

预应力钢绞线及夹片式锚具 在我国的发展与应用

——预应力锚固区安全探讨之一——

冯大斌 于滨 裴 骥 陈 茜 朱 莹

(中国建筑科学研究院 北京 100013)

摘要:近几年,我国的高速铁路、高速公路、普通公路铁路、城际铁路、地下铁路以及很多基础建设项目增加很多,预应力混凝土结构用量持续快速增长。预应力张拉锚固体系的生产供应随之大大增加,其中用量最大的当属预应力钢绞线及夹片式锚具,2009年和2010年,中国每年都生产了1.5亿孔夹片式锚具,远超欧美各国。但是,仍存在一些应解决的问题,如:预应力钢绞线的易用性应予提高,锚具配套件(锚垫板、螺旋筋等)的尺寸应回归到科学的水平,对锚具效率系数的全面观问题,而确保结构中预应力筋锚固区的安全则是当前最重要的问题。中国的现状已要求将荷载传递试验列入国家产品标准之中,在此预应力工程大发展时期,中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会始终密切关注着预应力张拉锚固体系在工程实践中的表现。

关键词:预应力钢绞线 夹片式锚具 预应力筋效率系数 预应力筋锚固区

1 预应力钢绞线

我国的预应力钢绞线产业发展之路,先经历了漫长时期的低标准、小产量,在改革开放之后走上了正确发展的坦途,进入本世纪后获得举世瞩目的巨大发展。

上世纪70年代至80年代初期,在漫长的近20年中,只有天津每年生产约5万吨的高强钢丝($\phi 3$ 、 $\phi 4$ 、 $\phi 5$ 等),后来才开始生产少量 $\phi 12$ 及 $\phi 15\text{mm}$ 的钢绞线,年产量不足2万吨。这些产品的标准强度只能达到1470~1570MPa,而且都是普通松弛级的。在1986~1987年开发研制QM型钢绞线张拉锚固体系时,竟然还没有国产的1860MPa级低松弛钢绞线。

中国能按美国标准ASTM A416及英国标准BS 5896生产1860MPa级的低松弛钢绞线,是从江西新余市开始的。1988年投产供应市场,最初年生产能力约3~4万吨。

进入本世纪,我国预应力桥梁及其他工程明显增多,对钢绞线的需要量随之加大。2005年我国预应力筋产量已达200万吨,其中预应力钢绞线的产量约为120万吨,名列世界各国之冠。

据不完全统计,2009年我国拥有146条钢绞

线生产线,其中40%为进口生产线;国产的生产线占60%之多,也能生产1860MPa级低松弛产品。2009年我国的钢绞线年总产量已高达350万吨。业内人士估计我国的设备总产能约为500万吨。至2010年,钢绞线生产线数量突增至200多条,产能约为640万吨,因受国家建设计划调整的影响,产量降为320万吨。

我国预应力钢绞线产品也存在一些问题:强度、硬度和尺寸公差都是上偏差,如钢绞线与夹片锚具匹配失衡,会导致失锚问题,影响工程质量。工程设计是按1860MPa取用的,钢绞线的供货强度应保证不低于1860MPa,且不超过上一级1960MPa;如超过1960MPa,就不符合GB/T 14370-2007的规定。

关于钢绞线的表面硬度,各国标准都无规定,国产钢绞线随着强度的提高,表面硬度竟高达HRC49~HRC52。这一硬度范围与夹片硬度范围HRC58~HRC64在匹配时会出现问题,有可能满足不了“夹片硬度比钢绞线硬度高8度~10度(以HRC计)”的基本要求。为了使张拉锚固施工顺利进行,希望钢绞线的表面硬度微降至HRC47~HRC50。

钢绞线的实际直径准确值是影响锚固效果的另一重要因素,以1860MPa(270K)级为例,欧洲标准EURONORM 138及中国标准GB/T 5224都是 $+0.40$
 -0.20 mm。国内外预应力施工的实践证明,如此大的公差都超过夹片锚具顺利锚固的要求。国外钢绞线供应商的产品,实际尺寸公差多为 $+0.20$
 0 mm,工程使用顺利。

