

悬索桥可换式主缆的研究

黄家珍 李文献 彭春阳 邹全 黄子能 李启富

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

摘要:悬索桥作为跨度最大的桥梁在我国得到了迅猛发展,但悬索桥的上部结构缆索系统的防腐的研究还没有取得令人十分满意的结果,特别是作为悬索桥生命线的主缆防腐。目前桥梁缆索主要还是依靠换索的方式,来解决缆索的防腐以及安全性能问题。悬索桥的吊索、锚碇,斜拉索等都已有了可更换缆索的技术,但悬索桥的主缆还未见有可更换的技术和实例。本文主要介绍悬索桥可换主缆及其索鞍、索夹、散索套的结构设计,并重点介绍关键部件索夹设计和其相关试验情况。说明实现主缆可换及主缆防腐的可行性。

关键词:悬索桥 可换式主缆 小上索夹体 侧边索夹体 小压盖 侧压盖

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2016.02.005

1 概况

桥梁缆索的防腐一直是世界性的难题,而悬索桥主缆的防腐更是困难,桥梁建筑工程师一直在寻求桥梁缆索更好的防腐方法,但到目前为止还很难找到十分满意的答案,估计在十几年内是很难彻底解决了。现今桥梁缆索发生锈蚀后最彻底的修复方法就是对缆索进行更换。其中拱桥的吊杆、系杆、斜拉桥的斜拉索,悬索桥的吊索、甚至锚碇等都已经实现可更换,但悬索桥的主缆还是不可更换的,悬索桥主缆可换的技术目前在世界上还未见有实施。如能通过更换主缆来解决悬索桥缆索的防腐问题,那么对于提高桥梁拉索的安全性、减少因拉索耐久性导致的直接经济损失,将具有重要的作用。

2 可换式悬索桥主缆总体设想

目前,要想实现主缆可换,我们先从中小型悬索桥入手,我们的设计理念采用化整为零的方法,将悬索桥主缆由原来单根设计成多根小主缆,想办法可逐根拆装更换小主缆,从而实现悬索桥的主缆可更换。悬索桥采用可换式主缆具有以下有益效果:

(1) 将单根大主缆拆分成多根小主缆进行夹持,悬索桥建成后可通过逐个单独拆开小索夹体,对小主缆进行检查、维护和更换,从而实现主缆保持性能完好的目的。

(2) 将主缆分拆多根小主缆后,使主缆小

型化,使主缆的制作和和运输更加方便,施工机具小型化,施工、维修方便,适合山区及交通不便地方建造中小型悬索桥使用。

3 可换式主缆的索夹设计

为达到逐根更换小主缆,我们设计出了两种可换主缆的索夹结构图,第一种为水平方向依次排列的小主缆结构(见图1),该索夹特点是其下索夹是一体的,而上索夹由5个分离式小上索夹组成,每个小上索夹体单独使用高强螺栓副来夹持每根小主缆。第二种为竖向方向依次排列的小主缆结构(见图2),该索夹在竖向方向排布成左、右双排结构,索夹由侧边索夹体、中间索夹体和高强螺栓组成,每个小侧边索夹体单独使用高强螺栓副来夹持每根小主缆。这种索夹使小主缆在横桥向占用宽度变小,有利于吊索设计布置,使整个桥型更加美观。这两种结构的可换主缆索夹孔数和大小都可以进行多种组合变化,满足了不同大小主缆布索的要求。

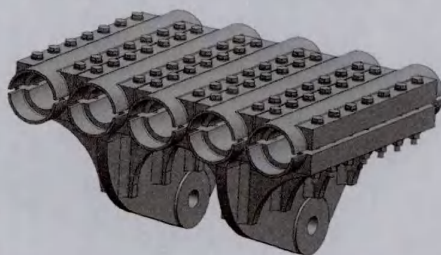


图1 可换主缆的索夹结构方案图(水平)

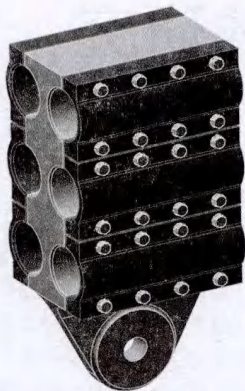


图2 可换主缆的索夹结构方案图(竖向)

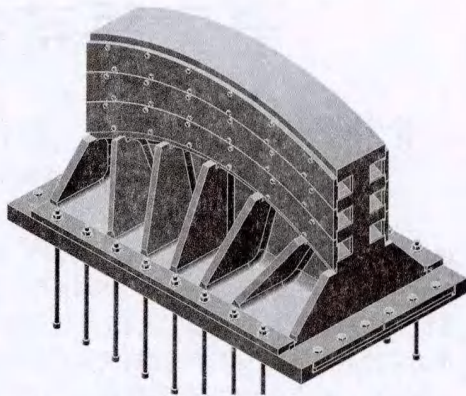


图5 可换主缆的索鞍结构方案图(竖向)

4 可换式主缆索鞍、散索套设计

为达到主缆可换,索鞍和散索套也需要进行特别设计。将索鞍鞍槽分成几个独立的小鞍槽,每个鞍槽用独立的索鞍盖进行压紧,使得每个小主缆在索鞍和散索套处也可以象索夹一样进行独立的拆开检查和更换,索鞍其他部位结构按常规要求设计即可,一般水平排布的可换主缆索鞍结构如图3。散索套结构设计于索夹相类似,相当于可换主缆索夹一端设计出散索形的喇叭口,且是没有连接吊索的耳板结构,一般水平排布的可换主缆散索套结构如图4。一般竖向排布的可换主缆索鞍结构如图5,一般竖向排布的可换主缆散索套结构如图6。

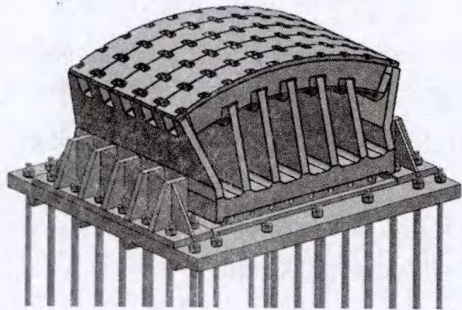


图3 可换主缆的索鞍结构方案图(水平)

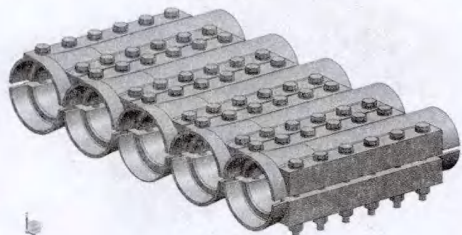


图4 可换主缆的散索套结构方案图(水平)

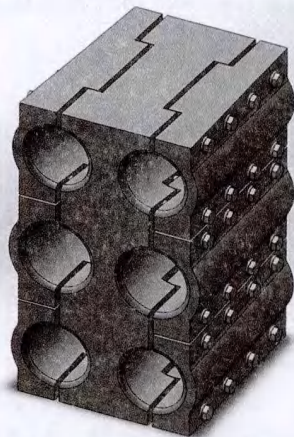


图6 可换主缆的散索套结构方案图(竖向)

5 主缆索夹试验

目前主缆索体形式是多种多样的,主要有:PPWS法的平行钢丝主缆索股、钢丝成品索、钢绞线成品索、钢丝绳等,在大型悬索桥主缆上主要使用PPWS平行钢丝主缆索股,而在中小型悬上,特别是在人行悬索桥主缆常采用钢丝或钢绞线成品索,常规设计时都要求索夹夹持处主缆处必须剥除PE,索夹夹持在钢丝或钢绞线上,这样才能保证索夹抗滑力的稳定、持久,索夹安装完成后进行专业的防腐处理。

5.1 试验目的:

