

基于局部加载试验的某桥梁病害 成因分析及工作性能评估

严松, 田甜, 张国刚

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南长沙410200)

摘要: 某大跨连续刚构桥梁采用钢筋混凝土桥面铺装, 近年来频繁出现桥面铺装破损、箱梁顶板开裂等病害, 并呈逐渐发展趋势, 严重影响桥梁正常运行。为调查病害成因, 有针对性地开展了箱梁顶板局部加载试验, 建立了箱梁节段实体有限元模型对试验工况进行模拟, 试验结果表明: 在车轮荷载作用下, 测试区箱梁顶板的挠度、应变实测值均大于理论计算值, 校验系数在1.04~1.26之间, 说明桥面铺装协同箱梁顶板受力状况较差。为进一步掌握桥梁整体工作性能和运营状态, 开展了结构整体静载试验和动力特性测试, 结果表明: 静载挠度、应变和相对残余值均处于规范允许范围, 结构前三阶竖向自振频率大于理论计算值, 表明桥梁结构的整体刚度和受力状态较好。最后, 基于试验结果及病害机理分析对桥梁的维修处治提出了合理建议。采用局部加载试验评估箱梁顶板和桥面铺装的工作状态, 可为类似养护项目提供参考借鉴。

关键词: 混凝土箱梁; 病害分析; 局部加载试验; 性能评估

中图分类号: U446.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)03-0181-09

Analysis of Distress Mechanism and Structural Performance Evaluation of a In-service Bridge Based on Local Loading Test

YAN Song, TIAN Tian, ZHANG Guogang

(Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan 410200, China)

Abstract: A long-span continuous rigid-frame bridge with reinforced concrete deck pavement has exhibited frequent distresses including pavement deterioration and box girder top slab cracking in recent years, showing a progressive deterioration trend that significantly affects normal bridge operation. To investigate the causation mechanisms, local loading tests on the top slab of box-girder were conducted. A solid finite element model of the box-girder segment was established to simulate test conditions. Experimental results revealed that under wheel loading, the measured deflections and strains exceeded calculated values, with verification coefficients ranging from 1.04 to 1.26, indicating poor collaborative mechanical performance between deck pavement and the top slab. To further assess the global structural behavior and operational status, full-scale static load tests and dynamic characteristic evaluations were implemented. Findings demonstrated that static load-induced deflections, strains, and relative residual values all complied with code requirements. The first three vertical natural vibration frequencies exceeded theoretical predictions, confirming satisfactory global stiffness and mechanical performance of the bridge structure. Based on experimental results and distress mechanism analysis, rational maintenance recommendations were proposed. This study demonstrates the effectiveness of local loading tests in evaluating the conditions of op slab of box girder and deck pavement, providing valuable references for similar maintenance projects.

Keywords: concrete box girder; distress analysis; local loading test; performance evaluation

作为基础设施的核心,桥梁是交通系统的咽喉要道和生命线枢纽。当前,我国桥梁工程在建设规模与技术水平上已居世界前列^[1-2],未来仍将持续高速发展。然而,在聚焦新建桥梁的同时,也应重视既有桥梁的运维管理。既有桥梁因交通负荷激增、材料老化等因素,普遍存在病害与安全隐忧^[3]。近年来国内外多起桥梁事故,不仅暴露了结构安全与耐久性的严峻挑战,更推动了人们对桥梁预防性养护^[4-6]与科学检测的深入研究^[7-8]。

桥梁定期检测是桥梁外观病害调查的一般性检查方法,它可初步判定桥梁的工作状况,却难以识别结构内部损伤及承载力退化,而荷载试验作为其重要补充手段,通过现场加载与动态响应测试,可精准捕捉隐蔽病害并量化安全参数。近年来,荷载试验技术呈现多元化发展趋势:在基础方法层面,代建波等^[9]通过静动载试验联合有限元建模验证人行玻璃索桥安全性能,关孝文等^[10]基于行车激励法探索桥梁自振特性测试的可行性;在智能识别领域,He等^[11]提出基于车辆响应的桥梁柔度矩阵识别方法,Liang等^[12]开发了小波包能量变异率(WPEVCR)与希尔伯特-黄变换(HHT)的双指标桥梁损伤评估体系,Casas等^[13]聚焦徐变、腐蚀及循环荷载等多因素耦合作用下的长期性能退化问题,构建了抗环境干扰的振动损伤识别框架;在高效检测方向,Xiao等^[14]通过横向荷载分布试验和单梁破坏性试验评估既有空心板梁桥的实际刚度及损伤分布,郑旭等^[15]提出基

