

9416(2)

1-12

末端带直角弯折的梁筋在端节点中的锚固性能试验研究

白绍良 傅剑平 周中元

(重庆建筑大学)

周兴杰

(重庆工程建设总公司)

TU375-4

摘要 通过40个钢筋混凝土框架中间层端节点梁柱组合体的静力试验,考察了混凝土强度、水平锚固段相对长度、竖直锚固段相对长度以及侧边保护层相对厚度等因素对该类节点内梁上部纵筋直角弯折锚固端受力性能的影响。其中着重考察了锚固区的损伤及破坏特征,测定了钢筋应变沿锚固段的变化规律,分析了这类锚固端的特殊锚固机理。

关键词 钢筋混凝土, 框架, 中间层端节点, 钢筋锚固, 末端带直角弯折的锚固段

性能

中图法分类号 TU375.4

框架端跨梁外端的最大负弯矩均出现在梁端截面,故该截面是梁外端负弯矩筋的强度充分利用截面。除框架顶层的梁、柱负弯矩筋多数需要在端节点处搭接,从而属于另一类性质的问题之外,其余各层端跨梁外端的负弯矩筋均应可靠锚固在框架端节点中。由于工程中常用的框架边柱截面高度有限,不能为梁负筋提供所需的直线锚固长度,即《混凝土结构设计规范》GBJ10-89第6.1.4条规定的直线锚固长度 l_a ,故梁负筋伸入节点到柱对边后,常需再向下弯折一定长度,以满足对其锚固性能的要求。这样就形成了一种特殊的末端带直角弯折的锚固段,它由水平锚固段、90°弯弧段和弯弧后的竖直锚固段所组成。本文对水平锚长 l_h 和竖直锚长 l_v 的定义见图1,于是, l_h/d 和 l_v/d 即分别为水平相对锚固长度和竖直相对锚固长度,其中 d 为锚筋直径。

这种特定形式锚固端的受力性能不同于直线锚固端。国内外近年来已对其做过一些试验研究,其中有美国 Jose L. G. Marques 与 James O. Jirsa 等人 1975 年做的试验^[1]和 Bilal S. Hamad 与 James O. Jirsa 1993 年在研究涂了环氧树脂的钢筋锚固端性能时所做的不涂树脂带直角弯折锚固端的对比试验^[2],还有我国西安冶金建筑学院傅恒菁^[3]和河南省建筑材料科学研究所牛铭^[4]分别在八十年代中期做的试验。

在上述试验中分别采用了不同的试验方案。牛铭^[4]采用的是从模拟节点受力的混凝土块体中拔出钢筋的方法(图2a)。这种方法虽然节省试件材料用量,但在反映块体上、下面及内面实际存在的剪切效应方面稍显不足,锚筋锚固环境与实际框架节点有一定差异。美国的

* 收稿日期:1993-12-18

白绍良, 1935年生,男,教授,重庆建筑大学建筑工程学院(630045)。

参加本文试验研究工作的还有吴京娟、何惠芳、罗明德、郭平和罗元辉

两次试验^{[1],[2]}和傅恒菁的试验^[3]均采用从钢筋混凝土柱中拔出钢筋的方案(图 2b)。这种方案从模拟实际锚固环境方面比图 2a 方案为好,但在反映梁端剪切效应,特别是梁负筋销栓作用对其锚固性能的影响方面还有可以改进之处。其中傅恒菁的试验在图 2b 的锚筋下面未施加模拟梁受压区的压力,故锚筋锚固环境与实际节点中的差异可能比美国方案略大一些。

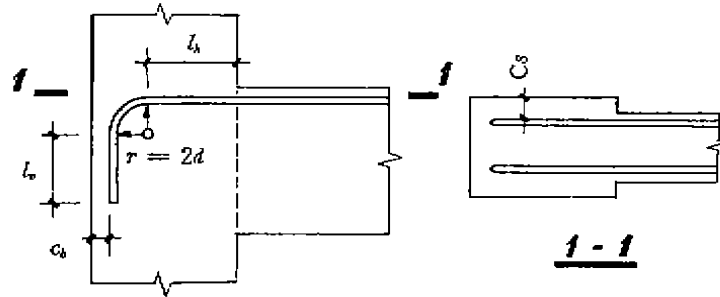


图 1 本文试验对基本几何参数的定义

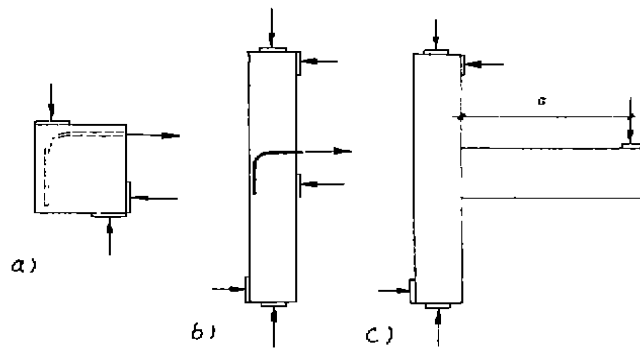


图 2 不同研究者所用的试验方案

为了获得更接近实际的锚固性能试验结果,重庆建筑工程学院用接近足尺的框架节点试件进行了末端带直角弯折的梁筋锚固段静力性能的试验研究(图 2c)。1984 年到 1985 年完成了第一批 26 个试件的试验,但可惜混凝土强度普遍偏高,有一部分试件在梁端纵筋屈服之前未出现锚固失效,可用试件为 21 个;1987 年又完成了第二批 14 个试件的试验,混凝土强度符合试件设计要求,且测试精度较高。

