

国家计量技术规范

《桥梁智能测力支座
校准规范》

编制说明

(征求意见稿)

规范编制组

2023年11月

目 录

| | |
|------------------------|----|
| 一、任务来源 | 1 |
| 1、任务来源 | 1 |
| 2、人员分工 | 1 |
| 二、项目背景 | 1 |
| 1、目的意义 | 1 |
| 2、国内外概况 | 3 |
| 三、编制过程 | 3 |
| 1、编制原则 | 5 |
| 2、工作进程 | 5 |
| 3、重大分歧意见的处理经过和依据 | 5 |
| 四、编制依据 | 5 |
| 1、编制依据 | 5 |
| 2、参考文献 | 6 |
| 3、国内外标准技术文件的兼容情况 | 6 |
| 五、主要技术内容 | 6 |
| 1、计量性能要求 | 7 |
| 2、计量校准方法 | 7 |
| 3、通用技术要求 | 8 |
| 4、计量器具控制中的校准条件 | 11 |
| 六、试验验证报告 | 11 |
| 七、不确定度评定 | 26 |
| 八、其他应予说明的事项 | 26 |

一、任务来源

1、任务来源

根据 2024 年国家计量技术规范制修订计划，由交通运输部公路科学研究所主持承担国家计量技术规范《桥梁智能测力支座校准规范》的制定工作。本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》进行制定。

2、人员分工

主要起草人及其所做的工作如表 1：

表 1 主要起草人及其所做的工作

| 人员 | 单位 | 所做工作 |
|-----|----------------|--------------------------|
| 曹瑾瑾 | 交通运输部公路科学研究所 | 负责试验方法研究及组织试验验证、全部章节的编写。 |
| 张金凝 | 中路高科交通科技集团有限公司 | 负责规范的理论分析，校准方法的研究、验证工作。 |
| 周毅姝 | 交通运输部公路科学研究所 | 负责规范的理论分析，校准方法的研究、验证工作。 |
| 伍大成 | 济通智能装备股份有限公司 | 负责部分试验验证工作。 |
| 任励硕 | 中路高科交通科技集团有限公司 | 负责部分试验验证工作。 |
| 刘越 | 交通运输部公路科学研究所 | 负责部分试验验证工作。 |
| 王剑明 | 济通智能装备股份有限公司 | 负责附录编制。 |

二、项目背景

1、目的意义

我国正处于“交通大国”向“交通强国”发展的关键时期，为提升产品、工程、服务质量总体水平，推动高质量发展、促进我国经济由大向强转变。近日，国务院印发了《质量强国建设纲要》，对产品、工程质量水平，质量基础设施及质量体系等机制建设与完善提出了明确要求。

随着先进材料、科技技术的不断发展与更新，形成了液压式测力、应变式测

力、频率法测力等多种力学的桥梁智能测力监测方案及装备。但很多检测方案和设备缺乏统一的计量技术标准，导致技术参数不统一、计量特性不一致等不足，无法评判各方案的利弊，更无法准确判断其在工程领域的适用性以及其监测数据的可靠性与长效性。

桥梁智能测力支座作为桥梁测力装备的一种常用设备，对桥梁支反力、索力、吊杆力等关键构件的力学进行监测，有效、可靠的感知其力学参数，不仅可提供结构安全、耐久性能，对促进基于实测数据的设计理论及方法优化，促进“双碳”目标具有非常重要的意义，此外对提升产品质量，促进基于计量、标准、认证认可、检验检测等要素集成融合的质量基础设施体系完善具有重要的意义，桥梁智能测力支座实物如图 1 所示。



图 1 桥梁智能测力支座

有效、可靠感知力学参数的关键在于监测装备/技术满足计量法量值溯源要求。而目前国家尚无相关标准对桥梁支反力监测装备的计量特性提出要求。致使海量“垃圾数据”的现象普遍存在。因此，迫切需要从国家层面建立一部标准，规范测力装备的计量特性、校准条件、校准内容、校准方法等。从计量法层面规范智能监测装备计量特性，提高产品质量、提升工程品质，促进我国“交通强国”与“质量强国”双战略稳步发展。

2、规范的关键技术内容和可行性分析

项目申请单位交通运输部公路科学研究院国家道路与桥梁工程检测设备计量站作为主要起草单位编制了 JJG(交通)142-2020 磁通量索力检测仪检定规程，并在 2022 年 4 月获得磁通量索力检测仪检定装置最高部门计量标准授权。截至目前，计量站已完成数台该类设备的检/校工作，积累了该类设备的计量经验。

桥梁智能测力支座的结构如下图 2 所示，在结构支座上部（或下部）串联一组具有对称布置楔形调节块的调高测力结构，测力传感器布设于两楔形块之间，正常使用，在上部荷载作用时，通过标准力传感器测定两楔形块的挤压力以反算支座竖向受力。调高测力结构与支座本体连接锚固可靠；在楔形块两侧配置动力系统接口，能按需配置动力系统，通过动力系统驱动楔形块发生平面运动，从而促使支座高度发生上、下运动。

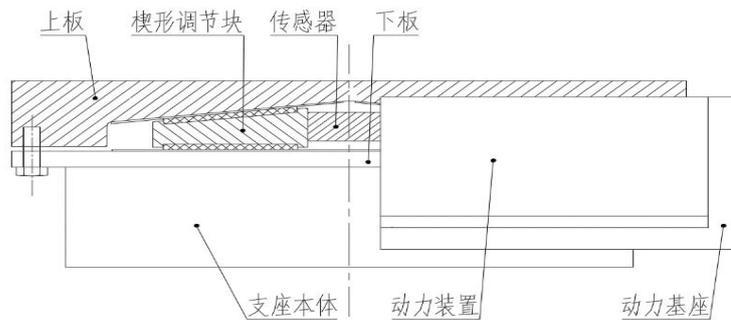


图 2 桥梁智能测力支座的结构原理

使用过程中，如需更换传感器，仅需通过对配置在两楔形块之间的动力装置及系统施加动力促使两楔形调节块发生相背运动，待内部传感器处于脱空状态，稳定后即可进行传感器的取出与安装更换工作。

服役期间需要标定时，楔形块配置动力系统，动力系统串联有标准荷载传感器，智能动力系统驱动楔形块水平运动，使装置发生向上、向下运动（或运动趋势），通过记录装置上、下运动（或运动趋势）时的水平力 T' 与 T ，并根据对应状态的力学平衡关系式即可计算出装置所受的竖向荷载 F ，从而实现结构支座竖向受力的标定。

各状态下装置受力模型及力学分析如下图 3 所示：

三、编制过程

1、编制原则

本标准在编写过程中遵循如下原则：

一是先进性。与国内外最新标准及方法接轨，体现国内外该领域的最新成果及动态。

二是适用性。与我国桥梁智能测力支座使用和生产质量的实际情况相适应。

三是协调性。符合国家及地方相关法律、法规的规定，符合相关强制性标准的要求，并与现行有效的检测、设计、验收等标准指标的要求协调一致。

2、工作进程

编制过程如下：

2024年01月~2024年05月，完成桥梁智能测力支座研究现状及使用情况的国内外相关资料调研，分析确定主要计量技术指标及量值复现方法，并进行试验验证和不确定度评定。

2024年06月~2024年08月，根据试验验证结果，修改规范稿件，完成校准规范及编制说明征求意见稿。

2024年09月~2024年12月，项目申请召开征求意见会，会后根据专家意见，并对规范草案进行修改完善。

2025年01月~2025年03月，申请征求意见挂网广泛征求意见，并汇总、分析各单位的反馈意见，完善征求意见稿。

2025年04月~2025年09月，形成送审稿，组织召开送审稿审查会，会后根据专家意见对规范草案进行修改完善。

2025年10月~2025年12月，形成报批，提交报批材料，完成结题。

3、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

四、编制依据

1、编制依据

标准编写格式依据 JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则编写。

2、参考文献

在标准编写中，编写组搜集了部分国内标准或规程资料，主要参照以下标准或规程：

- 1) JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则
- 2) JJF 1059.1-2010 测量不确定度评定与表示

3、国内外标准技术文件的兼容情况

国内外目前无相应设备的校准规范，国内外相关只有试验规程。

4、与国家或其他行业计量校准规范的关系

本标准不违反现行法律、法规和强制性国家标准。

五、主要技术内容

按照 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》要求，本规范包括八个章节和三个附录：1 范围、2 引用文件、3 概述、4 计量特性、5 校准条件、6 校准项目和校准方法、7 校准结果表达、8 复校时间间隔，以及附录 A 桥梁智能测力支座校准记录表，附录 B 桥梁智能测力支座校准结果内页格式，附录 C 桥梁智能测力支座校准结果不确定度评定示例。

