

埋入式平行钢丝斜拉索损伤状态检测与分析

王国民¹, 吴中鑫², 颜东煌³

(1. 铜陵长江公路大桥管理处, 安徽 铜陵 244011; 2. 浙江交工高等级公路养护有限公司; 3. 长沙理工大学)

摘要:为探索埋入式平行钢丝斜拉索梁端锚固区病害特征和机理,以某长江公路大桥拆下的4根斜拉索为研究对象,通过现场检测、取样室内试验、数值统计分析等方法,分析出梁端锚头、钢丝和HDPE护套的病害特征和机理,得出潮湿状态比干燥状态损伤严重、外侧比内侧损伤严重、功能退化与使用年限成正比的病害规律,并将斜拉索寿命划分为3个等级。

关键词:斜拉索; 检测与试验; 斜拉索更换

斜拉索是连接索塔和主梁的长细柔性杆系结构,是斜拉桥的主要承重构件,其工作状态优良直接关系到整座大桥的结构安全。当斜拉索运营一段时间后由于施工、环境、管养等原因造成斜拉索PE老化开裂、破损或钢丝锈蚀、索内积水、锚头锈蚀等严重病害,影响斜拉索的安全使用。因此斜拉索检测评估的可达性、准确性、科学性意义重大,较多学者针对在役平行钢丝斜拉索的检测评估进行了系统全面的研究。

埋入式平行钢丝斜拉索是一种特殊的平行钢丝斜拉索,即:梁端锚头是固定端,在斜拉索张拉完成后用钢筋混凝土将梁端锚头封闭于主梁内。其优点是将梁端锚头与外界隔绝,降低梁端锚头出现病害的频率。但由于梁端锚头的封闭性,使梁端锚固区成为检测养护盲区,同时,雨水进入套管内难以排出体外而腐蚀钢丝,导致拉索存在安全隐患。

目前尚无学者对埋入式平行钢丝斜拉索的检测与使用寿命的安全评估进行研究。该文针对某长江公路大桥已使用22年的埋入式平行钢丝斜拉索使用安全性进行试验检测,分析病害形成原因,提出平行钢丝拉索的疲劳损伤和寿命判定方法。

1 工程概况

某长江公路大桥为主跨432 m的双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,桥跨为7孔连续结构。斜拉索扇形布置,每个索面26对拉索,全桥共208根拉索,最长索238 m,最短索53 m。梁上索距8 m,塔上索距1.5~3.0 m。

1.1 斜拉索结构形式

斜拉索为 $\phi 7$ mm平行钢丝斜拉索,抗拉强度为1 600 MPa。由内向外,拉索分为8层,共163根钢丝。钢丝束保护方式为外挤高密度聚乙烯护套PE+PU防护套。因部分PU护套损坏,在拉索使用16年后将全桥拉索将军帽以上外部PU护套更换为PVF缠包带并增加螺旋线。

1.2 斜拉索梁端锚固形式

斜拉索塔端锚头为张拉端,梁端锚头为固定端。梁端锚头采用埋入式,锚头埋入主梁混凝土边肋内,其锚固点距节段线52 cm,距主梁底缘40~50 cm,原开槽口横向宽56 cm,见图1。

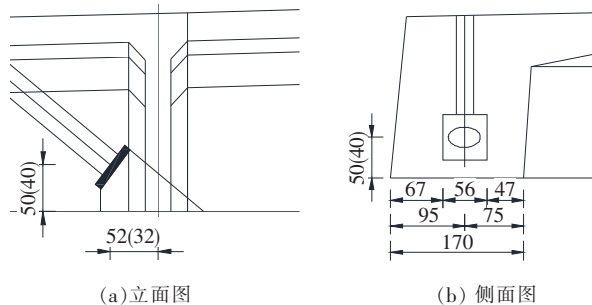


图1 斜拉索梁端锚固示意图(单位:cm)

