

# 国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》 GB/T 14370-2007及与欧美标准的比较

裴 璠

(中国建筑科学研究院 北京 100013)

**摘 要:** 本文介绍了国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接点》GB/T 14370-2007, 并与相关标准FIP 1993年“建议”、欧洲标准EN 13391和美国PTI《后张预应力体系验收标准》(1998)做了概况比较。

**关键词:** 预应力筋 锚具 夹具 连接器 锚具效率系数 预应力筋效率系数 预应力筋拉断时的总应变 锚固区

国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接点》GB/T 14370-2007已经于2007年9月11日发布, 并从2008年2月1日开始实施。该标准是按照国家标准化管理委员会的总体布署, 由建设部标准定额研究所建标产〔2005〕124号文通知修编的。标准起草的单位有中国建筑科学研究院、交通部建设集团第一公路工程局、铁道科学研究院、柳州欧维姆公司、威尔姆公司、邱姆公司和杭州浙锚公司。归口单位为中国建筑科学研究院。

## 1 GB/T 14370-2007的内容简介

(1) 本标准的适用范围为体内或体外配筋的有粘结、无粘结、缓粘结预应力混凝土结构和预应力钢结构。拉索用锚具也可参照执行。

(2) 以前经常出现以企业代号作为锚夹具产品代号的情况, 反映在工程设计文件及图纸之中, 但国家规定设计图纸文件不得指定选用产品的生产厂名。为此本标准对当前我国四种基本类型锚夹具和连接器进行重新统一命名, 在标记的写法中避免了生产厂名。在非经济竞争场合可用后缀方式写出企业体系代号。

(3) 锚具的基本要求

1) 静载锚固性能: 用预应力筋锚具组装件试验, 测定锚具效率系数 $\eta_a$ 和达到实测极限拉力时( $F_{apu}$ )的预应力筋的总应变 $\varepsilon_{apu}$ 。要求同时满足:

$$\eta_a = \frac{F_{apu}}{\eta_p \cdot F_{pm}} \geq 0.95, \varepsilon_{apu} \geq 2.0\%$$

式中 $F_{pm}$ 是预应力筋实测平均极限抗拉力。 $\eta_p$ 是预应力筋效率系数, 标准规定组装件预应力钢材根数为1至5根时 $\eta_p = 1$ , 6至12根时 $\eta_p = 0.99$ , 13至19根时 $\eta_p = 0.98$ , 20根及以上时 $\eta_p = 0.97$ 。

2) 疲劳荷载性能要求上限应力为抗拉强度标准值 $f_{pk}$ 的65%、应力幅度至少为80MPa时, 能满足200万次循环。

3) 有抗震要求的结构组装件还应能承受上限 $0.8f_{pk}$ 、下限 $0.4f_{pk}$ 共50次高应力幅的周期荷载循环。

4) 新研制的锚具或进行型式试验的产品, 可选择部分或全部的辅助性能试验, 包括: 锚具内缩量的测定、锚固端摩擦损失测定和张拉锚固工艺试验。锚具内缩量的大小受预应力筋拉应力的影响及锚固过程中应力响应段长度影响, 每种锚具有其自身的内缩量, 不存在合格与否, 我们只须测定出平均值, 以便和设计取值对比, 差别不大时不必调整张拉控制应力。锚固端摩擦损失也是各种锚具自身具有的特性, 凡是预应力筋在锚固端出现弯折的锚具, 此项应力损失随总弯折角大小及其易弯性而变化。夹片式锚具的此项损失比较大, 因此应加长喇叭管、减小弯折角、选用延伸率高的钢绞线。分级张拉、补张拉、更换预应力筋、设置合理的灌浆构造都是预应力体系的重要组成部分。拉索是在低应力状态下工作, 防松尤为重要, 每根独立锚固的预应力筋具有独立防松机构是更为合理的装置。用夹片锚做拉索锚具, 防腐的耐久性同样非常重要, 尽量不

要把不耐久的防腐留给后人。

(4) 夹具的基本性能要求是 $\eta_g \geq 0.92$ , 这里的 $\eta_g = F_{gqu} / F_{pm}$ 。工具锚是按夹具性能要求的, 应能重复使用, 放张后必须能自行松夹, 夹具的静载锚固性能要求是非常高的, 例如37孔钢绞线工具锚要比工作锚的生产难度高很多。

(5) 永久埋在混凝土中的连接器, 对其性能要求与锚具相同; 只是在结构施工过程中使用并将拆卸的连接器, 它不留在混凝土中, 对这种连接器性能的要求与夹具相同。

以上第(3)、(4)、(5)条的要求, 与国内各主要设计施工规范规程的指标是完全相同的, 不会出现标准不一致的混乱局面。

(6) 试验方法: 在GB/T 14370-2000中, 锚具静载试验装置有两种, 第一种是用于“先锚固后张拉”的预应力体系, 第二种是用于“先张拉后锚固”的体系。我国多年经验表明, 第二种试验装置受试验人员操作影响较大, 试验程序也复杂, 对检验锚具性能的试验实无必要, 所以2007版只选定第一种装置。连接器的试验装置不变。

