

# 斜拉索病害及其养护维修

黄 侨 任 远 马文刚

(东南大学 桥梁与隧道工程研究所 江苏南京 210096)

**摘 要:**在国内,斜拉桥以其跨越能力和独特的美观效果在近二十年内得到长足的发展和广泛的应用。然而,由于斜拉桥结构体系本身的复杂性、材料本身的缺陷,施工技术、方法、质量问题,环境腐蚀,车辆超载及运营期养护管理不到位等因素,使得已建成的斜拉桥的拉索或多或少地出现各种病害。这不仅影响了桥梁的使用性能和正常运营,甚至会降低桥梁主体结构安全余地,给桥梁带来安全性方面的隐患和耐久性方面的缺陷。本文先对我国现有的斜拉桥拉索病害情况进行较详细的调查分析,归纳总结斜拉桥拉索的使用现状及主要病害如PE护套开裂,索丝腐蚀断裂,锚具腐蚀、疲劳开裂等,并对病害的产生原因进行分析。在此基础上,提出相应的包括设计、建设中的建议,运营和管理阶段的养护维修策略和措施。

**关键词:**斜拉索 病害 机理 养护维修

## 1 引言

斜拉索是斜拉桥的主要承重结构之一,其安全性直接影响到斜拉桥的安全。九十年代以来,我国修建了数以百计的斜拉桥,这些桥梁为我国的经济发展起到了重要作用。然而由于我国的拉索材料和技术上的问题,斜拉桥的耐久性没有得到应有的保证,直接影响到斜拉桥的安全。这使得桥梁养护管理者不得不面对着大量的斜拉桥换索问题。本文旨在对我国的斜拉桥拉索病害情况进行较详细的调查研究,归纳分类了已有的斜拉索病害现象及产生的原因。表1给出调研得到的我国一些斜拉桥拉索病害的实际情况。

## 2 斜拉索病害及原因分析

斜拉桥的桥跨结构的重量和桥上承担的活荷载的绝大部分都是通过斜拉索传递到索塔上的。无论是什么类型的斜拉桥均要求其斜拉索具备良好的抗疲劳性能、耐久性、抗腐蚀性和安全性。

斜拉索因其材料为钢材,故具有易腐蚀的特点。此外,斜拉索在车辆荷载的反复作用下会产生疲劳,而风荷载引起的抖振、颤振以及因雨水顺索流动而形成的雨振等振动现象加大了斜拉索疲劳作用的影响,同时会破坏斜拉索的防护体系,加速斜拉索的锈蚀进程。在对国内外多座斜拉桥拉索的病害资料进行收集、分

析的基础上,对目前普遍使用的斜拉索进行分析,将其主要病害分为以下几个类:

### 2.1 拉索护套损伤

在各种防护体系类型的斜拉索病害中几乎都出现了护套开裂问题。常用的PE防护层损伤表现为横向开裂、纵向开裂、刮痕、断开、起皱,脱层、凹坑、翘皮等,如图1所示。拉索PE护套损伤原因主要有以下几点:

(1) PE护套长期暴露在空气中,经受着紫外线的照射、雨水冲淋、有害气体的腐蚀和拉伸应力的作用。其中,拉伸应力作用使得PE防腐层的分子间产生间隙,紫外线的照射或有害溶剂渗透到间隙中会导致分子间的凝聚力(分子间的强力结合)降低,引起分子移动,其宏观表现为PE防护材料的老化和龟裂。很多护套的开裂都是从索的迎光面开始的。此外,不同的PE粒子材料,其耐环境应力开裂的性能差异较大。而受种种因素的影响,国内许多工程拉索所用的PE材料的耐环境应力开裂的性能指标不满足要求,护套在短期使用后便会产生开裂现象。

(2) 索体是在无应力状态下成索的,当索体工作时,护套随着钢丝伸长而始终处于高应力状态下,在许多工况下还存在着交变拉应力。因此,长期在高应力状态下工作,PE的分子与分子的结合力逐渐下降,因而导致PE的耐