1.3 斜拉索试验检测的必要性

该桥与其他同时期、同类型的斜拉桥相比有如下特点:① 梁高索距比小(为1/4,边肋高2.0 m,索距8.0 m),主梁对斜拉索的敏感性更大;② 埋入式梁端锚头的斜拉索检测、维修、更换难度大。

根据结构特点、斜拉索外观情况选择1个索塔上下游各1对索进行更换,并对拆下的斜拉索进行试验

研究,进而对全桥斜拉索状况进行分析、推测斜拉索使用寿命,指导后续斜拉索的养护工作。

2 检测与试验方法及结果

2.1 梁端锚头检测

2.1.1 索道管及下锚头检测

打开将军帽对索道管内密封材料进行检查(图2),由图2可见:部分发泡材料已经失效,有水进入索道管内(上游1对索无水,下游1对索有水)。

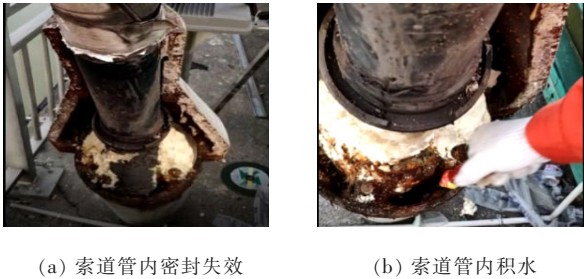


图2 索道管内密封情况

开槽后的梁端锚头见图3。由图3可见:锚头、锚头和连接筒间均有锈蚀,连接筒与索体间密封的热收缩套管均有破损。



图3 梁端锚头病害情况

2.1.2 梁端锚头内部缺陷检测

采用超声和磁粉的综合检测方法对斜拉索上、下锚头及螺母进行内部探伤检测(图4),发现5SW下锚头连接处存在1处缺陷磁痕和1处锚头开裂。

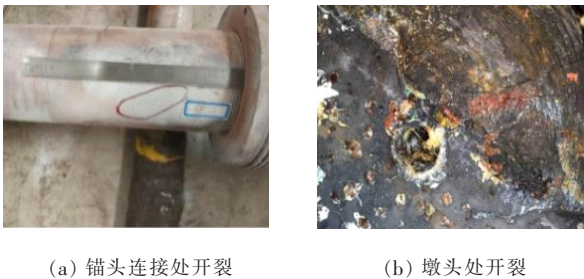


图4 5SW 梁端锚头连接处开裂

2.1.3 锚头静载试验

为准确检验斜拉索锚固段的整体锚固性能,对拆下的4根斜拉索梁端锚头进行整体静载试验,结果见表1。

表1 静载试验结果汇总

项目	破断力/ kN	效率系数/ %	极限延伸率/ %
5XE—下	9 871.3	94	3.53
5SW—下	9 363.4	89	1.89
5XE—上	9 878.8	94	3.27
5SW—上	9 973.4	95	3.94
标准值	10 476.0	≥95	≥2.00

由表1可知:所有锚头破断力均小于标准值,且有3根拉索效率系数小于标准值、1根钢丝静载延伸率小于标准值,说明使用22年后拉索破断力平均降低704 kN,下降速率为32 kN/年,平均损失率为6.7%,最大损失率为10.6%,以此推断当索使用30年时,拉索破断力损失将达到15%以上。

2.2 HDPE 护套试验

2.2.1 HDPE 护套拉伸试验

拉索HDPE护套的拉伸性能直接反映对内部钢丝的保护程度,为此需对拉索HDPE护套进行拉伸试验。从每根拉索上、中、下3处选取共12组HDPE护套作为试验原材料,热融化后浇筑制成试样进行拉伸试验,结果见表2。由表2可知:所有试样拉伸断裂强度值均小于HDPE标准值(25 MPa),最大应力值为12.6 MPa,最小应力值为1.33 MPa。说明HDPE护套经22年以上使用后其护套拉伸性能削弱明显,不能起到防护内部钢丝的作用。

