

预应力锚固区荷载传递试验国际标准简介

——预应力锚固区安全探讨之五

冯大斌¹ 裴 甯¹ 朱 莹¹ 陈 茜¹ 周成顺² 曾 利²

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

摘 要:近年来,国内预应力技术人员越来越重视预应力锚固区的安全问题。铁路、公路桥梁及特种结构的设计、施工单位及锚具主要生产企业,都把锚垫板、螺旋筋的承载能力放在首位。锚固区承载力的鉴定试验方法和标准,国外几十年前就已制订发布,我国也已开始探讨,预计不久将普遍开展。本文搜集了英国、国际预应力混凝土协会、欧洲标准化委员会、欧洲技术认证组织、美国国家公路和运输协会、美国后张学会等组织的七份标准,将其中有关预应力锚固区的荷载传递试验介绍给读者。主要内容有:试件的设计规定、试验时混凝土强度的要求、试件的加荷程序、试件数据的采集与分析等。希望能为同业人员开展此类工作时提供参考。

关键词:预应力锚固区 锚垫板 荷载传递试验

1 前言

欧美及国际预应力混凝土行业制订的预应力体系标准,称作“后张预应力体系验收标准”。他们把预应力筋和锚具组装在一起,构成组装件作为力学试件,进行静载和动载试验,符合标准的要求才能用于实际工程。锚具垫板及承压区的抗裂钢筋(螺旋筋或网片筋)是与锚具配套的承压元件,是锚具的成套组件。质量验收方法是将锚具垫板、螺旋筋和穿筋管道埋入一个特定的混凝土棱柱体中,该棱柱体即为力学试件。经试验符合标准的要求才能用于实际工程。棱柱体的试验是按锚具真实工作状态,将荷载作用到锚具垫板上,继而传递到混凝土中,称作“荷载传递试验”。

预应力筋—锚具组装件的试验结果,反映的是预应力筋和锚具二者的综合性能,二者都必须有良好的质量,才能获得组装件的技术认证。混凝土棱柱体试件反映的是锚具组件与混凝土二者的共同技术性能,二者也都必须有良好的质量才能获得荷载传递试验的技术认证。目前还没有找到科学的方法能将各自的效应从试验结果中加以分开。

现代的预应力锚具都是全规格的系列产品,

锚具组件的产品设计完成以后,必须先经试制及技术性能试验,经质量认证后才会转入量产。

2 主要国际标准发展沿革

六十多年前,欧洲开始生产高强钢丝,预应力混凝土结构应时而生,结构截面的计算方法(如弯、剪、扭及应力损失等)很快成章,唯锚固区应力分析难定规矩。工程界通常的做法是多配筋、加厚垫板以保证安全。中大吨位锚具出现后,锚固区的应对办法更显重要,不能再简单处置了。

英国标准研究所在其编制的《后张工程预应力锚具特性规程》BS4447-1973中,首先提出荷载传递试验方法。如前述将锚垫板等组件制成混凝土棱柱体试件,按实际张拉的传力状态施加压力;如符合要求,就认为这套锚具装置用于预应力结构是安全的。

原总部设在伦敦的国际预应力混凝土协会(FIP),在其1981年的《后张预应力体系的验收和应用建议》中吸纳了这一检验方法,内容有所补充,拟订出“静载传递试验”与“低周荷载传递试验”两套试验程序,可任选其一。试件混凝土的纵向横向变形及裂缝形成和宽度,都规定为观察项目,没有量的规定,但要求变形及裂缝

发展应趋于稳定。经多国十几年实践, FIP在其1993年的《后张预应力体系的验收和应用建议》中作了修订, 选定了循环加荷程序, 在试件设计制作、试验方法、测量和观察及标准要求等方面, 作出了全面系统的切实可行的规定, 成为各国和地区编制标准的起点。有些单位把FIP“建议”直接当作“标准”执行。

欧洲工程众多, 经验丰富, 人才济济。欧洲技术认证组织(ETA)在2002年发布了《预应力结构后张成套体系》的技术认可准则ETAG 013。欧洲标准化委员会(CEN)2004年又公布了欧洲标准EN 13391《后张预应力体系的力学性能试验》。他们的认可准则相同, ETAG 013的操作规定较详细, 两个欧洲标准都与FIP“建议”保持一致, 欧洲28个国家必须执行, 2007年ETAG 013又发布了“理解文件”, 为荷载传递进一步提供了方便。

