

文章编号:1671-6833(2008)02-0018-05

## 预应力螺旋钢筋粘结锚固性能的试验研究

谢丽丽<sup>1</sup>, 李大为<sup>2</sup>, 刘立新<sup>2</sup>, 赵 镇<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 综合设计研究院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 通过对 54 个预应力螺旋钢筋(简称 PC 钢棒)粘结锚固试件的拉拔试验, 分析了 PC 钢棒的粘结锚固特点和影响粘结强度的主要因素, 在统计回归的基础上给出了粘结强度的计算公式, 并根据现行《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002)提出 PC 钢棒的锚固长度计算公式。

**关键词:** PC 钢棒; 粘结锚固; 计算公式

**中图分类号:** TU 502<sup>+</sup>.6 **文献标识码:** A

### 0 引言

预应力螺旋钢筋(PC 钢棒)是日本于 20 世纪 60 年代开发的一种技术含量很高的预应力钢材, 属于预应力强度级别中的中间强度级。由于它具有高强度韧性、低松弛性、表面有螺旋状凹槽与混凝土握裹力强、良好的可焊接性、节省材料等特点, 在国外已被广泛应用于高强的预应力混凝土离心管桩、电线杆、高架桥墩、铁路轨枕等构件中。PC 钢棒的研究和生产在我国起步较晚, 通过设备引进与开发, 生产能力发展迅速, 但就整体而言, 目前仍处于生产和应用的探索阶段, PC 钢棒混凝土构件性能的试验研究就成为应用的关键。笔者通过 54 个 PC 钢棒试件的拉拔试验, 研究混凝土强度、保护层厚度、锚固长度和配箍率对 PC 钢棒粘结锚固性能的影响, 并提出在实际应用中的锚固长度设计建议。笔者所用的 PC 钢棒公称直径  $d = 7.1 \text{ mm}$ 、在制作过程中形成 4 条螺旋凹槽, 外形与螺旋肋钢丝相似(如图 1 所示)。经实测, PC 钢棒的横截面积为  $38.73 \text{ mm}^2$ , 外轮廓圆直径  $D \approx 1.01 d$ , 肋高  $h \approx 0.024 d$ , 槽宽  $a \approx 0.35 d$ , 肋宽  $b \approx 0.39 d$ , PC 钢棒螺旋槽与轴线的夹角为  $20^\circ \sim 25^\circ$ , 屈服强度为  $1497 \text{ MPa}$ , 强屈比约为 1.1, 均匀伸长率  $\delta_{gt} > 3\%$ 。

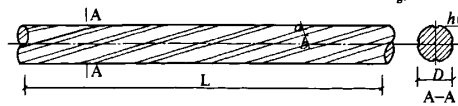


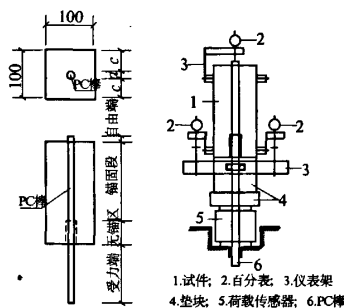
图 1 PC 棒示意图

Fig. 1 PC steel bar sketch

### 1 试验概况

#### 1.1 试件的设计与制作

根据试验要求, 设计了 A、B、C、D、E 5 组共 54 个试件, 分别探讨混凝土强度、保护层厚度、锚固长度和配箍率的影响。试件示意图 2(a), 各组试件的具体情况见表 1。其中 A、B 组试件为中心置筋, C 组试件为偏心置筋, D、E 组试件分别配了方形箍筋和螺旋箍筋。



(a) 试件示意图

(b) 试验装置示意图

图 2 试验示意图

Fig. 2 Test sketch

#### 1.2 试验观测及结果

试验在 WE-30 型液压式万能试验机上进行, 根据《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152-92)的要求分级加载。试验装置如图 2(b)所示, 试件的加载端放置硬塑料管保证一段无粘结长度以避免局部挤压的影响, 硬塑料管在浇注混

收稿日期:2008-03-17; 修订日期:2008-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50578148)

作者简介:谢丽丽(1954-)女, 郑州大学教授级高级工程师, 主要从事混凝土结构、砌体结构基本理论及应用研究。

凝土前用胶与 PC 钢棒固定,对其粘结力几乎没有影响,两端无粘结段的总长约 50 mm. 分别在加载端和自由端安装百分表测量相对滑移. 试件所受的拉拔力由油压表和荷载传感器同时记录. 百分表和荷载传感器分别与 CM-10 测量应变仪连接,用计算机记录每级加载后的读数. 根据试件从荷载为零直至破坏的各级荷载值及对应的滑移

