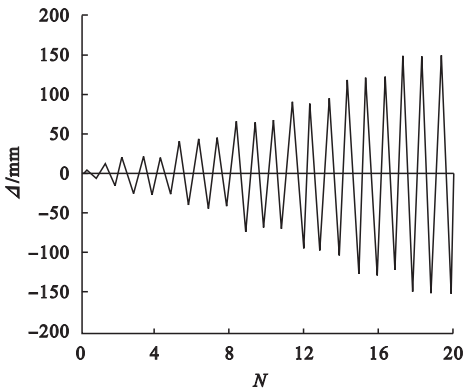
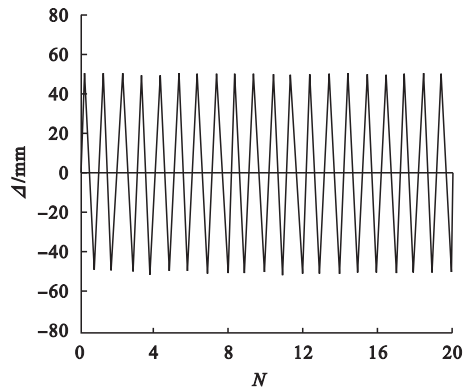


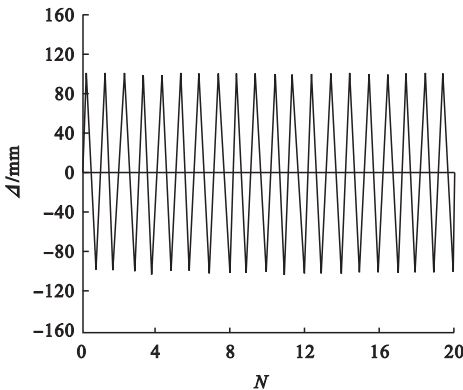
图3 加载装置  
Fig. 3 Test setup



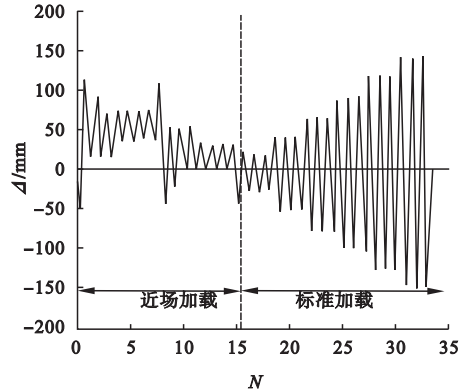
(a)试件Frame-2的加载制度



(b)试件Frame-3的加载制度



(c)试件Frame-4的加载制度



(d)试件Frame-5、Frame-6的加载制度

图4 加载制度

Fig. 4 Loading regime

## 2 试验结果与分析

### 2.1 狗骨式节点的破坏模式

由6榀狗骨式钢框架子结构的拟静力试验结果可知,塑性铰均出现在钢梁翼缘削弱位置.由于加载制度及钢梁板件宽厚比不同导致狗骨式节点主要出现3种破坏模式.

(1)试件 Frame - 1、Frame - 2、Frame - 4、Frame - 5 子结构所有狗骨式节点的转动能力均得到最大程度发挥,削弱位置的翼缘和腹板先屈服后屈曲,最后均形成了理想的塑性铰,呈延性破坏.由于试件 Frame - 2、Frame - 4 也在钢梁翼缘削弱部位形成塑性

铰,破坏现象与试件 Frame - 1、Frame - 5 类似,图 5(a)、(b)给出了试件 Frame - 1、Frame - 5 在试验终止时破坏形态.

(2)试件 Frame - 3 子结构中的狗骨式节点尽管在  $2\Delta_y$  等位移循环下已屈服,但部分狗骨式节点在多次循环后最终出现疲劳断裂破坏(见图 5(c)).

(3)试件 Frame - 6 子结构钢梁采用了较大宽厚比的板件,尽管所有节点的转动能力得到最大程度发挥,并形成理想的延性塑性铰,但削弱位置的翼缘及腹板先屈曲后屈服(见图 5(d)).