“美国国家公路和运输协会”(AASHTO)在行业中具有“准政府权力”。在其制订的《LRFD桥梁施工规范》(2010年)中, 对荷载传递试验提出了三种加荷程序: 循环加荷、持续加荷、单调加荷。三者的验收指标略异, 可任选一种。美国“后张预应力学会”(PTI)是预应力行业的权威单位, 1998年发布了《后张预应力体系验收标准》作为指导规范。他采用单调加荷程序, 在确定荷载传递试件截面方面给出了较具

体的指导规则。两份美国标准都规定只测量和评估混凝土的裂缝宽度, 不观测应变, 对单调加荷试验的破坏荷载要求更高一些。

3 荷载传递试验步骤

试验申请者可分为两个方面:

(1) 锚具使用方: 工程业主、设计及施工单位。作出结构设计方案后, 为了验证锚固区的承载能力, 需要向认证部门申请进行荷载传递试验。

(2) 锚具供应方: 锚具生产、经销及研制单位。为产品量产取得质量认证, 需要自行试验或向认证部门申请进行荷载传递试验。

试验工作步骤大致如下:

(1) 确定锚具类型及规格, 抽取锚垫板、螺旋筋及管道的试验件。

(2) 设计荷载传递试件结构图。试件构造及全部参数均应符合相关标准的规定。

(3) 试件制作。由认证单位和申请单位协商完成。

(4) 试验。分自检试验和鉴定试验两种, 试验结果均应符合相关标准。

4 主要国际标准对荷载传递试验的规定

本文介绍的国际标准如表1所示, 共有7份。都是国际上的主要标准, 能够揭示荷载传递试验的要领, 现就表1栏目简介如下。

表1 国外主要预应力体系验收标准中关于荷载传递试验的规定

标准名称	试件设计		试验时混凝土强度 $f_{cm,e}$	加荷程序	测量数据要求 W—裂缝宽度; ε —应变, ε_v 、 ε_t	破坏荷载要求	试验数量
	a 、 h	箍筋 纵筋					
英国标准研究所 BS4447-1973	$a = \frac{\text{锚板宽度}}{0.6}$ $h \geq a$	同实际工程	$f_{cm,e} = 0.75f_{cm} - 0.9f_{cu}$ f_{cu} —混凝土标号	单调加荷至少 $1.1f_{pu}$; 无持荷	观察记录W的发展程度, 无数值规定。对 ε 无规定。	$F_u \geq 1.1F_{pk}$	对特定锚具试验
国际预应力混凝土协会 FIP 1981	$a = 2 \times \text{锚具边距}$ $h \geq 2a$	按施工指南配筋	开始试验时: $f_{cm,e} \approx 0.85f_{ck}$ 试验结束时: $f_{cm,e} \leq f_{ck}$	1) 静载加荷: $F = 0.8F_{pk}$, 持荷 48h, 至 F_u 2) 低周加荷: $n \geq 10$, 至 F_u 二者选一	W、 ε 均应测量, 观察至稳定后停止。 无数值规定	加荷至破坏, F_u 无数值规定	同一规格试三件; 同一系列选有代表性的两个规格, 各试三件

(接下表)

