

# AS法悬索桥锚靴及拉杆锚固可靠性研究

黄安明<sup>1</sup>, 杨博<sup>2</sup>, 陈龙<sup>1</sup>, 谢俊<sup>1\*</sup>, 陈鑫<sup>3</sup>

(1. 德阳天元重工股份有限公司, 四川 德阳 618000; 2. 中交第二公路工程有限公司, 陕西 西安 710000;  
3. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** AS法(空中纺线法)施工的悬索桥, 主缆各索股钢丝套接锚固在两岸的锚靴上, 锚靴通过拉杆将索股力传递给锚固系统。锚靴与主缆钢丝相互作用后锚靴的承载能力、钢丝小曲率弯折后的应力状态、拉杆安装精度对锚固可靠性的影响均需要定性定量的研究以及试验验证。该文以AS法架设主缆悬索桥——阳宝山特大桥为背景, 对锚靴及索股进行了6150 kN设计荷载下拉杆无偏转状态、拉杆相对于锚固垫板在水平向、竖向向和45°向偏转0.5°共4种工况下的试验研究。结果表明: 锚靴承载能力满足设计要求, 钢丝小曲率弯折后无异常变形和破坏; 锚靴及拉杆构造连接可靠, 装配性好, 构造采用球面垫圈结构可以保证拉杆具备约1°偏心调节能力, 为保证锚靴及拉杆构造设计使用要求, 建议拉杆与索股轴向安装控制精度保证在0.5°以内。

**关键词:** 桥梁工程; AS法悬索桥; 主缆; 锚靴; 拉杆; 性能试验; 安装精度  
**中图分类号:** U448.25 **文献标志码:** A

## Study on Anchorage Reliability for Strand Shoe and Pull Rod of Air-Spinning Suspension Bridge

HUANG Anming<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>2</sup>, CHEN Long<sup>1</sup>, XIE Jun<sup>1\*</sup>, CHEN Xin<sup>3</sup>

(1. Deyang Tengen Heavy Industry Co., Ltd., Deyang, Sichuan 618000, China; 2. CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** Each strand wire of the main cable in the suspension bridge constructed by the AS method is sleeved and anchored on the strand shoes on both banks. The strand shoe transmits the strand force to the anchoring system through the pull rod. The bearing capacity of the strand shoe after the interaction between the strand shoe and the wires of the main cable, the stress state of the wires after small curvature bending, and the influence of installation accuracy of the pull rod on the anchoring reliability all need to be qualitatively and quantitatively studied and verified by the experiment. In this paper, the main cable suspension bridge constructed by the AS method, namely Yangbaoshan Bridge, was studied, and experimental studies were carried out on the strand shoe and strand under the four working conditions: design load of 6150 kN in the normal pull rod condition, as well as 0.5° deflection of the pull rod relative to the anchor plate in the horizontal direction, vertical direction, and 45° direction. The results show that the bearing capacity of the strand shoe meets the design requirements. There is no abnormal deformation or damage after the wire bends with a small curvature. The strand shoe and pull rod are connected reliably and have good assembly performance. The spherical washer structure can ensure that the pull rods have an eccentric adjustment ability of about 1°. In order to ensure the design and use requirements of the strand shoe and pull rod are met, it is suggested that the axial installation control precision of pull rods and strands should be maintained within 0.5°.

**Keywords:** bridge engineering; suspension bridge based on AS method; main cable; strand shoe; pull rod; performance test; installation accuracy

收稿日期: 2023-07-23(修改稿)

基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目(编号: 2020-122-032)

作者简介: 黄安明, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: 527554047@qq.com

\*通信作者: 谢俊, 女, 硕士, 高级工程师. E-mail: xiejun1899@163.com

## 0 引言

空中纺线法(AS法)是悬索桥主缆施工的主要方法之一,是一种对于超大跨径悬索桥更经济、更高效,也更能适应特殊地形悬索桥建设需要的施工方法<sup>[1]</sup>,目前在国外仍被广泛使用,而中国悬索桥的主缆架设都采用预制平行索股法(PPWS法)施工<sup>[2]</sup>。锚靴是AS法架设主缆悬索桥的特有构件<sup>[3]</sup>,其结构以及锚靴内钢丝排布如图1、2所示。地锚式悬索桥锚碇中的锚固系统,负责传递主缆索股拉力,是整个锚碇乃至桥梁一个关键的承载部位<sup>[4-8]</sup>。