于单辆重车移动加载的快速荷载试验与影响线虚拟加载相结合的承载能力评定方法,构建了由快速荷载试验设计、桥梁影响线识别和承载能力虚拟检算三者组成的符合中国规范的评定流程。上述研究不仅拓展了荷载试验的工程适用性,更为复杂服役环境下桥梁性能评估提供了理论支撑与技术范式。

本文以某高速公路桥梁为工程背景,通过箱梁顶板局部加载试验以及结构整体静载试验和结构动力特性测试,对比实测值和有限元分析结果,揭示相关病害产生的内在原因,评估结构整体工作性能,以期为后续桥梁加固设计提供依据。

1 桥梁概况及试验背景

本桥为高速公路某特大桥主桥,跨越湘江航道,设计荷载等级为汽-超 20、挂-120。主桥跨径布置为 $(54 + 3 \times 98 + 54) \text{ m} = 402 \text{ m}$,上部结构为悬浇变截面连续箱梁,单箱单室三向预应力混凝土结构。箱梁中支点处梁高 5.5 m,跨中合拢段梁高 2.8 m,其余位置梁高按二次抛物线规律变化;箱梁顶板全宽 15.0 m,顶板厚 25 cm,翼缘板宽 4.0 m;箱梁底板宽 7.0 m,底板厚 30 cm~60 cm;腹板厚 40 cm~60 cm。下部结构主墩为矩形截面薄壁墩,墩梁固结;边墩为圆形截面框架墩,盖梁上设盆式橡胶支座;基础为钻孔灌注桩基础。桥面铺装为 12 cm 厚钢筋混凝土桥面铺装。桥梁总体布置和箱梁典型断面分别见图 1 和图 2 所示。

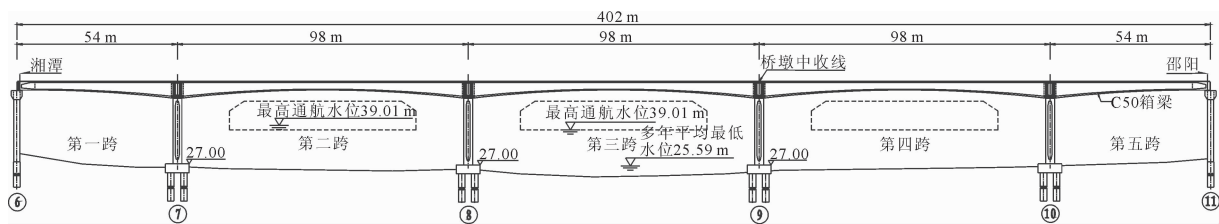
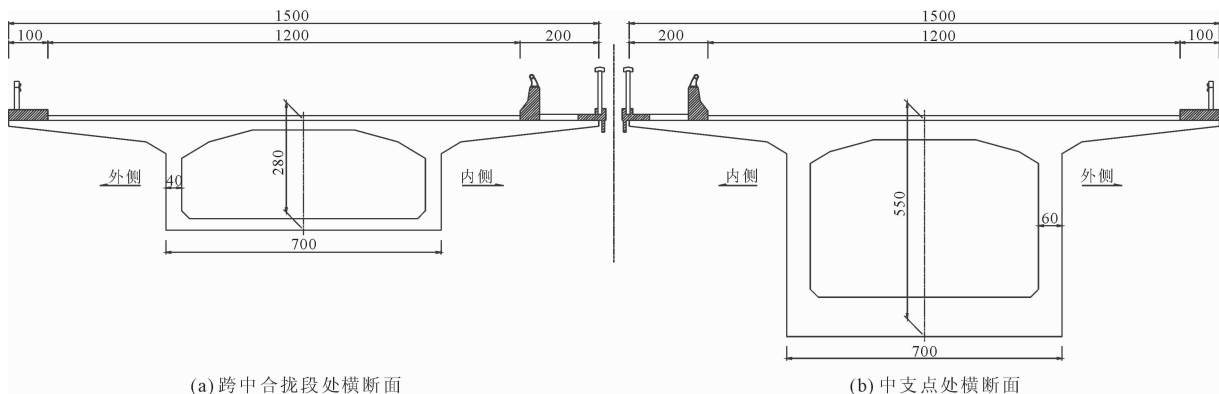


