

文章编号: 1001-8360(2002)02-0095-05

# 缓粘结预应力混凝土结构试验研究

赵建昌, 王起才

(兰州铁道学院 土木建筑学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:** 通过缓粘结预应力混凝土受弯构件实验研究, 给出了不同龄期下张拉预应力筋所需克服的摩阻力范围, 从开裂弯矩、极限弯矩、裂缝形式和荷载-挠度曲线等各个方面, 把缓粘结预应力构件与传统的后张法(有粘结、无粘结)预应力构件进行了对比分析, 得出缓粘结预应力构件在张拉两个月后, 其工作性能可等同于有粘结预应力构件的结论, 为缓粘结预应力体系设计提供了依据。

**关键词:** 缓粘结; 预应力混凝土梁; 实验研究; 张拉摩阻力; 工作性能

**中图分类号:** TU 378.2 **文献标识码:** A

## Experiment study on prestressed concrete beams of postponing condensation

ZHAO Jian-chang, WANG Qi-cai

(School of Civil and Architectural Engineering, Lanzhou Railway University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** On the basis of the experiment of prestressed concrete beam by placing material of postponing condensation between concrete and prestressed-bar, the range of friction resistance which needs to be overcome when prestressed bars are tensioned is presented. Through comparing the prestressed concrete beam with the traditional post-tensioned prestressed concrete beam in the aspects such as crack moments, ultimate moments, crack forms, load-deflection graph and so on, the conclusion has been gained that the performance of the prestressed concrete beam is almost as same as the traditional post-tensioned prestressed concrete beam which has sticky force between concrete and prestressed-bar. The conclusion of this paper can provide references for the designer of the prestressed concrete system.

**Keywords:** postponing condensation; prestressed concrete beam; experiment study; friction drag; work performance

预应力混凝土体系按设计和施工方法不同可分为两大类,即先张法和后张法。在后张法中,按预应力筋与混凝土之间有无粘结又可分为无粘结和有粘结。在无粘结预应力体系中,预应力筋的布置具有灵活方便,无成孔和灌浆等烦琐和复杂的施工工序,一出现就受到工程界的广泛重视,并得到大量使用,但由于无粘结预应力筋在工作中所受的预应力几乎处处相等,易造成预应力筋和锚具疲劳问题,同时还存在受拉区混凝土裂缝数量少,宽度大,易使预应力筋锈蚀和强度利用率低的缺点。而有粘结预应力体系克服了无粘结预应力体系在工作中表现出来的问题和缺点,但施工工艺

要求的预留孔道和孔道灌浆等过程,造成施工干扰大,孔道灌浆堵塞以及成孔后在灌浆前和灌浆中易形成月牙槽,降低灌浆材料与预应力筋的粘结,同时也易造成预应力筋锈蚀等问题。这两种预应力体系既有优点,也有自身难以克服的缺点,如何把二者相结合,扬长避短,发挥各自优势是预应力混凝土研究者一直在探索的问题。铁道第一勘察设计院预应力技术开发中心在总结多年预应力混凝土结构设计和施工实践的基础上,与兰州铁道学院合作,提出了一种新型预应力混凝土体系——缓粘结预应力体系,即不预留孔道,不需孔道灌浆,施工时与无粘结体系一样,而在施工完成后,靠包裹于预应力筋上的缓凝砂浆随时间延长而逐渐凝结硬化达到与有粘结预应力筋体系几乎完全相同的效

收稿日期: 2001-07-30; 修回日期: 2001-12-07

基金项目: 铁道部科技发展计划项目(96G56)

作者简介: 赵建昌(1962—),男,陕西咸阳人,教授,硕士。

果。缓粘结预应力体系的优点是显而易见的,但是在应用中,由于缺乏系统的结构试验,设计者主要参考后张法有粘结预应力构件的有关参数和设计方法,这种做法是否恰当是设计者普遍关心的问题。本文通过缓粘结预应力混凝土受弯构件试验研究,给出了不同龄期下张拉预应力筋所需克服的摩阻力的范围,从开裂弯矩、极限弯矩、裂缝形式和荷载-挠度曲线等各个方面,把缓粘结预应力构件与传统的后张法(有粘结、无粘结)预应力构件进行了对比分析,得出了缓粘结预应力构件在张拉两个月后,其工作性能与有粘结预应力构件几乎一样的结论,为缓粘结预应力体系设计提供了依据。

