

大跨曲线钢箱梁桥可调测力支座研究与应用

梁汇伟¹, 沈海洋², 王宇³, 潘可明¹, 郭明⁴, 王剑明⁵

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100082; 2. 深圳市交通公用设施建设中心, 广东 深圳 518000; 3. 北京首发公路养护工程有限公司, 北京市 102600; 4. 深圳市综合交通与市政工程设计研究总院有限公司, 广东 深圳 518000; 5. 济通智能装备股份有限公司, 四川 成都 611430)

摘要: 深圳市妈湾跨海通道工程金港大桥主桥采用65 m+90 m+65 m单箱双室变梁高曲线连续钢箱梁结构, 主梁位于平面半径为255 m的圆曲线、缓和曲线及直线上。金港大桥是典型的大跨曲线钢箱形梁结构, 具有复杂的空间结构特征, 为了解荷载作用下支座反力情况, 优化内力分配, 采用有限元计算软件MIDAS Civil进行分析, 并采用可调测力支座监测、调节支座反力, 以达到主梁受力较优的状态, 结果表明: 支座高度调节对结构反力的影响敏感, 可通过调节支座高度优化结构受力状态; 测力支座监测数据可有效反映结构的实际反力情况, 与计算结果差值小于10%; 可调测力智能支座在大跨曲线钢箱梁桥上的应用, 对其监测和运维工作有积极作用。

关键词: 大跨曲线连续钢箱梁; 有限元分析; 测力支座; 可调支座; 支座监测

中图分类号: U443.4; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)12-0115-06

Research and Application of Adjustable Force-Measuring Bearings for Long-Span Curved Steel Box Girder Bridges

LIANG Huiwei¹, SHEN Haiyang², WANG Yu³, PAN Keming¹, GUO Ming⁴, WANG Jianming⁵

(1. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China; 2. Shenzhen Transportation Public Facilities Construction Center, Shenzhen 518000, China; 3. Beijing Shoufa Highway Maintenance Engineering Co., Ltd., Beijing 102600, China; 4. Shenzhen General Institute of Comprehensive Transportation and Municipal Engineering Design & Research Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 5. Intelligent Engineering Connections Incorporated, Chengdu 611430, China)

Abstract: The main bridge of Jingang Bridge in the Shenzhen Mawan Cross-Sea Corridor Project is a 65 m+90 m+65 m single-box double-cell curved continuous steel box girder structure with variable girder depth. The main girder is located on a circular curve with a plane radius of 255 m, a transition curve and a straight line. The bridge is a typical long-span curved steel box girder structure with complex spatial structural characteristics. To understand the bearing reaction under load action, the internal force distribution is optimized. The finite element calculation software MIDAS Civil is used for analysis. Meanwhile, the adjustable load-measuring bearings are adopted to monitor and adjust the bearing reaction so as to achieve a better stress state of the main girder. The results show that the bearing height adjustment is sensitive to the influence of structural reaction, and the structural stress state can be optimized by adjusting the bearing height. The monitoring data of the load-measuring bearings can effectively reflect the actual structural reaction, and the difference from the calculation result is less than 10%. The application of adjustable load-measuring intelligent bearings in long-span curved steel box girder bridges plays a positive role in the monitoring, operation and maintenance work.

Keywords: long-span curved continuous steel box girder bridge; finite element analysis; force-measuring bearing; adjustable bearing; bearing monitoring

0 引言

曲线箱梁桥具有截面抗扭刚度大, 外形美观, 适应性强的结构优点, 被大量应用于我国公路和城市道路交通中, 特别是在线形复杂的立体交叉桥梁中被广泛采用。同时, 曲线箱梁桥具有十分明显的空间受力特性, 使得曲线梁桥的倾覆稳定问题突出,

收稿日期: 2025-11-24

作者简介: 梁汇伟(1979—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

通信作者: 潘可明(1971—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 专业副总工程师, 从事桥梁设计与科研工作。电子信箱: pankeming@163.com

