

# 夹片式锚具荷载传递试验方法

## ——预应力锚固区安全探讨之六

曾利<sup>1</sup> 周成顺<sup>1</sup> 裴 璜<sup>2</sup>

(1 杭州浙锚预应力有限公司 浙江富阳 311402 2 中国建筑科学研究院 北京 100013)

**摘 要:**我国预应力工程进入国际市场日渐增多,国际预应力行业对结构上预应力锚固区承载性能都有标准要求,我国在这方面的研究恰是一个弱项。铸造型锚垫板和螺旋筋是夹片式锚具的组成部分,国际预应力协会(FIP)、欧洲标准(EN)及技术认证组织(EOTA)、美国国家公路和运输协会(AASHTO)及后张学会(PTI)都要求结合锚具在结构物上的排布进行试验认证,经认可的产品才允许在工程上实用。我国即将修订的锚具标准,也会有与之相当的规定。我国预应力锚具生产行业、结构设计单位和工程业主等部门很快将面临此项复杂而又严格的陌生试验。本文作为锚固区安全探讨之六,将杭州浙锚预应力有限公司为主三年来摸索的试验方法,向同行人员作一个初步介绍,以响应我国新锚具标准的实施和开展此项试验认可工作。技术上不成熟之处在所难免,抛砖引玉,愿与同行专家共同探讨。

**关键词:**预应力锚固区 铸造型锚垫板 螺旋筋 荷载传递试验 混凝土棱柱体试件

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2015.01.001

### 1 前言

《预应力技术》2012年第2期曾发表了《关于预应力锚固区的荷载传递试验》一文,是为了应对担忧预应力锚固区的安全度不足,泛论可用荷载传递试验予以监控。2014年第3期发表了《预应力锚固区荷载传递试验国际标准简介》,向读者介绍了这项标准的发展沿革,并为当前修订我国锚具标准提供参考。关于荷载传递的试验方法,国内熟知的专家不多,大多数的检测认可部门和锚具生产厂还没有建立起这项试验装置;国外可供参考的试验实例极少。我国新修订的锚具国家标准很可能与国际看齐,要求实施的时间即将到来。为解当前急需,我们在尚未做完试验工作之时,将一套完整的试验方法,以设题举例的形式写成这份内部文稿,在当前也可请国内专家赐教。

本文是参照欧洲标准化委员会发布的《后张预应力体系的力学性能试验》(EN 13391-2004)和欧洲技术认证组织(EOTA)发布的《后张预应力体系欧洲技术认可准则》(ETAG 013)的规定写成的,也参考了国际预应力协会的FIP1993、美国AASHTO和PTI标准,预计和我国新锚具标准有可能大致相符。

本文作如下设定:

- (1) 按《预应力技术》2013年第3期发表的《夹片式锚具锚垫板系列的尺寸估算》,和2012年第3期发表的《铸造型预应力锚垫板的受力和尺寸探讨》两篇文章的内容,规划了产品优选系列,锚筋孔数计有1、3、4、5、7、12、19、22、27、31和37共11个规格;
- (2) 锚垫板采用HT200灰口铸铁制成;
- (3) 螺旋筋采用HPB235或HPB300级的光圆钢筋制成(没有必要使用更高强度的钢筋);
- (4) 预应力筋是符合GB/T5224-2003的钢绞线,公称直径 $\phi$ 15.20mm,抗拉强度为1860MPa,整根拉断力不小于260kN;
- (5) 适用结构的混凝土强度等级为C40;
- (6) 荷载传递试验安排为探索性厂内试验。

