

Experimental Study on Bending Characters of Tensioned Parallel Wire Strands with Rotational End

Ruili Shen, Faquan Zeng

Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan
Email: faquanzeng@163.com

Received: Mar. 9th, 2017; accepted: Mar. 23rd, 2017; published: Mar. 30th, 2017

Abstract

The bending stress of bridge cable structure has a distinct effect on fatigue life and stress corrosion, but traditional calculation method of bending beam cannot well express the bending characters of cable structure. Through the experimental study on bending characters of tensioned parallel wire strands with a rotational end, the results indicate: initial tension and end rotation angle of strand obviously impact on bending stress, but effective strand length influences feebly. The bending stiffness will not change until friction between parallel wires reaches maximum. With layering slippage diffuses along radial and axial directions when bending curvature increases, strand section integrality and bending stiffness decrease gradually. Finally the bending stiffness of strand end maintains invariable after all parallel wires slip.

Keywords

Parallel Wire Strand, Model Experiment, Bending Stiffness, Bending Stress, Layering Slippage

张紧的平行钢丝绳股在端部转动条件下的弯曲特性试验研究

沈锐利, 曾发全

西南交通大学桥梁工程系, 四川 成都
Email: faquanzeng@163.com

收稿日期: 2017年3月9日; 录用日期: 2017年3月23日; 发布日期: 2017年3月30日

摘要

桥梁缆索结构的弯曲应力对钢丝的疲劳寿命和应力腐蚀有明显影响, 但传统的梁弯曲计算方法不能很好

反应缆索结构的弯曲特性。通过模型试验对受张拉的平行钢丝索股在端部转动时的弯曲特性研究, 试验结果表明: 平行钢丝索股的初始张力、端部转角大小对弯曲应力影响明显, 而索股有效长度影响不明显。索股钢丝之间在达到最大摩擦力前不发生滑移, 抗弯刚度保持不变; 随着弯曲曲率增加, 沿索股径向和法向扩散出现分层滑移现象, 索股截面的整体性降低, 抗弯刚度逐渐减小; 当索股钢丝全部产生滑移后, 端部的抗弯刚度不再变化。

关键词

平行钢丝索股, 模型试验, 抗弯刚度, 弯曲应力, 分层滑移

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

缆索承重桥梁的跨越能力大、抗震性能好、轻型美观, 在大跨度桥型中有绝对优势, 且高强平行钢丝索股在这种桥型中被频繁使用。在复杂的山谷或海洋地区修建特大跨度桥梁的要求不断提高, 缆索结构的直径也随着跨度增加而增大。弯曲变形对大截面缆索结构的受力性能和耐久性影响越来越明显, 传统采用梁的弯曲计算理论不能很好反应缆索结构的弯曲特性, 需要研究更精确的计算方法。

Ricciardi 在考虑抗弯刚度和挠度的前提下, 分析了索的无量纲频率[1]。文献[2]说明有抗弯刚度的索平衡曲线计算可排除由模态超越引起的索力计算偏差。由几何方程和虚功原理建立单根钢丝绳的平衡方程, 计算结果表明较小的抗弯刚度也会明显影响受初张拉钢丝绳的应力分布[3]。用能量法推导悬索桥锚跨索股张力与自振频率的关系, 会发现抗弯刚度对索力测量精度影响明显[4]。有学者研究了抗弯刚度对悬索桥主缆线形的影响[5], 提出计入主缆抗弯刚度的初弯曲线单元, 并指出在桥塔附近主缆的弯矩和弯曲应力显著[6]。计算索力需不同程度地考虑抗弯刚度, 但这些计算都是基于梁理论的平截面假定, 并未考虑钢丝之间的接触关系。通过半平行钢丝绳在断丝后的恢复长度计算, 说明钢丝绳的内力重分配是靠钢丝之间的摩擦力来传递的[7], 同时有限元分析表明钢丝间摩擦力控制着索股的抗弯刚度[8]。文献[9]通过分析钢丝绳弯曲行为, 解释了钢丝滑移的影响因素。Gimsing 结合钢丝滑移的情况, 对抗弯刚度极限值进行了探讨[10]。由摩擦定律可知摩擦力与钢丝间挤压力密切相关, 传统计算认为钢丝压力沿索股径向均匀传递。而在研究索股平行钢丝接触关系时, 数值模拟结果表明沿索股截面径向的压力不是均匀分布的[11][12]。Wyatt 在计算悬索桥平行钢丝的二次应力时采用分层模型, 但是并未明确表达钢丝间所有的接触关系[13]。

