

超大孔位钢绞线斜拉索疲劳试验研究

闫云友 宋强 黄芳玮 庞维林 谢典峰 唐彰丽 关炳良
(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

摘要:为了适应现代大跨度桥梁高承载能力的现实与需求,斜拉索必须实现向超大孔位的跨越。欧维姆公司一直致力于钢绞线斜拉索体系的研究,以国际规范为设计依据,根据规范及工程设计需求,进行了超大孔位拉索组件疲劳试验研究, OVM250超大孔位斜拉索体系疲劳试验应力幅满足并超过国际规范要求,试验结果表明, OVM250超大孔位斜拉索的疲劳性能达到国际先进水平。

关键词: OVM250 超大孔位拉索 国际规范 疲劳试验

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2015.04.004

1 前言

经济的快速发展,带来交通量的日益增加,对道路和桥梁的承载能力提出了更高要求,随着现代桥梁设计手段及施工技术的发展,以及加工能力的提高,高承载能力的桥梁设计也在不断地推陈出新,单根拉索的承载能力也在不断地刷新记录。在超大吨位承载能力的斜拉桥设计中,钢绞线斜拉索因产品加工、运输、安装等方面的优势,受到业界关注。

如何提升并确保大吨位拉索的性能,有多个关键课题需要进行研究,本文主要研究拉索力学性能中的关键一项——疲劳性能。疲劳性能的研究,必须先要了解桥梁结构对拉索的要求,找出影响疲劳性能的因素。笔者针对这些因素,结合设计规范与试验标准,制定了超大孔位拉索体系试验研究方案,并进行试验。

2 桥梁结构对拉索疲劳性能的要求

钢绞线斜拉索体系的疲劳性能决定着桥梁的安全及寿命,与公路斜拉桥相比,铁路斜拉桥和公铁两用斜拉桥所承受的荷载更大,活载占总荷载的比例大,列车通过时的巨大重复荷载对拉索产生较大的冲击作用,为了满足以上特点,拉索

的规格相应加大的同时,对拉索的抗疲劳性能也提出了更高的要求,在公铁两用斜拉桥设计中,已把斜拉索疲劳试验的应力幅提高至250MPa。

3 国际规范对钢绞线斜拉索疲劳性能的要求

国内外相应的技术规范,分别对拉索体系的疲劳性能提出了具体要求,其中最具权威性的是国际规范 fib Bulletin 30 “Acceptance of stay cable system using prestressing steels(2005)”、PTI “Recommendations for stay cable design, testing and installation(2007)”以及CIP “Cable stays, Recommendations of French interministerial commission on prestressing (June 2002)” (以下依次简称为fib (2005)、PTI (2007)以及CIP (2002))。本课题以这三大国际规范为研究依据,分析关于疲劳性能要求中的相互关系与差异点,表1和表2列示了各规范对钢绞线母材及拉索系统的疲劳试验要求。

表1 各规范对钢绞线母材疲劳试验应力幅要求

规范	试验条件		
	PTI (2007)	fib (2005)	CIP (2002)
应力上限为0.45 f_{pk} , 200万次循环后, 不出现断裂情况	228MPa	300MPa	300MPa

表2 规范对钢绞线拉索体系的疲劳试验要求

		PTI (2007)	fib (2005)	CIP (2002)
试验参数	应力上限	0.45 f_{pk}	0.45 f_{pk}	0.45 f_{pk}
	应力幅值	159MPa	200MPa	200MPa
	循环次数	200万次	200万次	200万次

(续下表)

(接上表)

