

单侧不对称混合梁斜拉桥索力测试分析

余 毅

(福建省交通建设质量安全中心,福建 福州 350001)

摘要:为确保半漂浮体系单侧不对称混合梁斜拉桥的结构安全,以福建省某跨海斜拉桥为背景,采用振动频率法对成桥后斜拉索恒载索力和索力增量进行测试。结果表明:恒载下实测索力纵向分布规律与理论值一致,实测值与理论值偏差基本在 5% 内;主塔两侧索力分布均匀,上下游索力呈对称分布。通过与双侧对称斜拉桥对比,证实 3 次调索工艺可有效克服结构不对称影响(边跨差 90 m,主梁重量与刚度差异显著),满足索力控制要求。静载试验 4 种工况下,索力增量校验系数为 0.82~0.93,索力增量与加载效率呈强线性关系,表明斜拉索变形符合弹性特征。结构实际承载能力满足设计要求,验证了该桥型设计理念的可行性,为不对称混合斜拉桥建造提供技术参考。

关键词:斜拉桥;单侧不对称;混合梁;索力测试;振动频率法;恒载索力;索力增量

中图分类号:U443.38;U446

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)05-0060-08

doi:10.13402/j.gcjs.2026.05.055

Cable force test analysis on cable-stayed bridge for hybrid beam of unilateral asymmetry

YU Yi

(Fujian Provincial Transportation Construction Quality and Safety Center, Fuzhou 350001, Fujian, China)

Abstract: In order to ensure the structural safety of the cable-stayed bridge for hybrid beam of unilateral asymmetry with semi-floating system, a sea-crossing cable-stayed bridge in Fujian Province is taken as the background, the dead load cable force and cable force increment of cable-stayed cables after bridge formation are tested by vibration frequency method. The results show that the longitudinal distribution law of the measured cable force under dead load is consistent with the theoretical value, and the deviation between the measured value and the theoretical value is basically within 5%. The cable force on both sides of the main tower is evenly distributed, and the upstream and downstream cable forces are symmetrically distributed. By comparing with the bilaterally symmetrical cable-stayed bridge, it has been confirmed that the three adjustment processes of the cables can effectively overcome the effects of structural asymmetry (the difference in span length is 90 m, and there are significant differences in the weight and stiffness of the main beam), thus meeting the requirements for cable force control. Under the four working conditions of the static load test, the check coefficient of cable force increment is 0.82~0.93, and the cable force increment has a strong linear relationship with the loading efficiency, indicating that the deformation of cable-stayed cable conforms to the elastic characteristics. The actual bearing capacity of the structure meets the design requirements, which verifies the feasibility of the bridge design concept and provides a technical reference for the construction of asymmetric hybrid cable-stayed bridge.

Key words: cable-stayed bridge; unilateral asymmetry; hybrid beam; cable force test; vibration frequency method; dead load cable; cable force increment

收稿日期:2025-11-28

基金项目:福建省交通运输科技攻关项目(ZH202314)

作者简介:余毅(1981—),男,高级工程师,从事公路工程方面的研究。

斜拉桥因其跨越能力强、结构刚度大、施工技术成熟,在中、大跨度桥梁中得到越来越广泛的应用。大跨径斜拉桥的斜拉索受力复杂,成桥后对其承载能力和工作状态进行测试十分必要。国内外学者对此进行了大量研究,积累了丰富的设计施工经验与试验成果。KIM 等^[1]采用基于频率的灵敏度更新算法识别模型,该方法可同时识别拉索系统的拉力、弯曲刚度和轴向刚度。邢焕森^[2]结合某矮塔斜拉桥实际工程案例,提出基于最小二乘法的斜拉索拉力和频率函数关系计算方法,并验证了该方法的可行性。赵淑兰等^[3]采用基于新陈代谢模型的灰色预测控制方法,将监控中实测的线形、索力值与模型理论值进行对比分析,结果表明该系统对斜拉桥施工监控具有良好控制效果。朱万旭等^[4]以光纤布喇格光栅传感器为终端,开发了一套索力在线监测系统,并成功应用于衡阳东洲湘江大桥。张振浩等^[5]融合随机过程跨阈解析理论,提出斜拉索疲劳可靠性评估新视角,为建立更精准的斜拉索疲劳可靠性评估体系提供理论参考与技术路径。对比国内外索力测试分析相关研究可见,国内目前以振动频率法等成熟方法应用最广,已形成标准化测试流程,同时对微波雷达法、机器视觉法等新技术手段的应用和探索也在加速推进;国外则更侧重于非接触类测试技术、算法更新及智能信号识别处理等方面的研究。