表1 部分国内桥梁斜拉索病害调查

桥名	建成时间	桥型	拉索防护类型	病害现象
上海新五桥	1975	双塔双索面竖琴式斜拉桥	沥青玛蹄脂、水泥砂浆	拉索保护层多处开裂、严重处内部钢筋部分锈蚀、车辆过桥时振动幅度很大。
红水河铁路斜拉桥	1981	双塔竖琴型塔梁固结、塔墩分离混凝土斜拉桥	防腐涂料、玻璃丝布、金属套管护罩	拉索护套有深度裂纹、锚端积有大量的锈水。
济南黄河大桥	1982	双塔双索面混凝土斜拉桥	铝制套管压水泥浆	部分拉索的套管腐蚀、胀裂；不饱满、钢丝裸露，钢丝表面镀锌层已不存在，钢丝不同程度锈蚀。
广州海印大桥	1988	双塔单索面混凝土斜拉桥	镀锌高强钢丝、水泥浆压浆层、黑色聚乙烯套管、环氧玻璃钢	9号索断索、15号索松弛，部分拉索钢丝锈蚀严重，拉索塔端压灌的水泥浆不饱满、不硬化。
广东九江大桥	1988	独塔双索面混凝土斜拉桥	普通预应力钢丝、热挤LDPE护套	70%拉索PE护套不同程度损坏，钢丝严重锈蚀；个别PE护套中有水流出，两端锚头锈蚀严重；
四川犍为岷江斜拉桥	1990	双塔双索面混凝土斜拉桥	热挤PE护套	10%的拉索PE护套开裂，部分出现锈蚀断丝现象，锚端内有积水，部分锈斑。
上海恒丰路立交桥	1987	独塔单索面混凝土斜拉桥	PE护套、压注水泥浆、彩色玻璃钢	索内空穴，锈蚀非常普遍，拉索上部的锈蚀最为严重；拉索抗拉强度平均下降15%。
云南三达地怒江斜拉桥	1994	独塔双索面塔墩固结混凝土斜拉桥	黑色PE防护层	筒内密封环和连接筒锈蚀；部分上、下锚具严重锈蚀；部分锚具钢丝墩头严重移位、墩头断裂。
广东三水大桥	1996	独塔双索面斜拉桥	PE+PU防护层、双层拉索	导管防护材料老化变质；双层护套外层起皱、开裂并形成存水腔，有积水；内层护套部分出现环形纵向开裂。
广东番禺大桥	1998	双塔双索面混凝土斜拉桥	双层HDPE防护层	个别减振器失效；个别护套受减振器挡环割蚀破损；部分锚锈蚀，拉索断丝。

