

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.02.013

# 螺栓接触非线性对钢牛腿-钢锚梁组合结构 受力状态的影响研究

伍彦斌, 黄方林

(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 为了解螺栓接触非线性对钢牛腿-钢锚梁组合结构受力性能的影响及高强螺栓自身的受力状态, 在宏观受力分析的基础上, 以在建贵州红水河特大桥为背景, 基于 ANSYS 建立该桥整体及索塔锚固结构的混合单元有限元模型, 并进行了计算分析与比较。结果表明: 螺栓接触非线性一方面对钢牛腿与钢锚梁的协同受力性能产生有利影响; 另一方面, 高强螺栓参与受力后, 钢锚梁两端的纵向约束加强, 钢锚梁中部上拱量明显增大, 钢锚梁与钢牛腿之间的相对滑移明显减小, 螺栓孔周边局部应力显著增大。综合来看, 螺栓接触非线性对钢牛腿-钢锚梁组合结构受力性能的影响偏于不利, 不考虑高强螺栓作用的分析结果偏不安全。

**关键词:** 桥梁工程; 钢牛腿-钢锚梁组合结构; 精细化有限元分析; 螺栓接触非线性; 红水河特大桥

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2017)02-0081-07

## Study on Effect of Bolt Contact Nonlinearity on Mechanical State of Steel Corbel-anchor Beam Composite Structure

WU Yan-bin, HUANG Fang-lin

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China)

**Abstract:** In order to understand the effect of bolt contact nonlinearity on the mechanical state of steel corbel-anchor beam composite structure, and the mechanical state of high strength bolts, on the background of the constructing Hongshui River Grand Bridge in Guizhou after macro mechanic analysis, the hybrid finite element models of the whole bridge structure and cable-pylon anchorage are established based on ANSYS, and the calculation and analysis are performed. The result shows that (1) on the one hand, the bolt contact nonlinearity has a favorable effect on the associative mechanical properties of steel corbel and anchor beam; (2) on the other hand, as high strength bolts involved in bearing loads, the longitudinal restraints at both ends of the anchor beam have been strengthened, the bending deformation of middle of anchor beam is increased obviously, the relative sliding between steel corbel and anchor beam is reduced, and the local stress around the bolt holes is increased significantly. In general, the effect of the bolt contact nonlinearity on the mechanical state of steel corbel-anchor beam composite structure lean to unfavorable, the analysis result without considering the action of high strength bolts is in unsafe side.

**Key words:** bridge engineering; steel corbel-anchor beam composite structure; refined finite element analysis; bolt contact nonlinearity; Hongshui River grand bridge

收稿日期: 2016-02-29

基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目 (2013-122-001)

作者简介: 伍彦斌 (1985-), 男, 湖南新化人, 博士研究生. (wangqishi963@126.com)

## 0 引言

钢牛腿-钢锚梁组合结构是大跨度斜拉桥的一种新型索塔锚固型式,自我国舟山金塘大桥首次应用以来,由于其整体性能好,传力路径明确,已成功在国内多座大桥上应用<sup>[1-5]</sup>。钢锚梁沿顺桥向置于混凝土索塔内壁的钢牛腿上,两者之间的连接或约束方式可以分为3种:两端滑动、两端固定或一端滑动一端固定<sup>[6]</sup>,如舟山金塘大桥、厦漳跨海大桥北汊主桥采用两端滑动约束方式<sup>[2-3]</sup>,荆岳长江公路大桥采用两端固定约束方式<sup>[4]</sup>,九江长江公路大桥采用一端固定一端滑动约束方式<sup>[5]</sup>。

高强螺栓一般用在两端滑动约束的钢牛腿-钢锚梁组合结构中。目前已有研究主要针对钢牛腿-钢锚梁组合结构体系在水平向和竖向的传力机理,从宏观上分析力的传递路径<sup>[8]</sup>、力在钢锚梁和混凝土塔壁之间的分配关系<sup>[8-9]</sup>、钢壁板与塔壁的相互作用等<sup>[10]</sup>。对钢牛腿-钢锚梁组合结构中高强螺栓的受力状态,以及螺栓接触非线性对钢牛腿-钢锚梁组合结构受力性能的影响,尚缺乏相关的分析研究。基于此,本文针对高强螺栓在钢牛腿-钢锚梁组合结构中的功能特点,以在建贵州红水河特大桥索塔锚固结构为研究对象,采用ANSYS建立混合单元有限元模型,考虑整体结构几何非线性、支座非线性、斜拉索垂度效应、接触非线性、钢-混凝土黏结滑移等因素,研究了高强螺栓的受力状态及螺栓接触非线性对钢牛腿-钢锚梁组合结构受力状态的影响。

