

拉索体系相关标准及规范的研究

庞维林 黄芳玮 闫云友 陈建国 黄永玖

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545005)

摘要:通过对国内和国际通用的拉索体系标准及规范进行研究,从对拉索索体母材的疲劳性能、预应力筋——拉索锚具组件的疲劳性能和水密性能所提出的试验条件等方面进行比较,研究各标准及规范的共性与差异性。从各标准及规范对拉索体系各项性能要求的比较,及国际斜拉索规范对拉索防腐体系要求的解读,找出我国在斜拉索标准与国际规范的差距。结合拉索体系的设计、制造、检验、安装及维护对各规范中相关条款的合理性及可操作性进行分析,对这些标准的执行或修订提出一些思考。

关键词:拉索 试验方法 规范 疲劳性能 水密性试验

1 前言

目前我国关于拉索体系的标准主要有两项,一个是关于钢丝拉索体系的GB/T 18365《热挤聚乙烯钢丝拉索技术要求》;另一个是关于钢绞线拉索体系的JT/T 771《无粘结钢绞线拉索技术要求》。国外的规范则主要有fib“Acceptance of stay cable system using prestressing steels”、PTI“Recommendations for stay cable design, testing and installation”以及CIP“Cable stays, Recommendations of French interministerial commission on prestressing”(以下分别简称fib、PTI以及CIP)。国外的这些规范不仅是行业协会的一些建议,在工程界也具有极高的权威性,被广泛接受和认可,并将这些规范作为一种行业标准,在拉索体系的设计、制造、检验、安装及维护过程中参照执行。

另外我们也关注到,上述两项国内标准也还仅仅是产品的技术要求,并且每个标准也仅仅针对一种拉索体系(如钢丝拉索、钢绞线拉索等),涵盖的内容比较单一。而国外的这些规范则包含了拉索体系的设计、制造、检验、安装及维护等要求,并且每个规范都将不同类型的拉索体系纳入其中,从而使整个规范更加全面而细致。

2 几个关键点的比较

对于拉索体系,其力学性能与防腐耐久性能是最为关键的因素,因此这些标准、规范中几乎都一致强调了一些重要的性能要求,如疲劳性

能、防水密封性能等。这些性能要求在不同的标准、规范中的参数指标有所区别,下面对它们进行一些比较分析。

2.1 拉索体系的疲劳性能

拉索体系的疲劳性能是考验拉索的使用安全及寿命的重要指标,是拉索体系必须考察的关键项目。这些标准、规范中对拉索试验试件的规格、长度、试验技术条件(如试验的应力上限、应力幅、200万次循环次数)及试验验收标准等都进行了具体的规定。不同的标准、规范要求如表1所示。

根据上表对比可见,我国GB/T 18365中对钢丝拉索体系的疲劳性能要求比国外其它标准、规范要求低些。首先其应力上限要求相对低些,为 $0.4f_{pk}$,其余则要求为 $0.45f_{pk}$ 。其次,GB/T 18365只要求轴向疲劳,而其它标准、规范除此之外均考虑了拉索的偏角要求。其三,对于200万次循环结束后,GB/T 18365要求拉索的断丝率小于5%,低于其它标准、规范要求的2%。再有,在循环加载结束并满足断丝率的情况下,GB/T 18365没有就试验索提出破断试验的要求,而其他标准规范提出拉索经疲劳试验后,还需通过破断试验,如锚固效率大于95%标准破断力或92%实际破断力,则试验结果才可判定合格。

另外GB/T 18365对于疲劳试验应力幅的要求只是规定了幅值的上、下限,没有固定的幅值,其它标准均设有固定幅值(如200MPa或140MPa),因此当钢丝的强度等级不同时,其疲

劳试验应力幅也不同,比如:1570MPa的钢丝拉索疲劳试验应力幅为188.4MPa、1670MPa的钢丝为200.4 MPa、1770MPa的钢丝为212.4 MPa。这是该标准与其它标准不同之处,在进行试验时要特别注意根据钢丝的强度来换算应力幅。

交通部标准JT/T 771中对钢绞线拉索体系的疲劳性能要求与fib规范并无较大区别。

国外三个规范比较相似,规范中不但对拉

索体系的整体疲劳性能提出了要求,同时还对作为拉索体系主受力筋(如钢丝、钢绞线、钢棒等)材料的设计、运用及单根疲劳性能做了相关规定,并对不同类型的主受力筋制定了相应的技术指标。表2为主受力筋的单根疲劳试验应力幅要求。

