

# 护套钢绞线拉索在锚碇工程中的应用研究

苏强

(柳州欧维姆机械股份有限公司,广西 柳州 545006)

**摘要:**预应力锚固系统是锚固大型悬索桥主缆的关键构造,多年来各种类型的预应力锚固系统在锚碇工程中得到不断开发与应用。护套钢绞线拉索技术在斜拉桥拉索中应用广泛,相比其他传统锚碇用预应力锚固系统,采用护套钢绞线拉索技术的预应力锚固系统具有特定的优势。该文结合实际工程需要,重点介绍护套钢绞线拉索在锚碇工程中的设计方案和关键试验研究情况。

**关键词:**预应力锚固系统;护套钢绞线;锚碇工程;试验研究

## 1 引言

大跨径悬索桥锚碇锚固系统经历了型钢、不可更换式预应力、可更换式预应力等多个发展阶段,目前中国主要使用两种锚固系统:型钢锚固系统与预应力锚固系统。

早期悬索桥大都采用集中传力式型钢锚固系统,其基本特点是:系统主要由后背梁和钢拉杆组成,钢拉杆前端伸出前锚面与主缆索股进行连接,需设置较强的支承构造。该系统传力路径为:通过钢拉杆将主缆索股拉力传递至后背梁,然后通过后背梁将所受拉力传递至整个锚体混凝土。由于整个锚碇架浇筑在锚块混凝土内,因此后期维护工作量较小。葛文璇等以南京四桥锚碇工程为背景,介绍了一种采用钢筋混凝土樨的锚固系统,该锚固系统是对传统的集中传力式型钢锚固系统的一种改进。其主要创新在锚固钢板后部设置樨剪力键,樨剪力键将索股上的力逐次相对均匀地传入锚体混凝土中,是一种分布传力式型钢锚固系统,锚固更为可靠,施工相对方便。但不管是集中传力式型钢锚固系统还是采用了樨剪力键的分布传力式锚固系统,都存在用钢量大、定位用支架消耗量大、制作安装和施工精度要求高的缺点。

随着预应力技术的不断发展完善,预应力锚固系统逐步替代型钢锚固系统成为最常用的形式。当前中国最常用的锚碇预应力锚固系统有灌浆黏结式锚固系统和多股成品索式锚固系统。灌浆黏结式锚固系统是

在预埋孔道内灌注水泥基浆料对预应力筋进行防护,锚固系统不可更换、难以监测,但具有施工要求相对简单、技术成熟、成本低等优点。多股成品索式锚固系统具有锚固可靠、耐久性好、施工简便、全生命周期成本低、可更换等优点,但具有结构尺寸相对较大、初建成本较高等缺点。梅刚等介绍了多股成品索式锚固系统在虎门二桥中的设计,吴明远等及苏强等都介绍了多股成品索式锚固系统的研究情况。

随着中国西部交通建设的推进,越来越多的悬索桥锚碇工程正在设计与建造。一些锚碇工程提出了新的要求:工程初建成本要求较低,锚固系统尺寸要求较小,但同时也要求锚固系统可监测可更换、耐久性好等。当前常用的灌浆黏结式锚固系统和多股成品索式锚固系统都不能完全满足这些新的要求,因此工程设计人员不断研究,开发出了一种新型的锚固系统——护套钢绞线拉索式锚固系统。

## 2 护套钢绞线拉索式锚固系统的设计研究

### 2.1 护套钢绞线技术

护套钢绞线拉索技术成熟,已在斜拉桥上得到广泛应用。国外大部分斜拉桥工程都是采用护套钢绞线拉索,中国斜拉桥工程有的采用护套钢绞线拉索,有的采用护套钢丝拉索。杨吉新等和万义辉通过全面对比分析两种拉索的优缺点后认为钢绞线拉索更优,是斜拉桥的首选;罗维等重点从风载性能与风雨振性能两

方面分析比较钢绞线拉索与钢丝拉索,认为紧凑型钢绞线拉索在大跨度斜拉桥中将超越钢丝拉索。基于钢绞线拉索良好的特性,研究如何把钢绞线拉索应用于锚固系统已成为锚碇工程设计人员首要考虑的问题之一。