组装件试验用的预应力钢材(例如钢绞线), 本标准规定必须符合其国家标准规定的性能, 但强度等级必须与受试锚具同级, 超过该等级时不应采用。例如拟试1860MPa级的锚具, 就用预应力钢绞线实际强度在1860MPa至1960MPa之间, 超过1960MPa的不能使用。我国在组装静力试验方面已有丰富经验, 钢绞线的国家标准GB/T 5224规定的延伸率 $A_{gt} < 3.5\%$ 是不够的。但是我们的条文不能要求预应力钢绞线的延伸率 $A_{gt}$ 必须达到更高的规定值。

组装件试验单位的预应力筋拉力试验机、静载试验设备, 其测力系统应有国家计量部门出具的有效合格证明, 且测量值的不确定度不大于2%, 指示应变值的不确定度不大于0.1%。

用于预应力筋母材试验的试验机必须有良好的夹具, 这种夹具能将径向压应力达到最合理的分布, 保证试验获得最准确的力学性能测量值(例如国家建筑工程质量监督检验中心的此种夹具, 钳持长度220mm且口部有径向应力缓释段)。试件整根破断最大力 $F_m$ 和最大力总伸长率 $A_{gt}$ , 是关乎后续组装件试验可信度的重要指标。

不良夹具测得的 $F_m$ 可能偏低, 会导致以后测得的 $\eta_a$ 有可能大于1.0的情况。

组装件静力试验时应将锚固零件上涂的防锈油和污物擦拭干净, 残留微量油膜是可以的, 没有必要用汽油或溶剂完全擦洗到“绝对干净”, 因为“有油”和“无油”两个极端都不符合工程实际。不论单根或多根预应力筋-锚具组装件, 2007版本要求在拉应力超过 $0.8 f_{pk}$ 后都要缓慢加荷, 加荷速度不应超过100MPa/min, 这样有助于 $F_{apu}$ 获得最大值。试验过程测量的和观察的项目比以前细致了, 在分级加荷时要求每级都测量预应力筋和夹片进入锚孔的位移 $\Delta a$ 和 $\Delta b$ , 并随时核算与荷载增量的比例关系和注意锚具的塑性变形, 锚具零件如强度不足, 试验荷载较大时,  $\Delta a$ 、 $\Delta b$ 可能加大增量, 预示可能提前失去锚固能力。组装件的静载试验必须准确记录极限拉力 $F_{apu}$ 及拉断瞬间的预应力筋总应变 $\epsilon_{apu}$ , 二者必须满足 $\eta_a \geq 0.95$ 和 $\epsilon_{apu} \geq 2.0\%$ 的要求。在以往的试验中, 关于夹片开裂、预应力筋提前断裂、挤压锚中钢绞线抽出等现象, 使试验人员在提出分析意见时发生困惑。2007版的标准在参考国际相关标准及总结国内经验后, 明确了几种情况的处理规定:

1) 夹片在预应力筋应力达到 $0.8 f_{pk}$ 之前, 绝对不允许产生裂纹和破断, 如组装件试验合格, 但出现微裂或纵向断裂则是允许的, 但不允许出现横向、斜向断裂及碎裂。

2) 有时, 预应力筋的延伸率很高, 组装件可能达到很高的试验值并整束激烈破断, 夹片在崩断过程中导致多种形式的断裂及损伤, 这是很好的正常情况。

3) 太薄和强度太低的锚板, 即使 $\eta_a$ 和 $\epsilon_{apu}$ 达到了标准, 但如锚孔过度扩张, 锚板中心挠度太大, 底面开裂, 也不能判定该锚具合格。

4) 预应力筋如有伤痕或对焊接口, 都会导致组装件不在锚口处提前拉断, 属无效试验, 应重做试验。

5) 挤压式和握裹式锚具, 在满足 $\eta_a$ 和 $\epsilon_{apu}$ 的要求后可能失去握裹力, 这属正常情况。

疲劳试验、周期荷载试验及各种辅助试验, 2007版本和以前大致相同。

因为我国目前的预应力工程90%以上都使用预应力钢绞线和夹片式锚具,所以2007版本多所向其侧重。其他型式的锚夹具在试验方法上可能略有不同,但应满足2007版的基本要求。

(7)按照我国对工业产品的规定,产品检验和以前一样,仍是分出厂检验和型式检验两种。检验项目没有变化,2007版只是将辅助试验改为“选项”,视需要选择进行。

检验工作的批组划分和抽样的多少仍是最难确定的事项。现代锚夹具生产组织和十年前已经有很大不同,例如夹片的一次投料不是几千付的事,而是几十万付的安排。热处理炉已是世界上最先进的设备,不一定采用传统的打硬度方法。但是也有很多小厂仍沿用老的生产组织和旧式生产设备。产品检验一开始的组批划分和抽样就难以规定。最后还是按产品数量划分组批,并用组装装件进行最后的性能试验来决定是否可以通过出厂标准。

