

# 钢纤维钢筋混凝土无粘结部分预应力扁梁柱节点设计方法的研究

季 韬<sup>1</sup> 钱在兹<sup>2</sup> 鄢 飞<sup>3</sup>

(1.福州大学 2.浙江大学 3.福建省建委)

**摘 要:** 在四个扁梁柱节点试验的基础上, 本文通过理论推导, 得到一套考虑节点内、外核心区内的钢纤维和扁梁中配有的无粘结预应力筋作用的扁梁柱节点内、外核心区的设计方法; 该方法充分利用了节点内、外核心区混凝土的强度, 正确考虑了柱轴压力的作用, 仔细检查了节点的竖向抗剪能力; 所提出的设计方法的可靠性得到试验数据的验证。

**关键词:** 钢纤维混凝土 无粘结部分预应力 扁梁柱节点

## 1. 前言

无粘结部分预应力扁梁楼盖体系是一种新的结构形式, 它降低了建筑物的层高, 减少了由风荷载和地震荷载产生的结构内力, 避免了管道穿梁和互争空间的问题, 简化了支模、钢筋绑扎和震捣的程序, 给施工带来了方便; 另一方面它降低了工程造价, 具有很好的经济效益; 无粘结预应力筋的采用解决了因扁梁高度较小而产生的扁梁跨中挠度较大的问题, 且采用无粘结预应力筋可方便施工, 因而这种结构体系在中、高层建筑中得到广泛的应用。一些学者对这种结构进行了一些研究<sup>[1,2]</sup>。

梁柱节点的设计主要存在两个问题: 一是节点内配置的剪力筋过多, 给施工造成困难; 二是梁柱节点的延性较差。在节点核心区掺入钢纤维就可以较好地解决这两方面的问题<sup>[3,4]</sup>; 然而, 在扁梁柱节点中掺入钢纤维的试验还未见到有关文献报道, 还未有学者提出考虑节点核心区钢纤维和扁梁中无粘结预应力筋共同作用的扁梁柱节点设计方法。

本文通过理论推导, 提出了一套考虑节点内的钢纤维和扁梁中无粘结预应力筋作用的扁梁柱节点内、外核心区的设计方法, 该设计方法充分考虑了节点内、外核心区混凝土的强度, 正确考虑了柱轴压力的作用, 仔细检查了节点的竖向抗剪能力, 其可靠性得到四个扁梁柱节点的试验数据的验证。

## 2. 试验概况

试件采用扁梁柱节点组合体, 模拟多层框架结构的中柱节点。试件相当于柱子和扁梁反弯点之间的一个脱离体。变化参数有节点核心区内的钢纤维和扁梁中的无粘结预应力筋, 见表1, 其它参数均相同。

表1 构件情况表

试件编号	B1	B2	B3	B4
钢纤维	无	有	无	有
无粘结预应力筋	无	无	有	有

采用杭州东岳钢纤维厂生产的E-I型钢纤维, 规格为0.35x0.6x25, 长径比 $l/d=48.4$ 。石子粒径为5~10mm。水泥为钱江牌425#普通硅酸盐水泥。试件的尺寸、配筋及钢纤维掺入区域见图1、图2。