因此, 对缆索抗弯特性研究尚存不足, 本文通过受张拉的平行钢丝索股模型试验, 进一步研究索股在端部转动条件下的弯曲特性。

2. 试验模型设计

根据悬索桥主缆在受到轴向拉力和弯曲变形时的截面力学特性, 若选择实际的主缆截面来试验则不易操作并且难以施加荷载。将主缆截面进行缩尺后, 在自主设计的试验支架和加力机构上逐级加载, 采用若干高强度钢丝组成的平行钢丝索股进行弯曲特性试验研究。

2.1. 模型设计和加载方案

采用高强度镀锌钢丝直径 5.25 mm、钢丝数量分别为 19、37、61 和 91 丝的四根正六边形平行钢丝

索股, 索股外层无 PE 护套、两端头采用热铸锚具。模型试验中特别设计一套如图 1 所示的自平衡钢架, 用于索股的张拉与锚固。

索股轴向初张力加载点均位于钢架端部三角形横截面的形心, 可消除加载过程中钢架变形造成的索股附加荷载。试验还需在索股两端分别施加初张力和弯矩, 所以对钢架的张拉锚固端和弯矩施加端进行特殊设计, 如图 2 所示。索股锚固结构采用钢板及型钢焊接, 使加载的反力均匀地传递到自平衡钢架上。



Figure 1. Self-balanced steel frame on model test site

图 1. 模型试验现场的自平衡钢架

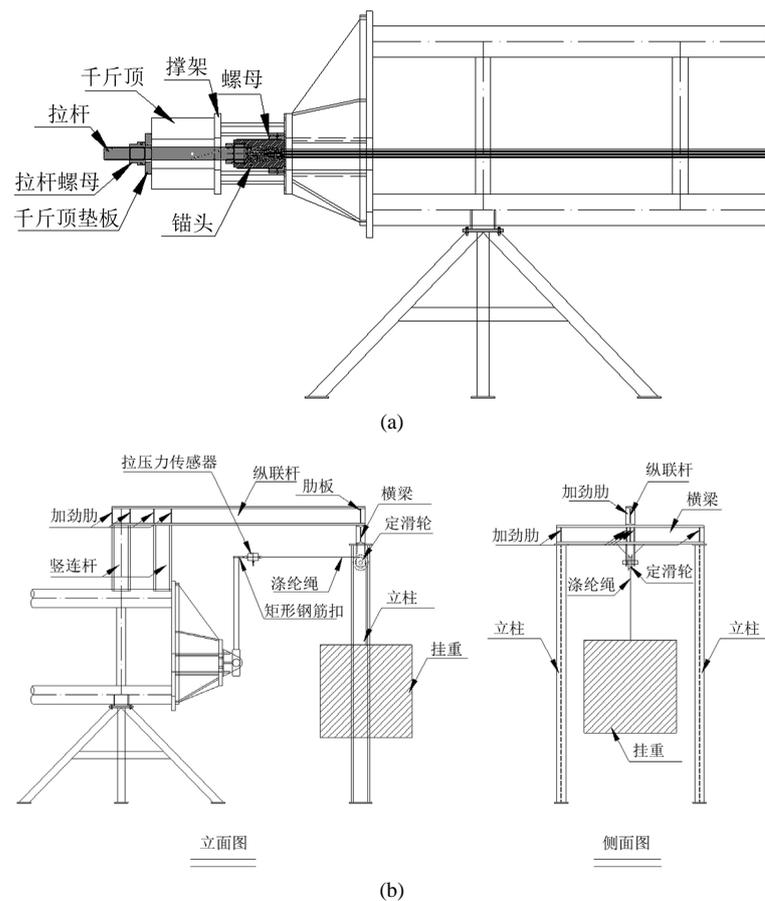


Figure 2. Loading system design of model test steel frame: (a) Schema of strand axial force loading; (b) Schema of strand end bending moment loading