## 2.2 锚固系统总体结构设计

经研究,提出了如图 1 所示的总体结构设计方案。该锚固系统由索股锚固连接构造和预应力锚固构造组成。索股锚固连接构造由拉杆组件、连接平板及连接筒组成;预应力锚固构造由管道、护套钢绞线及锚具、锚头防护帽等组成。与现有常用的预应力锚固系统相比,不同之处在于该锚固系统采用护套钢绞线为预应力束,两端采用夹片式锚具,锚具全密封设计,且管道内不再灌浆砂浆或油脂的防腐材料,但预埋管道端部设置预留通风管,在桥梁运营阶段可通过此管道安装监测元件,测试管道的空气温度,当湿度大于设计值时,可采取通入干空气方式进行管道内除湿,以提高锚固预应力钢绞线的耐久性。

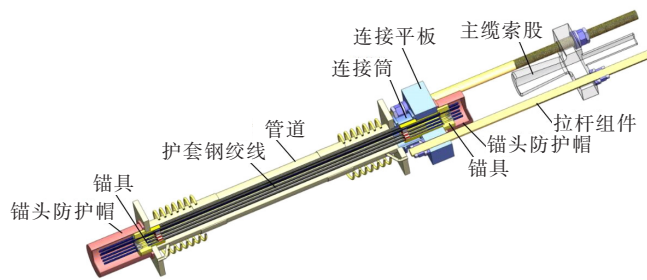


图 1 单索股用护套钢绞线拉索锚固单元

## 2.3 关键内容设计研究

钢绞线拉索应用于斜拉桥技术已较成熟,但如要应用于锚碇工程,因锚碇工况与斜拉桥工况不相同,需要考虑的因素也会有所不同,设计研究的关键内容也不同。

### (1) 锚碇用钢绞线拉索锚固性能研究

钢绞线斜拉索的设计荷载一般为  $0.45F_{ptk}$ ,其疲劳性能要求较高。GB/T 30826《斜拉桥钢绞线拉索技术条件》中要求锚具组件满足应力上限为  $0.45f_{ptk}$ 、应力幅度为 200 MPa、循环次数为 200 万次的疲劳试验要求。而锚碇用钢绞线拉索的设计荷载、应力上限、应力幅等要求更接近体内索,锚碇工程设计要求所施加的有效预应力大于主缆索股设计荷载的 1.2 倍,以保证锚混凝土体一直处于受压状态,尽可能防止锚混凝土体出现裂缝。为保证钢绞线拉索能更好地满足锚碇工程需要,对锚具组件的锚固单元进行了改进设计。

### (2) 锚碇用钢绞线拉索密封性能研究

钢绞线斜拉索的密封性能对保证其耐久性至关重要。GB/T 30826《斜拉桥钢绞线拉索技术条件》中要求锚具组件满足机械和热老化交替作用下的水密性试验要求,为保证锚具组件的密封性能,常规钢绞线斜拉索锚具需进行细致的、复杂的密封结构设计,如图 2 所示。在工作锚具前端,设计有密封筒、密封装置、调节顶杆和防护填料,防护填料充满密封筒,通过调节顶杆可以调节密封装置与护套钢绞线之间的密封间隙(护套钢绞线在穿索、张拉时调大密封间隙以方便施工,当要灌注防护填料时调小密封间隙以防渗漏)。在工作锚具后端,用防护帽和防护填料密封。闫云友等介绍了 OVM250 钢绞线拉索锚具的动态水密性试验研究,证明了 OVM 钢绞线拉索锚具有可靠的密封性能。但这种锚具当前主要存在以下问题:① 可调节间隙的密封装置结构复杂,密封筒外径尺寸较大,成本较高;② 防护填料多采用半固态的油性蜡,油性蜡在拉索动载作用下密封性能下降。

然而在锚碇工程中,因护套钢绞线安装在锚室的密封孔道内,其所处环境远好于钢绞线斜拉索所处的环境,且所受的动载较小,对密封装置的要求低于钢绞线斜拉索。最后综合锚碇用钢绞线拉索的各方面要求,对锚具密封结构进行简化改进,如图 3 所示。

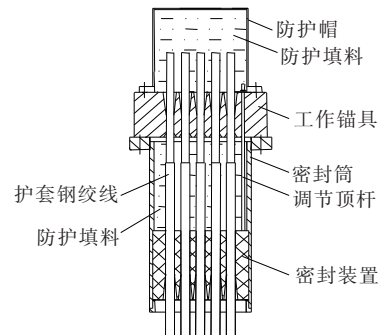


图 2 常规钢绞线斜拉索锚具密封结构

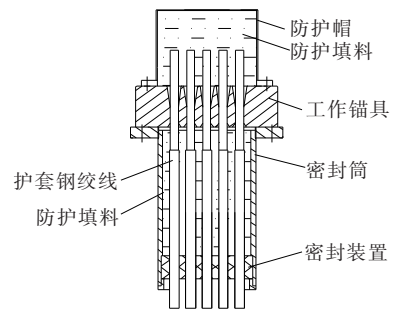


图 3 锚碇用钢绞线拉索锚具密封结构

主要改进的地方有:① 简化密封装置设计,同时

取消调节顶杆等可调式结构。改进后显著减少了密封筒的外径尺寸,成本得到降低;②改进防护填料,改用膏状的非硫化不干性防腐密封胶替代油性蜡。欧维姆公司专门针对桥梁拉索的防护要求和特点,研制出了