(1) 通过试验观察钢绞线成品索剥除PE后能否进行整形,观察带齿合与不带齿合索夹对钢绞线索夹安装过程与夹持性能的影响情况。

(2) 根据试验结果总结摸索出计算钢绞线成品索用索夹孔直径的计算一般规例。

(3) 通过试验得到钢绞线成品索主缆与索

夹的摩擦力的关系(即抗滑系数)、主缆在索夹处和索夹外的直径和空隙率,为钢绞线成品索主缆用索夹的设计和施工提供可靠资料,增加施工的可靠性和可行性。

(4)通过试验检测可换主缆索夹的机械性能及结构尺寸,检验多根平行排布成品索主缆上安装主缆可换索式悬索桥索夹是否顺利可行,索

夹与小主缆配合尺寸是否合理,为以后设计提供参考。

(5)根据试验总结出主缆可换索式悬索桥索夹的安装方法,为以后主缆可换索式悬索桥索夹安装施工提供可行性依据。

5.2 试验试件及设备:

试验所需试件及设备见表1

表1 试验试件及设备

| 序号 | 试件及设备名称 | 型号规格 | 数量 |
|----|------------|-------------------------------|-----|
| 1 | 试验索夹 | ZMSJ-KSYA.0试验索夹A(不带齿口)(详见图7) | 1套 |
| | | ZMSJ-KSYB.0试验索夹B(带齿口)(详见图8) | 1套 |
| | | ZMSJ-KSY.0可换主缆试验索夹(详见图9) | 2套 |
| 2 | 主缆试件 | 37根 ϕ 15.2环氧喷涂钢绞线成品索,长4m | 1根 |
| | | 37根 ϕ 15.2环氧喷涂钢绞线成品索,长5m | 6根 |
| 3 | 扭矩扳手 | | 1套 |
| 4 | 千斤顶 | YCW250B型 | 1台 |
| | | YCW60B-200型 | 4台 |
| 5 | 油泵、压力表 | ZB4-500 | 2台套 |
| 6 | 三通接头 | M16 \times 1.5 | 4个 |
| 7 | 抗滑试验垫板 | ZMSJ-KYS-DB | 2块 |
| 8 | 定位环 | ZMSJ-KYS-DWH.0 | 8套 |
| 9 | 纠偏器 | ZMJPQ-TUT1.0 | 4套 |
| 10 | 百分表及表座 | 0~10mm | 2套 |
| 11 | 游标卡尺 | 0~125mm | 1把 |
| 12 | 卷尺 | 5m | 1把 |
| 13 | 垫块、垫环、五金工具 | | 若干 |

5.3 试件的基本参数

试验主缆的选择,参照某桥对主缆的要求,本次研究可换主缆是分成5根水平平行排列小主缆,小主缆采用37根环氧钢绞线成品索。成品索是由37根环氧喷涂钢绞线(外径为 ϕ 16)排布成正六边形,经左旋轻度扭绞而成,扭绞角 $2^\circ\sim 4^\circ$,钢绞线束外面缠绕纤维增强聚脂带,然后外挤双层HDPE护套。

一般平行钢丝主缆索股索夹抗滑试验已有做过较多的抗滑试验,而有扭绞角的钢绞线成品索做主缆的索夹抗滑试验做得较少,此类主缆的索夹设计经验较少,索夹孔直径应该与一般平行钢丝主缆索夹直径会有区别。而可换主缆索夹结构较为复杂,因此首先参照了《特大跨径钢箱梁悬索桥设计指南》中索夹设计,计算确定夹持钢绞线成品索索夹结构(见图7、图8)。经过试验反

推出合适的索夹孔直径后,设计出了可换主缆试验索夹结构(见图9)。参照某桥对索夹的要求,在主缆上的最大安装倾角($\varphi=21^\circ$),此索夹的吊索设计拉力($N_h=1160kN$),索夹体采用ZG20Mn材料铸造而成,该可换主缆索夹主要参数如下:

- A、索夹5个主缆孔内径 d_c 均为 ϕ 106mm;
 - B、上、下索夹体两半开口间距离为8mm;
 - C、索夹共有M16高强度螺栓副 $n_{cb}=5\times 14$;
 - D、设计索夹上单个高强螺栓的预紧力 $P_b^c=91kN$;
 - E、主缆与索夹的静摩擦系数,设计时取 $\mu=0.1$;
 - F、紧固及压力分布不均匀系数,取 $k=2.8$ 。
- 因此可换主缆索夹最低试验抗滑力应达到:
- $$F_{fc}=k\mu n_{cb}P_b^c=2.8\times 0.1\times 5\times 14\times 91=1784kN$$