关于钢绞线的最小延伸率(A_{gt})标准值,这是一个陈旧而现实的问题,上世纪五十年代欧洲刚出现预应力钢丝时,确定的最小延伸率就是不小于3.5%,至今,钢丝钢绞线的制造技术虽已长足进步,但各国的产品标准中钢绞线的最小延伸率仍是3.5%。按照国际预应力协会(FIP)、欧洲认可标准ETAG 013、美国后张预应力协会(PTI)及中国《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370的规定,都要求静载试验的组装件必须具有不小于2.0%的延伸率。在试验室的操作中,母材试验中3.5%的延伸率是用长夹具(长度180mm~220mm)或裹铝皮作出的试验数据,而钢绞线—锚具组装件试验用的夹片长度仅为40mm~45mm,径向压应力的“切口效应”要大很多;经验表明,这一差别将会降低延伸率(2.5~3.0)%,母材如果真的只有3.5%的延伸率,出厂是合格的,但组装件试验几乎不可能合格,检测单位难以辨别究竟是锚具不合格还是钢绞线不合格,对此,FIP也认为难以厘清。从组装件静载试验的经验来看,钢绞线产品标准将最小延伸率定为5.0%比较合适。实际产品的延伸率如能达到(5.5~6.0)%,组装件试验就容易判断夹片锚具的真实锚固性能,实际工程中张拉也会很顺利,不易断丝,结构也能获得良好的承载性能,不会脆性破坏。

在国外,钢绞线的易用性常为商业竞标的内容,对此,应引起我国钢绞线生产厂的注意。钢绞线的易用性对施工操作很重要,它表现在以下几个方面:良好的柔韧性,硬度不会过高、开盘后平直度很好,切割端不会解扭,直径公差小,与锚具夹片匹配良好等。这些条件不会反映在结构设计中,但对施工操作非常重要,工程能否顺

利进行,细节决定成败!

2 夹片式锚具

用钢绞线作预应力筋,用夹片式锚具作锚固件的组装件,从上世纪70年代在国外开始应用。由于钢绞线具有高强度、低松弛、柔韧、长度自如、曲线孔道穿束方便等许多优点,很快得到工程应用部门的青睐和推广。我国由建设部组织的夹片群锚研究开发,1987年开始应用,90年代得到普及,本世纪初迅速发展,2005年的锚具产量超过了4000万孔,居世界各国首位。

近几年,我国基础建设项目猛增,2009年的夹片式锚具总产量更达1.5亿孔之多。中国的锚具生产基地主要有柳州、杭州、天津、成都和开封等城市,这些城市的预应力生产企业支撑着我国预应力结构工程(主要是新建高速铁路、高速公路和城际铁路)的紧张施工,贡献重大。

我国钢绞线使用的夹片式锚具,都是按照国家标准GB/T 14370-2007《预应力筋用锚具、夹具和连接器》的规定生产的,除特别要求外,均为1860MPa级,这是国际上实行的最高强度级别。

我国取得如此巨大成绩的关键因素是:用钛合金钢制造锚具夹片,材料选择正确、毛坯加工工艺持续改进,效率大为提高;机械加工高度数控化,精度完全达到互换性的要求,以及普遍使用世界先进水平的热处理工艺设备,确保产品质量、性能和匀质性都达到极高的水平。即便如此,更高效率的加工工艺或将在“中国制造”中出现。

当前的中国预应力工艺技术产品,包括锚具和张拉机具,都应该标准化。以标准化提高产品质量和提高产能,更加适应中国预应力施工队伍不够专业化的局面。如果锚板直径、厚度、孔位排列能统一标准,则张拉千斤顶、工具锚也就标准化了;如果锚垫板、螺旋筋能统一标准,则不但预应力筋锚固区的安全性得以保证,而且在预应力结构上锚具排布也会更加合理,使结构设计工作便利许多。锚筋孔按正三角形排列能方便张拉穿筋,舍弃一些不合理孔数的锚板,能提高经