图 1 主桥总体布置图(单位:m)



(a) 跨中合拢段处横断面

(b) 中支点处横断面

图 2 主桥箱梁典型横断面图(单位:cm)

大桥于2002年建成通车,运营至今已有20余年,近年来频繁观察到病害和异常情况的发生,混凝土桥面铺装破损如图3所示,箱梁顶板开裂如图4所示,重车通行时结构振动明显、振幅大。所带来的危害主要有如下几方面:①桥面铺装大面积的破损、坑槽直接影响桥面观感及桥上行车舒适性、安全性,甚至引发车辆失控、翻车等事故;②破损后的桥面铺装不再参与截面受力,会削弱结构的抗弯承载能力;③长期桥面跳车所产生的冲击效应和振动会加速桥梁疲劳损伤;④桥面铺装破损、箱梁顶板开裂导致箱内长期积水,对梁体的耐久性产生不利影响。本桥是高速公路桥梁,交通流量大,多次、反复的维修施工以及交通组织维护,严重降低了桥梁的运营服务水平,也造成了人力资源的浪费和养护经费的额外支出。为查明病害产生的根本原因,同时把握大桥当前的运营状态和承载能力,开展了本次专项检测试验。



图3 混凝土桥面铺装破损

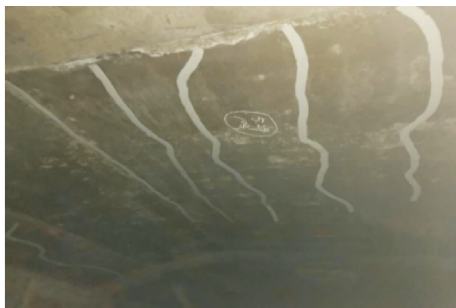


图4 箱梁内部顶板开裂

2 箱梁顶板局部加载试验

基于桥面铺装破损和箱梁顶板开裂的病害特征,初步分析是由于混凝土桥面铺装未能很好地参与箱梁顶板受力,二者未达到设计所要求的整体受力所导致。为验证上述推理是否正确,制定箱梁顶板局部加载试验的测试方案,以竖向荷载作用下结构的变形(应变)为表征,通过与理论值进行对比,反映桥面铺装和箱梁顶板的共同受力工作情况。

2.1 箱梁节段实体模型

建立箱梁节段的三维实体有限元模型,根据圣维南原理并通过试算,将主跨跨中合拢段及两侧各1个悬浇梁段作为分析对象,可满足控制截面挠度和应力分析的精度需要。箱梁节段共划分为49 840个单元,63 960个节点,如图5所示,混凝土和预应力钢束分别采用六边形实体单元和钢筋单元模拟,钢筋单元自动嵌入到混凝土实体单元内部,梁段两侧端面采用主从约束与形心处节点耦合,在形心处节点施加位移边界。混凝土为C50混凝土,弹性模量 $E_c = 3.45 \times 10^5$ MPa,顶板横向预应力钢绞线采用 $\Phi_s 15.2$ 抗拉标准强度 $f_t = 1860$ MPa的高强低松弛钢绞线,弹性模量 $E_t = 1.95 \times 10^6$ MPa。

试验车辆根据箱梁顶板受力最不利原则进行布置,横桥向对称布置两辆车,横向间距为1.3 m,只考虑中轴和后轴的荷载效应。根据《公路桥涵设计通用规范》^[16]所给定的车辆荷载主要技术指标,中、后轴距1.4 m,轮距1.8 m,重力标准值为140 kN,箱梁顶板局部加载冲击系数 $\mu = 0.3$,车轮着地面积为0.2 m(长度)×0.6 m(宽度)。有限元模型中,车轮荷载采用面荷载的方式施加,模型中施加的单轮等效面荷载为 $70 \text{ kN}/(0.2 \times 0.6) \text{ m}^2 \times 1.3 = 758.3 \text{ kN/m}^2$ 。

