

关于预应力筋锚固区的荷载传递试验

——预应力锚固区安全探讨之二

裴 骥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: 预应力筋锚固区的承载能力如何确定,是中外业界长久以来十分关注的问题,国外的技术标准要求采用对试件施加压力的试验方法进行验证,中国的惯例是混凝土结构以内的埋入件及抗裂钢筋由结构设计师负责设计,结构以外的锚具由锚具制造者负责达到标准。但整套的夹片式锚具却包含了结构体外的锚具和用于结构体内的配套零件,形成了分管不清的局面。从2010年10月起,中国的行业标准JGJ85-2010《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》首先提出在进场验收锚具时,如果锚垫板是铸造型的,锚具生产厂应进行锚固区传力性能试验,结构设计方认为锚固区传力性能不能满足要求时也可能进行这项试验,该标准与美国后张预应力学会(PTI)的验收标准基本一致。2011年3月中国交通部发布了《公路桥梁预应力钢绞线用锚具、夹具和连接器》(JT/T 329-2010)行业标准,要求锚下垫板的构造尺寸应能将预应力可靠地从锚具传递到混凝土构件中。该标准的规定与FIP1993关于荷载传递试验要求基本相同。但是中国的业界对“荷载传递试验”比较陌生,不太了解如何进行这项试验。今后的国内外工程(如高铁、高速),特别是国外用户可能要求锚具生产厂提供此项试验证明,锚具生产方和结构设计方都需要直面应对。本文就是在这种形势下汇总了国内外的试验概念、试件制作、试验方法和要求,给业内人员提供一个概括的资讯。
关键词: 预应力筋锚固区 锚具 锚垫板 螺旋筋 荷载传递 混凝土棱柱体试件

1 引言

预应力混凝土结构中支承锚具荷载并将其传递给结构的局部区域,称做“锚固区”。该区域受集中力作用,局部应力分布复杂,纵向和横向应变都会发生,相应的裂缝可能随之出现,影响结构的使用寿命。过宽的裂缝或锚垫板压损,都会毁伤结构。数十年来,对锚固区的应力分析,不能得出满意的计算方法。于是,国外标准就采用压力试验方法来确定锚固区的承载能力。而且国外标准是针对具体结构的,是在具体设计的结构上,取一个有代表性的锚固区,把它作为“脱离体”,制成棱柱体混凝土试件,试验认可后结构即可施工,如不合格,必须修改设计——锚具布置、结构截面、混凝土标号、锚垫板及螺旋筋尺寸等。和中国的锚具生产企业一样,国外的锚具生产企业不能等待设计院的具体结构设计,它选定一种常用混凝土标号(如圆柱体强度C35)作为标准,拟订自己的锚具及配套件系列产品设计,以进行大批生产并供应市场。用户有特殊要求时可提供多种设计资料。锚具生产企业的产品都应该经过“荷载传递试验”验证。

我国预应力行业的惯例是:混凝土结构以外的锚具部件,应符合锚夹具产品标准;混凝土结

构内的部分,包含锚固区,都归结构设计负责,应符合结构设计规范。锚垫板及其下方的抗裂钢筋都是结构设计图的内容。十几年来,中国的一些设计院参考外国的作法,在结构设计图上直接指定锚固区的锚具产品规格,由招标单位确定最后使用何种牌号的锚具产品。因为经济原因,锚垫板及螺旋筋尺寸日渐减小,已经威胁到锚固区的承载能力。所以JGJ 85-2010规程和交通部JT/T 329-2010标准都提出了要做荷载传递试验。可以预计,不久的将来,国家标准也会提出此项要求。

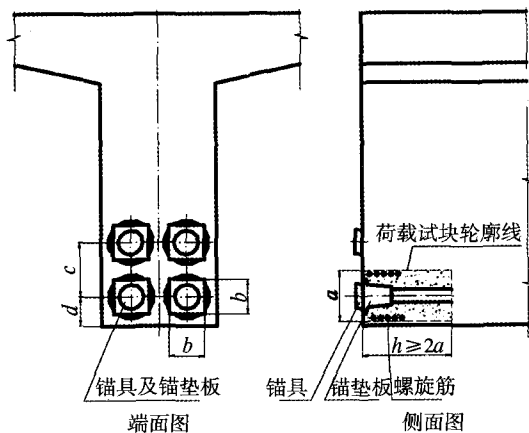
中国的多数锚具生产企业和预应力结构设计人员,对“荷载传递试验”还比较陌生。本文将就“荷载传递试验”在国外标准中的规定,简而要而全面地向读者做一介绍,同时对我国今后在产品标准中将如何规定,提出一些初步意见,抛砖引玉吧!