### 1 螺栓连接的钢牛腿-钢锚梁组合结构受力分析

螺栓连接的钢牛腿-钢锚梁组合结构典型构造图如图1所示,斜拉索锚固在钢锚梁两端的锚垫板上,钢锚梁两端支承在钢牛腿座板上,钢牛腿通过钢壁板背面的抗剪连接件与混凝土塔壁结合。钢锚梁由锚垫板、盖板、底板、腹板(拉板)、横隔板及加劲肋组成;钢牛腿由座板(顶板)、托板(腹板)、钢壁板及抗剪连接件组成,抗剪连接件采用焊钉或抗剪钢板;钢锚梁与钢牛腿采用高强螺栓连接,其间设聚四氟乙烯(PTFE)板条,与钢锚梁底部不锈钢板组成滑动摩擦副。

如图2所示,索力( $F_{cab}$ )由锚固螺母传递给锚垫板后,通过锚垫板下方的承压板以斜方向剪力的形式传递腹板,在索力及结构均非对称的条件下,钢锚梁两端的水平力、竖向力均非对称,故钢锚梁

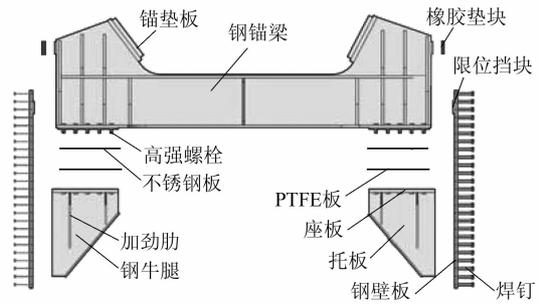


图1 典型的钢牛腿-钢锚梁组合结构构造图

Fig. 1 Structural diagram of typical steel corbel-anchor beam composite structure

中心既有轴力( $N$ ),也有剪力( $V$ )和弯矩( $M$ ),整个钢锚梁在纵向为偏心受拉构件,在竖向为受剪构件。

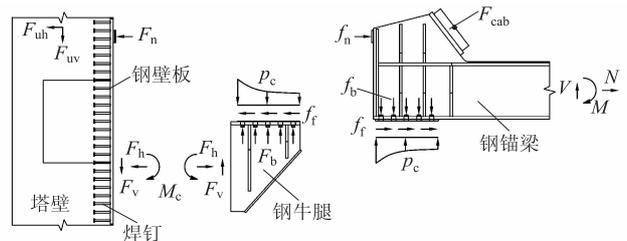


图2 螺栓连接的钢牛腿-钢锚梁组合结构受力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of forces on bolt connected steel corbel-anchor beam composite structure

索力的竖向分力由钢锚梁底部的不锈钢板-聚四氟乙烯板摩擦副以非均匀接触压力( $p_c$ )的形式传递给钢牛腿,通过钢牛腿座板、托板与钢壁板之间的焊缝传递给钢壁板,再由钢壁板背面的剪力钉与抗剪钢板传递给混凝土塔壁。对于钢壁板而言,索力的竖向分力是一种偏心力,钢壁板处于平面外受弯状态,在钢牛腿座板顶面产生拉拔效应。

索力的水平分力一部分由钢锚梁顶部的限位挡块传递给钢壁板,一部分以摩擦力的形式传递给钢牛腿进而传递给混凝土塔壁。

### 2 混合单元有限元模型

目前大部分对钢牛腿-钢锚梁组合结构的有限元分析,一般是单独建立索塔锚固区的精细化局部有限元模型<sup>[11]</sup>。实际上,索塔锚固结构作为整体结构的一部分,不仅承受斜拉索的索力,还参与结构整体变形。精细化节段模型虽然能够精确模拟锚固构造,但很难准确考虑该节段上、下端索塔的影响,不能反映出结构整体受力和变形特征<sup>[12]</sup>。为反映结

构整体与局部变形、受力的统一性, 基于 ANSYS, 采用混合单元建立有限元模型并进行分析。

### 2.1 工程背景

本文以在建红水河特大桥为背景。红水河特大桥位于贵州省罗甸县与广西省天峨县交界处, 横跨红水河, 桥位处为“U”形峡谷, 是贵州省境内第 1 座采用混合式叠合梁的大跨度斜拉桥。该桥孔跨布