图5 狗骨式节点的破坏模式

Fig. 5 Failure modes of RBS connections

### 2.2 滞回曲线

本次试验通过布置的 D5 ~ D12 位移计(见图 3)监测了狗骨式钢框架子结构中所有节点的总转角,节点域的剪切变形通过沿对

角线方向设置的 D13 ~ D20 位移计量测.受篇幅所限,图 6 给出了狗骨式钢框架子结构 B 柱下部节点的弯矩( $M$ ) - 转角( $\theta$ )滞回曲线,其中弯矩根据虚功原理间接计算获得.



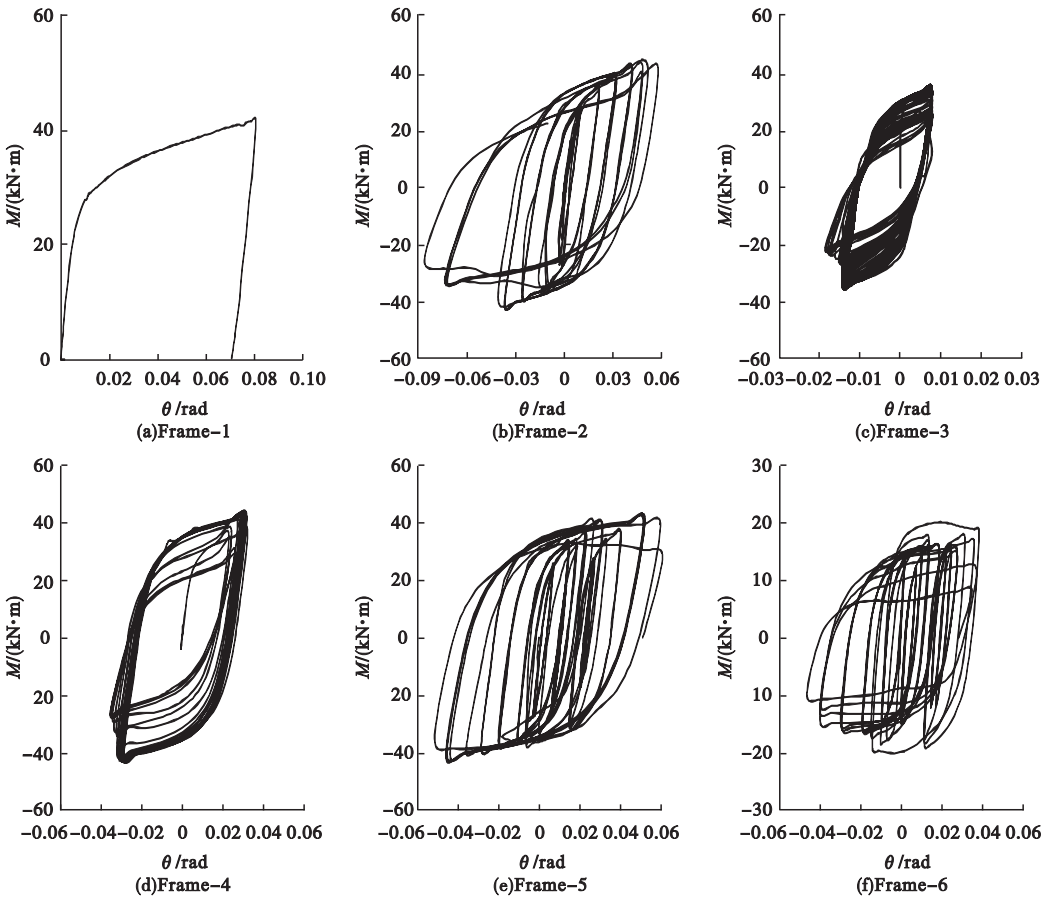


图6 典型狗骨式节点的弯矩-转角滞回曲线

Fig. 6 Moment-rotation hysteretic curves of typical RBS connections

由图6可知,加载制度对狗骨式节点滞回曲线形状无任何影响,均呈饱满的梭形,仅在钢梁翼缘削弱区出现裂纹后,所有试件的滞回曲线才开始出现一定程度的捏缩.随着裂纹的不断扩展,滞回曲线的捏缩程度在不断加剧.加载目标位移较小时,达到破坏时循环次数较多(试件Frame-3),反之较少(试件Frame-4).钢梁板件宽厚比较大的试件Frame-6在首次接近场制度加载时,由于钢梁翼缘及腹板先屈曲后屈服,导致后期曲线出现下降现象,这与采用厚壁钢梁的其他试件滞回曲线略有不同.