加上超载车等非正常作用而导致发生支座脱空、侧向倾覆甚至坍塌的严重后果。2007年10月,三辆半挂重卡同侧列队行驶至包头市国道高架桥上时钢主梁突然倾覆,造成桥下铁路线中断。2009年7月津晋高速公路独柱墩匝道桥因三辆严重超载货车密集停靠在匝道桥外侧,导致桥梁发生倾覆事故。2011年2月,浙江省上虞市春晖立交匝道桥突然坍塌。2019年10月,江苏省无锡市锡山区312国道K135跨线桥处,两辆重型平板半挂车严重超载且行驶距离较近产生的偏心荷载导致桥梁支座承载系统失效,梁与墩柱之间的相对滑动和转动造成主梁滑移和倾覆。彭卫兵等^[1-3]在调查多座独柱墩梁桥倾覆破坏现场的基础上,提出桥梁倾覆的阶段以及可能的破坏模式主要有3种:变形体转动、自重和刚体转动,同时建立与倾覆模式相适应的计算方法。曹景等^[4]基于力学原理,推导了直线桥及曲线桥的抗倾覆稳定系数计算公式,得出随着半径逐步减小,曲线桥抗倾覆稳定系数逐步提高的结论。近年来,大批学者对曲线桥进行了深入研究,参考文献[5]~[8]通过系统分析,总结了影响弯梁桥稳定性的主要影响因素,提出了桥梁侧向稳固措施。钢箱梁因其自重小、强度高、施工快捷等优点成为热门桥型,但由于结构本身支座的压力储备不足,倾覆的风险更大。2021年12月,湖北省鄂州市境内沪渝高速公路花湖互通匝道桥曲线钢箱梁由于超载车违规行驶,导致发生侧翻较大事故,造成严重的伤亡事故。肖金军等^[9]通过理论计算与现场实际加载试验相结合,检验支座是否存在脱空问题。文献[10]~[12]基于大跨径钢箱梁进行验算,发现曲率、支座布置以及钢箱梁自重小是导致结构支座脱空以及结构倾覆的主要原因,提出了提高桥梁抗倾覆能力的相应措施。除了对主梁结构形式进行分析研究,支座作为联系桥梁上、下部结构的重要构件,其布置形式是曲线箱梁结构稳定的重要因素之一。文献[13]~[14]针对曲线箱梁桥复杂的空间力学特点,研究分析了制动力、离心力、预应力和地震力等作用对支座受力的影响,提出调整支座间距和预偏心等改善结构内力和支座反力分配的方法。

目前的研究主要侧重于曲线桥倾覆的破坏模式、阶段及原因分析,推导抗倾覆系数合理取值,以及采取支座预偏位、拉开支座间距和减少扭矩跨度的抗倾覆措施等方面。对于支座布置确定的情况下,采取主动调节支座高度,以达到较优的反力分配

的研究较少。本文依托深圳市妈湾跨海通道工程金港大桥作为研究背景背景,通过有限元分析,探究支座升降变化对反力分配的影响。并利用可调测力支座,通过支座自带的监测系统及调节系统使桥梁达到最优受力状态。研发一套利用新型可调测力智能支座系统,实现可测、可调且便捷可靠的主动调节曲线桥梁结构反力分配的新工艺。

1 工程概述

深圳市妈湾跨海通道工程线路全长8.05 km,地面道路为城市主干道,双向6车道,时速60 km/h。工程包含一座高架桥——金港大桥,其跨越大铲湾收费站和立交地面道路及地下隧道,主桥平面位于半径255 m的圆曲线、缓和曲线和直线组合线形上。采用单向、多向及固定球型钢支座组合体系,支座具有可调测力功能,并配以实时的监测系统,支座总体布置如图1所示。

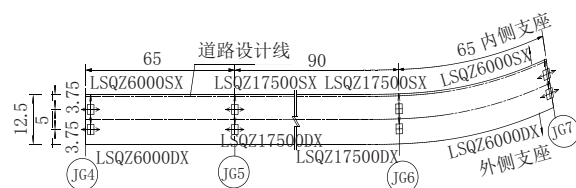


图1 支座布置图(单位:m)

主桥跨径组合为65 m+90 m+65 m,总长220 m,桥宽12.5 m,采用单箱双室变梁高连续钢箱梁结构,支点梁高4.36 m,跨中梁高2.76 m,梁底取二次抛物线变化,主梁横断面如图2所示。

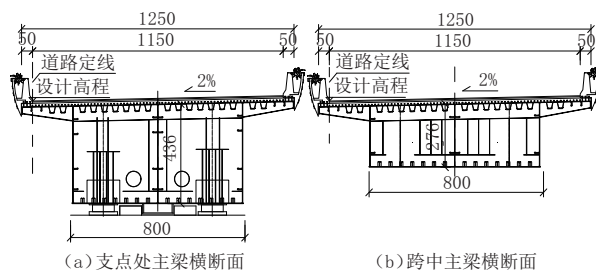


图2 主梁横断面图(单位:mm)

