

文章编号:1671-6833(2009)04-0011-04

# 螺旋肋钢丝(PC棒)预应力传递长度的试验研究

刘立新,刘中琦

(郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001)

**摘 要:**螺旋肋钢丝(简称 PC 棒)是我国新研制开发的用于预应力混凝土结构的新型钢丝.通过对 28 个先张法构件端部区域混凝土应变的量测,分析了 PC 棒预应力传递长度范围内混凝土应变和应力的变化规律以及主要影响因素,提出了 PC 棒预应力传递长度计算公式的建议,为 PC 棒的工程应用提供了依据.

**关键词:**PC 棒;预应力;传递长度

**中图分类号:**TU 378.8 **文献标识码:**A

## 0 引言

螺旋肋钢丝(Prestressed Reinforcement with Helical Rib)简称 PC 棒,是我国冶金行业新研制开发的用于预应力混凝土结构的新型钢丝,其抗拉强度标准值可达到 1 530 MPa,有很好的延性和韧性,填补了我国预应力钢筋强度级别的中间强度等级.与钢绞线和传统的高强预应力钢丝相比,PC 棒具有松弛性低、与混凝土握裹力强、生产过程不须进行酸洗、对环境污染小、成本低廉等优点,在国外已被广泛应用于高强预应力混凝土离心管桩、高架桥墩、桥梁、铁路轨枕等预应力构件中,具有广阔的应用前景和显著的社会经济效益.为了尽快使 PC 钢棒这种新型高强预应力钢丝在工程中得到推广应用,中国建筑科学研究院、中国冶金建筑研究总院和郑州大学等单位共同承担了国家科技支撑计划课题“高强钢筋与高性能混凝土应用关键技术研究”,PC 棒预应力传递长度的试验研究即为该项研究的子课题之一.

笔者采用 PC 棒制作了 28 个先张法预应力构件,通过连续量测切断预应力筋后构件端部区域的混凝土应变,求出了 PC 棒预应力传递长度,分析了影响预应力传递长度的主要因素,提出了 PC 棒预应力传递长度计算公式的建议,为 PC 棒的工程应用提供依据.

## 1 试验方案和试验方法

预应力传递长度试件共 28 个,PC 棒的公称直径分别为 7 mm、9 mm 和 11 mm,抗拉强度标准值  $f_{ptk} = 1\ 530\text{ MPa}$ ,张拉控制应力  $\sigma_{con} = 0.6 \sim 0.8f_{ptk}$ .构件的截面尺寸为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ,长度为  $2\ 000 \sim 2\ 500\text{ mm}$ ,混凝土立方体强度  $f_{cu} = 42.5 \sim 50.4\text{ MPa}$ ,保护层厚度  $c = 20 \sim 46.5\text{ mm}$ .部分试件配有方形箍筋或螺旋形箍筋,箍筋直径  $d = 4\text{ mm}$ ,间距为  $50\text{ mm}$ ,试件参数见表 1.

表 1 先张法预应力试件参数

Tab.1 The parameters of prestressing

试件 编号	直径 $d/\text{mm}$	$\sigma_{con}$	$f_{con}/$ MPa	保护层 $c/\text{mm}$	配箍 形式
T-a-7-1	7	$0.7f_{ptk}$	42.5	46.5	—
T-a-7-2	7	$0.7f_{ptk}$	42.5	20.0	—
T-a-7-3	7	$0.7f_{ptk}$	42.5	20.0	方箍
T-a-7-4	7	$0.7f_{ptk}$	42.5	46.5	螺旋箍
T-a-7-5	7	$0.7f_{ptk}$	50.4	46.5	—
T-a-7-6	7	$0.7f_{ptk}$	50.4	20.0	—
T-a-7-7	7	$0.7f_{ptk}$	50.4	46.5	方箍
T-a-7-8	7	$0.7f_{ptk}$	49.1	46.5	—
T-a-7-9	7	$0.7f_{ptk}$	49.1	20.0	—
T-a-7-10	7	$0.7f_{ptk}$	49.1	46.5	螺旋箍
T-b-9-1	9	$0.6f_{ptk}$	42.5	45.5	—
T-b-9-2	9	$0.6f_{ptk}$	42.5	20.0	—
T-b-9-3	9	$0.6f_{ptk}$	42.5	45.5	螺旋箍
T-b-9-4	9	$0.6f_{ptk}$	50.4	46.5	—
T-b-9-5	9	$0.6f_{ptk}$	50.4	20.0	—

收稿日期:2009-04-11;修订日期:2009-07-28

基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BA61B03)

作者简介:刘立新(1947-),男,湖北汉川人,郑州大学教授,博士生导师,主要从事混凝土、砌体结构基本理论及工程应用.