2 荷载传递试验的概念

在预应力混凝土结构中,锚垫板下的局部区域承担着锚具传来的预加力,并将此力扩散为分布力传到结构中。该区域能否担负既定的荷载,还不能给出满意的计算方法,欧美国家的现行标准规定应依据试验来认可。

中国的混凝土结构设计规范和规程,目前也

没有计算预应力筋锚固区的完善办法, 这使结构设计在应对多方向的拉压应力时遇到困难。

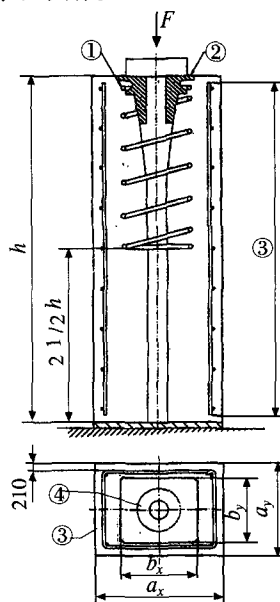


美国PTI标准规定: 如果 $2d < c$, 则 $a=2d$; 如果 $2d > c$, 则 $a=c+75\text{mm}$
图1 荷载传递试验试块取值图

在国外, 问题是同样的, 诸多的光弹性试验只能展示一个概况。在应力分析不能包络众多场合的情况下, 英国标准BS4447-1973《后张工程预应力锚具特性规程》首先提出用“荷载传递试验”来认可锚固区的承载能力。标准规定按照结构设计的锚具布置, 选取一个锚具下的锚固区, 如图1所示的“荷载传递试块轮廓线”, 确定这个混凝土块的截面尺寸 $a \times a$ (也可以是矩形的) 和高度 h , 据此埋入锚垫板、螺旋筋及波纹管, 并辅以箍筋和纵向钢筋如图2所示, 用和结构物相同标号的混凝土制成混凝土棱柱体。试件达到规定强度时进行压力试验, 并对棱柱体的耐压表现进行观测和评估, 连同混凝土试件的破坏形式、锚具埋入件的损坏情况, 极限承载力值等方面, 最后给出确认的陈述。

这一基本概念被后来的标准所接受, 他们是: 国际预应力混凝土协会(FIP)的历次“建议”、欧洲标准《后张预应力体系的力学性能试验》EN 13391 (2004)、《欧洲后张预应力体系技术认可准则》ETAG 013 (2002)、美国后张预应力学会(PTI)的《后张体系的验收标准》(1998)、中国的《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85-2010, 交通部行业标准JT/T 329-2010也接受这一概念。但是具体试验程序和认可的评估准则各有不同。FIP 1991及1993两个版本和欧洲标准二者基本相同, 都采用10次以上的慢速循环加载程序, 试验数据采集包括观测棱柱体的裂缝宽度及纵横向应变, 并适时

评估其稳定性, 最后破坏荷载应达到预应力筋标准抗拉力的1.1倍以上, 如试验时棱柱体强度升高较多, 此值可能达到1.2倍以上, 如图3、图4、图5所示。美国PTI规定为单次分级加载, 在几个荷载阶段, 也对裂缝宽度作出了规定, 最后的破坏荷载应达到预应力筋标准抗拉力的1.2倍以上才予以认可。中国的JGJ 85-2010规程的规定与美国PTI基本一致。FIP 1981规定可以静载单次加荷, 也可采用慢速循环加荷, 二者取其一。但对裂缝、变形、破坏荷载值都无具体规定, 只要求测量和观察。单次加荷只要求测量裂缝宽度和记录破坏荷载 F_u , 可免除对棱柱体测量纵横向应变和评估其稳定性的麻烦, 比较简便, 能否得到欧洲等国家的认可, 尚不了解。



1-抗裂钢筋; 2-锚具组件; 3-辅助钢筋, 纵向 $\leq 0.003A_c$ 箍筋 $\leq 50\text{kg/m}^3$; 4-孔道
图2 荷载传递试验的试件(参照欧洲标准EN13391及ETAG 013)