本文着重叙述这一研究课题的试验结果,并对锚固机理进行分析。有关各种锚固破坏形式的判别、临界锚固长度的确定原则及方法等将在另文中讨论。

1 试验结果

1.1 试验概况

本文两批试验所用试件形状及加载方案如图 2c 所示。在总计 40 个试件中各参数的变化范围是:混凝土强度 $f_{c,200} = 17.4 \sim 50.7 \text{ N/mm}^2$,主筋均为 I 级;梁负筋直径为 $\phi 20$ 及 $\phi 25$ 两种,屈服强度 $f_s = 375 \sim 450 \text{ N/mm}^2$; $l_a/d = 7 \sim 16$, $l_b/d = 5 \sim 15$, $c_s/d = 2 \sim 4$, $c_b/d = 2 \sim 5$ (其中 c_s 和 c_b 分别为梁筋侧边及竖直段背部的保护层厚度)。梁截面尺寸分为 $b_b \times h_b = 150 \times 300$, 200×300 及 $150 \times 400 \text{ mm}$ 三种,柱截面宽度分为 200, 240 及 300mm 三档,柱截面高度则根

据梁筋水平锚长要求选定,介于 300 与 500mm 之间。节点区柱箍为 $\phi 6@150$ 。柱中轴压力按试验轴压比 $\mu = N/f_c b_c h_c = 0.2$ 控制。其中 f_c 为实测轴心抗压强度, b_c, h_c 分别为柱截面宽度及高度。锚筋弯弧内半径均为 $2d$ 。各试件主要参数详见表 1。

1.2 锚固段受力特点及锚固区损伤与破坏特征

梁负筋在框架端节点中的锚固端处于节点核芯区及上柱下端的复杂混凝土应变场中,从而使这一锚固端的锚固环境具有其特殊性。其中,水平锚固段的前段位于上柱下端截面受拉区高度范围内,粘结环境偏不利(图 3),水平段后段及弯弧段位于上柱下端截面受压区高度范围内,混凝土对锚筋作用有侧压力,有利于粘结。此外,梁端受弯矩、剪力同时作用,梁筋的销栓作用也对水平锚固段前端的粘结环境有一定影响。当节点核芯区内出现主拉应力斜裂缝后,与该裂缝相交的锚筋竖直段将承担相应的拉力。

在第二批试验中,有五个试件沿锚固段密贴了应变片(将两根相同的锚筋同时弯折后各铣去相向的一半,沿每一半内剖面的纵向用数控铣床开槽,在槽内以 20mm 间距密贴应变片,再用环氧树脂封槽和将两个半边钢筋粘合成一根整钢筋)。这五个试件实测的各级荷载

表 1 试件主要参数及主要试验结果

试件批号	试件编号	f_{c200} (N/mm ²)	f_c (N/mm ²)	l_1/d	l_2/d	α_1/d	α_2/d	$b_c \times h_c$	σ_{sc} (N/mm ²)	S_c (mm)	破坏特征	节点区裂缝特征
第 一 批 试 件	J20-1a	46.1	436.3	7	10	2	5	200×300	419.9	0.31	BF	c
	J20-1a'	47.9	429.9	7	15	2	5	200×300	419.9	0.31	BF	c
	J20-2a	47.3	375.7	10	10	2	2	200×300	353.6	0.06	BF	无裂缝
	J20-3a	47.8	398.1	13	10	2	4	200×400	397.8	0.18	BF	b,c
	J20-3a'	37.6	407.6	13	5	2	4	200×400	397.8	0.27	BF	b,c
	J20-3b	40.5	407.6	13	10	3	4	200×400	442.0	0.22	Y	无裂缝
	J20-4a	45.8	388.5	15	10	2	2	200×400	442.0	0.28	Y	无裂缝
	J20-4a'	45.5	439.6	15	5	2	2	200×400	442.0	0.20	Y	无裂缝
	J20-4b	37.6	445.9	15	10	3	2	200×400	475.2	0.36	Y	b
	J20-1c	43.8	417.2	7	10	4	5	240×300	419.9	0.42	Y	c
	J20-2c	44.2	407.6	10	10	4	2	240×300	375.7	0.24	BF	无裂缝
	J20-3c	40.6	404.5	13	10	4	4	240×400	397.8	0.19	BF	b
	J20-4c	38.6	449.0	15	10	4	2	240×400	397.8	0.35	BF	b
	J25-1a	42.2	440.8	7	10	2	2	200×300	387.0	0.24	BF	c
	* J25-1a'	50.7	398.0	7	10	2	2	200×300	352.8	0.50	BF	b,c
	J25-2a	43.6	410.2	10	10	2	3	200×400	416.9	0.38	Y	c
	J25-3a	44.8	406.1	13	10	2	4	200×500	416.9	0.20	Y	b 及朝拉拔端方向的喇叭口状裂缝
	J25-4a	49.3	391.8	15	10	2	2	200×500	416.9	0.32	Y	b 及朝拉拔端方向的喇叭口状裂缝
	J25-1c	47.4	404.1	7	10	4	2	300×300	387.0	0.33	BF	b,c
	J25-2c	41.9	406.1	10	10	4	3	300×400	416.9	0.40	Y	b
J25-3c	41.7	400.0	13	10	4	4	300×500	449.0	0.25	Y	无裂缝	

