

# 短肢剪力墙中间层端节点梁筋锚固性能试验研究\*

傅剑平, 况建刚

(重庆大学 土木工程学院)

**摘要:**通过四个 T 型短肢剪力墙中间层端节点试件的试验,研究低周反复荷载作用下梁筋在节点区的锚固性能,验证了短肢剪力墙结构墙梁端节点处,在梁筋满足规范直线锚固长度的条件下,采用水平直线锚固方式能够满足锚固强度和锚固刚度要求。

**关键词:**短肢剪力墙;锚固强度;锚固长度;节点

**中国分类号:**TU312 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7329(2007)05-0053-07

## Experimental Study on the Beam Bars Detail in Exterior Short Pier Shear Wall Joints

FU Jian-ping, KUANG Jian-gang

(College of Civil Engineering, Chongqing University Chongqing 400045)

**Abstract:** By experiment of the beam bars in exterior short pier shear wall joints, the anchorage performance of the beam bars in joints on the action of low cyclic load have been studied to attest if the beam bars in exterior short pier shear wall joints can sufficed with the demanding of anchorage intensity and anchorage rigidity, when the anchorage of beam bars satisfy the requirement of the code.

**Keywords:** short pier shear wall; anchorage intensity; anchorage length; joints

### 1 概况及研究现状

短肢剪力墙结构是介于异型柱和剪力墙之间的一种结构形式。我国《高层建筑混凝土结构技术规程》<sup>[2]</sup>(简称《高规》)规定:“短肢剪力墙是指剪力墙墙肢截面高度与厚度之比为 5~8 的剪力墙”。通常墙肢厚度在 200 mm~300 mm 之间。目前这种结构形式广泛应用于 10~25 层住宅结构体系中。

对于短肢剪力墙结构梁筋在墙肢中的锚固长度及锚固形式,目前国家规范并没有给出明确的条文规定,国内工程届通常采用的做法是按照《混凝土结构设计规范》<sup>[1]</sup>(以下简称《规范》)来计算锚固长度。《规范》9.3.1 条规定:对普通钢筋,当计算中充分利用钢筋的抗拉强度时,受拉钢筋的锚固长度应按下列公式计算: $l_a = \alpha f_y / f_t d$ (带肋钢筋  $\alpha$  取 0.14)。另外,《规范》第 11.1.7 条规定,纵向受拉钢筋的抗震锚固长度  $l_{aE}$  应按下列公式计算:

一、二级抗震等级: $l_{aE} = 1.15 l_a$ ;三级抗震等级: $l_{aE} = 1.05 l_a$

在短肢剪力墙结构中,通常墙肢较长,有足够的长度容许梁的纵筋在墙肢中采用直线锚固,梁筋在短肢剪力墙结构中一般采取直线锚固形式,即可满足规范规定的锚固长度。实际工程中普遍采用直线锚固,当梁筋的直线锚固长度接近墙肢翼缘时,则直接延伸至翼缘位置。但是与普通的框架梁柱节点相比,短肢剪力墙由于墙肢厚度较薄,当梁筋数量较大时(4 根及其以上),通常梁筋需要放置两排甚至三排,梁筋在墙肢连接区混凝土中的锚固环境比起普通框架明显不利。此外,梁与墙肢连接区混凝土的受力较为复杂,在这种情况下,梁筋采用直线锚固在反复地震荷载作用下能否满足锚固强度(钢筋混凝土之间的粘结强度不能在反复作用下退化过快)和锚固刚度(钢筋与混凝土之间相对滑移量过大导致梁纵筋在节点内滑出量过大而使连接区变形过大)的要求,目前并没有得到试验验证,

\* 收稿日期:2007-05-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(59878056)

作者简介:傅剑平(1953-),男,辽宁本溪人,教授,博士,主要从事钢筋混凝土结构基本性能及抗震性能研究。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

而国家规范中也没有针对短肢剪力墙中梁筋锚固的专门规定。针对这个问题,本文进行了四个 T 型短肢剪力墙中间层端节点抗震条件下梁筋锚固性能试验研究,验证梁筋在短肢墙端节点直线锚固的性能。