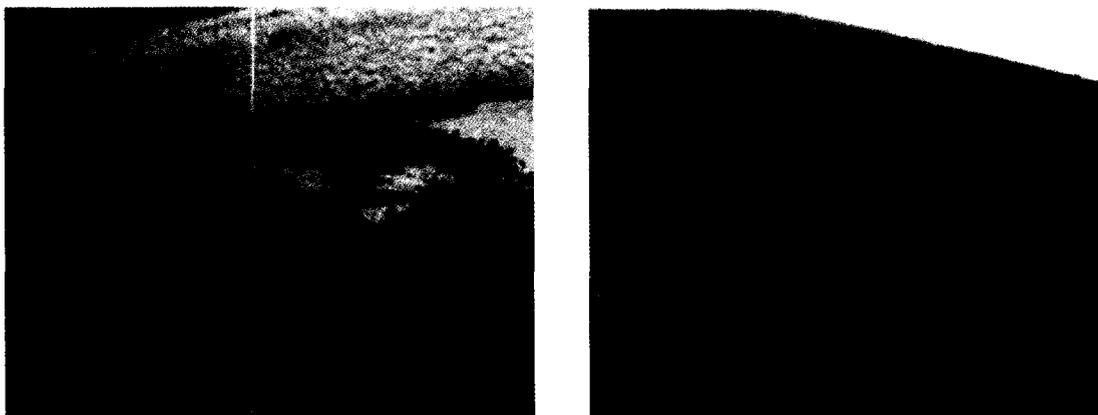


图1 斜拉索护套纵、横向开裂

环境开裂性能降低，造成PE提前开裂。

(3) 在活载的作用下，拉索承受的荷载不同，其内力不断变化，钢索伸长量也是往复变化的，这种往复变化将使得PE材料出现疲

劳、开裂，破坏防护系统的整体性。

(4) 施工时对索体的保护措施普遍不够，施工过程中索体的损伤时有发生。拉索安装过程中，由于拉索与孔道的方向很难对准，

从而导致拉索在进入孔道的过程中会经常出现违规操作。如有时会会出现牵引机拉住拉索一头强行向孔道中输送, 这个过程中PE护套和导管很容易发生摩擦, 导管的尖锐处就很有可能会划伤了PE护套, 从而在这里形成防腐体系的薄弱层。有时甚至会出现牵引机直接拉住拉索PE护套的情况。拉索施工时对PE护套造成的刻痕和划伤, 将会导致拉索在运营后不久就开裂。

斜拉索PE护套开裂往往是各种因素单独作用或综合作用的结果, 需要结合具体情况进行分析。

## 2.2 拉索钢丝腐蚀

斜拉索钢丝基本上是后于防护体系的失效才开始腐蚀的。这种情况下, 可以通过对拉索防护体系的检查和养护去尽量延缓腐蚀的出现。但也有些拉索却是从内部开始腐蚀的。例如有些拉索的索套密封结构没有做好, 这段薄弱环节的拉索最先开始腐蚀。还有早期压注水泥浆防护体系中出现的内部灌浆不饱满, 水蒸汽挥发不出去, 温度变低的情况下冷凝成水滴腐蚀了钢丝。如图2所示。

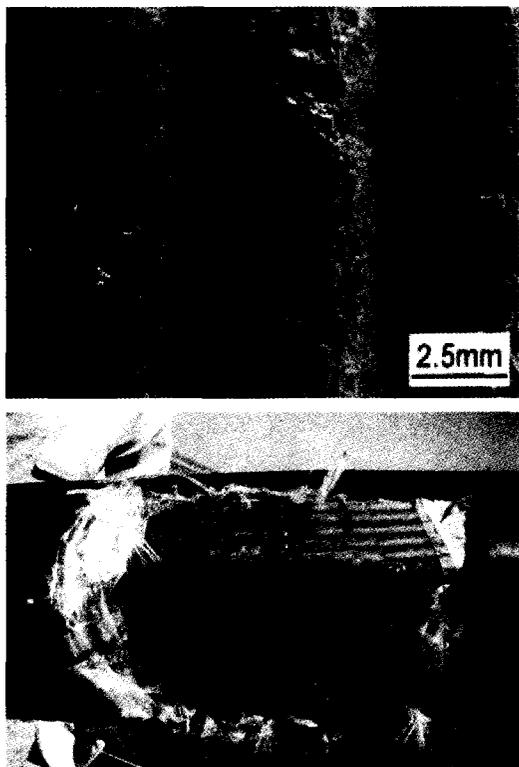


图2 拉索腐蚀

斜拉索的腐蚀主要分为以下几种:

### (1) 点腐蚀

点蚀主要发生在表面有钝化膜或保护膜的金属上。表现为外层钢丝束表面可见凹凸不平的点腐蚀凹坑, 大小深浅不一, 形状各异。点腐蚀是线缆钢丝最容易出现的一种腐蚀形式。

### (2) 应力腐蚀

金属或合金在拉应力(或内应力)和腐蚀介质共同作用下的加速腐蚀。应力腐蚀的特征是形成腐蚀—机械裂纹。由于应力腐蚀引起断裂称为应力腐蚀断裂。微裂纹一旦形成, 其扩展速度很快, 且破坏前没有明显的预兆, 所以应力腐蚀是所有腐蚀类型中破坏性和危害性最大的一种。腐蚀介质、应力大小、溶液温度等对产生应力腐蚀有极大的影响, 只有在一定的合金材料、环境、应力组合情况下才能发生应力腐蚀断裂。