表2 规范对钢绞线拉索体系的疲劳试验要求

拉索偏转角 度要求及实 现方式	偏转角范围10mrad, 在锚具 下面垫斜垫板	偏转角范围10mrad, 在锚具下 面垫斜垫板	偏转角范围10mrad, 在拉索 试件中间加偏转荷载, 或在 锚具下垫斜垫板
拉索试件 规格要求	疲劳试验至少在三个有代表 性试件上进行, 三个拉索试 件代表所有拉索中最大、最 小和中间值三种情况。	疲劳试验至少在三个有代表 性试件上进行, 三个拉索试 件代表所有拉索中最大、最 小和中间值三种情况, 并要 求至少做一个大尺寸的、最 高等级或最大加载能力的试 件(依试验机能力确定)。	拉索试件所有锥孔都应用 上, 拉索试件破断力应大于 7000kN; 确定拉索试件规格 n' 的计算公式: 当 $27 < n < 219$ 时, $n' = 27 + (n - 27) / 3$ 当 $n > 219$ 时, $n' = 91$ 式中 n 为设计最大拉索钢绞线 根数。
疲劳试验频率要求	无明确要求	$\leq 8\text{Hz}$	$\leq 10\text{Hz}$
疲劳试验断丝要求	钢丝断丝数不超过2%; 钢 丝数小于125时, 断丝不超 过3根	钢丝数小于100时, 断丝允许 2根; 钢丝数大于等于100 时, 允许断丝2%	断丝数不超过2%
疲劳后静载 试验要求	最大力 延伸率	不小于拉索公称破断力的95%, 或拉索实际最大破断力的92% (取两者中的大值)	
对拉索锚具组件要求	延伸率	无明确要求	$\geq 1.5\%$
		1. 疲劳试验过程中, 拉索锚具组件的任何零件及连接不能失效; 2. 静载试验达到最大破断荷载, 锚具不能出现裂纹, 夹片除外。	

4 超大孔位拉索锚具组件疲劳试验研究

在公路斜拉桥应用过程中, 根据桥梁设计及规范要求, OVM250钢绞线拉索在研制过程中结合工程实际, 进行了大量的中小规格拉索的疲劳试验, 积累了一些经验。针对超大孔位、高疲劳应力幅要求的疲劳试验, 因进行拉索疲劳试验的试验机的长度是有限的, 与中小孔位拉索相比, 对拉索锚固单元的可靠性提出了更高的要求, 在超大孔位拉索的疲劳试验中, 钢绞线母材缺陷的离散性、弯曲应力、微动磨损、钢绞线受力不均匀性等对疲劳试验结果的影响也会更大。

4.1 锚固单元疲劳性能研究

OVM250拉索锚具的锚固单元在研制过程中, 采用可靠性设计与有限元分析相结合的方法, 结合大量的试验进行结构设计与优化, 消除应力集中及微动磨损对疲劳性能的不利影响。

在拉索组件疲劳试验之前, 都会随机抽取

与拉索系统锚固单元相同的单孔工作锚板、夹片作为钢绞线母材疲劳试验的夹具, 在有资质的实验室进行钢绞线母材疲劳试验, 在应力上限为 $0.45f_{pk}$, 应力幅值300MPa条件下, 经200万次循环加载, 钢绞线母材不出现断丝, 疲劳试验后再作静载试验, 锚固效率系数大于95%, 试验后试件完好。

4.2 超大孔位拉索组件疲劳试验研究

为了验证超大孔位拉索疲劳性能, 欧维姆公司决定严格按fib (2005) 规范, 选择109孔拉索在美国CTL实验室进行疲劳试验(疲劳试验条件如表3), 经过充分准备, 试验顺利完成。

针对铜陵长江公铁两用斜拉桥把拉索应力幅提高至250MPa的设计要求, 项目组选取该桥原设计规格中的139孔拉索开展疲劳试验研究, 并于2012年在美国CTL实验室按fib2005和CIP2002的要求进行试验, 该试验应力幅值高达250MPa, 是世界范围内迄今为止钢绞线斜拉索体系中规格最大、疲劳应力幅值最高的。

在超大孔位拉索疲劳试验过程中,课题组对拉索试件安装的每一道工序都进行数据记录,在疲劳试验开始后的一个星期里,每天对每一副夹片的外露量进行测量并记录,疲劳试验完成,对夹片和绞线进行编号,拆出后对钢绞线断口、位置及夹片的状态进行拍照记录,对记录数据进行分析,找出影响拉索疲劳试验结果的主要因素,为产品设计积累数据。