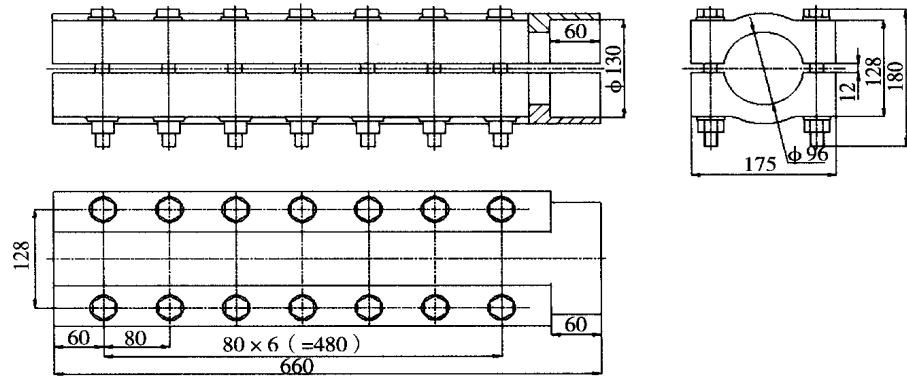


图7 试验索夹A结构图

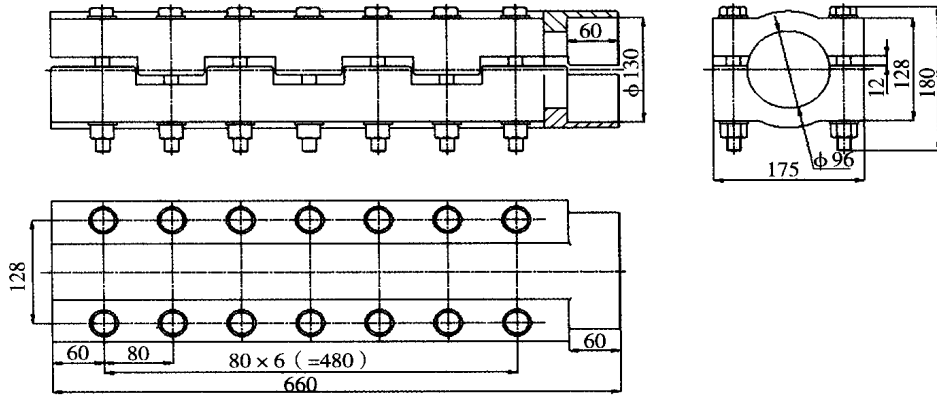


图8 试验索夹B结构图

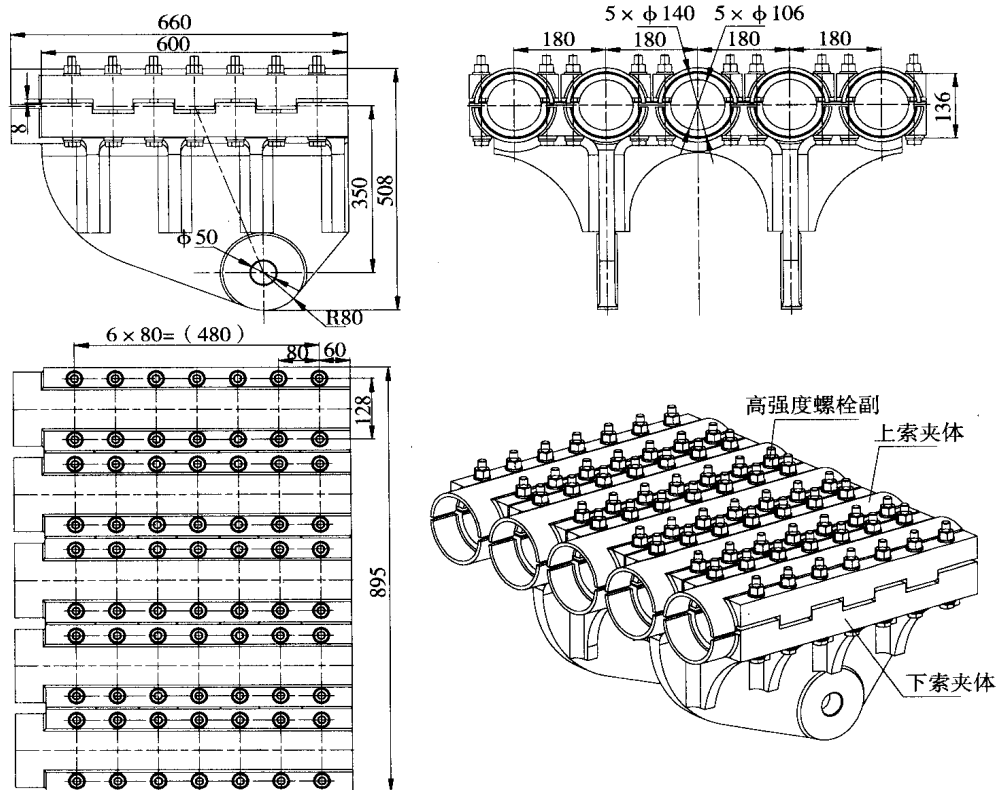


图9 可换主缆试验索夹结构图

5.4 试验步骤

5.4.1 索夹夹持对比试验步骤

1) 按图10索夹对比试验安装布置示意图,先将要安装试验索夹处的主缆外PE剥除,剥除时注意不能将钢绞线割伤,测量剥除PE后主缆的周长,根据周长算出安装索夹处主缆的外径,并记录。

2) 将YCW250B千斤顶与油泵连接好,并启动油泵,让千斤顶空走几个行程,排除油路中的空气,最后将活塞缩到底以便索夹安装,关闭油泵。

3) 按图10索夹对比试验安装布置示意图将千斤顶摆放好,将主缆穿进千斤顶,在千斤顶两

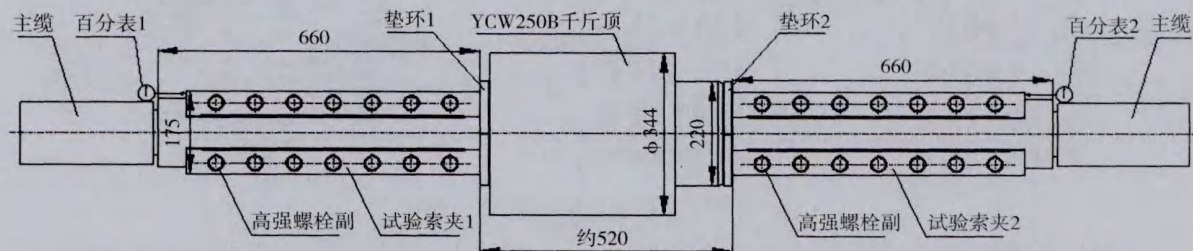


图10 索夹对比试验安装布置示意图

7) 启动油泵(见图11),通过YCW250B千斤顶施加推力,按2.0MPa, 3.0MPa, 4.0MPa, 5.0MPa, 6.0MPa, 7.0MPa, 8.0MPa, 逐级缓慢加载。通过百分表观察索夹是否移动,加载到8.2MPa(千斤顶推力为357kN)停机保压10min,观察是否移动,最后再加载直到克服索夹静摩擦力产生连续移动,记录其数值。

8) 卸载顶推千斤顶后,分步拆卸索夹上各个高强度螺栓(见图12、图13),最后拆下索夹体观察环氧喷涂钢绞线环氧层损伤情况、钢绞线形状及索夹是否完好,并做好记录。



图11 试验照片

端套上合适的垫环。

4) 将两种型号试验索夹分别安装在千斤顶两端钢绞线主缆上,穿上高强螺栓,拧上螺母,用扳手初步上紧,仔细观察两种型号索夹安装过程的各种情况,并做好记录;

5) 用扭矩扳手在索夹体对称的前后螺栓同时进行拧紧,紧固螺栓按从里到外的顺序进行,为使每个螺栓紧固力均匀,紧固到试验最大扭矩后,应再重复紧固3次,紧固好高强螺栓后测量索夹上下两片之间的距离,并记录其数据。

6) 按图10索夹对比试验安装布置示意图在两索夹体的外端面安装百分表;

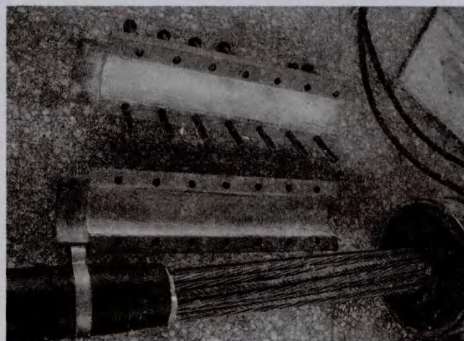


图12 试验照片

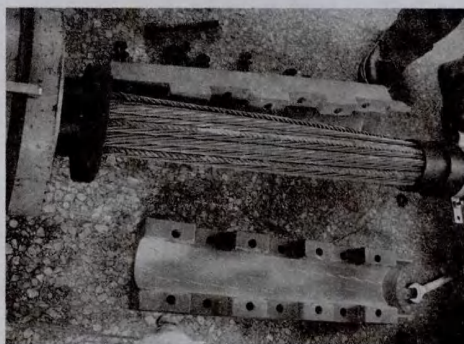


图13 试验照片

5.4.2 可换主缆的索夹试验步骤

1) 按图14将要安装试验索夹处的主缆

外PE剥除，剥除时注意不能将钢绞线割伤，测量剥除PE后主缆的周长，根据周长算出安装索夹处主缆的外径，并记录。

2) 按图14索夹试验布置示意图将抗滑试验垫板摆放好，将主缆穿进抗滑试验垫板。

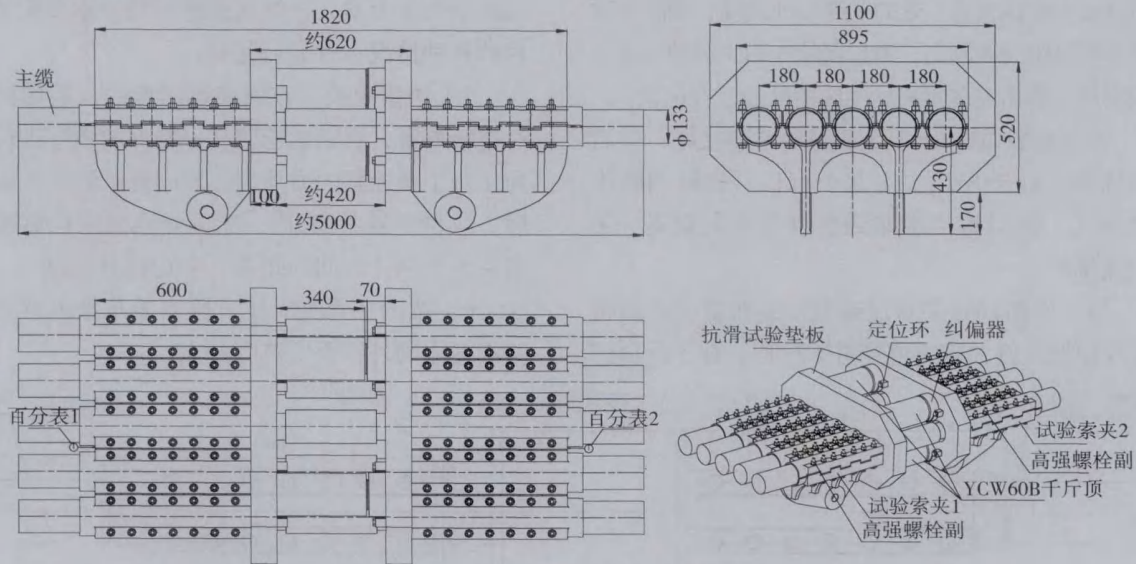


图14 可换主缆索夹试验安装布置示意图

3) 将两套试验索夹分别安装在两抗滑试验垫板外侧钢绞线主缆上，穿上高强螺栓，拧上螺母，用扳手进行初步预紧，仔细观察索夹安装过程的各种情况，并做好记录、试验过程见图15、图16；