置为 2 × 20 m 现浇箱梁 + (213 + 508 + 185) m 斜拉桥; 斜拉桥中跨和贵州岸边跨为叠合梁, 广西岸边跨主梁为预应力混凝土双肋式 II 形梁; 主塔形式为薄壁空心花瓶型, 高 195 m; 斜拉索采用平行双索面, 共 168 根。结构跨径布置不对称, 主梁结构形式及索力分布不对称, 结构构造复杂。红水河特大桥桥型布置如图 3 所示。

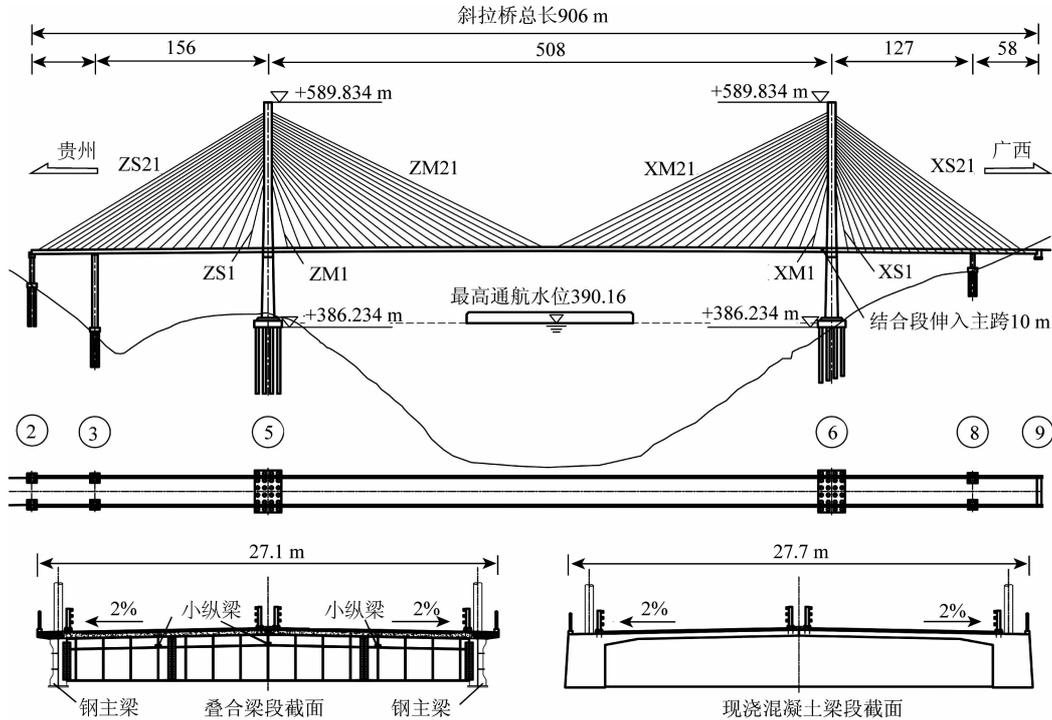


图 3 红水河特大桥桥型布置图

Fig. 3 General arrangement of Hongshui River Grand Bridge

红水河特大桥除各塔侧第 1 对斜拉索采用混凝土齿块式锚固外, 其余索塔锚固区均采用钢牛腿 - 钢锚梁组合结构形式。索塔锚固区标准节段高 2.5 m, 底部节段高 3.0 m。混凝土端塔壁宽 4.6 m, 厚 1.2 m。侧塔壁宽 7.2 m, 厚 0.9m。钢锚梁与钢牛腿采用高强螺栓连接, 之间采用不锈钢和聚四氟乙烯板构成滑动摩擦副, 高强螺栓不设初始预紧力, 仅起限位作用。钢壁板宽 1.8 m, 厚 32 mm, 单板平均配置约 325 根  $\phi 22 \times 200$  mm 的剪力钉连接件, 在钢牛腿腹板对应位置设抗剪钢板, 与混凝土塔柱劲性骨架连接。桥塔混凝土强度等级为 C50, 钢锚梁材质为 Q370qD, 高强螺栓材质为 35VB, 剪力钉材质为 ML15。红水河特大桥钢牛腿 - 钢锚梁组合锚固结构示意图如图 4 所示。