4.2.1 影响疲劳试验结果的主要因素

影响疲劳试验结果的因素很多,除了拉索锚具产品的可靠性以外,钢绞线母材也是决定疲劳试验结果的重要因素。在结合工程的疲劳试验中,钢绞线是在工程应用的钢绞线中随机抽取

表3 OVM250超大孔位拉索组件疲劳试验统计表

序号	规格型号	钢绞线直径 (mm)	应力上限	应力幅值 (MPa)	依据规范	试验时间
1	OVM250-109	$\phi 15.7$	$0.45 \sigma_b$	200	fib(2005)	2011
2	OVM250-139	$\phi 15.24$	$0.45 \sigma_b$	250	fib(2005)	2012

表4 CTL疲劳试验设备参数

动载能力	试验索长范围	液压千斤顶外径	静载能力	张拉最大行程	液压活塞面积
16MN	5.0m-8.0m	$\phi 1.2m$	42.7MN	254mm	$0.774m^2$

4.2.2.2 拉索组件安装

根据试验规范要求,在两端拉索锚具与试验台座之间需增加10mrad的斜垫板,调整好两端锚具位置后,采用锁紧装置固定到试验台座上。在拉索试件钢绞线依次安装并均匀预紧张拉完成后,将拉索试件钢绞线收紧,并在中部安装两个索箍,两索箍之间距离不小于500mm,拉索试件安装如图1。

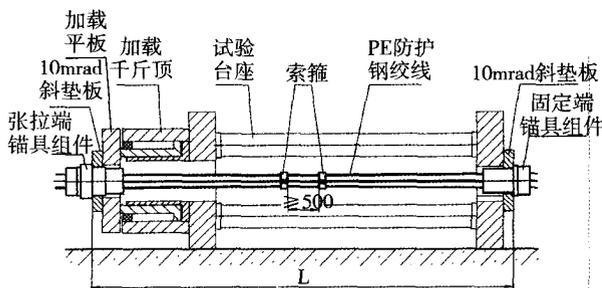


图1 拉索组件疲劳试验安装示意图

4.2.2.3 疲劳试验母材性能

在疲劳试验之前,需对用于试验的钢绞线母材进行检验:

的,因此,一定要选择钢绞线质量可靠的生产厂家作为材料供应商,在供应商提供质保书的情况下,还要抽取样品送往有资质的实验室进行母材试验。

拉索的安装也是影响疲劳试验的一个重要因素,为了积累经验,在疲劳试验之前,会用一组与疲劳试验相同的拉索锚具,严格按疲劳试验安装程序进行安装,完成静载试验。

4.2.2 拉索组件疲劳试验

4.2.2.1 疲劳试验设备参数

两种规格的超大孔位拉索组件疲劳试验均在美国CTL实验室卧式疲劳试验机上进行,试验设备参数如表4。

(1) OVM250-109拉索组件疲劳试验采用直径为 $\phi 15.7mm$ 、抗拉强度1860MPa的镀锌钢绞线,检测数据如表5。

(2) OVM250-139拉索组件疲劳试验采用直径为 $\phi 15.24mm$ 、抗拉强度1860MPa的镀锌钢绞线,检测数据如表6。

表5 OVM250-109试验用钢绞线母材性能

项目	标准值	实测值		
		#1	#2	#3
屈服荷载 $F_{0.1}$ (kN)	≥ 248	253.5	257.1	253.5
破断力 F_b (kN)	≥ 279	283.8	283.8	284.7
抗拉强度 (MPa)	≥ 1860	1892	1892	1898
延伸率 δ (%)	≥ 3.5	5.5	5.0	5.5

表6 OVM250-139试验用钢绞线母材性能

项目	标准值	实测值		
		#1	#2	#3
屈服荷载 $F_{0.1}$ (kN)	≥ 234.6	243.3	243.0	244.1
破断力 F_b (kN)	≥ 260.7	268.2	268.4	268.0
抗拉强度 (MPa)	≥ 1860	1920	1920	1910
延伸率 δ (%)	≥ 3.5	6.0	6.0	6.0

4.2.2.4 疲劳试验及数据采集

在疲劳试验中,在张拉端选取试样中的三根钢绞线(中间两根,外层一根)及一副夹片,通过4个LVDT位移传感器适时监测钢绞线中心丝、边丝及夹片的内缩量,同时在两端锚具端面安装加速度传感器,组成断丝信号采集系统,传感器安装分别如图2和图3。