(续上表) 表1 国外主要预应力体系验收标准中关于荷载传递试验的规定

标准名称	试件设计		试验时混凝土强度 $f_{cm,e}$	加荷程序	测量数据要求 W—裂缝宽度; ϵ —应变, ϵ_v, ϵ_t	破坏荷载要求	试验数量
	a、h	箍筋 纵筋					
国际预应力混凝土协会 FIP 1993	a对应于锚具轴线的间距 $h \geq 2a$	每 m^3 混凝土中 含钢筋 50kg, 均布	总截面积 $\leq 2cm^2$	试验最后试件破坏时: $f_{cm,e} \leq 1.3f_{ck,o}$ 和 $f_{cm,e} \leq 0.85f_{ck}$ 注: $f_{ck,o} = f_{cm,o} - 5MPa$	循环加荷: 上限 $0.8F_{pk}$ 下限 $0.12F_{pk}$ $n \geq 10$, 至 F_u	W: 第一次 $0.8F_{pk}$ 时, $W \leq 0.10mm$ 最后一次 $0.12F_{pk}$ 时, $W \leq 0.10mm$ 最后一次 $0.8F_{pk}$ 时, $W \leq 0.25mm$ 最后两次 $0.8F_{pk}$ 及 $0.12F_{pk}$ 时, 两次合计的 $\Delta W \leq 0.02mm$ ϵ : 最后两次循环, 合计 $\Delta \epsilon_v, \Delta \epsilon_t$ 均小于5%	$F_u \geq F_{pk} \frac{f_{cm,e}}{f_{ck,o}}$ 和 $F_u \geq 1.1F_{pk}$ 同一规格试三件; 同一系列选有代表性的两个规格, 各试三件
美国后张学会 PTI 1998	如 $2d < a, a = 2d$; 如 $2d > c, a = c + 150$, $h \geq 2a$	能代表真实结构中的钢筋		$f_{cm,e} \leq f_{ck,o}$ 和 $f_{cm,e} \leq 0.85f_{ck}$	单调加荷: $0.4F_{pk}$ 时, 持荷10分钟 $0.8F_{pk}$ 时, 持荷1h至 $1.2F_{pk}$	W: $0.4F_{pk}$ 时, $W \leq 0.05mm$ $0.8F_{pk}$ 时, 持荷1h, $W \leq 0.25mm$ 对 ϵ 无规定。	$F_u \geq 1.2F_{pk}$ 用铸造型锚垫板的锚具, 每个规格试三件
美国公路和运输协会 AASHTO-2010	按锚具供应 商规定的 最小边距 或小中距, 取较小值 $= a$, $h \geq 2a$	由锚具供应 商规定, 但 体积比 ≤ 0.01 (合 $78.5kg/m^3$)		$f_{cm,e} \leq f_{cm,o}$	1) 循环加荷, $n \geq 10$ 2) 持续加荷, 48h 3) 单调加荷, 1h 任选一种, 至 F_u	1) $0.1F_{pk} \sim 0.8F_{pk}$, 最后三次合计 $\Delta W \leq 0.025mm$; 最后一次 $0.8F_{pk}$ 时, $W \leq 0.25mm$; $0.9F_{pk}$ 时, $W \leq 0.40mm$ 2) $0.8F_{pk}$ 持荷48h后 $W \leq 0.25mm$; $0.9F_{pk}$ 时, $W \leq 0.40mm$ 3) $0.9F_{pk}$ 持荷1h后 $W \leq 0.25mm$; $1.0F_{pk}$ 时, $W \leq 0.40mm$ 较恶劣环境下的应用, W应减少50%	1) $F_u > 1.1F_{pk}$ 2) $F_u > 1.1F_{pk}$ 3) $F_u > 1.2F_{pk}$ 每个规格试三件; 一组形状相似的锚具, 可全试或选用代表性的试验
欧洲标准化委员会 EN 13391-2004 欧洲技术认证组织 ETAG 013-2002	$a \leq \frac{\text{锚具中心距}}{0.85}$ $b \geq \frac{2 \times \text{锚具边距}}{1.15}$ $A_c = \text{锚具中心距} \times \text{锚具边距}$ $h \geq 2a$ 或 $2b$ 用较大者	每 m^3 混凝土中 含钢筋 50kg, 均布	总截面积 $\leq 0.003A_c$	试件最后破坏时, $f_{cm,e} \leq f_{cm,o}$ 注1: $f_{ck,o} = f_{cm,o} - 8MPa$ 注2: $f_{cm,e} \leq f_{cm,o} + 3MPa$	循环加荷: 上限 $0.8F_{pk}$ 下限 $0.12F_{pk}$ $n \geq 10$, 至 F_u	W: 第一次 $0.8F_{pk}$ 时, $W \leq 0.15mm$ 最后一次 $0.12F_{pk}$ 时, $W \leq 0.15mm$ 最后一次 $0.8F_{pk}$ 时, $W \leq 0.25mm$ $W_n - W_{n-4} \leq \frac{1}{3}(W_{n-4} - W_0)$ $\epsilon: \epsilon_n - \epsilon_{n-4} \leq (\epsilon_{n-4} - \epsilon_0)$ $\epsilon: \epsilon_v, \epsilon_t$	$F_u \geq 1.1F_{pk} \frac{f_{cm,e}}{f_{cm,o}}$ 每种型号的系列锚具选取: 小规格试一件 中规格试一件 最大规格试二件