## 2 中、欧、美标准的比较

中国的锚具、夹具和连接器三种产品同属一类,都是金属机加工件,它的标准是按照国家标准化管理委员会的统一分类、统一办法编制的,它属于产品标准类。

国际预应力混凝土协会(FIP)提出的《后张预应力体系验收建议》(1981、1991、1993三次版本,现归fib第9委员会)、欧洲标准化委员会提出的欧洲标准《后张预应力体系的力学性能试验》EN13391(2004)、欧洲技术认可组织(EOTA)提出的《结构用后张预应力成套组件的欧洲技术认可准则》、美国后张预应力协会(PTI)制订的《后张预应力体系验收标准》,它们包括预应力筋、机械式锚具、连接器、粘结式锚具、混凝土结构的锚固区、张拉灌浆的各种施工工艺、对预应力筋提出偏斜拉伸试验等,都是成套体系的技术验收标准,不仅仅是产品标准。

为了对照明晰起见,以预应力筋-锚具组装件为例,将其试验要求列入表1,就其异同之处,分述如下:

### 2.1 标准的功能

中国的GB/T 14370是机械产品标准,是生产

厂用以控制质量的标准。因为锚具、夹具和连接器的设计构造可能是任意形式的,本标准对零件的材质、尺寸和加工工艺只要求符合现行国标,而不出现通用设计图。标准只对成品的最终锚固预应力筋的性能提出要求,即静载试验、疲劳试验、周期荷载试验和测定施工工艺参数的辅助试验。科研单位研制的新型锚夹具,也应符合本标准的要求。工程设计单位在选用锚夹具时应按本标准规定全国统一代号和标记方法写进设计图纸及相关文件中,同时提出其质量性能应符合GB/T 14370的标准。工程施工单位或业主在购买此类产品后,应按国家行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85-2002组织进场验收试验,验收的性能指标与本标准相同。作为一个国家,不应出现不同的指标规定,但在验收程序上则应简便,达到验证新购产品质量可靠的目的,以保证工程安全。

FIP是“国际预应力混凝土协会”的简称,中国曾是其团体会员,FIP现已并入fib。它在1981年首次发表了“后张预应力体系的验收建议”,因为它只是一个国际专业协会,不可能由国家赋予其为“标准”,所以只能称为“建议”;但又因其具有极高的技术权威性,这份“建议”后来又是许多国家和地区制定标准规范的起点。中国标准主要参考了FIP1981年“建议”,并按GB/T 1.1及TDS 1.0标准的结构和编写规则编制成GB/T 14370-1993;2000年和2007年参考了FIP 1993“建议”及其他相关标准,并总结我国大量实践经验,做了两次修订。现在的欧洲标准(已有28个欧洲成员国)EN 13391:2004及欧洲技术认可准则ETAG 013:2002,其内容及指标规定和FIP 1993年“建议”基本相同,但增加了预应力筋-锚具偏斜拉伸试验、无粘结体外预应力筋的偏转试验和体外预应力筋锚头的变形量测量。欧洲标准已被赋予国家标准的地位。美国后张预应力协会(PTI)的《后张预应力体系验收标准》1998,是得到美国行业认可的。工程单位的后张体系如经欧洲标准通过验收,PTI标准同意认可。