图 2. 模型试验钢架的加载系统设计: (a) 索股轴力加载示意图; (b) 索股端部弯矩加载示意图

将索股水平安装在钢架上后, 在张拉端用千斤顶对索股施加轴力, 其大小根据索股需要施加的应力换算得到, 轴向拉应力分别为 200 MPa、400 MPa 和 600 MPa。为固定端头高度, 用支架支起端头的撑架和千斤顶, 如图 3(a)所示。在弯矩加载端设计门式框架, 增设定滑轮, 用配重对端部悬臂杆的张拉, 实现逐级施加弯矩, 如图 3(b)所示。施加完每级荷载后, 测量悬臂杆的转动长度可计算端部转角, 结合配重与拉力传感器的数值来确定施加在索股端部弯矩。

在自平衡钢架上增设三个临时索夹的安装支座, 若索夹将索股夹紧则认为索股在此受固定约束, 该位置与弯矩加载端之距即弯矩作用的索股有效长度, 安装支座如图 4 所示, 位于索股跨度的四分点位置, 即索股有效长度分别为 2.5 m, 5 m, 7.5 m, 10 m。

2.2. 钢丝应变测试方案

试验前的分析表明, 索股端部施加的弯矩在端部附近影响最为明显, 需合理安排应变测试断面间距及测试钢丝数量, 断面布置如图 5 所示。弯矩加载端 0.5 m 范围每隔 100 mm 设置一个应变测量断面 A, 在索股外周的全部钢丝上布置应变片, 如图 6(a)为 61 丝索股布置的 24 个应变片。弯矩加载端 0.5 m~1.5 m 的范围每隔 250 mm 设置一个应变测量断面 B, 在索股外周间隔一根钢丝布置应变片, 如图 6(b)为 61 丝索股布置的 12 个应变片。临时索夹安装位置前 100 mm 设置一个应变测量断面 B, 剩余三个索股全长四分点之间各布置二或三个普通测试断面。61 丝索股外周的应变片编号如图 6 所示, 现场应变片粘贴如图 7 所示。



Figure 3. Loading on site of model test strands: (a) Strand axial force loading; (b) Strand end bending moment loading
图 3. 模型试验索股的现场加载: (a) 索股轴力加载; (b) 索股端部弯矩加载



Figure 4. Temporary clamp on model test site
图 4. 模型试验现场的临时索夹

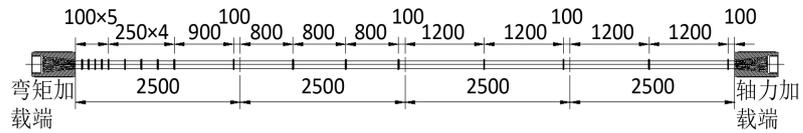


Figure 5. Section arrangement of wire strain measurement (unit: mm)

图 5. 钢丝应变测试断面布置(单位: mm)