## 2 试验加载方案及试件设计

### 2.1 试验加载装置及测试装置

结合重庆大学大型结构试验室现有的试验条件、

试验设备,采取的试验加载装置图如图 1 所示。为能较准确的量测伸入节点部分梁筋部分纵筋的应力状态,本次试验取上下梁纵筋各一根沿钢筋纵肋边缘纵向开一深×宽=3×5 mm 的槽,沿槽纵向间距 8 cm 贴应变片(型号为 BX120-3AA)。将应变片贴入槽内后,用表面经过绝缘处理的细铜丝引出,再用 703 胶作防水处理,最后用 914 快速粘结剂密封钢筋槽(各试件主要应变片编号见图 2)。

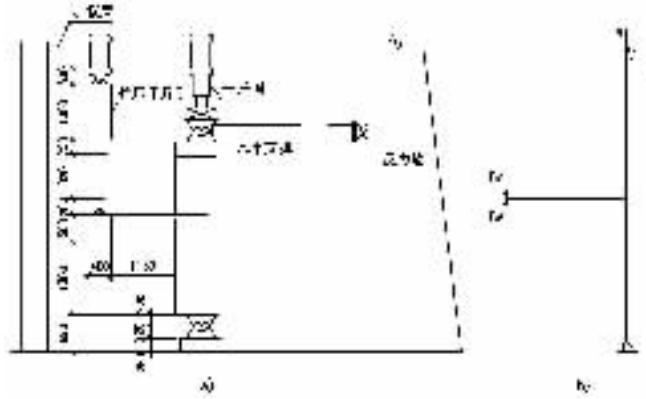


图 1 试件加载装置及加载示意

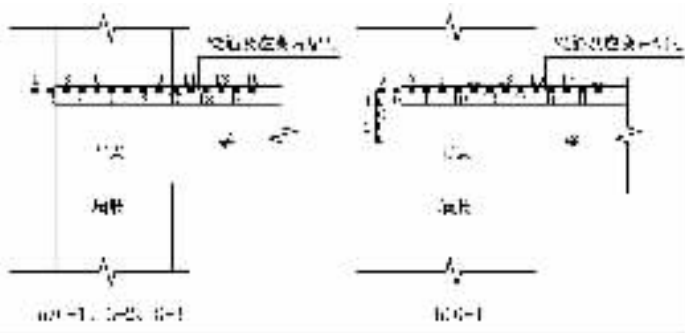


图 2 钢筋开槽内贴应变片

为了量测上、下梁纵筋相对于墙肢边的滑移量,采用如图 3 所示的量测方案,即在梁、墙肢交界面的梁筋保护层上预留一 25×50 mm 的长孔,在孔中部垂直焊接一根长度约为 150 mm 直径为 10 mm 的短钢筋,通

过固定在梁、墙肢交界处预埋木块上的两个电子百分表,分别测量上、下梁纵筋(各取一根)相对于梁、墙肢交界面的相对滑移量。

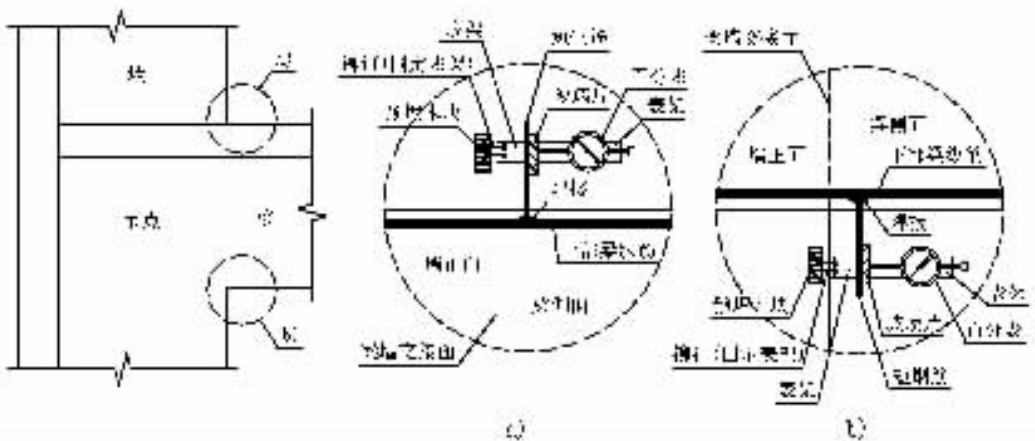


图 3 梁筋粘结滑移测量装置

2.2 试验加载方案:

首先对柱施加竖向荷载,通过上柱端的 2 000 kN 油压千斤顶施加轴向压力到预定值,轴向力的大小通过荷载传感器控制,在加载过程中轴力保持恒定。当轴力施加至预定轴压比(试件 G-1、G-2、G-4 轴压比为 0.1,G-3 轴压比为 0.05)之后,由梁端 500 kN 拉压千斤顶分别向下、向上施加低周反复荷载。第一循环梁端是否屈服由梁与节点交界处控制截面中的梁受

拉纵筋应变是否达到屈服应变来确定。当控制截面梁纵筋受拉屈服时,梁外端(远离节点端)的竖向位移即为屈服位移 $\Delta_y$ ,随后按屈服位移进行第二循环加载,后面的循环加载按位移控制加载,即按 $2\Delta_y, 3\Delta_y, \dots$ 的位移量进行控制加载,在每一个位移量下循环两次,直到试件承载能力下降至最大承载能力的 85% 时宣告试件失效或破坏。

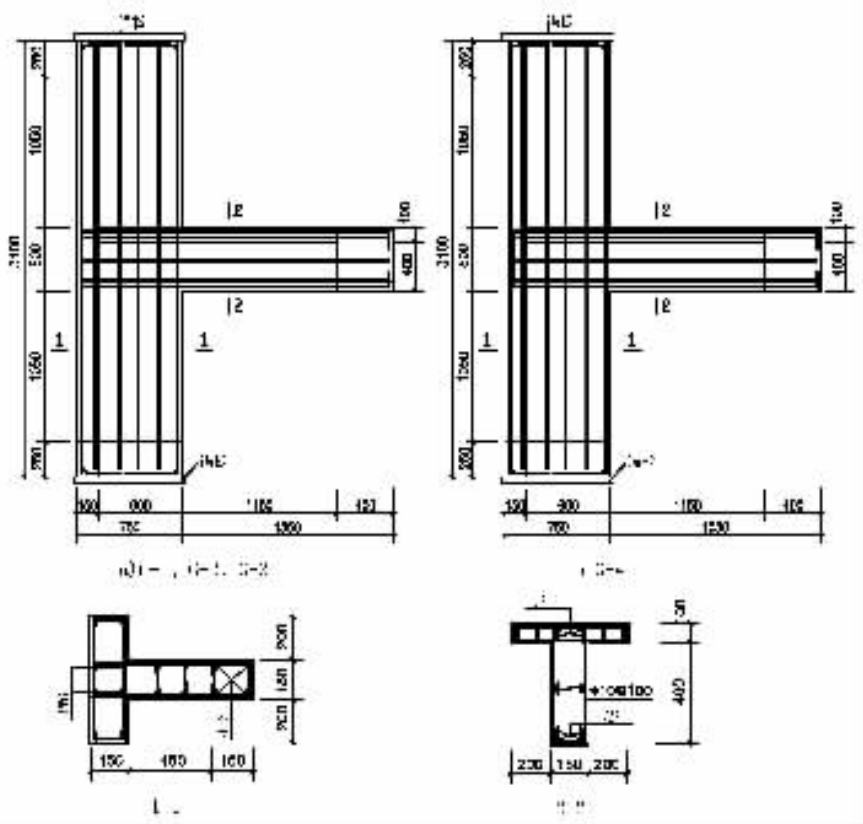


图 4 试件配筋详图

2.3 试件主要尺寸及配筋

试件 G-1、G-2、G-3 主要尺寸及配筋形式见图 4 和配筋量见表 1,G-4 主要尺寸及配筋形式见图 5,配筋量见表 1。其中,墙肢厚 150 mm,肢长为 750

mm,肢厚与肢长比按不利情况取为 1:5,梁尺寸为 150 × 500 mm,墙肢翼缘厚 150 mm,梁翼缘厚 100 mm。梁、柱实测混凝土强度等级见表 1。