### 2.2 混合单元有限元模型的建立

整体模型考虑桥面纵坡及竖曲线, 采用 Shell181 单元模拟桥面板; 采用 Beam188 单元模拟各类纵、

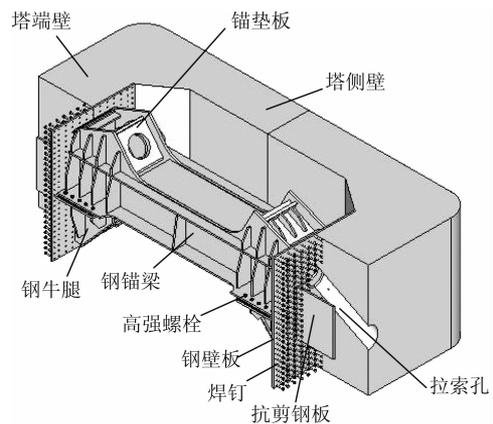


图 4 红水河特大桥索塔锚固结构构造示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cable-pylon anchorage of Hongshui River Grand Bridge

横向梁及主塔, 在模型中考虑钢梁的加劲肋板、斜拉索锚固体系等构造的质量贡献, 其中梁单元通过每延米截面附加质量参数 (ADDMA) 定义, 锚固

体系质量采用集中质量单元 (Mass21) 定义; 采用 Link180 单元模拟斜拉索, 并划分为多段杆单元以考虑垂度效应; 采用 MPC184 刚性梁单元将斜拉索端部节点分别与主梁、主塔节点连接, 以保证斜拉索

的理论锚固位置与设计精确相符; 采用 Contact178 点-点接触单元和 Combin39 非线性弹簧单元模拟支座, 支座刚度和摩擦系数根据厂家提供的参数确定。整体有限元模型如图 5 (a) 所示。

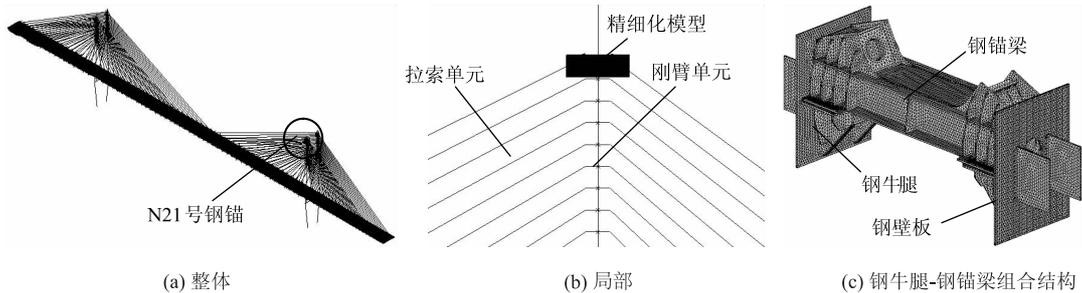


图5 混合单元有限元模型

Fig.5 Hybrid finite element model

在整体模型的基础上, 选取全桥索力最大、倾角最小的广西岸主塔 N21 号钢锚梁建立精细化模型。采用实体单元模拟混凝土桥塔、聚四氟乙烯板和各个钢结构板件, 剪力钉采用非线性弹簧单元模拟, 每个剪力钉用 3 个单向弹簧单元模拟抗剪和抗拉拔作用, 弹簧的刚度根据文献 [13-14] 确定, 其中拉拔方向的弹簧单元一个节点置于钢壁板背面, 另一个节点置于混凝土内部实际剪力钉头部位置, 以更真实地模拟其抗拉拔性能<sup>[1]</sup>。

钢与混凝土接触面、钢与橡胶垫块接触面、不锈钢与聚四氟乙烯板接触面、螺母与钢板接触面上设置非线性接触单元。钢-混凝土之间摩擦系数取 0.4<sup>[1,14]</sup>, 钢-橡胶垫块之间摩擦系数取 0.2, 不锈钢-聚四氟乙烯板之间摩擦系数取 0.06<sup>[15]</sup>。考虑预埋入塔柱内部的抗剪钢板与混凝土之间的黏结, 参考文献 [16] 中型钢沿周长全长的黏结强度, 取 0.5 MPa, 通过接触单元的实常数定义。整体模型与精细化局部模型的单元在交界面采用刚性面连接, 如图 5 (b) 所示, 钢锚梁精细化局部模型如图 5 (c) 所示。