值,由  $\tau = \frac{F}{\pi dl_a}$  计算平均粘结应力得到各试件的粘结应力滑移曲线,式中  $F$  为拉拔力,  $l_a$  为锚固长度,  $d$  为 PC 钢棒的公称直径. 图 3 为试件拉拔的典型粘结滑移( $\tau-s$ )曲线,其中 PC-B-I-3 锚固长度较长、未配箍筋,而 PC-D-I-3 锚固长度较短、配有箍筋.

表 1 拔出试验试件  
Tab.1 Pull-out test specimens list

试件 编号	混凝土设计 强度等级	锚筋直径 $d/\text{mm}$	锚固长度 $l_a/\text{mm}$	保护层厚度 $c/\text{mm}$	箍筋状况	试件 个数
A-I	C30	7.1	100	46.5	—	3
A-II	C40	7.1	100	46.5	—	3
A-III	C50	7.1	100	46.5	—	3
B-I	C30	7.1	200	46.5	—	3
B-II	C30	7.1	300	46.5	—	3
B-III	C40	7.1	200	46.5	—	3
B-IV	C40	7.1	300	46.5	—	3
B-V	C50	7.1	200	46.5	—	3
B-VI	C50	7.1	300	46.5	—	3
C-I	C30	7.1	100	20	—	3
C-II	C40	7.1	100	20	—	3
C-III	C50	7.1	100	20	—	3
D-I	C30	7.1	100	46.5	$\Phi 4@40$	3
D-II	C30	7.1	100	35	$\Phi 4@40$	3
D-III	C30	7.1	100	20	$\Phi 4@40$	3
E-I	C30	7.1	100	46.5	$\Phi 4$ 螺旋 $@30$	3
E-II	C30	7.1	100	35	$\Phi 4$ 螺旋 $@30$	3
E-III	C30	7.1	100	20	$\Phi 4$ 螺旋 $@30$	3

注:试件所用的混凝土采用强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥、粒径为 5~10 mm 的碎石和中粗沙砾配制.

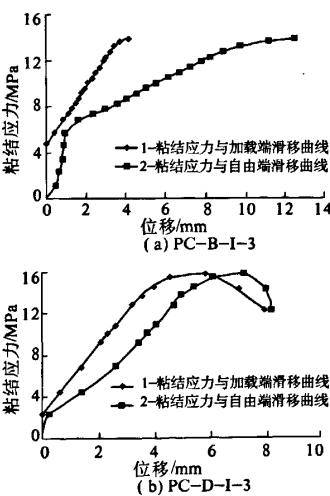


图 3 粘结滑移曲线  
Fig.3 Bond-slip curve

由实验观察及曲线的转折点,可以把 PC 钢棒的粘结锚固特征可分为以下几个受力阶段:

(1)微滑移段:加载后加载端滑移( $s_l$ )发展值很小,到自由端滑移( $s_f$ )发生后才较明显.此时锚长范围内的胶结力全部消失,主要靠摩擦力和咬合力持荷.

(2)线性滑移段:随荷载增加平均滑移  $s = (s_l + s_f)/2$  线性增大但数值仍较小,此时起锚固作用的主要是螺旋肋与肋间混凝土的咬合力.

(3)非线性滑移段:滑移发展到一定程度后曲线转折呈非线性形态.无横向配筋的试件,由于凸肋与混凝土之间的咬合力产生较大的横向拉应力而使试件劈裂.对于有横向配筋的试件,由于箍筋的约束作用,荷载还能增长,大部分试件无劈裂现象(PC-D-I-3).当保护层较大时,裂缝细小,甚至不能贯穿到试件的侧面,只能在试件的自

由端从 PC 钢棒向外发展几条裂纹.此后滑移增长明显加快,形成曲线的转折.

(4)下降段:达到峰值后,承载力迅速下降而滑移大幅增长,形成曲线的下降段.

(5)残余段:当滑移较大时咬合齿破碎堆积物被挤紧,荷载不再下降而滑移不断发展.此时滑移顺咬合齿发生,伴随试件旋转.对于锚固长度较大的试件,如  $l_a = 300$  mm,自由端和加载端的滑移都较小,达到一定的限值后,滑移的增长部分是由 PC 钢棒伸长引起,试件表面完好,试验至 PC 钢棒拉断而结束.