桥梁智能测力支座是用于连接桥梁上部结构与下部结构的关键部件，用于检测桥梁的受力、变形等。如图 4~6 所示。

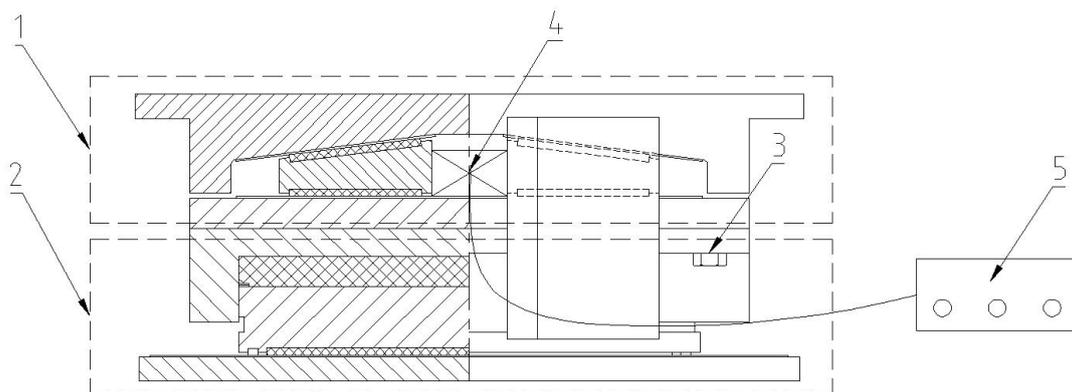


图 4 智能测力盆式橡胶支座结构示意图

注：1—测力装置；2—盆式橡胶支座；3—连接螺栓；4—力传感器；5—采集装置

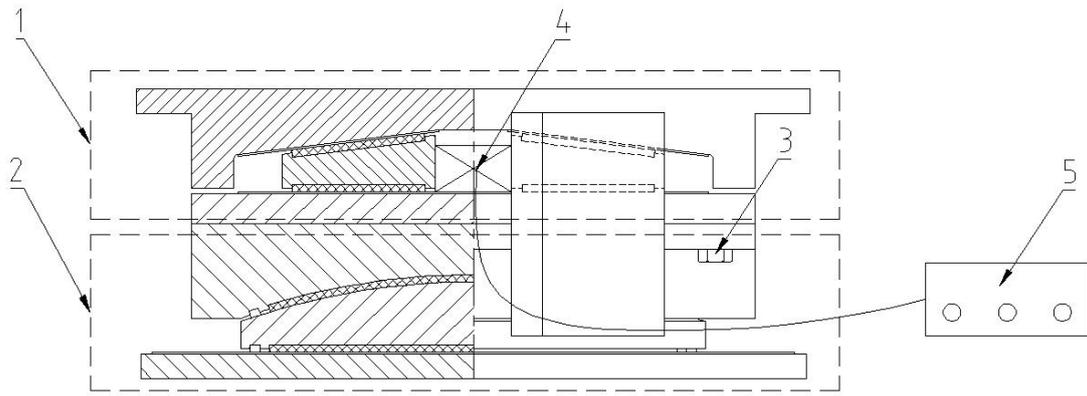


图5 智能测力球型钢支座结构示意图

注：1—测力装置；2—球型钢支座；3—连接螺栓；4—力传感器；5—采集装置

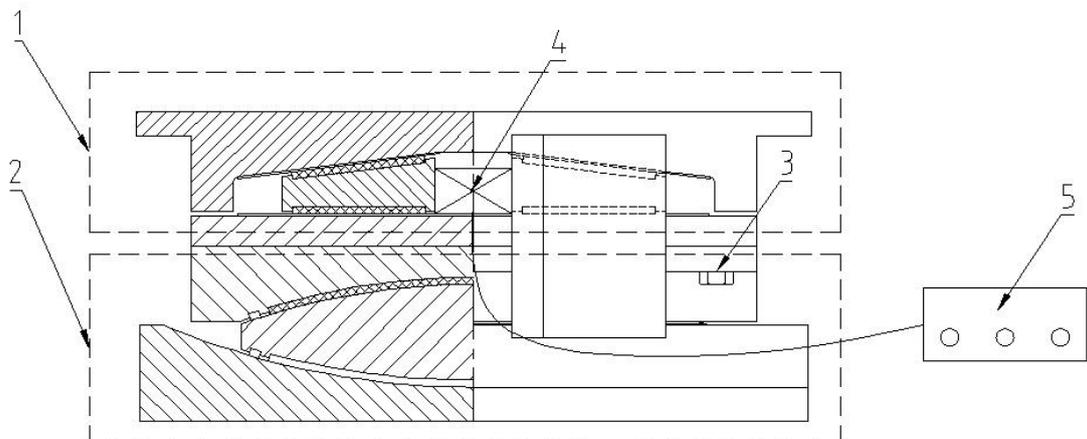


图6 智能测力摩擦摆减隔震支座结构示意图

注：1—测力装置；2—摩擦摆减隔震支座；3—连接螺栓；4—力传感器；5—采集装置

1、计量性能要求

1) 竖向压力测量示值误差

竖向压力试验即时示值误差应不大于 $\pm 5.0\%$ ，稳定后示值误差应不大于 $\pm 3.0\%$ 。

2) 转角 (6°) 测量示值误差

转角 (6°) 试验即时示值误差应不大于 $\pm 5.0\%$ ，稳定后示值误差应不大于 $\pm 3.0\%$ 。

3) 水平力 (10%竖向力) 测量示值误差

水平力 (10%竖向力) 即时示值误差应不大于 $\pm 5.0\%$ ，稳定后示值误差应不大于 $\pm 3.0\%$ 。

4) 竖向压力状态下原位校准的测量示值误差

竖向压力状态下对智能测力支座执行原位校准操作,即在不改变支座高度及受力的情况下,完成传感器的更换及示值数据处理函数的更新后,即时示值误差应不大于±5.0%,稳定后示值误差应不大于±3.0%。

2、计量校准方法

1) 竖向压力试验误差

试验过程如下:

a) 将桥梁智能测力支座安装在压力试验机上,启动试验装置。

b) 加载力值 F , 应满足 $F \leq F_{\max}$, (其中, F_{\max} 为桥梁智能测力支座量程标称值), 读取压力试验机力值示值 F_0 和桥梁智能测力支座示值 F_1 ;

c) 按式 (1) 计算竖向压力试验即时示值误差 δ_F ;

$$\delta_F = \frac{F_1 - F_0}{F_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: δ_F ——竖向压力试验即时示值误差;

F_1 ——桥梁智能测力支座即时示值, kN;

F_0 ——压力试验机力值即时示值, kN。

d) 加载力值 F 十分钟后, 读取压力试验机力值示值 F_{01} 和桥梁智能测力支座示值 F_{11} ;。按照公式 (2) 计算压力试验机竖向压力稳定后的示值误差应 δ_{F1} ;

$$\delta_{F1} = \frac{F_{11} - F_{01}}{F_{01}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: δ_{F1} ——竖向压力试验稳定后示值误差;

F_{11} ——桥梁智能测力支座稳定后示值, kN;

F_{01} ——压力试验机力值稳定后示值, kN。

e) 重复步骤 d) 三次, 取三次测量结果的最大值作为压力试验机竖向压力稳定后的示值误差。

2) 转角 (6°) 试验误差

试验过程如下:

a) 将桥梁智能测力支座安装在压力试验机上,启动试验装置。

b) 调整桥梁智能测力支座转角 6°, 加载力值 F 应满足 $F \leq F_{\max}$, (其中,

F_{\max} 为桥梁智能测力支座量程标称值), 读取压力试验机力值示值 F_{02} 和桥梁智能测力支座示值 F_{12} ;

c) 按式 (1) 计算转角试验即时示值误差 δ_{F2} ;

$$\delta_{F2} = \frac{F_{12}-F_{02}}{F_{02}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: δ_{F2} ——转角试验即时示值误差;

F_{12} ——桥梁智能测力支座即时示值, kN;

F_{02} ——压力试验机力值即时示值, kN。

d) 加载力值 10 分钟后, 读取压力试验机力值示值 F_{03} 和桥梁智能测力支座示值 F_{13} 。按照公式 (2) 计算转角试验稳定后的示值误差应 δ_{F3} ;

$$\delta_{F3} = \frac{F_{13}-F_{03}}{F_{03}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: δ_{F3} ——转角试验稳定后示值误差;

F_{13} ——桥梁智能测力支座稳定后示值, kN;

F_{03} ——压力试验机力值稳定后示值, kN。

e) 重复步骤 d) 三次, 取三次测量结果的最大值作为转角 6° 试验稳定后的示值误差。

3) 水平力 (10%竖向力) 试验误差

试验过程如下:

a) 将桥梁智能测力支座安装在具有水平力加载能力的压力试验机上, 启动试验装置。

b) 加载桥梁支座水平力为 $F_{\text{水平}} = 10\% * F_{\max}$, 加载竖向力值 F 应满足 $F \leq F_{\max}$, (其中, F_{\max} 为桥梁智能测力支座量程标称值), 读取压力试验机力值示值 F_{02} 和桥梁智能测力支座示值 F_{12} ;

c) 按式 (1) 计算转角试验即时示值误差 δ_{F2} ;

$$\delta_{F2} = \frac{F_{12}-F_{02}}{F_{02}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: δ_{F2} ——转角试验即时示值误差;

F_{12} ——桥梁智能测力支座即时示值，kN；

F_{02} ——压力试验机力值即时示值，kN。

d) 加载力值 10 分钟后，读取压力试验机力值示值 F_{03} 和桥梁智能测力支座示值 F_{13} ；。按照公式 (2) 计算水平力试验稳定后的示值误差应 δ_{F3} ；

$$\delta_{F3} = \frac{F_{13}-F_{03}}{F_{03}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： δ_{F3} ——水平力试验稳定后示值误差；

F_{13} ——桥梁智能测力支座稳定后示值，kN；

F_{03} ——压力试验机力值稳定后示值，kN。

e) 重复步骤 d) 三次，取三次测量结果的最大值作为水平力试验稳定后的示值误差。

4) 竖向压力状态下原位校准结果试验误差

试验过程如下：

a) 将桥梁智能测力支座安装在具有水平力加载能力的压力试验机上，启动试验装置。

b) 加载竖向力值 F 应满足 $F \leq F_{\max}$ ，（其中， F_{\max} 为桥梁智能测力支座量程标称值），执行智能测力支座原位校准。

c) 原位校准按智能测力支座专有方法进行，过程中应更换传感器及函数更新，过程应满足 F 变化值小于 $1\% * F_{\max}$ ，且支座高度变化值（用位移传感器测试支座上下板距离）小于 0.1mm。