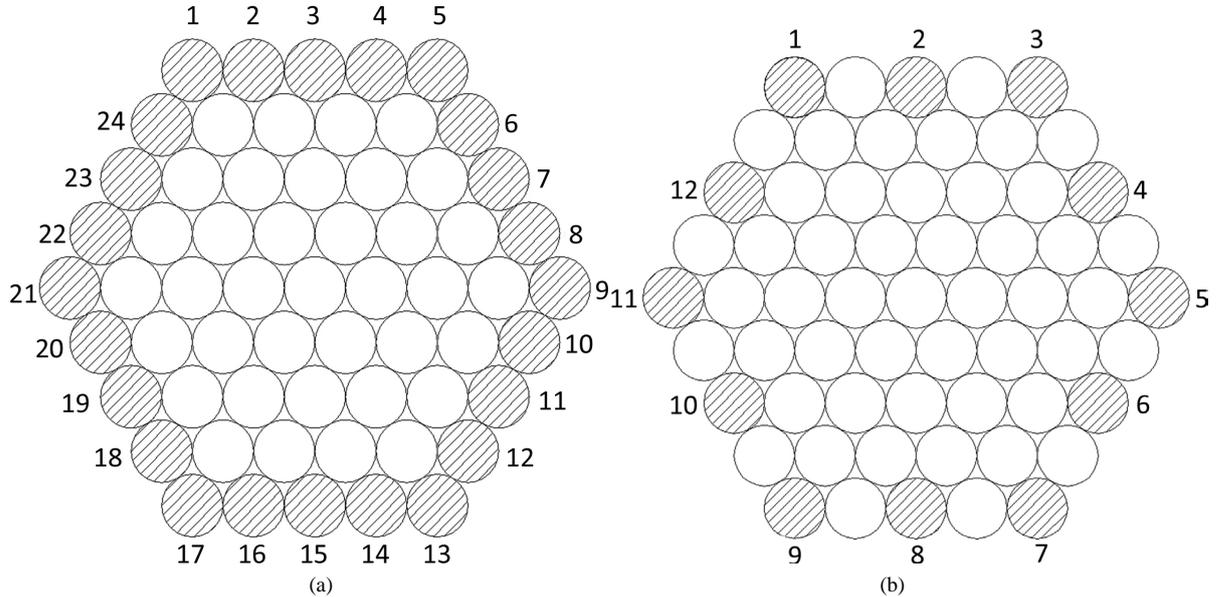


Figure 6. Schema of strain measurement sections for 61 wire strand: (a) Section-A of wire strain measurement; (b) Section-B of wire strain measurement

图 6. 对 61 丝索股的钢丝应变测试断面示意图: (a) 钢丝应变测试断面 A; (b) 钢丝应变测试断面 B

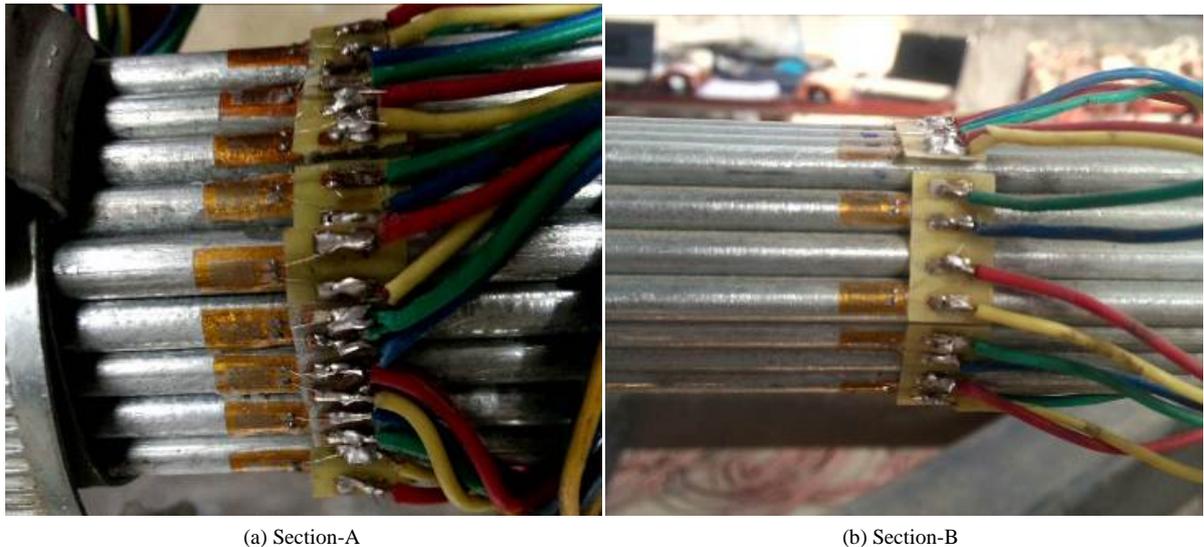


Figure 7. Strain foils adhesion for 61 wire strand on test site

图 7. 测试现场的 61 丝索股钢丝应变片粘贴

贴片前对索股的初张拉应力约 100 MPa, 钢丝直径 5.25 mm, 半桥接线法选用栅长 5 mm、栅宽 2 mm、阻值 120 欧的电阻应变片, 61 丝索股共计 $5 \times 24 + 12 \times 12 = 264$ 个应变片。