### 1.3 裂缝和破坏形态

试件 PC-B-I-3 的劈裂裂缝呈放射状,无明显的方向性,往往在保护层最薄处贯穿截面.剖开试件观察内部可见肋前混凝土碎屑堆积形成的斜面.试件 PC-D-I-3 配有箍筋无劈裂裂缝发生,后期发生顺螺旋槽方向的旋转如图 4 所示.

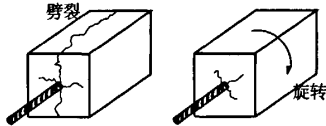


图 4 裂缝及破坏形态

Fig.4 Crevice and damage pattern

## 2 影响 PC 钢棒粘结锚固性能的主要因素

### 2.1 混凝土强度的影响

A 类试件 3 组共 9 个, B 类试件 6 组共 18 个,  $f_{cu} = 32.9 \sim 52.1$  MPa, 探讨混凝土强度的影响. 试验表明, 粘结锚固强度随混凝土强度的提高而提高, 并与抗拉强度  $f_t$  成正比, 这是由于无论内裂、劈裂、挤压或磨阻都与混凝土的质量特别是抗裂性有关, 如图 5 所示. 由试验值  $\tau_u$  和相应的抗拉强度  $f_t$  经统计回归得到如下关系式:

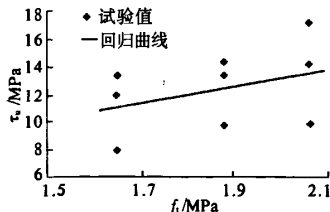


图 5 粘结强度与混凝土强度的关系

Fig.5 Relationship between bond strength and concrete strength

$$\tau_u = 6.3f_t + 0.64 \quad (1)$$

式中:  $\tau_u$  为拉拔力  $F$  最大 (即  $F_u$ ) 时的平均粘结应力,  $f_t = 0.88 \times 0.395 (f_{cu} \times 0.95)^{0.55}$  为混凝土的抗拉强度.

### 2.2 保护层厚度的影响

A 类和 C 类试件共 18 个,  $c/d = 2.81 \sim 6.55$ , 两类试件相比较来探讨混凝土保护层厚度的影响, 并用  $\tau_u/f_t$  来消除混凝土强度的影响. 试验表明,  $\tau_u/f_t$  随  $c/d$  的增大而增大, 大致成正比关系 (见图 6). 但是大量的资料表明, 这种增加并不是无限的, 到一定限度后不再增加, 此时多发生无劈裂的锚固拔出破坏.

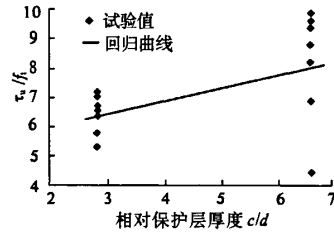


图 6 粘结强度与保护层厚度的关系

Fig.6 Relationship between bond strength and concrete cover thickness

### 2.3 锚固长度的影响

A 类试件共 9 个, 锚固长度为 100 mm, B 类试件共 18 个, 锚固长度分别为 200、300 mm, 探讨锚固长度的影响. 试验表明, 随锚固长度的增大, 拉拔力  $F_u$  增大, 但平均粘结强度减小 (见图 7). 这是由于短锚时应力丰满程度较大, 而长锚时应力沿锚长分布不均, 平均应力减小的缘故.

### 2.4 横向配箍率的影响

A-I、C-I 组试件共 6 个,  $\rho_{sv} = 0$ , D 类、E 类试件共 18 个,  $\rho_{sv} = 0.675\% \sim 2.093\%$ , 探讨配箍率的影响. 表 2 为 D 类、E 类试件与 A-I、C-I 组试件的试验结果. 从试验结果可以看出, 配置横向箍筋可以提高 PC 钢棒在混凝土中的粘结强度如图 8 所示, 主要是箍筋增强了握裹混凝土对锚筋的约束, 提高了锚固强度. 由试验值,  $\tau_u/f_t$  和相应的配箍率经统计回归得到如下关系式:

$$\tau_u/f_t = 30\rho_{sv} + 8.34 \quad (2)$$

式中:  $\rho_{sv} = A_{sv1}/c$ ,  $\rho_{sv}$  为劈裂面的配箍率;  $A_{sv1}$  为单根箍筋的截面积;  $c$  为保护层厚度;  $s_v$  为箍筋间距.