续表 1

试件 编号	直径 d/mm	$\sigma_{con}$	$f_{con}/$ MPa	保护层 c/mm	配箍 形式
T-b-9-6	9	$0.6f_{ptk}$	50.4	45.5	方箍
T-b-9-7	9	$0.6f_{ptk}$	50.4	20.0	螺旋箍
T-b-9-8	9	$0.6f_{ptk}$	49.1	45.5	—
T-b-9-9	9	$0.6f_{ptk}$	49.1	20.0	—
T-b-9-10	9	$0.6f_{ptk}$	49.1	45.5	方箍
T-c-11-1	11	$0.8f_{ptk}$	42.5	44.5	—
T-c-11-2	11	$0.8f_{ptk}$	42.5	20.0	—
T-c-11-3	11	$0.8f_{ptk}$	42.5	44.5	方箍
T-c-11-4	11	$0.8f_{ptk}$	50.4	44.5	—
T-c-11-5	11	$0.8f_{ptk}$	50.4	20.0	—
T-c-11-6	11	$0.8f_{ptk}$	50.4	44.5	螺旋箍
T-c-11-7	11	$0.8f_{ptk}$	49.1	44.5	—
T-c-11-8	11	$0.8f_{ptk}$	49.1	20.0	—

试验构件在长线台座长张拉,PC 棒张拉至规定的张拉应力后,浇注混凝土进行养护,并对 PC 棒的拉应力进行 48 h 监测. PC 棒放张以前,在试件上布置测点,用螺旋千分尺量测试件端部预应力传递区域范围内混凝土测点之间的初始长度.在浇注试件混凝土的同时抽取三组试块,第一组试块在标准条件下进行养护,用以确定混凝土的强度等级;第二组试块在现场与试件同条件下进行养护,用以确定 PC 棒放张时混凝土的实际强度;第三组试块为对照试块,用以量测混凝土温度及收缩的自由变形.

PC 棒放张前在试件顶面中心线附近每隔 120 mm 钻孔埋入钢筋测头,测点两排布置(图 1).放张之前先用螺旋千分仪量测试件各钢筋测点的初始间距以及对照试块的初始间距(精确至 0.001 mm),作为计算混凝土应变的初始标距,并记录量测时的气温. PC 棒切断放张 1 h 后,立即对各试件端部预应力传递区域范围内各钢筋测点间距的变化进行量测,并在随后的 1 d、3 d、7 d、14 d 和 28 d 继续进行量测,同时也量测对照试块的中心间距的变化,记录量测时的气温(图 2).



图 1 试件测点布置

Fig. 1 Arrangement of the measure points



图 2 量测测点间距

Fig. 2 Measure the distance between points

2 试验现象及结果

2.1 预应力传递区域内混凝土的应变

PC 棒预应力传递区域内各测点混凝土的压应变  $\varepsilon_c$  按下列公式计算:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{c1} - \varepsilon_{cs} \tag{1}$$

$$\varepsilon_{c1} = \frac{l_{c1} - l_{c1}^0}{l_{c1}^0} \tag{2}$$

$$\varepsilon_{cs} = \frac{l_{cs} - l_{cs}^0}{l_{cs}^0} \tag{3}$$

式中:  $\varepsilon_{c1}$  为构件混凝土的量测应变;  $l_{c1}^0$  为 PC 棒放张以前各钢筋测点的初始间距;  $l_{c1}$  为 PC 棒放张以后在不同龄期各钢筋测点的量测间距;  $\varepsilon_{cs}$  为对照试块的温度及收缩应变;  $l_{cs}^0$  为对照试块的初始间距;  $l_{cs}$  为在不同龄期对照试块的量测间距.

图 3 表示公称直径为 11 mm 的 PC 棒预应力传递长度试件在切断 PC 棒放张后的 1 h、1 d、3 d、7 d 和 28 d 端部区域的混凝土压应变随着距构件端头距离的增大而变化的情况,图中横坐标表示测点距构件端头(即 PC 棒切断点处)的距离(mm),纵坐标表示各测点混凝土的压应变( $\times 10^{-6}$ ),为表示方便,图中取混凝土压应变为正.从图中可以看出,靠近试件端头的混凝土应变很小,接近于零;随着距构件端头距离的增大,混凝土的压应变逐渐增大;距构件端头的距离达到一定长度后,混凝土的压应变趋于稳定.从图中还可看出,在切断钢绞线后的 1 h 到 1 d 期间内混凝土的压应变变化不大,随着放张后龄期的增长,由于混凝土徐变的影响,试件端部区域的混凝土压应变有所增大.

