

# 武汉三官汉江公路大桥技术创新

张铭<sup>1</sup> 詹建辉<sup>1</sup> 李文献<sup>2</sup>

(1 湖北省交通规划设计院 湖北武汉 430051 2 柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

**摘要:**本项目系统研究并设计了大跨度预应力混凝土部分斜拉桥宽幅主梁的合理截面形式,总结了大悬臂加劲隔板箱形截面主梁的受力性能,针对性地提出了宽幅主梁耐久性防裂措施;研发了部分斜拉桥新型单侧双向抗滑锚固系统,模拟实桥进行了单根钢绞线抽换试验,可以使部分斜拉桥的斜拉索真正做到可更换、可检测。

**关键词:**大跨度 预应力混凝土 斜拉桥 宽幅大悬臂主梁 加劲隔板 单侧双向抗滑锚固装置 换索试验

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2017.03.001

## 1 工程概述

武汉三官汉江公路大桥桥址位于武汉市外环线和三环线之间,上距蔡甸桥约4.2km,下距三环线长丰桥约8km。本项目公路等级为一级公路双向六车道,设计速度80km/h,设计汽车荷载为公路-I级,设计洪水频率为1/300,

50年超越概率水平5%基岩地震动峰值加速度为69.76cm/m<sup>2</sup>。

三官汉江公路大桥主桥采用主跨190m双塔PC部分斜拉桥<sup>[1]</sup>,竖琴式中央索面,跨度组合为120m+190m+120m,总跨度430m。主桥布置图如图1所示。