济性。这些标准化工作,建议由由建设部、铁道部和交通部的相关部门联合组织有关单位,使全国的预应力行业标准更趋一致,进入更高的标准化时代。

3 预应力筋效率系数 η_p

在国家标准GB/T 14370-2007《预应力筋用锚具、夹具和连接器》第5.5.1条中,对预应力筋-锚具组装件的静载锚固性能的要求规定锚具效率系数 η_a 按下式计算:

$$\eta_a = \frac{F_{apu}}{\eta_p \cdot F_{pm}}$$

式中 η_p 称做“预应力筋效率系数”,它反映组装件中预应力筋钢材的根数不同和试验安装初应力不均匀的影响,分别取1.0、0.99、0.98和0.97。

我们曾和fib第9委员会(负责原FIP的预应力技术事务)主席交换过看法,双方都认为,组装件静载试验结果实际上反映的是锚具和预应力筋二者的共同效应。目前还没有人找到实用的办法能把两个效应分开。但在中国的检验标准中,却只反映为锚具的效应,将“组装件”的合格标准规定为“锚具”的标准。

FIP 1981年“建议”中首先提出存在“束的效应”,明确指出组装件中第一根预应力钢材断裂时预应力束的拉力,必定小于预应力筋中各根钢材断裂时的拉力之和,其比值即为预应力筋束的效率系数,它以 η_c 表示之。在试验数据处理中, η_c 是基于束中具有最小应变值 ε_{min} 那一根预应力筋应该最先被拉断的概念,用5至30根预应力钢材母材试验的结果,采取统计分析的方法得出,试验及计算工作量很大,不实用。之后,在FIP 1991年和1993年两个版本的“建议”中,都取消了“束的效应”,不再计算 η_c ,即令任何时候 η_c 都等于1.0,这种规定有些硬性回避预应力筋束中的不均匀性影响。

我国GB/T 14370-2000的编制组做了许多试验,推证 η_c (中国用 η_p 表示)在1.0~0.98之间,标准取用1.0~0.97。同时还认为影响 η_c (η_p)的因素不仅是材料强度的不均匀性,而且预应力钢材的延伸率才是影响的根源。当然,还得要求组

装件安装初应力必须均匀,预应力筋直径公差不能太大(影响与锚具的尺寸匹配)等。我国多年来的组装件试验表明,如果预应力筋的延伸率足够大,比如 A_{gt} 达到(5.5~6.0)%以上,试验拉断时就可以超越上述因素,在 $\eta_p=1.0$ 时,也可能获得 $\eta_a \geq 0.95$ 和 $\varepsilon_{apu} \geq 2.0\%$ 的结果。如果钢绞线的延伸率合格标准仍然是3.5%,取消 η_p 后,不仅 η_a 难达标, ε_{apu} 可能更难达到2.0%的标准;须知, η_a 和 ε_{apu} 是互相关联的。在GB/T 14370取消 η_p 时,希望得到钢绞线标准GB/T 5224提高 A_{gt} 的支持。

欧洲和北美的预应力行业,对组装件的要求很高,也很稳定,在取消 η_c (η_q)的条件下,锚具和钢绞线两方面的投标者都在市场上竞争,招标者掌控着两者的综合效应。在确保锚具性能的同时,也逼着钢绞线产品的延伸率必须远高于产品标准,并且具有全面的良好的易用性。这就是他们取消 η_c (η_p)的内在原因。

4 预应力锚固区的安全度

自上世纪五十年代开始研究预应力工程技术开始,我国就将预应力结构上的埋入件锚垫板、抗裂钢筋、穿筋孔道等,归由结构设计方负责出图;而安放在结构件外的锚具归类为“预应力锚夹具”,由专业机械厂接受委托生产或自行作为商品销售。因此,中国历次版本的锚夹具产品标准(如GBJ 204-83、GB/T 14370-1993、2000、2007、铁道部和交通部的若干部颁标准等),都是针对结构体外的锚具产品制订的,结构体内的预应力锚固区则由《混凝土结构设计规范》(GB 50010等)作出设计计算规定。以往,用单根粗钢筋、细钢筋束、细钢绞线束及钢丝束作为预应力筋时,他们的规格都比较小,没有喇叭管,张拉力不太大,结构上的预应力锚固区构造都由设计院完成设计。后来,大规格的钢绞线夹片锚固体系使用日广,因为锚固区应力分布十分复杂,结构设计规范还没有提供针对性的设计计算办法,具体结构的设计人员实在难以处理。

(下转第9页)