3 棱柱体试件

上节已指出, 棱柱体试件是用于荷载传递试验的短柱形混凝土抗压试件, 如图1的侧面图所示, 试件按照此图尺寸和构造制备。当锚垫板为正方形或圆形时, 柱体为正方形, 截面边长为 a ; 当锚垫板为矩形时, 柱截面也相应呈矩形。边长 a 是最基本的尺寸, 在混凝土标号和试验荷载已确定的情况下, a 值直接决定棱柱体的抗压能力, 并会影响结构设计中锚具间隔的布置问题。对于如此重要的基本参数, 世界各标准居然很不一致; 按具体结构设计的锚具布置确定试件

边长 a 的规定,只适用于设计单位验证自己的设计尺寸是否安全,或供修改设计之用。如要求锚具生产厂提供锚具的荷载传递合格文件,这必须在具体结构设计之前完成,锚具生产厂必须作出能够通用的产品设计。

世界各标准对棱柱体截面边长 a 的取值规定如下:

(1) 英国标准BS4447-1973:棱柱体的受荷面积的宽度 b (指锚垫板边长)与棱柱体截面宽度 a 之比应为 $b/a=0.6$ 。该标准没有提出与具体结构锚具布置相联系的关系;

(2) 国际预应力协会FIP-1981:棱柱体截面边长 a 按结构物的有关方向,取锚具轴线至混凝土边缘最小距离的两倍。参见图1,取 $a=2d$, d 须从具体结构上选定;

国际预应力协会FIP-1993:棱柱体截面边长 a 要“对应”于结构物中特定预应力筋的最小轴向间距。在不确定使用的具体结构之前,无法确定 a 值;

(3) 欧洲标准EN13391、ETAG013:棱柱体横截面积 $A_c=a \cdot b$ 必须等同于欧洲技术认可准则中允许的特定预应力筋和结构混凝土等级所要求的轴向受压最小横截面。这仍是与具体结构相关联的;

(4) 美国PTI验收标准-1998:该标准对钢板加工型锚垫板只须按其计算规定进行设计即可,不必进行荷载传递试验;对于铸造型锚垫板,工程设计中不必提交计算书,但必须进行荷载传递试验。试验用混凝土棱柱体试块截面边长 a 应是下面两个数值中较小的那一个:a)锚垫板中心线到混凝土表面的最小边距的两倍;b)锚垫板中心至中心间隔的最小值加3英寸(75mm)。参见图1,用表达式写为:如果 $2d < c$,则 $a=2d$;如果 $2d > c$,则 $a=c+75\text{mm}$ 。其条文解释认为所加75mm,是用以适应棱柱体试件表面配筋及混凝土保护层的,是必需的,也与具体结构挂钩;

(5) 中国规程JGJ 85-2010:棱柱体横截面尺寸应分别取为:a)锚具应用技术参数;b)设计给定的每个方向的锚具中心最小间距加50mm;c)锚具中心到构件边缘最小距离2倍。取三者的较小值;

(6) 中国交通部JT/T 329-2010:与FIP 1993

相同,棱柱体横截面边长 a 和 b 对应于结构中钢绞线束中心最小间距;

(7) 本文建议:

a) 因为生产厂家公布的产品性能参数,无法与特定结构挂钩,只能用本公司的锚垫板和螺旋筋制成的棱柱体试件,经试验取得产品承压合格证明;

b) 经分析,在桥梁设计中,图1的锚具排列最紧密时 c 值最小,此时, c_{\min} =螺旋筋外径 $D+20\text{mm}$;留出混凝土保护层和表面配筋要求的厚度,建议取用 a =螺旋筋外径 $D+75\text{mm}$;其结果和BS 4447-1973中的 $b:a=0.6$ 很接近。当锚垫板为矩形时,边长分别为 a_x 和 a_y ,但螺旋筋外径 D 只有一个数值。棱柱体高度 h 取长边的2倍。对于大小不同的各种规格的棱柱体均采用固定的“75mm”还值得研究;

c) 常用夹片锚具有 $\phi 15.2$ 和 $\phi 12.7$ 两个系列,其破断力比例约为1:0.7,可将锚垫板与螺旋筋加以合并,例如YJM15-12与YJM13-19加以整合。钢绞线强度按 $F_{\text{pk}}=1860\text{MPa}$ 取用,混凝土强度按常用的C40取用。在全系列中要舍弃一些不合理规格。可按分段的优选孔数取7、12、19、27孔进行荷载传递试验,其余未试规格一并认可;遇有特殊要求或钢绞线强度及混凝土强度变更时,都做个案处理。欧洲标准将系列中最大规格(例如37孔)定为必试规格,我国是否采纳还需研究。