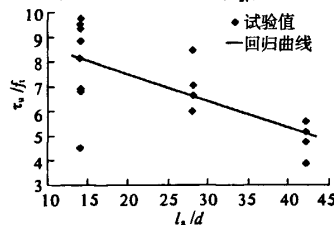


图 7 粘结强度与锚固长度的关系

Fig.7 Relationship between bond strength and anchoring length

表2 配箍率的影响

Tab.2 Effect of transverse steel ratio

试件 编号	$d$ /mm	$f_{cu}$ /MPa	$l_a/d$	$\tau_a$ 平均/ $f_t$	$f_t$ /MPa	$c/d$	$\rho_{sv}$ /%
A-I	7.1	32.9	14.08	8.13	1.65	6.55	0
C-I	7.1	32.9	14.08	6.78	1.65	2.82	0
D-I	7.1	32.9	14.08	10.43	1.65	6.55	0.675
D-II	7.1	32.9	14.08	9.83	1.65	4.93	0.897
D-III	7.1	32.9	14.08	7.97	1.65	2.82	1.57
E-I	7.1	32.9	14.08	7.68	1.65	6.55	0.90
E-II	7.1	32.9	14.08	10.01	1.65	4.93	1.196
E-III	7.1	32.9	14.08	8.15	1.65	2.82	2.093

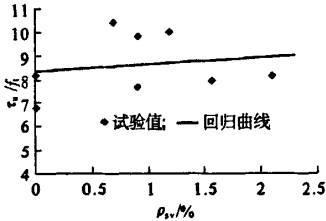


图8 粘结强度与横向配箍率的关系

Fig.8 Relationship between bond strength and transverse steel ratio

综合以上各因素,在大量试验资料分析的基础上,考虑影响粘结强度的主要因素并适当加以简化,经统计回归后得到PC钢棒的粘结锚固强度计算公式为:

$$\tau_a = (0.32 + 0.49c/d + 55.6d/l_a + 100\rho_{sv})f_t \quad (3)$$

试验结果与按式(3)计算值比较如表3所示,试验值/式(3)计算值的平均值 $\mu = 1.13$ ,变异系数 $\delta = 0.116$ ,计算值与试验值的符合较好,并有一定的安全储备如图9所示。

表3 PC钢棒粘结锚固试验值与计算值

Tab.3 Bond anchorage test values and calculations of formula

试件 编号	$l_a/d$	$c/d$	$f_t$ /MPa	$\rho_{sv}$ /%	$\tau_a$ 试验值 /MPa	式(3) 计算值	$\tau_a$ 试验值/式 计算值
A-I	14.08	6.55	1.65	0	13.41	12.33	1.088
A-II	14.08	6.55	1.88	0	14.33	14.05	1.020
A-III	14.08	6.55	2.06	0	17.08	15.39	1.100
B-I	28.12	6.55	1.65	0	12.0	9.07	1.322
B-II	42.25	6.55	1.65	0	7.77	7.98	0.973
B-III	28.12	6.55	1.88	0	13.32	10.33	1.289
B-IV	42.25	6.55	1.88	0	9.61	9.10	1.057
B-V	28.12	6.55	2.06	0	14.14	11.32	1.249

续表3

试件 编号	$l_a/d$	$c/d$	$f_t$ /MPa	$\rho_{sv}$ /%	$\tau_a$ 试验值 /MPa	式(3) 计算值	$\tau_a$ 试验值/式 计算值
B-VI	42.25	6.55	2.06	0	9.72	9.97	0.975
C-I	14.08	2.82	1.65	0	11.19	9.32	1.200
C-II	14.08	2.82	1.88	0	12.40	10.62	1.167
C-III	14.08	2.82	2.06	0	11.60	11.64	0.996
D-I	14.08	6.55	1.65	0.675	17.20	13.44	1.280
D-II	14.08	4.93	1.65	0.897	16.22	12.50	1.297
D-III	14.08	2.82	1.65	1.57	13.15	11.91	1.104
E-I	14.08	6.55	1.65	0.90	12.67	13.81	0.917
E-II	14.08	4.93	1.65	1.196	16.52	13.0	1.271
E-III	14.08	2.82	1.65	2.093	13.45	12.77	1.053

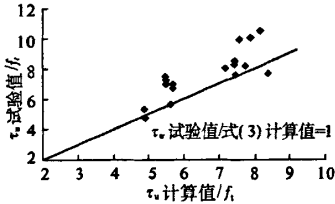


图9 PC钢棒粘结锚固试验值与式(3)计算值比较

Fig.9 Bond anchorage test values of PC steel bar compare with calculations of formula(3)