表 1 试件基本数据

试件编号	上部梁筋①	下部梁筋②	梁端箍筋	节点箍筋
G-1	4Φ20	4Φ18	F8@50	6Φ8
G-2	4Φ22	4Φ20	F10@50	6Φ8
G-3	2Φ25+2Φ22	4Φ22	F10@50	8Φ6
G-4	2Φ25+2Φ22	4Φ22	F10@50	8Φ6
试件编号	实测混凝土抗压强度 $f_{cu}$ 150(N/mm <sup>2</sup> )	《规范》公式计算抗震锚固长度 $l_{ae}$	$l_{ae}$	实际锚固长度
G-1	24.6	536 mm	469	730 mm
G-2	19	719 mm	688	730 mm
G-3	23	700 mm	690	730 mm
G-4	22.5	710 mm	680	730 mm+15 d(弯折)

注:1.表中  $d$  为钢筋直径;

2.表中《规范》公式按照公式 9.3.1-1(第 114 页)和 11.1.7-1(第 168 页)计算;

3.表中  $l_{ae}$  为按文献[5]相关公式考虑粘结强度退化后的抗震设计长度。

### 3 试验结果及试验数据分析

#### 3.1 梁筋锚固长度计算

4 个试件梁筋锚固长度参考文献[5]和《规范》相关公式进行计算,在满足规范要求并参考实际工程中的做法(实际工程中,若按规范计算的锚固长度伸入节点接近墙肢翼缘时,直接将梁筋锚固至墙肢翼缘),将梁筋水平锚固延伸至墙肢边缘,锚固长度取 730 mm。试件 G-1、G-2、G-3 梁筋实际锚固长度为 730 mm (直线锚固),即钢筋延伸至墙肢边缘保护层处,G-4 水平锚固长度为 730 mm,弯折锚固长度 15*d*(*d*为钢筋直径)。为考察弯折锚固作用的影响,设计中 G-3 和 G-4 尺寸和配筋相同,混凝土实测立方体抗压强度接近(见表 1),不同的是 G-3 为直锚,而 G-4 在直锚的基础上增加 15*d*弯锚。文献[5]中给出了锚固长度 *l<sub>a</sub>* 的计算公式,相关公式如下:

$$\tau_u = (0.82 + 0.9d/l_a)(1.6 + 0.7c/d)f_t \quad (1)$$

$$4(l_a/d)\tau_u - f_y = 0 \quad (2)$$

$$f_t = 0.27f_{cu}^{2/3} \quad (3)$$

$$\lambda_2 = 0.71e^{-2/8} + 0.25 \quad (4)$$

$$l_{ae} = l_a/\lambda_n \quad (5)$$

上式中各系数含义分别为: $\tau_u$ —某种极限状态下的极限平均粘结应力; $f_y$ —钢筋的屈服应力; $f_{cu}$ —混凝土立方体抗压强度; $c$ 、 $d$ —混凝土保护层厚度、钢筋直径; $\lambda_2$ —反复加载 2 次时钢筋受拉锚固粘结强度的退化率; $l_{ae}$ —考虑粘结强度退化后的抗震设计长度。按公式(1)~(5)和《规范》公式计算得到的各试件上部梁筋锚固长度见表 2.1。

#### 3.2 各试件试验照片及梁筋应变主要数据

各试件所测正向加载时上部梁筋应变见图 5,各试件的试验照片见图 6。

由图 6 中的各试验照片可以看出,各试件反复加载过程中,节点区都出现了随着梁筋受拉向外拔出产生的几条喇叭状裂缝,但试件最终都发生了梁端的弯曲破坏,梁筋并没有被拔脱而发生锚固失效,表明梁筋的锚固强度能够满足要求。