2.2 PC 棒预应力传递长度的确定

先张法预应力构件在切断预应力筋放张后,混凝土中的有效预压应力是依靠预应力筋和混凝土之间粘结力逐渐建立起来的.在构件预应力筋切断的端头,预应力筋的拉应力和混凝土的压应力均为零,随着距构件端头距离的增大,预应力筋

的回弹应力通过粘结力逐渐传递给混凝土,使混凝土产生压应力、预应力筋产生拉应力;在距构件端头的距离达到一定长度时,混凝土的压应力达到有效预压应力  $\sigma_{pe}$ , 预应力筋的拉应力达到有效预拉应力  $\sigma_{pe}$ ;从先张法构件切断预应力筋的端部到构件中混凝土的压应力达到有效预压应力  $\sigma_{pe}$  的距离称为预应力传递长度  $l_{tr}$ 。

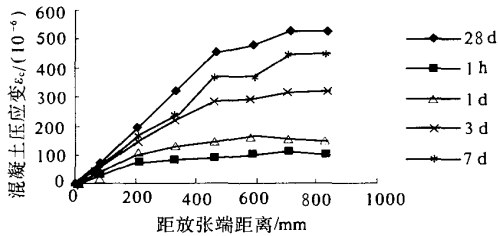


图3 试件端部混凝土应变(T-c-11-4西端)

Fig.3 The concrete strain at the end of member

在本次试验中由试件端部区域各点混凝土压应变可求出混凝土的压应力,画出试件端部区域混凝土压应力随距端部距离变化的曲线;由放张时PC棒的有效预拉应力  $\sigma_{pe}$  可求出混凝土放张后应达到的有效预压应力  $\sigma_{pe}$ ;在试件端部区域混凝土压应力随距端部距离变化的曲线上确定  $\sigma_{pe}$  点,则  $\sigma_{pe}$  点距试端部的距离即为实际预应力传递长度  $l_{tr}$ ,如图4所示。

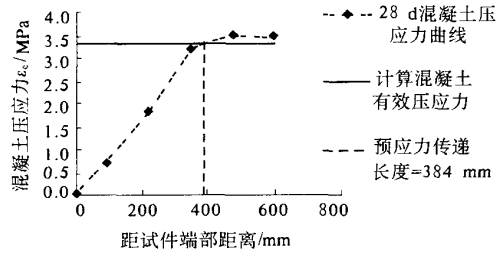


图4 预应力传递长度的确定(T-a-7-1东端)

Fig.4 The determination of transmission length

3 PC棒预应力传递长度分析

3.1 影响PC棒预应力传递长度的因素

图5~图7为根据表1中的试验参数画出的PC棒直径、试件最小保护层厚度以及横向配箍率等因素对PC棒预应力传递长度的影响图,图中横坐标均为PC棒有效预应力  $\sigma_{pe}$  与混凝土抗拉强度的比值,纵坐标均为实测相对预应力传递长度  $l_{tr}/d$ 。从图中可以看出,影响PC棒预应力传递长度的主要因素是有效预应力  $\sigma_{pe}$  与混凝土抗拉强度的比值,随着  $\sigma_{pe}/f_t$  的增大,相对预应力传递长度  $l_{tr}/d$  也增大,呈现较好的线性关系。

万方数据

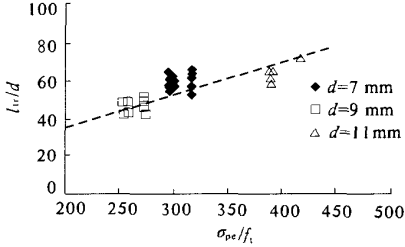


图5 不同直径PC棒的传递长度

Fig.5 The transmission length of PC steel bars with different diameter

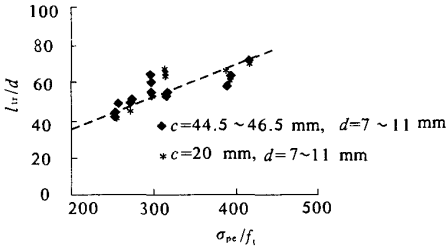


图6 不同保护层厚度PC棒的传递长度

Fig.6 The transmission length of PC steel bars with different concrete cover thickness