为研究螺栓接触非线性对钢锚梁受力状态的影响, 本文建立 2 个模型。模型 1 (无螺栓模型, M1): 不建立螺栓孔及螺栓实体, 不考虑螺栓的限位作用, 钢锚梁与钢牛腿之间为摩擦接触关系; 模型 2 (摩擦接触模型, M2): 建立螺栓孔及螺栓、垫圈、螺母实体, 考虑螺母、垫圈与钢板之间及螺栓杆与孔壁之间的接触。

### 3 螺栓接触非线性影响分析

根据钢锚梁两端索力差的最不利效应, 考虑两

种工况, 其中工况 1 (LC1) 为恒载 + 索力差最大工况, 工况 2 (LC2) 为恒载 + 索力差最小工况。两种工况下索力的水平分力及其差值见表 1。

表1 索力水平分力表 (单位: kN)

Tab.1 Horizontal components of cable forces (unit: kN)

工况	XM21#	XS21#	差值
1	4 610.9	5 445.3	834.3
2	5 115.2	5 194.4	79.2

两种工况下的位移计算结果见表 2。在斜拉索水平分力的偏心作用下, 钢锚梁沿纵向伸长, 且顶缘伸长量大于底缘, 中部上拱, 钢锚梁与钢牛腿之间产生相对滑移。钢锚梁腹板底缘的纵向、竖向位移比较曲线如图 6 所示。

表2 位移计算结果汇总表

Tab.2 Summary of displacement calculation results

影响	LC1 位移/mm			LC2 位移/mm		
	M1	M2	$\eta/\%$	M1	M2	$\eta/\%$
腹板顶缘伸长	1.14	1.16	1.89	1.20	1.21	0.68
腹板底缘伸长	0.44	0.40	-9.60	0.42	0.40	-3.50
腹板中部上拱	0.40	0.45	10.77	0.48	0.49	3.38
四氟板滑移	0.62	0.47	-24.19	0.43	0.40	-6.98

注: 表中  $\eta$  指模型 2 相对于模型 1 的相对增量, 下同。

表 2 表明, 两个模型的位移计算结果有较大差异。考虑螺栓接触非线性后, 最大索力差工况下, 钢锚梁腹板顶部伸长量增大约 1.9%, 底部伸长量减小约 9.6%, 中部上拱量增大约 10.8%, 四氟板滑移量减小约 24.2%; 最小索力差工况与最大索力差工况的变化趋势相同, 但影响程度较小。这说明考虑螺栓接触非线性后, 接触摩擦增大了钢锚梁两端的纵向约束, 在偏心水平分力作用下钢锚梁中部产生较大弯曲变形。

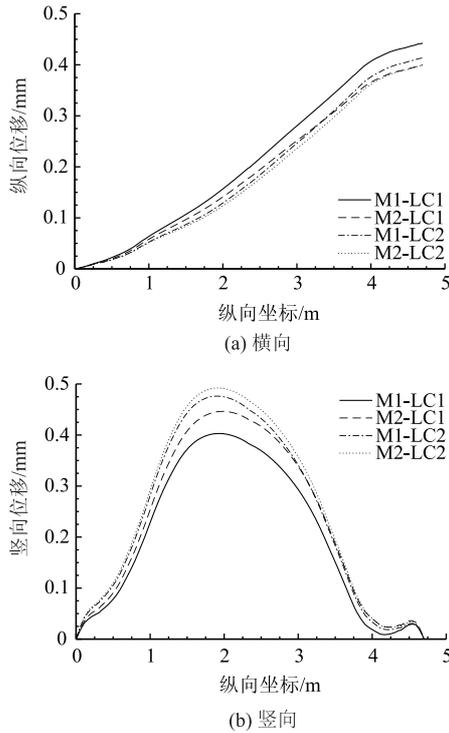


图6 钢锚梁腹板纵向、竖向位移分布曲线

Fig.6 Distribution curves of longitudinal and vertical displacements of web plate of steel anchor beam

两种工况下的混凝土主应力计算结果见表3。由于竖向偏心力作用, 钢壁板在平面外受弯, 钢牛腿腹板作用给塔壁的水平力为“上拉下压”, 牛腿座板与钢壁板相交处出现拉拔效应, 同时钢牛腿腹板底部主压应力较大。在斜拉索索孔两侧, 混凝土截面有较大幅度的削弱, 同一排剪力钉的数量较少, 单颗剪力钉承受的拉拔力较大, 对应的混凝土塔壁主拉应力较大。