d) 锚垫板和螺旋筋的计算,是困扰业界多年的问题,希望业界多加探讨,我们将开展试验,积极研究。

4 试验方法及要求

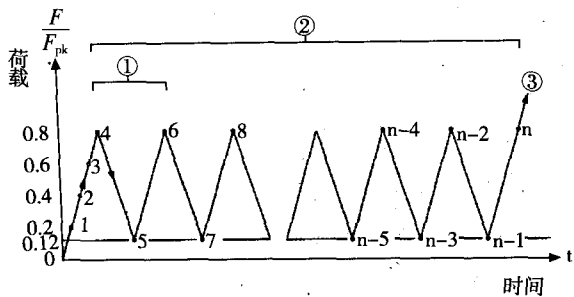
前述中外六个标准都是要求将检验合格的锚垫板、螺旋筋及管道埋入混凝土棱柱体试件中,待混凝土强度达到结构设计确定的张拉时强度时,即行开始加荷试验。欧洲及美国标准都规定应在混凝土强度达到 $0.85f_{\text{ck}}$ 之前压至破坏,而中国JGJ 85-2010规定应在混凝土强度达到抗压强度标准值 $f_{\text{cu,k}}$ 的80%至100%之间进行试验。试验时,将混凝土棱柱体试件安装在压力试验机中,荷载要模拟锚具的状态和部位,缓慢分级加荷,最后达到破坏。但是各标准规定的加荷方法和评定标准是不一样的。现行有效的标准有5个:欧

洲标准EN13391及ETAG 013、美国标准PTI后张预应力体系的验收标准、中国的JGJ 85-2010规程,及JT/T 329-2010,各个标准的要点如下:

4.1 欧洲标准EN 13391及欧洲认可准则ETAG 013

EN 13391是经欧洲标准化委员会(CEN)批准的《后张预应力体系的力学性能试验》(2004.3),CEN成员国当时包括欧洲28个国家,他们都执行这一标准。ETAG 013是欧洲技术认可组织编制的《结构用后张预应力成套组件技术认可准则》。二者的规定相同。

加荷步骤如图3所示:从0开始,加至 $0.2F_{pk}$ 、 $0.4F_{pk}$ 、 $0.6F_{pk}$ 、 $0.8F_{pk}$,在达到 $0.8F_{pk}$ 后,转入慢速循环加荷,即行降低荷载至 $0.12F_{pk}$,不必停歇,再次加荷,直至 $0.8F_{pk}$,此为第一个循环,至少进行10次慢速循环加载,其高低荷载极限分别是 $0.8F_{pk}$ 和 $0.12F_{pk}$ 。 F_{pk} 是相应规格预应力筋的特征极限抗拉力, $F_{pk}=A_{pk} \times f_{pk}$ 。中国写为 F_{pk} 。