### 2 试验目的

试验YJM15-19型锚具锚垫板和螺旋筋组成的混凝土试件承载能力。

### 3 概况

新设计一个系列拟用于国外某工程的YJM型夹片式锚具,取YJM15-19型的锚垫板、螺旋筋和波纹管,按标准制成混凝土棱柱体试件,用以

进行荷载传递试验。

#### 4 标准依据

欧洲标准EN13391、ETAG013；其他参考文献见“前言”。

本文的符号定义如下：

$f_{ck}$ ——混凝土龄期28天时的特征抗压强度（混凝土强度等级）；

$f_{ck,o}$ ——现场施加全部预应力时混凝土的最小特征抗压强度；

$f_{cm,o}$ ——现场施加全部预应力时混凝土试块的平均抗压强度；

$f_{cm,e}$ ——荷载传递试验中，试件达到破坏时混凝土试块的平均抗压强度；

$F$ ——荷载传递试验的荷载；

$F_{pk}(F_{pk})$ ——预应力筋的特征极限抗拉力；

$F_u$ ——荷载传递试验中，试件的实测极限荷载；

$W$ ——试件裂缝宽度；

$\varepsilon_t$ 、 $\varepsilon_v$ ——试件的横向、纵向应变。

#### 5 试件

因为锚垫板底面为正方形，所以混凝土试件截面也应为正方形。截面边长 $a$ 是按多个锚具排列的最小中距确定的。本锚具的螺旋筋外径为 $\phi 420\text{mm}$ ，相邻的间隙为 $20\text{mm}$ ，所以锚具排列最小中距为 $420\text{mm}+20\text{mm}=440\text{mm}$ 。参考美标PTI的规定，试件截面边长 $a$ 应为 $440\text{mm}+150\text{mm}=590\text{mm}$ 。（注：本锚具排列的2倍边距至少为 $570\text{mm}$ ，大于 $440\text{mm}$ ，不取为依据。）试件高度规定 $h \geq 2a$ ，故试件三向尺寸为 $590 \times 590 \times 1180$ （mm），截面积 $A_c = a \times a = 59^2 = 3481\text{cm}^2$ ，混凝土体积 $V_c = a^2 \times h = 0.411\text{m}^3$ 。

试件箍筋按每立方米混凝土不超过 $50\text{kg}$ 配置，取用 $\phi 8$ 光圆钢筋，共23支。纵向架立钢筋总截面按不超过 $0.003A_c$ 取用，共8根 $\phi 12$ 钢筋。

锚垫板的主承压板尺寸为 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，两个附加翼板直径分别为 $\phi 195\text{mm}$ 、 $\phi 170\text{mm}$ ，锚垫板全高 $300\text{mm}$ ，筒内壁单边斜度小于 $4^\circ$ 。

螺旋筋钢筋直径 $\phi 18\text{mm}$ ，圆圈外径 $\phi 420\text{mm}$ ，螺距 $60\text{mm}$ ，共7圈。体积配筋率

$\rho_v = 4.0\%$ 。

金属波纹管规格为 $\phi 100/107$ 。

试件结构设计图如图1所示。

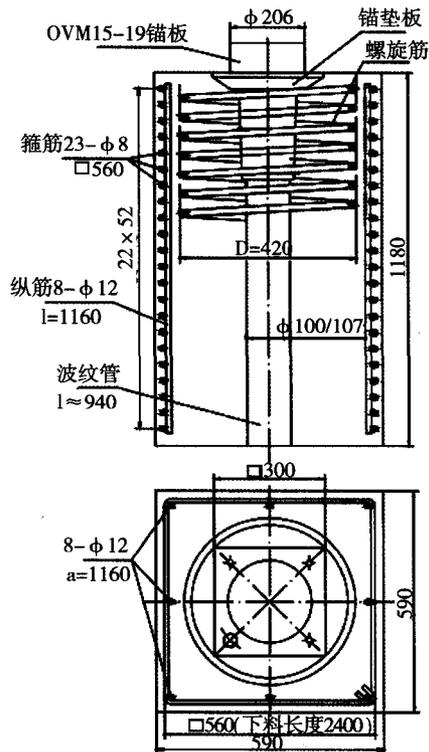


图1 荷载传递试件结构设计图

混凝土标号：C40，配合比：略。

试件水平浇筑，用震动棒捣固。同时制做 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 立方体混凝土试块约30块（10组），与试件同条件养护。在强度接近标号时，陆续压测试块进行监控，荷载传递试验当日压3组试块，强度分别为 $45\text{MPa}$ 、 $47.5\text{MPa}$ 、 $50\text{MPa}$ ，平均值为 $f_{cm,e} = 47.5\text{MPa}$ 。

试验单位确定该锚垫板在混凝土强度达到标号的100%才允许张拉预应力，所以 $f_{ck,o} = f_{ck}$

张拉预应力时的混凝土平均强度 $f_{cm,o}$ 按中国混凝土质量控制手册对C60以下混凝土的非统计法验收标准，应达到标号的1.15倍，即

$$f_{cm,o} = 1.15 f_{ck,o} = 1.15 \times 40 = 46\text{MPa}$$

而且最低一组强度应符合 $f_{cu,min} \geq 0.95 f_{ck}$

标准规定试验时混凝土强度不能过高，但可稍微超过 $f_{cm,o}$ ，确定允许增加 $4\text{MPa}$ ，于是：

$$f_{cm,e} \leq f_{cm,o} + 4\text{MPa} = 46 + 4 = 50\text{MPa}$$

这样就可以确定试验时混凝土平均强度不

应超过50MPa。本试验3组试块实测平均值为 $f_{cm,e}=47.5\text{MPa}$ ，最低一组的强度不低于 $0.95f_{ck}=38\text{MPa}$ ，所以符合规定。这一规定比FIP更便于试验操作。如采用ETAG013的规定， $f_{cm,e}$ 可以放宽得更多， $f_{cm,e}$ 可以 $\leq 53\text{MPa}$ ，且没有最低强度的限制。