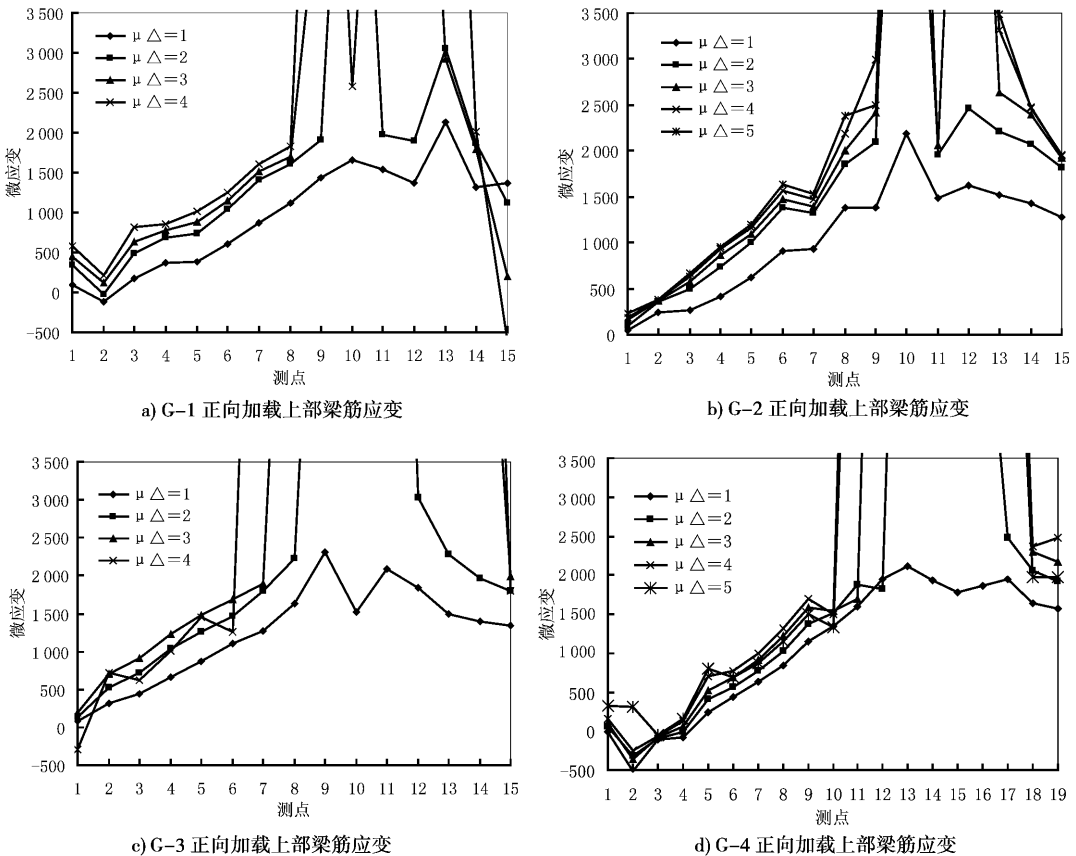


图 5 各试件试验照片

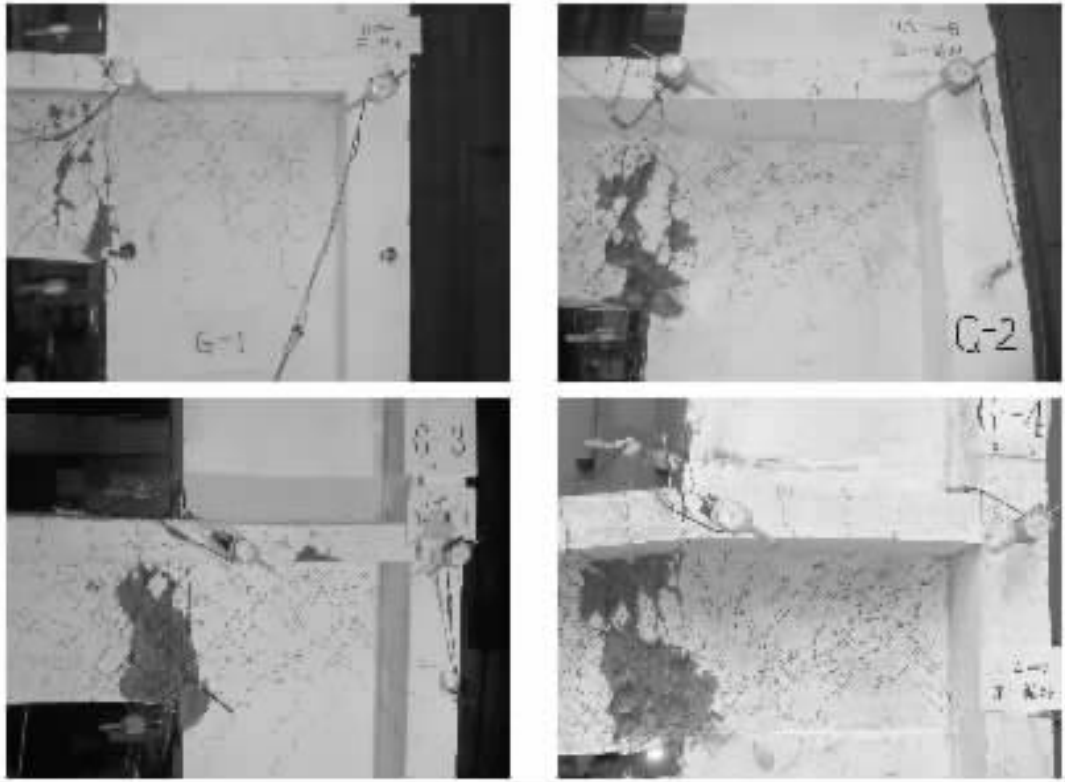


图 6 各试件梁筋实测应变

### 3.3 梁筋滑移分析

本文 4 个试件试验分别测量了上、下梁筋在第一循环各位移延性  $\mu_{\Delta}$  下的滑移量(见表 2、表 3、图 8),根据这些滑移量可近似由图 7 所示的几何关系计算出梁筋在节点中的滑移量  $S_l$  引起梁外端的挠度  $\Delta y$  计算公式:

$$\Delta y = \frac{S_l}{h_{bo} - a_s} l_b \quad (1)$$

式中  $h_{bo}$  为梁截面的有效高度,  $a_s$  为下部梁筋合力作用点到梁下边缘的距离,  $h_{bo}$  为柱边到梁端荷载作用点的距离。由此可得出不同位移延性下第一循环达峰值荷载时梁筋滑移与塑性伸长引起的梁外端挠度占梁外端总挠度的比值。