19、37 和 91 丝索股设计方案类似, 不再赘述。

3. 试验结果分析

无法测内部钢丝的应力增量, 假设每层钢丝有相同的应力值, 因此试验中每个测点值视为该层所有钢丝的平均应力增量值, 如图 6(a)中, 钢丝编号 6 和 24 的实测均值为该层钢丝的平均应力增量值, 标为测点 2。弯矩作用时, 索股中性层上侧钢丝受拉、下侧钢丝受压, 不均匀应力为索股上缘、下缘分层应力增量的差值, 如图 6(a)中, 上缘测值为钢丝编号 1~5 的均值, 下缘测值为钢丝编号 13~17 的均值, 分别标为测点 1、测点 9。测试断面与弯矩施加端的距离记为 $X(m)$, 初始张拉应力记为 $S(MPa)$, 索股有效长度记为 $L(m)$ 。

3.1. 索股不均匀应力与端部弯矩的变化规律

如图 8 所示, 应力增量随着端部弯矩的增大而增大, 不同层钢丝的应力增量不同。在端弯矩作用下的钢丝应力出现分层, 且层间应力增量沿中性轴基本对称分布, 上侧受拉应力, 下侧受压应力, 离中性轴越远处的应力增量越大, 中性轴位置基本为零。索股受弯矩作用产生的弯曲次应力会在钢丝之间产生径向挤压, 应力增量不同会使钢丝之间有相对移动趋势, 各层钢丝间的剪力正好由钢丝间的摩擦力平衡。

不均匀应力是索股截面上最大的应力增量, 描述弯矩产生次应力程度, 随着端部弯矩增加, 索股的不均匀应力增大。由图 9(a)可知越靠近端部的不均匀应力越大, 当端部弯矩较小时, 索股近端各位置的不均匀应力不明显, 当端部弯矩增大到某一临界值后, 钢丝的应力增量差会达到钢丝间的最大摩擦力, 钢丝之间开始滑动。当端部弯矩继续增加, 钢丝继续产生滑动, 直到全部钢丝滑动, 最终稳定后不均匀应力随端部弯矩线性变化。

由图 9 可知索股初始张力对不均匀应力影响很明显, 初始张力越大, 不均匀应力及其增长速率越小, 钢丝之间越不易发生滑动, 说明索股抵抗弯曲的能力越强。增加钢丝数量是通过增大索股截面积来提升抗弯能力, 从而减缓不均匀应力增长。由于增加索股有效长度并不会明显增大不均匀应力, 反过来说明端部弯矩产生作用的长度范围有限, 主要在索股直径的 10 倍以内。

3.2. 索股端部加载弯矩与端部转角的关系

索股初应力 S 、有效长度 L 对索股在端部转动时的影响如图 10 所示。由于钢丝之间存在摩擦力, 索

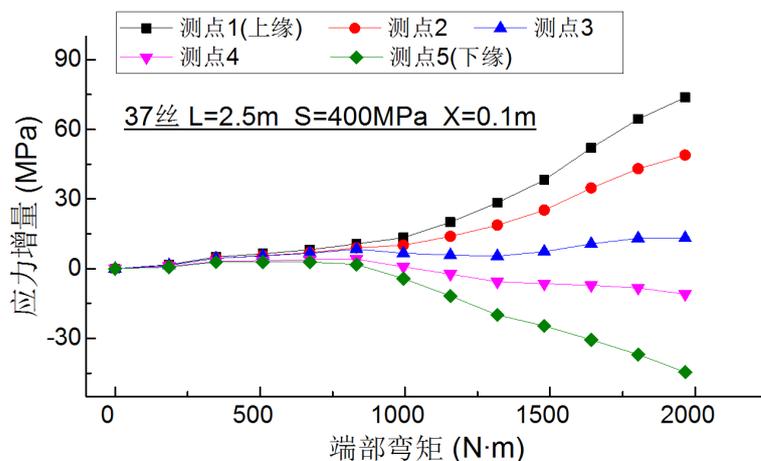


Figure 8. Relationship between strand wire stress increment and strand end bending moment