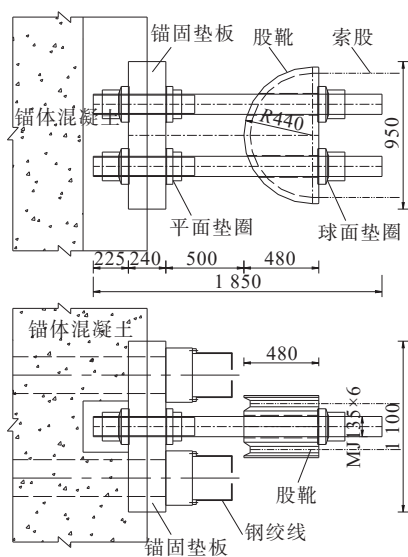


图1 锚靴、拉杆构造(单位:mm)

Figure 1 Structures of strand shoe and pull rod(unit:mm)

主缆钢丝缆力通过锚靴传递给拉杆,钢丝绕过曲率半径很小的锚靴时,因钢丝的局部弯曲和不同伸缩会产生二次应力<sup>[9-12]</sup>,同时锚靴承受主缆钢丝转向弯曲向心压力。PPWS法悬索桥缆索设计中通过设定比较大的安全系数(通常2.2~2.7)确保主缆的安全性,而不考虑缆索二次应力的影响<sup>[13-19]</sup>,AS法架设主缆悬索桥锚靴与主缆钢丝相互作用后,锚靴的承载能力及钢丝是否保持完好,必须通过理论和试验研究予以验证。锚靴在不伤及钢丝的前提下将索股力传递给锚固系统,拉杆是连接锚靴和锚固垫板的构件,承受来自锚靴的拉应力。锚靴与主缆连接端从构造上存在上下左右移动的可能。连接锚靴的另一端锚固垫板构造固定在锚体混凝土前锚面上,位置固定不可动。在锚靴可动而锚固垫板不可动的构造中,只能通过拉杆产生偏转角度来适应。必须

研究拉杆产生偏转后的应力状态,以便评估拉杆的承载能力及为安装精度提出具体的要求。本文以阳宝山特大桥索股及锚靴构造为研究对象,采用理论分析与模型试验研究相结合,对上述关键问题进行深入研究。

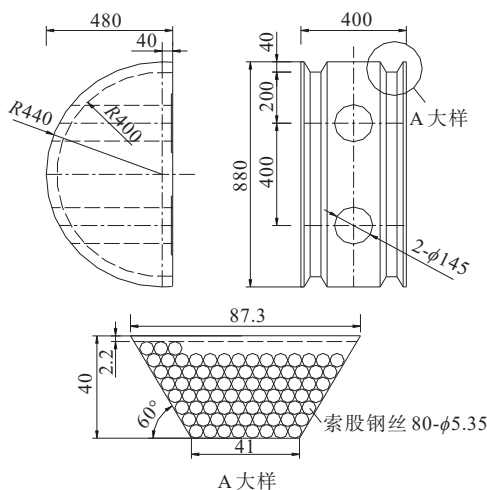


图2 锚靴及钢丝排布(单位:mm)

Figure 2 Configuration of strand shoe and wires(unit:mm)

## 1 试验研究方案

### 1.1 模型设计

本试验重点模拟索股与锚靴的结构特征及二者间的实际接触受力关系,并以此进行模型设计。AS法成型索股通过锚靴构造逐根锚固在索桥两侧,索股经锚靴缠绕固定后在索鞍内汇集,虽然主缆钢丝为柔性体,但是当它绕过曲率半径很小的锚靴和索鞍时也会产生弯曲应力,此外还应考虑架设长度的误差及本身构造因素导致的钢丝之间应力不均匀现象。基于上述认知,试验用的主缆钢丝与实桥完全一致,模拟AS法架设成型索股,按照产品锚靴半径预制成型,让每根钢丝拥有不同的预制弯曲半径,尽量减少应力不均匀现象。模型整体布置情况如图3所示,试验现场照片见图4。试验索股由160根直径 $\phi 5.35$  mm、抗拉强度1 860 MPa的镀锌高强度钢丝组成,经锚靴对合后共计320丝,与实桥索股丝数完全相同。在自平衡式钢结构试验台座上安装试验鞍座、锚固垫板和工装拉杆,试验索股入鞍后预制弯曲段与产品锚靴进行装配,实桥为保证锚固拉杆不产生偏心受力,锚固拉杆与锚垫板之间设计为球面垫圈,初装配阶段,由于索股上没有张力,为防止拉杆

在锚靴自重作用下发生偏转,需拧紧锚固垫板前表面设置的平面垫圈和临时定位螺母,索股张拉端采用锚杯与锚固螺母连接固定。试验索股线形通过在试验鞍座入鞍口两侧装配散索套进行控制。