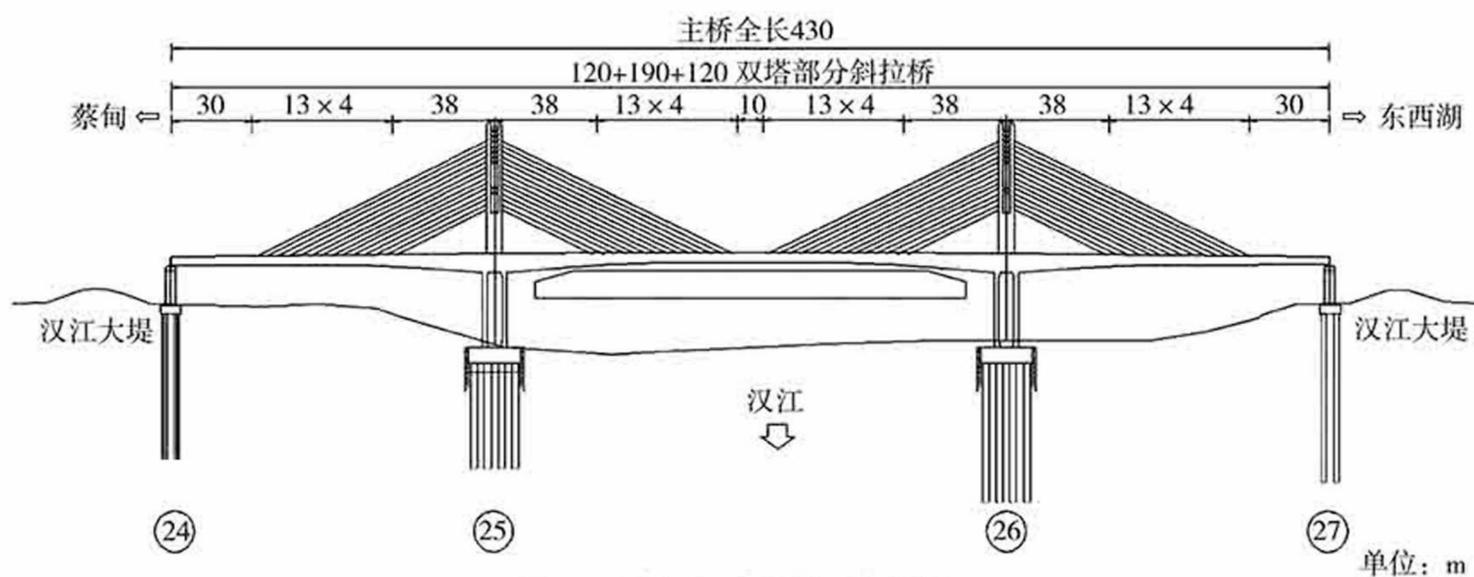


图1 三官汉江大桥桥型布置图

主梁采用大悬臂加劲隔板单箱三室截面,主梁全宽33.5m,其中翼缘板宽度达8.0m。索塔采用独柱形索塔,为实心矩形带圆弧截面。横桥向斜拉索双排布置在2.5m宽中央分隔带上,两排斜拉索间距1.0m;斜拉索顺桥向索距为4.0m,塔上竖向间距1.9m。全桥共4×14对斜拉索,每根斜拉索由31根 $\phi_{15.26}$ mm单根环氧钢绞线组成。

主桥采用塔、墩、梁固结体系,主墩与主梁、索塔固结,两边墩处分别设置一个单向活动支座和一个多向活动支座。主墩采用双薄壁

墩,塔墩基础采用群桩基础。主桥效果图如图2所示。



图2 三官汉江大桥效果图

## 2 主要技术创新

### 2.1 大跨度PC部分斜拉桥宽幅主梁合理截面设计

部分斜拉桥兼有常规斜拉桥与梁式桥的优点,近二十年来在国内发展迅猛<sup>[2]</sup>。从目前国内已建和在建的混凝土部分斜拉桥来看,该桥型有逐步向大跨径、宽幅桥面发展的趋势。对于大跨径宽幅主梁部分斜拉桥而言,需要从设计上保证结构的安全、合理、经济,如何进行主梁截面形式的合理选型尤为重要。

#### 2.1.1 主梁设计选型

由于本项目主梁全宽达到33.5m,主跨跨径较大,上部结构恒载占全部荷载的比例达到90%以上,设计从减轻上部结构重量的角度出发,采用大悬臂翼缘单箱三室主梁截面,翼缘板宽度设计为8.0m,约占主梁全宽的一半。为增强主梁横向结构刚度<sup>[3]</sup>,主梁顶板设计了通长横向加劲隔板,并在加劲隔板内配置了预应力钢束。设计对大悬臂翼缘和正常翼缘宽度箱形截面主梁(翼缘宽度一般采用3.0m~4.5m)进行了技术经济比较:由于主梁节段重量的减轻,大悬臂翼缘主梁的混凝土用量指标可节省约11%,主梁预应力钢束用量指标可节省20%以上<sup>[4]</sup>,相应斜拉索及主梁挂篮的材料数量也有所节省。对于大跨度宽幅PC部分斜拉桥而言,采用单箱三室大悬臂翼缘主梁截面形式,其经济效益尤其显著。

同时,为保证大悬臂加劲隔板单箱三室截面主梁的结构受力性能满足设计及规范要求、提高宽幅主梁结构使用的耐久性,设计进行了系统的研究分析工作。

#### 2.1.2 主梁构造设计

主梁采用单箱三室大悬臂变截面PC连续箱梁,箱梁根部高度6.5m,跨中高度3.0m,自双薄壁墩起57m范围内箱梁高度按1.6次抛物线变化。箱梁顶宽33.5m,其中悬臂板长8m,底宽17.5m。外腹板和中间腹板均为直腹板,腹板厚50cm~110cm。主梁边室顶板厚度为30cm~65cm,中室顶板厚度为45cm~80cm;底板厚28cm~110cm。

主梁顶板设置横向通长加劲隔板,包括翼缘及箱室内范围。加劲隔板采用短隔板,厚35cm,纵桥向设置间距为3m、4m,与主梁的节段划分相同。主梁在斜拉索锚固处及梁端的箱室内设置整体式横隔板,边室横隔板厚度35cm,中室横隔板厚度45cm。主梁典型截面图如图3所示。