符号定义:

a、b—混凝土荷载传递试件截面边长, 截面积 $A_c = ab$; 试件高度为h;
c—结构端面上锚具中心距离;
d—锚具中心至结构截面边线的距离;
 $f_{cm,e}$ —试件达到破坏时混凝土试块的平均抗压强度;
 $f_{cm,o}$ —现场施加全部预应力时混凝土试块的平均抗压强度;
 f_{ck} —混凝土28天的特征抗压强度, 即混凝土强度等级及英标的 f_{cu} ;
 $f_{ck,o}$ —现场施加全部预应力时混凝土的最小特征抗压强度;
FIP1993规定 $f_{ck,o} = f_{cm,o} - 5MPa$;
EN13391及ETAG013规定 $f_{ck,o} = f_{cm,o} - 8MPa$;

F_{pk} —预应力筋的特征极限抗拉力, $F_{pk} = A_{pk} \sigma_{pk}$; BS4447中 $f_{pu} = f_{pk}$;
F—施加在荷载传递试件上的荷载;
 F_u —荷载传递试件的实测破坏荷载;
n—循环加荷程序的循环次数;
W—试件混凝土的裂缝宽度;
 ϵ —试件混凝土表面的应变, 有垂直方向的应变 ϵ_v 及水平方向的横向应变 ϵ_t 。

(1) 试件设计

荷载传递试件（混凝土棱柱体）如图1所示，7份标准的规定大体相同。棱柱体的横截面尺寸 a 、 b 应首先确定。锚垫板主承压板为正方形或圆形时，混凝土棱柱体试件截面应为正方形（ $a \times a$ ），锚垫板为矩形时，试件截面为矩形（ $a \times b$ ）。试件高度不小于截面长边的2倍，即 $h \geq 2a$ 或 $h \geq 2b$ 。美标PTI还规定长大预应力筋加载两端同试时 $h \geq 4a$ （ b ）。

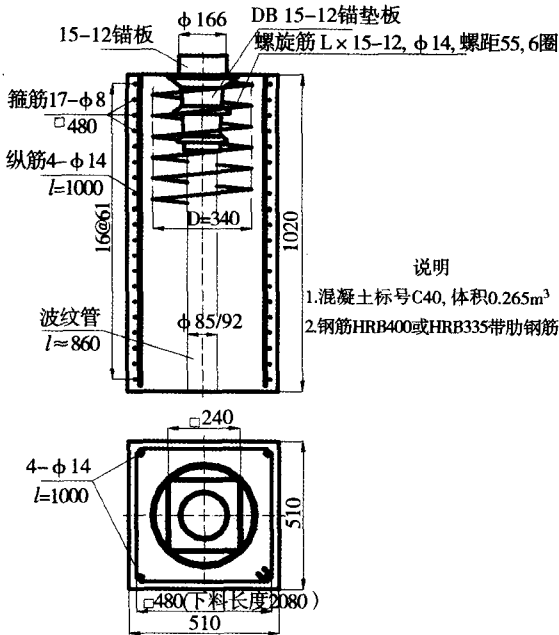


图1 HC 15-12荷载传递试验试件 $a = D + 20 + 150$

锚垫板主承压板的取形，法国弗列西涅（Freyssinet）公司为矩形， $b \approx 1.2a$ ，其他公司多为方形，有一些为圆形，所有标准都规定试件截面应大于锚垫板平面尺寸，但大多少？怎么确定？各不相同。最初的英标规定试件截面边长 a 或 b 约为锚垫板边长的1.67倍（1/0.6）。这一概念简明可取，唯觉偏小。如按FIP试验，就得先作出结构锚固区的布置图如图2所示，再按各锚具的中心距和边距确定 a 和 b 。FIP1981定为 $a = 2 \times$ 锚具边距；而FIP1993规定“ a 和 b 要对应于结构中特定预应力筋的最小轴向间距”，即按锚具中心距确定，没有规定比值。两个欧洲标准规定相同，也是按锚具布置图中的中距和边距确定的，试件边长 $a \leq$ 锚具中心距/0.85，边长 $b \geq 2 \times$ 锚具边距/1.15，但试件截面积 $A_c =$ 锚具中心距 \times 锚具边距 $\times 2 = a \times b$ 。美国AASHTO标准规定按锚具供

