

# OVM250钢绞线斜拉索锚固系统可靠性研究

闫云友 庞维林 唐燕华 黄永玖 植磊 谢典峰

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545005)

**摘要:**随着现代大跨度斜拉桥的发展,钢绞线斜拉索采用现场制索,具有无需大型制索、运输、吊装和张拉牵引设备、拉索的整体防护性能优越等优势,已越来越受到设计者的青睐。钢绞线斜拉索作为斜拉桥的承重构件,堪称斜拉桥的生命索,其可靠性是决定斜拉桥安全可靠的关键因素之一。

文章主要介绍了OVM250钢绞线斜拉索体系设计改进过程中对拉索锚固系统的可靠性研究,通过有效提高拉索锚具组件的疲劳性能的设计手段,对拉索锚固单元进行优化设计,保证拉索锚具组件的安全可靠,通过OVM250-139拉索锚具组件的疲劳试验,进一步验证了OVM250钢绞线拉索体系优异的抗疲劳性能。

**关键词:**OVM250 钢绞线斜拉索 可靠性 疲劳试验 高应力幅

## 1 前言

我国从上世纪70年代开始修建第一座斜拉桥以来,斜拉桥建设经过二十多年的发展,到了上世纪90年代进入了一个成熟期。但近年来有关桥梁的安全事故时有发生,桥梁的可靠性也成为人们关注的焦点。

在斜拉桥整个工程造价中,斜拉索的造价只占其中的一小部分,但斜拉索作为斜拉桥的主要承力构件,是整个桥梁结构的生命索。因此,斜拉索体系的可靠性直接关系到斜拉桥的安全与使用寿命。

OVM公司从上世纪九十年代开始,致力于钢绞线斜拉索体系的研制、开发、生产与施工,OVM250钢绞线斜拉索体系从1997年第一次应用于汕头口石大桥,到2012年中标合福铁路铜陵长江大桥斜拉索,拉索组件疲劳试验也完成了从最初有粘结型的19孔和43孔、应力幅200MPa,提升到无粘结型的139孔、应力幅250MPa的成功蜕变。

## 2 规范对钢绞线斜拉索锚固系统的技术性能要求

### 2.1 静载性能

拉索锚具组件静载锚固性能应满足以下要求:

锚固效率系数:  $\eta_a \geq 95\%$ ,

延伸率:  $\epsilon_{apu} \geq 2\%$ 。

### 2.2 低应力锚固性能

拉索锚具组件在应力状态下锚固性能可靠,能保证在钢绞线所受应力低至 $5\%f_{pk}$ 状态下,夹片不滑丝、不松脱。

### 2.3 抗疲劳性能

拉索锚具组件的抗疲劳性能满足以下要求:

在应力上限为 $0.45f_{pk}$ ,应力幅200(250)MPa,偏转角度 $10\text{mrad}$ ( $0.6^\circ$ )条件下进行疲劳试验,经过200万次循环加载,断丝率不大于2%。同一试件在疲劳试验后进行静强度拉伸试验,拉索破断力大于拉索实际最大破断力的92%或标准破断力的95%(取两者中的大值)。

## 3 OVM250拉索锚具可靠性研究

### 3.1 提高拉索锚具可靠性措施

OVM250拉索锚具的锚固关键件——工作夹片,在很好地满足标准所要求的静载锚固性能、低应力锚固性能要求的同时,还具有卓越抗疲劳性能。在OVM250拉索锚具可靠性研究方面,主要通过以下措施实现:

#### 3.1.1 采用先进的设计方法进行优化设计

OVM250拉索锚具设计过程中,采用可靠性设计(OVM250拉索锚固单元受力原理如图1)与有限元分析(锚板有限元分析结果如图2)相结合的方式,结合大量的试验进行结构与优化。