2 计算分析与监测

2.1 有限元模型

采用通用分析软件MIDAS Civil建立有限元梁单元模型,纵向单元长度为1 m。全桥主梁共244个单元,235个节点,支座采用弹性连接和边界节点约束模拟,有限元计算模型如图3所示。

2.2 荷载作用及抗倾覆计算

结构重要性系数取1.1;荷载标准为城—A级,按

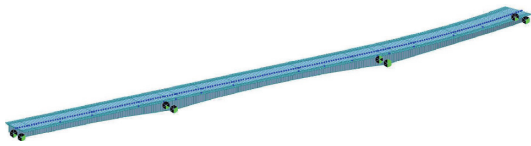


图3 有限元模型图

3 车道荷载布载;地基与基础不均沉降 10 mm;体系温度变化范围±30 ℃;温度梯度:竖向梯度 10 ℃/m,横向梯度 3 ℃/m^[15]。

为保证结构在持久状况作用下保持原结构体系,并应同时满足二个要求,第一是在作用基本组合下支座始终处于受压状态;第二是在标准组合下,主梁整体效应应符合公式(1)规定:

$$\frac{\sum S_{bk,i}}{\sum S_{sk,i}} \geq k_{qf} \tag{1}$$

式中: k_{qf} 为横向抗倾覆稳定性系数, $k_{qf}=2.5$; $S_{bk,i}$ 为使上部结构稳定的效应设计值; $S_{sk,i}$ 为使上部结构失稳的效应设计值^[16]。

2.3 反力分析

2.3.1 原反力计算结果

恒载作用下,位于曲线区域的JG7#内侧支座(支座位置见图1)反力为 947 kN,压力储备较小。当考虑最不利工况时,其反力最小值仅 136 kN,支座压力储备较小,冗余度不足;结构抗倾覆系数 $K=6.2$,满足规范要求,原反力结果见表 1。

表1 计算反力对比表

单位:kN

项目	支座	JG4#	JG5#	JG6#	JG7#
恒载	左	2 069	9 243	10 003	947
	右	2 069	9 262	8 511	3 221
恒+活	左	4 291	12 833	17 683	136
	右	4 691	14 860	10 676	4 032

2.3.2 调节反力

为了解曲线桥梁反力值与支座升降关系,增加支座压力储备,通过多方案试算以求最佳反力组合。

(1)支座调节方案考虑采用依次对每个墩柱的外侧支座下降 10 mm,内侧支座上升 10 mm,调节依次如下:方案 A:JG6#外支座(指曲线外侧,下文同)降 10 mm,内支座(指曲线内侧,下文同)升 10 mm;方案 B:方案 A+JG7#外支座降 10 mm,内支座升 10 mm;方案 C:方案 B+JG5#外支座降 10 mm,内支座升 10 mm;方案 D:方案 C+JG4#外支座降 10 mm,内支座升 10 mm。计算表明,JG6#墩内支座反力明显增大,外支座反力明显减小,相邻墩柱内侧反而变小,外侧数值变大,远端的直线段墩柱支座反力变化较小,体现

了箱梁整体抗扭刚度较大,支座反力对比情况如表 2 及图 4 所示。

表2 计算反力对比表

单位:kN

项目	支座	JG4#	JG5#	JG6#	JG7#
成桥	左	2 069	9 243	10 003	947
	右	2 069	9 262	8 511	3 221
方案 A	左	2 129	7 153	14 648	839
	右	2 028	11 278	4 019	4 909
方案 B	左	2 132	7 143	12 205	1 597
	右	2 031	11 265	6 450	2 500
方案 C	左	327	11 745	10 152	1 597
	右	4 490	6 666	8 504	2 498
方案 D	左	1 525	12 985	10 115	1 597
	右	5 677	5 447	8 527	2 501