表2 HDPE 护套拉伸试验结果汇总

编号	拉伸断裂 强度/MPa	编号	拉伸断裂 强度/MPa
5SE—上	5.87	5SW—上	4.02
5SE—中	1.65	5SW—中	3.53
5SE—下	1.33	5SW—下	1.60
5XE—上	1.82	5XW—上	7.85
5XE—中	1.86	5XW—中	12.60
5XE—下	1.70	5XW—下	8.96

2.2.2 HDPE 护套冲击试验

为检验拉索护套抗外界冲击荷载能力,需对

HDPE 护套进行冲击试验,冲击强度标准控制值为 $\geq 25\text{ kJ/m}^2$ 。共选 12 组 HDPE 护套进行冲击试验,结果见表 3。由表 3 可知:有 8 组试样合格,4 组试样不合格。说明材料有一定程度的老化后脆化现象。

表 3 HDPE 护套冲击试验结果汇总 kJ/m^2

编号	冲击强度	编号	冲击强度
5SE—上	29	5SW—上	25
5SE—中	23	5SW—中	32
5SE—下	31	5SW—下	29
5XE—上	24	5XW—上	24
5XE—中	31	5XW—中	30
5XE—下	23	5XW—下	26

注:规范规定的冲击强度标准控制值为 25 kJ/m^2 。

2.2.3 HDPE 护套氧化诱导期试验

从拆下的每根斜拉索上、中、下分别选取 1 段共 12 组 HDPE 护套试样进行氧化诱导期试验,规范要求的氧化诱导期控制值为 58 min。试验结果见表 4,由表 4 可知:12 组试样均不合格(最长诱导期为 56.3 min、最小诱导期为 23.9 min),HDPE 抗氧化性能削弱程度严重,HDPE 护套对钢丝的保护作用降低。

表 4 HDPE 护套氧化诱导期试验结果汇总

编号	氧化诱导期/min	编号	氧化诱导期/min
5SE—上	26.3	5SW—上	24.6
5SE—中	33.3	5SW—中	36.4
5SE—下	34.0	5SW—下	36.0
5XE—上	23.9	5XW—上	28.7
5XE—中	40.9	5XW—中	36.0
5XE—下	46.3	5XW—下	56.3

2.3 钢丝检测与试验

2.3.1 钢丝锈蚀检测

钢丝锈蚀程度直接影响斜拉索整体承载能力,对桥梁安全运营至关重要,因此必须对钢丝锈蚀程度进行专项检测。为更好地分析同一断面拉索钢丝腐蚀的分布规律,对断面钢丝进行编号,分析其腐蚀程度。编号原则为:采用百位数编号,最外层为第 1 层,共 36 根钢丝。由于该拉索腐蚀程度较低,达到铁基体腐蚀的程度,而现有的腐蚀程度评级方法该桥拉索均不适用,故根据该桥实际将钢丝镀锌层腐蚀程度划分为如下 5 级:

(1) 1 级:钢丝表面光滑,镀锌层腐蚀面积为 10% 以下。

(2) 2 级:介于 1 级和 3 级之间。

(3) 3 级:钢丝表面部分颜色较深,镀锌层腐蚀面积为 40%~60%。

(4) 4 级:介于 3 级和 5 级之间。

(5) 5 级:钢丝表面粗糙,颜色很深,镀锌层腐蚀面积达 90% 以上或存在大面积的深度腐蚀。

经检查发现:① 仅钢丝镀锌层存在部分腐蚀现象,并无白锈生成;② 仅有少部分钢丝镀锌层消耗严重,外观颜色变深;③ 钢丝镀锌层整体腐蚀趋势为由外向内逐渐减轻,最外层镀锌层腐蚀程度相对最严重,占比 58.33%(镀锌层腐蚀面积达 90% 以上或存在大面积深度腐蚀)。

根据试验结果与检查对比进行分析,其结果为:① 钢丝镀锌层腐蚀程度由外向内逐渐减轻,最外层较为严重,为 5 级和 4 级;② 全断面锈蚀程度 5 级 22 根(13.50%)、4 级 35 根(21.47%)、3 级 74 根(45.40%)、2 级 25 根(15.34%)、1 级 7 根(4.29%);③ 镀锌层腐蚀程度基本处于中等水平。