图 8. 索股钢丝的应力增量与索股端部弯矩的关系

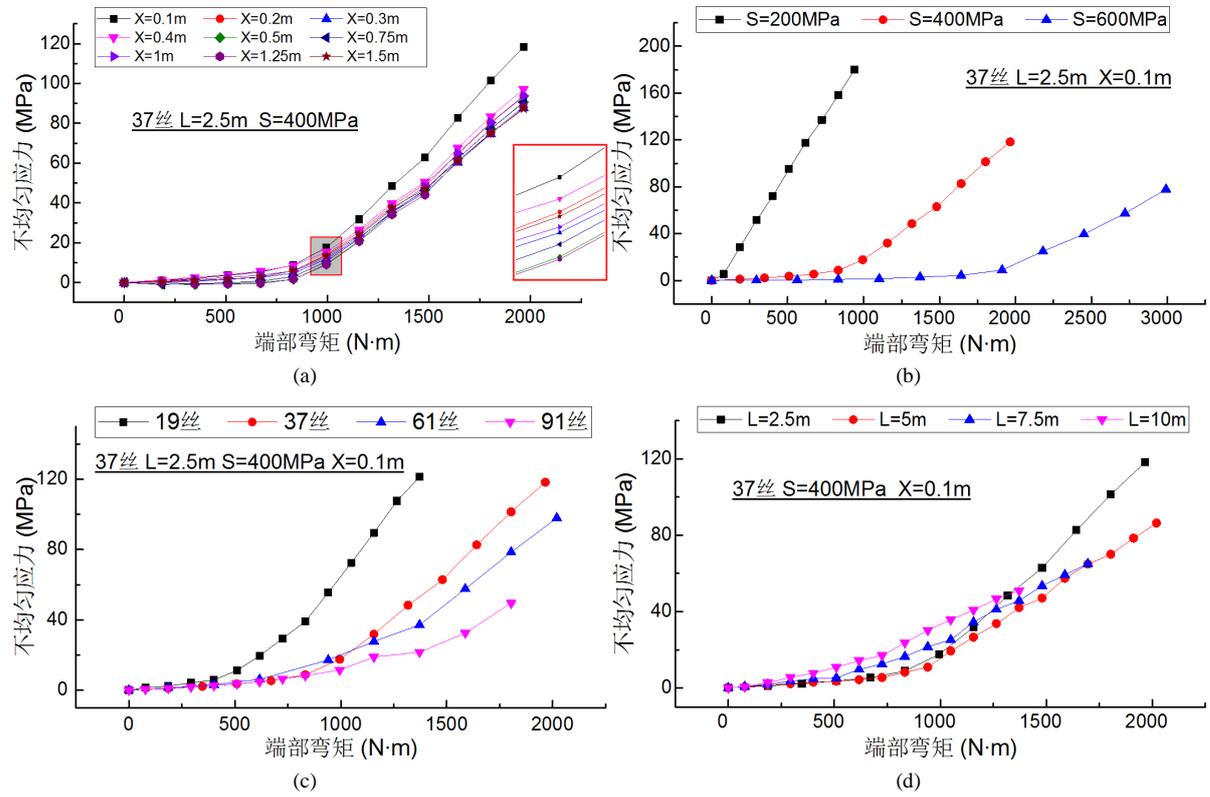
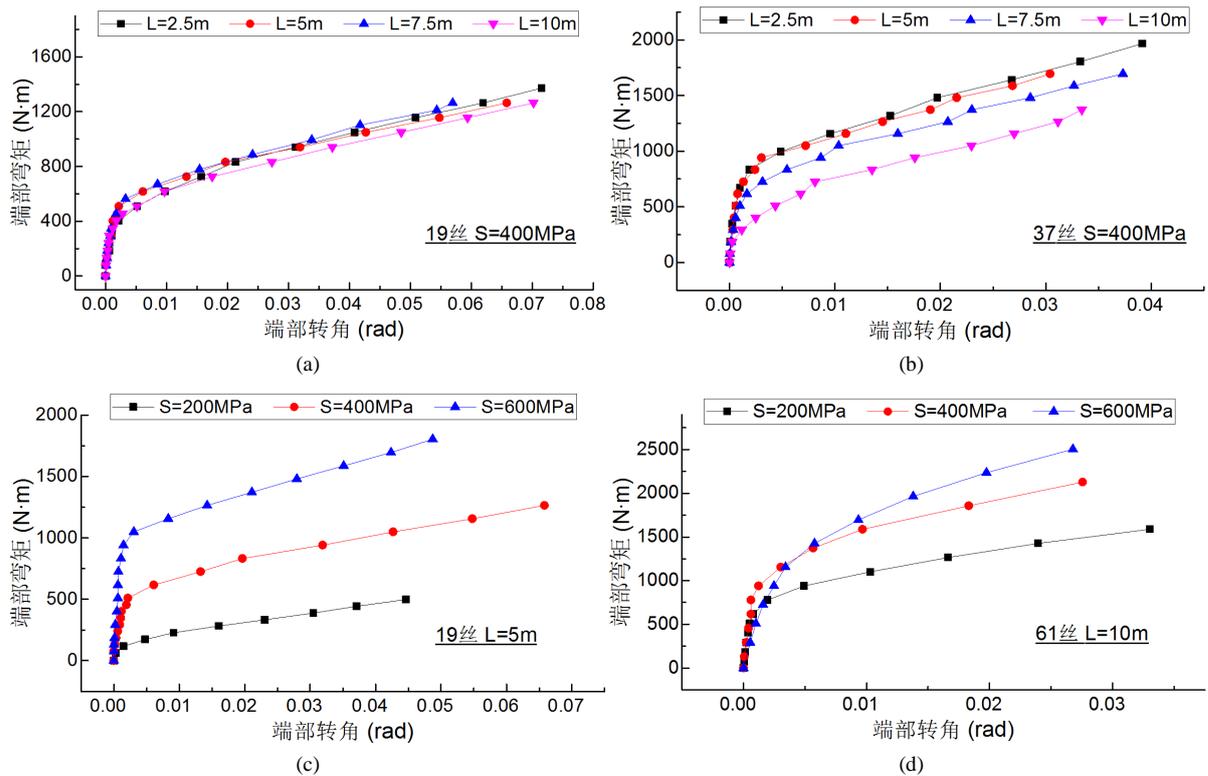