### (3) 腐蚀疲劳

在反复变化的应力作用下, 拉索平均应力远低于屈服应力时所发生的破坏是疲劳破坏。金属构件在重复的交变应力与腐蚀介质共同作用下的断裂称为腐蚀疲劳断裂。应力腐蚀是普遍存在的, 腐蚀疲劳可认为是其中的一个特例。在应力高峰及局部塑变区、缺陷和微裂处, 腐蚀介质的存在, 加速裂纹的扩展。因此在腐蚀疲劳断裂中反复应力和腐蚀相互促进, 加速裂纹的扩展。

腐蚀疲劳的特征之一是材料抗疲劳性能的降低。在相同的应力水平下, 腐蚀疲劳寿命远较一般疲劳寿命短。

### (4) 氢脆

在早期采用的对PE套管内压注水泥浆形成的拉索防护系统中, 水泥浆作为电解质, 钢丝本身作为电子从阳极流向阴极所需的金属连接, 因混凝土化学组成的局部差异、不同的充气条件、钢筋表面的不均匀性等都能产生钢筋腐蚀所需的电位差, 因此, 这种防护系统为钢筋的腐蚀过程提供了条件。

### (5) 微动磨蚀

有氧化腐蚀现象的微动磨损叫做微动磨蚀。摩擦表面间的法向压力使表面上的微凸体黏着。黏合点被小振幅振动剪断,形成磨屑,磨屑接着被氧化。被氧化的磨屑在磨损过程中起着磨粒的作用,使摩擦表面形成麻点或伤疤,这是产生是应力集中的根源。

### 2.3 拉索锚固系统疲劳损伤

锚具因其构造特征,水分易进难出,容易被侵蚀,且锚具的布置不易于检测,出现了问题一般难以被及时发现。锚杯的构造使得水汽易进难出,容易引起斜拉索的锈蚀。锚具的锈蚀会导致锚端部位斜拉索的腐蚀。斜拉索在锚具连接筒的末端因荷载作用下的变形以及斜拉索自身的振动等常承受反复的弯折作用,疲劳作用明显。如图3所示。



图3 锚头、套筒锈蚀

### 2.4 拉索振动过大

斜拉索在风、雨作用下,或是在桥面、桥塔的振动作用下,或是在上述因素的共同作用下,会发生各种不同机制的振动。有的振动虽

然振幅不大,但经常发生;有的振动虽然发生频率不高,但振幅较大。斜拉索振动导致索端接头部位疲劳,在索锚结合处易产生疲劳裂纹,破坏索的防腐系统,严重的造成拉索失效。

目前探索出的斜拉索的振动机制主要有涡激共振、尾流驰振、雨振、抖振以及参数共振等五大主要类型。

#### (1) 涡激共振

风在拉索后的气流中产生交替的卡门涡流,当涡流的脱落频率与斜拉索的某一阶的横向振动频率一致时会发生涡激共振,此时的风速即为涡激共振临界风速。圆形截面拉索的涡流脱落频率随风速而线性变化。根据拉索振动频率对涡流脱落的反馈作用,涡频在接近临界风速的一定风速范围内被拉索频率所“锁定”,使发生涡激共振的风速范围扩大。

#### (2) 尾流驰振

由于上风侧拉索的尾流作用而使下风侧拉索产生较大的振动称为尾流驰振。在并排拉索的斜拉桥中,处在前排拉索尾流区的后排拉索如果正好位于不稳定的驰振区,后排(下风侧)拉索会比前排(迎风侧)拉索发生更大的振动。

#### (3) 雨振

伴随着降雨,在某种风向的风作用下,雨水沿斜拉索下流时的水道改变了拉索原来的截面形状,从圆形异化为类似于结冰电缆的三角形。这使拉索成为空气动力不稳定的形状,在一定的临界风速下将发生振动,称为雨振。

#### (4) 抖振

斜拉索在风的随机脉动分量作用下会产生限幅的随机振动,称为抖振。因为斜拉索抖振振幅一般远小于前述3类风振振幅,故不作为控制对象。但增加斜拉索结构阻尼可大大减小抖振振幅。