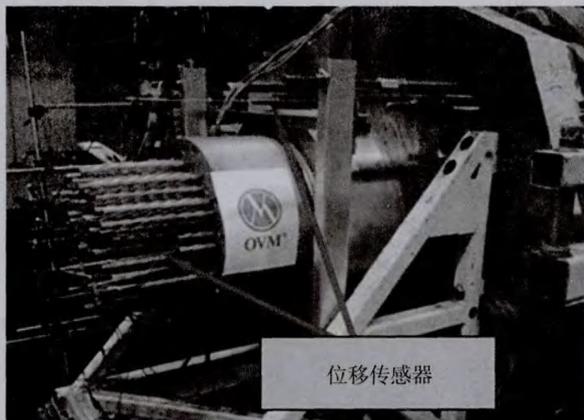


图2 张拉端位移传感器安装图
(OVM250-139试验照片)



图3 固定端加速度传感器安装图
(OVM250-139试验照片)

在试验过程中,拉索试件的各项试验数据,包括传感器信号及活塞伸长等,都通过数据采集系统进行纪录并储存于DAQ计算机工作站。当发生断丝时,安装在锚板端面的加速度传感器所收到的脉冲信号就会大于预设的临界值,断丝采集系统就会被触发,DAQ工作站就会纪录下因断丝产生的数据波形(如图4)。

4.2.2.5 试验数据及结果

OVM250超大孔位钢绞线拉索试验过程中,根据试验数据采集系统记录到的信号及疲劳试验

后静载试验结束,对拉索试件拆分检查,拉索疲劳断丝数均小于拉索试件总数的2%,满足规范要求,其中OVM250-139拉索组件疲劳试验应力幅从规范要求的200MPa提高到250MPa,高于规范要求,疲劳试验及疲劳试验后的静载试验数据及结果如表7和表8。

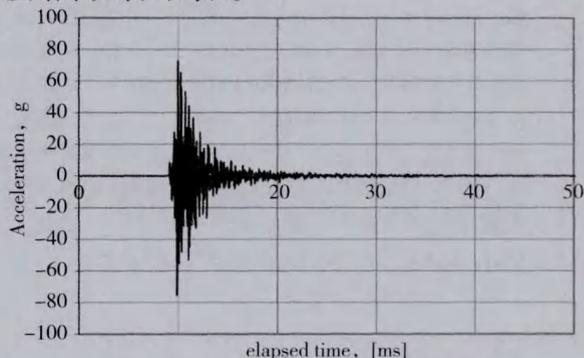


图4 拉索疲劳试验过程中采集到的钢绞线断丝信号(其中一个)

表7 疲劳试验数据及结果

项目	单位	OVM250-109	OVM250-139
钢绞线公称直径	mm	15.7	15.24
钢绞线(钢丝)根数	根	109(763)	139(973)
拉索公称破断力(F _b)	kN	30411	36237.3
上限荷载(45%F _b)	kN	13685	16306.8
应力幅值	MPa	200	250
循环次数	次	2 × 10 ⁶	2 × 10 ⁶
试验频率	Hz	1.1	0.4-0.75
允许断丝数(钢丝总数的2%)	根	15	19
实际断丝数	根	1	17
结论		通过	通过

表8 疲劳试验后的静载试验数据及结果

项目	单位	OVM250-109	OVM250-139
试验需达到最大荷载(95%F _b)	kN	28890.5	34425.4
试验实际达到的最大荷载	kN	28900	34436.9
达到最大荷载时的伸长量	mm	123.1	142.2
拉索试件长度L ⁰ (垫板间长度)	mm	7785	7735
达到最大荷载时的伸长率	-	1.58%	1.83%
试验后,拉索试件失效情况	-	无	无
结论		通过	通过

注:(1)长度L如图1所示。

5 工程应用

在OVM250钢绞线斜拉索不断发展的近二十年里,欧维姆公司也见证了斜拉桥技术的不断突破。在参与建设斜拉桥工程中,应用超大孔位拉索的桥梁已经有四座。(下转第30页)