Figure 9. Relationship between strand non-uniform stress and strand end bending moment

图 9. 索股不均匀应力与端部弯矩的关系



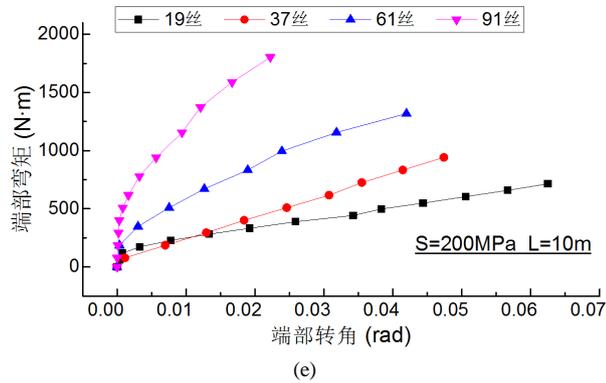


Figure 10. Relationship between strand end bending moment and strand end rotation angle
图 10. 索股端部加载弯矩与端部转角的关系

股端部施加的弯矩与端部转角呈非线性变化。从图 10(a)、图 10(b)可知, 随着索股有效长度增加, 端部弯矩作用产生的转角增大, 钢丝之间因为更大的剪力而更容易产生滑移, 降低了索股的抗弯能力。不同钢丝数的索股有类似的规律, 结合图 10(e)可知, 随着索股钢丝数增加, 索股能产生滑移区域变大, 抗弯刚度更大, 索股有效长度开始产生作用, 一定范围内索股有效长度越长, 端部弯矩可传递的范围越大, 非线性变化范围更广, 且完全滑移后的稳定值不同。

如图 10(c)、图 10(d)所示, 端部弯矩产生的转角受索股初始张力影响明显。曲线前段的线性阶段, 表示索股钢丝之间未达到最大摩擦力, 没发生滑移, 抗弯刚度保持不变; 随着钢丝出现滑移, 并且滑移区域沿着索股轴向和径向扩散, 曲线斜率即抗弯刚度为非线性, 因为钢丝滑移量的增加, 端部截面的整体性降低, 抗弯刚度逐渐减小; 当索股钢丝全部产生滑移后, 端部的抗弯刚度不再变化, 出现曲线后段的线性阶段。增加钢丝数量会使得滑移区域更大, 曲线非线性更强。