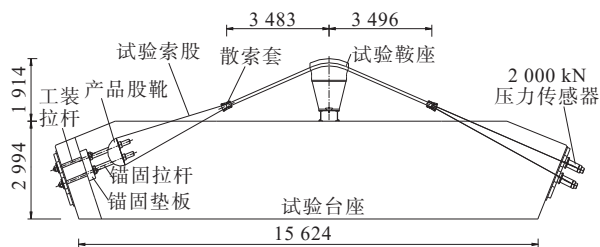


图3 锚靴、拉杆验证性试验方案图(单位:mm)

Figure 3 Test scheme for strand shoe and pull rod verification(unit:mm)



(a) 试验锚靴构造

(b) 张拉端



(c) 试验测试装置



(d) 应变测试装置

图4 试验现场照片

Figure 4 Photos of testing site

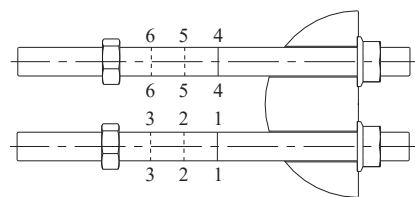
## 1.2 测试方法

为了验证锚靴与主缆钢丝相互作用后,构件及钢丝的承载能力以及明确锚靴、拉杆构造装配的精度要求及结构可靠性。主要的测试内容包括:各工况索股拉力、锚靴以及拉杆应力值。

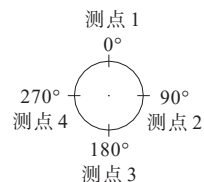
通过在试验索股的张拉端布置量程为2 000 kN的穿心式压力传感器,对张拉过程的索股拉力进行精确测试。为确保索股力轴向与压力传感器测试面垂直,在4个索股锚固端均配套设置了具有自定心调整功能的球面垫圈副。

在拉杆上布设应变片,用于测量整个张拉过程中拉杆的应力状态。应变片布置图见图5,在每根拉杆距离连接螺纹最近的位置选择3个截面,分别在各截面的0°、90°、180°和270°位置粘贴应变花,即每个截

面共计4个应力测点。各测点分别连接到应变箱上信号正常的通道,应变箱实际测点布置为:截面1-1到截面6-6对应测点1~24。



(a) 截面布置图



(b) 1-1 截面测点布置图

图5 应变片测点布置图

Figure 5 Arrangement of strain gauge measuring points

## 1.3 工况设置

为了对锚靴及拉杆装配进行全面验证,探究拉杆安装精度要求和控制方法,共设置4种试验工况,分别是:拉杆无偏转状态、拉杆相对于锚固垫板在水平向、竖直向和45°向偏转0.5°。拉杆无偏转状态通过安装保证,模型装配及加载过程中尽量减少附加弯矩的产生,通过锚固拉杆与锚垫板之间的球面垫圈实现锚固拉杆与轴力的共线,其余3种拉杆偏转的工况在本试验中采取在锚垫板后添加0.5°斜垫圈的方案实现,试验用斜垫圈如图6所示,为了准确控制3种偏转工况,在斜垫圈的0.5°斜度位置标注字母A。

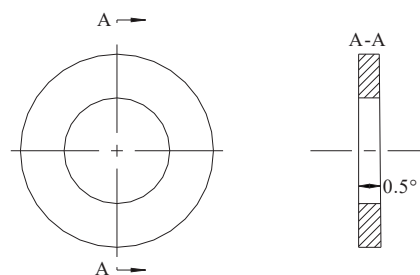
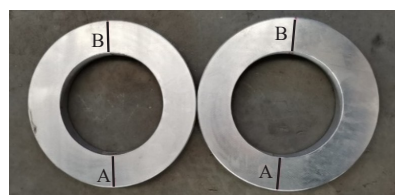


图6 试验用0.5°斜垫圈

Figure 6 Experimental beveled washer with 0.5° angle

## 1.4 加载及试验步骤

试验索股张拉力按照要求,需达到设计值 6 150 kN,用于锚靴、拉杆构造锚固的 4 根拉杆每根的拉力需达到 1 537.5 kN,为避免拉力不平衡,采取同步张拉的方式。典型试验步骤如下:① 按照试验方案及工况要求组装试验模型;② 松开临时定位螺母,采用 4 个 2 000 kN 千斤顶对索股锚固段同时加载,首次张拉 4 根锚固拉杆至设计值 1 537.5 kN 的 50%,即 768.75 kN,确保 4 根索股受力均匀;③ 按照每级递增 10% 试验值的荷载步,张拉锚固拉杆达到最终试验值 1 537.5 kN。