### 1 实验简介

#### 1.1 实验方案

根据实验目的,考虑张拉时现场可能出现的情况,

将张拉时间分为 10 d、15 d、20 d、25 d 共计 4 个时段,预应力配筋方式分为直线筋和曲线筋两种。在直线配筋方式中,考虑预应力筋张拉完成后,构件可能经历的 3 种环境,即(1)张拉后,不久就被搬运;(2)缓凝砂浆未达设计强度就承受荷载;(3)缓凝砂浆达到设计强度后,才承受荷载。为了使缓粘结预应力构件的工作性能与无粘结预应力试件和有粘结预应力构件的工作性能有一个对比,各安排两组无粘结预应力构件和有粘结预应力构件。无粘结预应力筋采用在预应力筋表面涂一层黄油后再套上波纹管的方法;有粘结预应力试件采用先预留孔洞,等混凝土强度达到 100% 时,张拉预应力筋,再孔道灌浆的传统方法,为了进一步考察缓凝砂浆结硬后,与混凝土和预应力筋是否达到牢靠粘结、共同变形的要求,采用加载试验完成后,劈开试件,肉眼直接观察的方法并取样测定其强度。试验具体方案见表 1,共计 20 个试件。

表 1 缓粘结预应力混凝土结构试验方案总表

预应力类型	配筋方式	加载时间	张 拉 时 间			
			10 d	15 d	20 d	25 d
缓粘结	直线筋	1 张拉后扰动(2 个月后加载)			试件数 2 编号: 4—1, 4—2	
		2 缓凝砂浆强度较低时加载(1 个月)			试件数 2 编号: 5—1, 5—2	
	3 缓凝砂浆 100% 硬化后加载(2 个月)	试件数 2 编号: 1—1, 1—2	试件数 2 编号: 3—1, 3—2	试件数 2 编号: 6—1, 6—2	试件数 2 编号: 2—1, 2—2	
	4 缓凝砂浆 100% 硬化后加载(2 个月)	试件数 2 编号: 9—1, 9—2		试件数 2 编号: 10—1, 10—2		
无粘结	直线筋			试件数 2 编号: 7—1, 7—2		
有粘结	直线筋			试件数 2 编号: 8—1, 8—2		

#### 1.2 试件制作

采用 C40 混凝土,配合比为水泥 砂 石 = 1 1.37 2.73。水泥采用硅酸盐水泥,碎卵石粒径为 0.5~2.0 cm,直线配筋试件如图 1,曲线配筋试件如

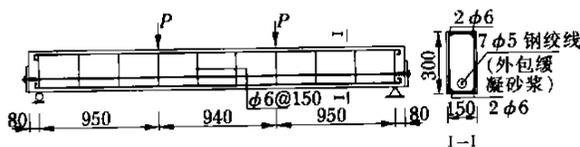


图 1 直线配筋试件

图 2。钢模自然养护,缓凝砂浆 30 d 后逐渐硬化,3 个月后最终硬化,其抗压强度达 30 MPa。试件制作的同时,每一试件分别留 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试块和 3 个 100 mm × 100 mm × 300 mm 的棱

柱体试块,预应力钢绞线也分别留有试样,以便测其材性;缓凝砂浆留试块,以便测定缓凝砂浆的性质和最终的强度。

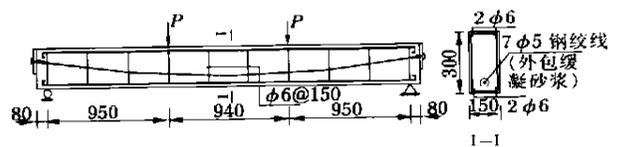


图 2 曲线配筋试件

#### 1.3 预应力筋的张拉

严格按试验安排的张拉时间进行,张拉时观察张拉端和非张拉端应力传感器变化,以非张拉端传感器有反映作为预应力筋被拉动,即静摩阻力被克服为标志,然后再分级张拉。张拉油压分级为 5.5、11、16、22、

27、30、32 MPa 及锚固共 8 级, 并分别记录张拉端和非张拉端应力传感器的应变读数。

### 1.4 试件支座安装及加载

试验时支座及加载装置和仪器布置如图 3。试件就位, 后用水准仪观察调整支座的水平度, 尽可能使二者位于同一水平线。采用油压千斤顶加载, 以 5 kN 分级加载, 每级荷载间的时间间隔为 5 min, 加载时注意观察裂缝出现和发展的情况。