4) 将两套试验索夹的高强螺栓副做好初步预紧后，将整个主缆及试验索夹翻转过来，以便高强螺栓副施扭，并对索夹高强螺栓副进行初步预紧，试验过程见图17、图18；

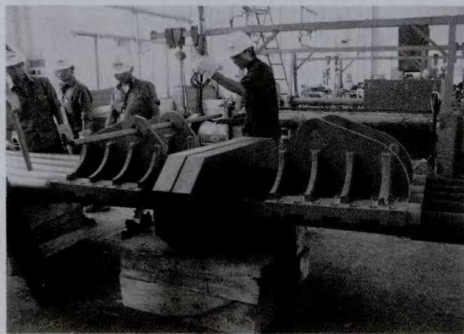


图15 试验照片



图17 试验照片

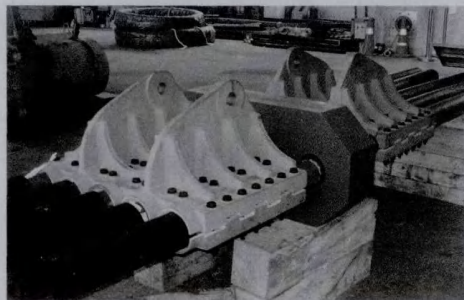


图16 试验照片

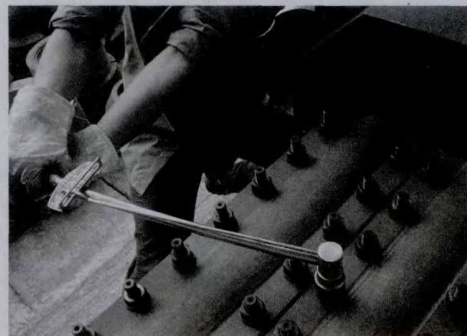


图18 试验照片

5) 将主缆及试验索夹垫平放置稳定, 将抗滑试验垫板分开靠压在两索夹端面, 在抗滑试验垫板上安装定位环; 将YCW60B千斤顶与油泵连接好(通过三通阀, 由一台油泵控制前面两台千斤顶, 另一台油泵控制后面两台千斤顶), 并启动油泵, 让千斤顶空走几个行程, 排除油路中的空气, 最后将活塞缩到底方便安装, 关闭油泵, 安装千斤顶和纠偏器, 试验过程见图19、图20。

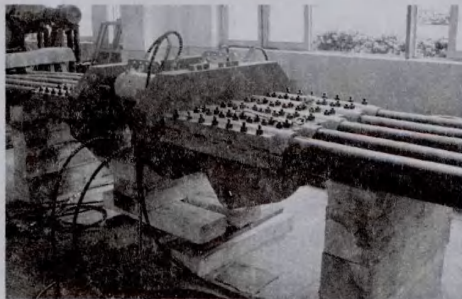


图19 试验照片

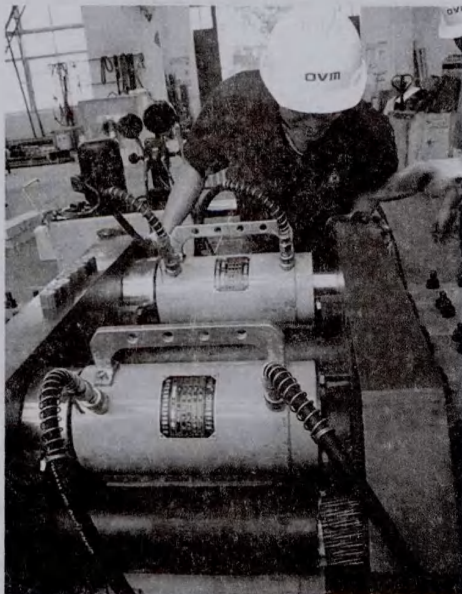


图20 试验照片

6) 启动油泵, 通过四台YCW60B千斤顶顶推抗滑试验垫板, 调节两索夹端面前后的距离基本一致, 5根主缆平直, 以使顶推抗滑时, 5个索夹孔抗滑受力均匀。

7) 用扭矩扳手在每个上索夹体对称的前后螺栓同时进行拧紧, 紧固螺栓按从里到外的顺序进行, 紧固时要保证上、下索夹体两侧间隙的距离尽量保持一致, 为使每个螺栓紧固力均匀, 紧

固到试验最大扭矩后, 应再重复紧固3次。紧固好后测量上、下索夹体两侧间隙的距离, 并记录其数据。

8) 在两个索夹的外端面安装百分表; 启动油泵, 通过四台YCW60B千斤顶施加推力, 按5MPa, 10MPa, 15MPa, 20MPa, 25MPa, 30MPa, 35MPa, 逐级缓慢加载, 通过百分表观察索夹是否移动, 加载到40MPa(千斤顶推力约为1784kN)停机保压10min, 观察是否移动, 最后再加载直到克服索夹静摩擦力产生连续移动, 记录其数值, 试验过程见图21、图22。

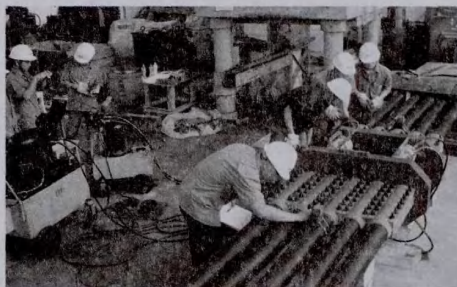


图21 试验照片

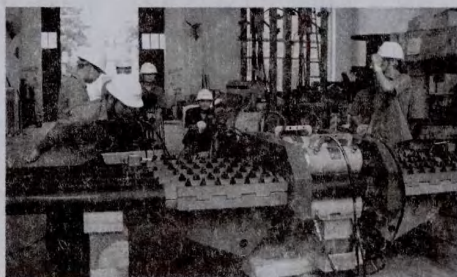


图22 试验照片

6 试验测试结果

6.1 环氧钢绞线成品索主缆剥除PE后测量值(见表2)

表2 环氧钢绞线成品索主缆剥除PE后测量记录表(单位mm):

| 主缆号 索夹孔位置 | 主缆周长值 | | | 主缆周长 平均值 | 主缆外径dc |
|--------------|-------|-----|-----|-------------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| 单孔试验用主缆 | 350 | 352 | 351 | 351 | 111.7 |
| A1 | 352 | 354 | 354 | 353.3 | 112.5 |
| A2 | 350 | 351 | 351 | 350.7 | 111.6 |
| A3 | 354 | 355 | 352 | 353.7 | 112.6 |
| A4 | 352 | 354 | 352 | 352.7 | 112.3 |
| A5 | 356 | 358 | 356 | 356.7 | 113.5 |
| B1 | 358 | 360 | 360 | 359.3 | 114.4 |
| B2 | 355 | 355 | 358 | 356.0 | 113.3 |
| B3 | 357 | 354 | 357 | 356.0 | 113.3 |
| B4 | 362 | 359 | 357 | 359.3 | 114.4 |
| B5 | 359 | 360 | 357 | 358.7 | 114.2 |
| 平均值 | | | | | 113.2 |

6.2 索夹体上下两片之间的距离测量值 (见表3、表4)