试件 批号	试件 编号	f_{yk20d} (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	$\frac{L_1}{d}$	$\frac{L_2}{d}$	$\frac{c_1}{d}$	$\frac{c_2}{d}$	$b_c \times h_c$	σ_{sc} (N/mm ²)	S_c (mm)	破坏 特征	节点区 裂缝特征
第 二 批 试 件	A ₁	32.0	403.3	8	10	2.5	4.5	200×310	379.0	0.55	BF	a, b, c
	A ₂	27.9	403.3	12	5	2.5	3	200×360	386.8	0.39	BF	a
	A ₃	36.0	436.0	12	10	2.5	3	200×360	406.1	0.33	BF	无裂缝
	A ₅	28.0	436.0	16	10	2.5	4	200×460	464.1	0.25	Y	a
	B ₁	32.0	397.5	8	10	2.5	4.5	200×310	386.8	0.32	BF	b, c 及朝拉拔端方向的喇叭口状裂缝
	B ₂	30.2	397.5	12	5	2.5	3	200×360	348.1	0.44	BF	无裂缝
	B ₃	32.0	397.5	12	10	2.5	3	200×360	338.4	0.42	BF	a, c
	B ₄	32.0	420.7	16	5	2.5	4	200×460	362.6	0.40	BF	a
	B ₆	33.3	420.7	16	10	2.5	4	200×460	386.8	0.38	BF	a
	C ₁	17.4	381.0	8	10	2.5	4.5	200×310	270.7	0.39	BF	b, c 及朝拉拔端方向的喇叭口状裂缝
	C ₂	22.2	392.2	12	5	2.5	3	200×360	386.8	0.52	BF	b, c 及朝拉拔端方向的喇叭口状裂缝
	C ₃	18.3	381.0	12	10	2.5	3	200×360	309.4	0.67	BF	b, c
	C ₄	22.0	392.2	16	5	2.5	4	200×460	386.8	0.48	BF	a
	C ₅	18.9	381.0	16	10	2.5	4	200×460	348.1	0.80	BF	b, c

注:① 表中 L_1, L_2, c_1, c_2 定义见图 1。

② 第一批试件 J20-1a 到 J20-4c 梁负筋均为 2 Φ 20, 试件 J25-1a 到 J25-3c 为 2 Φ 25, 第二批试件均为 2 Φ 20。

③ 第一批试件 J20-1a 到 J20-4b 梁截面均为 200×300mm, J20-1c 到 J25-3c 均为 150×300mm, 第二批试件梁截面均为 150×300mm。

④ 破坏特征栏中 BF 表示在梁筋屈服前或屈服同时发生锚固失效(滑移显著增大), Y 则表示直到梁筋屈服均未发生锚固失效。

⑤ 裂缝特征栏中 a 表示沿内侧柱纵筋的纵向裂缝; b 表示沿锚筋水平段的粘结劈裂裂缝; c 表示节点内的主拉应力斜裂缝(上端一般延伸到上柱外侧)。

⑥ 标有 * 号的试件 J25-1a' 在节点区设有不受荷载的纵梁。

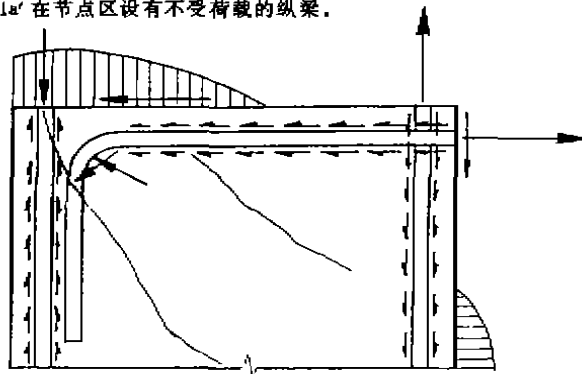


图 3 梁筋锚固区的受力环境

下的钢筋纵向应变分布如图 4a 到 4e 所示。根据这里得到的应变分布规律,并参考下文所述其它试验结果,可以得出以下结论。

1.2.1 水平段的作用

从图4中可以看出,不论水平段长短,钢筋纵向应变均从拉拔端向内递减。在拉拔力不大时,递减趋势较均匀;拉拔力较大时,靠近拉拔端一段应变递减速度变慢,表明水平段前端粘结逐步退化。此外,水平相对锚长越大,弯弧起点处钢筋所余的纵向应变越小。当 l/b 由16.12减到8时(试件B4,B2和B1),弯弧起点处的应变与拉拔端应变之比由0.057,0.116增大到0.312,且这一比值在荷载增大过程中没有过大变化。这一实测结果表明,即使是在水平相对锚长较短时,弯弧段以后部分所承担的拉力比重依然不大,表明水平锚固段对锚固端的性能起关键作用。当然,水平段的这种受力表现也包含了弯弧段甚至竖直段的一定影响在内,因此应看作是受有弯弧段及竖直段影响的锚筋前段的总体受力反应特征。

1.2.2 竖直段的作用

从图4中可以看出,当 $l/b \geq 12$ 时(图4中的试件B2,B4和B5),竖直段的应变均已很小。这是因为水平段的长度稍大时,传到弯弧起点处的应力已经较小。加之弯弧段的拉力经弯弧效应转换成径向压力后,使弯弧段具有比直线段更高的粘结传力效应,从而导致传到竖直段的拉力更小(见例如图4c中的试件B2)。此外,对比 l/b 均为16的试件B4和B5,还可以发现,弯弧段起点处的应变与拉拔端应变的比值由竖直段较长的试件B5($l/d=10$)处的0.029上升到竖直段较短时(试件B4, $l/d=5$)的0.057,而在 $l/d=12$, $l/d=5$ 的试件B2处,这一比值再上升到0.116。这在一定程度上证明了当水平段不是太短时,竖直段的长短对弯弧起点处的应变也有一定影响,从而也会在有限幅度内影响锚固端的受力性能。通过对全部试件试验结果的分析,证明对于水平段有一定长度,因而不会发生局部拉脱式破坏的锚固端,竖直段的长短对其锚固强度有程度不大的,但是可以察觉的影响,但对锚固刚度的影响则几乎难以察觉。在水平锚固段更短的试件中,例如图4d中的试件B1中,弯弧起点处的应变则相对更大。但是直到在试件梁外端施加的竖向荷载 P 达到64KN时(见图2c),竖直段中的应变仍然很小。这表明弯弧段由于受弯弧效应引起的径向压力的作用而保有很好的粘结传力能力和抗环向滑移的能力。直到 P 增大到80KN,节点核芯区出现主拉应力斜裂缝并与竖直锚固段相交后(见图8a),竖直段应变方才突然增大,造成弯弧起点及终点处拉力相近的局面。这时弯弧两端的拉力几乎不再需要由粘结力来平衡,两个端点拉力中的相当一部分将经弯弧效应转换为对弯弧下而混凝土的径向压力。荷载再稍事增加后,水平锚固段滑移即明显增大,但由于弯弧和竖直段的存在,从图8b和6c都可以看出,试件承载能力(即锚固端抗拔能力)直到滑移很大时均无下降迹象。因此,从保证在大滑移量下锚固承载力不退化的角度,一定长度的竖直段是必不可少的。但是从图4所示各试件的应变分布规律看,过长的竖直段是没有必要的。