主梁采用三向预应力结构,纵向预应力采用15-7、15-16、15-22钢绞线;横向预应力采用15-5、15-12钢绞线,其中15-5预应力束布置在顶板和加劲隔板内,15-12预应力束布置在整体式横隔板内;竖向预应力采用直径32mm高强精轧螺纹粗钢筋,布置在腹板内。

主梁0号段长14m,1号~9号梁段长3m,其余悬浇梁段长度均为4m,边跨支架现浇梁段长23.9m,边跨、中跨合龙段长2m。主梁采用后支点挂篮悬臂浇筑施工。

#### 2.1.3 宽幅大悬臂加劲隔板主梁受力性能研究

针对大悬臂加劲隔板单箱三室箱形主梁,设计采用空间有限元程序系统研究并总结了其结构受力性能、分析了施工期及运营期宽幅主梁的剪力滞效应影响。

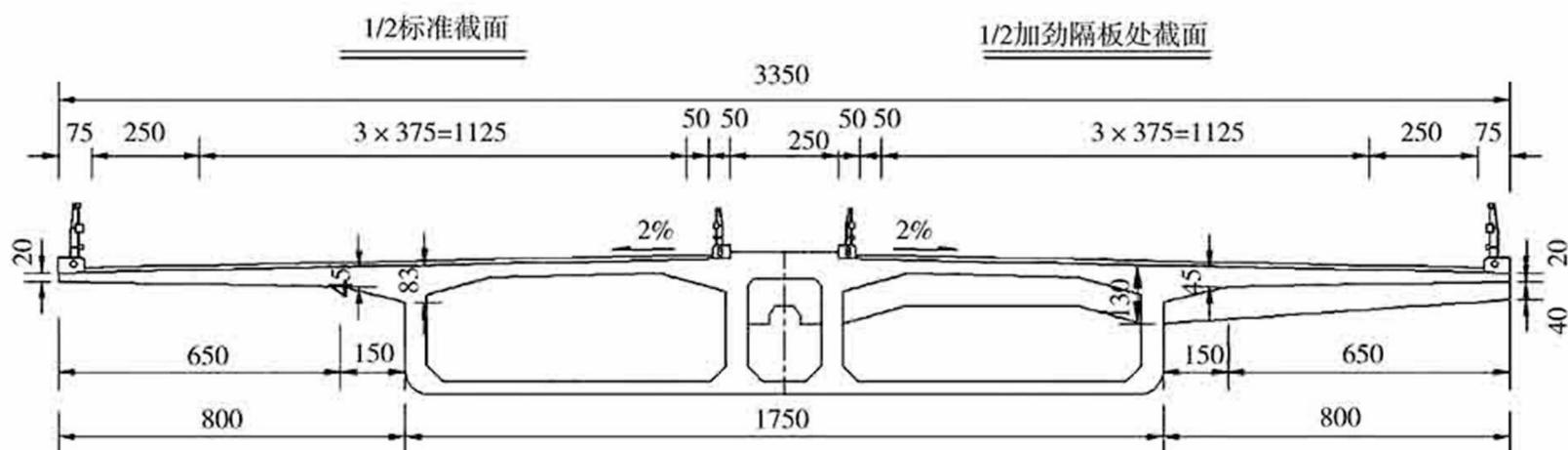


图3 主梁典型截面图

主梁横向受力性能研究表明：大悬臂加劲隔板主梁承载能力及正常使用极限状态验算均可满足规范要求，主梁结构的横向受力可达到预应力混凝土A类构件的预应力水平，并留有一定富余。