每级张拉到位后,检测各部位的情况,确定无异常后再加载,每级持荷时间不少于 10 min。完成张拉后检测各部位是否有损害,以保证试验参数的可靠性。当荷载达到 6 150 kN 后,测量拉杆上各测点应力,千斤顶卸载后检查拉杆有无变形,螺母是否转动自如,是否存在螺纹脱扣现象。

之后通过调节斜垫圈的摆放位置,使得拉杆相对于锚垫板分别在水平、竖直以及 45° 方向上产生 0.5° 的偏转,重复以上试验步骤。

试验终止条件:① 拉杆总张力达到设计值 6 150 kN;② 拉杆、锚靴出现异常变位。

## 2 校核要求

阳宝山锚靴拉杆螺纹规格为 MJ 135×6,无缩腰设计,材料采用 40CrNiMoA 轧制圆钢,调质后屈服强度  $\sigma_s=835 \text{ MPa}$ <sup>[20]</sup>,设计安全系数  $n_s=2.5$ ,校核要求拉伸正应力  $\sigma$  不超过  $[\sigma]=\sigma_s/n_s=334 \text{ MPa}$ 。

拉杆无偏转受力状态下,拉杆强度按照式(1)校核:

$$\sigma = \frac{F_c}{A} = \frac{F_c}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \leq [\sigma] \quad (1)$$

式中: $F_c$ 为拉杆上承受的拉力; $A$ 为应变测试截面的横截面积; $d$ 为应变测试截面的直径; $[\sigma]$ 为容许拉应力。

设计荷载 6 150 kN 作用下,单根拉杆拉伸正应力理论计算值  $\sigma=214.8 \text{ MPa}$ 。

拉杆偏置  $\theta=0.5^\circ$  状态下,受力分析如图 7 所示。

叠加弯曲应力后的强度校核公式为<sup>[21]</sup>:

$$\sigma = \frac{F_c \cdot \cos \theta}{A} + \frac{F_c \cdot \sin \theta \cdot L}{W} \leq [\sigma] \quad (2)$$

式中: $L$ 为拉杆受弯力臂,约 1 050 mm; $W$ 为抗弯截面系数,圆形截面  $W=\pi d^3/32$ 。

设计荷载 6 150 kN 作用下,单根拉杆拉伸正应力理论计算值  $\sigma=331.5 \text{ MPa}$ ,可以看出偏置  $\theta=0.5^\circ$  已经是设计允许偏转误差的极限。

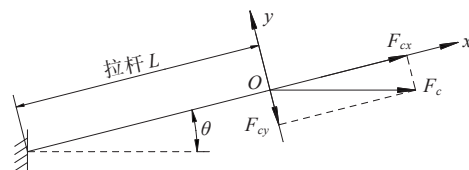


图 7 拉杆受力分析图

Figure 7 Force analysis of pull rod

## 3 各工况下试验结果及分析

### 3.1 拉杆无偏转状态

拉杆无偏转状态即为正常设计状态,在正确安装各构件的前提下可以认为拉杆为 0° 偏转角的无误差状态。按照图 3 装配各件,试验加载步见表 1,加载过程中无异响,经检查各部件无异常变形和破坏。索股力经 6 级加载达到 6 168.85 kN,拉杆应力随加载步的变化曲线见图 8,图示测点的应力值取自拉杆 0° 位置各应力测点。可以看到:拉杆应力随加载步各级加载呈线性变化。卸载后拉杆无塑性变形,螺母转动自如,螺纹无脱扣现象。卸载后螺母旋松后拉杆螺纹状态见图 9。

表 1 工况 1 加载步

Table 1 Loading steps under condition 1

加载步	张拉值/kN				载荷 合计/kN
	张拉端 1	张拉端 2	张拉端 3	张拉端 4	
1 级	740.61	730.31	754.25	770.94	2 996.11
2 级	954.28	897.03	905.68	952.27	3 709.26
3 级	1 062.50	1 080.56	1 039.03	1 044.42	4 226.51
4 级	1 276.79	1 221.99	1 226.93	1 262.14	4 987.85
5 级	1 396.96	1 377.14	1 389.45	1 354.60	5 518.15
6 级	1 551.55	1 517.79	1 544.21	1 555.30	6 168.85

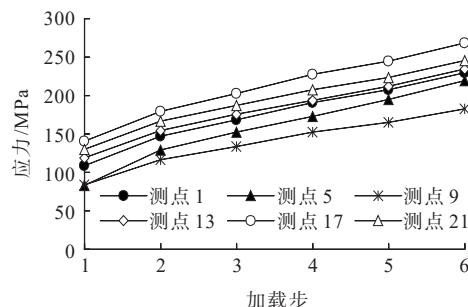


图 8 拉杆应力随加载步变化曲线(工况 1)