表3 单孔索夹螺栓紧固至91kN后索夹上、下索夹体之间的距离测量值(单位mm):

| 测量位置 | 外侧端 | 垫板端 | 平均值 | |
|----------------|-----|------|------|------|
| 试验索夹A | 索夹前 | 28.6 | 28.8 | 28.7 |
| | 索夹后 | 29.2 | 29.4 | 29.3 |
| 试验索夹B | 索夹前 | 28.0 | 27.0 | 27.5 |
| | 索夹后 | 28.2 | 27.2 | 27.7 |
| 索夹体上下两片之间的平均距离 | | | 28.3 | |

由于单孔试验索夹孔直径刚开始是按规范中设计公式 $D = \sqrt{d^2 n_v / (1 - v_j)}$, 其中 d 取钢绞线的钢丝直径按5.4mm(喷涂环氧后直径), 空隙率取18%计算得单孔索夹直径为:

$$D = \sqrt{d^2 n_v / (1 - v_j)} \\ = \sqrt{5.4^2 \times 7 \times 37 / (1 - 0.18)} = 96.0 \text{ mm}$$

单根试验夹持成品索主缆后, 单孔索夹体上下两片之间的距离平均为28.3mm。试验索夹A、B上下两片之间的设计间隙为12mm, 因此确定按此方法计算索夹孔偏小, 按此夹持后成品索在索夹内面积倒推出索夹孔直径应为:

$$D = \sqrt{96^2 \times \pi / 4 + 96 \times (28.3 - 12)} = 106 \text{ mm}$$

因此可换主缆的索夹孔直径按106mm设计。根据试验结果计算主缆在索夹处的实际空隙率 V_c 为:

$$V_c = 1 - \frac{5.4^2 \times 7 \times 37}{96^2 \times \pi / 4 + 96 \times (28.3 - 12)} = 32.7\%$$

表4 可换主缆索夹螺栓紧固至91kN后索夹上、下索夹体之间的距离测量值(单位mm):

| 测量位置 | 外侧端 | 垫板端 | 平均值 | |
|----------------|-----|------|-----|------|
| 试验索夹1 | 索夹前 | 10.1 | 7.9 | 9.0 |
| | 索夹后 | 7.4 | 7.6 | 7.5 |
| 试验索夹2 | 索夹前 | 7.1 | 6.6 | 6.85 |
| | 索夹后 | 8.6 | 8.2 | 8.4 |
| 索夹体上下两片之间的平均距离 | | | 7.9 | |

∴可换主缆索夹体上下两片之间的距离平均为7.9mm。

∴可换主缆索夹处主缆外径 d_c 为:

$$d_c = \frac{106 \times \pi - 2 \times (8 - 7.9)}{\pi} = 105.9 \text{ mm}$$

∴主缆在可换主缆索夹处的空隙率 v_c 为:

$$v_c = 1 - \frac{d_w^2 \times n_{tot}}{d_c^2} = 1 - \frac{5.4^2 \times 7 \times 37}{105.9^2} = 32.7\%$$

6.3 可换主缆的索夹抗滑试验记录情况 (见表5、表6)

表5 单孔索夹抗滑试验记录表

| 千斤顶油压 (MPa) | 对应顶推力 (kN) | 百分表1 | 百分表2 | 备注 |
|-------------|------------|------|------|--------|
| 0.5(预紧) | | 0 | 0 | |
| 2.0 | 73.2 | 0 | 0 | |
| 3.0 | 119.0 | 0 | 0 | |
| 4.0 | 164.8 | 0 | 0 | |
| 5.0 | 210.6 | 0 | 0 | |
| 6.0 | 256.4 | 0 | 0 | |
| 7.0 | 302.2 | 0 | 0 | |
| 8.0 | 348.0 | 0 | 0 | |
| 8.2 | 357.0 | 0 | 0 | 保压10分钟 |
| 9.5 | 416.7 | 开始滑移 | 0 | 索夹开始滑移 |

表6 可换主缆索夹抗滑试验记录表

| 千斤顶油压 (MPa) | 对应顶推力 (kN) | 百分表1 | 百分表2 | 备注 |
|-------------|------------|------|------|--------|
| 0.5(预紧) | | 0 | 0 | |
| 5 | 182 | 0 | 0 | |
| 10 | 411 | 0 | 0 | |
| 15 | 639 | 0 | 0 | |
| 20 | 868 | 0 | 0 | |
| 25 | 1096 | 0 | 0 | |
| 30 | 1325 | 0 | 0 | |
| 35 | 1553 | 0 | 0 | |
| 40 | 1782 | 0 | 0 | 保压10分钟 |
| 45 | 2010 | 0 | 0 | |
| 46 | 2056 | 0.02 | 0 | |
| 47 | 2102 | 0.06 | 0.01 | |
| 48 | 2148 | 开始滑移 | 0.01 | 索夹开始滑移 |

∴实测可换主缆索夹体最大抗滑力

$$F_{fc} = 2148 \text{ kN}$$

∴实测可换主缆索夹体抗滑力安全系数 K_{fc} 为:

$$K_{fc} = F_{fc} / N_c = \frac{F_{fc}}{N_h \times \sin \varphi} = \frac{2148}{1160 \times \sin 21^\circ} = 5.2 \geq 4.3$$

∴可换主缆的索夹体与主缆之间摩擦系数

μ 为:

$$\mu = \frac{F_{fc}}{k P_{tot}} = \frac{2148}{2.8 \times 91 \times 14 \times 5} = 0.12$$

主缆可换索式悬索桥索夹试验结果表明:

1) 带齿合的索夹(ZMSJ-KSYB.0型)在安装使用上更方便,夹持效果上优于不带齿合的索夹。

2) 通过主缆可换索式悬索桥索夹抗滑试验,测定出索夹高强螺柱副加载91kN的紧固力后,主缆与索夹的摩擦力为2148kN,主缆与索夹之间的磨擦系数为0.12(设计时取值0.1)。实测抗滑系数大于设计值,表明钢绞线成品索主缆与索夹体的抗滑力设计校核是可靠的、安全的。

3) 通过试验,测定出钢绞线成品索主缆在索夹处的空隙率 $v_c=32.7%$;确定在高强螺栓副在施加设定的紧固力 $P_b=91kN$ 时,索夹无明显的弯曲变形,索夹体机械性能满足使用要求。

4) 通过试验,试验时先将下索夹体定位对准五根小主缆,再按从里到外的先后顺序安装上索夹体,小主缆进索夹孔很顺利,没有夹丝现象,螺栓穿装顺利、快捷,螺栓副施扭方便,测定出当高强螺栓副在施加至设计紧固力时索夹处主缆直径与索夹孔直径基本一致,表明此主缆可换式悬索桥索夹结构尺寸设计较为合理,能在今

后施工中安装使用。

但目前有很多悬索桥,特别是国外设计人行悬索桥,索夹的设计很多都是直接夹持在主缆PE上。由于人行悬索桥吊索力较小,索夹抗滑力也较小,一般也能达到使用要求,这样索夹处也不用进行专业的防腐处理,施工和防腐上方便很多。但索夹夹持在PE上的抗滑系数是多少还没有可参照的资料,索夹夹持在PE上多大力会开裂、设计时夹紧力该如何确定呢?因此需要做索夹直接夹持在成品索HDPE上的抗滑试验。此试验的目的是:(1)通过试验得到钢绞线成品索主缆(单根钢绞线不包PE,外包两层PE)与索夹的摩擦力的关系(即抗滑系数),为钢绞线成品索主缆用索夹的设计和施工提供可靠资料,增加施工的可靠性和可行性。(2)通过试验观察索夹直接夹持在成品索PE上的变形情况,为以后设计提供参考。

7 索夹夹持主缆PE抗滑试验

7.1 试验试件及设备:

表7 试验试件及设备

| 序号 | 试件及设备名称 | 型号规格 | 数量 |
|----|------------|----------------------------------|-----|
| 1 | 试验索夹 | ZMSJ-KSYA.0试验索夹A(不带齿口)(详见图7) | 1套 |
| | | ZMSJ-KSYB.0试验索夹B(带齿口)(详见图8) | 1套 |
| | | DM18SJA-YLQ.0主缆索夹(详见图12) | 2套 |
| 2 | 主缆试件 | 31根 $\phi 15.2$ 环氧喷涂PE钢绞线成品索,长4m | 1根 |
| | | 12根 $\phi 15.2$ 镀锌钢绞线成品索,长4m | 6根 |
| 3 | 扭矩扳手 | | 1套 |
| 4 | 千斤顶 | YCW150B型 | 1台 |
| 5 | 油泵、压力表 | ZB4-500 | 2台套 |
| 6 | 百分表及表座 | 0~10mm | 2套 |
| 7 | 游标卡尺 | 0~125mm | 1把 |
| 8 | 卷尺 | 5m | 1把 |
| 9 | 垫块、垫环、五金工具 | | 若干 |

试验试件的选用,利用原先的试验索夹A和索夹B,正好合适夹持31根内含小PE的钢绞线成品索,成品索内钢绞线为无粘结筋,每根钢绞线有单独的PE层,且内含油脂型。

另一种按国外的一座实际桥梁使用了12根钢绞线成品索,成品索内钢绞线为环氧喷涂钢绞线,无小PE和油脂,索体外径约为 $\phi 85$ 。索夹在主缆上最大的安装倾角 φ 为 23° ,索夹具体结构

见图23。吊索采用单根钢绞线挤压索,吊索破断力 $N_h=260kN$,考虑吊索设计使用力为 $260/4=65kN$ 。

该索夹的上、下索夹体都是用ZG20Mn材料铸造而成,该索夹主要参数如下:

- A、索夹主缆孔内径 d_c 为 $\phi 86mm$;
- B、上、下索夹体两半开口间距离为10mm;
- C、索夹共有M16-8.8高强度螺栓副 $n_{cb}=6$;

D、索夹单个高强螺栓的设计预紧力 $P_b^c=70\text{kN}$;

E、主缆与索夹的静摩擦系数,设计时取 $\mu=0.1$;

F、紧固及压力分布不均匀系数,取 $k=2.8\text{kN}$ 。

因此试验抗滑力应达到:

$$F_{fc}=k\mu n_{cb}P_b^c=2.8\times 0.1\times 6\times 70=118\text{kN}$$

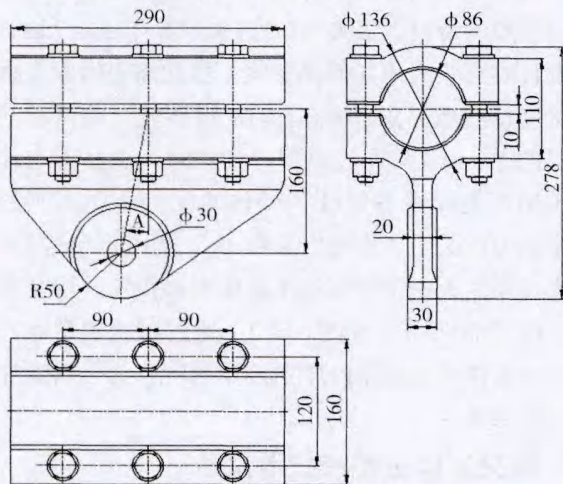


图23 试验索夹结构图

7.2 试验步骤

7.2.1 索夹夹持含小PE主缆试验步骤

此试验步骤按索夹夹持对比试验来进行。

7.2.2 索夹夹持不含小PE主缆试验步骤

1) 按设计图纸加工制作DM18SJA-YLQ.0主缆索夹2套;制作 $\phi 15.2-12$ 镀锌钢绞线成品索,单根钢绞线不包PE,索体外直接挤包两层PE,索体外径约为 $\phi 85\text{mm}$,长度约为4m;备齐所有试验设备,并标定好千斤顶和扭矩扳手。

2) 测量主缆安装索夹处的直径(两个方向值),并记录。

3) 将YCW150B千斤顶与油泵连接好,并启动油泵,让千斤顶空走几个行程,排除油路中的空气,最后将活塞缩到底以便索夹安装,关闭油泵。按图24将千斤顶摆放好,将主缆穿进千斤顶,在千斤顶两端套上合适的垫环。

4) 将两个主缆索夹分别安装在千斤顶两端钢绞线主缆上,穿上高强螺栓,拧上螺母,用扳手初步上紧,仔细观察索夹安装过程的各种情况,并做好记录;(见图25、图26)

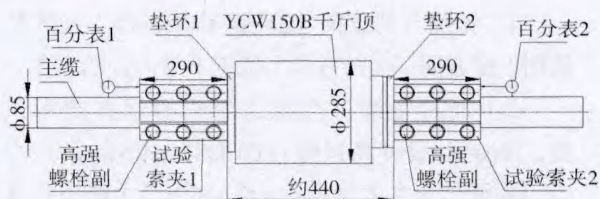


图24 索夹夹持PE主缆试验布置示意图

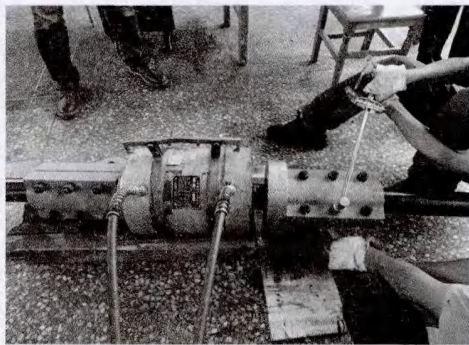


图25 试验照片

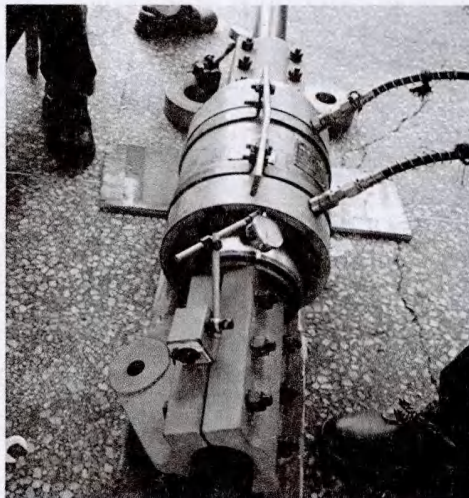


图26 试验照片

5) 用扭矩扳手在索夹体对称的前后螺栓同时进行拧紧,紧固螺栓按从里到外的顺序进行,为使每个螺栓紧固力均匀,紧固到试验规定的扭矩后,应再重复紧固3次,并注意观察成品索HDPE变形和破坏情况,并做好详细记录,并在两个索夹外端面处的主缆外径画一圈红色标记线。

6) 启动油泵,通过YCW150B千斤顶施加推力预紧后在索夹上安装百分表,测量千斤顶活塞伸长量。

7) 启动油泵,通过YCW150B千斤顶施加推力,按0.7MPa, 1.5MPa, 2.4MPa, 3.2MPa, 4.0MPa

(千斤顶推力为118kN)逐级缓慢加载,并记录百分表数值,仔细观察索夹外端红色标记线,观察索夹是否在PE上滑移,最后再加载直到索夹在主缆PE上滑移,记录其数值。

8)按以上步骤,第一次螺栓预紧力按70kN设计预紧力夹紧,卸载顶推千斤顶后,分步拆卸索夹上各个高强度螺栓,最后拆下索夹体观察主缆索体HDPE损伤情况、成品索形状及索夹是否完好,并做好记录。

9)在索上安装一个索夹,螺栓扳手扭力上到300N·m后,保持10min后卸掉索夹,观察外HDPE情况。

7.3 记录及结果

7.3.1 索夹夹持不含小PE主缆试验结果:

1)第一次试验扳手扭矩200N·m,螺栓预

紧力约为70kN时,具体数值见表8;

2)第二次试验扳手扭矩200N·m,螺栓预紧力约为70kN时,具体数值见表9;

∴实测索夹夹持钢绞线成品索主缆最大抗滑力 $F_{fc}=177kN$

∴实测索夹夹持钢绞线成品索主缆最大抗滑力安全系数 K_{fc} 为:

$$K_{fc}=F_{fc}/N_c=\frac{F_{fc}}{N_h \times \sin\varphi}=\frac{177}{65 \times \sin 23^\circ}=7.0 \geq 4.3$$