大桥全施工过程及运营期有限元分析表明：

(1) 大悬臂宽幅主梁在施工及成桥阶段，箱梁顶、底板均存在一定的剪力滞效。相对而言，主梁在施工期的剪力滞效应更为明显；

(2) 大悬臂宽幅主梁顶板的剪力滞效应较为显著，而底板的剪力滞效应则很小；

(3) 在主梁悬臂施工过程中，节段悬臂端部的顶、底板剪力滞效应最为显著；

(4) 在主梁短悬臂状态，由于受0#节段塔、墩、梁固结的约束影响，主梁翼缘板剪力滞效应较为显著。从箱梁外腹板至翼缘外侧，翼缘板正应力呈三角形分布，翼缘外侧可能存在压应力储备较小区域。随着主梁悬臂施工节段的生长，翼缘板剪力滞效应影响逐渐减小。因此，在施工过程中应该重视剪力滞效应对大悬臂翼缘的影响，防止大悬臂翼缘板横向开裂；

(5) 1.5m及2.9m高度的加劲隔板对比分析显示，加劲隔板的截面尺寸并不能对宽幅大悬臂主梁的顶板剪力滞效应产生显著改善，其截面尺寸拟定主要是满足主梁的横向受力需求。

#### 2.1.4 宽幅大悬臂加劲隔板主梁耐久性措施研究

通过全桥结构有限元分析，设计验证了该主梁形式的结构受力性能，并结合本项目施工的实践经验，提出了大悬臂翼缘宽幅主梁综合耐久性构造措施，在依托工程中成功实施。

(1) 在满足宽幅大悬臂主梁横向受力需求的基础上，合理布置桥面加劲隔板间距、确定加劲隔板截面尺寸，以保证主梁的横向结构刚度；

(2) 对于主梁各悬臂施工阶段，应保证翼缘板内足够的预应力度，即在主梁各节段翼缘板内配置一定数量的预应力锚固束；对于主梁短悬臂施工状态，可考虑采用精轧螺纹钢对翼缘板外侧区域进行预应力度度的补强；

(3) 主梁翼缘板内纵向预应力钢束尽量靠近翼板边缘布置；

(4) 主梁大悬臂翼缘板区段沿纵桥向设置足够的加强箍筋，以增强翼缘板的抗裂性能；

(5) 对于主梁各悬臂施工阶段，特别是主梁短悬臂施工状态，施工中应采取有效养护措施降低主梁大悬臂翼缘板温度变化速度，防止在过大的温度梯度作用下，大悬臂翼缘板产生横向裂缝；

可以考虑路侧防撞护栏混凝土底座与主梁节段混凝土同步浇筑，相当于在主梁翼缘板外侧设置了一道小纵梁，有助于缓解施工阶段主梁翼缘板的剪力滞效应；

(6) 主梁采用悬臂浇筑施工，应首先保证后支点挂篮的整体刚度，特别是大悬臂翼缘板区域挂篮及支架的竖向刚度。

## 2.2 可实现运营期换索的抗滑锚固系统研发

常规斜拉桥斜拉索的锚固方式为分离式，斜拉索分别锚固在主梁和索塔的锚固构造上，在桥梁运营期进行换索没有太大的技术难度。与常规斜拉桥不同，绝大多数部分斜拉桥的斜拉索采用贯穿锚固方式，钢绞线斜拉索利用预埋在索塔内的鞍座构造实现转向，为防止斜拉索在鞍座内滑移，需要在索塔两端设置环氧砂浆锚固装置实现体系的抗滑，这也造成了运营期斜拉索无法更换的弊端。如果设计之初能为将来斜拉索的更换预留可能，部分斜拉桥的耐久性及可维护性将大大提高。

### 2.2.1 新型单侧双向抗滑锚固系统构造

为了彻底解决部分斜拉桥斜拉索的运营期更换问题，本项目研发了基于分丝管索鞍的单侧双向抗滑锚固装置。该装置为一种带有抗滑锁紧结构的部分斜拉桥索鞍，由单根抗滑键、抗滑插片、锁紧螺母组成。新型单侧双向抗滑体系效果图如图4所示。