图7给出了狗骨式钢框架子结构B柱下部节点域的弯矩( $M$ )-剪切变形( $\theta_{\text{panel}}$ )滞回曲线.由图7可以看出,试件Frame-1中B柱下部节点域的最大剪切变形约为0.02 rad,大约占该节点总转角的25%.试件

Frame-2~Frame-4的节点域最大转角近似相等,在0.012 rad左右.试件Frame-2、Frame-4加载点施加了较大的位移,导致B柱下部节点产生转角均大于试件Frame-3的节点总转角.这说明试件Frame-2、Frame-4在B柱下部节点所产生的过大塑性变形主要由翼缘削弱区所形成的塑性铰转动提供.试件Frame-3由于加载点施加的目标位移较小(仅为 $2\Delta_y$ ),致使该试件翼缘削弱位置所形成的塑性铰并未出现过大大转动变形,节点转角仍以节点域剪切变形为主.试件Frame-5由于采用近场加载制度,加载初始节点域就进入塑性程度较深,特别是在后期的循环加载尤为不利,导致节点域剪切变形远大于其他试件.相反,试件Frame-6采用更为柔薄的钢梁截面,致使钢梁削弱部位的翼缘和腹板过早屈曲,节点的抗弯承载力显

著降低,节点域并未进入塑性,节点转角由翼缘削弱部位塑性铰转动提供.因此,加载过程、翼缘及腹板的宽厚比均对钢框架结构

中狗骨式连接的节点域变形发展产生较大影响.