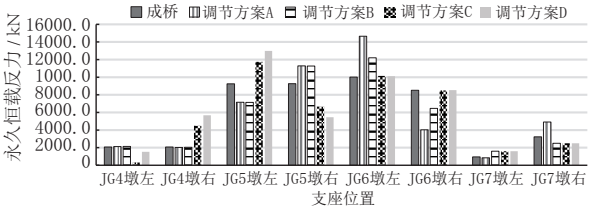


图4 方案A-D永久支座恒载反力对比图

(2)支座调节方案考虑采用依次对每个墩柱的外侧支座上升 10 mm,内侧支座下降 10 mm,调节依次如下:方案 K:JG6#外支座升 10 mm,内支座降 10 mm;方案 L:方案 A+JG7#外支座升 10 mm,内支座降 10 mm;方案 M:方案 B+JG5#外支座升 10 mm,内支座降 10 mm;方案 N:方案 C+JG4#外支座升 10 mm,内支座降 10 mm。计算结果与方案(1)相反,支座反力对比情况如表 3 及图 5 所示。

表3 计算反力对比表

单位:kN

项目	支座	JG4#	JG5#	JG6#	JG7#
成桥	左	2 069	9 243	10 003	947
	右	2 069	9 262	8 511	3 221
方案 K	左	2 008	11 333	5 359	4 133
	右	2 109	7 246	13 003	132
方案 L	左	2 005	11 344	7 802	1 697
	右	2 106	7 258	10 571	2 541
方案 M	左	4 464	6 742	9 855	1 697
	右	353	11 858	8 518	2 543
方案 N	左	5 663	5 502	9 892	1 697
	右	1 540	13 077	8 494	2 540

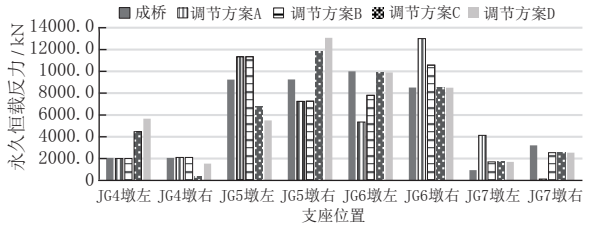


图5 方案A-D永久支座恒载反力对比图 单位:kN

(3)经反复试算,支座调节方案:JG7#墩外支座降3 mm,内支座升3 mm,端支座内力分配较佳,恒载作用下内侧支座压力值为1 684 kN,增加1.77倍,其余支座反力分配也较均匀。考虑最不利工况反力最小值873 kN,支座压力储备及冗余度满足;支座反力对比情况如表4及图6所示。

表4 计算反力对比表					
单位:kN					
项目	支座	JG4#	JG5#	JG6#	JG7#
成桥	左	2 069	9 243	10 003	947
	右	2 069	9 262	8 511	3 221
推荐方案	左	2 072	9 233	7 561	1 684
	右	2 072	9 250	10 923	2 511

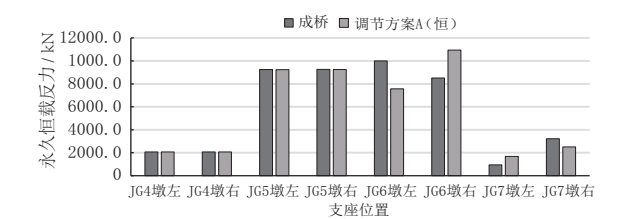


图6 方案A永久支座恒载反力对比图 单位:kN

由计算结果可得,调节前曲线段的墩柱内、外侧支座反力差异较大,特别是梁端支座差异最大,在活载作用下压力储备小,设计冗余度低。通过支座调节可改善支座的内力分配,推荐大桩号JG7#墩外支座降3 mm、内支座升3 mm方案。

3 支座体系及构造设计

3.1 支座选型及构造

随着我国桥梁事业不断发展,桥梁附属关键产品——桥梁支座也向高质量、多元化、高集合度及国产化发展。支座的开发基本涵盖了桥梁结构所需的各种功能,如阻尼抗震支座、拉索抗震支座、耐久球形钢支座、补充硅脂耐久性球形钢支座、快修防落梁球形支座、健康监测支座、三向测力智慧支座、可调节测力智能支座等等。其中可调节测力支座可实时掌握结构的支承状态,还可以弥补因结构体系、施工控制不力、运营期不均匀沉降等因素导致的不均衡受力,是提升桥梁安全服役的重要保障。张恺等^[17]通过将应变式测力传感器与支座内部的传力机构相结合,形成测力单元组件,设计出了一种新型的测力拉压支座,并对其测力性能进行了试验研究;丁玉平等^[18]基于压电陶瓷传感器设计了一种测力支座,并对其测力精度进行了试验验证。在支座调高技术方面,文献^{[19]~[23]}主要介绍了垫板调高、楔形块构造调高、螺纹调高、填充注射式调高等应用较成熟的