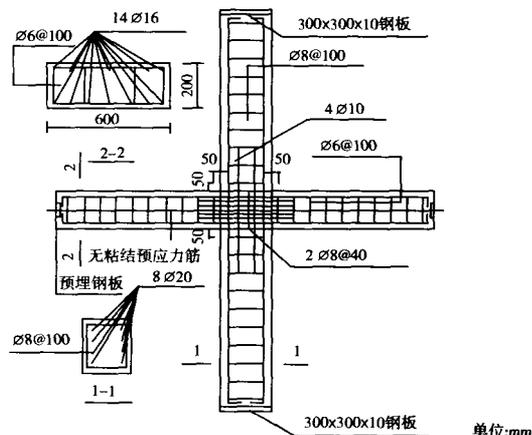


图1 试件B3、B4配筋图

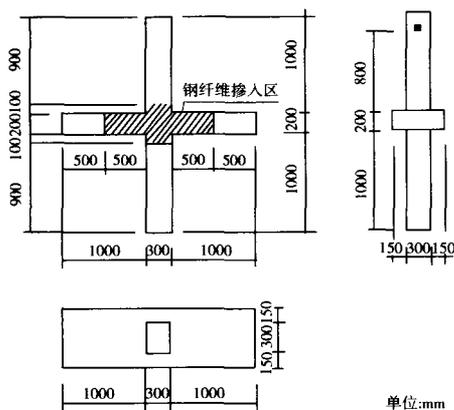


图2 试件尺寸及钢纤维掺入区域

两个试件 (B3、B4) 的扁梁上布置有三根无粘结预应力钢绞线, 中间一根穿过柱, 旁边两根绕着柱通过节点, 为直线布束, 见图3。钢筋上的应变片贴片位置见图4。

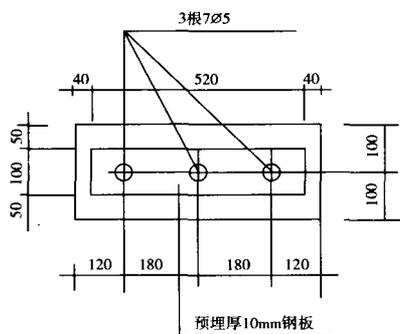


图3 无粘结预应力筋在梁中的布置

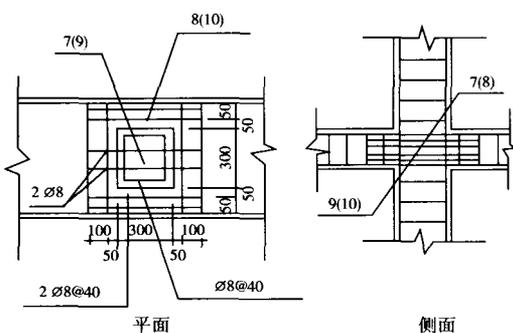


图4 配筋及测点位置

柱顶通过千斤顶施加轴压力, 控制轴压比为0.2。扁梁自由端采用油压同步千斤顶竖向施加低周反复荷载, 先以荷载控制, 求出屈服位移后再以屈服位移来控制加载, 每级荷载下反复2次, 以模拟地震水平作用。试验中记录了荷载 $P$ -位移 $\Delta$ 滞回曲线, 钢筋应变 $\epsilon_s$ , 节点核心

区剪切变形 $\gamma$ 。

试验前对无粘结预应力钢筋进行张拉。采用一端张拉法, 锚具为OVM15-1系列单孔锚, 在张拉端, 锚具和扁梁之间安装有200kN的压力传感器, 扁梁自由端预埋钢板。每根无粘结预应力筋的张拉控制力为180kN, 张拉后, 由压力传感器测得无粘结预应力筋的有效拉力为137kN。扁梁截面的轴压比为0.23, 预应力度 $PPR=0.634^{[5]}$ 。

试验过程及试验结果详见文献<sup>[6]</sup>。

### 3. 公式的推导

#### 3.1 扁梁柱节点的内、外核心区

参考文献<sup>[2]</sup>及根据本文试验中扁梁柱节点的破坏形态, 可将扁梁柱节点分为内、外核心区, 见图5。 $b_b$ 为扁梁宽度,  $h_j$ 、 $b_j$ 分别为节点内(外)核心区的宽度和高度。对于内核心区,  $h_j=h_c$ ,  $b_j=b_c$ ,  $h_c$ 、 $b_c$ 分别为柱高度和柱宽度; 对于外核心区,  $b_j=0.5(b_b-b_c)$ ,  $h_j=h_c+b_j$ 。