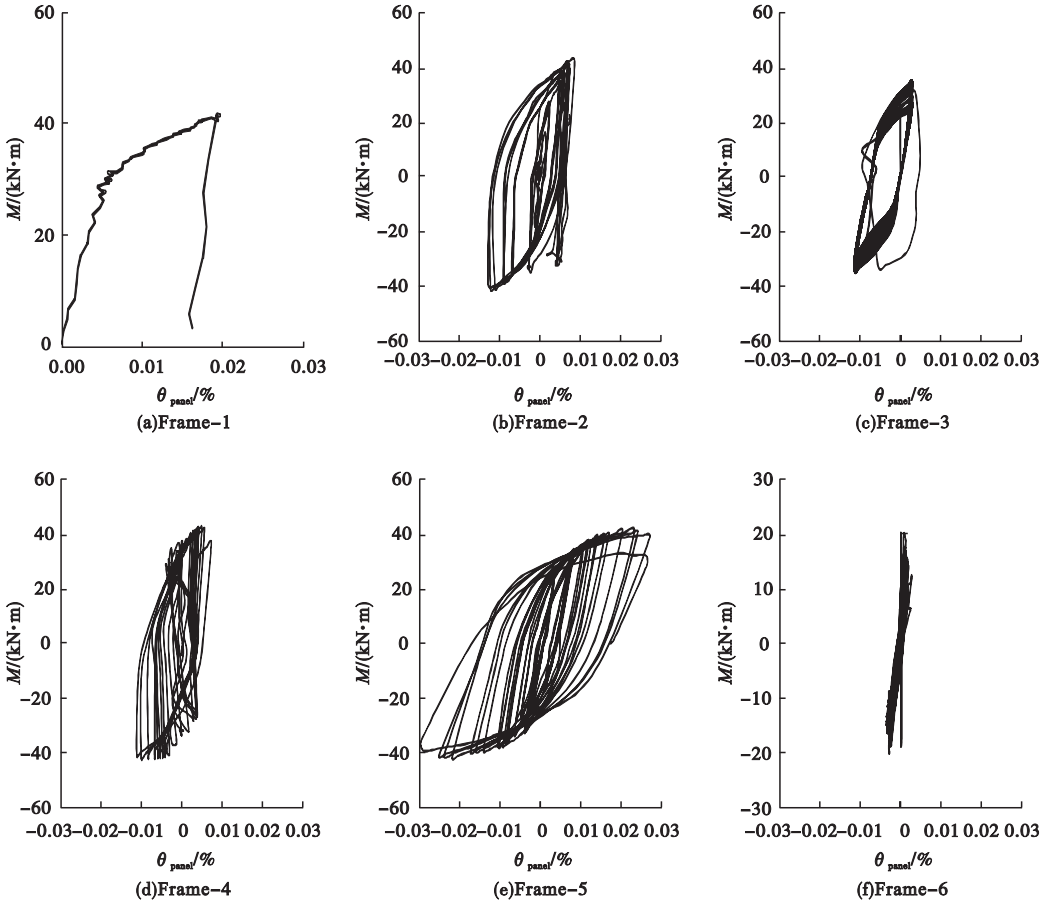


图7 典型狗骨式节点域弯矩-剪切变形的滞回曲线

Fig. 7 Moment-shear deformation hysteretic curves of panel zone in typical RBS connections

### 2.3 变形能力

试验所有试件均在钢梁端部形成较为理想的塑性铰,因此笔者旨在量化钢框架结构中呈理想延性破坏狗骨式节点的极限变形能力及累积变形能力.其中,极限变形能力可采用最大转角  $\theta_u$  或最大延性比  $\mu$  来描述,按式(1)计算:

$$\mu = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad (1)$$

式中: $\theta_u$  为狗骨式节点的最大转角; $\theta_y$  为狗骨式节点的屈服转角,按等能量法确定(见图8),即等效双折线在第1象限所包络的面积与原曲线面积相等.

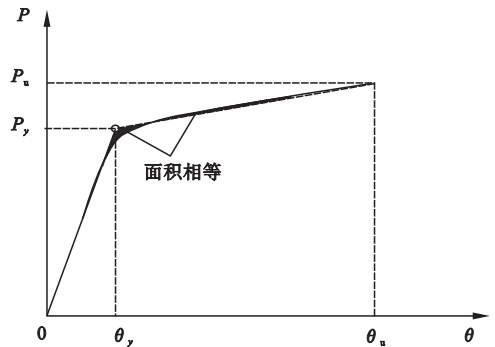


图8 等能量法

Fig. 8 Equivalent energy method

狗骨式节点的累积变形能力既可采用累积塑性转角描述,又可采用累积延性比  $\mu_c$  评估.其中,狗骨式节点的累积塑性转角可按图9计算.

累积延性比按式(2)计算:

$$\mu_c = \sum_{i=1}^n \theta_{p,i} / \theta_y \quad (2)$$

式中:  $n$  为循环加载次数;  $\theta_{p,i}$  为狗骨式节点在第  $i$  次循环的塑性转角。

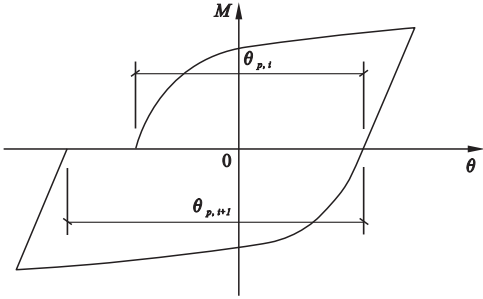


图9 累积塑性转角的计算

Fig.9 Diagram of cumulative plastic rotation

试件 Frame - 1 ~ Frame - 5 的构件截面均一致, 可根据单向加载试件 Frame - 1 的试验结果利用等能量法确定狗骨式节点的显著屈服点. 由于试件 Frame - 6 采用了薄壁钢梁及近场加载制度, 则采用等能量法单独对试件 Frame - 6 在近场加载制度作用下的骨架曲线进行分析, 确定其显著屈服点. 表 2 给出了所有试验试件狗骨式节点的屈服转角  $\theta_y$ 、屈服弯矩  $M_y$ 、最大塑性转角  $\theta_u$ 、目标延性  $\mu_t$ 、累积塑性转角  $\sum \theta_p$  及累积延性比  $\mu_c$  的实测数据及平均值.