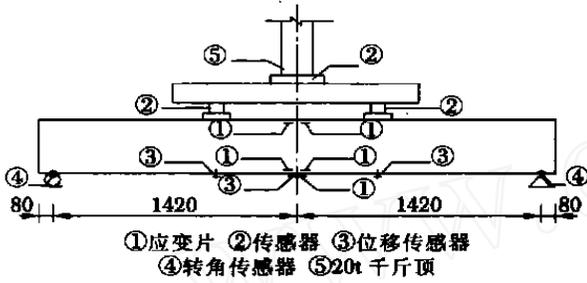


图 3 加载装置及仪器布置图

## 2 试验结果及分析

### 2.1 张拉摩阻力

以非张拉端传感器有反应时, 张拉端所测得的张拉力除以试件长度, 计算出单位长度静摩阻力; 以张拉

端传感器读得的张拉力减去非张拉端传感器读得的张拉力再除以试件长度, 计算出单位长度动摩阻力, 动摩阻力始终小于静摩阻力。不同龄期下的静摩阻力见表 2。

从表 2 中可以看出, 不同龄期直线配筋静摩阻力以龄期 10~ 15 d 时最低, 最大为 1.33 kN/m, 单位面积摩阻力为 4.45 N/cm<sup>2</sup>。不同龄期曲线配筋摩阻力普遍大于直线配筋摩阻力, 龄期 10 d 时为 1.5 kN/m, 20 d 时为 2.33 kN/m。为了进一步弄清楚张拉摩阻力与张拉龄期之间的关系, 本文对张拉摩阻力另外进行了龄期为 5、11、14、18、21、24、28、32、38、44、49、54、61、66 共 14 组, 每组 3 根预应力筋的专题试验, 获得了张拉龄期与张拉摩阻力(静摩阻力和动摩阻力)关系曲线, 如图 4。从图 4 可以看出: (1) 缓粘结预应力筋, 龄期 30 d 前张拉摩阻力基本上保持稳定, 单位面积静摩阻力在 3.0~ 4.5 N/cm<sup>2</sup> 之间, 单位面积动摩阻力在 1.77~ 3.5 N/cm<sup>2</sup> 之间。这说明超效缓凝砂浆能够保持 30 d 不硬化, 并具有相当大的可塑性; (2) 龄期大于 30 d 后, 张拉摩阻力急剧增大, 龄期大于 60 d 后, 张拉摩阻力达到 145 N/cm<sup>2</sup>, 这时摩阻力实际主要由粘结力提供。这说明超效缓凝砂浆 30 d 后开始硬化, 一旦开始硬化, 其摩阻力迅速增大。

表 2 缓粘结预应力试件张拉摩阻力

配筋方式	龄期/d	构件号	构件长度/m	张拉力/kN	静摩阻力/kN·m <sup>-1</sup>	构件号	构件长度/m	张拉力/kN	静摩阻力/kN·m <sup>-1</sup>
直线筋	10	1—1	3.0	3.00	1.00	1—2	3.0	3.30	1.10
	15	3—1	3.0	2.50	0.83	3—2	3.0	2.79	0.93
	20	6—1	3.0	3.76	1.26	6—2	3.0	3.60	1.20
	25	2—1	3.0	3.99	1.33	2—1	3.0	3.90	1.30
曲线筋	10	9—1	3.0	4.91	1.66	9—2	3.0	4.50	1.50
	20	10—1	3.0	7.43	2.48	10—2	3.0	6.97	2.33

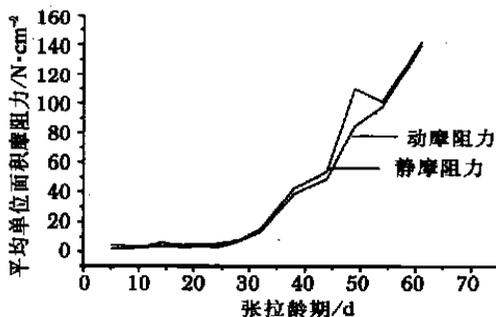


图 4 张拉龄期与张拉摩阻力关系曲线

### 2.2 开裂弯矩、极限弯矩

构件从开始加载到破坏, 开裂弯矩、极限弯矩见表 3—1 和表 3—2。

从表 3—1 可以看出, 同一张拉龄期下极限弯矩, 1 个月时加载构件(5—1, 5—2)的极限弯矩与无粘结构件(7—1, 7—2)的极限弯矩十分接近, 说明 1 个月时缓凝砂浆尚未完全凝固, 这时梁的表现如同无粘结预应力构件; 2 个月后加载构件(4—1, 4—2), (6—1, 6—2)的极限弯矩与有粘结预应力结构件(8—1, 8—2)的极限弯矩十分接近, 说明 2 个月后缓凝砂浆已完全凝结, 起到了把预应力筋与混凝土粘结在一起的作用, 预应力筋与混凝土能共同工作, 协同变形。曲线配筋的构件(10—1, 10—2)的极限弯矩接近直线配筋的构件(4—1, 4—2), (6—1, 6—2)。从表 3—2 可以看出, 张拉龄期对极限弯矩有一定的影响, 张拉龄期为 20 d 时最大。对于开裂弯矩, 从表 3—1 和表 3—2 可以看出, 无论是同一张拉龄期还是不同张拉龄期都十分接近, 说明张