3 预应力螺旋钢筋锚固长度的计算

现行《混凝土结构设计规范》GB50010-2002规定预应力钢筋的锚固长度 $l_a$ 按下式计算:

$$l_a = \alpha \frac{f_{py}}{f_t d} \quad (4)$$

式中: $f_{py}$ 、 $f_t$ 分别为预应力钢筋和混凝土抗拉强度设计值, $d$ 为预应力钢筋的公称直径, $\alpha$ 为预应力钢筋的外形系数,按表4取值。

表4 钢筋的外形系数

Tab.4 Shape coefficient of reinforcing steel

钢筋 类型	光面 钢筋	带肋 钢筋	刻痕 钢丝	螺旋肋 钢丝	三股钢七股钢 绞线	七股钢 绞线
$\alpha$	0.16	0.14	0.19	0.13	0.16	0.17

由试验现象和分析结果可知,PC钢棒粘结锚固性能类似于螺旋肋钢丝,但粘结锚固强度略低于螺旋肋钢丝,由于粘结锚固试验结果有一定离散性且本次试件的数量也偏少,为保证PC钢棒粘结锚固计算的可靠性,考虑计算公式95%的保证率,在统计分析的基础上,将螺旋肋钢丝的外形系数除以0.85的修正系数得PC钢棒的外形系

数  $\alpha = 0.13/0.85 \approx 0.15$ , 则 PC 钢棒的锚固长度可按下式计算:

$$l_a = 0.15 \frac{f_{py}}{f_t d} \quad (5)$$

#### 4 结论

(1) 由 PC 钢棒粘结锚固试验现象得出, PC 钢棒的锚固延性好, 大滑移时仍有相当锚固力; 这是因为螺旋槽的旋角较小 ( $20^\circ \sim 25^\circ$ ), 容易以旋转的方式吸收较大的滑移, 在变化较大的情况下 (如抗震) 保持必要的承载力, 即具有较好的锚固延性。

(2) PC 钢棒的粘结锚固试验结果表明, PC 钢棒的粘结锚固性能类似于螺旋肋钢丝, 但粘结锚固强度略低于螺旋肋钢丝; 影响 PC 钢棒粘结锚固性能的主要因素与其他种类钢筋基本相同。

(3) PC 钢棒的锚固长度仍可以按《混凝土结

构设计规范》GB50010-2002 规定的公式计算, 钢筋的外形系数可取为  $\alpha = 0.15$ 。

#### 参考文献:

- [1] 刘立新, 徐有邻. 螺旋肋钢筋粘结锚固性能的试验研究, 混凝土结构基本理论与工程应用 [C], 天津: 天津大学出版社, 1998: 53-57.
- [2] 毛达岭, 刘立新, 范丽. HRB500 级钢筋粘结锚固性能及设计建议 [J]. 郑州大学学报: 理学版, 2004. 25(2): 54-58.
- [3] 王传志, 腾智明. 钢筋混凝土结构理论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985, 254-295.
- [4] 孙亚飞, 孙静. PC 钢棒抗拉强度的预报与控制 [J]. 金属制品, 2002. 28(5): 10-12.
- [5] 《混凝土结构设计规范》GB50010-2002 [S]. 中国建筑工业出版社, 2002, 北京.
- [6] 赵军, 金朝晖. 混凝土结构中钢筋的粘结锚固 [J]. 平顶山工学院学报, 2003. 12(3): 3-4.

### Experimental Study on Bond - anchorage Property of Prestressed Helical Reinforcement in Concrete

XIE Li-li<sup>1</sup>, LI Da-wei<sup>2</sup>, LIU Li-xin<sup>2</sup>, ZHAO Zhen<sup>2</sup>

(1. Zhengzhou University Multifunctional Design and Research Academy, Zhengzhou 450002, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Based on 54 steel bar for prestressed concrete (PC steel bar) pull-out tests, the bond-anchorage properties of PC steel bar and the main factors influencing the bond capacity between PC steel bar and concrete are investigated in this paper. Then the calculating formula of bond length has been established through statistical regression, and finally, based on the existing《Code for design of concrete structures》(GB50010-2002), the anchoring length calculation formula of PC steel bar is suggested.

**Key words:** PC steel bar; bond-anchorage; calculation formula