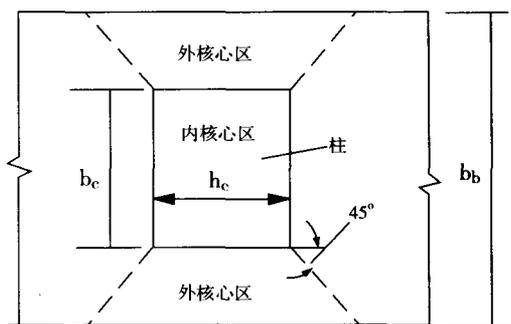


图5 内、外核心区

#### 3.2 外核心区的受力状态

内核心区在水平方向受到两侧梁传来的弯矩 $M$ 、剪力 $V$ 和轴力 $N$ (由无粘结预应力筋或相邻柱的约束作用提供), 在竖直方向受到柱传来的弯矩 $M'$ 、剪力 $V'$ 和轴力 $P$ , 如图6所示; 而外核心区仅在水平方向受到两侧梁传来的弯矩 $M$ 、剪力 $V$ 和轴力 $N$ , 因而可把外核心区看成是当内核心区 $M'=V'=P=0$ 时的特殊情况。

为了简化, 假定柱、扁梁的纵向钢筋对称布置, 节点两边柱、扁梁上传来的弯矩、剪力和轴力在数值上相同。扁梁柱节点内核心区的

受力状态见图7。图中： $C_s$ 、 $C'_s$ 分别为扁梁、柱受压纵向钢筋的压力； $C'$ 、 $C'_c$ 分别为扁梁、柱受压区混凝土压力合力； $T$ 、 $T'$ 分别为扁梁、柱受拉纵筋的拉力； $A_{s1}$ 、 $A_{s0}$ 分别为穿过内、外核心区扁梁受拉纵筋的面积； $A$ 为钢筋的强度系数，取1.25<sup>[3]</sup>。D为节点核心区混凝土的总斜向压力； $\beta$ 为混凝土总斜向压力的方向角。近似假定极限状态时，受压区合力作用在受压钢筋重心处，图中变量有如下关系：

$$M = T(h_{b0} - a_{bs}) \quad (1)$$

$$M' = T'(h_{c0} - a_{cs}) \quad (2)$$

$$T = C_s + C_c \quad (3)$$

$$T' = C'_s + C'_c \quad (4)$$

其中： $a_{bs}$ 、 $a_{cs}$ 分别为扁梁、柱受拉纵向钢筋重心至混凝土受压边缘的距离； $h_{b0}$ 、 $h_{c0}$ 分别为扁梁、柱的有效高度。

对于节点外核心区，则图7中：

$$C'_s = C'_c = T' = P = V' = 0 \quad (5)$$

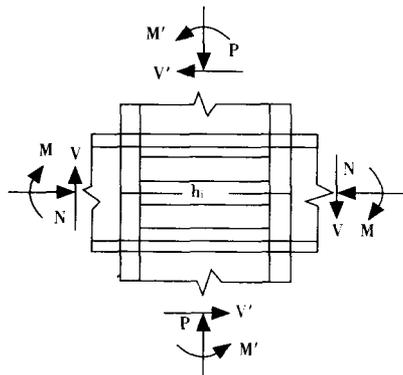


图6 内核心区受力状态

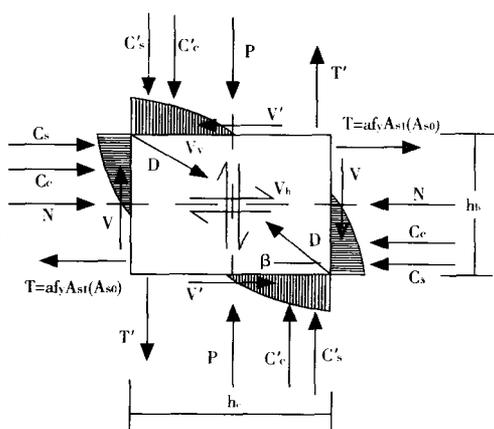


图7 内核心区受力状态

### 3.3 隔离体

对图7的受力节点取隔离体，如图8、9所示。由图8的水平力平衡和竖向力平衡可得式(6)、(7)。

$$V_h = C_s + C_c + T - V' = 2T - V' \quad (6)$$

$$C_v = T_{sv} + P \quad (7)$$

由图9的水平力平衡和竖向力平衡可得式(8)、(9)。

$$V_v = C'_s + C'_c + T' - V = 2T' - V \quad (8)$$

$$C_h = T_{sh} + N \quad (9)$$

式中  $V_h$ 、 $V_v$ 分别为外力在节点核心区产生的水平和竖向剪力； $C_h$ 、 $C_v$ 分别为外力在节点核心区混凝土中产生的水平和竖向压力； $T_{sh}$ 、 $T_{sv}$ 分别为外力在节点核心区水平和竖向钢筋上产生的水平和竖向拉力；