Figure 8 Variation curve of pull rod stress over loading steps(condition 1)



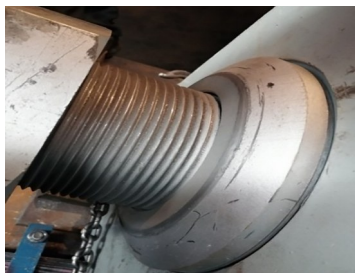


图9 卸载后螺纹状态

Figure 9 Thread after unloading

加载达到设计荷载时,拉杆应力的理论计算值为 215.48 MPa,各测点应力测试结果如图 10 所示。

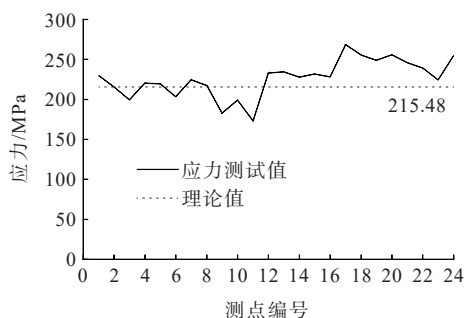


图10 各测点应力测试结果(工况1)

Figure 10 Stress test results of each measuring point(condition 1)

从图 10 可以看到:拉杆各测点应力的最大、最小值分别为 268.39 MPa 和 173.15 MPa(弹性模量取  $2 \times 10^5$  MPa),其余各测点应力相当,较为均衡地分布于理论计算值两侧,该工况拉杆应力的试验测试结果与理论计算结果一致。

### 3.2 拉杆水平向偏转 0.5°

在锚垫板后添加 0.5°斜垫圈,字母 A 与锚垫板标记的水平向对齐,拉杆装配后相对于锚垫板在水平向即呈 0.5°预偏。试验加载步如表 2 所示,加载过程中无异响,经检查各部件无异常变形和破坏。合计索股力经 6 级加载达到 6 015.55 kN,拉杆应力随加载步的变化曲线见图 11,图示测点的应力值取自拉杆 90°位置各应力测点。可以看到:拉杆应力随加载步各级加载呈现线性变化。卸载后拉杆无塑性变形,螺母转动自如,螺纹无脱扣现象。

拉杆水平向偏转 0.5°后,当加载达到设计荷载时,拉杆应力理论计算最大值为 324.25 MPa,最小值为 96.03 MPa,应力峰值出现在受弯面测点,谷值则位于受弯面 180°的对向测点。各测点应力测试结果如图 12 所示。

表2 工况2加载步

Table 2 Loading steps under condition 2

加载步	张拉值/kN				荷载 合计/kN
	张拉端 1	张拉端 2	张拉端 3	张拉端 4	
1级	747.06	743.91	759.99	756.04	3 007.00
2级	913.44	933.30	917.29	911.29	3 675.32
3级	1 041.36	1 088.91	1 098.21	1 114.33	4 342.81
4级	1 250.68	1 211.83	1 239.49	1 230.53	4 932.53
5级	1 394.42	1 387.03	1 381.56	1 326.28	5 489.29
6级	1 636.46	1 430.52	1 583.09	1 365.48	6 015.55

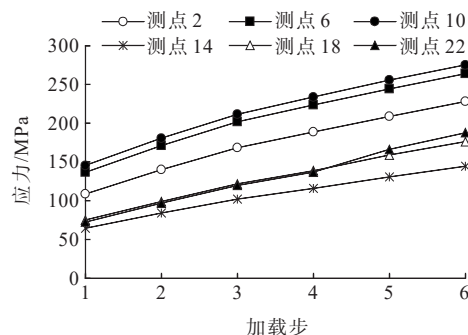


图11 拉杆应力随加载步变化曲线(工况2)

Figure 11 Variation curve of pull rod stress over loading steps(condition 2)

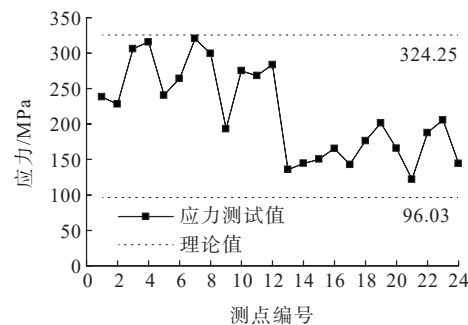


图12 各测点应力测试结果(工况2)

Figure 12 Stress test results of each measuring point(condition 2)