1.2.3 弯弧的受力特征

观察图4各试件弯弧起点(水平端)和终点(竖直端)的受力状况,可以看出弯弧段的受力大多介于以下两种极端情况之间。一种极端情况是弯弧起点处作用有一定大小的水平拉力,但因拉力不大,经弯弧段粘结效应的平衡,到弯弧终点处竖向拉力已经为零。另一种极端情况是当节点核芯区出现主拉应力斜裂缝并与竖直段相交后,可能出现弯弧起点的水平拉力与弯弧终点的竖向拉力数值相等的状况。在这两种极端情况和介于它们之间的各种情况下,弯弧两端点的拉力将由以下三种作用来平衡。一是由弯弧效应(或称“缆索效应”)引起的由弯弧以内混凝土作用给弯弧的径向压力;二是弯弧与其以内混凝土之间的粘结力;三是

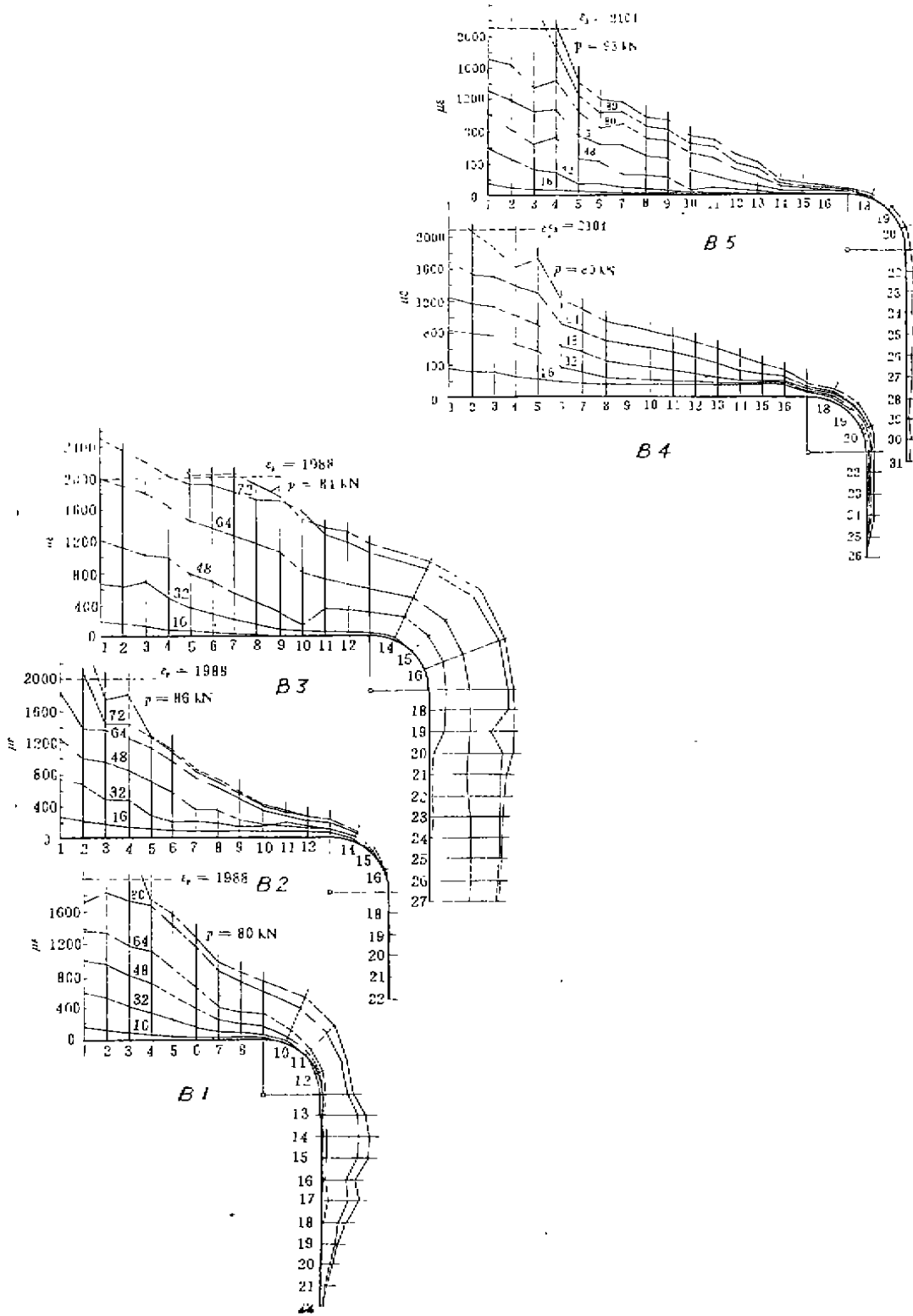


图 1 沿纵筋锚固段的实测纵向应变分布

“锚桩效应”提供的水平抗力。

在第一种极端情况下，由于弯弧段上的钢筋拉力自弯弧起点逐步下降到弯弧终点处为零，因此单位弧长上的内侧径向压力亦由起点逐步下降到终点处为零(图 5a)。径向压力的合力 P_r ，其倾角必然大于 45° 。与此同时，沿弯弧环向单位长度上的粘结力也将由弯弧起点向终点逐步下降到零(因终点处拉力为零，环向滑移为零)，其合力 P_t 的倾角自然小于 45° (图 5b)。