2.3.2 钢丝锌层耐硫酸铜与附着性试验

从 4 根斜拉索中取上、中、下 3 个位置处的 12 组钢丝试样分别进行了钢丝锌层耐硫酸铜与附着性试验,试验结果见表 5、6。

表 5 钢丝锌层耐硫酸铜试验结果汇总

编号	次数	编号	次数	编号	次数
5SE—上	2	5XE—中	4	5SW—下	1
5SE—中	4	5XE—下	1	5XW—上	4
5SE—下	1	5SW—上	1	5XW—中	1
5XE—上	4	5SW—中	4	5XW—下	1

注:规范合格标准为钢丝镀锌层硫酸铜试验挂铜次数大于 4 次。

根据表 5 耐硫酸铜试验结果,试验的 12 组钢丝均不合格,说明镀锌层性能已严重削弱,镀锌层防护性能较差,已基本不能起到防护作用。

附着性试验结果表明:从 36 组试样中(每根索选取 9 组试样,按上中下分为:3:3:3,每组试样共 1 根)有 20 根不合格,占比 55.56%,尤其以靠近下锚头位置处的钢丝附着性最差,钢丝整体镀锌层附着性明显削弱,不满足使用要求。同时也表明钢丝潮湿越大,附着性削弱越大。

表 6 单根钢丝锌层附着性试验结果汇总

编号	开裂情况	编号	开裂情况
5XE—中 14	锌未开裂	5SW—下 7	锌未开裂
5XE—中 15	锌未开裂	5SW—下 8	锌开裂
5XE—下 1	锌开裂	5XW—上 3	锌未开裂
5XE—下 7	锌开裂	5XW—上 11	锌未开裂
5XE—下 8	锌未开裂	5XW—上 14	锌未开裂
5SW—上 6	锌未开裂	5XW—中 1	锌开裂
5SW—上 8	锌开裂	5XW—中 7	锌未开裂
5SW—上 9	锌未开裂	5XW—中 8	锌未开裂
5SW—中 2	锌未开裂	5XW—下 3	锌开裂
5SW—中 8	锌开裂	5XW—下 14	锌开裂
5SW—中 11	锌开裂	5XW—下 15	锌开裂
5SW—下 1	锌未开裂	5SE—上 6	锌开裂
5SE—上 8	锌未开裂	5SE—上 9	锌开裂
5SE—中 3	锌开裂	5SE—中 14	锌开裂
5SE—中 21	锌开裂	5SE—下 4	锌开裂
5SE—下 11	锌开裂	5SE—下 14	锌开裂
5XE—上 4	锌未开裂	SXE—上 11	锌开裂
5XE—上 14	锌未开裂	5XE—中 3	锌开裂

总体表明,拉索钢丝使用 22 年后其最外层的镀锌层已基本失去防腐作用。

2.3.3 钢丝拉伸性能试验

分别在每根斜拉索上、中、下 3 处共选取 96 组 288 根试样(每根索 24 组,每组 3 根,每根长 500 mm)进行钢丝拉伸性能试验,结果表明:① 钢丝抗拉强度和屈服强度均合格;② 弹性模量和延伸率有 25 根不合格(占有试验钢丝的 8.7%),不合格主要集中在最外两层钢丝(第 1、2 层各为 8 根,占不合格的 64%)中的中下部位置(中下部各为 9 根,占不合格的 72%)。

说明斜拉索钢丝均有不同程度损伤,性能部分老化,主要集中在中下部、最外两层。分析试验结果表明:在潮湿环境下损伤越大,强度削弱越大。

2.3.4 单根钢丝扭转性能试验

为检验斜拉索钢丝扭转性能,需对拉索钢丝进行扭转性能试验,要求钢丝的扭转次数≥12 次、断口平整。从拆下的每根斜拉索上、中、下 3 处各选择 6 根共 72 根钢丝试样进行单根钢丝扭转性能试验,仅有 2 根合格。说明:钢丝整体抗扭转性能较差,与标准值相比较,使用 22 年的钢丝抗扭转已不满足使用要求。