### 2.2 静载试验指标规定

用预应力筋-锚具组装件进行试验,并以

表1 中、欧、美预应力筋—锚具组装件的试验要求

标准名称	静载试验	疲劳试验	周期荷载试验	荷载传递试验	辅助试验
中国标准 GB/T 14370-2007	$\eta_a = \frac{F_{apu}}{\eta_p \cdot F_{pm}} \geq 0.95$ ; $\varepsilon_{apu} \geq 2.0\%$ 式中: $\eta_p$ 为预应力筋的效率数,按束中筋的根数确定, $\eta_p$ 可等于1、0.99、0.98、0.97	$\sigma_{max} = 0.65 f_{pk}$ $\Delta \sigma_{min} = 80 \text{MPa}$ 200万次	$\sigma_{max} = 0.8 f_{pk}$ $\sigma_{min} = 0.4 f_{pk}$ 50次	无规定	选项: 1. 锚具内缩量试验 2. 锚固端摩擦阻试验 3. 张拉锚固工艺试验
FIP建议1993 欧洲标准 EN 13391:2004 欧洲技术认可准则 ETAG 013:2002	1. 机械式锚具: $\eta_A = \frac{F_{Tu}}{F_{pm}} \geq 0.95$ ; $\varepsilon_u \geq 2.0\%$ 2. 粘结式锚具: 略	$\sigma_{max} = 0.65 f_{pk}$ $\Delta \sigma_{min} = 80 \text{MPa}$ 200万次	无规定	按照实际工程结构的锚具布置确定混凝土试验棱柱体尺寸, 喇叭管、螺旋筋、管道埋设其中, 在限定混凝土强度的条件下, 棱柱体加载后裂缝宽度应在限值以内且稳定。	1. 多级张拉试验 2. 摩擦阻试验 3. 灌浆性能试验 4. 预应力筋锚具偏转角试验 5. 无粘结体外预应力偏转角试验
美国PTI 验收标准1998	1. 多孔锚板承压试验: (1) 荷载达 $0.95 F_{pk}$ 卸荷后, 锚板顶面中心挠度不大于锚垫板孔径的 $1/600$ (2) 锚板压坏时 $F_u \geq 1.2 F_{pk}$ 2. 夹片: 检查尺寸和公差、表面硬度、渗层深度、芯部硬度 3. 单根钢绞线-锚具组装件试验: $\frac{F_{Tu}}{F_{pm}} \geq 0.95$ ; $\varepsilon_u \geq 2.0\%$ 试件数量30件; 锚孔涂油与不涂油各15件	无粘结预应力工程: 单根钢绞线-锚具组装件 $\sigma_{min} = 0.60 f_{pm}$ $\sigma_{max} = 0.66 f_{pm}$ 50万次 试件数量: 4 锚孔涂油与不涂油各2件 有粘结预应力工程无此要求。	用疲劳试验的试件做完疲劳试验后, 再做周期荷载试验: $\sigma_{min} = 0.40 f_{pm}$ $\sigma_{max} = 0.80 f_{pm}$ 50次 仅无粘结预应力工程有此要求。	四边形混凝土棱柱体中包含喇叭管、管道、螺旋筋, 在限定混凝土强度的条件下测定裂缝宽度 $W$ : $F_u = 0.4 F_{pk}$ 时 $W \leq 0.05 \text{mm}$ $F_u = 0.8 F_{pk}$ 时 $W \leq 0.25 \text{mm}$ $F_u = 1.2 F_{pk}$ 时试件不破坏。	对钢绞线、预应力钢筋, 张拉设备、钢绞线安装设备、管道、灌浆设备都有要求。

注: 1.  $\eta_a$ 、 $\eta_A$ —锚具效率系数; 2.  $F_{apu}$ 、 $F_{Tu}$ —组装件实测极限拉力; 3.  $\varepsilon_{apu}$ 、 $\varepsilon_u$ —预应力筋拉断时的延伸率(总应变); 4.  $F_u$ —锚板或试块承压力; 5.  $F_{pk}$ —预应力筋标准极限抗拉力; 6.  $F_{pm}$ —预应力筋实测平均极限抗拉力; 7.  $f_{pm}$ —预应力筋实测平均抗拉强度; 8.  $f_{pk}$ —预应力筋标准抗拉强度

$\eta_a \geq 0.95$ 、 $\varepsilon_{apu} \geq 2.0\%$ 做为合格标准, 中、欧、美都是一致认同的, 但具体条件略有不同。

这一标准首先由FIP 1981年“建议”提出, 即: (符号注脚有更改)

$$\eta_A = \frac{F_{Tu}}{\eta_c \cdot F_{pm}} \geq 0.95 \text{ 及 } \varepsilon_u \geq 2.0\%$$

式中 $\eta_c$ 称做预应力筋的效率系数, 是考虑预应力筋强度及延伸率不均匀的影响系数, 并按统计学得出的公式求得。FIP在其1991年及1993年都取消了这一系数(即令 $\eta_c=1$ )。关于取消的原因及为取消而采取的措施, 我们和原FIP第2委员

会主席、后为fib第9委员会主席H·R·Ganz教授做了交流, 解释如下:

(1) 事实上, 当你做预应力束的拉伸试验时, 你研究得到的试验结果是锚具与预应力束两者的综合效应。本人尚未找到实用的方法能从预应力束的试验结果将这两个效应区分开。

(2) 在预应力筋—锚具系统中, 预应力筋的破坏主要发生在进入锚具的部位, 通常是夹片的位置。FIP 1993“建议”要求极限抗拉强度的影响统一定为5%, 即 $\eta_A$ 应大于或等于0.95; 另外, 要求预应力筋能够像结构设计规范假设的那样有足够的屈服变形, 即 $\varepsilon_u \geq 2\%$ 。

(3) 从统计学的意义上来说, 试验筋内钢丝的根数对抗拉试验的结果可能有影响(即参数 $\eta_c$ ), 我也赞成此观点。因此, 较大型的预应力束的钢丝比较小型的预应力束中的钢丝更易断裂。可是, 前面已制定出统一5%的安全界限, 所以删除了 $\eta_c$ 这一参数。

