

# 中承式钢管混凝土拱桥吊杆更换临时兜吊系统的设计和施工

窦勇芝 黎祖金 李东平

(柳州欧维姆工程有限公司 广西柳州 545005)

**摘 要:** 本文结合旧桥维修工程实例,介绍了中承式钢管混凝土拱桥吊杆更换中柔性临时兜吊系统的选型、体系组成及各构件设计要点,并通过有限元程序进行计算验证。另外,重点介绍了临时兜吊系统相关安装及施工工艺,经工程实践证明该柔性临时兜吊系统安全有效地实现了吊杆更换。同时该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。

**关键词:** 中承式钢管拱桥 吊杆更换 临时兜吊系统

## 1 工程概况

仙游木兰溪大桥始建于1996年间,全桥共分3孔,中孔净跨64m,两边孔净跨54m,均为中承式钢管混凝土拱结构。中孔钢管混凝土肋拱矢跨比1/3.2,拱轴为二次抛物线,按无铰拱设计,拱肋采用 $2 \times \phi 0.75\text{m}$ 钢管组合而成的哑铃型截面,肋高2.0m,内灌C40混凝土。两侧边孔钢管混凝土肋拱矢跨比1/3.75,拱肋采用 $2 \times \phi 0.75\text{m}$ 钢管组成的哑铃型拱肋,肋高1.8m,桥面以上设两根横撑联系,其余构造同中孔。原吊杆采用56根 $\phi 7$ 高强平行钢丝组成,外套钢管,内灌水泥浆防护,横梁为无粘结预应力混凝土构件。桥面为装配式钢筋混凝土筒支板,桥面连续,全桥共设4道伸缩缝。

目前该桥已运营10多年,由于期间往返于桥上交通的车辆超载现象严重以及混凝土收缩等原因,造成了局部受力构件出现裂缝等问题。根据2010年检测报告结果,该桥发现有少数吊杆局部锈蚀,全桥有两根吊杆灌浆不密实,同时下锚头处出现锈蚀,并有进一步发展的可能,建议立即对该处吊杆进行更换。经加固设计单位确定需对全桥吊杆进行更换,并对其余病害进行维修加固,加固后桥梁按限载30t标准进行管控。

根据现场对全桥吊杆长度的复测,以及施工可操作空间的考虑,吊杆更换采用临时兜吊体系施工,临时兜吊体系分为短吊杆兜吊体系和长吊杆兜吊体系。

## 2 临时兜吊体系的设计原则

(1) 能满足同原吊杆恒载作用下相同的受力状态,并保证有相当的强度、刚度和稳定性安全储备。

(2) 与原吊杆进行力系转换过程中,能够分级卸载或加载定量控制,保持原结构受力状态不变和工作状态的连续性。

(3) 临时兜吊体系在安装和施工使用过程中,不会对原结构构件造成损伤,并避免构件局部应力集中情况。

## 3 长吊杆临时兜吊体系的设计

### 3.1 临时兜吊体系组成

长吊杆更换临时兜吊系统(如图1所示)由止滑钢挡块、 $\phi 32$ 钢丝绳、上分配梁、临时索钢绞线、YDCLLJ500-100A千斤顶和下托梁组成。在拱肋上距离原吊杆中心各两侧0.40m处分别焊接止滑钢挡块,通过4道 $\phi 32$ 钢丝绳将上分配梁兜吊在拱肋和桥面之间,在各吊点中心上、下游侧各0.575m位置桥面处分别采用金刚钻机钻 $\phi 80\text{mm}$ 孔洞,以穿钢绞线。以上分配梁为反力支架,通过4台千斤顶同时张拉4束临时索钢绞线,临时索一端通过安装挤压套锚固在下托梁底,将横梁托起,实现原桥吊杆所有受力均匀地转换到临时索上。另外,托梁与横梁间垫5mm厚橡胶板,防止兜吊加载时因局部应力集中对吊杆横梁造成损伤。