应商规定的锚具最小边距或最小中距，取其较小值为试件截面边长尺寸，论述太过原则。而美国PTI1998的规定是各标准中最合理、最清晰的，不但有文字说明，更有附图标示。它也是先作出锚具布置图，再根据各锚具中心距 c 和边距 d ，再考虑辅助钢筋及混凝土保护层的需要及密排锚垫板的影响，它规定：如 $2d < c$ ，则 $a = 2d$ ；如 $2d > c$ ，则 $a = c + 150\text{mm}$ 。这一规定值得借鉴。

各标准已公认FIP规定的试件箍筋用量（混凝土试件中钢筋含量 $\leq 50\text{kg/m}^3$ ）为好，但它对纵向钢筋的规定（混凝土试件中纵向钢筋截面积 $\leq 2\text{cm}^2$ ）则不分试件大小，而欧标对纵向钢筋的规定（混凝土试件中纵向钢筋截面积 $\leq 0.003 A_c$ ）更为合理。

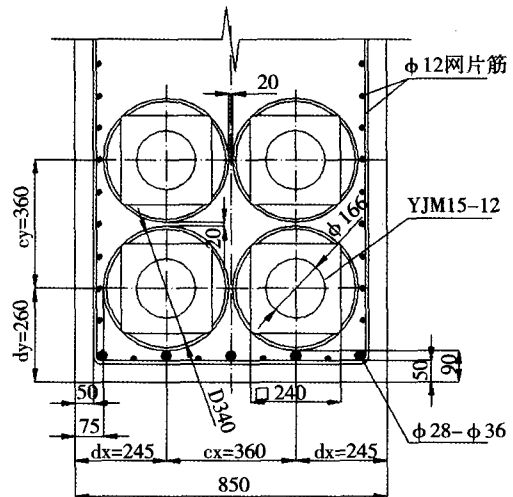


图2 一种紧凑排列的4束预应力配筋锚固端布置图

(2) 试验时混凝土强度

试件混凝土的强度随时间而增长，在何时开始试验？应予规定。试验室只能从压试块来测知混凝土的强度发展。表1中7个标准都是采用圆柱体试块强度的，当用立方体试块试压时，测值换算系数通常为0.80~0.83（即圆柱体试块强度C40相当于立方体试块强度C50）。

各标准的指导思想是试件压坏时的混凝土平均强度 $f_{cm,e}$ （通过即时压预留的混凝土试块得出实测平均值）不得超过申请人规定的现场张拉预应力时的平均抗压强度 $f_{cm,o}$ 。早些年，混凝土中不掺加早强剂，强度发展较慢，为了加快工程进度，在混凝土强度达到85%时就张拉预应力。所以FIP及PTI就规定荷载传递试件压坏时 $f_{cm,e} \leq 0.85$

f_{ck} 。上述规定在试验时很难监控强度发展的时间点。当今普遍使用早强剂，混凝土强度发展很快，更难找准时间点。此外，混凝土的平均强度值与保证率95%的最小特征强度值之间有个均方差问题，各国各地的差值不尽相同，FIP1993年标准规定一个统一差值为5MPa，10年后的欧洲标准将其扩展为8MPa。

欧标ETAG013工作组2008年5月又发表了柏林会议的“理解文件”，对试验时混凝土强度取值修正如下：

ETAG013原来文本： $f_{cm,e} \leq f_{cm,o}$

修正文本： $f_{cm,e} \leq f_{cm,o} + 3\text{MPa}$

修正理由：对混凝土强度的发展和试验时间允许给一些公差，试件的实际强度可以略超规定值 $f_{cm,o}$ 。

这项修正，使试验的可操作性大为改善。

(3) 加荷程序

美国AASHTO标准认为：单调加荷、持续（静载）加荷和循环（低周）加荷对试件的效应有些区别，验收标准也应调整。

1973年的英标很简单，采用缓慢的单调加荷，直至 $1.1 f_{pu}$ 试件不破坏，加荷中间无持荷规定。1981年FIP发现当采用较长时间（48h）的高荷持荷或10次以上的低周加荷时，试件的裂缝和应变与采用单调加荷不持荷时不同。至1993年，FIP“建议”只选择了循环（低周）加荷。欧洲标准与其相同，如图3所示。美标AASHTO规定三种加荷程序可任选一种。而PTI则只取单调加荷， $0.4 f_{pk}$ 时持荷10分钟， $0.8 f_{pk}$ 时持荷1h，如图4所示。循环加荷可以通过程序自动控制，但应给仪表采集数据留有充分时间，手动控制也可。