技术。在支座监测系统方面,王晨^[24]使用LabVIEW开发语言,开发基于TV1600解调仪的软件系统用于球型测力支座监测系统。

金港大桥主桥为大跨曲线钢箱梁结构,通过第2小节的分析论述,曲线段边墩端支座压力储备较小,可通过支点升降调节优化反力和主梁内力分配。同时,桥梁运营期主要承担繁忙的码头货运交通运输,经综合比较,主桥选取具有监测功能的可调测力减震球形钢支座可有效提高结构抗倾覆风险能力,减少后期运维对现状交通的干扰。支座构造如图7所示,主要由测力调高装置和常规拉索减震支座两部分通过联结螺栓固连为一体。再结合采集模块、无线传输模块、及分析预警模块共同形成支座反力监测、预警与调节控制系统。测力调高装置由上顶板、斜面滑板、中间楔形板、平面滑板、荷载传感器、上座板等构成。装置上顶板内表面设有镜面不锈钢板,与斜面滑板形成斜面摩擦副;上座板的上表面设有平面镜面不锈钢板,与平面滑板形成平面摩擦副,斜面滑板和平面滑板均采用改性聚四氟乙烯滑板,斜面摩擦副和平面摩擦副的摩擦系数通过试验确定。中间楔形板为左右对称布置于装置内,楔形板梁端侧边均设有托板,当需要对支座高度进行调节或进行传感器元件更换时,仅需将千斤顶安装于中间楔形板侧边托板内,通过两对称楔形板侧边的托板自成反力系统,实现两楔形板水平间距的调节,进而促使支座高度发生改变。

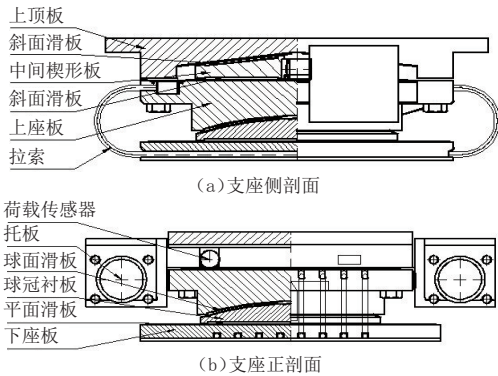


图7 测力调高拉索减震支座结构构造

3.2 工作原理

3.2.1 调节原理

如图8所示,当支座高度进行调节时,将设定的千斤顶装入一楔形板侧边的托板上,千斤顶的另一端作用于同一侧相对称的另一楔形板侧边托板上,其自成反力系统。通过泵站控制千斤顶的输出动力与行程即可调节两中间楔形板的水平间距,由此转

换为支座高度相应改变。

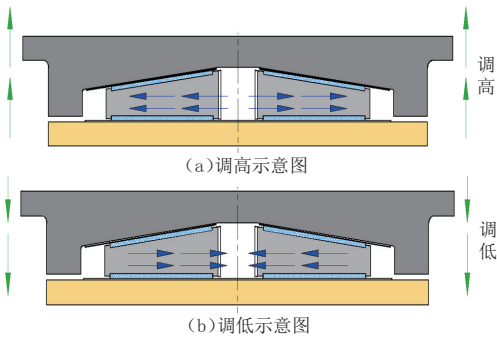


图 8 装置高度调节示意图

3.2.2 测力原理

测力调高装置内两对称楔形板之间布置有 2 个水平放置的荷载传感器,装置受力如图 9 所示,当支座承受竖向反力 F_v 时,会促使两中间楔形板相向挤压中间的荷载传感器,通过采集模块采集两荷载传感器的合力 F_H ,并结合力学平衡关系可获得支座竖向向力监测值,见式(2)。

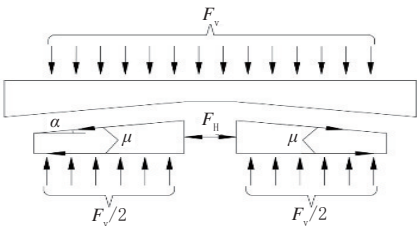


图 9 装置受力示意图

$$F_v = \frac{2(1 + \mu \tan \theta)}{\tan \theta - 2\mu - \mu^2 \tan \theta} F_H \quad (2)$$