2.3.5 钢丝疲劳试验

钢丝疲劳次数关系到斜拉索的使用寿命,必须对

斜拉索钢丝进行疲劳试验。试验条件上限为 $0.45\sigma_b$,应力幅为 360 MPa,要求 200 万次疲劳荷载后不断裂。

共选 40 组拉伸试样(每组试样 1 根)进行钢丝疲劳试验:有 38 根合格,2 根不合格(均为下游拉索,1 根位于 5XE# 斜拉索下锚头处外侧,31 万次后断裂于中间,另 1 根位于 5XW# 斜拉索靠近中间段处外侧,35 万次时断裂于钳口处)。按照线性简单预测斜拉索剩余使用寿命分别为 3.7 年和 4.2 年,说明钢丝的耐疲劳性能已严重削弱。

3 斜拉索钢丝腐蚀与力学指标性能变化机理分析

3.1 平行钢丝斜拉索现状调研

通过对 2000 年以前建成的 38 座斜拉桥拉索运行状况进行统计(部分典型桥梁使用情况见表 7),已换斜拉索的寿命:≤10 年有 6 座、11~20 年有 20 座、21~24 年有 3 座。至今未换索的使用寿命为 21~29 年的有 7 座、≥30 年的有 2 座。经分析表明:PE 护套开裂、钢丝锈蚀,且下锚头端处于含水潮湿状态下,钢丝锈蚀严重,拉索的寿命<20 年;PE 护套开裂、钢丝轻微锈蚀,拉索寿命为 20~25 年;PE 护套无损伤,钢丝锈蚀轻微,且下锚头处于干燥环境,拉索寿命>25 年。

表 7 平行钢丝斜拉索使用寿命与典型病害关系

桥梁名称	斜拉索病害	斜拉索使用寿命/年
上海新五桥		16(1991—1975)
济南黄河大桥	锚头积水、锈蚀,PE 护套老化开裂、钢丝锈蚀严重	13(1995—1982)
上海恒丰北路桥		13(2003—1987)
银盆岭大桥		15(2012—1990)
南昌八一大桥		15(2012—1997)
石门大桥		17(2005—1988)
三原新龙斜拉桥		20(2007—1987)
佛山西樵大桥		20(2007—1987)
李家沱长江大桥	PE 老化开裂、钢丝锈蚀	20(2017—1997)
郧县汉江大桥		22(2016—1994)
上虞章镇斜拉桥		24(2007—1983)
蚌埠淮河公路大桥	PE 护套无或少量损伤,钢丝锈蚀轻微,下锚头处于干燥环境	>31(2020—1989)
上海杨浦大桥		>27(2020—1993)
武汉长江二桥		>25(2020—1995)
上海徐浦大桥		>23(2020—1997)

3.2 斜拉索病害机理分析

(1) 大桥原斜拉索试验时已接近 22 年,虽然后期

增加了 PVF 缠包带,但 PVF 缠包带已使用近 8 年,HDPE 护套暴露空气中达 14 年,HDPE 护套拉伸、抗冲击、氧化诱导期等性能下降明显,HDPE 护套对内部钢丝防护性能下降,已不能起到防护内部钢丝的作用。

(2) 钢丝长期处于高强动荷载环境下将导致大部分钢丝的拉伸、扭转和疲劳等性能下降,特别在潮湿环境下,水气综合作用易产生疲劳腐蚀。钢丝拉伸损伤,主要集中在中下部、最外两层,这与钢丝所处位置有很大的关系,环境越潮湿,强度削弱越大。

(3) 拉索破断力随着使用年限增加而逐渐下降。经分析,拉索破断力平均降低 704 kN,下降速率为 32 kN/年,破断力平均损失率为 6.7%,最大损失率为 10.6%,以此推断当索使用 30 年,拉索破断力损失将达到 15%以上,拉索须更换。