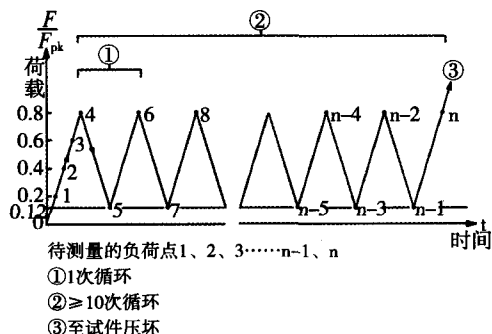


图3 欧洲标准的循环加荷程序

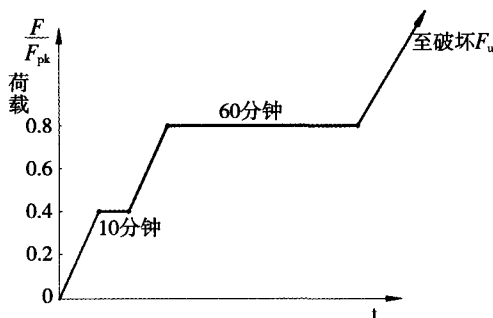


图4 美国PTI标准的单调加荷程序

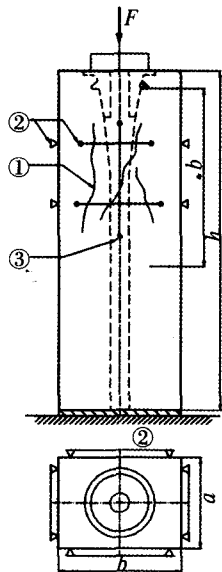
(4) 测量数据要求

荷载传递试验主要采集的数据有：混凝土试件裂缝宽度、试件表面的应变和破坏荷载值。此外还应观察锚具零件的变形、位移及断裂状况。

混凝土棱柱体的四个侧面都应测量和观察，欧洲标准要求任选两个侧面进行数据整理并据以评估试验结果，试件的上表面裂缝及破坏情况也应观察记录和拍照。

欧洲标准给出了测量装置示意图，如图5所示。图6为一个实体试件布置的位移传感器，一个测竖向应变（测量位移值即可），两个测横向应变。仪表布置区在锚垫板小端下方，估计这个区域为易开裂区且应力方向较明确，试验人员可根据经验调整测量装置位置。试件的A、B、C、D四个侧面，共需12个位移传感器。位移传感器的引线接至静态应变测试分析系统（如DH3821型）及电脑，与荷载控制系统保持同步。可以将各测点采集的数据列成记录表，也可自动绘出位移—时间的变化曲线。

美国两份标准都只要求测量裂缝宽度，不要求测量应变，使试验简化。国外7份标准都没有写明如何测量裂缝宽度。经调研可按下述方案测量：使用1~2台裂缝测宽仪（如HC-CK102型）人工测读，读数精度经放大可达0.01mm，有SD卡可照相记录。当荷载加至 $0.2 F_{pk} \sim 0.4 F_{pk}$ 时很可能出现裂缝，试验人员应仔细寻找，每个侧面在第一批裂缝中选定一条最宽裂缝，在最宽处标记固定位置，测得的宽度值应作纸面记录。在以后全部荷载点时，均在此处采集宽度值。为了评估稳定性，其它裂缝只好舍弃不记。至于按美国PTI标准只要求裂缝宽度值的试验，因为不评估稳定性，可在多条裂缝上不固定位置选测最宽值。



- ① 裂缝
- ② ε 横向应变
- ③ ε 垂直应变 测量长度=0.6b ~ 0.8b

图5 荷载传递试验试件的测量装置

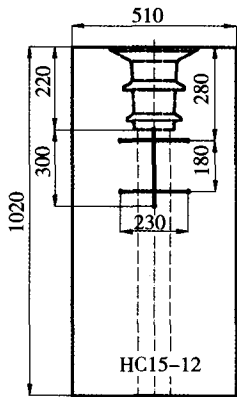


图6 位移传感器布置图

从表1可见，早期的英标及FIP1981“建议”，都只要求观察加荷后的效应而无数值要求。美国PTI标准最简单， $0.8 F_{pk}$ 持荷1小时， $W \leq 0.25\text{mm}$ 即算合格。但它对 $0.4 F_{pk}$ 作用时，要求 $W \leq 0.05\text{mm}$ 似有不妥。因为人们肉眼几乎不能看见 0.05mm 的裂缝。如果可见，其宽度恐已超过 0.05mm ，此时会过早地判定试验为“不合格”。