该锚固装置设置有固结在单根钢绞线上的抗滑键及锁紧结构，抗滑键的一端支承在索鞍端面，抗滑键的另一端与抗滑插片的一端紧密接

触,抗滑插片的另一端与锁紧螺母紧密接触,螺母与锚固筒螺纹连接,形成两端约束抗滑键滑动。该装置结构受力模式清晰,施工操作便利,不仅在施工阶段就可以提供足够的抗滑力,而且抗滑力持续不变,大大提高了拉索的使用安全性<sup>[5]</sup>。由于每根钢绞线形成独立抗滑,锁紧结构为可拆分式,解决了环氧砂浆握裹式抗滑锚在施工过程中的斜拉索抗滑问题及运营期无法单根换索的技术难题。

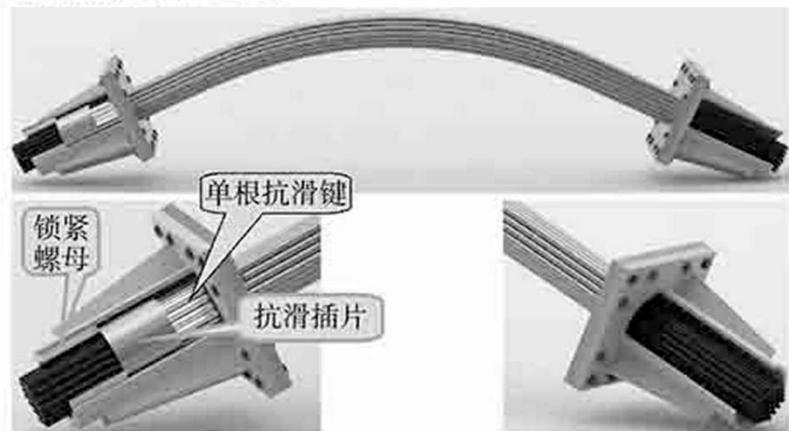


图4 分丝管索鞍配合单侧双向抗滑体系效果图

### 2.2.2 单侧双向抗滑锚固系统抗滑试验

由于该体系在国内部分斜拉桥工程属于首次应用,有必要结合本桥工程实际对该体系进行试验研究。抗滑试验模拟桥塔两侧斜拉索的偏载即抗滑力,研究索塔抗滑锚固装置在偏载作用下的微动情况,验证单侧双向抗滑锚固装置的结构性能及抗滑性能,确保塔端抗滑装置在1.4倍设计荷载作用下能满足设计抗滑要求,具有可靠的抗滑移性。

试验采用15-31规格钢绞线,斜拉索及单侧双向可换式抗滑装置在足尺模型上按照实桥进行安装锚固。斜拉索设计荷载为3150kN,设计偏载为1260kN,试验装置布置如图5所示。

抗滑试验结果表明:在模型索塔两端分别逐级加载不平衡力时,钢绞线产生的位移成均匀线性发展趋势,且位移量均在理论延伸之间,位移量非常小。在无抗滑键的A端及有抗滑键B端分别加载到1400kN偏载时,抗滑键未产生滑移现象,抗滑锚固装置的最大位移量变化为0.06mm,位移变化量非常小,抗滑键未发生相对滑动。将载荷卸载至标准载荷时,百分表能恢复到原数值,未出现抗滑力失效的现象。充分说明该单侧双向抗滑锚固装置内的抗滑键对钢绞线的握裹作用是优异的,在1.4倍设计荷载作用下抗滑力是可靠的。

### 2.2.3 单根钢绞线换索试验

该试验主要是模拟并最终掌握大桥运营阶段斜拉索的单根钢绞线更换技术,使部分斜拉桥的斜拉索真正做到可更换、可检测。试验选取更换难度最大的OVM15-31锚具中心单根钢绞线进行更换,具体步骤如下:

Step1 按照比例降低索力,旋紧拉索锚具的螺母,锁定索力;

Step2 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;

Step3 逐一取下抗滑插片;

Step4 选取一根钢绞线,用千斤顶放张索力,取出该根钢绞线的同时牵引一根新的钢绞线更换到原抽出的钢绞线位置;