在第二种极端情况下，弯弧在拉力作用下自中点向两端沿环向伸长，故其中点两侧粘结力的作用是相反的，单位弧长上的粘结力值从两端向中间递减，沿环向的合力为零，但形成一个沿 45° 方向作用于弯弧中点的径向反力 P_s (图 5d)。受粘结力分布规律影响，弯弧拉力自两端向中点亦有一定程度的降低，因此由“缆索效应”形成的单位弧长上的径向压力亦从两端向中点有一定程度的降低，其合力 P_r 则沿 45° 方向作用于弯弧中点(图 5c)，即与 P_s 的作用方向相同。

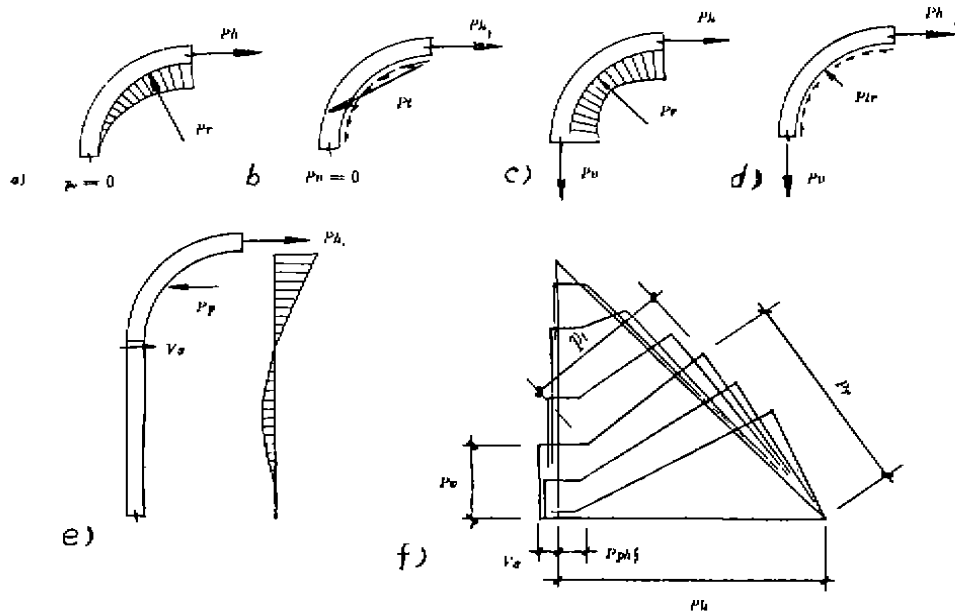


图 5 弯弧上的作用力

在介于这两种极端情况之间的各种情况，也就是弯弧起点水平拉力 P_h 以不同比值大于弯弧终点竖向拉力 P_v 的情况下，弯弧的受力特征将介于两种极端情况之间。其中，若假定弯弧起点的水平拉力值不变，则当从第一种极端状态向第二种极端状态过渡时，由于弯弧终点竖向拉力逐步增大，沿弯弧拉力分布图的饱满度增大，因此径向压力的合力 P_r 也将逐渐有所增大，且倾角逐步有所减小(参见图 5f 中的力多边形)。在过渡过程中，粘结力合力 P_t 的数值及作用方向的变化规律则更为复杂。当节点核心区内未出现主拉应力斜裂缝时，随着弯弧起点水平拉力 P_h 的增大，弯弧终点竖向拉力 P_v 与 P_h 的比值也会有所增加。由于此时整个弯弧的滑移均为沿环向朝向起点方向，故粘结抗力均沿环向朝终点方向作用。因此，随着

P_1/P_0 的逐步增大, 粘结力合力 P_1 值逐步有所减小, 倾角逐步有所增大。但试验结果表明, 由于弯弧段的粘结效应很强, 在这种受力特点下, 弯弧终点的竖向拉力值不会有更大增长。只有当节点核心区出现主拉应力斜裂缝并与垂直锚固段相交后, 弯弧终点的竖向拉力 P_1 方才可能进一步增大。此时弯弧已不再是沿环向朝起点单向滑移, 而是改为前面一段朝前滑移, 后面一段朝后滑移, 在弯弧偏终点一侧某处有一个滑移零点。这导致弯弧前部粘结力与后部粘结力作用方向相反。随着 P_1/P_0 值的进一步加大, 粘结合力 P_1 值进一步减小, 但倾角又重新逐步增大。最后, 在达到第二种极端情况时, P_1 转换为 P_{1*} , 并沿 45° 方向作用 (参见图 5f 力多边形的变化)。

除以上两种效应外, 当锚筋水平锚固段的粘结逐步退化, 弯弧起点出现越来越大的水平滑移时, 弯弧将压迫其前方的混凝土, 而弯弧以下的一部分垂直段则向后压迫其背部保护层。这也是在垂直段较短、背部保护层较薄的试件中, 柱外表面可能出现沿锚筋垂直段的竖向裂缝的原因。此时, 由前、后混凝土作用给钢筋的反作用力如图 5e 所示。这种效应类似于嵌岩桩在桩顶水平力作用下的受力状态, 故称“锚桩效应”。这时, 在弯弧终点的钢筋截面中必然有剪力 V 作用。于是, 由锚桩效应引起的作用在弯弧段上的水平力 P_{1*} 即为弯弧段实际所受锚桩效应水平力 P_1 与弯弧终点截面剪力 V 的代数和。