#### (5) 参数共振

当斜拉桥主梁受到各种外界的激励后桥面

以总体的弯曲基频发生振动时,将使下端与桥面相连接的拉索以同样的频率随之纵向振动。当桥面的振动频率和拉索的横向振动频率满足倍数关系时,会发生拉索的参数共振。

斜拉索的使用寿命与拉索的振动有密切关系。拉索长时间大幅振动不仅使组成拉索的单根钢丝及锚固端产生反复应力变化导致其疲劳断裂,并破坏拉索的防护装置而加快拉索的锈蚀,而且由于拉索中的钢丝相互交叠,两个接触面产生小振幅相对滑动时,即有可能发生微动损伤。其损伤的方式可能是微动磨损、微动腐蚀、微动疲劳,斜拉索所用的高强钢丝对微动损伤十分敏感,也会使拉索的疲劳寿命下降。

## 2.5 拉索松弛

由于松弛,拉索无法维持原有的应力水平,使防护体系的各个部分趋向于独立变化。防护体系的各部分(聚乙烯套管、水泥砂浆、钢管等)由于无法变形一致,从而在套管内和混凝土外表面之间产生一系列的缝隙,在在管内混凝土收缩影响下,会发展成常规裂缝,盐分和其它化学物质就能乘虚而入,侵蚀钢丝。

## 3 斜拉索养护维修

### 3.1 护套开裂修补

PE护套在正常情况下具有一定的硬度和表面强度,但与钢材等相比则小得多,在制造、运输、施工中须特别注意保护。

对于小面积的划伤,深度在3mm以下时,可以用专用焊枪用相同的HDPE原料覆盖并焊接在损坏处再用电磨机进行表面处理,恢复表面平整。对于比较深、范围较大的损坏,宜采用加热套管进行恢复。

### 3.2 锚固端防护措施

#### (1) 锚固部位外露锚具防护

在锚固结构的锚板上设置法兰连接垫板并进行必要的防锈处理,周边用密封胶密封;清除锚具外露部分的表面污染和锈蚀后均匀涂刷一层锚具专用长效防护油脂;在法兰垫板表面

沟槽内安装密封圈,打上密封胶后安装不锈钢护罩;护罩用合格的不锈钢材料加工制造,护罩能全部罩住斜拉索锚具,并与其他密封措施配合形成密封区间。

#### (2) 锚管内聚氨酯发泡填充

近年来使用封闭性聚氨酯发泡填充在斜拉索与锚管的间隙内,防止水分和污染物进入斜拉索护筒管内。

#### (3) 梁端拉索导管出口处不锈钢防雨罩结构

为了防止雨水顺斜拉索索体流入锚管内,避免斜拉索索体与锚管口摩擦伤损,同时使过渡连接部位美观,锚端防护专门设置了不锈钢防雨罩结构。

## 3.3 斜拉索振动控制

斜拉索振动必须满足两个条件:其一是频率吻合;其二是外界提供充足的能量。只有外界产生的激励力提供的能量大于拉索振动所需要的初始势能,并满足拉索在振动过程中拉索自身结构阻尼所消耗的能量时才能产生风振。因此,斜拉索减振也只能从两个方面入手,即改变拉索本身的结构特点及力学性能或抑制拉索激励的强度。一般要抑制拉索的激励或振源强度是比较困难的。因此,减振措施的作用绝大部分是改变拉索本身的振动特性,包括结构措施和空气动力学措施两大类:

#### (1) 结构措施

在外界因素的激励下,不管拉索做何种性质的振动,拉索的内部阻尼力总有使振动停止或减小振动幅度的倾向,因此增加拉索的模态阻尼是减小拉索振动的有效方法。通常的结构措施分为阻尼器方式和辅助索方式两类。