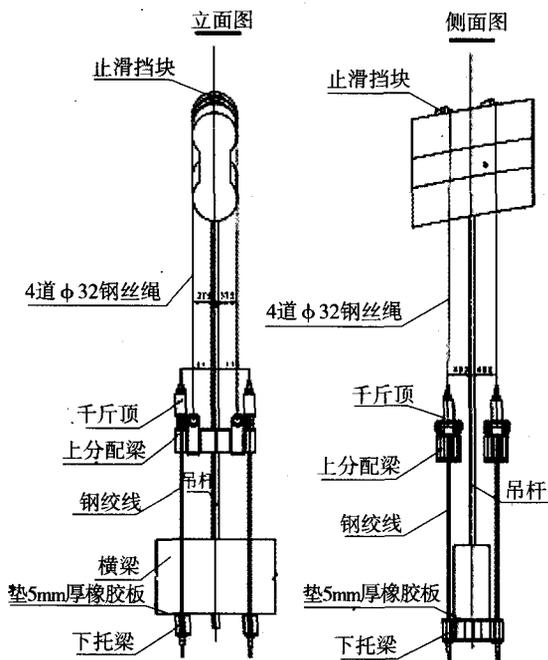


图1 长吊杆临时兜吊体系示意图

### 3.2 止滑钢挡块设计

吊杆更换最大控制索力为1102kN, 在止滑挡块上最大下滑力位置为中孔短吊杆处, 拱肋法线与竖直面夹角为 $44^{\circ} 38' 53''$ , 故最大下滑力为:

$$1102 \times \sin 44^{\circ} 38' 53'' = 774.43 \text{ kN}$$

止滑挡块由N1、N2构件组成, 材料Q235, 其与钢管拱连接采用角焊缝焊接, 角焊缝焊脚高度为20mm, N1长400mm, 宽120mm, 厚40mm, 两端焊缝长度分别为139mm; N2长210mm, 宽120mm, 厚30mm, 两侧焊缝长度分别为210mm (如图2所示)。

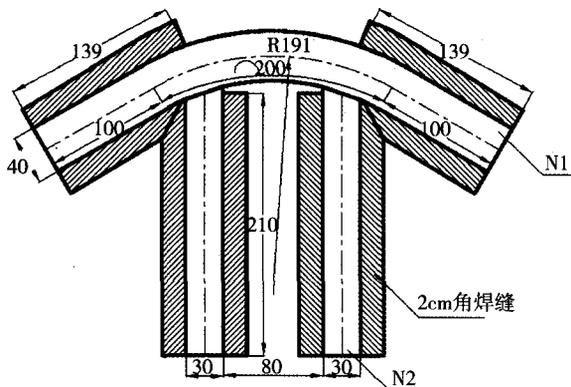


图2 止滑挡块平面示意图

焊缝长度验算:

N1侧面角焊缝:

$$N = 774.43/2 = 387.215 \text{ kN}$$

$$h_e = 0.7 \times 20 = 14 \text{ mm}$$

$$l_w = (139 - 2 \times 20) \times 4 = 396 \text{ mm}$$

$$N / (h_e l_w) = 387.215 \times 1000 / (14 \times 396) \\ = 69.84 \text{ MPa} < f_f = 160 \text{ MPa}$$

满足要求。

N2侧面角焊缝:

$$N = 774.43/2 = 387.215 \text{ kN}$$

$$h_e = 0.7 \times 20 = 14 \text{ mm}$$

$$l_w = (210 - 2 \times 20) \times 4 = 680 \text{ mm}$$

$$N / (h_e l_w) = 387.215 \times 1000 / (14 \times 680) \\ = 40.67 \text{ MPa} < \beta f_f = 160 \text{ MPa}$$

满足要求。

### 3.3 钢丝绳选型

钢丝绳采用 $6 \times 37 + \text{FC}$ 圆股光面钢丝绳, 兜吊体系采用4道1770MPa的 $\phi 32$ 钢丝绳组成。长吊杆更换控制索力最大值为700kN。则单根钢丝绳受力为:  $700/4/4 = 43.75 \text{ kN}$

单根钢丝绳最小破断力为535kN, 安全系数为 $535/43.75 = 12.2$ , 满足要求。

### 3.4 上分配梁设计

上分配梁材料Q235, 由双I40b工字钢拼焊组成主要承力构件, 通过设置耳板、销子与钢丝绳联接, 距耳板中心200mm外侧设置千斤顶反力架 (如图3、图4所示)。