表3 混凝土主应力计算结果汇总表

Tab.3 Summary of principal stress calculation results of concrete

工况	主拉应力/MPa		$\eta/\%$	主压应力		$\eta/\%$
	M1	M2		M1	M2	
LC1	7.16	6.99	-2.37	9.12	9.05	-0.77
LC2	7.00	6.99	-0.14	8.50	8.45	-0.59

从表3可以看出, 考虑螺栓接触非线性后, 混凝土主应力减小, 但减小的程度较低。这说明在螺栓接触非线性的影响下, 钢牛腿与钢锚梁的协同受力性能增强, 整体抗弯刚度增大。

两种工况下的主要钢结构板件等效应力计算结果见表4。在不剔除螺栓孔局部区域的情况下, 考虑螺栓接触非线性影响后, 钢锚梁底板和钢牛腿顶板的局部等效应力显著增大, 在最大索力差工况下,

最大相对增量达50.4%; 剔除螺栓孔局部区域后, 两个模型的钢结构等效应力比较接近。这说明螺栓接触非线性对钢牛腿-钢锚梁组合结构螺栓孔周边的局部应力有较大影响, 对远离螺栓孔的其他大部分区域的应力影响较小, 符合受力规律。

表4 主要钢结构板件等效应力计算结果汇总表

Tab.4 Summary of equivalent stress calculation results of main steel plates

位置	LC1 应力/MPa		$\eta/\%$	LC2 应力/MPa		$\eta/\%$
	M1	M2		M1	M2	
腹板	134.0	133.0	-0.75	145.0	145.0	0
底板	52.2	78.5	50.38	49.8	71.2	42.97
		53.9*	3.26		50.3*	1.00
钢牛腿	104.0	125.0	20.19	96.5	107.0	10.88
		101.0*	-2.88		95.8*	-0.73
钢壁板	53.3	53.7	0.75	50.4	50.2	-0.40

注: 表中带“\*”者, 表示剔除螺栓孔局部区域(范围大小为距离孔壁1倍孔径, 即以螺栓轴线为中心3倍孔径)后, 其他一般区域的应力值。

在考虑螺栓接触非线性的模型中, 螺栓变形后基本呈“S”形, 垫圈弯折, 承压区沿纵向分布在螺栓杆两侧, 螺栓处于复杂的应力状态。靠近钢锚梁中部的螺栓典型等效应力云图如图7所示。

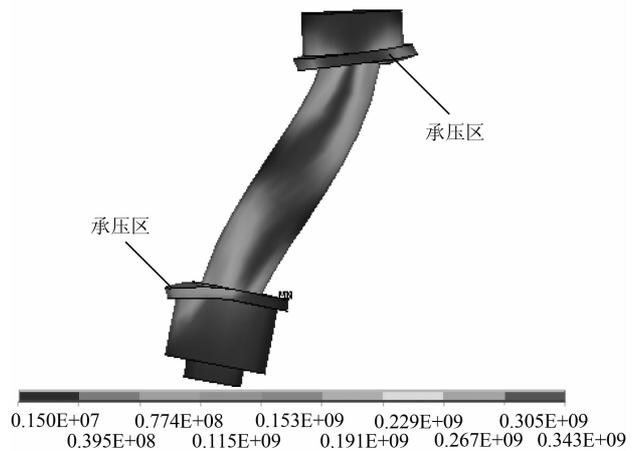


图7 靠近钢锚梁中部的典型螺栓等效应力云图(单位: Pa)

Fig.7 Nephogram of equivalent stress of typical bolt near middle of anchor beam (unit: Pa)

两种工况下的剪力钉的最大内力计算结果见表5。两个模型中剪力钉的拉拔力分布基本一致, 在横向以索孔两侧的剪力钉拉拔力最大, 由于此处混凝土截面削弱, 同一排剪力钉数量较少, 故单颗剪力钉拉拔力较大。剪力钉拉拔力沿竖向呈单峰波浪形分布, 由于斜拉索竖向分力的偏心影响, 钢壁板

在与钢牛腿座板连接处呈面外弯曲状态, 对应位置的剪力钉拉拔力出现峰值。两个模型中剪力钉竖向剪力的分布基本一致, 横向基本对称, 在钢牛腿座板及钢牛腿腹板底缘附近表现出较大的突变, 在钢壁板底部达峰值。峰值拉拔力和竖向剪力对应同一排的剪力钉内力分布曲线如图8所示。