式中: μ 为装置内摩擦副的摩擦系数, θ 为中间楔形板上斜面坡度。

3.2.3 试验设计

限于篇幅,本文仅列出支座反力监测性能的相关研究。以本项目实际所用的 XIQZ (LS) 17500DX 进行试验,支座的竖向承载力设计值为 17 500 kN,水平向设计位移为 ± 200 mm,设计最大转角为 0.02 rad,支座测力调节装置内中间楔形板上斜面的坡度为 1/8,摩擦系数通过试验确定为 $\mu=0.011$ 。

支座测力量程为 $0.2 P \sim 1.2 P$ (P 为支座竖向设计承载力),设计全量程误差为 $\leq 3\%$;两楔形板之间并联布置 2 个量程范围为 $0 \sim 100$ t 的柱式力传感器,传感器参数为:灵敏度 $(2.0 \pm 10\%)$ mV/V,非线性为 0.2% FS,重复性为 0.1% FS (FS 为全量程)。通过已知参数拟合的支座竖向力与传感器水平力的关系如式(3)所示。

$$F_v = 20.239 F_H \quad (3)$$

试验在 FTS30 000 kN 静动态压剪试验机上进

行,如图 9 所示,试验机竖向加载力量程为 $0 \sim 30\,000$ kN,水平加载力量程为 $0 \sim 3\,000$ kN。由试验结果可知,竖向压力、竖向压力 +0.02 rad 转角与竖向压力 +1 500 kN 水平力 3 种工况下,通过采集水平荷载传感器的力值,并通过拟合公式(3)计算得到支座竖向反力的测量值与试验机加载力值高度重合。3 种工况下的全量程误差最大值分别为:1.49%,1.78%, -1.13% ,均小于 3%,满足设计要求。结果表明,即使支座发生设计竖向转角,或承受设定水平力时,其对支座测力性能的影响均极小,未呈现出明显变化规律。因此,采用仅考虑竖向压力下的测力拟合公式获得的支座反力监测值可达到理想的精度。

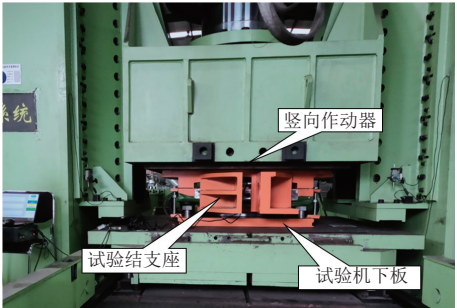


图 9 试验设备与布置

3.3 监测数据

为更好地监测本桥支座反力,建立了桥梁支座监测智慧平台 ThingsBoard (见图 10),频率可以达到每 10 s 测定一次。系统提供预警功能并分析支座的工作状态,为桥梁的运营安全提供保障。



图 10 监测平台图

通过监控数据的采集结果与理论计算进行对比,监测支座最大数值为标准组合 92%,承载力组合的 67%,结果满足设计要求,见表 5。

支座体系及功能示意如图 11 所示。

4 结 语

深圳妈湾跨海通道工程为国内在建的最大直径盾构跨海隧道工程,包含海域工程和陆域工程两部分,金港大桥为该工程陆域地下、地上组合立交的一

表5 计算反力对比表

墩号	支座	实时值最大/kN	实时/标准组合	实时/基本组合	实时值1/kN	实时值2/kN
JG4	左	3 433	76%	55%	3 278	3 433
	右	2 590	58%	41%	2 578	2 590
JG5	左	11 632	84%	61%	10 603	11 633
	右	12 740	92%	67%	12 740	12 716
JG6	左	12 974	85%	63%	12 699	12 974
	右	10 816	82%	60%	10 816	10 578
JG7	左	2 168	59%	42%	2 154	2 168
	右	4 156	77%	56%	4 156	4 033