主受力筋通过与锚具等承载构件结合后成为拉索,由于夹具等结构因素通常会对主受力筋的

表1 拉索体系的疲劳性能要求

技术要求 标准 与规范	钢丝拉索	钢绞线拉索	钢棒拉索
GB/T 18365	应力上限 $0.4f_{pk}$; 应力下限 $0.28f_{pk}$; 应力幅为 $(0.4 \sim 0.28)f_{pk}$; 断丝率小于5%		
JT/T 771		应力上限 $0.45f_{pk}$; 应力幅为200MPa; 断丝率小于2%; 破断试验,锚固效率应大于95% 标准破断力或92%实际破断力	
fib	应力上限 $0.45f_{pk}$; 应力幅为200MPa; 锚具两端为10mrad的斜垫块形成折角; 断丝率小于2%; 破断试验,锚固效率应大于95% 标准破断力或92%实际破断力	应力上限 $0.45f_{pk}$; 应力幅为200MPa; 锚具两端为10mrad的斜垫块形成折角; 断丝率小于2%; 破断试验,锚固效率应大于95% 标准破断力或92%实际破断力	应力上限 $0.45f_{pk}$ 应力幅为110MPa 锚具两端为10mrad的斜垫块形成折角; 断丝率小于2% 破断试验,锚固效率应大于95% 标准破断力或92%实际破断力
PTI	应力上限 $0.45f_{pk}$; 应力幅为200MPa; 锚具两端为10mrad的斜垫块形成折角; 断丝率小于2%; 破断试验,锚固效率应大于95%标准破断力或92%实际破断力		
CIP	应力上限 $0.45f_{pk}$; 应力幅为200MPa; 锚具两端为10mrad的斜垫块形成折角; 断丝率小于2%; 破断试验,锚固效率应大于95%标准破断力或92%实际破断力		

注:表中 f_{pk} 为主受力筋的公称抗拉强度。国外规范使用符号有所不同,为了对比方便,统一按我国标准符号

表2 单根疲劳试验应力幅要求

指标 规范	主受力筋疲劳应力幅			备注
	钢丝	钢绞线	钢棒	
fib	370	300	180	应力上限为 $0.45f_{pk}$, 200万次循环后,没 有断裂情况
PTI	297	228	122	
CIP	300	300	无	

疲劳性能产生一些影响,会使其疲劳性能有所降低。因此结合这些干扰因素及试验经验,各标准、规范对拉索体系的疲劳试验应力幅要求进行规定,如表3所示。

表3 拉索体系疲劳试验应力幅要求

指标 规范	拉索疲劳应力幅			备注
	钢丝	钢绞线	钢棒	
fib	200	200	110	应力上限 $0.45 f_{pk}$, 两端锚具下加 10mrad 的斜垫块形成折角, 断丝率小于2%。 破断试验, 锚固效率应大于95%标准破断力或92%实际破断力。
PTI	194	159	105	
CIP	200	200	无	

表4 拉索的设计疲劳应力幅

指标 规范	疲劳应力幅			备注
	钢丝	钢绞线	钢棒	
fib	148	148	82	按拉索疲劳试验应力幅取1.35的安全系数 按拉索疲劳试验应力幅取35MPa的安全余量
PTI	159	124	70	

2.2 拉索体系的水密性

拉索体系的水密性试验主要是考验拉索体系过渡段的密封性能,防止拉索体系因梁端过渡段密封结构不可靠,而导致拉索防腐失效。各标准、规范对拉索水密性试验要求如表5所示,试验装置及程序如图1所示。

从表5对比可见,PTI规范对拉索的水密性试验过程是静态的。在水密性试验过程中,拉索试件处于无应力状态,时间也比较短,只有4天。但其对拉索试件要求不一样,要求拉索试件在做完疲劳试验后,再做水密性试验。

交通部标准JT/T 771是参照fib规范制定的,仅对试验循环水温作了改变,即由fib的 $20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 变更为 $16^{\circ}\text{C} \sim 56^{\circ}\text{C}$,其余要求均与fib相同。

CIP与fib两规范相比, fib除在试验水压方面的要求比CIP高之外,其余要求均比CIP低,从试验难度上来说,CIP要求更高。CIP规定试件倾斜 30° 的安装方式,更符合斜拉索的实际使用状态。

2.3 对防腐体系的描述与解读

拉索设计使用的许用应力幅极限是在拉索的试验应力幅的基础上,考虑了一定的安全系数后确定的,其对应不同主受力筋拉索的设计疲劳应力幅极限分别如表4所示。

2.3.1 PTI

4PTI规范的4.1.2条款中提到:防腐保护至少有两层完整的防护。防护层应满足:当外层防腐失效时,内层应能对主受力筋起到良好的保护作用。如果内层是物理保护,应能完全覆盖钢绞线外表面,并且在钢丝之间的空隙填满惰性材料。内防护层不允许自由水进入空隙内。