性能更优的拉索填充防腐材料——OVM非硫化不干性防腐密封胶,该密封胶具有良好的柔软性、密封性、耐热性、黏附性、耐老化性,可灌注、可涂抹。其性能指标如表1所示,与其他常用防腐材料对比如表2所示。

表1 OVM非硫化不干性防腐密封胶性能指标

项目	单位	技术指标	试验方法(标准)
外观		均质膏状物	
滴点	℃	≥170	JG/T 430
钢网分油(100℃,24h)(质量分数)	%	≤5.0	JG/T 430
水分(质量分数)	%	痕迹	GB/T 512
湿热试验(45号钢片,30d)(锈蚀级别)	级	B	JG/T 430
低温性能(-40℃,30min)		合格	JG/T 430
腐蚀(45号钢片,100℃,24h)		合格	JG/T 430
氧化安定性(99℃,100h,758kPa)氧化后压力降	MPa	≤0.07	SH/T 0325

表2 OVM非硫化不干性防腐密封胶与其他防腐材料对比

性能	防腐油脂	弹性体树脂	石蜡	OVM非硫化不干性防腐密封胶
灌注性能	流动性一般,可灌性一般	流动性好,可灌性好	加热后流动性好,可灌性好	流动性好,可灌注或涂沫
耐久性	易乳化,易分油,稳定性差	易老化,稳定性差	易变脆,黏附性差,稳定性差	惰性原料,耐老化
阻蚀效果	油脂易变质,易流失,阻蚀期短	致密性差,易吸水,易渗水,阻蚀期短	易随索振动开裂,阻蚀期短	不干性,不开裂,黏结性强,随动性好,阻蚀期长

### (3) 锚碇用钢绞线拉索穿索工艺研究

锚固系统主要施工流程为:安装预埋件—(浇筑锚体)—安装连接器—穿索—张拉—安装防护罩—锚头灌注—安装拉杆。其中最关键的是穿索工序,穿索时要保证孔道内各根护套钢绞线顺直不打绞。

①钢绞线下料:穿索前进行钢绞线下料,下料长度需计算确定,计算两端要剥除PE外护套的长度,剥除PE后清洗钢绞线表面的油脂;为方便后期可能的换索需要,在后锚端的钢绞线端头切除6根边丝约100mm,剩余的中心丝锚头。

②钢绞线穿索:先把前锚具临时安放在连接器上方,把后锚具临时安放在后锚垫板端面下方。从前锚面,按工作锚板上的孔位顺序将各根钢绞线(有锚头一端向下)依次穿入前工作锚板、密封装置相应孔口、连接器内孔、预埋管,直至钢绞线露出后锚面,在后锚面钢绞线穿入后锚具的密封装置和后工作锚板,其中确保每根钢绞线穿入的前后工作锚位孔位要一一对应,

在前锚面用工作夹片临时锚固钢绞线。

③调整钢绞线位置:全部钢绞线穿入前、后端锚具后,把前、后锚具分别推至连接器端面、后锚垫板端面就位,之后调整各钢绞线的位置,保证前后锚面的钢绞线PE外护套割口都位于密封装置设计的位置内和保证后锚面钢绞线的外露长度。钢绞线调好位置后,在后工作锚板上装上工作夹片夹持钢绞线。

## 3 护套钢绞线拉索式锚固系统的试验研究

### 3.1 锚固系统锚具组件静载试验

因设计了新的锚固单元,进行了锚具组件的静载性能研究。试验按GB/T 14370《预应力筋用锚具、夹具和连接器》的规定进行,按依托工程要求选取单索股锚用15—18锚具组件和双索股锚用15—36锚具组件各3组试样进行了静载试验,结果满足标准要求,如表

3 所示。

表 3 锚具组件静载试验结果

锚具规格	锚具效率系数 $\eta_a$	总伸长率 $\epsilon_{tu}/\%$	标准要求	结论
15-18	0.982	3.6%		合格
15-18	0.980	3.5%		合格
15-18	0.980	3.5%	$\eta_a \geq 0.95$	合格
15-36	0.978	3.6%	$\epsilon_{tu} \geq 2.0\%$	合格
15-36	0.980	3.7%		合格
15-36	0.980	3.6%		合格