读取压力试验机力值示值 F_{02} 和桥梁智能测力支座示值 $F_{\text{原位}}$ ；

c) 按式 (1) 计算转角试验即时示值误差 δ_{F2} ；

$$\delta_{F2} = \frac{F_{\text{原位}}-F_{02}}{F_{02}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： δ_{F2} ——原位校准试验即时示值误差；

F_{12} ——桥梁智能测力支座即时示值，kN；

F_{02} ——压力试验机力值即时示值，kN。

d) 加载力值 10 分钟后，读取压力试验机力值示值 F_{03} 和桥梁智能测力支座

示值 F_{13} ；按照公式（2）计算水平力试验稳定后的示值误差应 δ_{F3} ：

$$\delta_{F3} = \frac{F_{13}-F_{03}}{F_{03}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： δ_{F3} ——水平力试验稳定后示值误差；

F_{13} ——桥梁智能测力支座稳定后示值，kN；

F_{03} ——压力试验机力值稳定后示值，kN。

e) 重复步骤 d) 三次，取三次测量结果的最大值作为水平力试验稳定后的示值误差。

3、通用技术要求

按照 JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则格式要求进行编辑。

4、计量器具控制中的校准条件

按照 JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则给出了试验条件和计量器具及要求编写，环境温度定为（0~60）℃，湿度为不大于 85%。

依据：超出（0~60）℃范围过冷过热对仪器设备精度造成影响。

六、试验验证报告

规范编写过程中，对路面磨耗仪计量特性所涉及的具体指标进行了试验验证。

1、竖向承载力试验：

支座规格为：XIQZ3000，设计竖向承载力：3000KN，其中支座高度为 305mm，盆环径向直径为 410mm。

GB17955 对支座竖向承载性能 4.1.1 要求为：在竖向设计承载力的作用下，支座的竖向压缩变形不应大于支座总高度的 1%，盆环径向变形不应大于盆环外径的 0.5%。

表 1 支座竖向压缩变形试验数据

| 序号 | 竖向承载力 kN | 压缩变形量/mm | | | 平均值 | 变形率/% |
|----|----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| | | 第一次加载 | 第二次加载 | 第三次加载 | | |
| 1 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 450 | 0.172 | 0.139 | 0.149 | 0.153 | 0.050 |
| 3 | 900 | 0.297 | 0.242 | 0.264 | 0.268 | 0.088 |
| 4 | 1350 | 0.417 | 0.355 | 0.365 | 0.379 | 0.124 |
| 5 | 1800 | 0.525 | 0.457 | 0.466 | 0.483 | 0.158 |

| | | | | | | |
|----|------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| 6 | 2250 | 0.631 | 0.562 | 0.568 | 0.587 | 0.192 |
| 7 | 2700 | 0.728 | 0.662 | 0.665 | 0.685 | 0.225 |
| 8 | 3000 | 0.787 | 0.717 | 0.722 | 0.742 | 0.243 |
| 9 | 3150 | 0.818 | 0.746 | 0.749 | 0.771 | 0.253 |
| 10 | 3600 | 0.901 | 0.827 | 0.831 | 0.853 | 0.280 |
| 11 | 4050 | 0.981 | 0.904 | 0.905 | 0.930 | 0.305 |
| 12 | 4500 | 1.041 | 0.994 | 0.993 | 1.009 | 0.331 |

竖向承载力与竖向压缩变形曲线如下图所示：

竖向承载力-压缩变形曲线

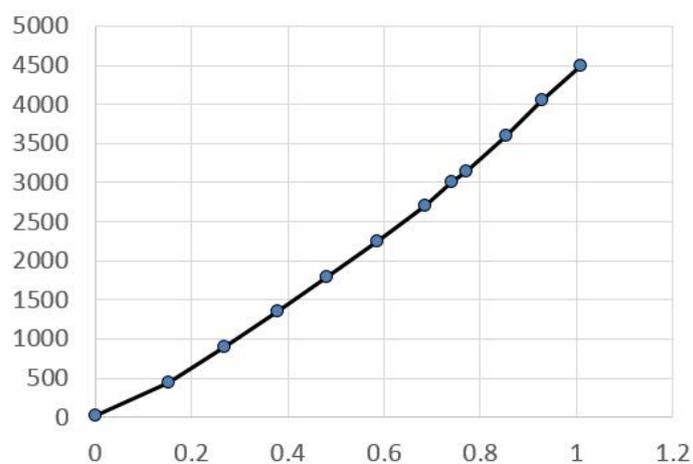


图 7 支座竖向承载力-压缩变形试验曲线

表 2 支座竖向承载-盆环径向变形试验数据

| 序号 | 竖向承载力 kN | 盆环变形量/mm | | | | 径向变形率/% |
|----|----------|----------|--------|-------|-------|--------------|
| | | 第一次加载 | 第二次加载 | 第三次加载 | 平均值 | |
| 1 | 15 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2 | 450 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 3 | 900 | 0.001 | -0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 4 | 1350 | 0.001 | -0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 5 | 1800 | 0.004 | 0.001 | 0.003 | 0.003 | 0.007 |
| 6 | 2250 | 0.006 | 0.006 | 0.005 | 0.006 | 0.014 |
| 7 | 2700 | 0.011 | 0.009 | 0.01 | 0.010 | 0.024 |
| 8 | 3000 | 0.013 | 0.011 | 0.013 | 0.012 | 0.030 |
| 9 | 3150 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.032 |
| 10 | 3600 | 0.017 | 0.016 | 0.018 | 0.017 | 0.041 |
| 11 | 4050 | 0.021 | 0.021 | 0.02 | 0.021 | 0.050 |
| 12 | 4500 | 0.024 | 0.024 | 0.025 | 0.024 | 0.059 |

竖向承载力-盆环径向变形曲线

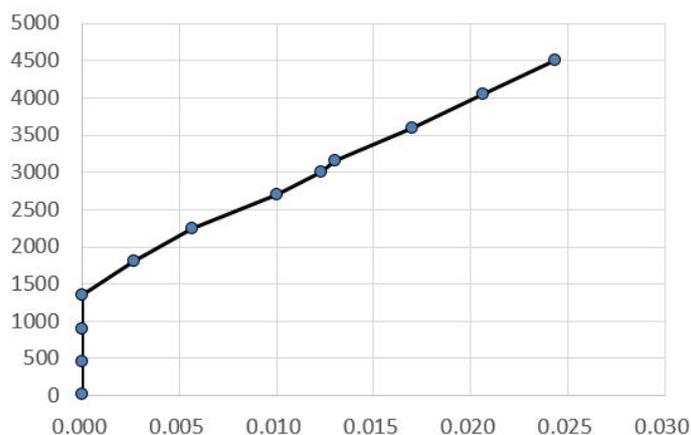


图 8 支座竖向承载力-盆环径向变形试验曲线

由试验可知，支座设计承载力作用下竖向压缩变形为支座高的 0.243%，盆环径向变形为盆环外径的 0.03%，符合标准要求。

2、竖向压力下测力试验：

表 3 正常竖向受压状态测力性能试验数据

| 竖向加载值 F/KN | 显示值/KN | | | 示值误差/% | | |
|------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | 第一次加载 | 第二次加载 | 第三次加载 | 第一次加载 | 第二次加载 | 第三次加载 |
| 800 | 805.4 | 816 | 809.9 | 0.67 | 2.00 | 1.24 |
| 1600 | 1587.9 | 1581.1 | 1575.9 | -0.76 | -1.18 | -1.51 |
| 2400 | 2363 | 2373.3 | 2353.1 | -1.54 | -1.11 | -1.95 |
| 3200 | 3178.6 | 3201.2 | 3168.6 | -0.67 | 0.04 | -0.98 |
| 4000 | 3995.5 | 4015.2 | 3982.9 | -0.11 | 0.38 | -0.43 |
| 4800 | 4813.2 | 4843 | 4820 | 0.27 | 0.90 | 0.42 |

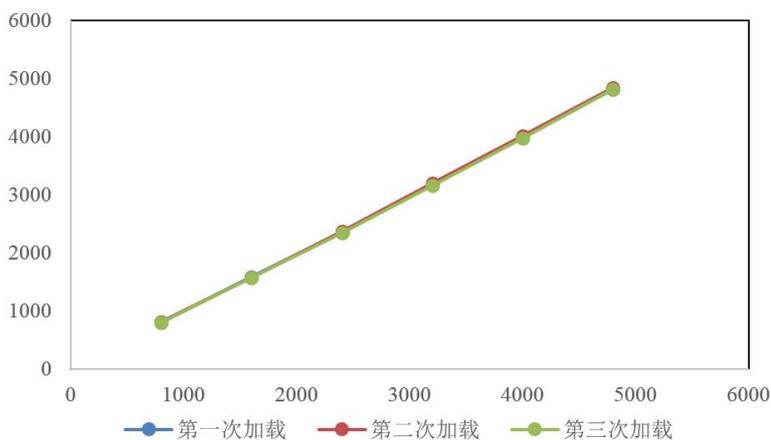


图 9 正常竖向受压状态测力性能试验曲线

3、发生 6° 转动后测力试验：

表 4 转角 (6°) 状态下测力性能试验数据

| 竖向加载 值 F/kN | 显示值/kN | | | 示值误差/% | | |
|----------------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 第一次加载 | 第二次加载 | 第三次加 载 | 第一次加 载 | 第二次加 载 | 第三次加 载 |
| 800 | 787.9 | 786.8 | 781.8 | -0.30 | -0.33 | -0.46 |
| 1600 | 1623.5 | 1609.8 | 1637.1 | 0.59 | 0.24 | 0.93 |
| 2400 | 2413 | 2408.1 | 2385.6 | 0.33 | 0.20 | -0.60 |
| 3200 | 3192 | 3162.6 | 3165.9 | -0.20 | -0.94 | -0.85 |
| 4000 | 4013 | 3969.5 | 3977 | 0.33 | -0.76 | -0.58 |
| 4800 | 4786.7 | 4776.9 | 4781.4 | -0.33 | -0.58 | -0.47 |

