

# 预应力钢绞线规定非比例延伸力测定的不确定度评定

迟 珊, 杨锡阶, 王时越

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 介绍了用 WE-600 型液压万能试验机测定高强度低松弛预应力钢绞线规定非比例延伸力  $F_{P_{0.2}}$  的试验方法, 并对试验结果的测量不确定度进行分析评定, 找出了影响规定非比例延伸力测量结果的主要因素是重复性试验和拉力测量。

**关键词:** 预应力钢绞线; 液压万能试验机

**中图分类号:** TU 511.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2008)04-0026-04

## Evaluation of Uncertainty about Proof Force of Non-Proportional Extension to Steel Stranded Wire

CHI Shan, YANG Xi-jie, WANG Shi-yue

(Faculty of Civil and Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650024, China)

**Abstract** The WE-600 hydraulic universal testing machine is used to determine proof force  $F_{P_{0.2}}$  of non-proportional extension to high strength and low relaxation steel stranded wire. The measurement uncertainty of the test is then analyzed. The main factors affecting the results are found out to be repeatability testing and stress measurement.

**Key words** prestressed steel strand; hydraulic universal testing

### 0 引言

高强度低松弛预应力钢绞线是目前广泛被采用的一种高效建筑钢材, 尤其近十多年来国内建造的许多大型桥梁、高架立交桥、高层建筑以及大型厂房、水电站等, 都大量采用高强度低松弛预应力钢绞线, 使这些建筑物的综合性能(结构、外形、承载等)都得到明显改善; 同时直接降低了工程造价、运输方便及改善劳动者的工作强度。

本文通过对高强度低松弛预应力钢绞线规定非比例延伸力  $F_{P_{0.2}}$  测定的不确定度的评定, 找到引起测量结果不确定度的主要来源并加以分析, 为提高检测水平提供依据。

### 1 试样及试验方法

选用高强度低松弛预应力钢绞线, 按 GB/T 5224-2003《混凝土用钢绞线》规定, 在室温 ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) 下用 WE-600 液压万能试验机 (精度 1 级), 选用量程为 0~300 kN, 应变式引伸仪 (精度 0.3 级), 静态应变仪 (分辨率  $1\mu\epsilon$ )。采用卸力法<sup>[1]</sup>对试样进行规定非比例延伸力试验。当引伸仪标距的非比例延伸达到原始标距 0.2% 时所受的力即为规定非比例延伸力  $F_{P_{0.2}}$ <sup>[2]</sup>, 以 10 个有效试样的算术平均值为测试结果, 并进行评定。

收稿日期: 2008-05-10

第一作者简介: 迟珊 (1949-), 男, 实验师, 主要研究方向: 材料力学、实验力学, E-mail: yangxj1666@126.com

## 2 数学模型

规定非比例延伸力  $F_{P0.2}$  为试验过程中当引伸仪标距的非比例延伸达到原始标距 0.2% 时所达到的力, 因此, 力和应变变量彼此独立, 于是不确定度传播律为:

$$u_{rel}^2(F_{P0.2}) = u_{rel}^2(rep) + u_{rel}^2(\varepsilon) \quad (1)$$

$$u_{erl}(F_{P0.2}) = u_{erl}(F_{P0.2}) / \sqrt{n} \quad (2)$$

其中:  $F_{P0.2}$ —规定非比例延伸力, 单位为 kN (精确至 0.1 kN);  $\varepsilon$ —引伸仪标距内的非比例延伸达到原始标距 0.2% 时的残余延伸的应变值, 单位为  $\mu\varepsilon$  (精确至 1  $\mu\varepsilon$ );  $rep$ —试验的总重复性;  $u_{rel}(F_{P0.2})$ —规定非比例延伸力的相对合成标准不确定度;  $u_{rel}(rep)$ —重复性测量引起的不确定度 (考虑装卡、加载速度、操作者、零点修正的影响);  $u_{erl}(F_{P0.2})$ —以 10 个试件平均值表示的规定非比例延伸力的不确定度;  $n$ —试样个数。

## 3 标准不确定度分量及其评定<sup>[3-4]</sup>

### 3.1 高强度低松弛预应力钢绞线重复性引起的相对不确定度评定

重复性引起的相对不确定度主要来源于拉力测量的重复性和应变测量的重复性。

高强度低松弛预应力钢绞线公称直径为 15.24 mm, 取 10 个拉伸试样进行试验, 10 次规定非比例延伸力试验结果见表 1。

表 1 测定结果  
Tab 1 Testing results

测试内容	1# 样	2# 样	3# 样	4# 样	5# 样	6# 样	7# 样	8# 样	9# 样	10# 样
引伸仪标距达到原始标距 0.2% 时的残余延伸的应变值 / $\mu\varepsilon$	132	133	133	132	133	133	132	133	132	132
规定非比例延伸力 /kN	245	246.4	247.8	244.4	249.8	246.4	244.5	246	248	245.2
规定非比例延伸力平均值 /kN	246.4									
规定非比例延伸力标准偏差 /kN	1.73									