在两种极端状态以及介于其间的各种受力状态下, 弯弧段上作用的各种力以及它们之间的示意性平衡关系示于图 5f 中。

1.2.4 锚固区的主要损伤或破坏特征

当 l_h/d 较小, 节点混凝土强度偏低, 节点箍筋用量不多时 (例如试件 C1, $f_{c,200} = 17.4 \text{ N/mm}^2$, $l_h/d = 8$, $l_v/d = 10$, 箍筋 $\phi 6 @ 150$), 有可能发生图 6b 所示的类似于局部拉脱的破坏方式。即当拉拔力增大到一定数值时, 将从弯弧起点附近向斜上方及斜下方各伸展出一条主拉应力斜裂缝 (是节点区及上柱下端的构件受力效应与锚筋粘结传力效应的综合反应)。被这两条斜裂缝包围的喇叭口状的混凝土块体将随锚筋一起被向外拉出, 滑移量迅速增大。当垂直段具有一定长度且混凝土强度不是过低时, 锚固强度在滑移明显增长过程中仍能保持微弱的上升势头 (图 6c)。但如果垂直段过短, 则整个锚固端也可能完全拔出, 这时拉拔力 P 自然会迅速下降。在锚筋滑移过程中, 水平锚固段前端从钢筋横肋向拉拔端形成的圆锥面裂缝 (后藤裂缝) 有时会发展到柱内侧混凝土表面 (图 6a 中的裂缝①)。此外, 内侧柱筋受锚筋水平段带动, 也将向拉拔方向弯曲, 并在柱的内表面或侧面形成沿纵筋的裂缝 (图 6a 中的裂缝②)。与此同时, 还将沿水平锚固段出现粘结劈裂裂缝 (图 6a 中的裂缝③)。从图 6c 还可看出, 当水平段随喇叭口状混凝土块体向外拉出时, $P-s$ 曲线出现明显转折。此时梁负筋在拉拔端尚未屈服, 故属于典型的锚固端粘结失效。虽然荷载 P 随滑移增大还会略有增长, 但本文认为应把 $P-s$ 曲线转折点对应的锚筋拉力看作是锚固端所能承担的最大拉力。与这一拉力对应的钢筋应力即为“锚固失效应力” σ_{sc} 。

若水平锚固段比上述情况稍长, 或混凝土强度稍高时, 则将只沿水平锚固段出现自拉拔端向内伸延的粘结劈裂裂缝 (如图 7a 中的试件 C2, $f_{c,200} = 22.2 \text{ N/mm}^2$, $l_h/d = 12$, $l_v/d = 5$ 以及图 8a 中的试件 B1, $f_{c,200} = 32.0 \text{ N/mm}^2$, $l_h/d = 8$, $l_v/d = 10$)。靠近拉拔端虽然也会出现喇叭口状主拉应力裂缝, 但均未造成局部拉脱式破坏。随着水平段粘结退化和滑移增长, $P-s$ 曲线亦将逐渐明显弯折。此时梁筋在拉拔端仍未屈服, 故仍属锚固失效。这时仍取与 $P-s$ 曲线转折点对应的钢筋应力为锚固失效应力 σ_{sc} 。