∴索夹体与钢绞线成品索主缆之间摩擦系数 μ 为:

$$\mu=\frac{F_{fc}}{kP_{tot}}=\frac{177}{2.8 \times 70 \times 6}=0.15$$

3)第三次试验扳手扭矩250N·m,螺栓预紧力约为80kN时,具体数值见表10;

表8 第一次试验结果

| 公称油压 P(MPa) | 对应顶推力 (kN) | 千斤顶活塞位移 (mm) | 索径(装索夹前)(mm) | | 索径(卸索夹后)(mm) | | |
|----------------|---------------|-----------------|--------------|-------|--------------|-------|-------|
| | | | 主缆外径 | | 活塞一端 | 另一端 | |
| 0.8 | 24 | 0 | 第一次 | φ84.0 | 索夹方向 | φ85.4 | φ84.0 |
| 1.6 | 47 | 0 | 第二次 | φ85.0 | 反方向 | φ82.8 | φ82.3 |
| 2.4 | 71 | 0.4 | 平均值 | φ84.5 | | | |
| 3.2 | 95 | 3.7 | | | | | |
| 4.0 | 118 | | 索夹开始滑移 | | | | |

表9 第二次试验结果

| 公称油压 P(MPa) | 对应顶推力 (kN) | 千斤顶活塞位移 (mm) | 索径(装索夹前)(mm) | | 索径(卸索夹后)(mm) | | |
|----------------|---------------|-----------------|-------------------|-------|--------------|-------|-------|
| | | | 主缆外径 | | 活塞一端 | 另一端 | |
| 0.8 | 24 | 0 | 第一次 | φ83.0 | 索夹方向 | φ82.9 | φ85.4 |
| 1.6 | 47 | 0 | 第二次 | φ83.7 | 反方向 | φ80.0 | φ80.9 |
| 2.4 | 71 | 0.5 | 平均值 | φ83.4 | | | |
| 3.2 | 95 | 1.0 | | | | | |
| 4.0 | 118 | 1.5 | | | | | |
| 5.0 | 148 | 6.0 | | | | | |
| 6.0 | 177 | | 索夹开始滑移(由于PE的延伸引起) | | | | |

表10 第三次试验结果

| 公称油压 P(MPa) | 对应顶推力 (kN) | 千斤顶活塞位移 (mm) | 索径(装索夹前)(mm) | | 索径(卸索夹后)(mm) | | |
|----------------|---------------|-----------------|---------------------------------------|-------|--------------|-------|-------|
| | | | 主缆外径 | | 活塞一端 | 另一端 | |
| 0.8 | 24 | 0 | 第一次 | φ85.4 | 索夹方向 | φ86.0 | φ87.2 |
| 1.6 | 47 | 1 | 第二次 | φ85.0 | 反方向 | φ83.3 | φ84.8 |
| 2.4 | 71 | 1.5 | 平均值 | φ85.2 | | | |
| 3.2 | 95 | 2.0 | | | | | |
| 4.0 | 118 | 2.5 | | | | | |
| 5.0 | 148 | 3.0 | 顶推试验后,按1~5MPa幅度进行循环试验60次,索夹位置没有发生滑移; | | | | |
| 6.2 | 183 | | 加压到6MPa后,活塞行程为70mm,加压到6.2MPa以上,索夹开始滑移 | | | | |



4) 第四次扳手扭力上到300N·m, 螺栓预紧力约为91kN时, 具体数值见表11;

表11 第四次试验结果

| 索径(装索夹前)(mm) | | 索径(卸索夹后)(mm) | | | 备注 |
|--------------|-------|--------------|-------|-------|--|
| 主缆外径 | | 索夹方向 | | 反方向 | |
| 第一次 | φ85.4 | 第一次 | φ84.7 | φ87.4 | 螺栓上到压紧力后, 保持10分钟, 卸掉索夹, 主缆PE外圆变成椭圆形, 变形量在-1mm至+2mm左右, 剖开后PE内部完好, 见图21、图22。 |
| 第二次 | φ85.6 | 第二次 | φ84.5 | φ87.9 | |
| 平均值 | φ85.5 | 第三次 | φ85.0 | φ87.0 | |
| | | 平均值 | φ84.7 | φ87.4 | |

∴索夹体夹持在钢绞线成品索PE外的压应力σ为:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{91 \times 1000 \times 6}{(\pi \times 86 - 2 \times 10) \div 2 \times 290} = 15.1 \text{MPa}$$

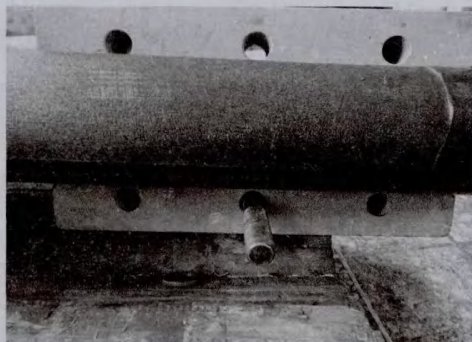


图27 试验照片

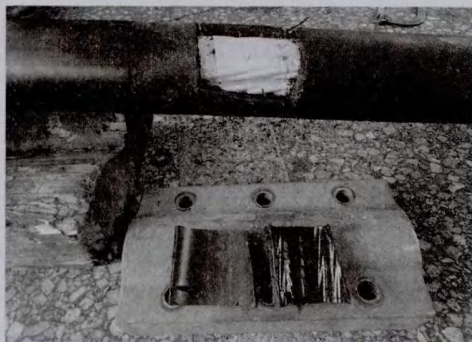


图28 试验照片

7.3.2 索夹夹持含小PE主缆试验情况:

由于主缆为成品索内钢绞线为无粘结筋, 每根钢绞线有单独的PE层, 且内含油脂型, 在上紧索夹过程中都较容易, 主缆直径变得较小, 并发现无粘结筋PE层被压破, 有油脂流出。因此我们只将螺栓力拧到约70kN, 两半索夹间隙已较小, 并做了顶推, 结果顶推力很小时索夹就已滑动。最后拆开索夹发现, 接触索夹部分主缆外圈钢绞线小PE基本都被压穿, 露出了钢丝, 中间的也基本压变形(见图29、图30、图31)。



图29 试验照片

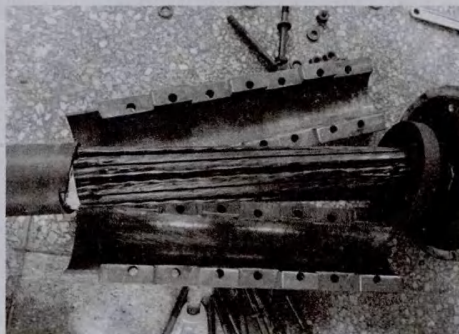


图30 试验照片

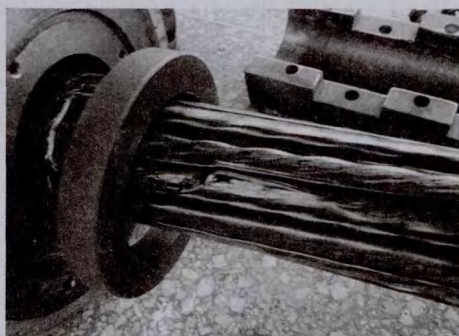


图31 试验照片

索夹夹持主缆PE抗滑试验结果表明:

- 1) 无粘结筋钢绞线编排而成的主缆索夹抗滑力很小, 不能满足一般吊索对索夹下滑力要求, 悬索桥主缆不应使用无粘结筋钢绞线。
- 2) 钢绞线或钢线成品索做主缆时, 索体PE内不能加入油脂, 索夹夹持在PE上时抗滑力虽能满足一般吊索力要求, 但吊索下滑力对PE的拉应