(4) 为了降低预应力筋效率系数的影响, 欧洲标准采取了几项措施: 预应力筋组装件的测力装置精度应与母材试验机的相同, 即都是 $\pm 1\%$ , 以减少误差, 试验时初应力要尽量调匀。

(5) 不同国家采用不同的预应力筋装配程序, 这可能导致不同“切口效应”(径向压力引起的效应)。一段时间以前, 欧美发现了这一效应, 因此, FIP建议采用一种“偏斜拉伸试验”。发明这种试验方法可以模拟预应力筋上的径向压力。近来预应力钢绞线标准中, 用这种抗拉试验保证市场上出售的预应力筋受锚具或径向压力影响不过于敏感, 有大量生产厂家的预应力钢绞线上市销售并展开竞争。

FIP和欧洲标准中, 将金属加工的锚具称做“机械式锚具”, 把预应力钢材端部埋设在混凝土中靠粘结力锚固的设计构造, 称做“粘结式锚具”。粘结式锚具是根据工程结构设计图的布置和混凝土强度及施工张拉规定而设计的试件, 试验理念及规定与荷载传递试验相近。

美国后张预应力协会(PTI)制订的《后张预应力体系的验收标准》适用于桥梁、地锚及建筑工程。该标准包括钢绞线、预应力钢筋、锚垫板、钢绞线组装件、护套、管道、质量鉴定试验和穿束张拉灌浆设备等全套体系。标准的重点是夹片锚钢绞线体系。

美国PTI标准对钢绞线用夹片式锚具的验收试验是:

(1) 多孔锚板仅用压力试验机从上面加压, 荷载达到按孔数(钢绞线根数)算出标准破断力总量 $F_{pk}$ 的95%卸载后, 测量锚板上表面中心挠度不应大于支撑它的锚垫板孔径的1/600。然后再次加压至破坏荷载 $F_u$ ,  $F_u$ 应大于或等于 $1.2F_{pk}$ 。一般张拉控制荷载最大为 $0.8F_{pk}$ ,  $1.2F_{pk}$ 为其1.5倍, 可以认为这一限定是安全的。

(2) 对夹片进行一系列的检查, 要求其外

形尺寸、尺寸公差、表面硬度、渗层深度、芯部硬度都应符合原设计的规定。

(3) 最后用单根钢绞线—锚具组装成拉力试件, 并要求

$$\frac{F_{Tu}}{F_{pm}} \geq 0.95 \text{ 及 } \varepsilon_u \geq 2.0\%$$

这种试件的试验数量要达到30件, 而且试验用锚具的锥形锚孔有15件涂润滑剂, 另15件不涂。美国PTI认为单根钢绞线—锚具组装件试验最适合优化和确定组装件在许多不同情况下的性能。

我国的试验研究表明, 锚孔涂油试件径向压力很大, 切口效应显著增加, 钢绞线可能“早断”。如果钢绞线的原有延伸率比国标3.5%(美标ASTM 416同此)高出不多, 材性较脆, 这项试验会更难通过。而另外15件试件不涂润滑剂, PTI规定锥孔“保持干燥”。事实上“干燥”也有程度的区别, 如果用溶剂清洗, 就可能很干燥, 这时夹片和锥孔之间的摩擦力就会很大, 和锚具设计时摩擦系数取值相去甚远, 夹片失去楔进作用, 导致钢绞线提前滑脱。“早断”和“早滑”都是不能允许的。美国标准没有规定一定要做多孔锚具的组装件试验, 避开了“束的效应”; 他们认为多孔锚具的每一个单元都和单孔锚相同, 用实际强度试验, 单孔合格了, 多孔锚施工时用的是较小的标准强度, 所以应无问题。欧洲标准的制订者并不认同这一观点。

中国标准GB/T 14370-2007和2000年版本相同, 继续维持全国各相关标准规程规范的一致性, 仍然是:

$$\eta_a = \frac{F_{apu}}{\eta_p \cdot F_{pm}} \geq 0.95 \text{ 及 } \varepsilon_{apu} \geq 2.0\%$$

关于预应力筋的效率数 $\eta_p$ , 业内人士多不详知, 简介如下:

(1) FIP 1981年“建议”首先提出“束的效应”, 认为束中多根钢材的应力-应变不会相同, 组装件拉伸时第一根钢材拉断时的总拉力 $\min F_{cu}$ 肯定小于按平均破断力算出的总破断力 $F_{cu}$ , 它们之间的关系以系数 $\eta_c$ 表之, 即

$$\min F_{cu} = \eta_c \cdot F_{cu}$$

$\eta_c$ 小于1, 它与预应力钢材的屈强比( $K_m$ )、

平均屈服强度的平均应变 ( $\varepsilon_{ym}$ )、与实际强度对应的平均应变 ( $\varepsilon_{fm}$ )、以及破断时总应变在统计学中的变异系数 ( $V_s$ ) 有关。为了求得  $\eta_c$ ，必须进行20~30根预应力钢材的力学性能试验，再借助FIP 1981“建议”中提供的具有统计学意义的公式才能算出，全过程很长。我们通过几个工程和科研项目的计算，获知  $\eta_c$  仅分布在  $0.98 \pm 0.01$  之区间。