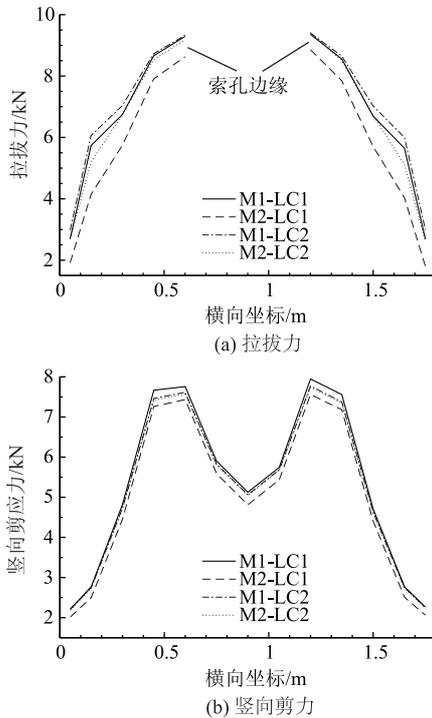


图8 剪力钉内力分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of internal forces of shear studs

从表5可以看出, 考虑螺栓接触非线性后, 在最大索力差工况下, 剪力钉拉拔力及竖向剪力均有较大程度的降低; 在最小索力差工况下, 其基本不受影响。这说明螺栓接触非线性对剪力钉的受力状态影响较小。

表5 剪力钉内力计算结果汇总表

Tab. 5 Summary of internal force calculation results of shear studs

工况	拉拔力		$\eta/\%$	竖向剪力		$\eta/\%$
	M1	M2		M1	M2	
LC1	9.36	8.86	-5.37	7.95	7.56	-4.87
LC2	9.40	9.42	0.14	7.77	7.74	-0.44

#### 4 结论

本文针对螺栓连接的钢牛腿-钢锚梁组合结构中高强螺栓的受力特征, 以在建贵州红水河特大桥为背景, 基于ANSYS建立了该桥整体与索塔锚固结构的混合单元有限元模型, 研究了螺栓接触非线性

对组合结构受力状态的影响。结论如下:

(1) 考虑螺栓接触非线性, 可以反映高强螺栓对钢牛腿与钢锚梁协同受力性能的积极影响并提高了整体刚度, 钢壁板的拉拔效应有所降低, 混凝土塔壁的主应力有所减小。

(2) 高强螺栓参与结构受力后, 钢锚梁两端的纵向约束加强, 中部上拱明显增大, 相对滑移明显减小。螺栓孔附近约3倍孔径范围内的局部应力显著增大, 最大索力差工况下增大达50.4%, 与理想的两端滑动模式有较大差异。

(3) 螺栓接触非线性对剪力钉的受力状态影响较小。

综合来看, 螺栓接触非线性使钢牛腿-钢锚梁组合结构的受力状态偏于不利, 不考虑高强螺栓作用的分析结果偏不安全, 设计中应对螺栓孔边加强。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 张喜刚, 刘玉擎. 组合索塔锚固结构 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.  
ZHANG Xi-gang, LIU Yu-qing. Cable-pylon Composite Anchorage [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [2] 陈向阳, 王昌将, 史方华. 大跨径斜拉桥钢锚梁的创新设计 [J]. 公路, 2009 (1): 130-132.  
CHEN Xiang-yang, WANG Chang-jiang, SHI Fang-hua. Blazing New Trails in Design of Steel Anchor Beam for Long Span Stayed-cable Bridge [J]. Highway, 2009 (1): 130-132.
- [3] 李军, 陈学兵. 厦漳跨海大桥北汊主桥索塔及其钢锚梁研究 [J]. 公路交通技术, 2012 (4): 54-60.  
LI Jun, CHEN Xue-bing. Research on Research on Cable Towers and Steel Anchor Beams of Main Bridge in Northern Bay of Xia-zhang Bridge across Sea [J]. Technology of Highway and Transport, 2012 (4): 54-60.
- [4] 胡贵琼, 郑舟军. 荆岳长江公路大桥钢锚梁索塔锚固区单节段模型有限元分析 [J]. 世界桥梁, 2010 (2): 40-44.  
HU Gui-qiong, ZHENG Zhou-jun. Finite Element Analysis of Single Sectional Model of Cable-to-Pylon Steel Anchor Beam Anchor Zone of Jingyue Changjiang River Highway Bridge [J]. World Bridges, 2010 (2): 40-44.
- [5] 张奇志, 尹夏明, 郑舟军. 钢锚梁索塔锚固区受力机理分析与约束方式比选 [J]. 桥梁建设, 2012, 42 (6): 50-56.