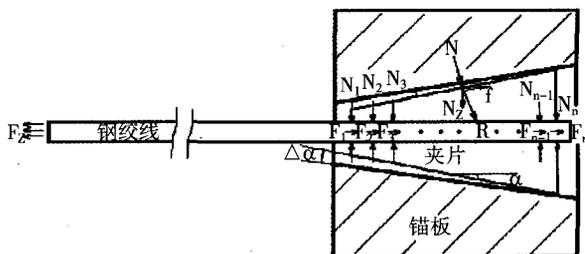
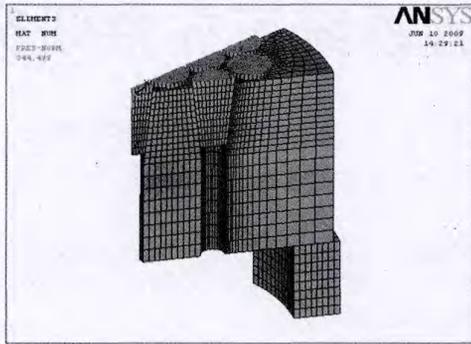
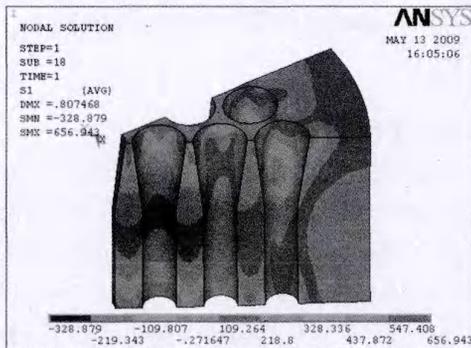


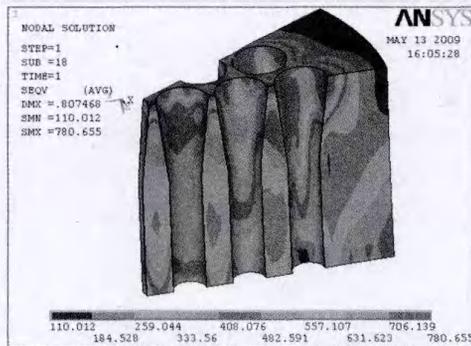
图1 OVM250拉索锚固单元受力原理图



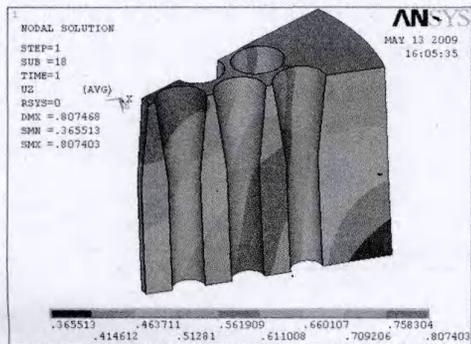
a) 结构划分网格



b) 锚板第一主应力云图



c) 锚板mises应力云图



d) 锚板沿轴向变形云图

图2 OVM250-37拉索锚具锚板有限元分析

OVM250夹片全长分布的咬合应力均匀, 与锚孔之间的锥度配合精确, 不会因咬合应力增大而产生的“切口效应”, 消除应力集中对疲劳性能的影响, 用OVM250工作夹片作为钢绞线母材试验的夹具, 在应力上限为 $0.45f_{ptk}$ , 应力幅300MPa条件下, 经200万次循环加载, 钢绞线母材不出现断丝, 疲劳试验后再作静拉伸试验, 锚固效率系数大于95%, 试验后, 工作夹片完好。

### 3.1.2 通过热处理工艺调节夹片金相组织

OVM250工作夹片采用碳氮共渗的热处理工艺, 热处理设备为计算机控制全自动多用炉, 保证夹片渗层深度和硬度, 使夹片金相组织结构(如图3)最优, 保证夹片心部有韧性的同时, 夹片锥面及齿部足够坚硬以确保能咬入钢绞线母材本体, 保证锚固性能可靠。

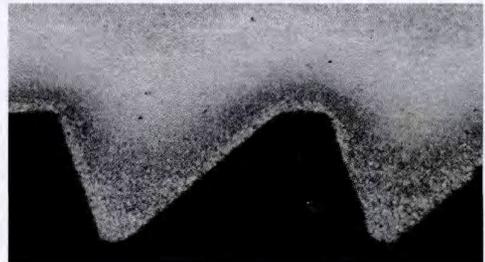


图3 工作夹片碳氮共渗金相结构图

### 3.1.3 优化锚具细部结构设计, 有效降低钢绞线接触应力和弯曲应力

OVM250拉索锚具在设计中充分考虑了接触应力对拉索抗疲劳性能的影响, 拉索钢绞线除了在夹片锚固部位(图4A处)为钢与钢的接触外, 其余部位(图4B、C处)均设计为与非金属接触, 降低拉索因在动载荷作用下钢绞线与锚具间“硬碰硬”的磨擦而产生过大的接触应力。