当前斜拉索索力检测分析研究虽多,但大多集中于独塔或双侧对称斜拉桥,针对半漂浮体系单侧不对称混合梁斜拉桥的研究相对较少。该类桥型能适应复杂地形及线形条件,解决通航需求矛盾,通过调整两侧刚度及重量优化整体受力性

能,在特定限制条件下可实现成本最优,满足项目的“定制化”需求。因此,开展单侧不对称混合梁斜拉桥索力测试研究,总结分析成桥状态下斜拉索的力学性能,可为同类桥梁提供参考。本文依托一座跨径为 961 m (49 + 58 + 61 + 535 + 198 + 60) 的双塔双索面单侧不对称混合梁斜拉桥,阐述其主要施工工艺及测试方案,分析成桥后索力测试结果,以期交工验收及后期运营期健康监测提供依据。

1 工程概况与施工关键技术

1.1 工程概况

福建某跨海斜拉桥主桥采用主跨为 535 m 的单侧不对称混合梁斜拉桥结构,其中北边跨为混凝土梁,中跨及南边跨为钢箱梁(图 1)。主桥斜拉索采用标准强度为 1 860 MPa、直径为 7 mm 的高强度、低松弛平行钢丝,全桥共设置 136 根斜拉索,北边跨斜拉索对应编号为 NB1 ~ NB17,中跨斜拉索对应编号为 NZ1 ~ NZ17、SZ1 ~ SZ17,南边跨斜拉索对应编号为 SB1 ~ SB17。索体采用单层黑色 HDPE 护套,外层以 PVF 氟化膜胶带防护,共 7 种规格。斜拉索最长达 288.236 m (NZ17# 斜拉索),最大自重为 21.507 t (NZ17# 斜拉索)。该桥施工中需通过运梁驳船和浮吊跨越主航道,且精确定位要求高;同时,因斜拉索索长较长、重量大,安装难度显著。在运输、放索及挂索过程中,索体易受挤压、摩擦及拽拉作用导致保护层破损;此外,张拉施工时受日照、温度、风力及不均匀荷载等因素影响,实现精确张拉控制难度较大。

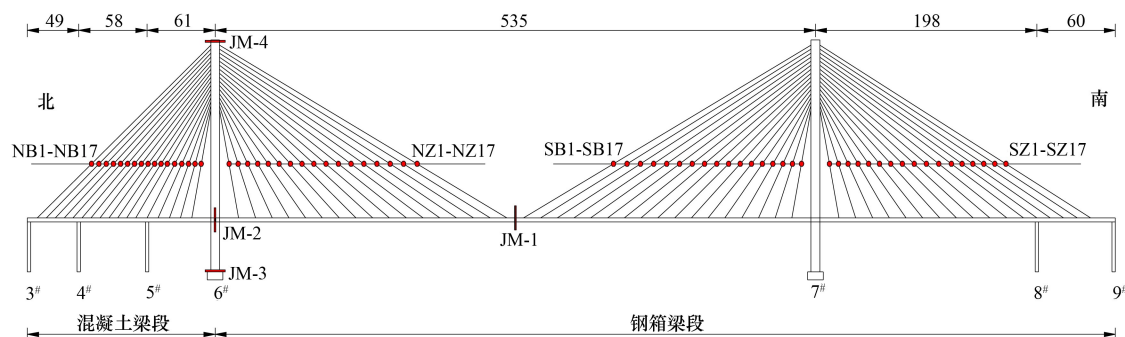


图 1 斜拉桥桥型立面、斜拉索编号及控制截面

1.2 主要施工工艺

中跨钢箱梁段施工流程：SJ1、NJ1 ~ NJ3 梁段由桥面吊机直接从存梁矮支架上起吊。中跨标准钢箱梁及斜拉索施工流程：钢箱梁运输船就位→钢箱梁起吊到位→钢箱梁节段间精准对位→钢箱梁节段栓焊连接→挂索、张拉→下一节段钢箱梁施工。