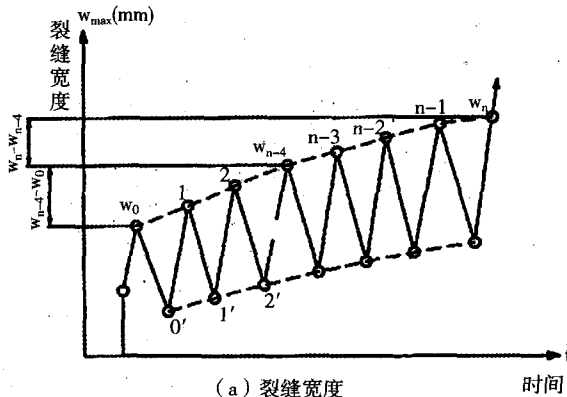
1-1个循环; 2-≥10个循环; 3-至破坏

图3 荷载传递试验程序

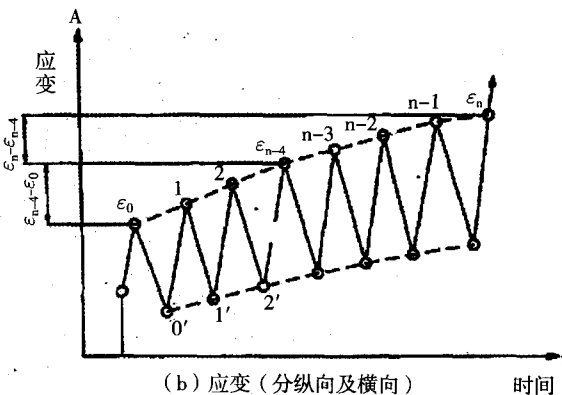
慢速加荷循环次数(n)应是多少?由循环加载时依据混凝土试件的应变读数(ϵ)和裂缝宽度(w)发展的读数进行判定,达到稳定性合格时停止循环加载,最后再逐渐加荷直至破坏。图4(a)(b)为裂缝宽度及应变稳定性的评估示意图。在前几次循环荷载下,裂缝宽度和纵横向应变值都有较大增量,第 $n-4$ 次至第 n 次(即最后4次以图4的序号为准)之间的总增量应该较小,在符合下列条件时即认为已经稳定,可以停止循环加荷:

裂缝: $w_n - w_{n-4} \leq \frac{1}{3} (w_{n-4} - w_0)$ 时,且 $n \geq 10$,可认为裂缝已稳定;

纵向及横向应变: $\epsilon_n - \epsilon_{n-4} \leq \frac{1}{3} (\epsilon_{n-4} - \epsilon_0)$ 时,且 $n \geq 10$,可认为应变已稳定。



(a) 裂缝宽度



(b) 应变(分纵向及横向)

图4 裂缝宽度与应变稳定性的评估

试验中,对裂缝宽度 w 有具体要求:(1)荷载 F 第一次达到 $0.8F_{pk}$ 时, $w \leq 0.15\text{mm}$;(2) F 最后一次降至 $0.12F_{pk}$ 时, $w \leq 0.15\text{mm}$;(3) F 最后一次达到 $0.8F_{pk}$ 时, $w \leq 0.25\text{mm}$ 。

如果棱柱体的承载能力不足,裂缝宽度必然超标, w 和 ϵ 的增量不会逐渐减小并趋于稳定。锚垫板和混凝土棱柱体都可能压坏。

标准要求最后破坏时棱柱体试件混凝土的平均抗压强度 $f_{cm,e}$ 应小于或等于现场计划全部张拉时混凝土的平均抗压强度 $f_{cm,o}$ 。

最后认可评估的内容主要有:

- 检查锚垫板等部件是否合格(材料、机加工质量、几何尺寸、硬度等);
- 混凝土棱柱体裂缝图及应变影响区,至少两个侧面;
- 锚垫板可见部分变形情况;
- 破坏位置及形式;
- 实测极限荷载 F_u ;应满足 $F_u \geq 1.1 F_{pk}$ ($f_{cm,e}/f_{cm,o}$);实际试验时,如果出现 $f_{cm,e} > f_{cm,o}$ 的情况,不等式的右边将大于 $1.1 F_{pk}$;
- 文字及照片资料,给出意见。

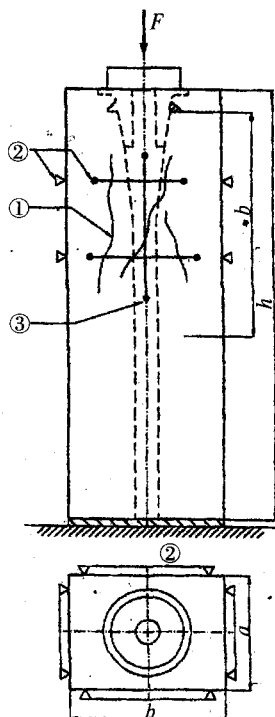


图5 荷载传递试验测量装置图

4.2 国际预应力协会FIP 1981、1991、1993历次的《后张预应力体系的验收和应用建议》

世界各国的预应力行业都把“国际预应力混凝土协会(FIP)制订的“建议”视为“国际标准”。FIP 1981“建议”吸纳了英国BS 4447-1973的规定,但细化了各步骤,要点明确一些,棱柱体试验时混凝土强度应超过28天特征强度的85%,并在达到100%之前结束。试验程序可选用单次静载加荷,也可选用慢速循环加荷,当选用单次静载加荷时,至 $0.8 F_{pk}$ 后持荷48小时,并观察混凝土裂缝及变形、锚具变形等项目。最后压至破坏,未提荷载值 F_u 的要求。对慢速循环加荷程序,规定不具体,不易操作。