由表 2 可知, 钢框架子结构中狗骨式节点的显著屈服转角在 0.004 47 ~ 0.006 32 rad, 板件宽厚比较大试件 Frame -

表 2 钢框架子结构狗骨式节点的实测数据

Table 2 Test results of RBS connections in steel frame substructure

试件编号	节点位置	屈服转角/rad		屈服弯矩/(kN·m)		最大转角/rad		目标延性比		累积塑性转角/rad		累积延性比	
		$\theta_y$	$\bar{\theta}_y$	$M_y$	$\bar{M}_y$	$\theta_u$	$\mu_t$	$\bar{\mu}_t$	$\sum \theta_p$	$\sum \bar{\theta}_p$	$\mu_c$	$\bar{\mu}_c$	
Frame - 1	B 柱下节点	0.005 75		30.10		0.080 28	12.70		0.073 96		11.70		
	B 柱上节点	0.005 96		30.62		0.077 82	12.31		0.071 50		11.31		
	A 柱下节点	0.006 88	0.006 32	30.34	30.33	0.083 78	13.25	12.87	0.077 46	0.075 05	12.25	11.87	
	A 柱上节点	0.006 70		30.26		0.083 60	13.22		0.077 28		12.22		
Frame - 2	B 柱下节点	0.005 75		30.10		0.061 27	9.69		1.514 72		239.58		
	B 柱上节点	0.005 96		30.62		0.053 19	8.41		1.517 98		240.09		
	A 柱下节点	0.006 88	0.006 32	30.34	30.33	0.042 34	6.70	8.13	1.287 47	1.429 30	203.63	226.07	
	A 柱上节点	0.006 70		30.26		0.048 86	7.73		1.397 05		220.96		
Frame - 3	B 柱下节点	0.005 75		30.10		0.011 00	1.74		3.504 34		554.27		
	B 柱上节点	0.005 96		30.62		0.007 28	1.15		2.449 39		387.41		
	A 柱下节点	0.006 88	0.006 32	30.34	30.33	0.008 20	1.30	1.33	3.024 46	2.838 62	478.37	448.97	
	A 柱上节点	0.006 70		30.26		0.007 14	1.13		2.376 30		375.85		
Frame - 4	B 柱下节点	0.005 75		30.10		0.030 45	4.82		1.431 76		226.45		
	B 柱上节点	0.005 96		30.62		0.020 34	3.22		0.976 32		154.42		
	A 柱下节点	0.006 88	0.006 32	30.34	30.33	0.022 30	3.53	3.64	1.246 17	1.153 14	197.10	182.39	
	A 柱上节点	0.006 70		30.26		0.019 05	3.01		0.958 32		151.57		
Frame - 5	B 柱下节点	0.005 75		30.10		0.048 64	7.69		1.399 41		221.34		
	B 柱上节点	0.005 96		30.62		0.040 40	6.39		0.888 52		140.53		
	A 柱下节点	0.006 88	0.006 32	30.34	30.33	0.028 47	4.50	5.79	1.083 30	1.115 85	171.34	176.49	
	A 柱上节点	0.006 70		30.26		0.028 91	4.57		1.092 17		172.74		
Frame - 6	B 柱下节点	0.004 93		18.52		0.033 97	7.60		1.259 21		281.74		
	B 柱上节点	0.003 82		18.35		0.031 32	7.01		1.145 95		256.40		
	A 柱下节点	0.004 56	0.004 47	18.93	18.59	0.031 04	6.94	7.49	1.186 33	1.221 55	265.44	273.32	
	A 柱上节点	0.004 57		18.55		0.037 66	8.43		1.294 73		289.69		



6的钢梁板件过早屈曲导致计算节点显著屈服转角减小。不同加载历史对狗骨式节点的累积塑性转角影响显著,单向加载下狗骨式节点的塑性转角为0.075 rad,而标准加载模式下狗骨式节点的塑性转角为1.429 rad。在 $2\Delta_y$ 等目标位移循环下,狗骨式节点的累积塑性转角最大(2.839 rad),相对在 $4\Delta_y$ 等目标位移循环下,其累积塑性转角降至1.153 rad。在近场加载与标准加载制度联合作用下,狗骨式节点的累积塑性转角在1.116~1.222 rad。狗骨式节点累积延性比变化规律同累积塑性转角类似。