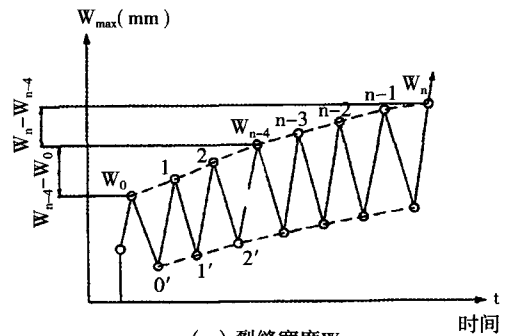
FIP1993和ETAG013的要求基本相同，后者更切合实际，判定稳定性的方法比较明确。图7为ETAG013对W和 ε 的评估图。在纵坐标上截取两段，上段小于下段的1/3即表示已经稳定。

循环荷载中，第一次达到 $0.8 F_{pk}$ 时和最后一次达到 $0.12 F_{pk}$ 时也要记录裂缝宽度。FIP1993要

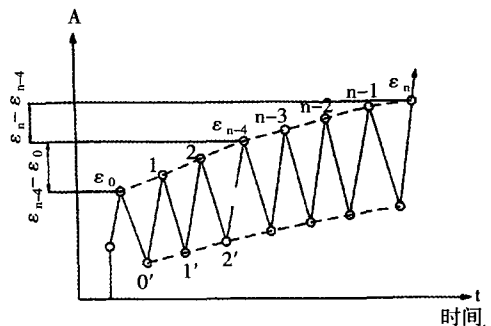
求 $W \leq 0.10\text{mm}$ ，ETAG013放宽至 0.15mm 。但对最后一次达到 $0.8 F_{pk}$ 时的裂缝宽度，FIP、欧标和美标全都要求 $W \leq 0.25\text{mm}$ 。

从各标准来看，裂缝宽度比应变更受关注。预应力筋锚固区的混凝土出现裂缝是不可避免的，问题在于结构物处在何种环境，裂缝限制在何种宽度能确保长期安全使用状态。中国、美国等国家按潮湿及腐蚀情况，将环境类别分为5级。美标PTI认为处在2至4级裸露状态的混凝土结构，如有加固措施，裂缝宽度控制在 0.30mm 是符合外观及耐久性要求的。对于在第1~4级环境中裸露状态下且频繁受力的预应力构件，CEB-FIP规范将裂缝宽度限制在 0.20mm 。早期的研究表明 0.20mm 以下的裂缝经长期后会有自然愈合作用。出于长期安全的考虑，多数标准都要求w在最后几个循环中增量很小，以表明混凝土的变形已经稳定。

对锚固区混凝土测量并评估应变 ε_v 和 ε_t ，充分体现了国外标准编制专家对预应力结构的认真程度，对锚固区要十分谨慎。



(a) 裂缝宽度W



(b) 应变 ε_v 、 ε_t

注：A分别为最大 ε_v 和最大 ε_t

图7 试件裂缝宽度和应变稳定性的评估

(下转第12页)

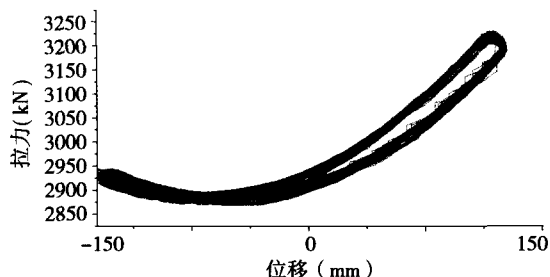


图5 角度偏移运动循环数据曲线(70℃)(两次)

4.6 试验结果

将钢管内的水排出, 放松千斤顶, 卸除钢绞线所受拉力。将整束拉索从钢管中吊出, 风干或擦干试件锚具及钢绞线表面的水后, 打开锚具, 检查是否有水进入锚具内部及密封段的钢绞线。

OVM250-37拉索锚具组件严格按CIP2002规范要求, 进行荷载循环、加热循环和角度偏移运动

(上接第8页)