### 3.2 锚固系统锚具组件疲劳试验

锚碇用拉索的疲劳性能不同于斜拉索,更类似于体内索,因此按 GB/T 14370《预应力筋用锚具、夹具和连接器》要求进行疲劳试验研究。按依托工程要求选取单索股锚用 15-18 锚具组件和双索股锚用 15-36 锚具组件各 3 组试样,按上限应力  $65\% f_{pk}$ 、应力幅度 80 MPa、循环次数 200 万次进行了疲劳试验,试验后样品完好,锚具不失效,没有发生断丝或滑丝,满足标准要求,如表 4 所示。

表 4 锚具组件疲劳试验结果

锚具规格	疲劳破坏截面积/ $\%$	疲劳次数/万次	标准要求	结论
15-18	0	200		合格
15-18	0	200	疲劳破坏	合格
15-18	0	200	截面积 $\leq$	合格
15-36	0	200	5% 锚具不	合格
15-36	0	200	失效不滑	合格
15-36	0	200	丝	合格

### 3.3 锚固系统护套钢绞线穿束、张拉和更换试验

为验证新型锚碇锚固系统关键施工工艺的可行性,按施工方案在试验室进行了穿束、张拉和换索试验。经分析计算并结合多年灌油无黏结式锚碇锚固体系和多股成品索式锚碇锚固体系的换索试验与应用经验得知,实际工程中前后锚面上相邻的锚固构件间距较大,换索操作空间足够。试验主要过程如下:

步骤 1:选用结构尺寸较大的双索股用 15-36 锚具为试验对象,在试验台座两端安装锚具(含密封装置),按施工方案要求进行各根钢绞线的穿束并用千斤顶加载至上限应力  $65\% f_{pk}$  后锚固钢绞线。

步骤 2:用单根张拉千斤顶放张任一需更换钢

绞线,取出已放张的两端夹片。

步骤 3:用连接器把新钢绞线与已放张的旧钢绞线相连。

步骤 4:从一端抽出旧钢绞线,同时新钢绞线进入两端锚具。

步骤 5:新钢绞线两端装上夹片,用单根张拉千斤顶重新张拉锚固新钢绞线。

试验过程及结果表明:整个施工工艺过程可行、顺利,无异常情况,试验过程中各样件完好。

### 3.4 锚固系统锚具组件水密性试验

参照 JT/T 771《无黏结钢绞线斜拉索技术条件》并结合实际工况,对锚碇用钢绞线拉索进行静态水密性试验。试验表明:拉索在 3 m 高水压下,试验后通过目测,没有发现有水进入锚具内部,试验合格。

## 4 工程应用与结论

护套钢绞线拉索式锚固系统已在湖北棋盘洲大桥锚碇中成功应用,棋盘洲大桥锚碇工程共使用 84 套单索股锚固单元和 160 套双索股锚固单元,满足了工程设计和施工要求。

试验与应用表明:所研发的护套钢绞线拉索式锚固系统具有结构尺寸较小、锚固可靠、耐久性较好、初建成本较低、可监测可更换等优点,可为今后锚碇工程应用提供借鉴。

### 参考文献:

- [1] 葛文璇,徐贵娥,陈静.南京长江四桥北锚碇工程锚体及锚固系统施工技术[J].施工技术,2012(11).
- [2] 梅刚,陈占力,吴明远,等.虎门二桥锚固系统设计[J].广西科技大学学报,2016(增刊1).
- [3] 吴明远,梅刚,陈占力.多股成品索式预应力锚固系统研究[C].2015年全国桥梁学术会议论文集,2015.
- [4] 苏强,吴东明,谢正元.多股成品索锚碇锚固系统关键技术研究[J].中外公路,2018(4).
- [5] 杨吉新,喻桥,石旷,等.平行钢绞线和平行钢丝斜拉索对比分析[J].工程与建设,2019(1).
- [6] 万义辉.平行钢丝和钢丝斜拉索比较研究[J].中国市政工程,2013(6).
- [7] 罗维,葛耀君,谢正元.钢绞线和平行钢丝斜拉索性能分析与展望[C].第二十一届全国桥梁学术会议论文集(上册),2014.
- [8] 闫云友,唐燕华,黄永久,等.OVM250钢绞线拉索锚具水密性试验研究[J].预应力技术,2014(3).