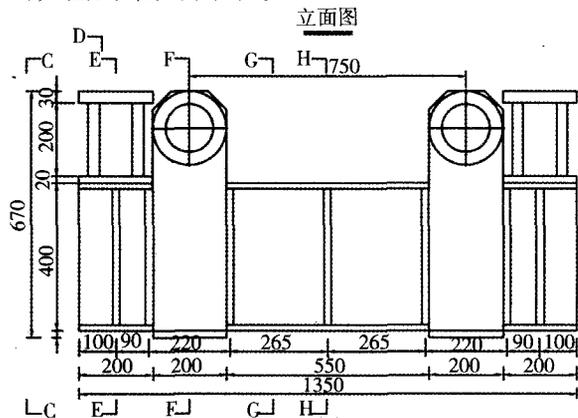


图3 上分配梁构造立面图 (单位: mm)

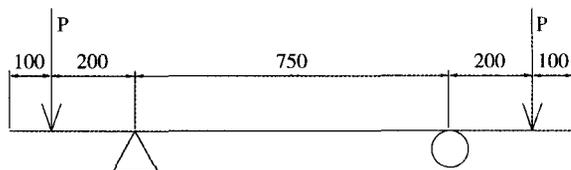


图4 计算简图 (单位: mm)

长吊杆更换临时兜吊系统控制最大索力为700kN,按1.4考虑冲击及不均匀系数,单个上分配梁上每个反力架设计作用力为:

$$1.4 \times 700 / 2 / 2 = 245 \text{ kN}$$

采用通用有限元软件对单个上分配梁进行建模计算,利用构件、荷载的对称性(如图5所示)。

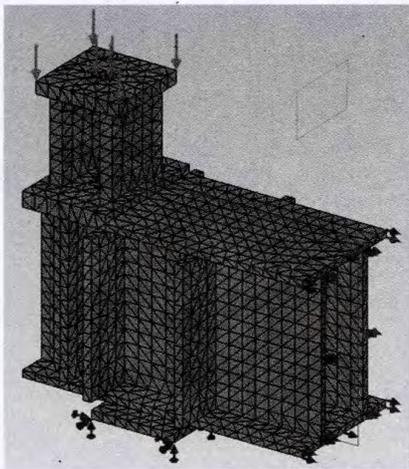


图5 简化有限元模型示意图

跨中设置对称边界条件,耳板对应位置型钢底部设置固定边界条件,反力架位置加载245kN。

由计算结果可知,最大拉、压应力最大值均小于设计值215MPa,剪应力最大值均小于设计值125MPa;最大变形为0.17mm,小于容许变形 $2 \times 200 / 400 = 1 \text{ mm}$ ,满足要求(见表1)。

表1 应力和变形计算结果

名称	最小值	最大值
法向应力	-103.8MPa	27.9MPa
主压应力	-107.5MPa	9.8MPa
主拉应力	-18.9MPa	46.5MPa
剪应力	-12.3MPa	27.9MPa
变形值		0.17mm

注:拉压应力中负值为拉应力,正值为压应力

### 3.5 千斤顶选型

每道上分配梁上设置2台千斤顶,每个反力点最大作用力为:

$1.4 \times 700 / 2 / 2 = 245 \text{ kN}$ ,采用型号YDCLLJ500-100A千斤顶,公称张拉力500kN,安全系数为: $500 / 245 = 2.04$ ,满足要求。

### 3.6 临时索选型

临时索采用5根公称直径 $\phi 15.24 \text{ mm}$ 钢绞线,抗拉强度为1860MPa,单根破断力258.54kN,安全系数为: $5 \times 258.54 / 245 = 5.28$ ,满足要求。

### 3.7 下托梁设计

下托梁材料Q235,由双32c槽钢背靠背,缀板拼焊组成主要承力构件,钢绞线一端锚固于距跨中400mm位置处(如图6、图7所示)。

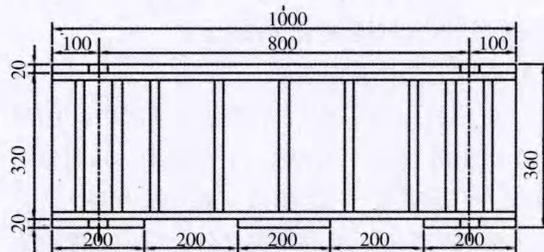


图6 下托梁立面图(单位: mm)

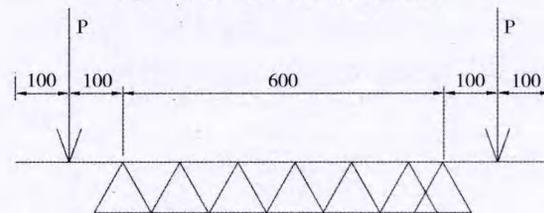


图7 计算简图(单位: mm)