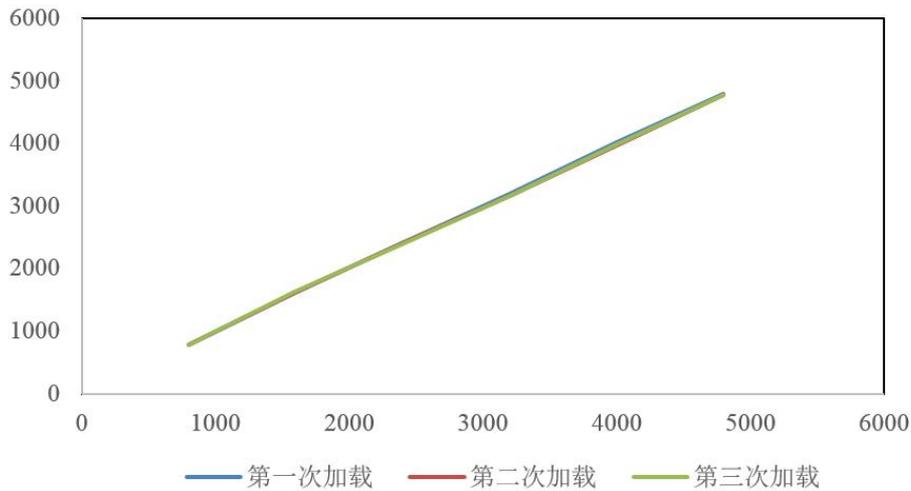


图 10 转角 (6°) 状态测力性能试验曲线

4、水平力 (10%竖向力) 状态下测力试验:

表 5 水平力 (10%) 状态测力性能试验数据

| 竖向加载 值 F/kN | 显示值/kN | | | 示值误差/% | | |
|----------------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 第一次加载 | 第二次加载 | 第三次加 载 | 第一次加 载 | 第二次加 载 | 第三次加 载 |
| 1600 | 1576.2 | 1562.7 | 1585.4 | -0.74 | -1.17 | -0.46 |
| 2400 | 2355.2 | 2370.1 | 2372.4 | -1.12 | -0.75 | -0.69 |
| 3200 | 3154.2 | 3162.3 | 3133.2 | -1.15 | -0.94 | -1.67 |
| 4000 | 3950.3 | 3946.4 | 3913.7 | -1.24 | -1.34 | -2.16 |
| 4800 | 4751.8 | 4782.1 | 4760.8 | -1.21 | -0.45 | -0.98 |

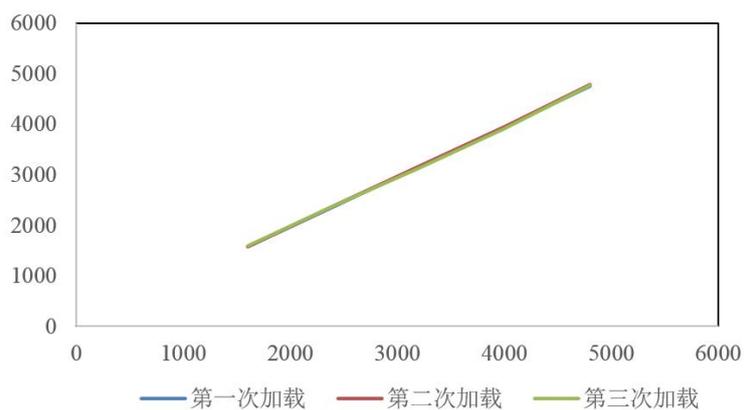


图 11 水平力状态测力性能试验曲线

5、竖向压力状态下原位校准结果试验数据

| | | 加载值 | 显示值 | 显示误差 | 显示误差 |
|-------|-----|------|--------|-------|-------|
| 0.2P | 第一次 | 800 | 810.1 | 1.3% | 1.1% |
| | 第二次 | 800 | 808.7 | 1.1% | |
| | 第三次 | 800 | 806.7 | 0.8% | |
| 0.4P | 第一次 | 1600 | 1591.2 | -0.5% | -0.9% |
| | 第二次 | 1600 | 1584.2 | -1.0% | |
| | 第三次 | 1600 | 1579.1 | -1.3% | |
| 0.6P | 第一次 | 2400 | 2366.1 | -1.4% | -1.3% |
| | 第二次 | 2400 | 2378.4 | -0.9% | |
| | 第三次 | 2400 | 2364.5 | -1.5% | |
| 0.8P | 第一次 | 3200 | 3180.8 | -0.6% | -0.5% |
| | 第二次 | 3200 | 3208.1 | 0.3% | |
| | 第三次 | 3200 | 3165.1 | -1.1% | |
| 0.10P | 第一次 | 4000 | 3998.9 | 0.0% | 0.0% |
| | 第二次 | 4000 | 4018.7 | 0.5% | |
| | 第三次 | 4000 | 3985.5 | -0.4% | |
| 0.12P | 第一次 | 4800 | 4747.1 | -1.1% | -1.2% |
| | 第二次 | 4800 | 4746.2 | -1.1% | |
| | 第三次 | 4800 | 4732.8 | -1.4% | |

6、现场原位校准试验

1) 汕头牛田洋大桥





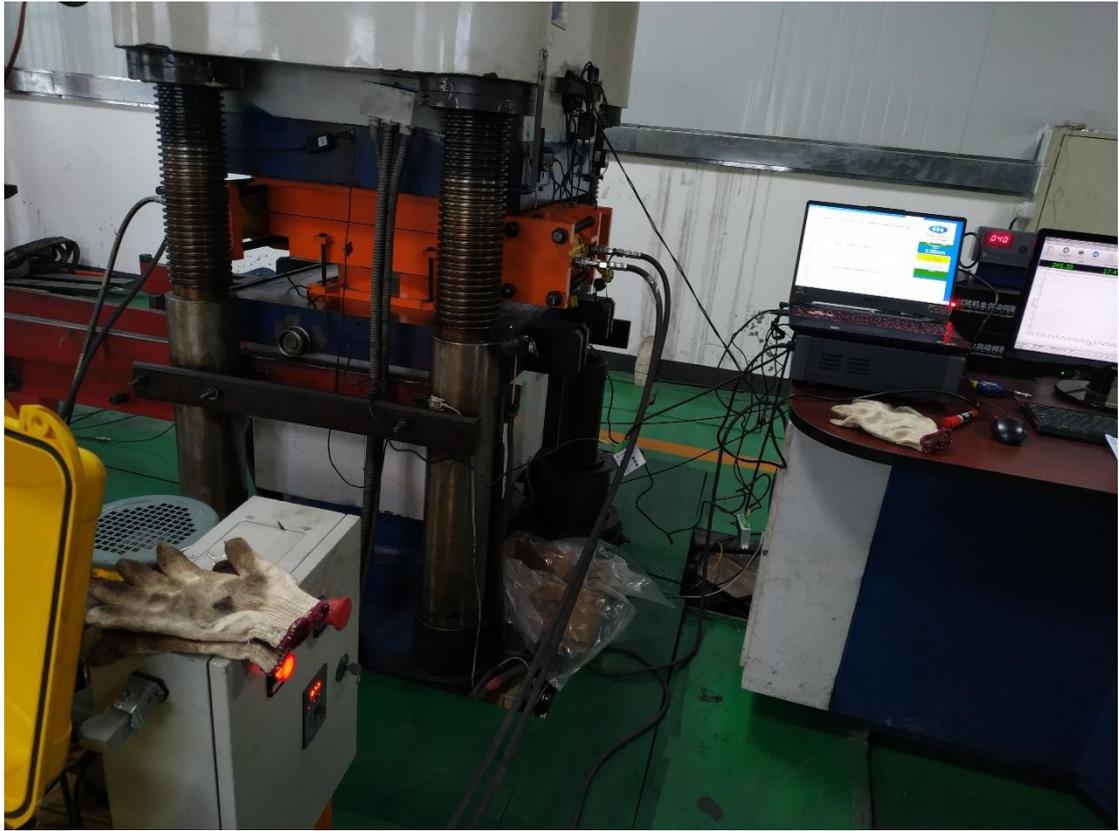
2) 江西大广高速大阿大桥





3) 实验室试验照片:







7、绍兴实桥数据监测与分析

绍兴二环智慧快速路中支座智能化典型桥梁——二环西鉴湖大桥为对象，对其支座数据情况进行统计与分析。受前期分幅施工及现场环境等多方面因素影响，该桥支座于2024年5月全面供电进行数据采集。支座布置如下图所示，本研究仅对左、右两幅地面桥主桥布置智能测力支座。其中边墩支座设计竖向承载力为5000kN，主墩支座设计竖向承载力为15000 kN。