Step5 通过千斤顶的张拉,将更换后的钢绞线两端安装夹片,完成新钢绞线的锚固,换索完毕。

单根钢绞线换索试验步骤如图6~图9所示。

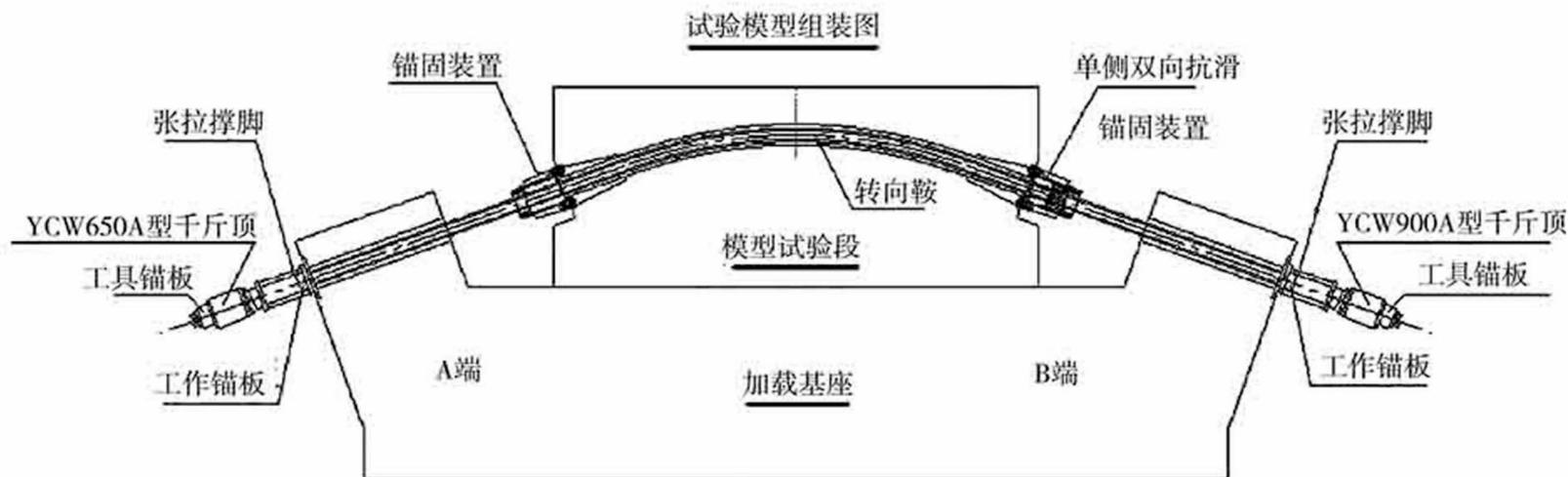


图5 试验装置布置图

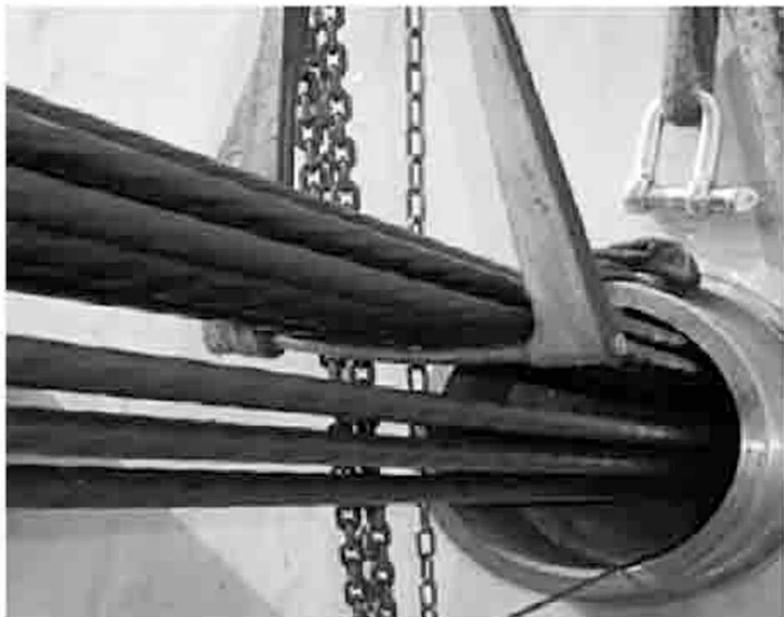


图6 利用手拉葫芦形成更换空间



图7 逐一取下抗滑插片

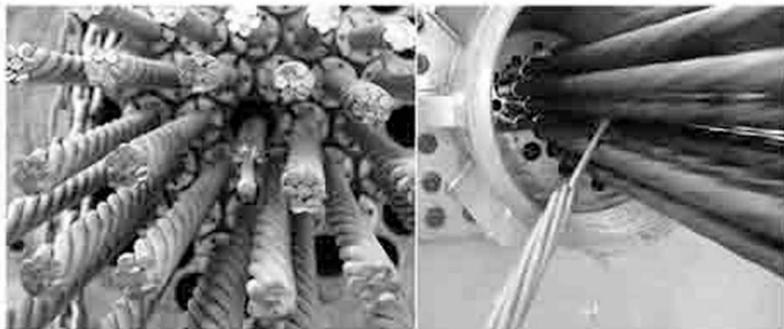


图8 抽出中心丝完成换索



图9 张拉锚固更换后的钢绞线

抗滑试验结果表明：根据实桥情况模拟进行了单根换索试验，该换索工艺能实现单根钢绞线的便利更换，在实桥中需要更换的拉索能在梁面即可完成抽换步骤，解决了换索空间问题，具有很强的可操作性和便利性，完全实现了部分斜拉桥拉索体系在桥梁运营阶段的换索功能。

### 3 结束语

本项目系统研究并设计了宽幅主梁合理截面形式，宽幅大悬臂加劲隔板单箱三室截面主梁结构受力性能完全满足规范要求；首次提出了宽幅主梁施工期及运营期综合防裂措施，大大提高了该结构的耐久性。该主梁形式可有效降低上部结构自重，在大跨度宽幅混凝土部分斜拉桥中采用具有较为显著的经济优势。武汉三官汉江大桥已于2015年11月建成通车，通过成桥健康监控系统的实时监测数据的分析，大桥运行状态良好，宽幅大悬臂加劲隔板主梁无裂缝产生。