长吊杆更换临时兜吊系统控制最大索力为700kN,按1.4考虑冲击及不均匀系数,单个下托梁上每个设计作用力为:

$$1.4 \times 700 / 2 / 2 = 245 \text{ kN}$$

采用通用有限元软件对单个下托梁进行建模计算(如图8所示)。

跨中对应横梁宽度600mm位置设置固定边界条件,两端钢绞线锚固端分别加载245kN。

由计算结果可知,最大拉、压应力最大值均小于设计值215MPa,剪应力最大值均小于设计值125MPa;最大变形为0.16mm,小于容许变形 $2 \times 100 / 400 = 0.5 \text{ mm}$ ,满足要求(见表2)。

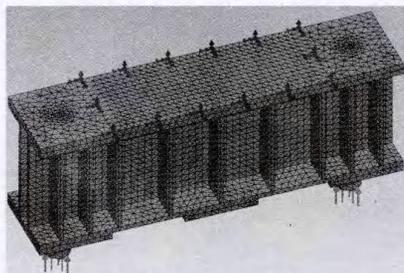


图8 有限元简化模型

表2 应力和变形计算结果

名称	最小值	最大值
法向应力	-107.9MPa	59.6MPa
主压应力	-164.5MPa	9.8MPa
主拉应力	-37.8MPa	82MPa
剪应力	-56.7MPa	56.5MPa
变形值		0.16mm

注：拉压应力中负值为拉应力，正值为压应力

## 4 短吊杆临时兜吊体系的设计

### 4.1 临时兜吊体系组成

短吊杆更换临时兜吊系统（如图9，10所示）由止滑挡块、钢丝绳、上分配梁、临时索钢绞线、千斤顶和下托梁组成。通过止滑挡块将上分配梁兜吊在拱肋和桥面之间，以上分配梁为反力支架，通过2台千斤顶单端张拉临时索，临时索一端通过安装挤压套锚固在下托梁底，将横梁托起，实现临时索与原吊杆索力转换。