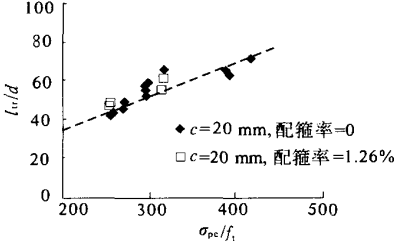


图7 不同配箍率PC棒的传递长度

Fig.7 The transmission length of PC steel bars with different stirrup ratio

从图还可以看出,PC棒直径、试件最小保护层厚度以及横向配箍率等因素对PC棒预应力传递长度的影响不明显,这主要是因为预应力传递区域内,PC棒的拉应力是通过与混凝土之间粘结应力的传递逐渐增大的,在传递区域内混凝土的压应力也是逐增大的,因而PC棒对混凝土的局部挤压和劈裂作用较小,保护层厚度和横向配箍率的影响也较小。

3.2 PC棒预应力传递长度的计算

我国混凝土结构设计规范规定先张法预应力钢筋的预应力传递长度  $l_{tr}$  应按下式计算:

$$l_{tr} = \alpha \frac{\sigma_{pe}}{f_{tk}} d \tag{4}$$

式中:  $\sigma_{pe}$  为放张时预应力钢筋的有效预应力;  $d$  为预应力钢筋的公称直径;  $f_{tk}$  为与放张时混凝土立方体强度  $f_{cu}$  相应的混凝土轴心抗拉强度;  $\alpha$  为预

应力钢筋的外形系数,与预应力钢筋的外形几何参数有关.由试验结果回归分析,可得到 PC 棒预应力传递长度  $l_{tr}$  平均值的计算公式为:

$$l_{tr} = 0.1739 \frac{\sigma_{pe}}{f_{tk}} d \quad (5)$$

即 PC 棒的外形系数可取为  $\alpha = 0.1739$ . 式(5)的计算结果与试验实测结果的比较见图 8, 计算值与实测值比值的平均值  $\mu = 0.993$ , 变异系数  $\delta = 0.086$ ; 可见计算值与实测值符合很好.

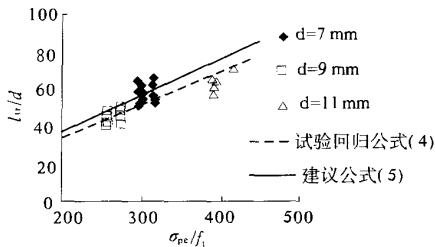


图 8 传递长度计算结果与试验结果比较

Fig. 8 Comparison of calculated results with test results

为保证先张法预应力构件端部区域有一定抗裂储备,预应力传递长度  $l_{tr}$  的取值不宜偏小,应有一定的保证率.考虑 85% 的保证率,PC 棒的外形系数可取与刻痕钢丝相同的外形系数,即取  $\alpha = 0.19$ . 则 PC 棒预应力传递长度取值的建议公式可表示为:

$$l_{tr} = 0.19 \frac{\sigma_{pe}}{f_{tk}} d \quad (6)$$

式(6)的计算值与实测值比值的平均值  $\mu = 1.086$ , 变异系数  $\delta = 0.085$ , 计算值与实测值符合也很好,如图 8 所示,可供工程设计时应用.

#### 4 结论

(1) 试验结果表明,影响 PC 棒预应力传递长度的主要因素是有效预应力  $\sigma_{pe}$  与混凝土抗拉强度的比值,随着  $\sigma_{pe}/f_t$  的增大,相对预应力传递长度  $l_{tr}/d$  也增大,呈现较好的线性关系.

(2) 由试验结果回归分析,PC 棒预应力传递长度  $l_{tr}$  可按式(5)计算,计算值与实测值符合很好.

(3) 为保证先张法预应力构件端部区域有一定抗裂储备,并考虑 85% 的保证率,在实际工程中建议 PC 棒预应力传递长度按式(6)计算.

#### 参考文献:

- [1] GB5001022002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 徐有邻. 螺旋肋钢丝预应力传递性能的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 1998, (1): 32-35.
- [3] 谢丽丽. 先张法预应力混凝土梁绞线预应力传递长度的试验研究[J]. 建筑科学, 2007, (5): 34-36.

### Experimental Study on the Transmission Length of Prestressed Reinforcement with Helical Rib (PC Steel Bars) in Concrete

LIU Li-xin, LIU Zhong-qi

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** This paper presents the results of transmission length tests on 28 pre-tensioned members made of prestressing reinforcement with helical rib (PC steel bars). The compressive strain and stress of concrete within the prestressing transmission zone for the PC steel bars of the members are analyzed, and the factors affecting the transmission length of PC steel bars in concrete are also discussed, and a formula for calculating the transmission length is suggested. The result can provide reference for the application of PC steel bars in concrete structure.

**Key words:** helical prestressing reinforcement (PC steel bars); prestressing; transmission length