北边跨混凝土梁段受北岸地形条件限制，须先搭设临时海上作业平台，以满足搅拌站、料仓等配套设施场地需求，混凝土箱梁采用钢管支架现浇施工。混凝土箱梁强度达到设计强度后，斜拉索利用平板车通过北岸施工便道直接运输至桥面，再由 50 t 汽车吊吊装入水平索盘，随后采用卷扬机牵引就地展索，并进行斜拉索挂设及张拉施工。

大桥选定塔端牵引、梁段牵引、张拉方式进行挂索施工。施工时根据斜拉索牵引、张拉过程的施工控制力大小，斜拉索按短索和长索分别采用不同施工工艺。短索施工时利用硬牵引，长索施工时利用大吨位连续千斤顶；软牵引时选用超大流量油泵及 XY 型千斤顶，此系统软牵引速度可达 25 m/h 左右，可大幅缩短施工工期。

单侧不对称斜拉桥的混凝土主梁刚度大，斜拉索的索力相当于体外预应力，其张拉力对主梁起到加劲作用，以改善主梁受力，因此斜拉索实际索力的大小对主梁受力的影响很大。而对于斜拉桥来说，恒载内力分布是否均匀是衡量成桥质量的重要标准，理想的成桥状态是主桥整体结构处于零弯矩或局部弯矩的状态。但在单侧不对称斜拉桥的设计及施工中，由于各种复杂因素的制

约，无法到达最理想的成桥状态。索力调整的目标就是通过索力调整改善结构受力，使其在确定荷载下的受力状态达到最优。

常规双侧对称斜拉桥一般进行二次索力调整，第二次索力调整后还需施工剩余部分二期恒载，这会引引起索力变化，为保证剩余二期恒载施工完成后索力值接近设计成桥索力，斜拉索二次张拉目标值为设计成桥索力减去剩余二期恒载引起的索力增量。考虑该桥为单侧不对称斜拉桥，两边跨跨径相差 90 m，且 6[#]主塔两侧主梁重量、刚度相差大。为使该桥斜拉索体系满足设计及规范要求，对桥斜拉索进行三次索力调整：在南、北边跨合龙前进行第一次调索，主要目的是使主梁线形满足设计要求；中跨合龙前进行第二次调索，主要目的是控制主梁线形和索塔偏移量；桥梁恒载全部施工完成后进行第三次索力调整，主要目的是使线形、索力终值误差及桥梁受力状态符合设计要求。

2 索力测试方法

2.1 测试方法比较

目前比较常用的接触式索力测试方法有压力传感器法、振动频率法、磁通量法、微波雷达法等，各种方法具有不同的适用条件，基本原理及其优缺点如表 1 所示。

通过上述各类测试方法比较，振动频率法技术较为成熟测试效率较高，且对该测试方法的影响因素有系统的研究，综合考虑后现场采用振动频率法进行索力测试，并基于频谱法对测试数据进行评定与测试。

表 1 索力测试方法对比

测试方法	基本原理	适用条件	优点	缺点
压力传感器法	压力传感器产生的电信号，可转化成张拉力值	长期持续的索力测量	具备更高的测量准确度和更稳定的性能	成本高，只能测量到拉索端部的张拉力
振动频率法	通过自振频率与索力之间的关系，换算得到索力	施工过程、成桥运营期间的索力测试	仪器轻便便携，操作简单、测试精度高	拉索自身参数的准确性会影响结果
磁通量法	根据索力和磁通量变化的关系得到索力	有无损、高精度需求的测试	现场操作简便，测试精度高	需将仪器安置在拉索内部，使用费用昂贵
微波雷达法	分析微波信号数据可得到索力值	服役中的斜拉桥	测试效率高，结果精确	现有的分析算法复杂程度高，应用难度大