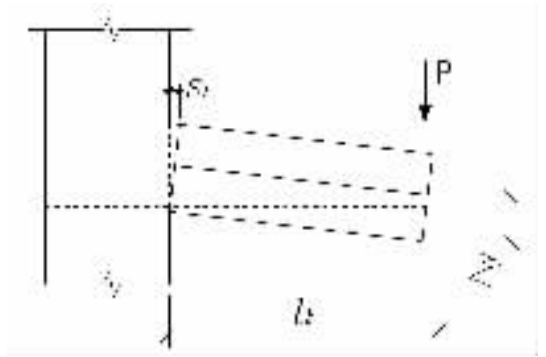


图 7 伸入节点梁筋滑移引起梁外端附加挠度示意

表 2 正向加载时各试件梁筋滑移量(单位:mm)

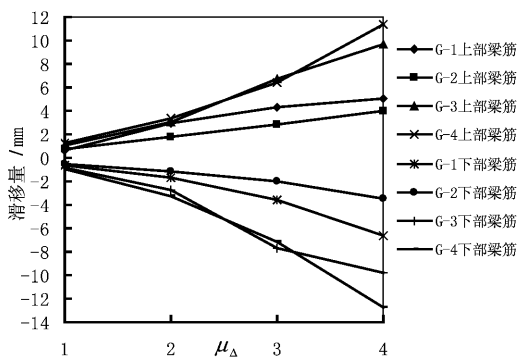
构件编号	梁纵筋	$\mu_{\Delta}=1$	$\mu_{\Delta}=2$	$\mu_{\Delta}=3$	$\mu_{\Delta}=4$
G-1	上部梁筋	0.65	2.92	4.32	5.04
	下部梁筋	-0.67	-1.67	-3.56	-6.65
G-2	上部梁筋	0.7	1.81	2.81	4.02
	下部梁筋	-0.48	-1.12	-2.05	-3.48
G-3	上部梁筋	1.03	3.02	6.72	9.65
	下部梁筋	-0.89	-2.73	-7.73	-9.78
G-4	上部梁筋	1.26	3.37	6.38	11.33
	下部梁筋	-0.94	-3.31	-7.11	-12.73

表 3 反向加载时各试件梁筋滑移量(单位:mm)