从图 12 可以看到:同一截面 4 个不同测点的曲线呈较为明显的峰谷交替,由于在试验过程中 4 个张拉端加载不够均衡,张拉端 1 和 3 对应的拉杆应力值明显大于张拉端 2 和 4 对应的拉杆。拉杆各测点应力的最大值为 320.61 MPa,位于测点 7;最小值 121.92 MPa,位于测点 21,根据应变片测点布置图可知(图 5),位于波峰的测点与波谷测点呈 180°角分布,与理论分析结果一致。

### 3.3 拉杆竖直向偏转 0.5°

旋转 0.5°斜垫圈,令字母 A 与锚垫板标记的竖直

向对齐,拉杆装配后相对于锚垫板在竖直向即呈 $0.5^\circ$ 预偏。试验加载步如表3所示,加载过程中无异响,经检查各部件无异常变形和破坏。合计索股力经6级加载达到6 221.53 kN,拉杆应力随加载步的变化曲线见图13,图示测点的应力值取自拉杆 $180^\circ$ 位置各应力测点。可以看到:拉杆应力随加载步各级加载呈现线性变化。卸载后拉杆无变形,螺母转动自如,螺纹无脱扣现象。

表3 工况3加载步

Table 3 Loading steps under condition 3

加载步	张拉值/kN				载荷 合计/kN
	张拉端1	张拉端2	张拉端3	张拉端4	
1级	729.48	768.67	768.22	763.04	3 029.41
2级	946.56	933.54	890.95	931.41	3 702.46
3级	1 100.84	1 102.41	1 077.10	1 093.53	4 373.88
4级	1 255.43	1 194.18	1 202.21	1 202.39	4 854.21
5级	1 412.81	1 391.74	1 363.15	1 394.18	5 561.88
6级	1 555.93	1 588.23	1 551.05	1 526.32	6 221.53

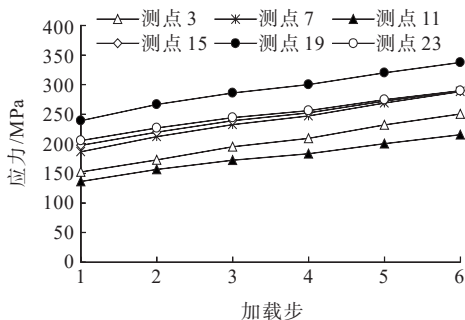


图13 拉杆应力随加载步变化曲线(工况3)

Figure 13 Variation curve of pull rod stress over loading steps(condition 3)

拉杆竖直向偏转 $0.5^\circ$ 后,当加载达到设计荷载时,拉杆应力理论计算最大值为335.35 MPa,最小值为99.32 MPa,应力峰值出现在受弯面测点,谷值则位于受弯面 $180^\circ$ 的对向测点。各测点应力测试结果如图14所示。

从图14可以看到:该工况试验时4个张拉端各级加载均衡,曲线呈非常明显且规律的峰谷交替,拉杆各测点应力的最大值为337.47 MPa,位于测点19;最小值100.80 MPa,位于测点21,根据应变片测点布置图可知(图5),位于波峰的测点与波谷测点呈 $180^\circ$ 角分布,与理论分析结果一致。

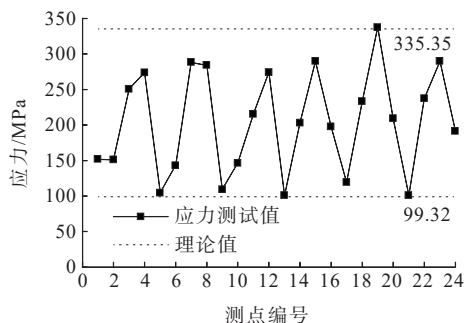


图14 各测点应力测试结果(工况3)

Figure 14 Stress test results of each measuring point(condition 3)

### 3.4 拉杆 $45^\circ$ 向偏转 $0.5^\circ$

旋转 $0.5^\circ$ 斜垫圈,令字母A与锚垫板标记 $45^\circ$ 向对齐,拉杆装配后相对于锚垫板在 $45^\circ$ 向即呈 $0.5^\circ$ 预偏。试验加载步如表4所示,加载过程中无异响,经检查各部件无异常变形和破坏。合计索股力经6级加载达到6 208.38 kN,拉杆应力随加载步的变化曲线见图15,图中测点的应力值取自拉杆 $90^\circ$ 位置各应力测点。可以看到:拉杆应力随加载步各级加载呈现线性变化。卸载后拉杆无变形,螺母转动自如,螺纹无脱扣现象。