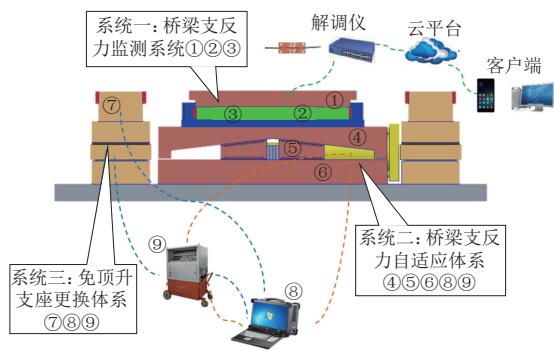


图11 支座体系及功能示意图

部分,其主桥为65 m+90 m+65 m大跨度曲线钢箱梁桥,大桥2024年12月通车至今运营状态良好。

(1)大跨曲线钢箱梁桥空间效应明显,对支座反力及主梁内力影响较大,曲线内侧端支座反力储备较小。支座高度调节对结构反力的影响敏感,可通过调节支座高度优化结构受力状态;

(2)通过调节支座高度模拟分析,提出最优支座调节方案,优化主梁内力,均衡支座受力,提供结构安全储备;

(3)采用集成度较高的可调测力支座,能提供原位校准、调节功能及智能测力功能,减少运营期对交通的干扰及运维成本,实现全寿命、智慧化的智能支座监测功能,具有良好的社会效益。

参考文献:

[1] 彭卫兵,潘若丹,马俊,等.独柱墩梁桥倾覆破坏模式与计算方法研究[J].桥梁建设,2016,46(2):25-30.
[2] 彭卫兵,徐文涛,陈光军,等.独柱墩梁桥抗倾覆承载力计算方法[J].中国公路学报,2015,28(3):66-72.

[3] 彭卫兵,程波,史贤豪,等.独柱墩梁桥倾覆破坏机理研究[J].自然灾害学报,2014,23(5):98-106.
[4] 曹景,刘志才,冯希训.箱形截面直线桥及曲线桥抗倾覆稳定性分析[J].桥梁建设,2014,44(3):69-74.
[5] 吴玉华,蔡若红,杨育人.独柱墩连续梁桥的稳定影响因素分析[J].公路工程,2011,36(6):93-96;106.
[6] 邢世玲,张佳,朱利明.独柱混凝土曲线连续梁桥抗倾覆稳定性研究[J].世界桥梁,2017,45(5):33-37.
[7] 程波.曲线独柱墩梁桥抗倾覆承载力计算理论研究[D].杭州:浙江工业大学,2016.
[8] 王锦程.独柱式曲线梁桥的稳定性分析[D].天津:河北工业大学,2014.
[9] 肖金军,鄢谷生.曲线钢箱梁-曲线钢箱梁桥支座最不利反力分析与试验研究[J].中外公路,2012,32(3):151-154.
[10] 凌冬.大跨径钢箱梁桥抗倾覆稳定性分析[J].西部交通科技,2024(3):190-192.
[11] 孙全胜,张清晨,张双.曲线钢箱梁支座反力分析和脱空控制[J].世界桥梁,2012,40(2):29-33.
[12] 刘冰.斜弯钢箱梁桥支反力计算的影响因素分析[J].科技创新与应用,2015(20):99-102.
[13] 周绪红,戴鹏,狄谨,等.曲线箱梁桥空间预应力效应分析[J].土木工程学报,2007,40(3):63-68.
[14] 李广慧,袁波.不同支承体系曲线梁桥的受力性能研究[J].郑州大学学报,2013,34(6):67-71.
[15] BS 5400 - 2: 2006, Steel, concrete and composite bridges, Specification for loads[S].
[16] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
[17] 张恺,王冰,魏巍巍,等.一种新型测力拉压支座的设计与测力试验研究[J].公路,2024,69(5):202-206.
[18] 丁玉平,李攀,韩鹏.可调高拉压智能支座设计与应用[J].城市道桥与防洪,2017(7):271-272.
[19] 郎海峰.调高技术在桥梁改扩建工程中的应用[J].交通世界,2016(增刊2):130-131.
[20] 曾永平,杨国静,刘海亮.铁路球型调高支座的设计与试验研究[J].高速铁路技术,2019,10(1):64-67.
[21] 罗辉,何忠宇,银晓东,等.沉陷区大行程可调高支座性能[J].土木工程与管理学报,2020,37(2):20-26.
[22] 叶圣平,田山坡,李黎,等.可调高与减隔震支座在工程中的应用研究[J].中外公路,2016,36(2):156-160.
[23] 夏俊勇,卢瑞林,胡宇新,等.注射式调高球型支座试验的设计与研究[J].铁道建筑,2012(7):30-33.
[24] 王晨.桥梁球型测力支座及其监测系统[D].石家庄:石家庄铁道大学,2024.