

台湾首座鞍座式矮塔斜拉桥拉索体系研究

高宁妥 覃巍巍 邱敏 卢双桂 宋强 李文献

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

摘要:矮塔斜拉桥一般采用圆管型分丝管索鞍,在实现对拉索的单根抗滑和单根抽换的功能时采用抗滑键交叉抗滑锚固的结构形式。但在拉索单侧不平衡力较高时,抗滑键交叉的排布无法满足单侧不平衡力较大的工况,提出单侧双向抗滑可换式锚固体系,以台湾小半天矮塔斜拉桥工程为背景,研究该锚固体系在矮塔斜拉桥中的应用。通过有限元分析、实物模拟试验、索鞍抗滑力试验、节段模型试验、换索试验等进行验证,解决了在拉索单侧不平衡力的工况下,拉索的单根抗滑和单根抽换难题,并在台湾小半天桥中成功运用。

关键词:交叉抗滑 单侧不平衡力 单侧双向抗滑 模型试验 单根换索

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2015.03.001

1 引言

矮塔斜拉桥大多数采用贯通式索鞍锚固结构,鞍座两侧需要设置抗滑装置,以保证斜拉索在使用过程中不产生任何滑移、靠抗滑装置来克服桥梁在运营过程中的不平衡力,同时满足斜拉索后期可以进行单根更换的技术要求^[1]。现有的矮塔斜拉桥大多数采用圆形分丝管转向鞍,两端交叉放置抗滑键的结构模式对拉索产生抗滑力,达到抵抗桥梁拉索在施工和运营期间的不平衡力的目的,从而实现钢绞线拉索的单根抗滑及单根可换。以抗滑键握裹钢绞线形式抗滑通过了充分试验研究证明和实际桥梁运用,其抗滑力安全有效,并且实现了钢绞线拉索的单根抽换功能^[2]。目前在国内外市场已经认可抗滑键交叉抗滑体系,并用近二十余座桥梁进行推广运用。

从目前检索到的资料来看,现有的带抗滑键交叉抗滑锚固体系实现单根抗滑和单根可换,基本满足设计和施工要求,但是存在着需要优化改进的地方:

(1) 抗滑键交叉抗滑锚固体系,抗滑键有严格的位置排布,左右两侧抗滑键必须相对均衡,如图1所示。施工时要求索塔左右两侧同时穿索且保证其排列顺序的正确,施工要求较高,参与人数较多,比原有环氧砂浆型整体抗滑体系的施工人员多出一倍,人员配置有待进一步

完善。

(2) 由于索塔的每一侧只有对应锚具孔位数的一半左右的抗滑键,根据市场调查研究发现,今后桥梁使用的孔位数将呈现增大趋势,目前已建的矮塔斜拉桥最大孔位已达到99孔,要求单侧抗滑力相对较高,交叉抗滑键的排布无法满足单侧不平衡力较大的工况。大孔位或不平衡力较高的满足单根抗滑及换索结构体系是一个急待解决的问题。

针对以上问题,在进行深入研究、多个方案试验对比后,提出一种新的抗滑装置——单侧双向抗滑可换式锚固体系,本文以台湾小半天矮塔斜拉桥为例,介绍该单侧双向抗滑可换式锚固体系在矮塔斜拉桥中的应用。



图1 抗滑键交叉抗滑锚固体系示意图

2 工程概况

台湾小半天矮塔斜拉桥是台湾南投县100南投生活圈公路系统建设计划—鹿谷乡投55-1线

4K+550-5K+960道路改善工程,主桥采用跨径为(95+180+95)m矮塔斜拉桥,主桥布置见图2所示。主桥为双塔对称单索面混凝土箱型梁斜拉桥,三跨连续梁结构。

该桥设计为单根钢绞线具有独立抗滑和独立抽换的矮塔斜拉桥拉索体系,斜拉索采用OVMAT-37结构体系,每个塔柱布置12束斜拉索,最短斜拉索为60.34m,最长斜拉索为172.26m。塔身斜拉索通过处设有分丝管转向鞍,转向鞍两端布置单侧双向抗滑可换式锚固体系,每根斜拉索均由37根 $\phi 15.2\text{mm}$ 标准强度为1860MPa的带PE防护钢绞线组成,整索外套整圆双螺旋线