按照PTI的要求对其内部空隙需要用密封性混合物填充,填充物要能完全包裹钢绞线的外表面和填满钢丝之间的空隙。

2.3.2 CIP

CIP规范的9.1.1.2条款中提到:斜拉索主受力筋部分的保护至少是两层。

内防护层,直接保护主受力筋,必须覆盖索体的全部长度。

第二层保护(外防护层),由外层和中间过渡防护层组成。为了保护内防护层不被破坏,外层必须对自由段和锚固区具有良好的密封性。另外,中间过渡防护层的作用是阻止外部的水和气体通过外层进入内层。

表5 拉索水密性试验要求

	JT/T 771	PTI	fib	CIP
试件要求		包括锚具组件、过渡段及最少1m的自由长度。		
试件规格	无规定	破断荷载不小于7000kN		
试验要求	1. 试件置于不少于3m水头的染色溶液中； 2. 在常温下对拉索试件在 $0.2f_{pk}$ 至 $0.45f_{pk}$ 间循环加载10次，然后将轴向荷载稳定在 $0.3f_{pk}$ ； 3. 拉索试件轴向应力保持在 $0.3f_{pk}$ 的条件下，水温从 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间循环8个周期； 4. 试验过程中，分别选定低温和高温各两次，保持温度不变，对拉索试件进行横向偏转运动(偏转角度 $\pm 1.4^{\circ}$ ，位移约 $\pm 75\text{mm}$)	1. 拉索试件先按规范要求完成疲劳试验，试验合格的拉索试件进行水密性试验； 2. 试件置于不少于3m水头的染色溶液中浸泡96小时	1. 试件置于不少于3m水头的染色溶液中； 2. 在常温下对拉索试件在 $0.2f_{pk}$ 至 $0.45f_{pk}$ 间循环加载10次，然后将轴向荷载稳定在 $0.3f_{pk}$ ； 3. 拉索试件轴向应力保持在 $0.3f_{pk}$ 的条件下，水温从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间循环8个周期； 4. 试验过程中，分别选定低温和高温各两次，保持温度不变，对拉索试件进行横向偏转运动(偏转角度 $\pm 1.4^{\circ}$ ，位移约 $\pm 75\text{mm}$)	1. 在常温下安装拉索试件，在 $0.2f_{pk}$ 至 $0.5f_{pk}$ 间循环加载10次，然后将轴向荷载稳定在 $0.3f_{pk}$ ； 2. 向试验装置注入2m水头的染色水； 3. 拉索试件在室温静置一个星期； 4. 水温从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间循环8个周期，约3.5天一个周期； 5. 在温度循环过程中，分别选定低温和高温各两次，保持温度不变，对拉索试件进行横向偏转运动(偏转角度 $\pm 1.4^{\circ}$ ，位移约 $\pm 100\text{mm}$)。; 6. 拉索试件在室温静置一个星期
安装方式	垂直安装	无规定	垂直安装	倾斜 30° 安装
试验时间	8个周期，约8天	96小时	8个周期，约8天	约6个星期
偏转运动频率	不超过1Hz	无	不超过1Hz	约0.1Hz
验收标准	无染色水进入锚具及拉索内部			

注：GB/T 18365，标准对水密性试验没有要求，故在对比表中未列出

CIP的9.2.2.2条款进一步规定填充料必须是憎水性材料，具有良好的耐久性和稳定性，应能完全填充内部空隙。混凝土砂浆或硬树脂材料因容易发生开裂而不适用，可选用油脂或石蜡作为填充料。

2.3.3 fib

fib规范的4.3.3条款对防腐保护（等效体系）做了如下规定：

主受力筋表面的镀锌层或环氧涂层作为内保护层；

主受力筋与PE套或者HDPE管之间灌注油脂或石蜡作为过渡防护层；

主受力筋外的PE套，整束拉索外的HDPE管作为外防护层。

从上述三个规范所描述来看，要求在主受力筋的表面防腐至少有三层，只是PTI与CIP的描述

中将外层与中间过渡防护层结合成一起称为第二层，实际上与fib的要求是一样的，即由内防护层，过渡防护层与外防护层三层结合而成的。根据国内外大量工程应用实例证明，这样的防腐结构是合理的。

2.3.4 对新型材料的使用意见

对于拉索的主受力筋，规范中一般具体指示的有钢丝、钢绞线、钢棒三种，要求分别满足相关的标准，如ASTM421、ASTM416及ASTM722等。通常在这些标准的基础上还提出一些更为严格的要求，以适用于拉索所期望的功能。比如，更高的疲劳性能要求、One-pin、无焊接等要求。