为了防止因预埋管安装误差, 导致组成拉索索体的钢绞线在拉索锚具出口部位(图4D处)产生过大的弯曲应力, 在此处设计有圆弧面导向, 有效降低拉索钢绞线的弯曲应力。

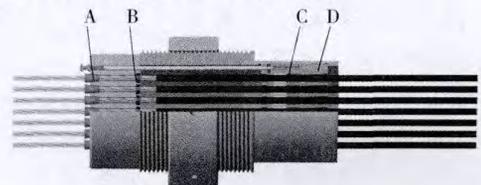


图4 拉索锚具组装图

### 3.2 OVM250拉索锚具材料及制造工艺要求

#### 3.2.1 材料要求

(1) OVM250拉索产品所使用的原材料进厂时均附有机械性能和化学成分合格证明书、质量保证书,材料进厂后还须进行相应的验收试验。

(2) OVM250钢绞线拉索锚具组件中的主要零件:锚板(包括张拉端锚板和固定端锚板,下同)、螺母、支承筒均采用优质合金结构钢40Cr材料符合GB/T3077-1999的规定,毛坯采用锻件符合JB/T 5000.8的有关规定。

(3) 夹片选用合金结构钢20CrMnTi,并符合GB/T3077-1999中的相关要求。

#### 3.2.2 制造工艺要求

(1) 零件机械加工符合JB/T 5000.9的有关规定。零件毛坯的锻造符合JB/T 5000.8的有关规定。零件热处理符合GB/T 16924的有关规定。

(2) 锚具的梯形螺纹符合GB/T 5796.1~5796.4的规定,螺纹的极限尺寸符合GB/T 8124的规定,螺纹采用专用螺纹量规进行检验,保证同种规格的拉索锚具配合螺纹具有互换性。

(3) 锚板、螺母、支承筒等主要受力件,在加工过程中要求进行超声波探伤。超声波探伤方法及评定标准符合GB/T 4162-2008表4中的B级或GB/T 6402-2008表4中直探头4级的规定。成品表面要求进行磁粉探伤。磁粉探伤方法及评定标准符合JB/T 4730.4-2005中第9章规定的Ⅱ级。

(4) 锚板、螺母、支承筒、工作夹片在热处理后均进行硬度测试,硬度检验按GB/T 230.1、GB/T 231.1的规定进行。

(5) 同一规格锚具的同类部件具有互换性。

### 3.3 OVM250拉索锚具组件疲劳性能研究

斜拉索作为斜拉桥主要承重构件,拉索的疲劳性能是决定拉索使用寿命的关键因素之一。在OVM250拉索体系研制、改进及应用过程中,结合研制及工程需要,做了大量的疲劳试验,充分验证了OVM250拉索锚具组件的抗疲劳性能。

#### 3.3.1 OVM250拉索组件疲劳试验统计

OVM公司从2006年以来,先后委托瑞士EMPA、美国CTL及中国重庆等有资质的实验室按PTI、fib、CIP等规范及JT/T771标准对OVM250拉索锚具进行疲劳试验,其中,2012年在美国CTL实验室进行的OVM250-139拉索锚具疲劳试验,是世界范围内迄今为止钢绞线斜拉索体系中规格最大、疲劳应力幅最高的(OVM250拉索组件国外疲劳试验统计如表1)。

#### 3.3.2 OVM250-139疲劳试验

随着大跨度斜拉桥的发展及桥梁设计荷载等级的提高,钢绞线斜拉索规格也在不断加大,在OVM公司参与斜拉索产品制作及拉索安装施工的工程中,OVM250拉索体系最初应用于汕头石大桥时,拉索最大规格为43孔,在2009年应用在天津赤峰桥时,拉索最大规格已达到127孔,合福铁路安徽铜陵桥在最初的方案设计时,拉索最大规格为143孔,最终设计为127孔。铜陵桥为国内首座采用钢绞线斜拉索的公铁两用桥,对拉索的要求更高,桥梁运营阶段,拉索的动载荷相对单纯的公路及铁路大桥更大,为了满足公铁两用桥梁的动载荷大的特点,OVM公司适时跟进,对OVM250拉索体系开展大规格、高应力幅的疲劳试验研究,于2011年11月9日至2012年1月6日,在美国CTL实验室参照fib2005规范要求,并将应力幅从规范要求的200MPa提高至250MPa,进行了OVM250-139拉索组件疲劳试验。