十年后,FIP 1991版本提出许多规定:采用慢速循环加荷制度;限制棱柱体试验破坏时(即进行试验时)混凝土强度的发展不能超过规定标号的85%,也不能超过 $1.3 f_{ck,o}$ ($f_{ck,o}$ 为现场施加全部预应力时混凝土的最小特征抗压强度, $1.3 f_{ck,o}$ 约为标号的88%左右);破坏荷载 F_u 必须大于预应力筋标准抗拉力 F_{pk} 的1.1倍和 $f_{cm,e} / f_{ck,o}$;第1循环荷载上限 $0.8 F_{pk}$ 和最后一次荷载下限 $0.12 F_{pk}$ 时裂缝宽度都不应超过0.10mm,最后一次荷载上限 $0.8 F_{pk}$ 时裂缝宽度不应超过0.25mm;最后两次

循环时纵向和横向应变增量应小于5%、裂缝宽度增量不应大于0.02mm。FIP1993“建议”与此相同。这些规定对试验设计及仪表精度提出的要求是非常高的,锚具生产厂从开始确定棱柱体试件截面尺寸时就可能遇到困难;当承接国外预应力工程后,或我国标准确定“荷载传递试验”为必试项目时,这项困难必须要克服。

4.3 美国PTI制订的《后张预应力体系的验收标准》(1998)

这个标准仍然是以结构设计的锚具布置来确定混凝土棱柱体试件的截面尺寸;对试件中预埋钢筋说得不是很精准—应能代表实际结构中的钢筋;棱柱体试验时混凝土强度不应超过体系规定的张拉时的最小强度,也不能超过规定标号的85%。

该标准采用单次静载分级的加荷方式,仍以相应预应力筋的标准抗拉力 F_{pk} (该标准称为极限抗拉强度最小值,缩写为MUTS)为准。

试验荷载应用试验机或大于本规格的预应力束加到锚板上或锚固螺母上。荷载应分阶段到达40%MUTS和80%MUTS。当达到40%MUTS时,要持荷10分钟,以便检验裂缝情况。当荷载达到80%MUTS时,在持荷1小时后测量裂缝宽度。最后,荷载达到120%MUTS之上。

PTI的验收标准有3条:

- 当荷载达到40%MUTS且持荷10分钟后,棱柱体试件混凝土裂缝宽度不应超过0.05mm;
- 荷载80%MUTS且持荷1小时后,混凝土棱柱体裂缝宽度不应超过0.25mm;
- 荷载达到120%MUTS之前,混凝土试件不应破坏。

PTI标准认为锚固区在40%MUTS集中力作用下,微小裂纹是难免的。本文认为不必限制0.05mm的裂缝宽度,因为0.05mm肉眼难及,混凝土一旦开裂,很可能就超过了0.05mm,若据此判定试验不合格似乎不妥。对80%MUTS持荷1小时的规定,可以改为半小时,这是因为混凝土结构的变形反应虽较钢结构慢,但半小时足矣。0.25mm的裂缝限宽是必要的,永久的有效预应力可能降至65%MUTS左右,缝宽会有所降低,对于一般环境下的桥梁及建筑结构,可满足耐久性要求。曾有学者认为,小于0.2mm的混凝土微小裂缝,日久后会有“愈合”作用。对于破坏荷

载要求 $F_u \geq 120\%MUTS$, PTI是和80%MUTS比对的, 这时正好有1.5的安全系数。120%MUTS是固定数, FIP-1993和ETAG 013要求的 F_u 是随试件混凝土强度不同而确定的变数。PTI承认“满足FIP后张体系验收建议”的锚具试验可被认为也满足了它的要求。而欧洲EN13391及ETAG 013没有表示已满足PTI的锚具试验能不能算也满足它的要求。

4.4 中国JGJ 85-2010《预应力筋用锚具夹具和连接器应用技术规程》

这是国家行业标准, 在我国首开“采用铸造垫板的锚具应进行锚固区传力性能试验”的要求。可以预计, 今后修订的锚具产品标准及交通和铁路系统的相关标准, 都会陆续提出“荷载传递试验”的规定。

我国的预应力工程实践及锚具应用技术管理将走上更为健康的发展道路。

JGJ 85-2010的要点如下:

(1) 定名为“锚固区传力性能检验”。锚具生产厂应在1~37孔的系列规格中分段选定5个规格进行试验; 工程用户检验时, 由设计单位选定有代表性的规格进行检验。每组3件, 均应符合要求。