(2) 中国标准GB/T 14370-1993吸纳了FIP 1981这一“建议”的规定，要求型式试验时  $\eta_p$  (即  $\eta_c$ ) 按上述烦琐程序求得，而出厂试验时可直接取用  $\eta_p=0.97$ 。GB/T 14370-2000和2007则将  $\eta_p$  进一步合理地简化，仅按预应力钢材根数多少直接取用  $\eta_p$  值。当根数不同时，分别取用  $\eta_p$  等于 1、0.99、0.98、0.97。

(3) 欧洲的锚具的由几家预应力专业公司自行研制和生产，自产自销，多数公司不外卖。预应力钢绞线及钢筋则是另外的行业产品，全世界所有标准 (欧洲EN138，美国ASTMA416，英国BS5896，中国GB/T5224等) 规定的标准延伸率都是3.5% ( $A_{gt}$ )。实际上，这种  $A_{gt}=3.5\%$  的钢绞线用现代夹片式锚具锚固时，因延伸率太小，要达到  $\eta_a \geq 0.95$  及  $\varepsilon_{apu} \geq 2.0\%$  是没有把握的。欧洲组装件验收标准既然这么定了，而且又不考虑大型束与小型束的实际差别，硬是取消  $\eta_c$  ( $\eta_p$ )。他们也承认组装件试验得到的是预应力束和锚具的综合效应，谁也无法把这两个效应区分开来。怎么办？必须降低“切口效应”，一定要提高预应力筋的延伸率才能通过试验。于是增加了新规定——钢绞线只达到  $A_{gt}=3.5\%$  是不够的，还必须能通过“偏斜拉伸试验”，换言之，即必须有很高的延伸率。这一要求促进了钢绞线厂的竞争，他们提高了质量，满足了预应力专业公司的要求。我们中国的多年实践证明，组装件测得的延伸率  $\varepsilon_{apu}$  比钢绞线原材料的延伸率  $A_{gt}$  小50%以上。中国标准GB/T 14370不能在条文中规定必须使用超出GB/T5224规定的钢绞线，不能规定钢绞线的延伸率必须达到5.5~6%。同时，我们也不能无视  $\eta_p$  的存在，所以作出了  $\eta_p$  在不同根数时有不同取值的规定。在中国，将组装件试验结果做为全是锚具的效应是不合理的，实乃无奈之举；

如不明就里，再取消  $\eta_p$ ，甚至误会那是世界水平。在中国，锚具是商品，掌握合格尺度要符合自己国情、设限要准确合理。曾经收到过取消  $\eta_p$  的建议，编制组十分慎重，调查了以往的试验资料，取消  $\eta_p$  后，优良的大型锚具也很难达标。锚具生产厂如要求用高延伸率钢绞线做试验，目前尚无法定文件支持，最终结果可能是需方买不到锚具。如转向国外购买，外商还可能要求用通过偏斜拉伸试验的钢绞线进行试验验收。如若这样，何必不用中国锚具。由此看来，中国标准将来如能明文规定实际工程和组装件试验都使用高延伸率钢绞线，标准中的  $\eta_p$  才可以取消。当然高延伸率应当是定量的，将来由哪个行业定量，还有许多工作要做。

### 2.3 疲劳试验及周期荷载试验

FIP、fib及欧洲标准关于预应力筋—锚具组装件疲劳性能的要求是相同的，从工程结构受力情况来说，除了静载试验以外，还应检验其抗疲劳性能。他们认为预应力束在结构中的使用阶段，当各种预应力损失发生以后，应力上限大致为标准强度  $f_{ptk}$  的65%左右，疲劳试验的应力幅度最小为80MPa时，就能涵盖一般情况，特殊时应力幅度可以加大。他们认为很难出现最高应力达  $0.8 f_{ptk}$  的情况，所以不要求做高应力幅的周期荷载试验。由于疲劳试验机的能力有限，不得不规定做疲劳试验的组装件可以少安装预应力筋，但那些偏斜角度最大的钢绞线必须包含在试验组装件中。FIP 1981年“建议”中规定安装的根数不能少于1/10，1993版中没有再写明这一限定。他们还规定粘结式锚具也应和机械式锚具一样做疲劳试验。

美国PTI标准对有粘结结构中使用的组装件不强制要求进行疲劳试验，他们对无粘结结构中使用的组装件特别关注，这可能与美国几十年来长期讨论无粘结结构有关。PTI规定用于无粘结预应力工程的组装件必须进行单根钢绞线—锚具组装件的疲劳试验，上限应力为实测强度  $f_{pm}$  的66%，下限应力为  $0.6 f_{pm}$ 。以1860级钢绞线来说，实际强度  $f_{pm}$  可能达到1950MPa，其应力幅按计算为117MPa，比欧洲标准的80MPa高出46%。但它规定疲劳次数只要求50万次 (而不是200万