2.2 振动频率法索力测试原理

振动频率法是当前运用最广泛、最成熟的索力测试方法之一。其基本原理: 通过对斜拉索进行振动激励, 使其产生特定的振动模态和振动频率; 通过安装在索体上的传感器采集振动信号, 经滤波、放大等处理后, 识别出信号的频率与幅度; 最后, 根据拉索的自振频率与索力之间的换算关系确定索力。假定拉索作弦振动, 其基本平衡方程为

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中: EI 为弯曲刚度, $\text{N} \cdot \text{m}^2$; y 为横向振幅, m ; x 为沿拉索方向的坐标, m ; F 为索力, N ; m 为拉索单位长度质量, kg/m ; t 为时间, s 。

若进一步假定拉索两端铰支且斜拉索弯曲刚度为 0, 求解式(1)可知:

$$F = KH^2 \quad (2)$$

$$H = \frac{F_n}{n} \quad (3)$$

$$K = \frac{4mL^2}{1000} \quad (4)$$

式中: H 为基频, Hz ; F_n 为振动频率, Hz ; n 为振型阶次; m 为拉索质量, kg ; L 为索长, m ; K 为频率-索力换算系数, N/Hz^2 。

3 恒载索力测试

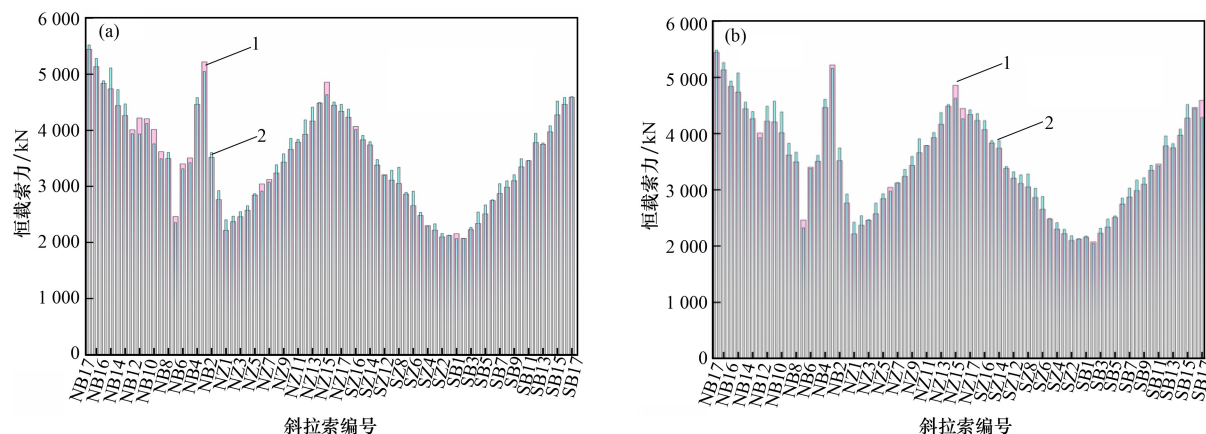
斜拉桥是由主塔、主梁和斜拉索共同构成的超静定结构体系。在此体系中, 斜拉索的索力控

制是施工质量控制的核心环节, 其大小及分布直接决定了桥梁的线形和受力状态。因此, 精准测定斜拉索索力是确保斜拉桥交工验收及通车运营前的重要工作。

大桥共有 136 根斜拉索, 其具体布置如图 1 所示。恒载索力测试的测点编号规则与设计图纸保持一致, 左右幅以 L/R 区分。测试采用振动频率法, 在二期恒载施加完毕后进行。该方法基于斜拉索拉力与其振动频率间的对应关系, 在已知斜拉索的分布质量与长度时, 可通过计算斜拉索的振动频率得出。由于大桥斜拉索两端的约束条件明确, 无需根据现场试验结果进行索长换算。