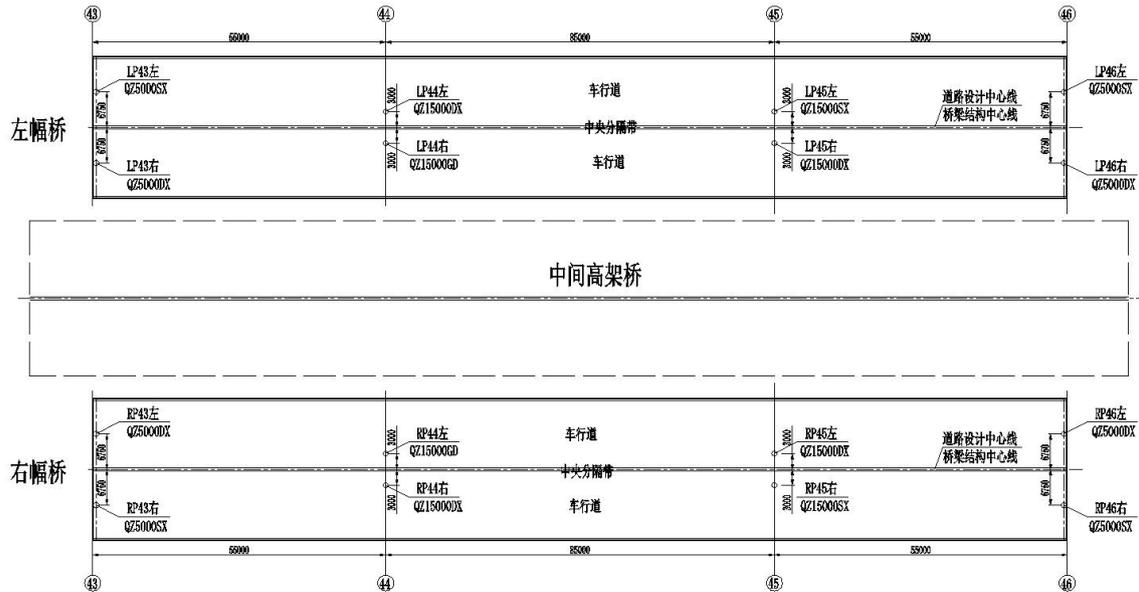


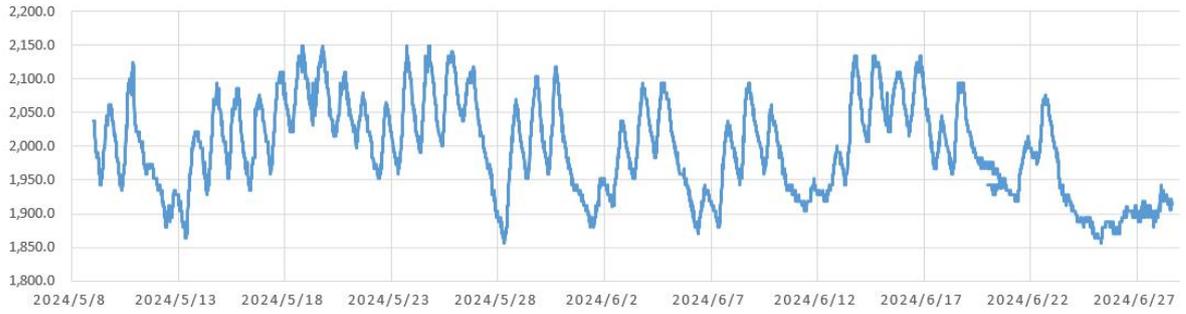
图 12 智能支座布置图

各智能测力支座实时监测数据及历时数据如下图所示。

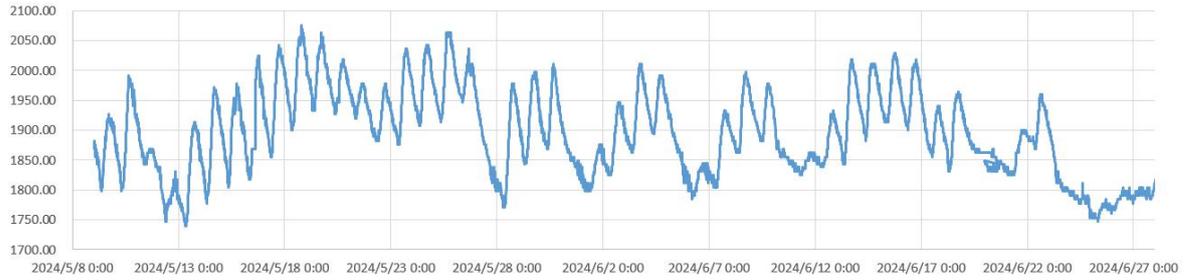


图 13 智能支座实时监测数据

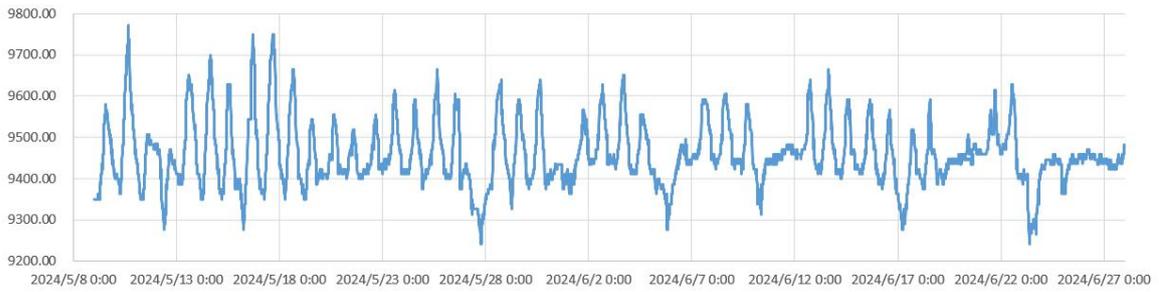
| 时间 | 温度 (°C) | LP43左 (KN) | LP43右 (KN) | P44左 (KN) | P44右 (KN) | LP45左 (KN) | LP45右 (KN) | LP46左 (KN) | LP46右 (KN) | RP43左 (KN) | RP43右 (KN) | RP44左 (KN) | RP44右 (KN) | RP45左 (KN) | RP45右 (KN) | RP46左 (KN) | RP46右 (KN) |
|----------------|---------|------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 2024/5/9 0:25 | 14 | 2037.00 | 1882.61 | 9349.97 | 7461.34 | 9569.89 | 7503.43 | 1943.57 | 1858.07 | 2039.54 | 1888.58 | 9347.38 | 7468.10 | 9571.24 | 7504.08 | 1938.13 | 1859.53 |
| 2024/5/9 0:35 | 14 | 2037.00 | 1882.61 | 9349.97 | 7461.34 | 9569.89 | 7503.43 | 1943.57 | 1858.07 | 2039.54 | 1888.58 | 9347.38 | 7468.10 | 9571.24 | 7504.08 | 1938.13 | 1859.53 |
| 2024/5/9 0:45 | 14 | 2037.00 | 1882.61 | 9349.97 | 7461.34 | 9569.89 | 7503.43 | 1943.57 | 1858.07 | 2039.54 | 1888.58 | 9347.38 | 7468.10 | 9571.24 | 7504.08 | 1938.13 | 1859.53 |
| 2024/5/9 0:55 | 14 | 2037.00 | 1882.61 | 9349.97 | 7461.34 | 9569.89 | 7503.43 | 1943.57 | 1858.07 | 2039.54 | 1888.58 | 9347.38 | 7468.10 | 9571.24 | 7504.08 | 1938.13 | 1859.53 |
| 2024/5/9 1:05 | 14 | 2021.87 | 1882.61 | 9349.97 | 7478.58 | 9550.11 | 7503.43 | 1940.36 | 1860.72 | 2024.52 | 1888.58 | 9347.38 | 7485.41 | 9551.50 | 7504.08 | 1934.92 | 1862.18 |
| 2024/5/9 1:15 | 14 | 2021.87 | 1889.24 | 9349.97 | 7494.74 | 9560.36 | 7503.43 | 1940.36 | 1862.78 | 2024.52 | 1874.97 | 9347.38 | 7501.63 | 9561.74 | 7504.08 | 1934.92 | 1862.18 |
| 2024/5/9 1:25 | 14 | 2021.87 | 1875.92 | 9349.97 | 7511.98 | 9539.85 | 7503.43 | 1940.36 | 1860.72 | 2024.52 | 1881.77 | 9347.38 | 7518.94 | 9541.27 | 7504.08 | 1934.92 | 1862.18 |
| 2024/5/9 1:35 | 14 | 2021.87 | 1875.92 | 9349.97 | 7511.98 | 9550.11 | 7503.43 | 1940.36 | 1860.72 | 2024.52 | 1881.77 | 9347.38 | 7518.94 | 9551.50 | 7504.08 | 1934.92 | 1862.18 |
| 2024/5/9 1:45 | 14 | 2015.82 | 1869.24 | 9349.97 | 7529.22 | 9539.85 | 7503.43 | 1949.98 | 1852.78 | 2018.51 | 1874.97 | 9347.38 | 7536.25 | 9541.27 | 7504.08 | 1944.56 | 1854.24 |
| 2024/5/9 1:55 | 14 | 2015.82 | 1862.56 | 9349.97 | 7529.22 | 9550.11 | 7503.43 | 1949.98 | 1852.78 | 2018.51 | 1868.17 | 9347.38 | 7536.25 | 9551.50 | 7504.08 | 1944.56 | 1854.24 |
| 2024/5/9 2:05 | 13 | 2015.82 | 1862.56 | 9349.97 | 7529.22 | 9550.11 | 7503.43 | 1949.98 | 1852.78 | 2018.51 | 1868.17 | 9347.38 | 7536.25 | 9551.50 | 7504.08 | 1944.56 | 1854.24 |
| 2024/5/9 2:15 | 13 | 2006.74 | 1855.88 | 9349.97 | 7529.22 | 9550.11 | 7503.43 | 1949.98 | 1860.72 | 2009.50 | 1861.36 | 9347.38 | 7536.25 | 9551.50 | 7504.08 | 1944.56 | 1862.18 |
| 2024/5/9 2:25 | 13 | 2006.74 | 1862.56 | 9349.97 | 7529.22 | 9560.36 | 7503.43 | 1949.98 | 1860.72 | 2009.50 | 1868.17 | 9347.38 | 7536.25 | 9561.74 | 7504.08 | 1944.56 | 1862.18 |
| 2024/5/9 2:35 | 13 | 2006.74 | 1862.56 | 9349.97 | 7544.30 | 9560.36 | 7503.43 | 1949.98 | 1860.72 | 2009.50 | 1868.17 | 9347.38 | 7551.40 | 9561.74 | 7504.08 | 1944.56 | 1862.18 |
| 2024/5/9 2:45 | 13 | 2006.74 | 1862.56 | 9349.97 | 7544.30 | 9560.36 | 7521.74 | 1949.98 | 1860.72 | 2009.50 | 1868.17 | 9347.38 | 7551.40 | 9561.74 | 7522.38 | 1944.56 | 1862.18 |
| 2024/5/9 2:55 | 13 | 1991.61 | 1869.24 | 9349.97 | 7544.30 | 9560.36 | 7521.74 | 1949.98 | 1860.72 | 1994.48 | 1874.97 | 9347.38 | 7551.40 | 9561.74 | 7522.38 | 1944.56 | 1862.18 |
| 2024/5/9 3:05 | 13 | 1991.61 | 1869.24 | 9349.97 | 7544.30 | 9560.36 | 7521.74 | 1949.98 | 1860.72 | 1994.48 | 1874.97 | 9347.38 | 7551.40 | 9561.74 | 7522.38 | 1944.56 | 1862.18 |
| 2024/5/9 3:15 | 13 | 1991.61 | 1855.88 | 9349.97 | 7544.30 | 9569.89 | 7521.74 | 1959.60 | 1866.00 | 1994.48 | 1861.36 | 9347.38 | 7551.40 | 9571.24 | 7522.38 | 1954.21 | 1867.47 |
| 2024/5/9 3:25 | 13 | 1991.61 | 1855.88 | 9349.97 | 7544.30 | 9559.63 | 7537.77 | 1959.60 | 1860.72 | 1994.48 | 1861.36 | 9347.38 | 7551.40 | 9561.74 | 7538.39 | 1954.21 | 1862.18 |
| 2024/5/9 3:35 | 13 | 1982.53 | 1862.56 | 9349.97 | 7560.46 | 9559.63 | 7520.60 | 1949.98 | 1866.00 | 1985.47 | 1868.17 | 9347.38 | 7567.63 | 9561.01 | 7521.23 | 1944.56 | 1867.47 |
| 2024/5/9 3:45 | 13 | 1991.61 | 1862.56 | 9349.97 | 7544.30 | 9559.63 | 7520.60 | 1949.98 | 1860.72 | 1994.48 | 1868.17 | 9347.38 | 7551.40 | 9561.01 | 7521.23 | 1944.56 | 1862.18 |
| 2024/5/9 3:55 | 13 | 1991.61 | 1842.51 | 9349.97 | 7560.46 | 9560.36 | 7537.77 | 1949.98 | 1860.72 | 1994.48 | 1847.76 | 9347.38 | 7567.63 | 9561.74 | 7538.39 | 1944.56 | 1862.18 |
| 2024/5/9 4:05 | 13 | 1982.53 | 1842.51 | 9349.97 | 7560.46 | 9560.36 | 7537.77 | 1949.98 | 1860.72 | 1985.47 | 1847.76 | 9347.38 | 7567.63 | 9561.74 | 7538.39 | 1944.56 | 1862.18 |
| 2024/5/9 4:15 | 13 | 1991.61 | 1849.20 | 9349.97 | 7544.30 | 9560.36 | 7537.77 | 1949.98 | 1860.72 | 1994.48 | 1854.56 | 9347.38 | 7551.40 | 9561.74 | 7538.39 | 1944.56 | 1862.18 |