然而对于新型材料，如环氧涂层钢绞线的使用，在PTI中对环氧钢绞线提出了详细的要求，其参考标准为ASTM882 对其质量控制、表面处

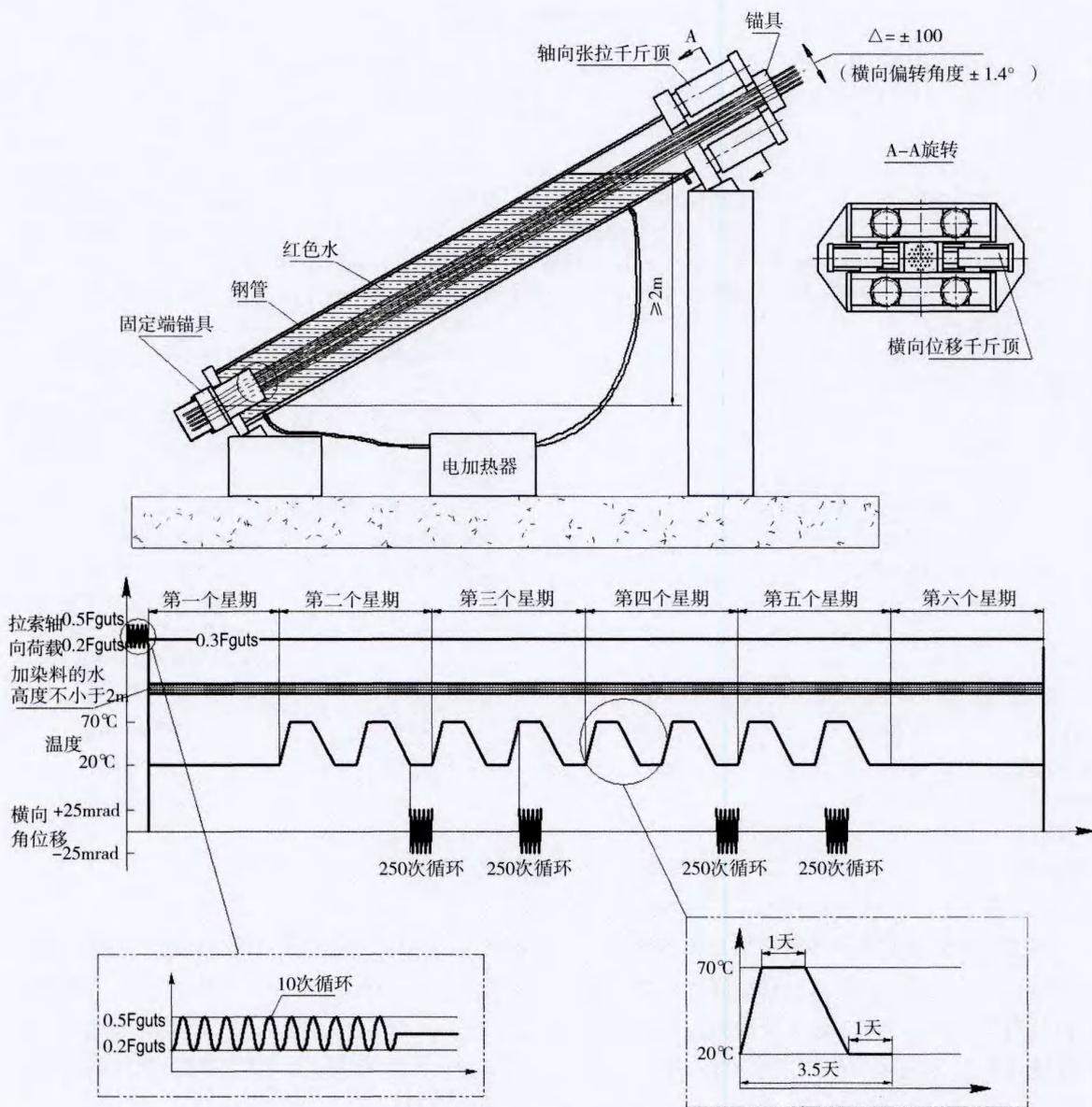


图1 水密性试验装置及程序示意图

理、涂层检测均有相应的规定。

而CIP中对环氧钢绞线的应用表示相对保守的观点。CIP规定：如果其他非金属防护系统的有效性没有得到持久的体现时，应优先考虑金属涂层。该规范认为：由于涂层的不连续和过早开裂将直接影响拉索系统的微动腐蚀和疲劳性能，因此环氧涂层的主受力筋没有获得理想的防腐效果，即使环氧涂层技术取得进一步的进展，这些产品似乎也不会太多运用于拉索体系中。

fib规定可采用镀锌防护（包含热镀锌层和喷

锌铝合金镀层）、环氧涂层防护或其他“等效体系”。但又指出一些已使用环氧涂层对主受力筋进行保护的项目还没有完全能证明环氧涂层的功效（据说，环氧涂层在低温下易脆裂），因此对使用环氧涂层的锚固张拉件应给予特别关注。fib建议当外部和中间层都已进行有效保护的基础上，可以尝试使用环氧涂层作为“等效体系”，运用于主受力筋的内层保护。