本项目研发的新型单侧双向抗滑锚固系统彻底解决了部分斜拉桥斜拉索的运营期更换问题，在实桥中需要更换的斜拉索能在梁面即可完成更换步骤；通过试验验证了新型锚固系统的结构性能及抗滑性能；研究制定了单根钢绞线更换技术及实际操作工艺并模拟了大桥运营阶段斜拉索的更换，具有很强的可操作性。新型单侧双向抗滑锚固装置以及所进行的换索试验具有重大技术突破，对今后部分斜拉桥斜拉索的后期维护具有很高的指导和借鉴意义。

### 参考文献

- [1] 湖北省交通规划设计院. 武汉三官汉江公路大桥施工图设计[J]. 武汉: 2011.
- [2] 陈从春, 周海智, 肖汝诚. 矮塔斜拉桥研究的新进展[J]. 世界桥梁, 2006(1): 70-73.
- [3] 袁任重, 张明金, 干学军. 鄂十汉江大桥主桥设计[J]. 桥梁建设, 2013, 43(6): 94-98.
- [4] 湖北省交通规划设计院. 大跨度预应力混凝土部分斜拉桥设计及施工关键技术研究[R]. 武汉: 2015.
- [5] 邱敏, 高宁妥, 覃巍巍等. 三官汉江矮塔斜拉桥索塔节段模型试验研究[J]. 预应力技术, 2014(5): 11-18.