测量结果表明, 成桥恒载状态下, 斜拉索的实测索力沿纵桥向的分布情况与理论索力分布基本一致(图 2), 未发现明显异常。所有斜拉索的实测索力值均未超过材料允许上限, 未出现索力整体过高或过低的情况。7#主塔(南塔)两侧索力呈对称均匀分布, 表现为短索索力较小、长索索力较大, 索力值随索长增加而逐渐递增的规律。而 6#主塔(北塔)两侧因两侧主梁结构、刚度差异, 分布有所不同: 主塔附近的拉索虽短但索力较大, 其中 NB5 斜拉索出现局部索力偏低。尽管该偏差在设计允许范围内, 但增加了索力控制的难度。

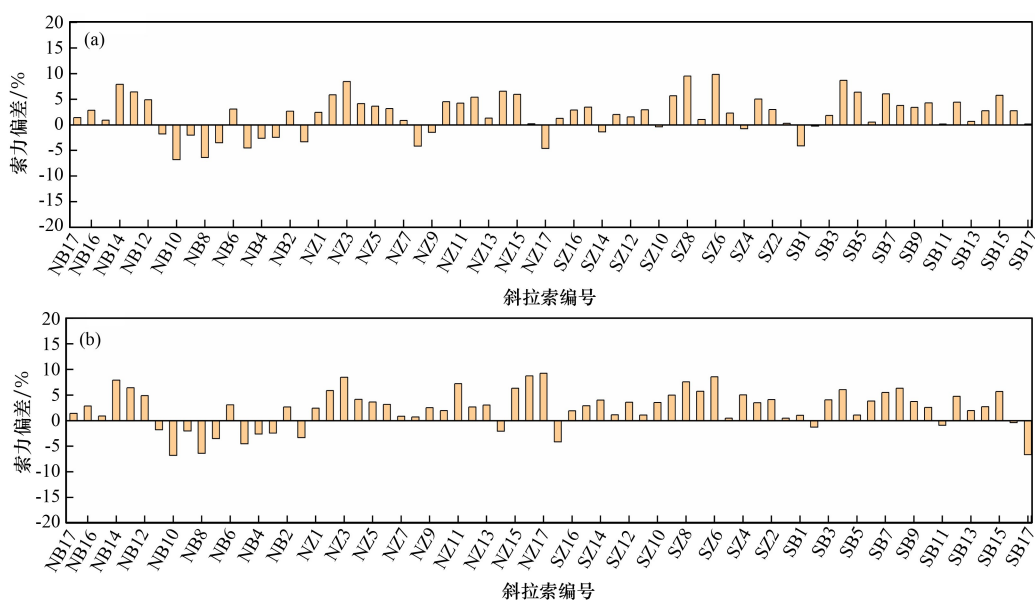
各斜拉索实测索力与理论索力的差值基本控制在 5% 以内(图 3)。主塔两侧索力分布均匀, 上下游索力对称性良好, 表明单根斜拉索的实际承载能力、斜拉索体系的协同受力性能均满足设计要求。



(a) 左幅; (b) 右幅

1—理论索力; 2—实测索力。

图 2 恒载索力



(a) 左幅; (b) 右幅

图 3 斜拉索索力偏差

图 4 为某大跨径双侧对称斜拉桥的索力实测值与理论值偏差图。该桥采用二次调索工艺,其索力测试值与理论值的相对偏差为 $-8.39\% \sim 8.12\%$ 。将两桥恒载索力进行对比可知,本文所述的单侧不对称斜拉桥索力整体受力更为均匀,相对偏差更小。这说明,尽管单侧不对称斜拉桥受力体系更为复杂,索力控制难度更大,但在严格的施工质量控制下,采用三次索力调整工艺能够取得满意的施工效果。这一结果也验证了单侧不对称混合梁斜拉桥设计理念的可行性,为在复杂建设环境下发展多样化的桥型结构提供了实践参考。

4 索力增量测试

4.1 测试工况

斜拉桥成桥后,其结构除承受自身重量(恒载)外,还承受车辆荷载、人群荷载等活载作用。

为检验成桥后斜拉索内力状态是否符合设计值,需进行索力测试。这既能检验斜拉索施工质量,也能评估桥梁的工作状态与性能。根据《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01—2015)和斜拉桥受力变形特点,确定大桥静载试验主要工况如表 2 所示。