对于节点外核心区，由式(5)、(6)、(8)得：

$$V_h = 2T \quad (6a)$$

$$V_v = -V \quad (8a)$$

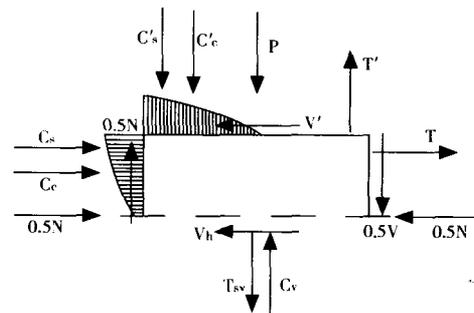


图8 水平隔离体

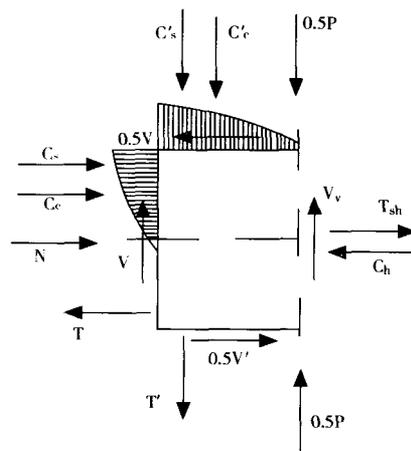


图9 竖向隔离体

### 3.4 其它公式

由于节点核心区内的钢筋只承受拉力而不承受剪力, 所以存在如下关系:

$$V_h = D \cos \beta = C_h \quad (10)$$

$$V_v = D \sin \beta = C_v \quad (11)$$

将式(6)、(9)及(7)、(8)代入(10)、(11)可得:

$$T_{sh} = V_h - N \quad (12)$$

$$T_{sv} = V_v - P \quad (13)$$

对于节点外核心区, 由式(5)、(13)得:

$$T_{sv} = V_v \quad (13a)$$

将式(11)/式(10)得:

$$\tan \beta = V_v / V_h \quad (14)$$

变量之间的关系见图10。

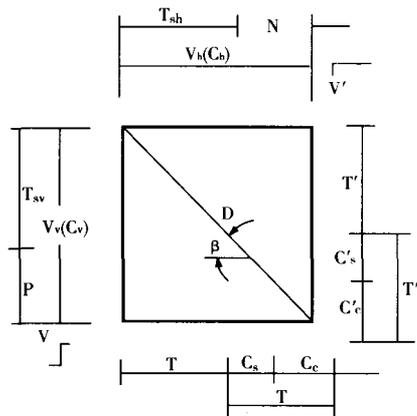


图10 水平隔离体

### 3.5 考虑钢纤维的作用

在节点内核心区, 当需要抵抗很大拉力时, 钢纤维有可能被拔出, 而钢筋则达到屈服强度; 在钢纤维从混凝土中被拔出之前, 其抗拉作用等效于钢筋的抗拉作用。当节点内掺入钢纤维时, 钢纤维承担了部分拉力, 节点核心区的水平向和竖直向钢筋配量可以减少; 当核心区的水平向和竖直向钢筋配量不变时, 节点可以承担更大地震荷载。即:

$$T_{sh} = V_h - N - T_{fh} \quad (12a)$$

$$T_{sv} = V_v - P - T_{fv} \quad (13a)$$

式中  $T_{fh}$ 、 $T_{fv}$  分别为钢纤维承担的水平向和竖向拉力。偏于安全, 可参考文献<sup>[7]</sup>提出的每单位面积上钢纤维所能承受的极限拉应力:  $f_{fm} = 1.5v/d$ ,