(5) 破坏荷载要求

从表1可见, 早在1973年英标已经定下框框, F_u 必须大于或等于 $1.1 F_{pk}$ 。FIP1993要求同时满足两式, 似觉无此必要。特别是引入了 $f_{ck,o}$, 锚具生产厂难以确定此值。美国两份标准都规定单调加荷时, 必须满足 $F_u > 1.2 F_{pk}$, 这个要求太高, 实际试验时难以通过, 必要性值得商榷。欧洲两份标准的要求相同, 也比较合理。在 $F_u \geq 1.1 F_{pk} \frac{f_{cm,e}}{f_{cm,o}}$ 式中, $f_{cm,e}/f_{cm,o}$ 是在试验时试件混凝土实际强度变化的修正系数。

中外设计规范都规定高强钢丝及钢绞线的张拉控制应力不超过 $0.75 f_{pk}$, 施工规范又规定在任何情况下张拉控制应力不得超过 $0.80 f_{pk}$ 。张拉控制应力在施工时只是短暂的应力峰值, 放张锚固后预应力筋中的应力就会降至 $0.70 f_{pk}$ 左右, 在使用阶段, 应力将进一步降低。

荷载传递试验中规定的高荷为 $0.8 f_{pk}$, 是和张拉控制应力对应的。对 F_u 的要求, 美标规定单调加荷时 $F_u > 1.2 F_{pk}$, 和 $0.8 f_{pk}$ 的张拉控制应力相比有1.5倍的安全系数。美、欧及FIP规定循环加荷时 $F_u \geq 1.1 F_{pk}$, 和实际张拉控制应力 $0.75 f_{pk}$ 相比, 安全系数是1.47, 二者相差无几。

(6) 试验数量

锚具应用方如向认证部门申请试验, 当然是

循环的水密性试验后, 拆除钢绞线后, 拆开锚具, 没有水进入锚具和钢绞线内部, 试件各零件无破损, 密封装置无异常, 试验完全满足规范要求。

5 结束语

OVM250-37拉索锚具组件水密性试验成功, 充分证明了OVM250拉索锚具的密封可靠性, 标志着OVM250拉索体系锚具的水密性能完全满足国际规范要求。拉索体系防腐性能提高, 对延长斜拉桥拉索的使用寿命具有积极意义。

参考文献

- [1] Recommendations for Stay Cable Design, testing and installation. Post-tensioning institute (PTI), fifth edition, 2007.
- [2] fib bulletin 30, Acceptance of stay cable systems using prestressing steels. International Federation for Structural Concrete, 2005.
- [3] Cable Stays - Recommendations of French interministerial commission on Prestressing. SETRA, France, June 2002.
- [4] JT/T771-2009. 无粘结钢绞线斜拉索技术条件[S]. 中华人民共和国交通运输部.

用什么试什么, 或选有代表性的规格送检, 多份标准都规定同一规格试验三件。美国标准还规定如一件不合格可复试, 仍为三件, 都应合格。

锚具生产或研制方对较长的系列产品, 可选若干有代表性的规格进行试验。FIP要求两个规格各试三件。美国PTI要求每个都试验, AASHTO标准要求全试或选有代表性规格各试三件, 但选多少规格没有确定。而欧洲标准ETAG 013对系列产品只要求小规格、中规格各试一件, 但最大规格应试两件。试验数量对判定一个系列产品非常重要。全系列每个规格全试, 工作量很大; 最大规格如果是37根 $\phi 15.2$ 钢绞线锚具, F_u 可能达到11000kN, 试验机的最大压力大约为15000kN, 设备投资及试验费用较大。

参考文献

- [1] BS 4447-1973 Specification for the performance of prestressing anchorages for post-tensioned construction October 1973
- [2] FIP Recommendations for acceptance and application of post-tensioning systems March 1981
- [3] FIP Recommendations for the acceptance of post-tensioning systems June 1993
- [4] PTI Guide Specification: Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems Post-Tensioning Institute. U.S.A. Sept. 1998
- [5] AASHTO LRFD CONS-3-2010 LRFD Bridge Construction Specifications - 3rd Edition
- [6] BS EN 13391:2004 Mechanical tests for post-tensioning systems
- [7] ETAG 013-2002 Guideline for European Technical Approval of Post-tensioning Kits for Prestressing of Structures