4.2 试验荷载与加载位置

按照 JTG/T J21-01—2015,静力荷载效率 η_s 取值范围为 $85\% \sim 105\%$ 。为真实反映斜拉索受力变形并避免结构局部破坏,需合理取值。试验以主梁最大正弯矩、墩顶主梁最大负弯矩及索塔塔底截面最大弯矩工况对应的 η_s 值作为控制标准,控制截面位置如图 1 所示。各工况试验荷载效率如表 3 所示。由表 3 可知:静载试验效率系数满足规程要求。实际加载时,采用弯矩等效原则,按各工况最不利效应位置布载。

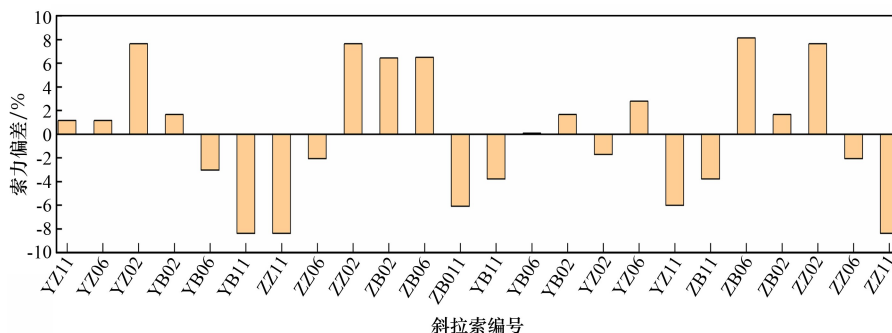


图 4 某双侧对称斜拉索索力偏差

表 2 静载试验加载工况

工况编号	布载方式	控制截面	位置	横桥向加载方式
1	按主梁最大正弯矩布载	JM-1(主梁 1/2 跨最大正弯矩)	主梁 1/2 跨处	对称加载
2	按主梁最大正弯矩布载	JM-1(主梁 1/2 跨最大正弯矩)	主梁 1/2 跨处	偏心加载
3	按主梁墩顶最大负弯矩布载	JM-2(主梁墩顶最大负弯矩)	主梁墩顶处	对称加载
4	按索塔塔底截面最大弯矩工况/塔顶最大纵向水平偏位布载	JM-3(塔底最大弯矩)/JM-4(塔顶最大水平偏位)	索塔塔底/塔顶	对称加载

表 3 各工况试验荷载效率

工况类型	控制指标	加载车辆数/辆	公路荷载-I 设计值	加载效应值	荷载效率/%
主梁最大正弯矩	弯矩/(kN·m)	12	64 637.000	60 971.000	94
支点最大负弯矩	弯矩/(kN·m)	24	-86 871.000	-83 158.000	93
主塔最大弯矩	弯矩/(kN·m)	40	-190 709.000	-162 471.000	85
主塔最大塔偏	位移/m	40	0.218	0.194	89

4.3 索力增量测点布置

加载过程中，对每种工况下加载位置附近的索力变化量较大的 5 对拉索进行索力增量监测。测点编号沿用设计图纸编号(左右幅分别以 L/R 区分)，具体编号如表 4 所示。

表 4 主桥索力测试编号

加载工况编号	索力测试编号
1	NZ16-L/R~NZ17-L/R、SZ15-L/R~SZ17-L/R
2	NZ16-L/R~NZ17-L/R、SZ15-L/R~SZ17-L/R
3	NZ1-L/R~NZ5-L/R
4	SZ14-L/R、SZ12-L/R、SZ9-L/R、SZ7-L/R、SZ4-L/R

4.4 测试结果分析

在工况 1~4 下，各工况对应加载位置附近的 5 对斜拉索的索力增量值如图 5 所示。由图 5 可知：各工况对应 5 对斜拉索索力增量实测值与理论值变化趋势一致，说明结构变形规律与拉索索受力特性相符，主桥斜拉索体系结构安全。各工况对应 5 对斜拉索索力增量实测值与理论值比较可知：索力增量实测值均小于理论值(索力校验系数为 0.82~0.93)，说明斜拉索承载能力满足设计要求，具有较高承载富余度，符合 JTG/T J21-01—2015 规定。