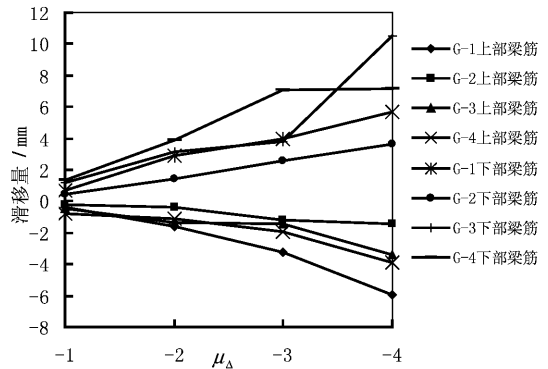
构件编号	梁纵筋	$\mu\Delta=-1$	$\mu\Delta=-2$	$\mu\Delta=-3$	$\mu\Delta=-4$
G-1	上部梁筋	-0.34	-1.61	-3.26	-5.99
	下部梁筋	0.71	2.94	3.98	5.65
G-2	上部梁筋	-0.23	-0.41	-1.17	-1.48
	下部梁筋	0.44	1.43	2.55	3.6
G-3	上部梁筋	-0.47	-1.32	-1.42	-3.44
	下部梁筋	1.21	3.12	3.82	10.54
G-4	上部梁筋	-0.76	-1.13	-1.94	-3.94
	下部梁筋	1.31	3.9	7.05	7.13

由表 2、表 3 中的数据和图 8 所示曲线可知,在反复加载过程中,随着荷载等级的增大,4 个试件梁纵筋的滑移量逐渐增大。由图 9 可知,加载过程中,4 个试件由梁筋滑移引起的梁外端挠度占梁外端总挠度的百

分比都比较大,最大接近 46%。各个试件随着位移延性  $\mu\Delta$  的增大,梁筋滑移所占的比例基本上逐渐增大,但增加幅度不大。



a) 正向加载



b) 反向加载

图 8 各位移延性  $\mu\Delta$  下各试件梁筋滑移曲线

将图 9、表 2 和表 3 中 G-4 数据和 G-1、G-2、G-3 数据相比,可以得出,G-4 在梁筋加了竖直弯锚的情况下对梁筋的粘结滑移并没有帮助。从正向加载时上部梁筋滑移量来看, $\mu\Delta=3$  时,G-3 滑移量为 6.72 mm,G-4 滑移量为 6.38 mm,差别并不大, $\mu\Delta=4$  时,G-3 滑移量为 9.65 mm,G-4 滑移量为 11.33 mm,G-4 梁筋的滑移量反而要大于 G-3。从梁筋滑移引起梁端挠度所占的比例来比较, $\mu\Delta=3,4$  时,G-3 所占的比例明显大于 G-4, $\mu\Delta=3$  时,G-4 所占的比例甚至比 G-2 要小, $\mu\Delta=4$  时,G-4 梁筋的滑入量和滑出量都比较大,由梁筋滑移引起的梁外端挠度比值也比较大(接近 44%),说明此时梁筋的粘结退化已比较严重,梁筋的锚固刚度降低。表中数据表明:G-4 在满足规范要求的锚固长度前提下,加了竖直弯锚对梁筋滑移并没有起帮助作用,也没有提高梁筋的锚固

刚度。

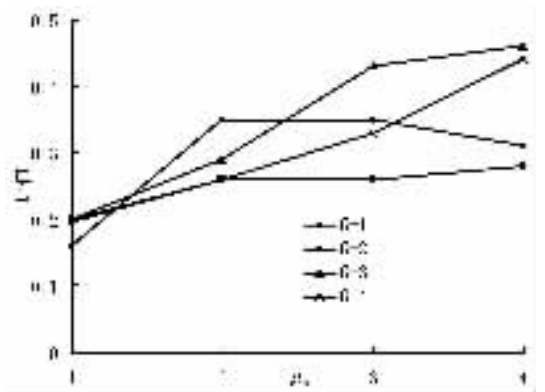


图 9 上部梁筋滑移量引起的梁外端挠度占总挠度的比值

由图 5 所示的梁筋应力曲线图也可看出,在各位移延性状态下伸入节点区的梁筋末梢段(测点 1,2 附近处)钢筋应变都比较小,说明试件直到梁破坏时梁筋末端并没有承受较大的应力。G-4 梁纵筋竖直弯折