##### 1) 阻尼器方式

在拉索的端部安装阻尼器来增加拉索的阻尼,使拉索自身的初始阻尼大于外界激励力提供的负阻尼,从而能有效地减少拉索的振动。

##### 2) 辅助索方式

改变拉索的动力特性,增加拉索的刚度使

其基频提高到风雨振动不能发生的水平,从而减小拉索的振动幅度。即用辅助索将若干根斜拉索连接起来,或者采用连接器将相互并列的两根索连接起来,从而可增加拉索体系整体的刚度,提高索的振动频率,提高了拉索各阶振型的广义质量,增加了拉索的机械阻力和气动阻尼,同时由于每根索的振动频率、相位和幅值不同,因此可使索之间的运动受到制约而达到一定的减振效果。

## (2) 空气动力学措施

通过改变拉索形状从而改变拉索空气动力特性也同样可以达到抑制振动的目的。拉索在风或风雨的共同作用下的振动,其振动强度除了与风的特性如风速、风向有关外,还与拉索的空气动力特性如拉索的外形、质量以及拉索的振动频率等有关。风速、风向一般是无法改变的,因此只能设法改变拉索的空气动力特性。与拉索空气动力特性有关的如拉索的质量及振动频率等随拉索材料和索力大小而变化,一般也是不能轻易改变的。因此要改变拉索的空气动力特性就只能改变拉索的外形。可以通过改变拉索的截面形式,防止雨线的产生,从而避免拉索的风雨振动,同时能干扰交替脱落漩涡的产生,减弱拉索的涡激振动。

### 1) 斜拉索表面设置螺旋肋条

在拉索表面附设单向或双向螺旋肋条这一措施最早用于减缓圆柱形结构的涡振,它实际是一种“扰流器”,其作用是强制导流雨水、提高拉索表面的粗糙度及减小激振的气动力。如图4所示。

### 2) 斜拉索表面设置平行肋条

带棱角的凸肋或凹槽在拉索表面形成多道分离线,使得拉索周围分离流因相互干扰而变得紊乱,因此阻止了大而有规模的漩涡脱落并能破坏沿拉索表面流动的上水路,从而达到抑制雨振的目的。如图5所示。

### 3) 斜拉索表面设置凹坑或凸点

斜拉索表面的粗糙度对结构的气动特性有

很大影响,研究表明,只要粗糙度的形状及分布选择合适,就能改善拉索截面包括抗风阻力系数在内的综合气动性能。表面带圆形或椭圆形凹坑或凸点是两种性能较好且较常用的设置表面粗糙度的方法。并且在有雨时,表面带圆形或椭圆形凹坑或凸点的拉索对雨振均有一定的抑制作用。



图4 螺旋肋条的布置形状图

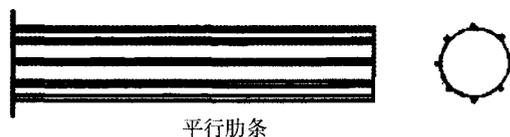


图5 斜拉索表面的平行肋条及V形凹槽

## 3.4 斜拉索的日常养护维修

### 3.4.1 定期检查

检查应主要针对拉索索体护套和上、下锚固端等。

按顺序逐束检查拉索PE套管有无开裂、断裂、鼓胀及变形,并作好标记和记录。重点检查索端出索处的钢护筒、钢管与索导管连接处的外观情况。检查拉索的防护层有无裂纹、破损、老化,钢护筒有无松动、脱落、锈蚀、连接处有无渗水、漏水等。