次)。PTI还要求试件数量为4件,且锚孔涂油与不涂者各2件。PTI要求无粘结工程用的组装件还必须经受更高应力的测试,它规定用通过了50万次疲劳试验的组装件,接着再做周期荷载试验,应力上限 $\sigma_{\max}=0.8 f_{pm}$ ,下限 $\sigma_{\min}=0.4 f_{pm}$ ;以 $f_{pm}=1950\text{MPa}$ 的钢绞线为例,应力幅 $\Delta\sigma=780\text{MPa}$ ,它必须经受50次荷载循环。业主及监理工程师做产品质量鉴定试验时,可以采用钢绞线标准强度( $f_{ptk}$ ),这比实际强度( $f_{pm}$ )低了许多。

中国标准GB/T 14370的三次版本对疲劳试验的要求,都与FIP“建议”相同。考虑中国是多地震地区,对有抗震要求的工程,不论是有粘结或无粘结结构,都还应加做周期荷载试验,应力上下限分别是标准强度 $f_{ptk}$ (而不是实际强度 $f_{pm}$ )的80%和40%,循环次数也是50次。中国标准与欧洲和美国标准在动载试验方面的要求基本相同。

#### 2.4 荷载传递试验

荷载传递试验是用来检验预加力从锚具及其附件传递到混凝土结构的情况,用以检验锚具配套件和混凝土结构强度的综合效应。现代的钢绞线夹片锚具,预应力混凝土结构的预加力可达8000~10000kN,混凝土结构承受该荷载的所谓“锚固区”是否安全,工程结构的技术负责人对此十分关注。

FIP及欧洲标准是针对“预应力体系”制定的验收标准,负责预应力体系技术设计或施工图的是工程的总承包者,即预应力专业公司。他们按工程设计图的锚具分布选取最不利的位置,依照局部承压扩大分布区的力学原则,设计出一个混凝土棱柱体压力试件,将锚具附件(喇叭型垫板、螺旋筋和波纹管等)埋在其中,并配以最少的箍筋和架立筋,按工程规定的混凝土标号及龄期强度进行压力试验,测定混凝土棱柱体裂缝的出现、分布、宽度及稳定情况。FIP 1993“建议”要求加压10个循环后,在压力为 $0.8F_{pk}$ (预应力束标准破断力的80%)时混凝土裂缝宽度不大于0.25mm,而且最后两次加压时的裂缝宽度增量不大于0.02mm,混凝土破坏时的压力( $F_u$ )应大于预应力束标准破断力的1.1倍。欧洲标准的规定与此近似。

美国PTI 1998年的标准吸收了FIP 1993年“建议”的规定,内容基本相同。

按照中国工程责任的划分,结构设计归设计单位,工程建造归施工单位。中国标准GB/T 14370的三个版本,都因中国产品标准不能涉及预应力混凝土结构设计施工事项,所以没有规定锚固区的检验问题。可是,中国的夹片锚生产厂为了给自己的锚具配上喇叭形垫板及螺旋筋,早期是参照外国产品尺寸,生产出自己的配套件,技术性能及安全性能都无问题。中国的一些用户(例如桥梁工程),在工程设计图上可能缺失锚固区的完整设计,中国的施工单位又无作出结构详图的责任,他们招标采购锚具时一并买入了喇叭管和螺旋筋,承载能力部分依赖所购配套件的性能,许多招标者和设计者或许不知道自己的锚固区承载能力是否足够。近十几年,中国的工程用品采购招标多取“最低价中标”的策略,失去了工程质量第一的原则,围绕“钱”字打转是错误的根源。在恶性竞争的市场中,有些锚具生产厂一再减小产品尺寸,导致工程结构安全度不足。一旦出事,国家受损,责任难分。

从国家技术政策来说,作为混凝土结构的一个关键局部,荷载传递试验应该归口解决。锚具厂生产的配套件应能适合常用混凝土标号下的锚固区。用户,特别是大用户完全可以作出自己的锚固区设计,通过认真的试验研究,将设计标准归口到应用技术规程中,如能做出标准设计图就更好了。大用户按照自己的标准图招标订货,按质论价,抛弃“最低价中标”的错误,工程安全可以无忧。在大用户的带动下,小用户可随之纳入正规,正常的市场运作秩序方可维护。

#### 2.5 辅助试验

欧美都将锚具以外的部分列入了辅助试验,大体包括预应力钢绞线的材性、偏斜拉伸试验、穿束安装设备,灌浆材料及工艺设备,摩阻力测量,多级张拉的可能性等。欧洲标准提出的无粘结体外束偏斜拉伸试验,不但规模很大,要求也很高。