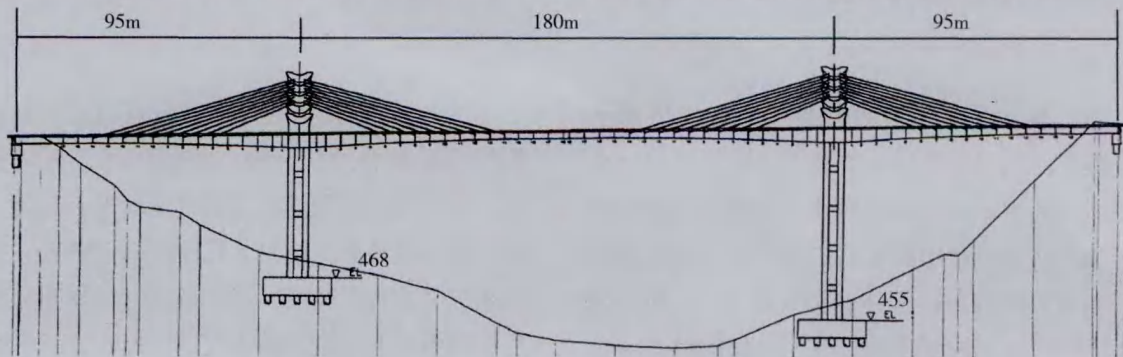


图2 临台湾小半天大桥主桥布置

3 单侧双向抗滑可换式锚固体系的研究设计

现有的带抗滑键交叉抗滑体系是在单根钢绞线上布置一个抗滑键,由抗滑键交叉排布作用在索鞍两端部形成抗滑力,这样的结构优点是能够实现单根调索、单根换索。根据现有的抗滑键交叉锚固体系,提出了单侧双向抗滑可换式锚固体系的构思,同样是采用在单根钢绞线上布置一个抗滑键,由抗滑键作用在索鞍端部产生抗滑力,区别是将抗滑键排布在索塔的一侧,由交叉排布变为单侧排布,为防止单侧排布的抗滑键滑动,设计有单侧双向抗滑可换式装置及抗滑插片等配套构件,限制抗滑键左右滑动,产生双向抗滑的效果,如图3所示。

这样的结构优点是在满足原有的钢绞线单根调索、单根换索的提前下,施工便捷,施工人员只需要在索塔的一侧进行穿索施工即可,人员配置需要和原有的环氧砂浆抗滑体系的人

式高密度聚乙烯HDPE护管($\phi 200\text{mm} \times 9\text{mm}$)。由于台湾地区属于地震多发区域,在桥梁建造时必须考虑索塔鞍座两侧装置必须具有较高的抗滑力,该桥规范要求在施工期间或完成永久防腐作业的工作期间,抗滑锚固系统在钢绞线张拉到设计索力时,必须承担设计抗滑力的1.5倍以上不产生滑移现象。而PTI国际规范中5.7.2.2描述,索鞍及抗滑段的仅仅为设计抗滑力的1.25倍。该桥采用的锚具规格仅仅为OVMAT-37,主跨达到180m,面对小孔位大跨径的桥型结构,又处于地震多发地区,该桥的抗滑锚固系统比常规的抗滑锚固系统需要承受更大的抗不平衡力。

员数量一致,不需要像单根可换式矮塔斜拉桥体系那样需要两侧均安排人员,降低了人员成本。通过单侧双向抗滑锚固装置自身的紧锁装置和转向鞍的连接配合,成功解决成桥后不平衡力需要较大及大孔位矮塔斜拉桥需要较大抗滑力的技术难题。



图3 单侧双向抗滑可换式锚固体系

3.1 理论设计依据

设计考虑握裹在钢绞线上的抗滑键需要统一放置在索塔的一侧,这种形式最为关键的考虑的

因素是两侧的抗滑锚固结构必须能够承受设计所需的抗滑力的作用,并保证其整体结构不变形,确保今后的单根换索工法能顺利进行。

通过有限元分析计算,对抗滑键作用在分丝管锚垫板端面的工况进行模拟仿真,将分丝管锚垫板处于混凝土的灌注中,对其施加不平衡力值,不平衡力值根据抗滑装置抗滑力满足美国后张法协会《斜拉索设计、测试与安装条例》(PTI)规范的有关要求:索鞍及抗滑装置的设计应能在设计荷载的125%倍应力时防止拉索的滑移及磨损,完全能保证拉索从施工到成桥及后期运营整个过程中不产生滑移中推算而出,考虑到锚垫板和抗滑键结构和荷载的对称性,减少单元数目和计算时间,取模型的1/4进行分析即可。有限元分析如图4、图5所示:

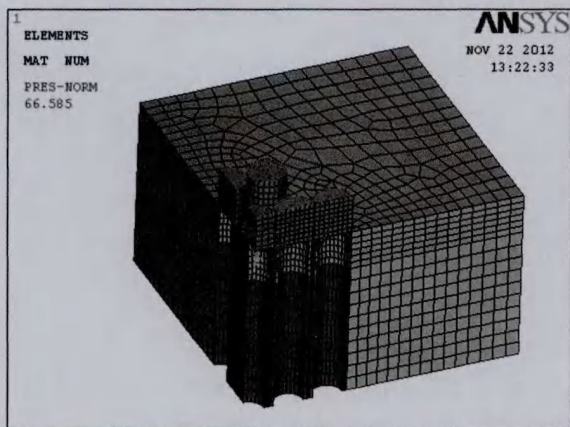


图4 抗滑键作用在锚垫板上模型

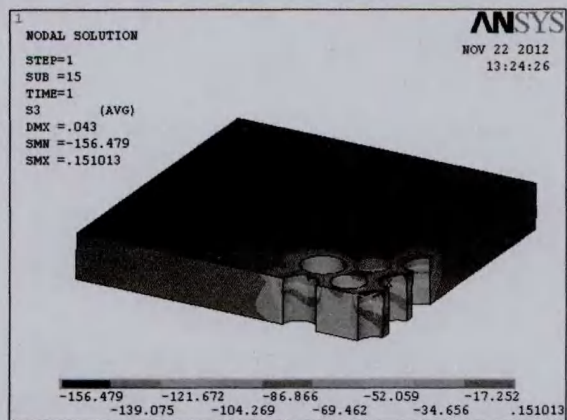


图5 锚垫板压应力分析

从模拟结果上看,其分丝管锚垫板端面受力变形量很小很小,完全能够承受抗滑键全部集中到单侧全部施加的不平衡力。单侧双向抗滑可换式锚固装置的另一侧是靠抗滑插片和锁紧螺母进行配合螺纹式抗滑,通过理论计算,验证其具有安全性和可靠性。

3.2 单侧双向抗滑可换式锚固体系可靠性研究

在进行理论计算和反复设计验证后,对单侧双向抗滑可换式锚固装置进行验证,制作一个可以承受大载荷的试验台架,台架两侧各放置一台900A穿心式千斤顶,一侧的千斤顶通过和一个支撑筒相连,支撑筒里面放置单侧双向抗滑可换式锚固体系。通过两个百分表测量钢绞线的相对位移,在大偏载力作用下观察该锚固体系的抗滑移性能。通过对实物进行模拟试验及试验改进,研究该单侧双向抗滑可换式锚固装置的可靠性。试验如图6所示:

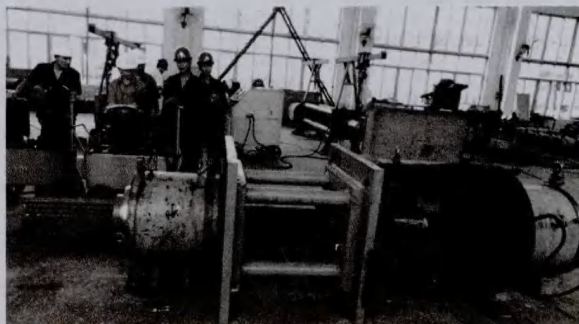


图6 单侧双向抗滑可换式锚固体系可靠性研究

3.3 索鞍与混凝土粘接性能试验

通过利用有限元分析抗滑键对作用在锚垫板上力值的分析,可知锚垫板完全能承受抗滑键全部集中到一侧而产生的不平衡力,对于一侧施加的不平衡力,研发出的单侧双向抗滑可换式锚固体系也能满足两侧的不平衡力的技术要求。当以上两项试验均满足技术要求时,在索塔处,一侧产生较大的不平衡力时,索鞍与混凝土是否会产生相对滑移,是一个必须要验证的问题。

试验制作一个55孔位长度为1m的直线型分丝管索鞍模型,测试其直线段的粘结力,获取直线段粘结力数据,研究分丝管索鞍的在混凝土中的粘结性能,为今后索鞍两侧如出现较大不平衡力

时,分丝管索鞍是否出现相对滑移提供数据参考,试验简图如图7所示:

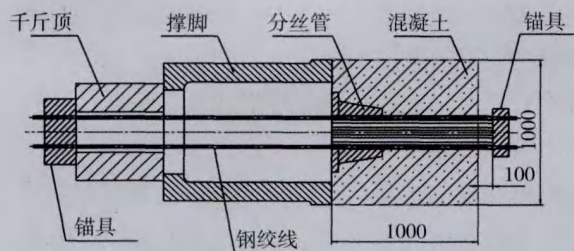


图7 55孔索鞍与混凝土的粘结性能试验简图

按照简图制作1000mm×1000mm×1000mm的正方形模板架,将分丝管按照图示放置进模板内,灌注桥梁用C50混凝土。按照桥梁用混凝土养护办法进行养护后,对试块做强度测试,试块强度大于50MPa方可进行试验,根据简图安放试验装置并安装张拉机具及张拉测控元件逐级进行张拉测试,试验结果如表1所示:

表1 55孔索鞍与混凝土的粘结性能数据

| 加载力值 | 技03百分表 | 技04百分表 | 技05百分表 |
|------|--------|--------|--------|
| 50t | 0 | 0 | 0 |
| 100t | 0.1 | 0.15 | 0.12 |
| 150t | 0.2 | 0.24 | 0.23 |
| 200t | 0.28 | 0.32 | 0.30 |
| 2339 | 产生滑移 | 产生滑移 | 产生滑移 |

从试验的数据中可以看出分丝管未与混凝土脱离粘结直至产生滑移的过程,从中通过公式可以计算出分丝管1m直线段与混凝土粘结强度如下:

$$\delta = F/S$$

δ —粘接强度 F —力值 S —面积

经过计算:55孔分丝管的周长为:1186.6mm

$$\delta = F/S = 2339/1186.6 = 1.97 \text{ (MPa)}$$

从试验数据可以得出,当 $\delta \leq 1.97\text{MPa}$ 时,直线段为1m的转向鞍能与混凝土稳定粘结,为今后索鞍两侧如出现较大不平衡力时,分丝管索鞍是否出现相对滑移提供数据参考。从实际情况分析,索鞍是具有圆弧型结构,两侧端面还设置有加强筋,常规的索鞍长度至少在3~8m之间,这样极大的增多与混凝土接触面,索鞍本身的抗滑移性能得到更大的提高,参考1m直线型索鞍抗滑移性

能试验结果,可以推断实际索鞍与混凝土具有优异的粘结性能,在索鞍两侧出现不平衡力时,分丝管索鞍不会出现滑移现象。试验现场如图8所示:



图8 55孔索鞍与混凝土的粘结性能试验图

3.4 单侧双向抗滑可换式锚固体系的抗滑试验

试验的抗滑装置是根据fib bulletin 30《Acceptance of stay cable systems using prestressing steels》中3.4.2 Transfer differential stay cable forces阐述斜拉索在索塔处的不平衡力的传递可以通过抗滑键及其他机械装置来提供,因此采用抗滑键的单侧双向抗滑可换式锚固形式是符合fib国际规范要求。其次根据PTI规范中5.7.2.2描述,索鞍及过渡细节的设计应能在所有不同的使用及强度极限状态下最大荷载的125%倍时防止拉索的滑移及磨损。试验将利用足尺索塔节段实体模型,检验单侧双向抗滑装置在拉索设计荷载下的抗滑性能。

试验利用原有的矮塔斜拉桥节段模型进行抗滑试验,试验采用1860MPa的环氧喷涂钢绞线,拉索孔数为43孔,拉索常规的应力上限在0.45~0.55区间内,以拉索张拉到0.45、0.55标准荷载作为基准参照,参照PTI规范中规定索鞍不同的使用及强度极限状态下最大荷载的125%倍时能够防止拉索的滑移及磨损的要求,对该单侧双向抗滑装置进行实测检验^[3]。

计算公式如下:

$$F_{0.05} = 260.4 \times 43 \times 0.05 = 559.86 \text{ (kN)}$$

$$F_{0.45} = 260.4 \times 43 \times 0.45 = 5038.74 \text{ (kN)}$$

$$F_{0.55} = 260.4 \times 43 \times 0.55 = 6158.46 \text{ (kN)}$$

试验按照:0.05、0.1、0.2、0.3、0.4、0.45、0.55的级别逐渐递增。

通过试验证明单侧双向抗滑可换式锚固装置在0.45和0.55倍标准索力下,钢绞线未产生滑移现象,单侧双向抗滑可换式锚固装置受到最大偏

载力时产生微小位移变化量,位移变化量为0.1mm,可视为无位移变化,验证其抗滑性能安全可靠,试验现场照片如图9:

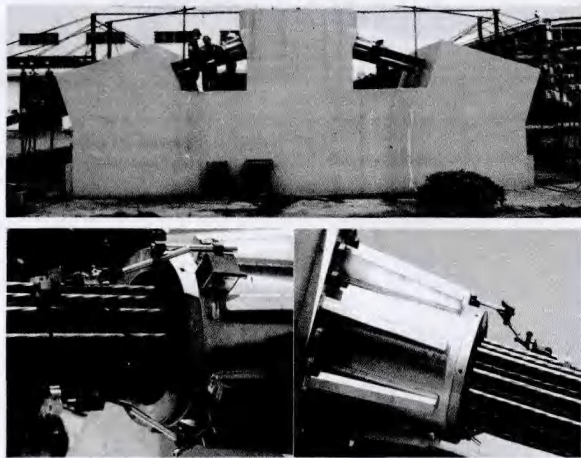


图9 单侧双向抗滑可换式锚固装置抗滑性能试验

3.5 单侧双向抗滑可换式锚固体系的换索试验

在单侧双向抗滑可换式锚固体系理论计算和实际模拟验证安全性后,该装置还必须满足单根可换的要求,在节段模型上完成了抗滑锚固性能试验的基础上,对该抗滑体系的单根可换性进行试验研究。由于单侧双向抗滑装置换索时,需要抽出抗滑插片,而抗滑插片厚度为26.8mm,需用手拉葫芦等工具将抗滑插片以上的索提升,垂直索的方向提高28mm以上的高度,以供抗滑插片抽出进行更换。

根据节段模型的锚具孔位规格为OVMAT-43,有针对的选取最中心的钢绞线进行换索,最中心的钢绞线是最难更换的一根,如能够实现对中心钢绞线的更换,其余的钢绞线换索相对简单。根据锚板的排布情况,需要将三排钢绞线向上提升,提升距离为28mm。

考虑节段模型梁端锚固区的锚点到塔端锚点的距离仅有4.1m,用手拉葫芦等工具提索时需要很大的力,甚至超出了手拉葫芦的最大承载力 $2t$,而真正的桥梁由于索长要远大于4.1m,不需要很大的提升力,为了模拟实际桥梁的换索工况,考虑试验换索时降低索力,减少手拉葫芦的负载,使手拉葫芦的负载和施工时负载相同。

换索步骤如下:

(1) 按照比例降低索力,旋紧拉索锚具的螺母,锁定索力;

(2) 放松锁紧螺母,利用手动葫芦拉紧上排钢绞线,形成更换空间;

(3) 逐一取下抗滑插片;

(4) 选取一根钢绞线,用千斤顶放张,取出该根钢绞线的同时牵引一根新的钢绞线进行替换;

(5) 通过千斤顶的张拉更换后钢绞线,张拉至索力后在钢绞线两端安装夹片,完成新钢绞线的锚固,换索完毕。

根据以上换索步骤,换索过程如图12~图17所示:

根据模拟实桥情况进行单根换索试验,抽取OVMAT-43斜拉索中心的单根钢绞线进行更换,试验中的锚具孔位数大于台湾小半天矮塔斜拉桥OVMAT-37,具有较强的指导意义。该换索工艺能够实现单根可换,且钢绞线拉索更换便利,在实桥中需要更换的拉索能在梁面完成抽换步骤,解决了换索空间问题,具有较强的可操作性和便利性,完全满足拉索体系在桥梁运营阶段实现拉索的单根换索要求^[4](如图10、图11)。

4 工程应用

台湾小半天桥中首次采用单侧双向抗滑可换式锚固体系,斜拉索钢绞线的安装采用单根穿索的方式进行。安装前,根据设计的要求,先定位好相应的锚板、HDPE护套等相关配套部件的安装位置,以便钢绞线顺利通过相应构件,完成挂穿索工作^{[5][6]}。带有单侧双向抗滑可换式锚固体系抗滑键的斜拉索安装过程如下:

(1) 斜拉索在工厂下料后直接挤压抗滑键,对带有抗滑键的钢绞线左右两侧进行标记,成盘运输到施工现场;

(2) 在施工现场,辨别钢绞线上对应的拉索编号,按照施工顺序将带有抗滑键的钢绞线线盘放置到放线基架上;

(3) 竖向自上而下逐行进行穿索,水平方向则自外侧往内侧逐孔进行穿索;