## 6 试验设备

(1) 加荷设备：杭州浙锚预应力有限公司的加荷设备为一台自行组装的10000kN试验框架，如图2所示。框架上横板中央悬挂一台10000kN液压千斤顶及配套的荷载传感器。液压油泵站供给，可按程序控制，也可手动控制。测力系统经过计量部门标定核准。荷载传感器底面至框架下横板上表面的净空距离约2.0m，是放置不同高度试件及调节高度的承压台之处。

试件浇注时可加平整的钢底板，在框架中安放时仍应铺1cm~2cm细砂，以资传力均匀。

有条件时可添置一台4柱式15000kN大柱距压力试验机，会更便于操作。

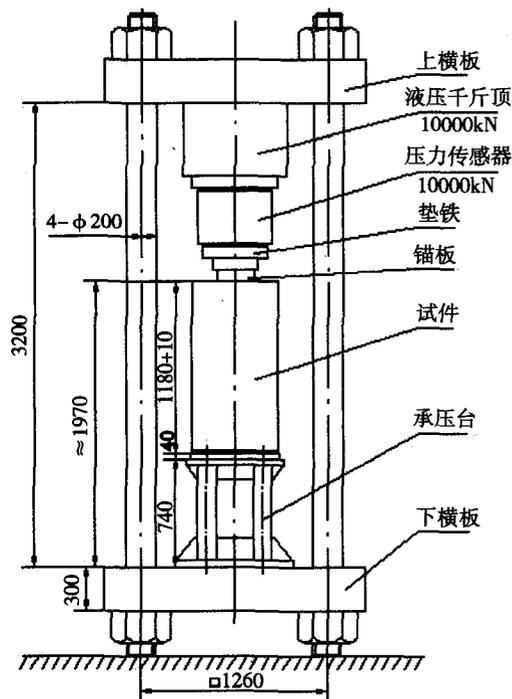


图2 试验框架

### (2) 测试仪器：

a) 裂缝测宽仪（如HC-CK102型），读数精度经放大可达0.01mm，仪器内配有SD卡，可将

测值及裂缝图像拍照储存。使用时由人工佩带，在试件上测读。

b) 位移传感器（如YHD-10型导杆式引伸仪），与静态应变测试分析系统（如DH3821型）及电脑联机，可全程测量、记录和存储位移（ $\Delta$ ）值。使用手持式“接触式引伸仪”在各荷载点测量并用纸质记录表记录，可能是更方便的方法。

## 7 仪表布置及试件安装

(1) 试件准备：试验前将试件表面清理干净，不必刷白，标出试件型号，A、B、C、D四个侧面和试验日期。在各侧面上用铅笔线划出位移传感器的位置及标距点，然后将金属片做成的测点用快干胶粘贴牢固，如图3所示。

位移传感器的数量、安装位置和标距，国际上并无硬性规定，通常在每个侧面上安装两个横向的和一个竖向的。本试验采用的标距约为230mm~300mm，3个位移传感器都位于锚垫板下方不远的区域。

锚垫板上表面安放锚板的子口槽应清理干净，此平面在浇注试件时必须与试件轴线垂直，以保证加荷时传力正确。

(2) 试件安装：用两根小槽钢及长螺栓制

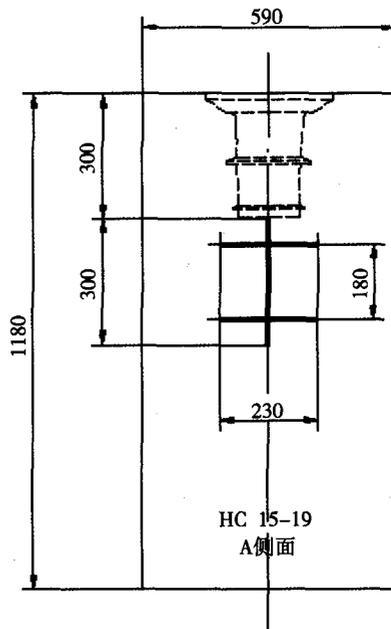


图3 位移传感器布置图

成一付夹紧板, 夹紧试件中部, 以供叉车搬运和托举安装试件。试件在试验框架中的对中、找平十分重要。试件就位后将12个位移传感器按编号装到试件准备好的位置上, 导线与应变仪分线箱的接线柱编号必须正确无误。