表4 工况4加载步

Table 4 Loading steps under condition 4

加载步	张拉值/kN				载荷 合计/kN
	张拉端1	张拉端2	张拉端3	张拉端4	
1级	740.11	791.97	776.20	763.02	3 071.30
2级	890.36	899.77	914.62	959.34	3 664.09
3级	1 105.73	1 092.25	1 036.72	1 061.64	4 296.34
4级	1 228.69	1 209.61	1 212.09	1 220.17	4 870.56
5级	1 381.89	1 359.06	1 379.05	1 355.27	5 475.27
6级	1 588.57	1 512.20	1 567.42	1 540.19	6 208.38

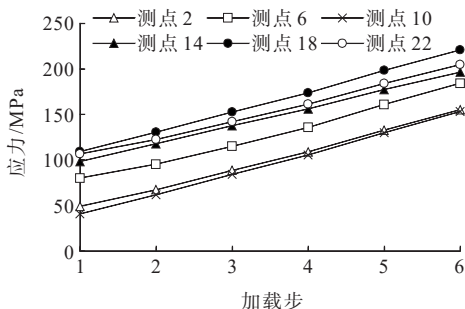


图15 拉杆应力随加载步变化曲线(工况4)

Figure 15 Variation curve of pull rod stress over loading steps(condition 4)

拉杆 $45^\circ$ 向偏转 $0.5^\circ$ 后,当加载达到设计荷载时,拉杆应力理论计算最大值为334.64 MPa,最小值为99.11 MPa,各测点应力测试结果如图16所示。

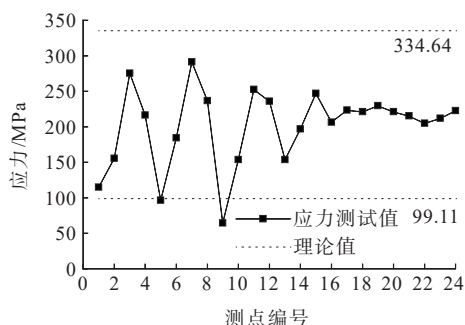


图16 各测点应力测试结果(工况4)

Figure 16 Stress test results of each measuring point(condition 4)

从图16可以看到:峰值应力291.26 MPa,谷值应力64.20 MPa,由于在 $45^\circ$ 向没有布置测点,因此测试峰值应力比受弯面最大值应力略小,与理论分析结果一致。

## 4 结论

(1) 研究表明:自然状态、拉杆相对于锚固垫板在水平向、竖直向和 $45^\circ$ 向偏转 $0.5^\circ$ 共4种工况下,加载到设计荷载6150 kN时,测点测试应力与理论计算结果相符;卸载后拉杆无塑性变形,螺母转动自如,螺纹无脱扣现象,试验各测点最大应力值满足2.5倍设计安全系数要求。

(2) 锚靴及拉杆构造连接可靠,装配性好,拉杆与锚垫板间采用球面垫圈结构可以保证拉杆在约 $1^\circ$ 范围内偏心可调,避免拉杆偏心受力。

(3) 索股力卸载后,锚靴承缆槽经检验无明显压痕,防护涂层完好。试验过程中,锚靴和钢丝都没有发生异常变形。

(4) 为保证锚靴及拉杆构造满足设计及使用要求,建议拉杆与索股轴向安装控制精度应保证在 $0.5^\circ$ 以内。拉杆偏转后表面最大应力的试验测量结果与理论计算值相吻合,只要产品制作合格,可以通过理论校核验证结构的强度。

## 参考文献:

## References:

[1] 王冠青.悬索桥空中编缆法主缆架设关键技术研究[D].

成都:西南交通大学,2021.

WANG Guanqing. Research on the key technology of main cable erection of suspension bridges by air spinning [D].Chengdu:Southwest Jiaotong University,2021.

[2] 葛国库,石虎强,金仓,等.悬索桥主缆空中纺线工法技术经济性分析[J].公路,2017,62(3):296-301.

GE Guoku, SHI Huqiang, JIN Cang, et al. Technical and economic analysis of AS method for main cable of suspension bridge[J].Highway,2017,62(3):296-301.

[3] 冯云成,陈华林,王学军,等.锚靴处弯曲应力对缆索承载能力影响的研究[J].公路,2022,67(5):143-149.

FENG Yuncheng, CHEN Hualin, WANG Xuejun, et al. Influence of bending stress on cable carrying capacity at strand shoe[J].Highway,2022,67(5):143-149.

[4] 鲁薇薇.悬索桥主缆锚固连接器疲劳性能试验研究[J].中外公路,2022,42(2):112-116.