| 2024/5/9 4:25 | 13 | 1991.61 | 1849.20 | 9349.97 | 7544.30 | 9560.36 | 7537.77 | 1949.98 | 1852.78 | 1994.48 | 1854.56 | 9347.38 | 7551.40 | 9561.74 | 7538.39 | 1944.56 | 1854.24 |
| 2024/5/9 4:35 | 13 | 1991.61 | 1849.20 | 9349.97 | 7544.30 | 9560.36 | 7554.94 | 1959.60 | 1858.07 | 1994.48 | 1854.56 | 9347.38 | 7551.40 | 9561.74 | 7555.55 | 1954.21 | 1859.53 |
| 2024/5/9 4:45 | 13 | 1991.61 | 1849.20 | 9349.97 | 7544.30 | 9560.36 | 7537.77 | 1949.98 | 1860.72 | 1994.48 | 1854.56 | 9347.38 | 7551.40 | 9561.74 | 7538.39 | 1954.21 | 1859.53 |
| 2024/5/9 4:55 | 13 | 1982.53 | 1855.88 | 9349.97 | 7544.30 | 9560.36 | 7556.09 | 1949.98 | 1852.78 | 1985.47 | 1861.36 | 9347.38 | 7551.40 | 9561.74 | 7556.69 | 1944.56 | 1854.24 |
| 2024/5/9 5:05 | 13 | 1982.53 | 1849.20 | 9362.11 | 7528.14 | 9560.36 | 7556.09 | 1949.98 | 1852.78 | 1985.47 | 1854.56 | 9359.54 | 7535.17 | 9561.74 | 7556.69 | 1944.56 | 1854.24 |
| 2024/5/9 5:15 | 13 | 1991.61 | 1849.20 | 9349.97 | 7528.14 | 9569.89 | 7556.09 | 1949.98 | 1852.78 | 1994.48 | 1854.56 | 9347.38 | 7535.17 | 9561.74 | 7556.69 | 1944.56 | 1854.24 |
| 2024/5/9 5:25 | 13 | 1991.61 | 1849.20 | 9349.97 | 7528.14 | 9559.63 | 7556.09 | 1949.98 | 1852.78 | 1994.48 | 1854.56 | 9347.38 | 7535.17 | 9561.01 | 7556.69 | 1944.56 | 1854.24 |
| 2024/5/9 5:35 | 13 | 1982.53 | 1842.51 | 9362.11 | 7528.14 | 9559.63 | 7556.09 | 1949.98 | 1847.76 | 1885.47 | 1847.76 | 9347.38 | 7535.17 | 9561.01 | 7556.69 | 1938.13 | 1846.30 |
| 2024/5/9 5:45 | 13 | 1982.53 | 1844.74 | 9362.11 | 7528.14 | 9569.89 | 7537.77 | 1933.95 | 1844.85 | 1985.47 | 1850.03 | 9359.54 | 7535.17 | 9571.24 | 7538.39 | 1928.49 | 1846.30 |
| 2024/5/9 8:45 | 17 | 1943.19 | 1804.65 | 9409.84 | 7611.10 | 9590.14 | 7696.89 | 1917.92 | 1860.72 | 1946.42 | 1809.21 | 9407.30 | 7618.48 | 9581.47 | 7697.39 | 1912.41 | 1862.18 |
| 2024/5/9 8:55 | 17 | 1943.19 | 1804.65 | 9409.84 | 7627.26 | 9580.14 | 7696.89 | 1924.33 | 1860.72 | 1946.42 | 1809.21 | 9407.30 | 7634.70 | 9581.47 | 7697.39 | 1918.84 | 1862.18 |
| 2024/5/9 9:05 | 19 | 1943.19 | 1804.65 | 9409.84 | 7644.50 | 9590.14 | 7696.89 | 1933.95 | 1860.72 | 1946.42 | 1809.21 | 9407.30 | 7652.01 | 9591.70 | 7697.39 | 1928.49 | 1862.18 |
| 2024/5/9 9:15 | 19 | 1943.19 | 1804.65 | 9421.98 | 7644.50 | 9590.14 | 7715.21 | 1933.95 | 1868.65 | 1946.42 | 1809.21 | 9419.46 | 7652.01 | 9591.70 | 7715.69 | 1928.49 | 1870.12 |
| 2024/5/9 9:25 | 19 | 1952.27 | 1804.65 | 9435.00 | 7644.50 | 9590.14 | 7715.21 | 1933.95 | 1868.65 | 1955.43 | 1809.21 | 9432.49 | 7652.01 | 9591.70 | 7715.69 | 1928.49 | 1870.12 |
| 2024/5/9 9:35 | 19 | 1952.27 | 1804.65 | 9421.98 | 7659.58 | 9590.14 | 7715.21 | 1943.57 | 1873.94 | 1955.43 | 1809.21 | 9419.46 | 7667.16 | 9591.70 | 7715.69 | 1938.13 | 1875.41 |
| 2024/5/9 9:45 | 19 | 1952.27 | 1804.65 | 9421.98 | 7659.58 | 9599.92 | 7733.53 | 1943.57 | 1873.94 | 1955.43 | 1809.21 | 9419.46 | 7667.16 | 9601.21 | 7733.99 | 1938.13 | 1875.41 |
| 2024/5/9 9:55 | 19 | 1952.27 | 1811.33 | 9421.98 | 7676.82 | 9590.14 | 7750.70 | 1949.98 | 1881.87 | 1955.43 | 1816.01 | 9419.46 | 7684.47 | 9591.70 | 7751.15 | 1944.56 | 1883.35 |
| 2024/5/9 10:05 | 21 | 1952.27 | 1811.33 | 9447.15 | 7676.82 | 9599.92 | 7750.70 | 1959.60 | 1873.94 | 1955.43 | 1816.01 | 9444.64 | 7684.47 | 9601.21 | 7751.15 | 1954.21 | 1875.41 |
| 2024/5/9 10:15 | 21 | 1952.27 | 1811.33 | 9447.15 | 7694.06 | 9599.92 | 7750.70 | 1966.01 | 1889.80 | 1955.43 | 1816.01 | 9444.64 | 7701.78 | 9601.21 | 7751.15 | 1960.64 | 1891.29 |
| 2024/5/9 10:25 | 21 | 1958.32 | 1818.01 | 9447.15 | 7710.22 | 9610.91 | 7786.19 | 1975.63 | 1897.73 | 1961.44 | 1822.81 | 9444.64 | 7718.01 | 9612.17 | 7786.60 | 1970.28 | 1899.23 |
| 2024/5/9 10:35 | 21 | 1967.40 | 1831.38 | 9447.15 | 7727.46 | 9621.16 | 7786.19 | 1985.25 | 1897.73 | 1970.45 | 1836.42 | 9444.64 | 7735.32 | 9622.40 | 7786.60 | 1979.92 | 1899.23 |
| 2024/5/9 10:45 | 21 | 1967.40 | 1831.38 | 9458.42 | 7727.46 | 9621.16 | 7786.19 | 1991.66 | 1897.73 | 1970.45 | 1836.42 | 9459.93 | 7735.32 | 9622.40 | 7786.60 | 1986.35 | 1899.23 |
| 2024/5/9 10:55 | 21 | 1973.45 | 1831.38 | 9458.42 | 7727.46 | 9630.69 | 7786.19 | 1991.66 | 1905.96 | 1976.46 | 1836.42 | 9459.93 | 7735.32 | 9622.40 | 7786.60 | 1986.35 | 1907.17 |
| 2024/5/9 11:05 | 22 | 1973.45 | 1838.06 | 9458.42 | 7744.70 | 9630.69 | 7786.19 | 1991.66 | 1910.95 | 1976.46 | 1843.22 | 9459.93 | 7752.63 | 9631.90 | 7786.60 | 1986.35 | 1912.46 |
| 2024/5/9 11:15 | 22 | 1973.45 | 1842.51 | 9519.16 | 7744.70 | 9640.94 | 7786.19 | 2007.69 | 1910.95 | 1976.46 | 1847.76 | 9516.73 | 7752.63 | 9642.14 | 7786.60 | 2002.43 | 1912.46 |
| 2024/5/9 11:25 | 22 | 1973.45 | 1842.51 | 9519.16 | 7760.86 | 9640.94 | 7786.19 | 2023.93 | 1910.95 | 1976.46 | 1847.76 | 9516.73 | 7768.85 | 9642.14 | 7786.60 | 2021.72 | 1912.46 |
| 2024/5/9 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |



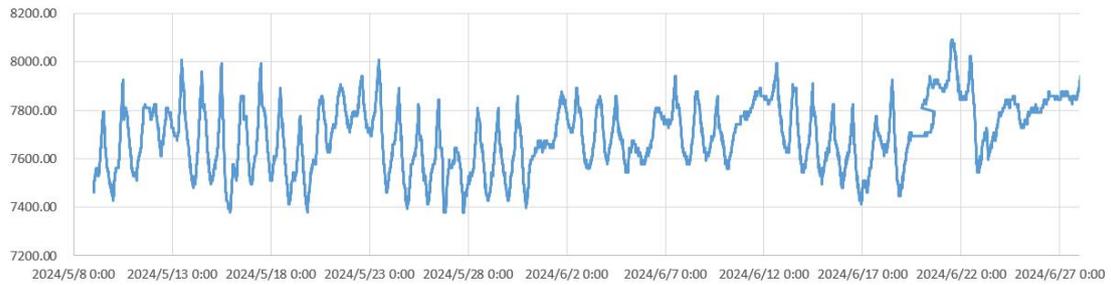
LP43 左支座历史监测数据



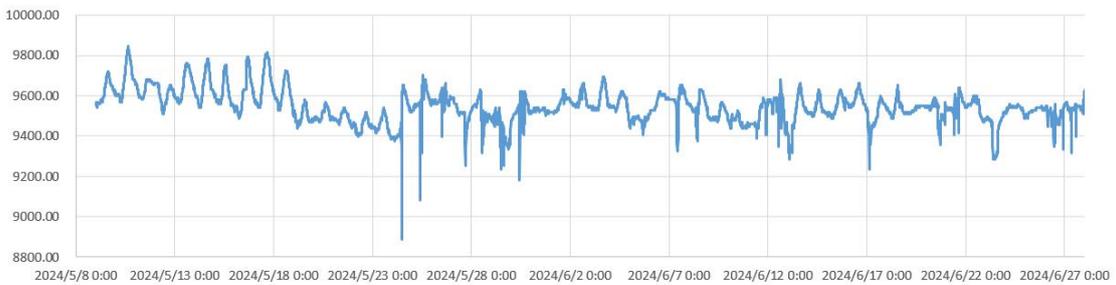
LP43 右支座历史监测数据



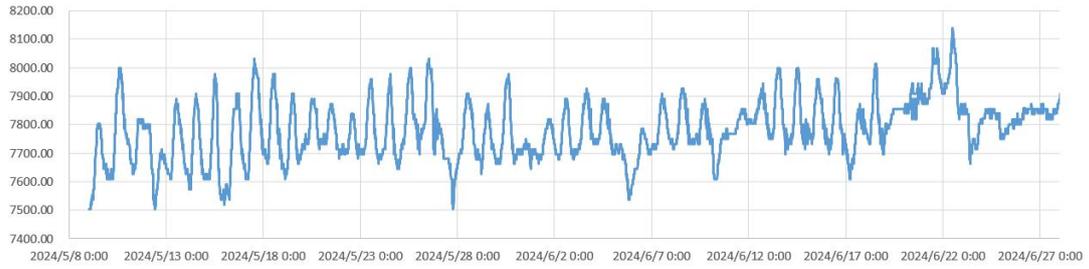
LP44 左支座历史监测数据



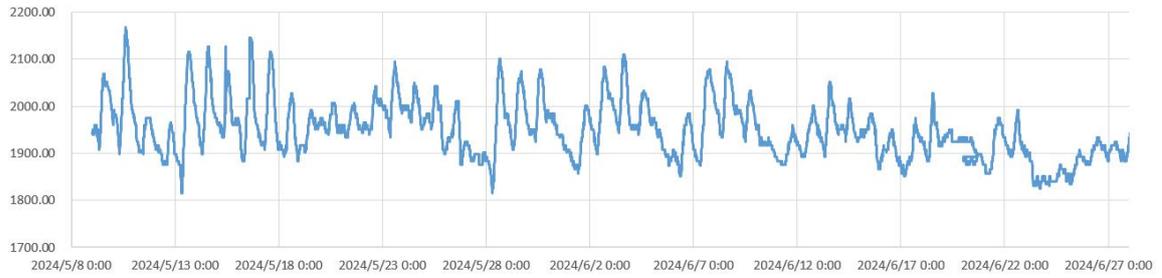
LP44 右支座历史监测数据



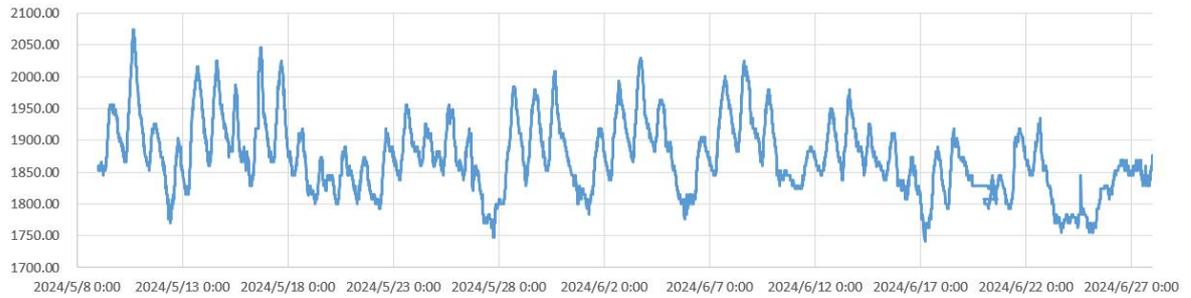
LP45 左支座历史监测数据



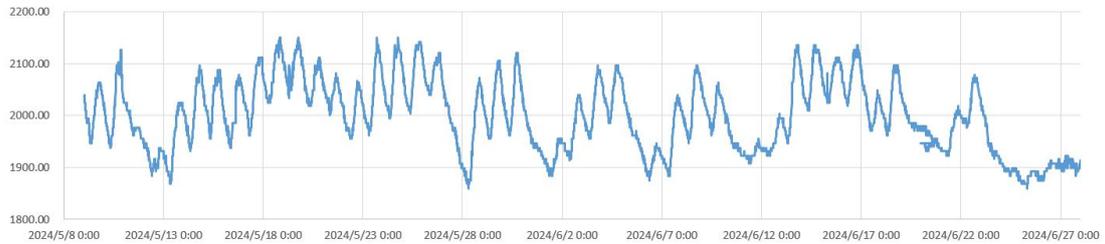
LP45 右支座历史监测数据



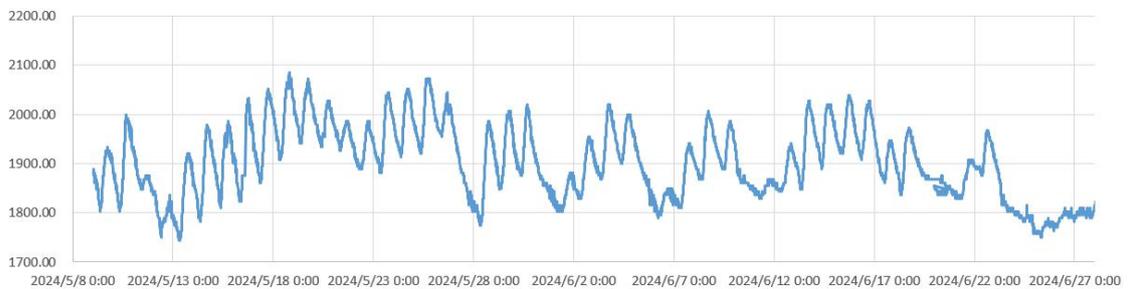
LP46 左支座历史监测数据



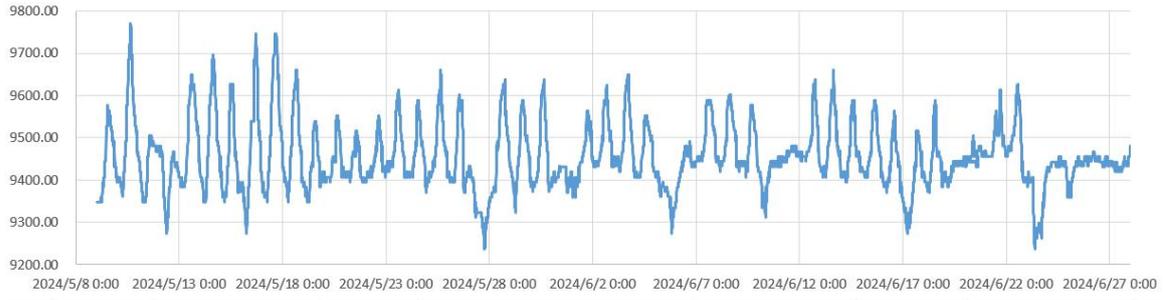
LP46 右支座历史监测数据



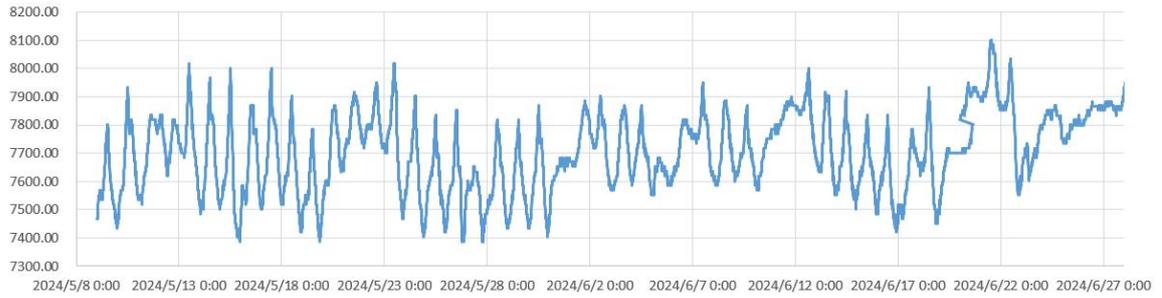
RP43 左支座历史监测数据



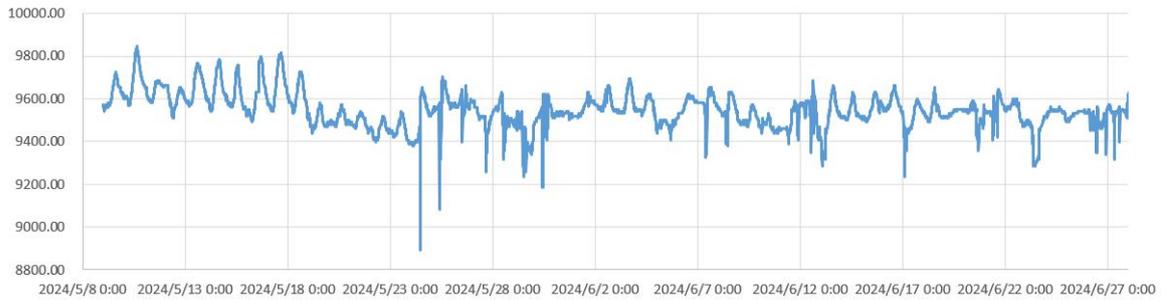