为分析斜拉索的变形状态，对斜拉索索力增

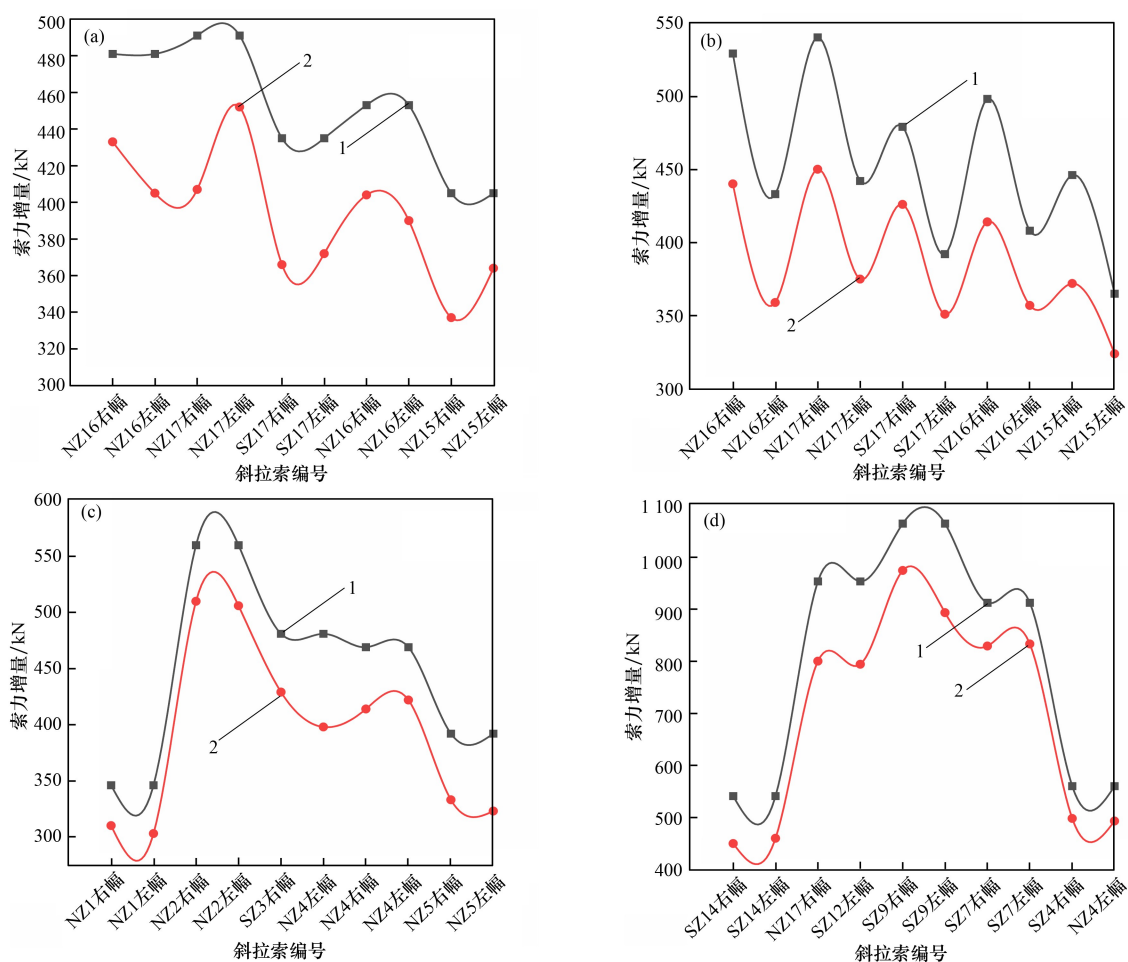
量与加载效率进行相关性分析。限于文章篇幅，仅列出工况 4(静力加载试验)下 SZ7 斜拉索索力增量实测值(表 5)，以及 SZ7 斜拉索在该工况下索力增量值与加载效率变化关系(图 6)。由图 6 可知：左幅 SZ7 斜拉索决定系数 R^2 为 0.999 9，右幅 SZ7 斜拉索 R^2 值为 0.994 0，两者的 R^2 值均非常接近 1，表明线性拟合度非常高，说明 SZ7 斜拉索在工况 4(静力加载试验)逐级加载下，索力增量值与荷载效率存在强线性关系，该斜拉索处于正常弹性变形阶段，卸载后变形可恢复。