## 8 荷载试验过程

本试验采用慢速循环加荷制度, 荷载按  $0.2F_{pk}=988kN$ 、 $0.4F_{pk}=1976kN$ 、 $0.6F_{pk}=2964kN$  和  $0.8F_{pk}=3952kN$  增加, 在第一次达到  $0.8F_{pk}$  以后, 按下述条件进入循环荷载试验:

上限荷载 ( $0.8F_{pk}$ ),  $F_{max}=3952kN$

下限荷载 ( $0.12F_{pk}$ ),  $F_{min}=592.8kN$

荷载幅度  $\Delta F=3359.2kN$

循环次数  $n=13(>10)$

试验全过程的加荷程序如图4所示。荷载点4-5-6为第1循环, 荷载点6-7-8为第2循环, 荷载点n-2-n-1-n为第n次循环。

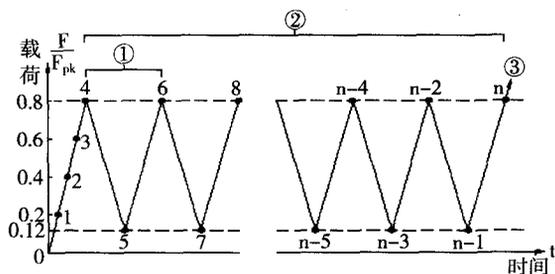


图4 循环加荷程序

待测量的负荷点1、2、3……n-1、n

①1次循环

② $\geq 10$ 次循环

③至试件压坏

因为在每个荷载点都要采集裂缝宽度W和纵横向位移的测量值, 在此期间都须持荷几分钟。由此看来, 使用人工控制油压比编程控制更觉方便。

13次循环加荷后, 拆去位移传感器, 缓慢增加荷载, 直至试件破坏, 记录到破坏荷载值  $F_u=5780kN$ 。

为了拍照的清晰度, 可将裂缝加以描绘。试件的破坏状况、锚垫板的沉降、开裂和倾斜都记录描述和拍照。

## 9 试验结果

### (1) 裂缝

第1条裂缝是在第3级荷载  $0.6F_{pk}=2964kN$  时出现在B侧面上, 当时在裂缝最宽处 ( $0.08mm$ ) 作出划线标记, 在后续的试验全过程都在此点测量宽度值, 以便按欧洲标准规定办法进行裂缝稳定性评估。该点裂缝宽度在全过程的数值记录如表1所示。

表1 HC15-19试件裂缝宽度记录表 (B侧面)

测量次序	循环次数	荷载 (kN)	裂缝宽度 (mm)	备注
0	0	0	0	
1	0	988	0	
2	0	1976	0	
3	0	2964	0.08	
4	0	3952	0.08	
5	1	592.8	--	
6	1	3952	0.09	
7	2	592.8	--	
8	2	3952	0.12	
9	3	592.8	--	
10	3	3952	0.12	
11	4	592.8	--	
12	4	3952	0.15	
13	5	592.8	--	
14	5	3952	0.15	
15	6	592.8	--	
16	6	3952	0.18	
17	7	592.8	--	
18	7	3952	0.18	
19	8	592.8	--	
20	8	3952	0.20	
21	9	592.8	--	
22	9	3952	0.20	
23	10	592.8	--	
24	10	3952	0.20	
25	11	592.8	--	
26	11	3952	0.22	
27	12	592.8	--	
28	12	3952	0.22	
29	13	592.8	0.10	
30	13	3952	0.22	
31	14			
32	14			

在3个特定荷载点时裂缝宽度如下, 都小于标准规定:

在荷载第一次达到上限 $0.8F_{ptk}=3952kN$ 时,

$$W=0.08mm<0.15mm,$$

在荷载最后一次达到下限 $0.12F_{ptk}=592.8kN$

$$\text{时, } W=0.10mm<0.15mm,$$

在荷载最后一次达到上限 $0.8F_{ptk}=3952kN$

$$\text{时, } W=0.22mm<0.25mm。$$

标准规定裂缝宽度发展的稳定性评估办法如下:

荷载第一次达到 $0.8F_{ptk}$ 时裂缝宽度确定为 $W_0$ ,以后各次循环终了时( $0.8F_{ptk}$ )顺序为 $W_i$ 。标准要求后4个循环时裂缝宽度的增量( $W_n-W_{n-4}$ ),如果小于或等于之前各循环时增量之和的三分之一 $[1/3 \times (W_{n-4}-W_0)]$ ,即可判定裂缝发展稳定。