当水平段更长或混凝土强度更高时,随着荷载的增大只出现锚筋滑移量的增长。在钢筋屈服前,P-s 曲线未发生明显转折,即锚固端未发生粘结失效。

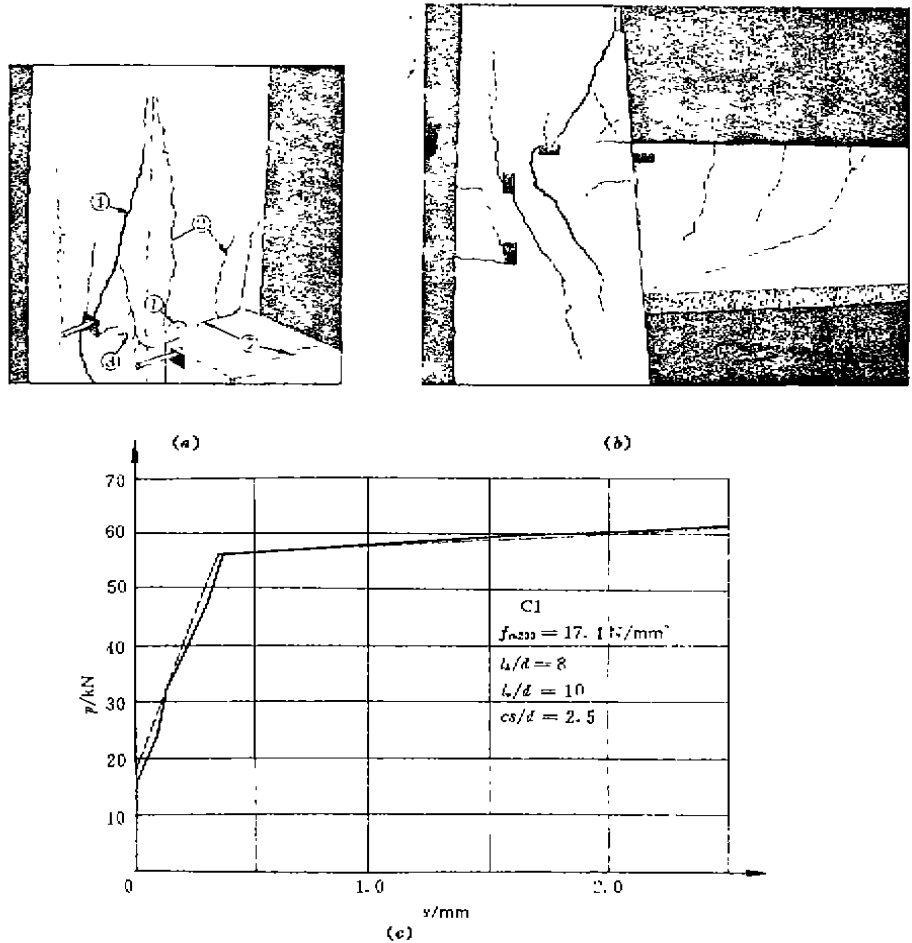


图 6 试件 C1 破坏特征及荷载滑移曲线

在图 6b、7a 和 8a 中还可以分别看到节点区出现的主拉应力斜裂缝。在图 6b 和 8a 中,该裂缝向上一直延伸到上柱下端的受压区中。

在本文试验的全部试件中未发现弯弧内的混凝土有局部压碎现象,表明对 I 级钢筋取弯弧内半径 $r = 2d$ (d 为锚筋直径) 是合适的。

在图 6 到图 8 的 P-s 曲线中,P 是指前文图 2c 施加在试件梁外端的竖向荷载,s 为用位移传感器量测的钢筋拉拔端表面与柱侧面混凝土基准点之间的相对水平位移(图 9)。在本文试验中,柱侧面混凝土表面基准点的位置略低于水平锚筋,以避免沿水平段的粘结劈裂裂缝。同时,基准点到柱内边的距离为 e 。本文第一批试件 e 等于三倍锚筋直径,第二批试件 e 等于大约六倍锚筋直径。由于拉拔端锚筋周围的混凝土将不可避免地产生由锚筋滑移引起的水平伸长,因此第一批基准点离柱内边较近的试件,测试所得的滑移将比第二批基准点离柱内边较远的试件略小。

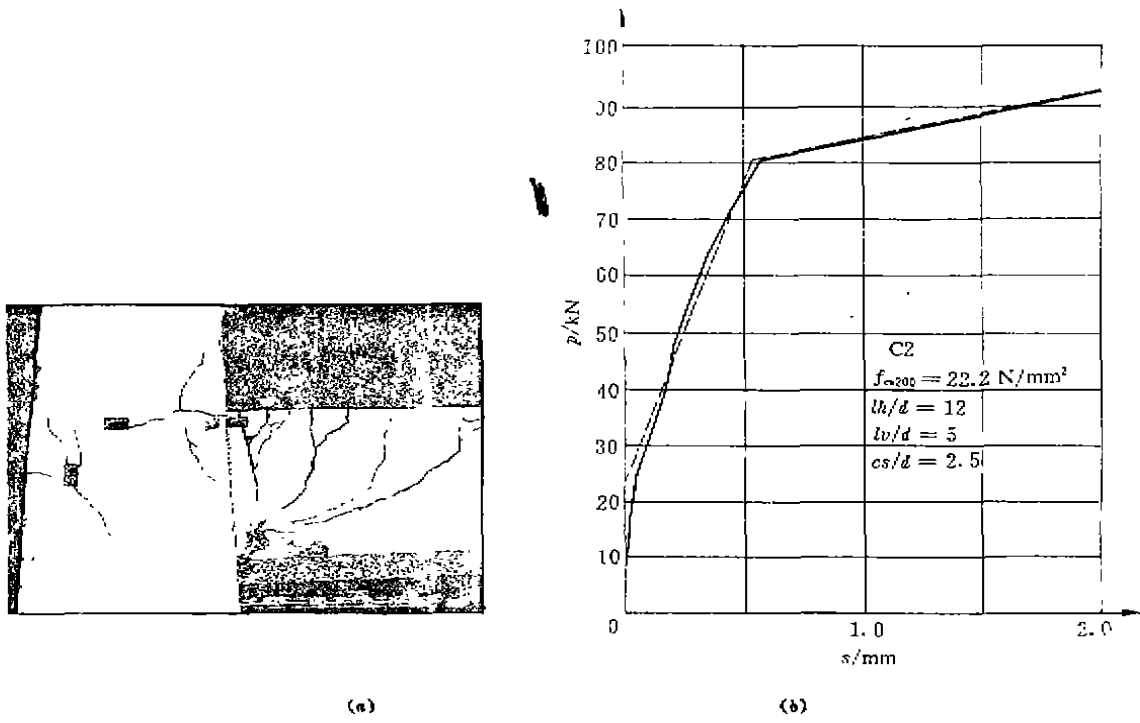


图 7 试件 C2 的损伤特征及荷载-滑移曲线

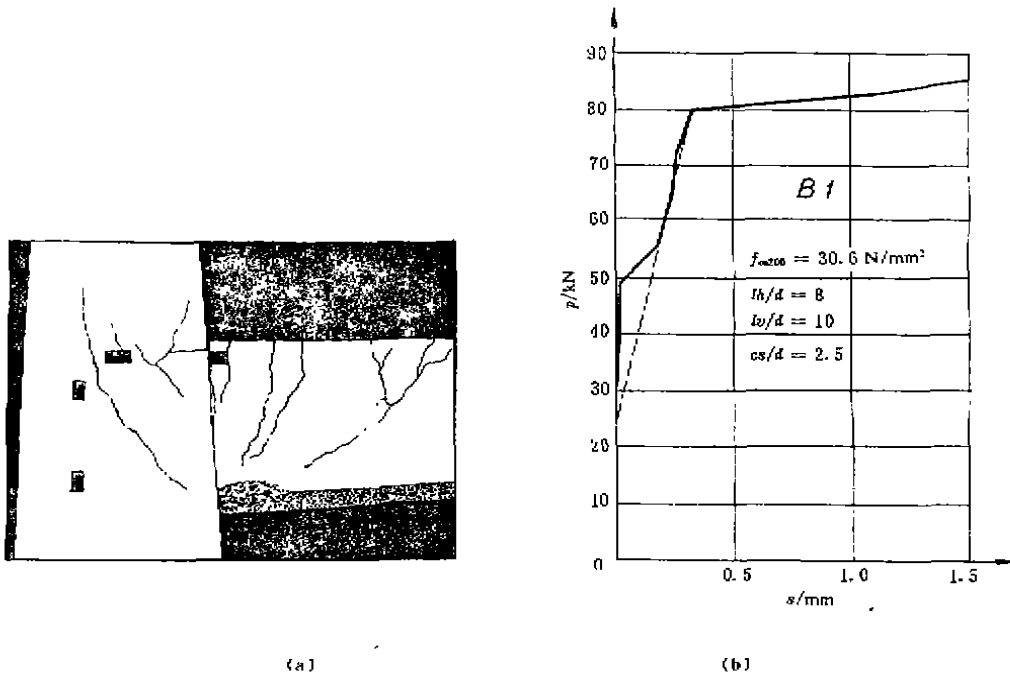
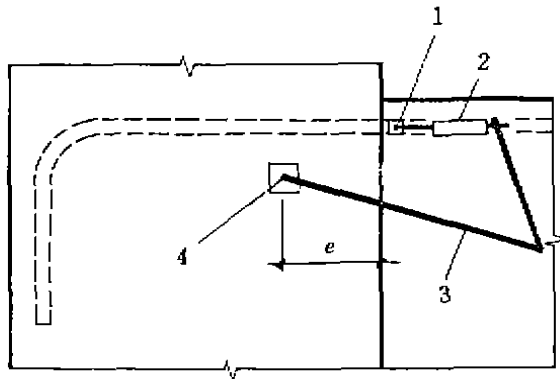