拉龄期和张拉环境对构件的开裂弯矩影响不大; 曲线配筋构件的开裂弯矩低于直线配筋构件。这是因为曲

线筋张拉摩阻力大于直线配筋, 跨中有效预应力小的缘故。

表 3—1 同一张拉龄期下开裂弯矩、极限弯矩实测值

配筋方式	构件环境	构件编号	开裂弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$			极限弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$		
			实测值	平均值	计算值	实测值	平均值	计算值
直线筋 (缓粘 结筋)	1 张拉后扰动(2 个月后加载)	4—1	61.5	64.1	60.7	145.5	142.6	136.8
		4—2	66.5			140.0		
	2 缓凝砂浆强度较低时加载 (1 个月)	5—1	61.8	59.4	60.7	114.0	114.0	120.6
		5—2	57.0			114.0		
	3 缓凝材料 100% 硬化后加载 (2 个月)	6—1	61.8	61.8	60.7	146.3	144.3	136.8
		6—2	61.8			142.3		
直线筋	无粘结筋	7—1	61.8	59.3	60.7	109.3	111.6	120.6
		7—2	57.0			114.0		
	有粘结筋	8—1	66.5	64.1	60.7	133.0	135.4	136.8
		8—2	61.8			137.8		
曲线筋	缓凝材料 100% 硬化后加载(2 个月)	10—1	57.5	54.9	52.8	128.3	130.6	136.8
10—2	52.3	133.0						

表 3—2 不同张拉龄期下开裂弯矩、极限弯矩实测值

配筋方式	张拉龄期/d	构件编号	开裂弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$			极限弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$		
			实测值	平均值	计算值	实测值	平均值	计算值
直线筋	10	1—1	66.3	67.3	60.7	123.5	125.9	136.8
		1—2	68.2			128.3		
	15	3—1	61.8	64.1	60.7	128.5	135.4	136.8
		3—2	66.5			142.5		
	20	6—1	61.8	61.8	60.7	146.3	144.3	136.8
		6—2	61.8			142.3		
25	2—1	66.5	64.1	60.7	128.3	128.3	136.8	
	2—2	61.8			128.3			
曲线筋	10	9—1	52.3	51.2	52.8	128.3	130.6	136.8
		9—2	50.2			133.0		
	20	10—1	57.5	54.9	52.8	128.3	130.6	136.8
		10—2	52.3			133.0		

### 2.3 裂缝形式

图 5 为同一张拉龄期缓粘结预应力构件 5—1 (1 个月后加载)、4—1、6—1 (2 个月后加载)、无粘结预应力构件 7—1、有粘结预应力构件 8—1 和缓粘曲线配筋预应力构件 10—1 的裂缝分布情况。

从裂缝形式的对比可以看出: 构件 5—1 与构件 7—1 的裂缝形式类似, 说明 1 个月时加载, 构件的裂缝形式与无粘结预应力构件类似, 具有无粘结构件的特征。构件 4—1、6—1 和 8—1 的裂缝间距比较均匀且十分类似, 说明 2 个月加载时, 构件的裂缝形式已具有有粘结预应力构件特点; 曲线缓粘预应力构件 10—1, 2 个月加载时, 同样也已具有有粘结预应力构件的裂缝特点。

### 2.4 实测荷载-挠度 ( $p-f$ ) 曲线

图 6 为构件 4—1、6—1、7—1、8—1 张拉 2 个月后加载时的荷载-挠度 ( $p-f$ ) 曲线。从图 6 可以看出, 张

拉 2 个月后, 加载的构件 4—1、6—1 的  $p-f$  曲线与无粘结构件 7—1 的  $p-f$  曲线有明显的差别, 而与有粘结构件 8—1 的  $p-f$  曲线十分接近, 说明它们都已具有有粘结预应力构件特征。

### 2.5 缓凝砂浆与混凝土实际结合情况

为了进一步考察缓凝砂浆与混凝土实际结合情况, 对部分 2 个月后加载破坏的试件进行了劈开检验, 劈开后当即进行了现场取样。缓凝砂浆样品的平均强度为  $33.5 \text{ MPa}$ , 缓凝砂浆、钢绞线与混凝土三者结合良好, 无后张法中孔道灌浆时经常出现的缺陷。进一步验证了 2 个月后缓凝砂浆完全可以起到把预应力筋与混凝土粘结在一起的作用。综上所述, 可以认为缓粘结筋在 1~ 30 d 内张拉是可行的, 龄期为 10~ 15 d 内张拉较理想, 单位面积静摩阻力可在  $3.0 \sim 4.5 \text{ N/cm}^2$  之间取值; 缓粘结预应力构件在张拉 2 个月后, 完全可以视为有粘结预应力构件。