图10给出了每个狗骨式钢框架子结构试件中4个节点的平均累积塑性转角与目标延性比的变化规律。

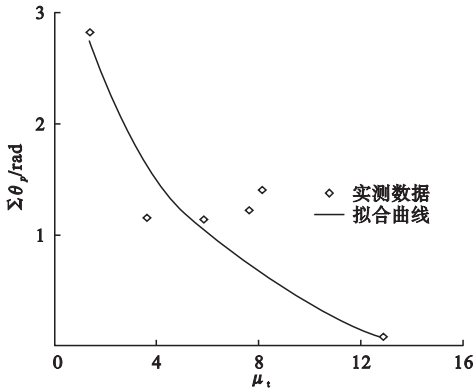


图10 狗骨式节点的平均累积塑性转角与目标延性比变化规律

Fig. 10 The relationship between the average cumulative plastic rotation and target ductility of RBS connection

由图10可以看出,随着加载目标位移的增加,狗骨式钢框架子结构进入塑性程度较深,导致结构损伤趋于严重,狗骨式节点的平均累积塑性转角也呈显著的降低趋势。

根据钢框架子结构试验中狗骨式节点的平均累积塑性转角与目标延性比的变化规律,可统计如下回归公式:

$$\sum \theta_p = 3.186 - 1.218 \ln(\mu_t). \quad (3)$$

根据式(3)即可近似估算出在给定目标延性下狗骨式节点的最大累积塑性转角。图11给

出了各狗骨式钢框架子结构试件中4个节点的平均累积延性比与目标延性比的变化规律。

狗骨式节点的平均累积延性比与目标延性比的变化规律,可统计如下回归公式:

$$\mu_c = 921.98 - 341.668 \ln(\mu_t). \quad (4)$$

根据式(4)即可近似计算出在给定目标延性下狗骨式节点的累积延性比。

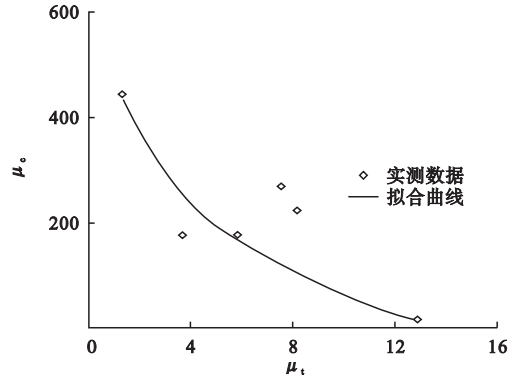


图11 狗骨式节点的平均累积延性比与目标延性比的变化规律

Fig. 11 The relationship between the average cumulative ductility and target ductility of RBS connection

### 2.4 耗能能力

结构或构件的耗能能力通常可采用累积滞回耗能  $E_h$  来描述,笔者通过对狗骨式钢框架子结构中各节点弯矩-转角滞回曲线的积分获得其累积滞回耗能。图12给出了各狗骨式钢框架子结构试件中4个节点的平均累积滞回耗能。

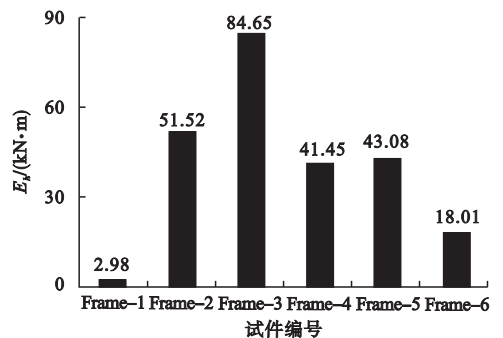


图12 狗骨式节点的平均累积滞回耗能

Fig. 12 The average cumulative hysteretic energy of RBS connections

由图12可知,加载制度对钢框架子结构中狗骨式节点的平均累积滞回耗能影响显著.单向加载时,狗骨式节点的平均累积滞回耗能最小( $2.98 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ),在 $2\Delta_y$ 等位移循环下,狗骨式节点的平均累积滞回耗能最大( $84.65 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ).试件 Frame-5、Frame-6的加载制度相同,仅钢梁板件宽厚比不同,采用薄壁钢梁试件 Frame-6的狗骨式节点累积滞回耗能仅为厚壁钢梁试件 Frame-5的42%.