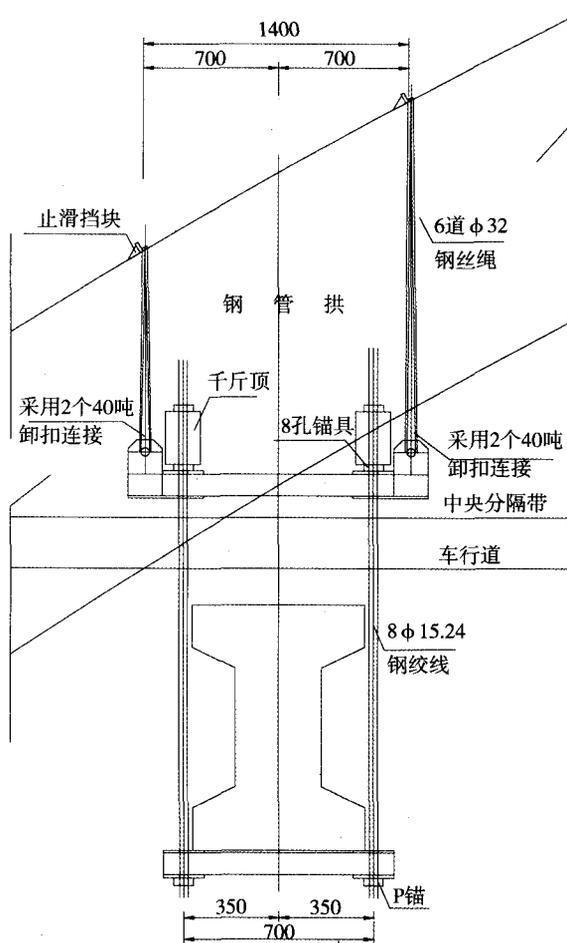


图9 短吊杆临时兜吊体系立面图（单位：mm）

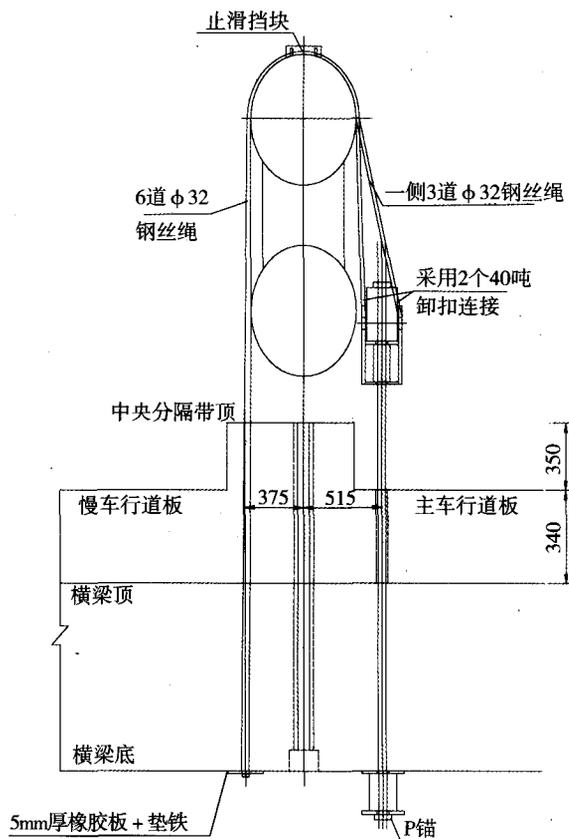


图10 短吊杆临时兜吊体系侧面图（单位：mm）

### 4.2 钢丝绳选型

钢丝绳采用6×37+FC圆股光面钢丝绳，兜吊体系采用4道1770MPa的φ32钢丝绳组成。短吊杆更换控制索力最大值为1102kN。则单根钢丝绳受力为：

$$1102/4/4=68.875kN$$

单根钢丝绳最小破断力为535kN，安全系数为535/68.875=7.8，满足要求。

### 4.3 上分配梁设计

上分配梁材料Q235，由双I40b工字钢拼焊组成主要承力构件，通过设置耳板、销子与钢丝绳联接，距耳板中心350mm内侧设置千斤顶反力架（如图11、图12所示）。

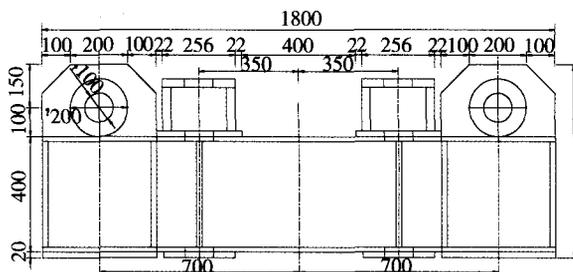


图11 上分配梁立面图示意（单位：mm）

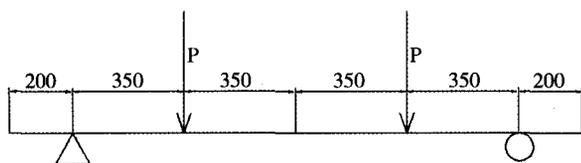


图12 计算简图 (单位: mm)

短吊杆更换临时兜吊系统控制最大索力为1102kN,按1.4考虑冲击及不均匀系数,单个上分配梁上每个反力架上设计作用力为:

$$1.4 \times 1102 / 2 = 771.4 \text{ kN}$$

采用通用有限元软件对单个上分配梁进行建模计算,利用构件、荷载的对称性(如图13所示)。

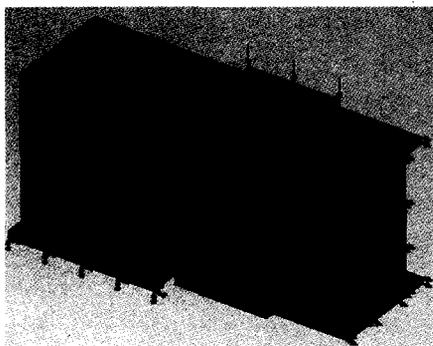


图13 有限元简化计算模型

跨中设置对称边界条件,耳板对应位置型钢底部设置固定边界条件,反力架位置加载771.4kN。

由计算结果可知,最大拉、压应力最大值均小于设计值215MPa,剪应力最大值均小于设计值125MPa;最大变形为0.31mm,小于容许变形 $1400/400=3.5\text{mm}$ ,满足要求(见表3)。

表3 应力和变形计算结果

名称	最小值	最大值
法向应力	-132.3MPa	65.8MPa
主压应力	-186.6MPa	10MPa
主拉应力	-55.7MPa	90.2MPa
剪应力	-30.4MPa	80.9MPa
变形值		0.31mm