规定非比例延伸力平均值:

$$\overline{F_{P0.2}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m F_{P0.2i} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad m = 10 \quad (3)$$

规定非比例延伸力标准偏差:

$$S(F_{P0.2i}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (F_{P0.2i} - \overline{F_{P0.2}})^2}{m - 1}} = 1.73 \text{ kN} \quad (4)$$

重复性引起的相对不确定度分量:

$$u_{rel} = S(F_{P0.2i}) / \overline{F_{P0.2}} = \frac{1.73}{246.4} \times 100\% = 0.70\% \quad (5)$$

### 3.2 规定非比例延伸力 $F_{P0.2}$ 引起的测量不确定度 $u_{rel}(F_{P0.2})$ 评定

规定非比例延伸力  $F_{P0.2}$  的测量不确定度主要来源于试验机示值的测量不确定度、引伸仪、应变仪引起的测量不确定度和仪器校准的不确定度三个方面。

#### 3.2.1 试验机测力引入的不确定度评定

因为试验机的准确度等级为 1 级, 力示值误差为  $\pm 1.0\%$ , 可认为示值均匀分布, 由 JJF1059 表 3 可知  $k = \sqrt{3}$  于是试验机的 B 类相对标准不确定度  $u_{1rel}(F_{P0.2})$  为:

$$u_{1rel}(F_{P0.2}) = 1.0\% / \sqrt{3} = 0.58\% \quad (6)$$

### 3.2.2 试验机校准引入的不确定度评定

1级试验机是借助 0.3级标准测力仪进行校准的,该校准源的不确定度为 0.3%,其置信因子  $k = 2$  故由此引入的 B类相对标准不确定度  $u_{2rel}(F_{P0.2})$  的值为:

$$u_{2rel}(F_{P0.2}) = 0.3\% / 2 = 0.15\% \quad (7)$$

力的测量相对不确定度可合成为:

$$u_{rel}(F_{P0.2}) = \sqrt{u_{1rel}^2(F_{P0.2}) + u_{2rel}^2(F_{P0.2})} = \sqrt{(0.58\%)^2 + (0.15\%)^2} = 0.60\% \quad (8)$$

### 3.3 引伸仪引起的测量不确定度 $u_{rel}(\varepsilon)$ 评定

#### 3.3.1 引伸仪测量引起的测量不确定度 $u_{1rel}(\varepsilon)$

测量应变所用的引伸仪 YYU-10/200 为 0.3级,可认为示值均匀分布,由 JJF1059表 3<sup>[4]</sup>可知  $k = \sqrt{3}$ ,于是引伸仪的 B类相对标准不确定度  $u_{1rel}(\varepsilon)$  为:

$$u_{1rel}(\varepsilon) = 0.3\% / \sqrt{3} = 0.17\% \quad (9)$$

#### 3.3.2 引伸仪标距引入的不确定度评定 $u_{2rel}(\varepsilon)$

满足测定规定非比例延伸力所用的引伸仪标距误差应达到  $\pm 1.0\%$ ,由此引入的 B类相对标准不确定度  $u_{2rel}(\varepsilon)$  为:

$$u_{2rel}(\varepsilon) = 1\% / \sqrt{3} = 0.58\% \quad (10)$$

引伸仪测量引起的测量不确定度  $u_{rel}(\varepsilon)$  为:

$$u_{rel}(\varepsilon) = \sqrt{u_{1rel}^2(\varepsilon) + u_{2rel}^2(\varepsilon)} = \sqrt{(0.17\%)^2 + (0.58\%)^2} = 0.60\% \quad (11)$$

### 3.4 应变仪引起的测量不确定度 $u_{rel}(\varepsilon)$ 评定

#### 3.4.1 应变仪测量引入的不确定度

测量应变所用的应变仪 YJ-18 为 0.3级,可认为示值均匀分布,由 JJF1059表 3<sup>[4]</sup>可知  $k = \sqrt{3}$ ,于是引伸仪的 B类相对标准不确定度  $u_{1rel}(\varepsilon)$  为:

$$u_{1rel}(\varepsilon) = 0.3\% / \sqrt{3} = 0.17\% \quad (12)$$

#### 3.4.2 应变仪校准引入的不确定度

应变仪是借助 0.1级标准电阻箱标定的,其不确定度为 0.1%,也是均匀分布,由此引入的 B类相对标准不确定度  $u_{2rel}(\varepsilon)$  为:

$$u_{2rel}(\varepsilon) = 0.1\% / \sqrt{3} = 0.058\% \quad (13)$$

引伸仪测量引起的测量不确定度  $u_{rel}(\varepsilon)$  为:

$$u_{rel}(\varepsilon) = \sqrt{u_{1rel}^2(\varepsilon) + u_{2rel}^2(\varepsilon)} = \sqrt{(0.17\%)^2 + (0.058\%)^2} = 0.18\% \quad (14)$$