段(测点 1,2,3,4)所测应变也很小,甚至为负应变(负应变表示受压),说明在反复荷载作用下,伸入节点的梁纵筋末梢段及竖直弯折锚固段钢筋并没有承受较大的拉力,也没有对梁筋的滑移起帮助作用。

### 3.4 与普通框架梁筋锚固刚度的比较

重庆大学 2002 级研究生朱爱萍<sup>[9]</sup>和 2003 级研究生刘晓<sup>[8]</sup>共进行了 8 个框架矩形柱中间层中节点抗震性能试验研究,并分析了梁筋在节点中的锚固性能。其中,各试件梁筋滑移引起的梁外端挠度占梁外端总挠度的比值见图 10。

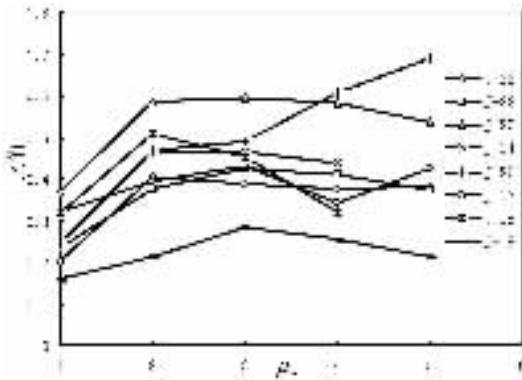


图 10 上部梁筋滑移量引起的梁外端挠度占总挠度的比值  
(注:本图为 8 个框架矩形柱中间层中节点上部梁筋滑移引起的梁外端挠度占总挠度的比值)

由图 9 与图 10 数据对比可以看出,框架矩形柱中间层中节点上部梁筋引起的梁外端挠度占总挠度的比值与本文短肢墙中间层端节点比值相比反而偏大,矩形柱比值大部分控制在 0.3~0.5 之间,本文的比值大部分控制在 0.2~0.4 之间,表明短肢墙端节点梁筋的锚固刚度与普通框架节点相比并不偏小,短肢墙端节点的锚固刚度能够满足要求。

## 4 结论:

试验结果和分析得出的主要结论有:

1) 4 个试件试验最终都发生梁的弯曲破坏,而梁筋并没有被拔出发生锚固失效破坏,梁筋在节点区的锚固强度能满足要求。

2) 与普通框架梁柱节点相比,短肢墙由于厚度偏小,通常墙肢厚与梁宽相同,墙肢纵筋与梁纵筋交汇,使得梁筋在短肢墙节点内的锚固环境比较差。因此,梁筋在节点内的滑移量以及由梁筋滑移引起梁外端的挠度占梁外端总挠度的比值与均比较大,但与普通框架节点相比,该比值并不偏大,梁筋在短肢墙端节点中的锚固刚度能满足要求。

3) 在梁筋水平锚固长度满足规范要求后,增加竖直方向的弯折锚固对梁筋的滑移和粘结退化以及梁筋的锚固刚度均没有帮助。

4) 在满足规范要求的条件下,梁筋可以采用直线锚固形式,若梁筋锚固长度接近短肢墙翼缘边时,建议将梁筋直接延伸至短肢墙翼缘边混凝土保护层处。

## 主要参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家标准. GB50010—2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [2] 中华人民共和国行业标准. JGJ3—2002, J186—2002. 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [3] 中华人民共和国行业标准. 混凝土异形柱结构技术规程(送审稿)[M]. 中国建筑工业出版社, 2005.
- [4] 冯建平、吴修文. T 形截面柱框架边节点的抗震性能[J]. 华南理工大学学报, 1995, 23(3): 123—130
- [5] 粘结锚固专题组. 钢筋混凝土粘锚固的研究及设计建议[J]. 建筑结构学报, 1986, (4): 2—12
- [6] 李宏、付恒菁. 钢筋混凝土框架边节点粘锚固性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 1998, 30(1): 16—19
- [7] 傅剑平. 钢筋混凝土框架节点抗震性能与设计方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [8] 刘晓. 高粘结条件下框架中间层中节点抗震性能实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [9] 朱爱萍. 高剪压比高轴压比框架矩形及圆形柱中间层中节点抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.

(编辑 王秀玲)