(2) 混凝土棱柱体试件的构造和FIP及欧美标准基本相同, 辅助钢筋的配置吸收了FIP和欧美标准的规定。本规程特别要求试件的下半部应满足国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的正截面受压承载力要求。确定棱柱体横截面尺寸的3种办法已在前面第3节之(5)介绍了, 但锚具生产厂很难确定棱柱体试件的截面尺寸。而试件高度 h 规定为: 当用压力机加载时, $h = 2a$ (如为矩形时, 取用长边的2倍); 当用预应力筋张拉加载时, $h = 3a$ 。

(3) 试验时试件混凝土强度(f'_{cu})不应小于设计抗压强度($f_{cu,k}$)的80%, 且不超过100%; 这和FIP及PTI标准规定压坏时混凝土强度不得超过 $0.85 f_{ck}$ (f_{ck} 为混凝土28天龄期的特征抗压强度)的规定不在一个强度区段中。采用单次静载加荷方法, 与美标PTI基本一致, 如图6所示, 只是在 $0.8 F_{pk}$ 时持荷不是1小时, 而是10分钟。

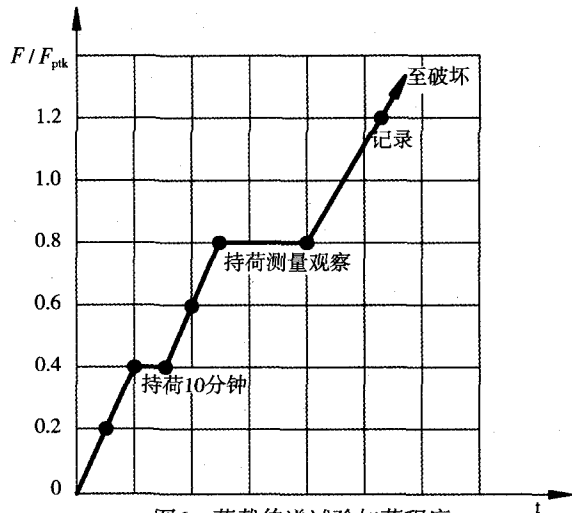


图6 荷载传递试验加荷程序

(4) 合格标准有3条:

- 加载到 $1.0F_{pk}$ 时, 锚垫板不应出现裂缝;
- 加载到 $0.4F_{pk}$ 时, 棱柱体混凝土最大裂缝宽度不超过 0.05mm ;

加载到 $0.8F_{pk}$ 时, 最大裂缝宽度不超过 0.25mm ;

c) 破坏荷载 F_u 应符合下列要求:

$$\text{锚具生产厂 } F_u \geq 1.2F_{pk} f'_{cu} / f_{cu,k}$$

$$\text{用户工程检验 } F_u \geq 1.5N_{con} f'_{cu} / f_{cu,k}$$

式中 f'_{cu} —试验时的同条件养护混凝土立方体试块的抗压强度实测平均值;

$f_{cu,k}$ —试件设计混凝土立方体抗压强度标准值;

N_{con} —预应力筋张拉控制力。

此处 $f'_{cu} / f_{cu,k}$ 是依据试验时混凝土强度的调节系数。

5 中国的荷载传递试验尚须考虑的问题

(1) 中国的锚具产品标准GB/T 14370在下次修订时, 建议列入荷载传递试验, 本文提出的一些问题, 可供参考。FIP及欧洲标准采用慢速循环加荷程序, 比较复杂, 但在世界上应用的国家多, 美国PTI采用单次静载加荷程序, 比较简便, 但应用国家数量不详; 我国须多加斟酌。

(2) JGJ 85-2010规定试验时的混凝土强度阶段在 $0.8 f_{cu,k}$ 至 $1.0 f_{cu,k}$ 之间, 而FIP及欧美标准规定应在混凝土强度较低时结束试验, 他们规定棱柱体试件最后破坏试验时, 试件混凝土的平均抗压强度($f_{cm,e}$)应低于现场施加全部预应力时混凝土的平均抗压强度($f_{cm,o}$), 也不能超过龄期28天的特征抗压强度 f_{ck} 的85% (即 $0.85 f_{cu,k}$)。混凝土强度差 $0.15 f_{cu,k}$ 。在实际工程中, 有规定

混凝土达到设计标号80%即可开始张拉,也有规定必须达到100%时才允许张拉。现代的混凝土几乎都掺有早强剂,从 $0.85f_{cu,k}$ 到 $1.0f_{cu,k}$ 可能只有一两天的时间,这项试验的时间安排及对 F_u 的要求,宜从当前情况出发。棱柱体试件混凝土强度如超过规定怎么办?作废或适度宽限,对试验值如何修正?