由于环氧钢绞线、环氧钢丝都是近年来开发的新材料，最初在日本的体外索上应用，再发展

到部分斜拉索（即矮塔斜拉索）上应用。从2003年开始，我国开发出来了单丝涂覆环氧钢绞线和环氧钢丝，并且与锚具具有很好的适配性，保证了拉索的力学性能。通过按fib所要求的等效体系进行过渡防护层及外层的保护后，其防腐性能得到了很好的保证，从而在大量工程中得到了推广应用。至今在斜拉桥拉索，拱桥吊杆、系杆及体外索的应用工程已有上百座。同时制定了相应的国家标准GB/T 25823《单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线》和GB/T 25835《缆索用环氧涂层钢丝》。

可见在CIP（2002年）及fib（2005年）在制定拉索规范时，这项环氧涂层钢绞线、钢丝的技术尚未完善，因此在标准内容中就此材料的应用表示谨慎的观点，是可以理解的。从PTI（2007年）来看，这些材料已得认可。因此当再次制定或修订拉索标准时，笔者认为应将环氧涂层钢绞线、钢丝应该纳入到拉索体系的材料中，以便于推广使用。另外，对于标准、规范的编写应该具有开放性与适应性，不应约束新技术的应用与发展。

3 对于执行标准的一些看法

对于执行拉索的标准时，拉索的供应商经常为了满足不同的标准而进行相应的试验认证，上述所提的疲劳试验及水密性试验均是投入费用巨大（数十万元一项），耗时长久（一般为一个多月的时间）的试验。由于缺乏大量的试验基础积累的可能性，试验的成功与否难以估计，因此对于供应商来说，除非是产品开发所需，通常不会投入太多费用在这些试验上的。目前在全世界被认可的试验室进行以上试验仍有一些条件约束，比如试验机的动力，如果疲劳试验吨位要大于1000吨的话，只有美国与德国的两个试验室可以做。对于动态水密性试验，国内的试验机构还没有试验装置。有时当试验室试验量多时还需预约等待，并不是想做就可以安排的。因此对于这样的试验要求，如果拉索各个标准要求不一致，供

应商就得按不同的标准进行试验，投入的费用确实非常高昂，因此建议编制标准的部门在这些性能要求上各个标准应该相互统一，以免造成过多的投入；对于供应商则建议在选取试验方案时尽可能按照这些标准中最高的指标来进行试验，以便试验结果可以覆盖所有的标准；对于产品验收方面则应该按要求的试验内容来进行验收，而不是仅仅按试验报告中的标准号对号入座地验收。

4 总结

从以上所列的标准或规范来看，由于我国的拉索体系标准只是针对产品而制定的，拉索体系的全面系统性是不足的，特别是没有设计、振动控制与施工维护的要求，因此国外的规范就具有更多的参考性。

通过对疲劳试验及水密性试验的比较，发现国内的标准比国外规范要求偏低，这可能是出于对国内产品的质量水平与试验机构的能力所限而综合考虑的。由于目前技术的发展，并且国内的厂家到国外的试验室进行试验也是可以做到的，因此可以考虑在试验指标上与国外规范接轨，并且尽可能统一。

通过相关标准规范比较，并结合多年来对拉索体系在设计与应用中的一些经验，笔者认为所有现行标准的制定均是力求合理的，但是要作到完美也是困难的，在此期待结合材料技术的发展、设计、生产制造、检验、施工及服务的要求不断地提高与完善。

参考文献

- [1] Recommendations for Stay Cable Design, testing and installation [S]. Post-tensioning institute(PTI) fifth edition, 2007
- [2] fib bulletin 30, acceptance of stay cable systems using prestressing steels[S]. International Federation for Structural Concrete, 2005.
- [3] Cable Stays - Recommendations of French interministerial commission on Prestressing[S]. SETRA, France, June 2002.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. JT/T 771-2009. 无粘结钢绞线斜拉索技术条件[S].
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18365-2001. 斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件[S].