为更合理地评估钢框架子结构中狗骨式节点的累积滞回耗能能力,还可采用无量纲的等效能量耗散系数 $E_c$ 评估,可按式(5)计算:

$$E_c = \frac{\sum_{i=1}^N E_{h,i}}{M_y \theta_y} \quad (5)$$

式中: $E_{h,i}$ 为狗骨式节点第*i*次循环的滞回耗能.

图13给出了各钢框架子结构试件中4个狗骨式节点的平均等效能量耗散系数与目标延性比的变化规律.

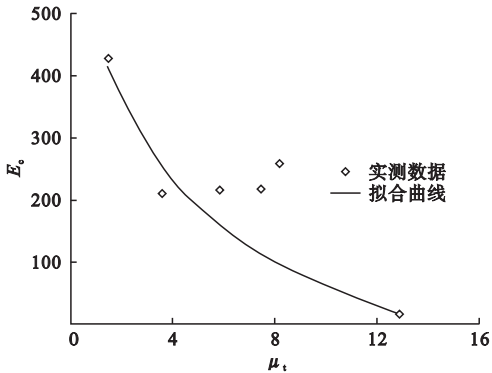


图13 狗骨式节点的平均等效能量耗散系数与目标延性比的变化规律

Fig. 13 The relationship between the average energy dissipation ratio and target ductility of RBS connection1

由图13可知,狗骨式节点的平均等效能量耗散系数随着目标延性比的增大而显著降低.等效能量耗散系数从概念上比节点的累积塑性转角、累积延性比参数更合理,该系数可反映结构或构件滞回环形状的影响.狗骨式节点的平均等效能量耗散系数与目标延性

比的变化规律,也可由式(6)估算.

$$E_c = 478.12 - 181.06 \ln(\mu_t) \quad (6)$$

根据式(6)即可近似计算出在给定目标延性下狗骨式节点的等效能量耗散系数.

### 3 结 论

(1)钢梁板件宽厚比对钢框架子结构中狗骨式节点的显著屈服转角有一定影响.板件宽厚比较小试件的狗骨式节点先屈服后屈曲,显著屈服转角较大.板件宽厚比较大试件的狗骨式节点先屈曲后屈服,导致显著屈服转角略小.

(2)加载制度对钢框架子结构中狗骨式节点的累积变形能力有显著影响.所施加的循环等幅位移越小,狗骨式节点在经受每次循环时损伤越轻,其累积塑性转角及累积延性比越大.

(3)加载制度对钢框架子结构中狗骨式节点的累积耗能能力有较大影响.所施加的循环等幅位移越小,狗骨式节点的等效能量耗散系数越大.

(4)基于累积塑性转角、累积延性比及等效能量耗散系数与加载全过程中钢框架子结构狗骨式节点达到最大转动延性之间的关系,回归了简化计算公式.

### 参考文献

- [1] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
(China Academy of Building Research. Code for seismic design of buildings: GB50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [2] CHEN S J, YE H C H, CHU J M. Ductile steel beam-to-column connections for seismic resistance [J]. Journal of structural engineering, 1996, 11(4): 19—37.
- [3] ENGELHARDT M D, WINNEBERGER T, ZEKANY A J, et al. Experimental investigations of dog bone moment connections [J]. Engineering journal, 1998, 35(4): 128—139.
- [4] UANG C M, YUKENT Q S, NOEL S, et al. Cy-