(4) 根据张拉施工工法,按张拉施工工艺控制斜拉索各根钢绞线的张拉力,并保证抗滑键

均紧密贴合在转向鞍端面。

(5) 逐次安装抗滑插片，旋紧锁紧螺母。

按照以上方法，完成带有单侧双向抗滑可换式锚固体系的拉索安装（如图12、图13）。



图10 旋出锁紧螺母

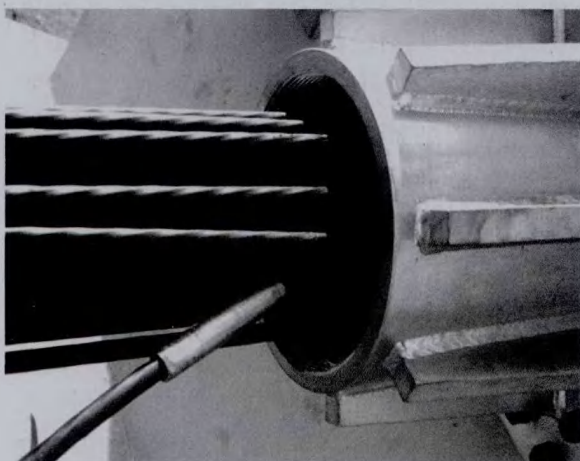


图11 取出钢绞线

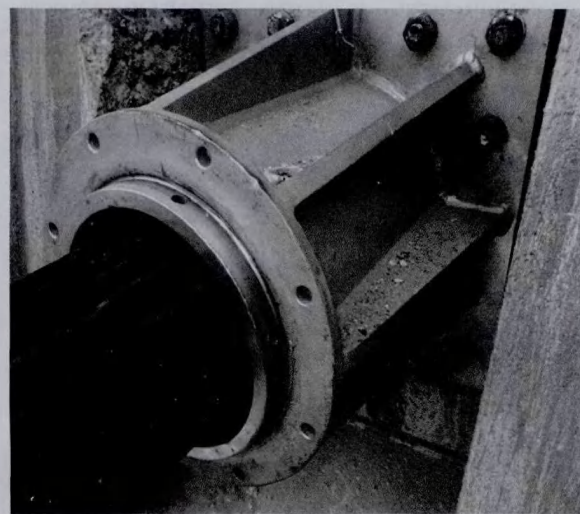


图12 抗滑装置与索鞍连接



图13 台湾小半天矮塔斜拉桥竣工

5 结语

经过不断的研究改进及在实际工程中的成功应用，OVM单侧双向抗滑可换式锚固拉索体系各项指标均能满足主要技术经济指标，符合设计、施工要求。该体系已成功运用在台湾小半天桥等工程，并有数十座矮塔斜拉桥工程采用该设计方案。

应用结果表明OVM单侧双向抗滑可换式矮塔斜拉桥拉索体系具有安全可靠、受力明确、单根调索、单根可换的优点，具有优异的防腐性能和良好的抗疲劳性能等技术优势，同时具有造价经济、施工方便、便于检测维修等特点。该体系在原OVM单根可换式矮塔斜拉桥体系进行优化改进，解决了原体系不能满足大偏载力的工况和施工繁琐等问题，并且进一步优化了拉索锚具，使之结构更加合理和经济，OVM单侧双向抗滑可换式矮塔斜拉桥拉索体系的成功开发应用，将更有力地促进我国矮塔斜拉桥这种新型桥型的迅速发展。

参考文献

- [1] 郑衫, 王戒躁. 矮塔斜拉桥斜拉索抗滑移性能研究[J]. 桥梁建设, 2001, 5: 20-21.
- [2] 李文献, 宋强等. 矮塔斜拉桥中交叉抗滑键的研究及应用[J]. 桥梁建设, 2012, 42(6): 92-96.
- [3] 李文献, 徐栋, 肖军等. 拉萨市纳金大桥桥塔节段尺寸模型试验研究[J]. 世界桥梁, 2012, 40(5): 63-68.
- [4] 闫云友, 庞维林等. OVM250平行钢绞线拉索单根换索试验研究[J]. 预应力技术, 2005, 52(5): 19-23.
- [5] 李晓磊, 赵艳. 淮安通甫路大运河桥斜拉索施工技术[J]. 预应力技术, 2012, 92(3): 35-39.
- [6] 叶生. 谈某斜拉桥环氧涂层钢绞线斜拉索施工工艺[J]. 山西建筑, 2009, 35(5): 310-311.