### 3.5 相对标准不确定度分量汇总

相对标准不确定度分量汇总如表 2 从表 2 可看出,重复性引起的不确定度分量对总的相对标准不确定度所占的比例最大,需控制其影响因素。

表 2 相对标准不确定度计算结果

Tab 2 Calculation results for the relative standard uncertainty

序号	不确定度来源	相对标准不确定度 /%	序号	不确定度来源	相对标准不确定度 /%
1	重复性不确定度	0.70	6	应变仪读数不确定度	0.17
2	试验机示值不确定度	0.58	7	应变仪校准不确定度	0.058
3	0.3级标准测力仪不确定度	0.15	8	相对合成不确定度	1.12
4	引伸仪读数不确定度	0.17	9	相对扩展不确定度	0.70
5	引伸仪标距不确定度	0.58	—	—	—

### 3.6 合成标准不确定度 $u(F_{P0.2})$ 评定

由于各分量之间彼此独立,相对合成标准不确定度为:

$$\begin{aligned}
 u_{rel}(F_{P0.2}) &= \sqrt{u_{rel}^2(r\varphi) + u_{rel}^2(F_{P0.2}) + u_{rel}^2(\varepsilon)} \\
 &= \sqrt{(0.70\%)^2 + (0.63\%)^2 + (0.60\%)^2 + (0.18\%)^2} = 1.12\%
 \end{aligned} \tag{15}$$

因为实际检测时, 是以 10 个试件的规定非比例延伸力平均值为最终结果, 所以相对合成标准不确定度为:

$$u_{rel}(\overline{F_{P0.2}}) = \frac{u_{rel}(F_{P0.2})}{\sqrt{n}} = \frac{1.12\%}{\sqrt{10}} = 0.35\% \tag{16}$$

合成修约不确定度后, 可得其合成标准不确定度为:

$$u(F_{P0.2}) = \sqrt{(246.4 \times 0.35\%)^2 + (0.29 \times 0.1)^2} = 1.34 \text{ kN} \tag{17}$$

### 3.7 扩展不确定度 $U(F_{P0.2})$ 评定

本例在报告合成标准不确定度时, 缺少有关自由度的信息, 这在使用计量仪器进行常规测量时是经常遇到的. 实际上, 估算 B 类标准不确定度时, 都隐含地假设标准不确定度是确切知道的, 这就暗示它们相应的自由度都趋近  $\infty$  (亦即标准不确定度的相对不确定度趋近于零). 因此根据韦尔奇 - 萨特思韦特公式, 合成标准不确定度  $u(F_{P0.2})$  的有效自由度也趋近于  $\infty$ . 这就意味着, 在相对合成标准不确定度确定后, 乘以一个包含因子  $k$ , 即可得扩展不确定度. 根据 JJF 1059-1999《测量不确定度评定与表示》<sup>[4]</sup> 第 7 章可知, 在大多数情况下 (置信概率为 95%) 包含因子  $k = 2$ , 故规定非比例延伸力的相对扩展不确定度为:

$$U_{rel}(F_{P0.2}) = k \times u_{rel}(F_{P0.2}) = 2 \times 0.35\% = 0.70\% \tag{18}$$

合成修约不确定度后, 可得其扩展不确定度为:

$$u(F_{P0.2}) = \sqrt{(246.4 \times 0.70\%)^2 + (0.29 \times 0.1)^2} = 1.87 \text{ kN} \tag{19}$$

检测结果可表示为:

$$F_{P0.2} = 246.4 \text{ kN}, \text{ 扩展不确定度 } U = 1.87 \text{ kN}, \text{ 包含因子 } k = 2, \text{ 置信概率 } p = 95\%.$$

## 4 结束语

(1) 通过对高强度低松弛预应力钢绞线规定非比例延伸力测定的不确定度的评定, 结果表明影响规定非比例延伸力结果的主要因素是重复性试验和拉力测量. 因此, 实际检测时, 应提高人员素质, 考虑装卡、加载速度、零点修正等对检测结果的影响, 以保证测量的准确性.

(2) 应变式引伸仪的精度对规定非比例延伸力的测定的不确定度有很大影响. 因此在测定规定非比例延伸力时, 应尽量采用精度较高的引伸仪.

(3) 按标准 GB/T 5224-2003 要求, 规定非比例延伸力应达到标准值 260.4 kN 的 90%, 即 234.4 kN, 测量结果平均值为  $F_{P0.2} = 246.4 \text{ kN}$  (达到 95%), 测量结果最小值为  $F_{P0.2} = 244.6 \text{ kN}$  (达到 94%), 达到标准要求. 但若实际测量的  $F_{P0.2}$  等于标准的 90%, 即 234.4 kN, 合格与否的判定就会处于可疑区、模糊区或不确定区. 可看出, 不确定度评定对产品质量的判定和试验数据的判断的重要性.

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 228-2002 金属材料室温拉伸试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 1-27.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 5224-2003 混凝土用预应力钢绞线 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 7-8.
- [3] 国家质量技术监督局计量司. 测量不确定度评定与表示指南 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2000: 76-79.
- [4] 国家质量技术监督局. JJF 1059-1999 测量不确定度评定与表示 [S]. 北京: 中国计量出版社, 1999: 12-23.