力和索夹对PE的压应力不应太大,以保证主缆PE不被挤压破坏和拉伸断裂,如果吊索力较大,索夹应夹持在剥除PE后的钢丝上。

3) 由于PE在拉压力作用下容易变形和断裂,设计夹持在主缆PE外的索夹应定时进行检查,查看螺栓副夹紧力是否需要补拧,PE是否已开裂,以便及早发现问题,及时进行相应的处理。

8 索夹处的防腐处理

索夹安装于主缆上,对主缆和吊索起联结作用,是结构受力的关键点,也是防腐薄弱点,如果索夹处防腐处理得不好,雨水、水汽等很容易从索夹端面渗透到主缆内,从而使主缆发生锈蚀。因此索夹的结构设计不仅需要满足规范要求的强度和安全,还需要考虑有效的防腐。最初成品索主缆索夹处的防腐结构见图32,当时索夹环缝的防腐是参考常规悬索桥的防腐方式,在索夹两端先用HM106防腐腻子塞满,再用XM55防腐剂填补平剥除掉的PE层,再加一层HM106防腐腻子,最后用热缩带缠绕接口处。此种防腐方式存在的问题是:由于钢丝、索夹与PE、腻子的收缩系数的不同,且主缆外没有做缠丝,在日照、温差等因素的影响下,索夹与腻子处很容易开裂脱离,而热缩带只能防护到PE与腻子处,雨水、水汽从开裂处渗透到主缆内。为避免防腐效果的失效,我们对索夹结构和防腐结构做了优化改进,在索夹两端增加防腐环,新的索夹结构方案见图32。

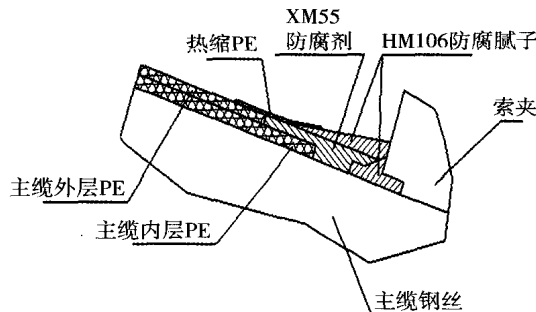


图32 索夹两端环缝防腐示意图

在索夹结构改进的同时,对防腐步骤进行优化改进,使索夹与PE层很好的过渡,制定出成品索索夹施工工法如下:

8.1 成品索主缆索夹处防腐施工工法:

(1) 主缆线型调整到位后,经过监控测定准确的索夹安装位置,剥除主缆PE长度比索夹的

夹持长度(不含两端防腐环的长度)略长一点,满足索夹的安装即可,以保证该防腐方案的可靠性;

(2) 对索夹安装两端的PE外层进行拉毛处理,以增加密封剂与PE的粘接性。

(3) 待索夹安装后,在索夹两端的防腐环内缝(见图33)和上下索夹之间的缝隙用HM106聚硫密封剂填充密实。其中两端的HM106聚硫密封剂分两次填充,待第一次固化后方可进行第二次填充;

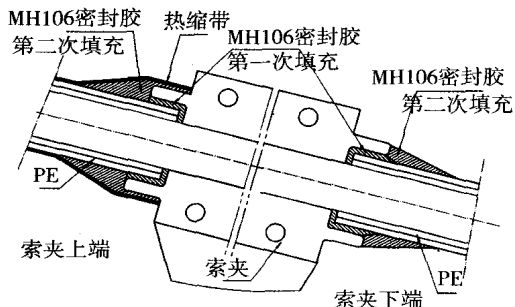


图33 索夹环缝防腐结构图

(4) 待HM106聚硫密封剂固化后,在索夹的上端再用热缩带缠包密封;对于桥中间的一对索夹,其两端都按索夹上端的防腐要求;

(5) 将索夹处的所有表面可用钢刷、丙酮或二甲苯清理干净,按索夹施工后的防腐要求进行涂刷油漆。

近年来一些主缆采用成品索的工程实例(见表12),工程照片见图34、图35、图36、图37,是最近在来宾景观二号桥实拍的索夹处防腐效果,可见其防护非常完好。因此好的设计并不是都需要推翻现有模式进行大的改造,只需要一点小变动就能起到大效果。优化后的索夹结构和防腐工法,经过多年实桥的运用证实,该方案对索夹两端防腐变得更加可靠和耐久。

表12 近年来主缆采用成品索统计表

| 序号 | 桥名 | 省份 | 年份 | 主缆型号 | 吊索型号 |
|----|-----------|------|------|----------|---------|
| 1 | 北京怀柔景观桥 | 北京 | 2008 | PES5-127 | GJ15-3 |
| 2 | 醴陵市淦江河人行桥 | 湖南 | 2008 | PES7-139 | PES5-13 |
| 3 | 迁西滦河桥 | 河北唐山 | 2009 | PES7-313 | PES5-37 |
| 4 | 江油哪吒大桥 | 四川 | 2010 | PES5-451 | PES5-19 |
| 5 | 乌鲁木齐北一路桥 | 新疆 | 2011 | PES5-109 | PES5-19 |
| 6 | 来宾景观二号桥 | 广西 | 2011 | PES5-253 | GJ15-3 |
| 7 | 临沂柳青河 | 山东 | 2013 | PES5-121 | PES5-13 |
| 8 | 辽阳中华桥 | 辽宁 | 2013 | GJ15-55 | GJ15-3 |



图34 工程照片



图35 工程照片



图36 工程照片



图37 工程照片

9 结论

目前, 虽然还没有实际工程采用可换式主缆结构, 但经过以上一系列结构设计和试验研究, 采用化整为零的方法, 将悬索桥主缆由原来单根设计成多根小主缆, 可逐根拆装更换小主缆, 从而实现悬索桥的主缆可更换。因此在中小型悬索桥上实现主缆的可更换, 可使主缆小型化, 使主缆的制作和运输更加方便, 施工机具小型化, 施工、维修方便, 适合山区及交通不便地方建造中小型悬索桥使用。

参考文献

- [1] 中交公路规划设计院有限公司等. 《特大跨径钢箱梁悬索桥设计指南》(报批稿) 2010年10月
- [2] 雷俊卿等. 悬索桥设计[D]. 人民交通出版社, 2002
- [3] 柳州铁路工程质量检测中心有限公司. 主缆可换索式悬索桥索夹试验报告, 2012年9月

(上接第15页)

表9 结构形式比较

| 楼盖形式 | 钢筋 (kg) | 混凝土 (m ³) | 模板 (m ²) | 结构层高 (mm) | 每平方米造价 (元) |
|----------|---------|-----------------------|----------------------|-----------|------------|
| 主次梁结构 | 59.67 | 0.352 | 1.68 | 1000 | 523.63 |
| 普通无梁实心板 | 52.77 | 0.460 | 1.00 | 450 | 493.17 |
| 普通无梁空心板 | 40.48 | 0.342 | 1.00 | 500 | 480.54 |
| 预应力无梁空心板 | 31.20 | 0.338 | 1.00 | 500 | 471.45 |

表10 修正结果比较

| 楼盖形式 | 计算造价 (元/m ²) | 高度修正值 | 重量修正值 | 修正造价 (元/m ²) | 修正价差 (元/m ²) |
|----------|--------------------------|--------|-------|--------------------------|--------------------------|
| 主次梁结构 | 523.63 | 72.00 | 0.00 | 595.63 | 0.00 |
| 普通无梁实心板 | 493.17 | -50.00 | 14.60 | 457.77 | -137.86 |
| 普通无梁空心板 | 480.54 | -47.50 | 0.59 | 433.63 | -162.00 |
| 预应力无梁空心板 | 471.45 | -47.50 | 0.12 | 424.07 | 171.56 |

5 结语

在合适的部位将现浇楼盖这一新兴技术与预应力这一传统技术有机结合起来, 往往能达到出人意料的技术效果, 从已经完成的包括奥运工程

在内的诸多工程的各项指标看, 预应力空心楼盖技术的经济效益和社会效益十分明显, 相信今后有更多的工程会采用这一新技术。