表 5 索力增量汇总(工况 4)

加载顺序	理论	实测
一级/kN	174	161(R)
		158(L)
二级/kN	442	385(R)
		401(L)
三级/kN	754	647(R)
		688(L)
四级/kN	912	829(R)
		833(L)
索力校验系数	—	0.91(R)
		0.91(L)

5 结 论

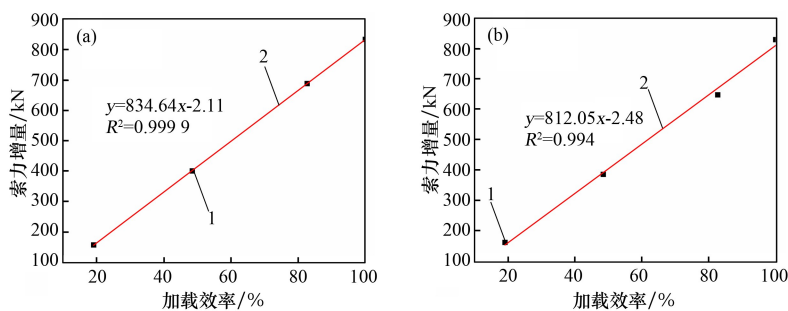
(1) 成桥恒载下，斜拉索实测索力沿纵桥向分布与理论分布一致，单根索力偏差均在规范范



(a) 工况 1; (b) 工况 2; (c) 工况 3; (d) 工况 4

1—理论值; 2—实测值。

图 5 索力增量



(a) 左幅; (b) 右幅

1—实测值; 2—线性。

图 6 SZ7 斜拉索索力增量值与加载效率变化线性图

围内,主塔两侧索力对称且分布均匀,斜拉索实际承载力及协同受力满足设计要求。与另一座大跨径双侧对称斜拉桥恒载索力控制质量对比表明,大桥采用的三次调索施工工艺可有效保障单侧不对称混合梁斜拉索施工质量,验证了该类型桥设

计理念的可行性,对提升同类桥梁建设技术水平具有参考价值。

(2) 荷载试验期间,斜拉索索力校验系数均小于 1,说明其加载过程承载富余度高;索力与加载效率呈强线性关系,表现出良好弹性性能,实

际工作能力和状态满足设计及规范要求。

(3) 单侧不对称混合梁斜拉桥受力体系较为复杂, 建议设计阶段优先保证成桥索力分布均匀, 避免索力局部突变; 除靠近主塔的短索外, 其余斜拉索宜遵循“短索索力小、长索索力大”规律, 以降低施工阶段索力调整难度。

(4) 接触式传感器的质量、安装位置对索力测试结果存在影响。随着测试技术不断发展, 非接触式方法凭借高效率、低成本、环境适应性强等优势, 将成为索力测试的重要技术手段。

参考文献:

- [1] KIM B H, Park T. Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304 (3/4/5): 660 - 676.
- [2] 邢焕森. 矮塔斜拉桥斜拉索张拉控制[J]. 工程建设, 2014, 46(1): 47 - 49.
- [3] 赵淑兰, 金添. 基于新陈代谢模型的灰色预测控制系统在斜拉桥施工监控中的应用[J]. 湖南交通科技, 2019, 45(2): 88 - 92; 159.
- [4] 朱万旭, 苏泳旗, 庞晰中. 基于 FBG 的斜拉桥索力在线监测系统[J]. 公路工程, 2022, 47(2): 61 - 69; 167.
- [5] 张振浩, 袁方, 毛艺程. 斜拉索疲劳动力可靠性及随机跨阈解析研究综述[J]. 工程建设, 2025, 57(12): 1 - 10.