图 8 试件 B1 的损伤特征及荷载-滑移曲线



1. 钢筋拉拔端测点; 2. 位移计; 3. 仪表架; 4. 混凝土表面测试基准点

图9 锚筋粘结滑移测试方案

2 结论

(1)当带直角弯折的梁筋锚固端的水平锚固段相对于周围混凝土的强度而言具有足够长度时,锚固效应主要由水平段的粘结作用提供;弯弧受力很小,竖直段受力更小,它们对锚固能力的贡献有限。当水平段进一步减短时,弯弧及竖直段承受的拉力虽有所增加,但比例仍然不大。因此,必要长度的水平锚固段是保证锚固端强度和刚度的主要条件。

(2)如果对应于节点区的混凝土强度所取的水平锚长过小,锚固端就可能发生局部拉脱型破坏或一般粘结失效。一旦出现这种情况,弯弧及必要构造长度的竖直段能保证锚固端在水平段粘结失效后的大滑移过程中继续维持原有的锚固承载力,或者说发挥一种“后期保障作用”。根据试验结果建议 l 的构造取值为 $12d\sim 15d$ 。

(3)当竖直段与节点核心区中的主拉应力斜裂缝相交而受有一定拉力时,弯弧段能将竖直段及水平段传来的拉力转化为对弯弧以内混凝土的径向压力。在所试验的梁端上部钢筋配筋率为中等的试件中,当对Ⅰ级钢筋取 $r=2d$ 时(r 为弯弧内半径),均未发现弯弧内侧混凝土有局部压碎迹象。考虑到梁端配筋率在以承受静力荷载为主的结构中可能更高,故本文建议,在非抗震情况下,若梁端负弯矩下 $x\leq 0.35h_0$,则取 $r=2d$ (Ⅰ级钢筋)和 $r=3d$ (Ⅱ级及新Ⅲ级钢筋)。当 $x>0.35h_0$ 时,取 $r=3d$ (Ⅰ级钢筋)和 $r=4d$ (Ⅱ级和新Ⅲ级钢筋)。其中 x 和 h_0 分别为梁端截面在负弯矩作用下的计算受压区高度和截面有效高度。在柱截面高度不变的前提下,如 r 取值越大,弯弧前的实际水平段就越短,因此,取用过大的 r 反而不利。

(4)带直角弯折的锚固端中的弯弧和竖直段相当于水平段后面的一种特定的附加锚固措施。这种带直角弯折的锚固端与直线锚固端在受力性能方面没有明确的对应关系。对于这种锚固端,应在从构造角度对弯弧段及竖直段作出规定后,通过控制水平段长度来保证其锚固强度和刚度。因此,没有必要再用总锚长不小于直线锚长 l 的要求对这种锚固端进行控制。《混凝土结构设计规范 GBJ10-89 1993年局部修订》已取消了TJ10-74和GBJ10-89规范中的这一传统要求。

(5)梁上部纵筋在端节点中的直角弯折锚固端要发挥正常的锚固效应,需以节点区和与节点相邻的上、下柱端配有必要数量的构造箍筋为前提。这种箍筋还将减缓图6所示拉脱型

锚固破坏的可能性。因此,特别是在以承受静力荷载为主的框架中,应保证节点区及柱内配有一定数量的箍筋。例如,不少于柱的构造配箍量。

参 考 文 献

- 1 Jose L. G. Marques, James O. Jirsa, A Study of Hooked Bar Anchorages in Beam-Column Joints, ACI Journal, May 1975.
- 2 Bilal S. Hamad, James O. Jirsa, Natalie I. ' Abreu de Pau — lo, Anchorage Strength of Epoxy-Coated Hooked Bars, ACI Structural Journal, March-April 1993.
- 3 傅恒菁. 月牙纹钢筋 90°弯折锚固性能试验研究. 西安冶金建筑学院. 1985. 4
- 4 牛铭. 框架节点 90°弯折变形钢筋锚固性能试验研究. 河南省建筑材料科学研究所保存. 1985. 4

(编辑:徐维森)

EXPERIMENTAL STUDY ON STATIC ANCHORAGE BEHAVIOR OF BEAM BARS WITH 90-DEGREE HOOK IN EXTERIOR JOINTS OF R/C FRAMES

Bai shaoliang Fu Jianping Zhou Zhongyuan

(Chongqing Jianzhu University)

Zhou Xingjie

(Chongqing Engineering Construction Company)

ABSTRACT In order to investigate the influence of concrete strength, horizontal and vertical portions of anchorage length and cover thickness etc. upon the mechanical performance of 90-degree hooks of beam upper bars in exterior joints, static experiments of 10 beam-column subassemblages are carried out. This study emphasizes the damage characteristics of the anchorage zone, measures the strains of the bars along the anchorage length and analyzes the special anchorage mechanism of such hooks of beam bars.

KEY WORDS reinforced concrete. frame. exterior joint. beam bar anchorage. anchorage with 90-degree hook.