注:拉压应力中负值为拉应力,正值为压应力

#### 4.4 千斤顶选型

单侧每道上分配梁上设置2台千斤顶,每个反力点最大作用力为:

$$1.4 \times 1102 / 2 = 771.4 \text{ kN}, \text{ 采用型号 YCW150B}$$

千斤顶,公称张拉力1492kN,安全系数为: $1492/771.4=1.93$ ,满足要求。

#### 4.5 临时索选型

临时索采用8根公称直径 $\phi 15.24\text{mm}$ 钢绞线,标准强度1860MPa,单根破断力258.54kN,安全系数为: $258.54 \times 8/771.4=2.68$ ,满足要求。

#### 4.6 下托梁设计

下托梁材料Q235,由双I40b工字钢拼焊组成主要承力构件,钢绞线一端锚固于距跨中350mm位置(如图14、图15所示)。

短吊杆更换临时兜吊系统控制最大索力为1102kN,按1.4考虑冲击及不均匀系数,单个下托梁上每个设计作用力为:

$$1.4 \times 1102 / 2 = 771.4 \text{ kN}$$

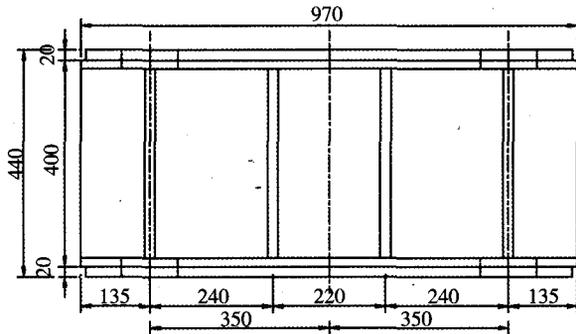


图14 下托梁立面图 (单位: mm)

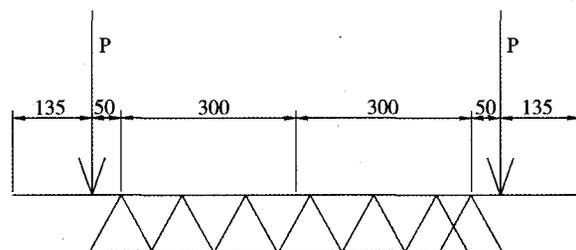


图15 计算简图 (单位: mm)

采用通用有限元软件对单个下托梁进行建模计算,利用构件、荷载的对称性,简化模型计算(如图16所示)。

跨中设置对称边界条件,对应横梁宽度600mm位置设置固定边界条件,钢绞线锚固端加载771.4kN。

由计算结果可知,最大拉、压应力最大值均小于设计值215MPa,剪应力最大值均小于设计值125MPa;最大变形为0.20mm,小于容许变形 $2 \times 50/400=0.25\text{mm}$ ,满足要求(见表4)。

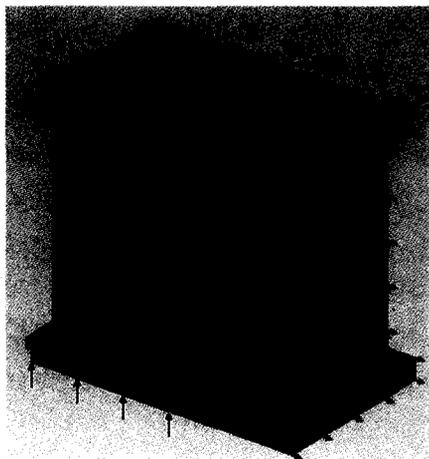


图16 有限元简化计算模型

表4 应力和变形计算结果

名称	最小值	最大值
法向应力	-122.6MPa	16.1MPa
主压应力	-131.8MPa	9.2MPa
主拉应力	-37.6MPa	80.6MPa
剪应力	-34.0MPa	54.3MPa
变形值		0.20mm

注：拉压应力中负值为拉应力，正值为压应力

## 5 临时兜吊体系的安装与施工要点

### 5.1 临时兜吊体系的安装要点

#### (1) 长吊杆临时兜吊体系的安装要点：

在拱肋上距离原吊杆中心各两侧0.4m分别焊接止滑钢挡块，通过4道 $\phi 32$ 钢丝绳将上分配梁兜吊在拱肋和桥面之间。一根钢丝绳一端绕过上分配梁耳板承重销临时固定，另一端绕过钢管拱，通过2.5t手拉葫芦收紧，再绕过上分配梁另一侧耳板承重销后，绕过钢管拱，与起始端用相应绳夹锚固，保证一道上分配梁耳板各一侧有2道钢丝绳兜起，让横梁的自重通过临时兜吊系统传递到钢管拱上。另外，在承重销上设置限位套筒，防止钢丝绳在承重销上左右滑动。