- ZHANG Qi-zhi, YIN Xia-ming, ZHENG Zhou-jun. Analysis of Force Mechanism and Comparison of Restraint Ways for Steel Anchor Beam Anchorage Zone in Pylon [J]. Bridge Construction, 2012, 42 (6): 50-56.
- [6] 贺国栋, 阮欣, 石雪飞, 等. 钢锚梁索塔锚固区水平荷载分配关系 [J]. 结构工程师, 2014, 30 (4): 6-11.
- HE Guo-dong, RUAN Xin, SHI Xue-fei, et al. Horizontal Load Distribution in the Steel Anchor Beam Anchorage Zone of a Bridge Pylon [J]. Structural Engineers, 2014, 30 (4): 6-11.
- [7] 郑双杰, 刘玉擎, 徐海军. 组合索塔锚固区钢牛腿-塔壁作用机理分析 [J]. 工程力学, 2014, 31 (5): 197-202.
- ZHENG Shuang-jie, LIU Yu-qing, XU Hai-jun. Structural Analysis of Steel Bracket-concrete Walls in Cable-tower Composite Anchorage [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31 (5): 197-202.
- [8] 贺国栋, 石雪飞. 钢锚梁索塔锚固区混凝土塔壁简化计算方法 [J]. 交通科学与工程, 2014, 30 (3): 40-44.
- HE Guo-dong, SHI Xue-fei. Simplified Calculation Method of Concrete Tower Wall for Steel Anchor Beam Anchorage Zone in Pylon [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2014, 30 (3): 40-44.
- [9] 邵旭东, 何东升, 李立峰. 钢锚梁-钢牛腿组合结构水平受力机理试验 [J]. 中国公路学报, 2014, 27 (4): 55-61.
- SHAO Xu-dong, HE Dong-sheng, LI Li-feng. Experimental Research on Horizontal Mechanical Behavior of Steel Anchor Girder-corbelt Composite Structure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27 (4): 55-61.
- [10] 张家元, 丁望星, 朱世峰. 荆岳长江公路大桥索塔锚固钢锚梁结构体系分析 [J]. 桥梁建设, 2015, 45 (2): 89-93.
- ZHANG Jia-yuan, DING Wang-xing, ZHU Shi-feng. Analysis of Steel Anchor Beam Structural System of Anchorage in Pylon of Jingyue Changjiang River Highway Bridge [J]. Bridge Construction, 2015, 45 (2): 89-93.
- [11] 郑双杰, 刘玉擎. 钢牛腿支承锚梁型索塔锚固结构传力机理分析 [J]. 中国铁道科学, 2014, 35 (5): 19-23.
- ZHENG Shuang-jie, LIU Yu-qing. Analysis of Load Transfer Mechanism of Cable-Tower Anchorage with Steel Bracket Supported Anchor Beam [J]. China Railway Science, 2014, 35 (5): 19-23.
- [12] 王永. 基于有限混合单元法的斜拉桥塔端锚固构造应力分析 [J]. 铁道建筑技术, 2011 (2): 20-23.
- WANG Yong. Anchor Structure Stress Analysis of Cable-stayed Bridge Tower End with the Mixed Finite Element Method [J]. Railway Construction Technology, 2011 (2): 20-23.
- [13] 周绪红, 逯文茹, 狄谨, 等. 钢锚箱栓钉剪力连接件群钉效应及抗剪承载力计算方法 [J]. 中国公路学报, 2014, 27 (12): 33-45.
- ZHOU Xu-hong, LU Wen-ru, DI Jin, et al. Group Studs Effect and Shear Strength Calculation Method for Group Studs Shear Connector of Steel Anchor Box [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27 (12): 33-45.
- [14] 徐国平, 张喜刚, 刘玉擎, 等. 混合梁斜拉桥 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- XU Guo-ping, ZHANG Xi-gang, LIU Yu-qing, et al. Hybrid Girder Cable-stayed Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [15] JTG D60—2004, 公路桥涵设计通用规范 [S].
- JTG D60—2004, General Code for Design of Highway Bridges and Culverts [S].
- [16] 马付彪, 赵鸿铁, 薛建阳. 型钢与混凝土间的粘结强度分析 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39 (1): 83-86.
- MA Fu-biao, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-yang. Analysis on the Bond Strength between Steel Shape and Concrete in SRC Structures [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39 (1): 83-86.