LU Weiwei. Experimental study on fatigue behavior of main cable tendon-anchorage assembly of suspension bridge[J].Journal of China & Foreign Highway,2022,42(2):112-116.

[5] 周诗云,李国平,骆梦.景区人行悬索桥受力特征研究[J].中外公路,2022,42(1):151-157.

ZHOU Shiyun, LI Guoping, LUO Meng. Study on force characteristic of scenic pedestrian suspension bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(1):151-157.

[6] 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,2018,38(4):197-200.

SU Qiang, WU Dongming, XIE Zhengyuan. Research on key technology of the multi-strand finished tendon for anchorage system[J].Journal of China & Foreign Highway, 2018,38(4):197-200.

[7] 叶龙祥,柯红军,陈卓.基于Midas/Civil的钢箱主梁地锚式悬索桥施工阶段正装分析[J].中外公路,2020,40(6):140-144.

YE Longxiang, KE Hongjun, CHEN Zhuo. Analysis of assembly stage of suspension bridge with steel box girder anchor based on Midas Civil[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(6):140-144.

[8] 陈永亮,何世永,夏支贤,等.复杂地质条件下山区悬索桥锚碇选型及设计[J].中外公路,2023,43(2):107-111.

CHEN Yongliang, HE Shiyong, XIA Zhixian, et al. Selection and design of anchorage for suspension bridge in downhill area under complex geological conditions[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(2):107-111.

- [9] 聂利芳. 悬索桥主缆二次应力分析与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
NIE Lifang. The analysis and investigation of secondary stress of suspension bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [10] 吉姆辛 N J. 缆索支承桥梁: 概念与设计[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2002.  
GIMSING N J. Cable supported bridge: Concept & design [M]. 2<sup>nd</sup> ed. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [11] 邵梦龙, 郭日强, 唐绪. 降低钢桁梁悬索桥主桁疲劳应力幅的结构体系及其可行性研究[J]. 中外公路, 2022, 42(1): 123-126.  
SHAO Menglong, GUO Riqiang, TANG Xu. Study on structural system and feasibility for reducing fatigue stress amplitude of main truss in steel truss suspension bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 123-126.
- [12] 邓小康, 邓恒耀. 悬索桥鞍座设计位置计算的改进方法[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 99-103.  
DENG Xiaokang, DENG Hengyao. Improved method for calculating design position of the cable saddle on suspension bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 99-103.
- [13] 雷俊卿, 郑明珠, 徐恭义, 等. 悬索桥设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.  
LEI Junqing, ZHENG Mingzhu, XU Gongyi, et al. Suspension bridge design[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [14] 严国敏. 现代悬索桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.  
YAN Guomin. Modern suspension bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [15] 李枝军, 韩晓林, 李爱群, 等. 悬索桥桥塔挂缆前后动态特性分析与测试[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 54-58.  
LI Zhijun, HAN Xiaolin, LI Aiqun, et al. Dynamic analysis and test of bridge tower of suspension bridge before and after cable installed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 54-58.
- [16] 程进, 肖汝诚. 基于逆可靠度法的大跨悬索桥主缆安全系数评估[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 58-61.  
CHENG Jin, XIAO Rucheng. Main cable safety factors assessment of long-span suspension bridges based on inverse reliability method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1): 58-61.
- [17] 吴建强, 彭武, 何治学. KLD3700 型跨缆吊机在润扬大桥悬索桥钢箱梁吊装施工中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 22(7): 44-46.  
WU Jianqiang, PENG Wu, HE Zhixue. Application of KLD3700 deck erection gantry in Runyang suspension bridge[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2005, 22(7): 44-46.
- [18] 狄谨, 武隽. 自锚式悬索桥主缆线形计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 38-43.  
DI Jin, WU Jun. Calculation methods for cable curve of self-anchored suspension bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 38-43.
- [19] 田仲初, 黄欢, 李国华, 等. 郑万铁路梅溪河特大桥缆索吊装系统荷载试验研究[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 56-60.  
TIAN Zhongchu, HUANG Huan, LI Guohua, et al. Study on load test of cable hoisting system for meixihe super bridge in Zhengwan railway[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(1): 56-60.
- [20] 大冶特殊钢股份有限公司, 冶金工业信息标准研究院, 宝钢特钢有限公司, 等. 合金结构钢: GB/T 3077—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
Daye Special Steel Co., Ltd., China Metallurgical Information and Standardization Institute, Baosteel Special Steel Co., Ltd., et al. Alloy structure steels: GB/T 3077—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [21] 单辉祖. 材料力学( I ) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.  
SHAN Huizu. Mechanics of materials( I ) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.