4. 结语

对张紧的平行钢丝索股在端部转动时进行弯曲特性的试验研究, 获得了以下结论:

1) 平行钢丝索股的弯曲应力增量沿中性轴对称分布, 钢丝随施加弯矩(或弯曲转角)的增大而开始分层滑移, 随着滑移区域的扩大, 索股上下边缘的不均匀应力随转角变化的趋势减小, 说明滑移将降低索股的弯曲应力; 平行钢丝索股的初应力越大, 全滑移时的转角越大, 这说明钢丝索股拉力越大, 其索股端部受弯曲影响产生的弯曲应力越大。

2) 自由长度对钢丝滑移影响比较小, 一般超出索股直径的 10 倍后, 长度几乎无影响; 钢丝滑移后, 索股截面的抗弯刚度大幅度降低, 一般仅为未滑移前的 1/10 或更小; 钢丝的滑移大幅度减小了索股弯曲引起的应力。

3) 成功试制了平行钢丝索股在拉力作用时的弯曲特性试验支架和加力机构, 为类似研究提供了试验思路。研究索股的试验数据, 可获得索股钢丝滑移前后, 索股抗弯刚度与索张力的关系, 为索股在有张力时的弯曲应力计算提供依据。

基金项目

国家自然科学基金(项目批准号: 51178396)资助项目。

参考文献 (References)

- [1] Ricciardi, G. and Saitta, F. (2008) A Continuous Vibration Analysis Model for Cables with Sag and Bending Stiffness.

Engineering Structures, **30**, 1459-1472.

- [2] 张巍, 王广政, 孙永明. 考虑抗弯刚度的斜拉索频率与索力分析[J]. 公路交通科技, 2012, 29(7): 64-75.
- [3] Nawrocki, A. and Labrosse, M. (2000) A Finite Element Model for Simple Straight Wire Rope Strands. *Computers & Structures*, **77**, 345-359.
- [4] 王达, 杨琴, 刘扬. 大跨度悬索桥索股抗弯刚度对锚跨张力测试精度的影响研究[J]. 计算力学学报, 2015, 32(2): 174-179.
- [5] 严琨, 沈锐利, 陈卫国, 等. 抗弯刚度对主缆线形的影响[J]. 桥梁建设, 2011(1): 22-25.
- [6] 严琨, 沈锐利, 王涛, 等. 基于初弯曲梁单元的大跨度悬索桥主缆弯曲刚度分析[J]. 公路交通科技, 2015, 32(3): 89-95.
- [7] Yu, Y., Chen, Z. and Liu, H. (2016) Advanced Approaches to Calculate Recovery Length and Force Redistribution in Semi-Parallel Wire Cables with Broken Wires. *Engineering Structures*, **131**, 44-56.
- [8] Lalonde, S., Guilbault, R. and Légeron, F. (2016) Modeling Multilayered Wire Strands, a Strategy Based on 3D Finite Element Beam-to-Beam Contacts-Part I: Model Formulation and Validation. *International Journal of Mechanical Sciences*.
- [9] Foti, F. and Martinelli, L. (2016) An Analytical Approach to Model the Hysteretic Bending Behavior of Spiral Strands. *Applied Mathematical Modelling*, **40**, 6451-6467.
- [10] Gimsing, N.J. and Georgakis, C.T. (2012) Cable Supported Bridges: Concept and Design, 3rd Edition, Wiley, Chichester, 148-152.
- [11] Montoya, A., Waisman, H. and Betti, R. (2012) A Simplified Contact-Friction Methodology for Modeling Wire Breaks in Parallel Wire Strands. *Computers & Structures*, **100-101**, 39-53.
- [12] Chatzis, M.N. and Deodatis, G. (2013) Modeling of Very Large Interacting Multiple-Beam Systems with Application to Suspension Bridge Cables. *Journal of Structural Engineering*, **139**, 1541-1554.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000740](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000740)
- [13] Wyatt, T.A. (1963) Secondary Stresses in Parallel Wire Suspension Cables. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **128**, 97-124.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ijm@hanspub.org