- clic testing of steel moment connections rehabilitated with RBS or welded haunch[J]. Journal of structural engineering, 2000, 126(4): 57-68.
- [5] CHI B, UANG C M. Cyclic response and design recommendations of reduced beam section moment connections with deep column[J]. Journal of structural engineering, 2002, 128(4): 464-473.
- [6] GILTON C S, UANG C M. Cyclic response and design recommendations of weak-axis reduced beam section moment connections[J]. Journal of structural engineering, 2002, 128(4): 452-463.
- [7] JONES S L, FRY G T, ENGELHARDT M D. Experimental evaluation of cyclically loaded reduced beam section moment connections[J]. Journal of structural engineering, 2002, 128(4): 441-451.
- [8] NAKASHIMA M, KANAO L, LIU D W. Lateral instability and lateral bracing of steel beams subjected to cyclic loading[J]. Journal of structural engineering, 2002, 128(10): 1308-1316.
- [9] CHEN S J, TU C T. Experimental study of jumbo size reduced beam section connections using high-strength steel[J]. Journal of structural engineering, 2004, 130(4): 582-587.
- [10] LEE C H, JEON S W. Effects of panel zone strength and beam web connection method on seismic performance of reduced beam section steel moment connections[J]. Journal of structural engineering, 2005, 131(12): 1854-1856.
- [11] ZHANG X F, RICLES J M. Experimental evaluation of reduced beam section connections to deep columns[J]. Journal of structural engineering, 2006, 132(3): 346-357.
- [12] PACHOUMIS D T, GALOUSIS E G, KALFAS C N, et al. Cyclic performance of steel moment-resisting connections experimental analysis and finite element model simulation[J]. Engineering structures, 2010, 32: 2683-2692.
- [13] SOFIAS C E, KALFAS C N, PACHOUMIS D T. Experimental and FEM analysis of reduced beam section moment endplate connections under cyclic loading[J]. Engineering structures, 2014, 59: 320-329.
- [14] LIGNOS D G, KRAWINKLER H. Development and utilization of structural component databases for performance-based earthquake engineering[J]. Journal of structural engineering, 2013, 139(8): 1382-1394.
- [15] LIGNOS D G, KOLIOS D, MIRANDA E. Fragility assessment of reduced beam section moment connections[J]. Journal of structural engineering, 2010, 136(9): 1140-1150.
- [16] 杨尉彪, 高小旺, 张维嶽, 等. 高层建筑钢结构梁柱连接节点试验研究[J]. 建筑结构, 2001, 31(8): 3-8.  
(YANG Weibiao, GAO Xiaowang, ZHANG Weiyue, et al. Experimental study on moment connections of tall steel structures[J]. Building structure, 2001, 31(8): 3-8.)
- [17] 陈宏, 石永久, 王元清, 等. 钢框架梁柱节点受力性能的非线性分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(5): 56-58.  
(CHEN Hong, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing, et al. Research on stressing properties of steel beam-column connections by nonlinear analysis[J]. Industrial construction, 2001, 31(5): 56-58.)
- [18] 石永久, 王萌, 王元清, 等. 钢框架改进型梁柱节点滞回性能有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(2): 205-210.  
(SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing, et al. FEM analysis on cyclic behavior of improved beam-column connections in steel frames[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2010, 26(2): 205-210.)
- [19] 戴绍斌, 刘文吉, 黄俊. 狗骨式刚性连接节点的受力性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(12): 56-58.  
(DAI Shaobin, LIU Wenji, HUANG Jun. Experimental research on working behavior of dog-bone style rigid connection joint[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2004, 26(12): 56-58.)
- [20] 曹静, 王建国, 完海鹰. 钢框架梁柱狗骨式节点疲劳性能试验研究[J]. 安徽建筑工业学院学报, 2009, 17(5): 1-4.  
(CAO Jing, WANG Jianguo, WAN Haiying. The experimental research of fatigue behavior about the steel frame's reduced beam section joint[J]. Journal of Anhui institute of architecture & industry, 2009, 17(5): 1-4.)
- [21] 李军, 于征, 厉凤香. 考虑局部屈曲影响的狗骨式连接性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(2): 6-11.  
(LI Jun, YU Zheng, LI Fengxiang. Experimental study on performance of dogbone moment connections considering local buckling[J]. Progress in steel building structure, 2013, 15(2): 6-11.)
- [22] 何源. 骨式钢框架结构损伤模型的试验及理论研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2014.  
(HE Yuan. Experimental and theoretical research on damage model of steel frame substructure with reduced beam section[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2014.)