我国标准只围绕机械式锚具(主要是夹片锚)规定在型式试验时作为选项,必要时要进行锚具内缩量、锚口摩阻力及张拉锚固工艺三项试

(下转第23页)

布设线安装上下端抱箍，并对抱箍加劲板进行现场施焊。对拱肋边与抱箍之间的缝隙，先用不同规格薄钢板进行塞满、固定，再灌注水泥砂浆填满侧板与拱肋侧面的空隙。

### 3.5 新吊杆安装与张拉

吊杆采用OVMPEs (FD) 5-85低应力索体，索体为PES5-85内黑外乳白色的双层PE外包的成品索，锚具型号为OVMLZ5K-85型冷轧镦头锚。吊杆均在厂家加工完成，两端为叉耳式锚具。

利用汽吊或卷扬机辅以手拉葫芦将新吊杆与抱箍进行联接。由于新吊杆承载力大，在控制力为400kN时，最长吊杆最大弹性伸长值约为3mm，短吊杆变形很难测出。旧桥换索主要以桥面原标高控制为主，吊杆通过调节杆螺牙间隙来调整，由于吊杆伸长量较小，所以张拉时采用如下控制措施：新吊杆上下叉耳销接后，用加长扳手对调节杆尽量调紧，以消除非弹性变形。按照理论计算的伸长量和高程控制值以及锚具的正常回缩，张拉时适当超张拉到一定数量值（注意：桥面高程变化 $<5\text{mm}$ ），然后锚固以便克服上下端抱箍的间隙累积值对吊杆应力的影响。

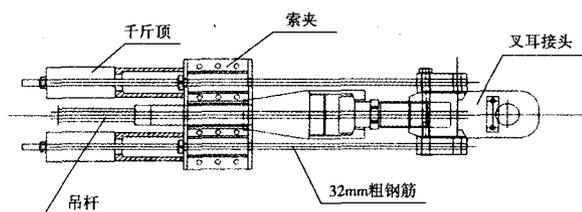


图5 新吊杆张拉系统

（上接第9页）

验。内缩量试验为的是测量平均内缩量，可以和设计规范的数据（一般偏小）比对，正常情况下会有些出入。工程设计给出的张拉伸长值都有一定变化幅度，一般不需要调整张拉力。在锚具处，曲线预应力筋锚固时产生的内缩现象，对降低张拉控制应力峰值是有益的，对长而平直的预应力筋应力降低非常微小，只有短预应力筋才不希望出现过大的内缩量。本标准没有规定将实测内缩量作为锚具验收标准。锚口摩阻力的总体平均值，在结构设计时已计入张拉控制力之中。夹片式锚具中的钢绞线都有二次弯折，这是产生锚口摩阻力的主因。为了减小摩阻力，必须减小钢

## 4 结束语

对于旧桥更换吊杆施工及旧桥加固，设计和施工均较复杂，不同的结构设计，必须按照相应的施工程序进行施工，而且设计的吊杆体系不但要满足承力功能，而且又不削弱旧桥结构的使用性能。由于历史原因，当时桥梁主体结构设计与施工技术水平留下了很多局限性，如今旧桥的加固必须克服这些困难和不足，才能保证桥梁加固施工的安全，延长该桥的使用寿命。研究新结构与旧结构的衔接的方法和工艺成为旧桥加固设计与施工的关键之一，而本桥采用的抱箍锚固结构能很好满足上述的新旧结构的结合问题。新旧吊杆更换是结构体系加固施工的又一关键问题，在本桥吊杆更换过程中严格加强监测，采用施工方便、可行的临时兜吊系统，有效解决了由于旧吊杆松弛造成桥梁旧结构局部开裂的问题，使力系平稳、安全过渡到新吊杆，保证施工安全。

### 参考文献

- [1] 交通部标准. 公路桥涵设计规范 [S]. 人民交通出版社, 1995
- [2] 顾安邦等. 公路桥涵设计手册 [S]. 人民交通出版社, 1997
- [3] 交通部标准. 公路桥涵施工技术规范 [S]. 人民交通出版社, 2000
- [4] 中国公路工程咨询总公司. 新昌城西大桥加固工程两阶段施工图设计文件, 2007

绞线的张角，增加喇叭管长度是主要办法。较长的喇叭管及其外围螺旋筋对锚固区荷载传递有利。螺旋筋内的混凝土是三向受力状态，有高承载能力，此时，螺旋筋的受力伸长量必须很小，所以做螺旋筋的钢材不求高强、只要求有足够截面积。张拉工艺试验的目的是证实全套设备工艺的可操作性。至于预应力筋穿束及灌浆等施工工艺，在施工规范中有专项规定，所以都不包括在锚具标准中。

做好预应力工程既要遵守规范标准，更应掌握原理、明了要点何在。美国PTI标准中就有多处允许工程师自己处置的余地。