动；而PL3体系的电阻值数据则在预应力筋张拉灌浆完成后一直不断的往上涨，一年多以来，涨了5倍以上。

(3) 从数据上看，国内测量的动态电阻数值偏低，但是整体上涨的趋势都是一样的，对于这种检测的方法是有效的，可行的。因此该体系可以进一步提高其绝缘性，优化系统。

(4) 该体系即时监控方便可行，数据可靠。

2010.9月在玉港高速跨海大桥预制预应力梁上应用了该锚固体系，目前在施工监测之中。预

(上接第5页)

1987年QM体系研制成功时，与其配套的埋入件锚垫板、螺旋筋和孔道，只是参考国外产品尺寸摘录应用，因其业经多年实践，安全无虞。若干年后，我国招标中常取“最低价中标”，导致产品尺寸屡屡缩减，预应力锚固区的安全储备随之不断下降。近年更有减小锚板尺寸和“简化”加工工艺的现象。这些情况应引起锚具标准编制人员的高度重视，工程业主或招标单位切勿因小失大，一旦锚固区突然压坏，工程不能验收，损失难以挽回。设计院不应默认那些缩小尺寸的埋入件。铁道部的认证部门已开始强力扭转这一危险趋势。

国际上主要的先进标准都将锚固区的安全性一并作出规定，强制性的条件包括三项，即：

(1) 预应力筋-锚具组装件的静载试验；(2) 预应力筋-锚具组装件的疲劳试验；(3) 包含锚垫板、抗裂钢筋及孔道等预埋件的锚固区荷载传递试验。这三项试验涵盖了锚具钢绞线的动静力性能及预埋件和混凝土的承压性能，基本要求完整。此外，还有一些辅助试验也须完成。但是，它不能称作“锚具标准”，国际预应力混凝土协会(FIP)、欧洲标准及美国标准，均称其为“后张预应力体系”的验收标准或认可准则。这与中国的标准分类办法不完全吻合，建议中国GB/T 14370标准在下次修订时，将“预应力体

预应力筋腐蚀后的情况还需要试验进行验证，下一步我们要继续进行这方面的探讨和认证。

参考文献

- [1] The International Federation for Structural Concrete. Fib technical bulletin 33.2005[S]. prepared at the fib workshop at Zurich.October 2004.
- [2] M.Della Vedova, B.Elsener, L.Evangelister. Corrosion Protection and Monitoring of Electrically Isolated Post-Tensioning Tendons [C]. Proceedings of the Third European Conference on Structural Control ,3ESCS,12-15July 2004.
- [3] Measures to ensure the durability of post-tensioning tendons in bridges, guideline of the Swiss Federal Roads Authority and Swiss Federal Railways[M], edition 2001.

系”这一较全面的范畴引入标准之中，从而顺理成章地作出“锚固区荷载传递试验”的规定。为了确保预应力体系的安全度，新标准完全可以对产品作出一些标准化的规定，并赋予“标准化产品”的类别，倡导优胜劣汰。

关于荷载传递试验，我国还需要探索，国际上的规定不完全一致。我国在“慢速循环荷载试验”和“单次加载试验”方面，要获取探讨性试验的技术资料，以作为国家标准修订的依据，同时还应考虑国际上互认的可能性。可以相信，荷载传递试验如列入国家标准，并在全国的预应力结构工程中普遍贯彻，诸如铁路公路桥梁、大型预应力建筑结构、特种结构等工程的预应力锚固区，其安全性将会回归到正常的科学水平。

参考文献

- [1] GB/T 14370-2007 预应力筋用锚具、夹具和连接器等[S]. 北京：中国标准出版社，2008.01
- [2] GB/T 5224-2003 预应力混凝土用钢绞线[S]. 北京：中国标准出版社.
- [3] ASTM A416-02 Standard specification for steel strand, uncoated seven-wire for prestressed concrete.
- [4] FIP Recommendations for Acceptance and Application of post-tensioning systems. March 1981
- [5] FIP Recommendations for the acceptance of post-tensioning systems. June 1993
- [6] 冯大斌, 裴璐, 朱莹. 关于当前预应力钢绞线硬度与锚具夹片的匹配建议[J]. 预应力技术, 2010年第4期