RP43 右支座历史监测数据



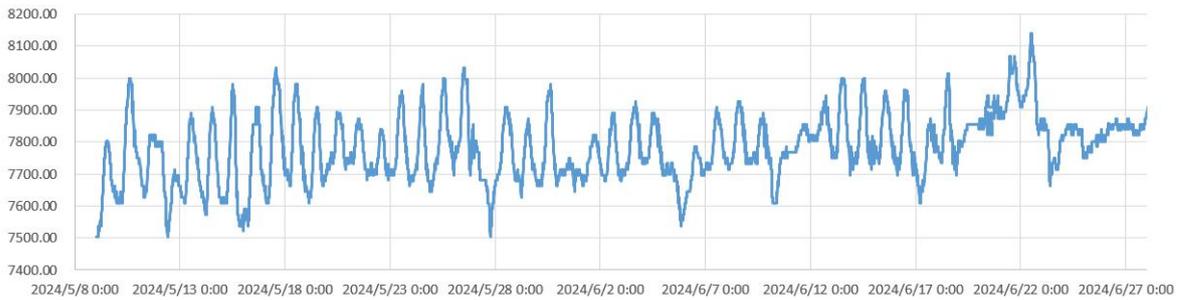
RP44 左支座历史监测数据



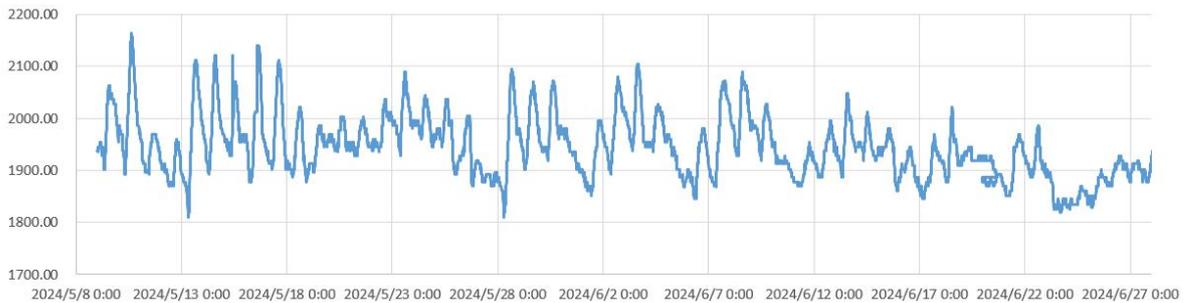
RP44 右支座历史监测数据



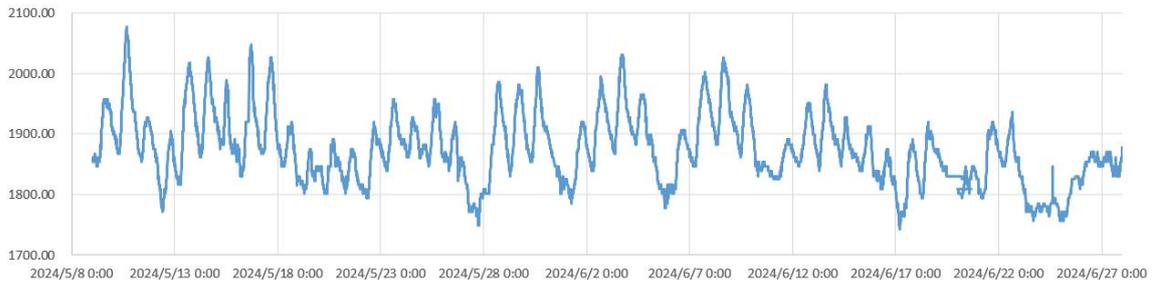
RP45 左支座历史监测数据



RP45 右支座历史监测数据



RP46 左支座历史监测数据



RP46 右支座历史监测数据

图 15 各支座历史数据

由实时监测与历史统计数据进行分析，可知：

1) 各支座受力正常，均处于设计承载力范围之内，监测期间未出现异常受力报警情况；

2) 监测期间，各支座反力均出现了较小范围的往复波动，综合分析，原因主要为：a 结构随气温变化时发生热胀冷缩而导致各支座反力会存在一定的波动；b 桥上人行、车辆移动荷载通行时导致各支座反力不均；

3) 为进一步更准确了解各支座反力响应机理，后期可结合支座位移、转角，桥上行车、行人监测等指标综合监测进一步综合分析确认。

七、不确定度评定

对路面磨耗仪进行了不确定度评定，见规范附录 A《桥梁智能测力支座不确定度评定示例》。

八、其他应予说明的事项

无。