(4) 梁端锚头埋入混凝土内,当雨水进入索道管内后将形成梁端锚头长期处于潮湿积水的工作环境,在水气综合作用下使锚头锈蚀。但仅有上端有孔洞而下端封闭条件下,又阻碍了水气作用的速率,相应减缓腐蚀速度。

(5) 因平行钢丝拉索为同心圆周截面,在振动和高应力作用下,会对钢丝产生侧向压应力作用,离圆心越远,偏角越大,损伤越大。在腐蚀环境和长期循环荷载作用下,钢丝强度下降,其钢丝锈蚀和力学指标沿拉索径向由外到内依次降低,主要集中在拉索最外侧 1、2 层。沿纵向钢丝腐蚀程度多集中在拉索下段,说明雨水沿拉索向下流动,汇集在锚头下端所致。

4 结 论

以某长江大桥拆下的 4 根斜拉索为研究对象,分别从外观和力学性能方面进行试验检测,对病害机理进行分析,可得如下结论:

(1) 埋入式拉索的锚固区在潮湿环境下易引起钢筋锈胀,安全风险高。

(2) 无论是干燥条件还是含水潮湿状态,钢丝镀锌层随着使用年限延长均存在功能退化现象;同时防腐退化呈现由外向内逐步减弱的规律,最外二层退化

腐蚀较明显。

(3) 钢丝抗扭转性能在使用 22 年后已不满足使用要求。

(4) 拉索破断力平均降低 704 kN,下降速率为 32 kN/年,破断力平均损失率为 6.7%,最大损失率为 10.6%,以此推断当索使用 30 年,拉索破断力损失将达到 15%以上。

(5) 在长期循环荷载作用下,斜拉索的弹性模量和延伸率均有不同程度损伤,主要集中在拉索中下部最外两层位置,潮湿环境下损伤越大,强度削弱越大。在潮湿状态下拉索的钢丝疲劳强度比干燥状态下的疲劳强度下降快。

(6) 中、上锚段钢丝的力学指标值大于下锚头段,这与斜拉索下锚头受力工况和积水锈蚀削弱钢丝强度相吻合。

(7) 若拉索外保护层无损伤,且上下锚头无锈蚀或钢丝在规范规定标度 2 级及以下状态时,拉索寿命 >25 年;若拉索外护套有破损,拉索下锚头端处于含水潮湿状态下,且钢丝锈蚀达到规范规定标度 4 以上者,拉索寿命 <20 年;其他状况寿命为 20~25 年。

参考文献:

- [1] 李欧,侍刚,王波,等.运营期桥梁斜拉索的技术状况检测[J].世界桥梁,2017(4).
- [2] 舒林,许红胜,曾毅杰,等.影响斜拉索运营寿命的各种因素分析[J].中外公路,2017(1).
- [3] 兰成明,徐阳,任登路,等.平行钢丝斜拉索疲劳性能评定 I:钢丝疲劳寿命模型[J].土木工程学报,2017(6).
- [4] 兰成明,任登路,徐阳,等.平行钢丝斜拉索疲劳性能评定 II:斜拉索疲劳寿命模型[J].土木工程学报,2017(7).
- [5] 许红胜,吴佳东,黄娟,等.基于蚀坑参数的既有斜拉索钢丝腐蚀程度分级评价研究[J].中外公路,2015(6).
- [6] 吴中鑫,盛海军,郑敏,等.斜拉桥旧索试验检测及残余寿命评估[J].中外公路,2015(1).
- [7] JT/T 775—2016 大跨度斜拉桥平行钢丝斜拉索[S].
- [8] GB/T 228.1—2010 金属材料拉伸试验第 1 部分[S].
- [9] GB/T 239.1—2012 金属材料线材第 1 部分:单向扭转试验方法[S].
- [10] JTG/T H21—2011 公路桥梁技术状况评定标准[S].