其中:  $v$  为钢纤维体积含量,  $l/d$  为钢纤维的长径比。所以  $T_{fh} = f_{fm} h b_j$ 、 $T_{fv} = f_{fm} h_j b_j$ ,  $h_b$  为扁梁高度。

### 3.6 充分考虑混凝土强度的计算公式

当由于建筑方面的要求, 或者由于稳定性和锚固方面的要求, 扁梁柱节点的尺寸不得不设计得较大时, 这时外荷载在节点内产生的压应力远未达到其软化抗压强度; 如果不考虑这部分剩余的混凝土强度将造成较大的浪费。如果将这部分剩余的混凝土强度用于抵抗外力在节点核心区产生的水平和竖向剪力, 这将大大减少节点核心区水平和竖向钢筋的配量, 从而也方便了施工。核心区所能提供的抗压承载力为:

$$D_0 = ab_j \zeta f_c \quad (15)$$

式中  $a$  为节点内(外)核心区斜压杆的等效宽度, 参考文献<sup>[3]</sup>, 可取  $a = 0.3 \sqrt{(h_j - 2a_{cs})^2 + (h_b - 2a_{bs})^2}$ 。 $\zeta$  为混凝土的软化系数, 文献<sup>[3]</sup>取  $\zeta = 0.8$ 。

节点内(外)核心区的剩余混凝土强度为:

$$\Delta f = \frac{D_0 - D}{ab_j} \quad (16)$$

参考文献<sup>[8]</sup>, 剩余混凝土强度所能提供的抗剪承载力  $\Delta \tau_c = 0.1 \Delta f_c$ 。所以剩余混凝土强度所能提供的水平和竖向抗剪承载力  $\Delta V_{ch}$ 、 $\Delta V_{cv}$  分别为:

$$\Delta h_{ch} = \Delta \tau_c b_j h_j \quad (17)$$

$$\Delta h_{cv} = \Delta \tau_c b_j h_b \quad (18)$$

因此, 式(12a)、(13a)可修正为:

$$T_{sh} = V_h - N - T_{fh} - \Delta V_{ch} \quad (12b)$$

$$T_{sv} = V_v - P - T_{fv} - \Delta V_{cv} \quad (13b)$$

## 4. 设计步骤

1. 由式(6)、(8)或者(6a)、(8a)计算出水平和竖向剪力  $V_h$ 、 $V_v$ 。
2. 由式(14)计算得到  $\beta$  角。
3. 由式(10)或式(11)计算得到  $D$  值。
4. 当  $D/(ab_j) < \zeta f_c$  时, 混凝土的抗压强度满足要求。
5. 由式(15)~(18)计算出  $\Delta V_{ch}$ 、 $\Delta V_{cv}$ 。
6. 由式(12b)、(13b)计算出  $T_{sh}$ 、 $T_{sv}$ 。
7. 若  $T_{sh} < (\sum f_{sv} A_{sv})_h$ , 则水平剪力筋的抗拉满足要求, 若  $T_{sv} < (\sum A_{sv} f_{sv})_v$ , 则竖向剪力筋的抗拉满足要求。

## 5. 设计方法的验证

本文四个扁梁柱节点B1~B4的破坏形态均为节点核心区混凝土剪压破坏,按文献<sup>[2]</sup>提出的柱侧梁上总弯矩在内、外核心区分配的原则,即  $M_1=MA_{s1}/A_s$ ,  $M_0=M-M_1$ , 其中M、 $M_1$ 、 $M_0$ 分别为柱侧梁上总弯矩和传给内、外核心区的弯矩,  $A_s$ 为扁梁纵向钢筋总面积,  $A_s=A_{s1}+A_{s0}$ 。可以计算出核心区混凝土的压应力和水平与竖向钢筋的拉应力,计算值与试验值见表2、表3,表中给出的钢筋应力试验值均为图4中7、8、9、10测点应力的平均值。

表2 内核心区的计算值与试验值比较(MPa)