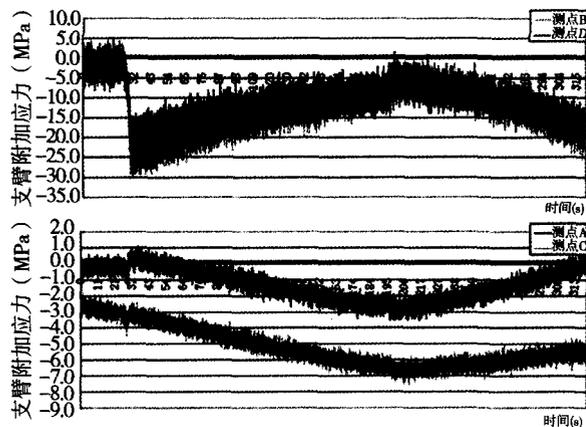


图6 闸门右支臂测点启闭过程应力曲线

6 结论

无线传感器网络技术是涉及传感器技术、无线网络技术、微机电系统技术以及数据处理技术等诸多技术领域的一门交叉学科。基于该技术所研制的无线测试系统解决了传统有线数据采集系统在工程应用方面所面临诸多问题。而同步采集技术是无线传感器网络最关键的技术之一。本文

(上接第25页)

(1) 天津赤峰桥

天津赤峰桥主桥横跨130多米,引桥为互通式立交桥。赤峰桥主塔倾斜达63度、高64.923米,建成后的赤峰桥从外形上看如同一艘巨轮,主塔犹如扬起的风帆,被誉为“海河之舟”。最大斜拉索由127根钢绞线组成。

(2) 绵阳会客厅一号桥

绵阳会客厅一号桥是造型独特的一座双塔双层斜拉桥,上层为人行观景步行桥,下层为双向六车道车行桥。该桥全长约1400m,主桥桥长400m,主塔外形似白鹭,全高98m,桥宽28m,双向六车道,最大斜拉索由109根钢绞线组成。

(3) 铜陵长江公铁两用大桥

铜陵长江公铁两用大桥主桥全长1290m,主跨630m,为双塔五跨钢桁梁斜拉桥。该桥上层为设计时速100公里的双向六车道高速公路,下层为设计时速250公里的合福铁路双线和160公里和合庐铜铁路双线,共四条铁路。最大斜拉索由127根钢绞线组成。

(4) 坦桑尼亚KIGAMBONI桥

在基于传统无线传感器网络技术基础上研制了一种双核应变应力采集装置,该装置从硬件技术架构上解决了无线应变采集系统的时间同步问题,是无线传感器网络同步技术的一次革新。同时,本文研制的无线应变测试系统在实际工程中得到应用,结果显示,本系统稳定、可靠,测量精度及时间同步精度极高。

参考文献

- [1] 孙利民,李建中. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [2] 陈得民. 应变传感器的稳定性[M]. 上海计量测试, 2012, 03: 20-22.
- [3] 陈得民, 罗银生, 张俊辉等. 一种应变式无线传感器: CN 102628717 A[P]. 2012.08.08.
- [4] 陈得民, 杨绍普. 一种无线双核数据采集装置及采集方法: 中国, 104298160A[P]. 2015-01-21.
- [5] 陈得民, 张一辉, 李淑娟等. 基于WSNs的吊机应力监测系统机械工程与自动化[J]. 2012,02:28-30.
- [6] 陈得民, 沈唯真, 代啸宁. 一种无线闸门设备状态监测装置: CN 203642964 U[P]. 2014.06.11.

坦桑尼亚KIGAMBONI桥为双塔单索面混凝土斜拉桥,主跨200m。最大斜拉索由160根钢绞线组成。

6 小结

OVM250超大孔位钢绞线拉索疲劳试验的成功,充分证明了OVM250钢绞线拉索体系优异的安全可靠性,其中OVM250-139拉索组件疲劳试验的应力幅值高达250MPa,高于国际规范要求,这标志着OVM250钢绞线拉索体系的达到国际先进水平,为斜拉桥超大孔位斜拉索设计与应用提供强有力的技术保障。

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] 闫云友等. OVM250钢绞线斜拉索锚固系统可靠性研究[C]. 第十六届全国混凝土及预应力混凝土学术会议暨第十二届预应力学术交流会. 论文集, 2013年