(3) 棱柱体下半部不必要求符合GB50010正截面受压承载力验算。本试验要求的是破坏阶段值,而上述设计规程要求的是设计值。棱柱体截面积不可能随意增加,混凝土标号也不能提高,这牵涉结构设计和试验设计等多种问题。

(4) 中国现代的锚具市场已是“标准件商品供应”(国外也类似)的时代,荷载传递试验中棱柱体截面和混凝土标号不可能沿用过去那种按具体结构设计来确定的办法。只能是生产厂根据预应力筋的破断力 F_{pk} 和常用混凝土标号(例如C40)来设计生产成套锚具,棱柱体试件截面尺寸只能按锚具尺寸来确定,设计单位通常按锚具性能布置锚固区域。遇特殊情况按照个案处理。

本文建议:方形锚垫板的边长 b 或圆形锚垫板的直径 D_0 确定后,螺旋筋外径 D 就可选定,一般可取 $D \approx (1.35 \sim 1.40)b$ 或 $D \approx (1.10 \sim 1.15)D_0$,如图1所示,令锚垫板完全居于螺旋筋之中,能获得最大承载力。当锚具中心距 C 最小时可采用 $C_{\min} = D + 20\text{mm}$,建议棱柱体边长参考PTI第3.2.1条的规定,取 $a = D + 75\text{mm}$ 。75mm是供安放棱柱体试件箍筋和混凝土保护层之用,已是最小尺寸。这个尺寸是否合适,修订标准时还应积

(上接第10页)

表3 有限元应变与实验应变对比

施加荷载	试验平均值	有限元值	相对误差
$0.2F_{pk}$	-28.3	-29.0	-2.67%
$0.4F_{pk}$	-64.4	-69.2	-7.4%
$0.6F_{pk}$	-102.7	-108.8	-5.92%
$0.8F_{pk}$	-138.6	-146.9	-5.97%

4 结论

1) 在设计荷载下,优化后的锚下混凝土侧面拉应力减少了12.6%,并且质量较前者更轻。可认为优化后的锚垫板不仅性能更优越,而且也更为经济。

2) 由锚垫板最大拉应力比较可得,OVM15R-37CP比OVM15R-37C更充分利用材料

累试验经验加以验证。

“荷载传递试验”今后应列入产品标准GB/T 14370中。要求锚具生产单位对自己的预应力体系必须按规定完成每个锚具类型(系列)的“荷载传递试验”。同时,又应限制个别用户不必要的要求供应单位专为其进行这项试验。如设计单位(用户)有特需,可委托检测单位进行试验。JGJ 85是供用户使用的技术规程,“进场验收”中如规定“必试”,会发生很大的试验工作量及经费支出,也可能严重影响工程进度,只验证供应商的试验合格证明即可。

(5) 荷载传递试验的规格选择及试验数量,标准修订时很值得斟酌,过多过少都不妥当。

(6) 关于“荷载传递试验”的探索,杭州浙锚预应力有限公司已列项投资,筹建试验装备,开展相关的试验研究。

(7) 锚垫板的计算,国内外至今都没有可供使用的良好方法。如果方形垫板边长 b 、圆形锚垫板直径 D_0 都不是计算得出的,棱柱体试件截面尺寸 a 就不可能准确确定。希望业内专家在锚固区及锚垫板等方面多做研究。

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] JGJ 85-2010预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程. 北京,中国建筑工业出版社,2010年7月
- [5] PTI Guide Specification: Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems Post-Tensioning Institute. U.S.A. Sept. 1998

强度,还有进一步优化的空间。

3) 通过荷载传递试验,肯定了优化后的锚垫板及其锚下结构的安全性。

4) 通过有限元模拟与试验数据的对比,说明有限元模拟有一定的可靠性与精度,也为进一步研究与优化锚下结构提供了技术铺垫。

参考文献

- [1] 房贞政. 预应力结构理论与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [2] 桂志光,朱万旭. 核电站安全壳锚固区局部应力研究[J]. 特种结构,2010(8):58-61.
- [3] 陈嘉毅. 大跨度预应力混凝土箱梁锚固区局部应力的理论分析与试验研究[D]. 硕士学位论文,浙江大学. 2006:82.
- [4] FIP-1993《后张预应力体系验收建议》[S].