钢丝绳用相适的绳夹锚固，当钢丝绳进入受力的工况下需再次扭紧绳夹。

安装好兜吊系统后，先用2台YDC240Q千斤顶预紧4束钢绞线，并调整工字钢兜吊梁平整度。

临时索的张拉端设置在上分配梁反力架，采用4台YDCLLJ500-100A千斤顶固定在分配梁反力座上，反力座里设置一套安全工具锚锁紧，千斤

顶配自动液压锁，通过分配阀控制4台千斤顶同步张拉或放松。

临时吊杆下托梁按设计的间距与上分配梁垂直交叉布置在吊杆下锚头旁，临时吊杆锚固端配置P锚锚固。

#### (2) 短吊杆临时兜吊体系的安装要点：

在拱肋上距离原吊杆中心各两侧0.7m分别焊接止滑钢挡块，主行车道侧通过4道 $\phi 32$ 钢丝绳将上分配梁兜吊在拱肋和桥面之间。一根钢丝绳一端绕过上分配梁耳板承重销临时固定，另一端绕过钢管拱，兜住横梁底，绕过另一端钢管拱，通过2.5t手拉葫芦收紧，绕过另一侧上分配梁耳板承重销，按原路径返回起始端用相应绳卡锚固，保证一道上分配梁耳板各一侧有2道钢丝绳兜起，让横梁的自重通过临时兜吊系统传递到钢管拱上。另外，在承重销上设置限位套筒，防止钢丝绳在承重销上左右滑动。

钢丝绳用相适的绳夹锚固，当钢丝绳进入受力的工况下需再次扭紧绳夹。

安装好兜吊系统后，先用2台YDC240Q千斤顶预紧2束钢绞线，并调整工字钢兜吊梁平整度。

临时索的张拉端设置在上分配梁反力架，采用2台YCW150B千斤顶固定在分配梁撑脚上，撑脚里设置一套安全工具锚锁紧，千斤顶配自动液压锁，通过分配阀控制2台千斤顶同步张拉或放松。

临时吊杆下托梁按设计的间距与上分配梁平行布置在吊杆下锚头旁，临时吊杆锚固端同样配置P锚锚固。

### 5.2 临时兜吊体系与吊杆力系转换施工要点

(1) 临时兜吊体系与旧吊杆力系转换施工要点：设计采用逐级加载（释放）内力的方法，将原有吊杆索力逐步转移到临时吊杆上。为确保桥面不会因此出现大的应力变化，将吊杆力设计值分为5级，逐级施加至临时吊杆，相对应逐批切断原吊杆钢丝（预应力临时吊杆的张拉与原吊杆钢丝的切割交替进行），即原有吊杆分5批割掉。在索力转换全过程中，应注意跟踪监测索力和更换吊杆所处的高程变化情况以及关键截面处的应力变化情况，观察桥面有无裂缝产生，同

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)。

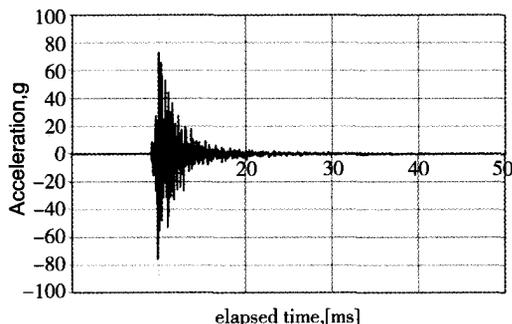


图8 拉索疲劳试验过程中采集到的钢绞线断丝信号

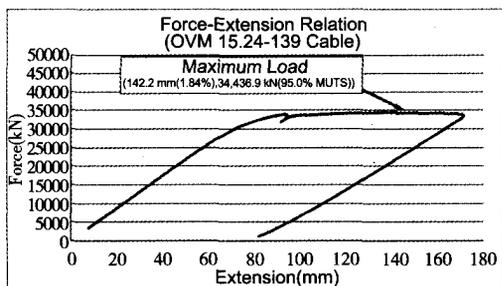


图9 OVM250-139拉索试件静拉伸试验曲线

## 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.