表1 OVM250拉索组件国外疲劳试验统计表

序号	规格型号	钢绞线直径(mm)	应力上限	应力幅(MPa)	依据规范	实验室	试验时间
1	OVM250-31	15.24	0.45 $f_{pk}$	200	PTI	美国CTL	2006
2	OVM250-55	15.24	0.45 $f_{pk}$	200	fib、CIP	美国CTL	2009
3	OVM250-43	15.24	0.45 $f_{pk}$	200	PTI	美国CTL	2010
4	OVM250-37	15.24	0.45 $f_{pk}$	200	fib、CIP	美国CTL	2011
5	OVM250-109	15.7	0.45 $f_{pk}$	200	fib、CIP	美国CTL	2011
6	OVM250-139	15.24	0.45 $f_{pk}$	250	fib	美国CTL	2012

### 3.3.2.1 疲劳试验钢绞线母材性能

OVM250-139拉索组件疲劳试验采用直径为 $\phi 15.24\text{mm}$ 、抗拉强度1860MPa的镀锌钢绞线,由国家建筑工程质量监督检验中心对母材性能进行检测(检测数据见表2)。

### 3.3.2.2 疲劳试验设备参数

OVM250-139拉索组件疲劳试验采用CLT实验室卧式试验台座(拉索组件安装见图5,试验

设备参数见表3)。

### 3.3.2.3 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垫板之间需增加0.6度的楔形垫板,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139根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(拉索试件安装见图5)。

表2 钢绞线母材检测数据

项目	标准值	实测值		
		CL1-2011-1978-1	CL1-2011-1978-2	CL1-2011-1978-3
1%伸长时最小荷载 $F_1$ (kN)	$\geq 234.6$	243.3	243.0	244.1
破断力 $F_b$ (kN)	$\geq 260.7$	268.2	268.4	268.0
抗拉强度 (MPa)	$\geq 1860$	1920	1920	1910
延伸率 $\delta$ (%)	$\geq 3.5$	6.0	6.0	6.0
弹性模量 $E$ (MPa)	—	$1.96 \times 10^5$	$1.95 \times 10^5$	$1.95 \times 10^5$

表3 CTL疲劳试验设备参数

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

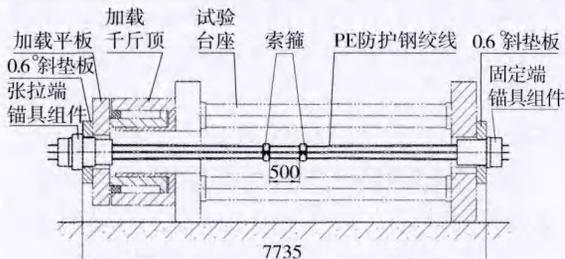


图5 OVM250-139拉索组件疲劳试验安装示意图

### 3.3.2.4 疲劳试验及数据采集

(1) 在疲劳试验及静拉伸试验中,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及夹片的内缩量(传感器安装如图6)。

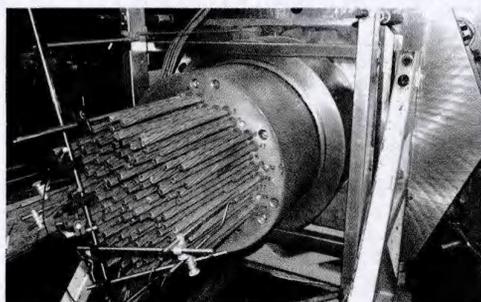


图6 LVDT位移传感器安装图

(2) 疲劳试验过程中,拉索钢绞线断丝通过安装在拉索试件上的由两个加速度传感器组成

的断丝采集系统进行采集,断丝采集用加速度传感器安装(如图7)。

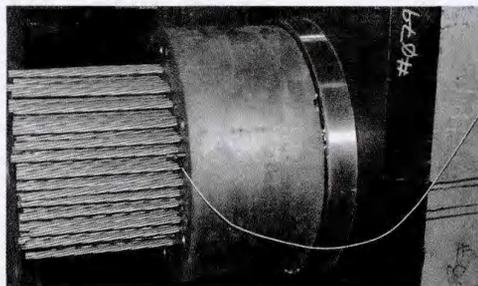


图7 钢绞线断丝采集加速度传感器安装图

(3) 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8)。

### 3.3.2.5 试验数据及结果

OVM250-139拉索组件疲劳试验于2011年11月9日至2012年1月6日在美国CTL实验室进行,疲劳试验频率为 $0.4\text{Hz} \sim 0.75\text{Hz}$ ,经过200万次应力循环,通过断丝采集系统共采集到17个断丝信号,断丝数小于拉索试件钢丝总数的2%。(下转第35页)