	B1	B2	B3	B4
0.18f <sub>c</sub>	13.7	13.2	13.7	13.2
D/(ab <sub>j</sub> )	16.9	16.7	17.1	17.7
f <sub>sh</sub> 试验值	225	195	204	160
f <sub>sh</sub> 计算值	319	292	211	169

注: f<sub>sh</sub>为扁梁柱节点内核心区水平箍筋的应力

由表2可知,计算的混凝土核心区主压应力大于混凝土的软化强度,所以核心区混凝土应压碎,这与试验现象相吻合;计算的钢筋的应力与试验值总体上也吻合得较好。

表3 外核心区的计算值与试验值比较(MPa)

	B1	B2	B3	B4
0.18f <sub>c</sub>	13.7	13.2	13.7	13.2
D/(ab <sub>j</sub> )	9.8	11.56	11.72	12.9
f <sub>sh</sub> 试验值	225	195	204	160
f <sub>sh</sub> 计算值	198	222	101	107

由表3中可知,外核心区的混凝土并未达到软化抗压强度,但由于内核心区混凝土压碎后,相应引起了外核心区混凝土的破坏。钢筋的应力的计算值与试验值总体上也吻合较好。

## 6. 结论

在理论推导和试验验证的基础上,本文提出了一套通过验算扁梁柱节点内、外核心区混凝土的抗压强度和节点内、外核心区内配置的水平与竖向钢筋抗拉强度来进行扁梁柱节点设计的计算方法;该方法利用了节点内碳纤维和扁梁中无粘结预应力筋作用,且充分考虑了节

点内、外核心区混凝土的强度;该方法可供工程设计人员参考使用。

### 参考文献

1. 杨杰,张然.无粘结部分预应力扁梁柱节点性能研究.建筑技术开发(建筑结构),1990(6):18-26
2. 殷芝霖.钢筋混凝土扁梁结构的抗震性能及其设计方法.建筑结构学报,1993,14(4):2-15
3. 唐九如.钢筋混凝土框架节点抗震.南京:东南大学出版社,1989
4. 章文纲,程铁生.1.0钢纤维框架节点抗震性能的研究.空军工程学院学报,1988(3):35-45
5. 唐九如等.预应力混凝土延性框架抗震配筋限值研究.建筑结构学报,1996(1):20-22
6. 季韬.梁柱节点抗震性能的研究:[博士学位论文].浙江:浙江大学建筑工程学院,2000
7. 高丹盈.碳纤维钢筋混凝土梁正截面强度的计算.工业建筑,1991(1):9-14
8. GB11089 混凝土结构设计规范.北京:中国建筑工业出版社,1989

(上接第22页)

## 6. 结论

研究表明,在确定岩锚设计参数时,首先应确定岩体的物理力学性质,并在建立锚索失效系统故障树的基础上,应用最大经济期望决策理论可以得到优化设计参数。本文提出的锚固荷载、锚固角、锚固间距、内锚固段长度等优化设计方法,现场试验验证了其合理性与准确性,可供设计部门参考使用,岩锚支护决策支持系统RSASYS可以快速地进行边坡预应力锚索加固设计。

### 参考文献

- [1] 程良奎.中国岩土锚固技术的应用与发展[A].岩土锚固工程技术的应用与发展[C].北京:万国学术出版社,1996年,1-5.
- [2] 张发明.岩质边坡预应力锚固效应及应用研究[博士学位论文][D].南京:河海大学,2000年.
- [3] Jun Kanda,Haresh Shah.Engineering role in failure lost evaluation for building[J]. Structural safety,1997,19(1):79-90.
- [4] A.H-S.ANG.W.H.TANG,著.孔芳垂,陈星焘,顾子聪,译.工程规划与设计中的概率概念[M].北京:冶金工业出版社,1991年,6-145.
- [5] 陈祖煜,汪小刚.岩质边坡的加固技术[A].孙剑,夏可风,主编.'98水利水电地基与基础工程学术交流会议论文集[C].天津:天津科学技术出版社,1998年,419-429.
- [6] 张发明,刘宁,赵维炳.岩质高边坡预应力锚固力学行为与群锚效应[J].岩石力学与工程学报,2000(专辑).