按顺序逐束检查塔端和梁端锚具及周围混凝土的情况。检查锚具是否生锈,周围混凝土是否开裂、潮湿,锚具内是否有水存在等。

检查拉索锚固区导管端部橡胶套管的水密性。

对斜拉索的振动进行观测。观察斜拉索振动是否明显(特别是在大风、下雨时),减振措施(两端阻尼减振器)是否损坏或失效。

### 3.4.2 制定系统的防护方法

#### (1) 拉索防护体系的维护

在详细检查的基础上每隔5~8年对索体进行防潮防锈的维护。如发现PE破损开裂应及时修补,可以采用热成型修补。

## (2) 拉索锚固系统的防护

斜拉索两端锚具及护筒应作好防腐、防锈处理,经常保持干净、清洁和干燥。

## 4 结语

斜拉索的病害主要分为拉索护套开裂、拉索钢丝腐蚀、拉索锚固系统疲劳损伤、拉索振动过大、拉索松弛等几类。引起斜拉桥拉索病害的原因是多种多样的,也是错综复杂的。一些病害的产生不仅仅是一种因素的作用,而经常是多种因素在时间上并行或前后对结构所产生的影响的总和。在包括设计、制作、运输、建设、运营、养护维修等诸多环节中,任何一处出现或大或小的错误或不合理的地方,在当时看来也许并不会发生严重后果,但对于要经受时间考验的结构来说,都有可能造成病害。因此在斜拉桥的设计、建设、养护中要尽量做到设计合理、考虑周详,建设规范、保证质量,养护及时、管理到位。

目前,大跨斜拉桥多采用以监测结构健康状况为目的的桥梁监测系统。但从现有的计算

和分析结果来看,似乎很难通过健康监测系统来实现桥梁早期病害的发现、预警或结构损伤的诊断。因此,对于大跨径斜拉桥,仍然要走常规养护管理巡检与健康监测相结合的道路。前者实现日常养护与病害的早期发现、维修。后者用于监测各种交通量下的桥梁状况,这将是一种有机、有效的结合。

### 参考文献

- [1] 刘士林,梁智涛等.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [2] 林元培.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,1993.
- [3] 叶觉明.桥梁缆索系统的腐蚀与防护[J].钢结构,2005(2).
- [4] 王力力.斜拉索的腐蚀案例与分析[J].中南公路工程,2007.2.
- [5] 苏达根.斜拉桥拉索失效的两个问题[J].中南公路工程,1996(12).
- [6] 苏波.四方台大桥斜拉索的养护与维修预案研究[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文,2005
- [7] 陈金华.四方台斜拉桥结构耐久性分析[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文,2005
- [8] 谭莹,李兴华.斜拉桥养护与维修[J].国外桥梁,1999
- [9] 金玉泉.桥梁的病害及灾害[D].同济大学硕士学位论文,2006

(上接第15页)

原设计安排从中心孔向边孔横张,在张拉第二道钢束时,由于第6孔的铰缝顶宽只有3cm,不便横向张拉,故张拉此道钢束时,先在第6孔铰缝内将钢束布置到最终的设计位置,并锚固好钢束的起弯点,然后在两桥头同时纵张预应力钢束,从第6孔的相邻孔开始横张。

为了更为精确地控制张拉应力,张拉工作开始前,设计人员决定将锚垫板后的四柱撑脚贴上应变片,使之成为了一个压力传感器,用于观测预应力钢束的张拉力。由于该套装置与纵向张拉设备在一处,实际操作时和油压表相互校对,控制张拉力。

从每道钢束的张拉过程看,通过油泵控制张拉应力简便可行,其精度能够满足工程要求。横张时,每孔两个张拉点张拉耗时30min。17孔长的钢束,从准备到张拉完毕,耗时12h(1.5个工作日)。

东洋河大桥采用等应力束技术加固完毕后,

为检验加固效果进行了荷载试验。试验表明,东洋河大桥加固后,能够满足汽车-超20级,挂车-120的设计荷载要求。该桥于2005年9月通车运营,状况良好。

## 4 结语

从东洋河大桥加固工程里可以看出,等应力束技术易于操作,简捷可靠,使用该项技术,既经济,又使加固后的结构性能发生了质的飞跃。对于新建连续梁桥的设计与施工也有参考价值。

### 参考文献

- [1] 邢现军.预应力不足混凝土梁下挠开裂后的加固利用[J].公路,2002(9)
- [2] 邢现军.等应力束技术的设想与实现[J].公路交通技术,2003(3)
- [3] 胡志坚,郭友,谭金华.体外预应力混凝土结构研究现状与展望[J].公路交通科技,2006,23(02):94-97
- [4] 姬同庚,张锋,张永水.许沟特大桥主拱结构徐变与收缩影响研究[J].公路交通科技,2006,23(06):77-80
- [5] 张元海,李乔.钢管混凝土系杆拱桥中系梁和横梁的设计计算方法研究[J].公路交通科技,2005,22(03):66-69