时还应进行邻近点桥面标高的测量以判断是否需要调整索力。桥面上、下位移应控制在 $\pm 10\text{mm}$ 范围内<sup>[2]</sup>。

(2) 临时兜吊体系与新吊杆力系转换施工要点: 根据设计的张拉索力值、标高控制对新吊杆进行张拉及桥面标高的调整。张拉过程中交替逐步放松临时吊杆。张拉分级进行加载, 分级解除临时吊杆索力, 分级大小与原吊杆拆除程序一致, 临时吊杆索力的放松是通过千斤顶逐步回程实现的。张拉加载速度一般应小于 $10\text{MPa}/\text{min}$ , 直至张拉到要求停止, 即打紧夹片锁紧钢绞线。在张拉过程中, 读数测量要准确, 记录要全面, 真实无误。同样在换索全过程中, 应跟踪监测索力和更换吊杆所在处的挠度变化情况以及关键截面处的应力变化情况, 并检测桥面裂缝, 判断是否需调整索力。

(上接第6页)

在疲劳试验后, 按fib2005规范要求对拉索试件进行静态拉伸试验, 最大张拉力达到 $34436.9\text{kN}$ , 大于标准要求的标准破断力的95% (95%标准破断力大于92%的实际最大破断力), 达到最大力时, 拉索延伸量为 $142.2\text{mm}$ , 延伸率达1.84%, 大于规范要求的1.5% (如图9)。

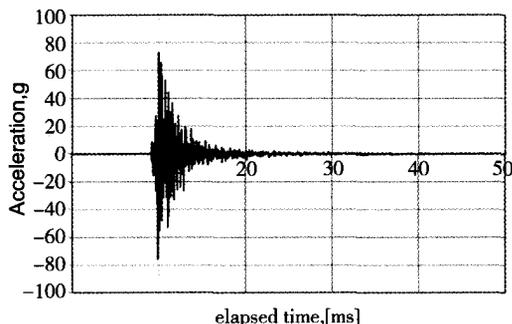


图8 拉索疲劳试验过程中采集到的钢绞线断丝信号

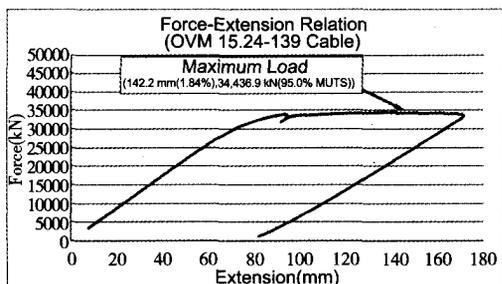


图9 OVM250-139拉索试件静拉伸试验曲线

## 6 结语

吊杆更换完工后, 对桥面的观测点标高进行复测和动静载试验, 桥面各观测点标高与原桥面基准标高一致。动静载试验结论: 桥跨整体受力性能良好, 吊杆受力均匀, 均满足加固设计荷载要求。

中承式钢管拱桥吊杆更换的临时兜吊系统的选型和设计, 需结合拱肋构造型式、拱肋下施工空间、吊杆控制索力、吊杆长度、横梁构造型式及吊杆受力特点等因素综合考虑。施工时需在有有效的测量和监控措施下保证临时兜吊体系与新、旧吊杆力系转换的同步性、均衡性。本文总结的临时兜吊系统设计方法、工程实践可为同类桥型吊杆更换和同类型临时兜吊系统的设计、施工提供借鉴。

### 参考文献

- [1] 李世忠, 易著炜. 中承式钢管混凝土拱桥吊杆更换施工技术[J]. 施工技术, 2008, (1): 214-216
- [2] 中华人民共和国行业标准. JTG/T J23-2008公路桥梁加固施工技术规范[S].

静拉伸试验后, 将拉索试件钢绞线及夹片一一拆出并检查, 拉索锚具组件及夹片均未出现裂纹, OVM250-139拉索组件的疲劳试验及静拉伸试验均取得圆满成功。

## 4 结论

随着斜拉索技术发展, OVM公司结合OVM250钢绞线斜拉索体系在工程应用中取得的经验, 对产品进行持续改进与创新。通过深入研究国际斜拉索标准、规范中对斜拉索产品的可靠性要求, 在产品研发、改进过程中, 结合理论计算与有限元分析, 通过大量的试验, 对拉索体系可靠性进行了系统研究, 使OVM250钢绞线斜拉索体系的安全可靠性满足国际标准、规范的要求。OVM250钢绞线斜拉索体系疲劳性能的提高, 也为斜拉桥的安全可靠性提供保障。

### 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.