按表1记录: $W_n=0.22mm$ ,  $W_{n-4}=0.20mm$ ,  $W_0=0.08mm$ ,  $W_n-W_{n-4}=0.02mm$ ,  $1/3 \times (W_{n-4}-W_0)=0.04mm$ ,裂缝变化稳定,符合标准要求。

各侧面上随后会出现多条裂缝,在荷载第一次达到 $0.8F_{ptk}$ 时,因宽度较小或尚未开裂,不能作为 $W_0$ ,无法进行评估,所以这些裂缝都不测读。对此,各相关标准均无明确阐释。

## (2) 应变

在评估应变 $\varepsilon$ 稳定性时,标准规定是比较 $\varepsilon$ 增量的变化速率。因为位移传感器的标距在试验中固定不变,这样就可以将测得的位移 $\Delta$ 算出增量,直接进行比较。于是,可将标准提出的条件式 $(\varepsilon_n-\varepsilon_{n-4}) \leq 1/3 \times (\varepsilon_{n-4}-\varepsilon_0)$ ,化为 $(\Delta_n-\Delta_{n-4}) \leq 1/3 \times (\Delta_{n-4}-\Delta_0)$ 。

试验中,4个侧面上12个位移传感器在13个循环中的位移 $\Delta$ 值,都会记录并储存到电脑中。但在整理数据时,只需要提取 $n=0, 9, 13$ 时上限荷载作用下的 $\Delta$ 值。而且欧洲技术认可准则只要求有两个侧面的评估即可。本试验A、C两侧面的测量值及评估列于表2,数据符合标准要求。各相关标准都对应变的最大值没有规定。

## 10 认可论述

技术管理部门根据试验结果做出下面的认可论述:

表2 HC15-19试件位移传感器位移记录整理表

循环次数	A侧面			C侧面		
	仪表号 横向,上	仪表号 横向,下	仪表号 竖向	仪表号 横向,上	仪表号 横向,下	仪表号 竖向
0	0.386	0.217	0.218	0.241	0.341	0.222
9	0.568	0.435	0.239	0.411	0.428	0.38
13	0.600	0.471	0.242	0.440	0.447	0.411
13-9	0.032	0.036	0.003	0.029	0.019	0.031
9-0	0.272	0.218	0.021	0.170	0.087	0.158
1/3(9-0)	0.091	0.073	0.007	0.057	0.029	0.053
试验评估	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定

注:表2中位移为绝对值,数字仅供示例。

(1) 荷载传递试验后,经混凝土试块测定,试件混凝土的平均抗压强度 $f_{cm,e}=47.5MPa$   
 $< f_{cm,o}+4MPa=1.15f_{ck,o}+4MPa=50MPa$ (此处  
 $f_{ck,o}=f_{ck}=40MPa$ )符合标准规定。

(2) 最大裂缝宽度:

第一次上限荷载 $0.8F_{ptk}=3952kN$ 时,  
 $W=0.08mm<0.15mm$

最后一次下限荷载 $0.12F_{ptk}=592.8kN$ 时,  
 $W=0.10mm<0.15mm$

最后一次上限荷载 $0.8F_{ptk}=3952kN$ 时,  
 $W=0.22mm<0.25mm$

最大裂缝宽度都小于限定值。

(3) 裂缝宽度发展的稳定性:

在上限荷载 $0.8F_{ptk}=3952kN$ 作用下,循环次数 $n=0, 9, 13$ 时的裂缝宽度分别为 $W_0=0.08mm$ 、 $W_{n-4}=W_9=0.20mm$ 、 $W_n=W_{13}=0.22mm$ ,经核算,能符合标准判别式 $(W_n-W_{n-4}) \leq 1/3(W_{n-4}-W_0)$ 的要求,试件裂缝直到循环荷载之后都是稳定的。

(4) 混凝土应变的稳定性:

试件A、C两个侧面上,混凝土的横向和竖向应变,经核算都能符合 $(\varepsilon_n-\varepsilon_{n-4}) \leq 1/3(\varepsilon_{n-4}-\varepsilon_0)$ 的标准要求,试件应变直到循环荷载之后都是稳定的。

(5) 试件的实测破坏荷载 $F_u=5780kN$ ,大于 $1.1F_{ptk}f_{cm,e}/f_{cm,o}=1.1 \times 4940 \times 47.5/46=5611.1kN$ ,符合标准要求。

(6) 锚垫板没有破坏,略有下沉(1mm~2mm),不影响使用。