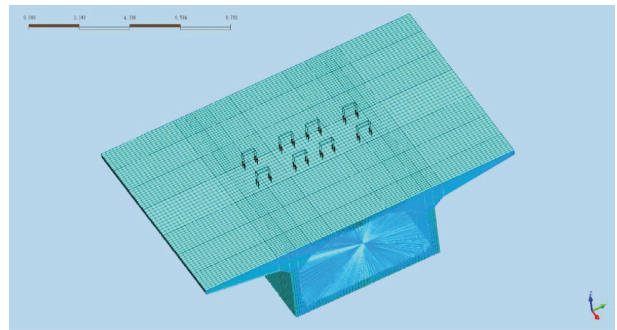


图5 箱梁节段实体有限元模型

2.2 有限元分析结果

主桥箱梁顶板在局部加载工况下的竖向变形如图6所示,桥跨中心线处纵向和横向应变分布云图如图7所示,由图中计算结果可见,在试验车辆荷载作用下:(1)箱梁顶板底面最大变形位于跨中,最大竖向变形值为 -0.41 mm ;(2)箱梁顶板底面跨中顺桥向和横桥向最大应变分别为 $+16 \times 10^{-6}$ 和 $+24 \times 10^{-6}$ 。

2.3 测点布置

根据箱梁在试验荷载下的受力和变形特征,为便于测量,将挠度和应变测点设置在箱内顶板底面跨中合拢段中轴线处,如图8所示。

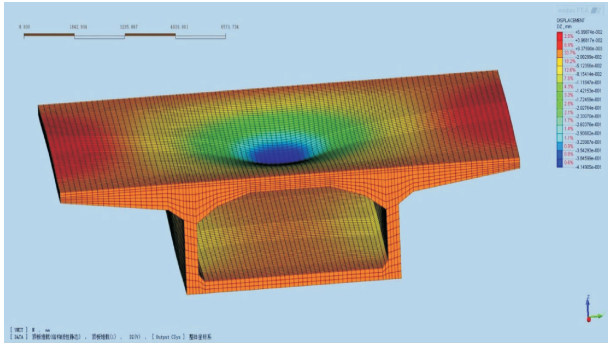


图 6 主桥箱梁顶板竖向变形云图(单位:mm)

型中保持一致,即横桥向对称布置两辆,横向间距为 1.3 m,加载车辆纵向横向布置如图 11 所示。

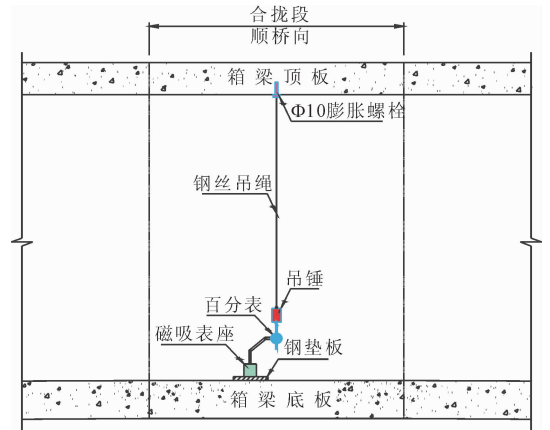
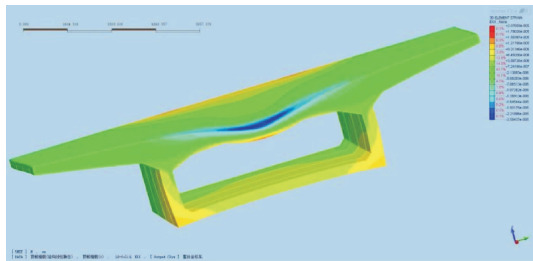
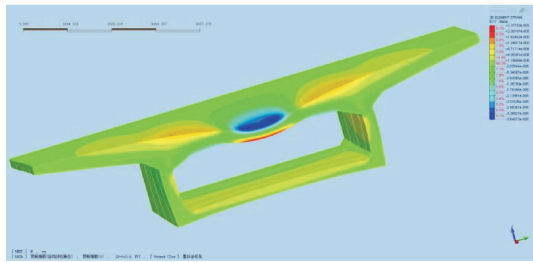


图 9 百分表布置示意图



(a) 桥跨中心线处纵向应变云图



(b) 桥跨中心线处横向应变云图

图 7 桥跨中心线处应变云图

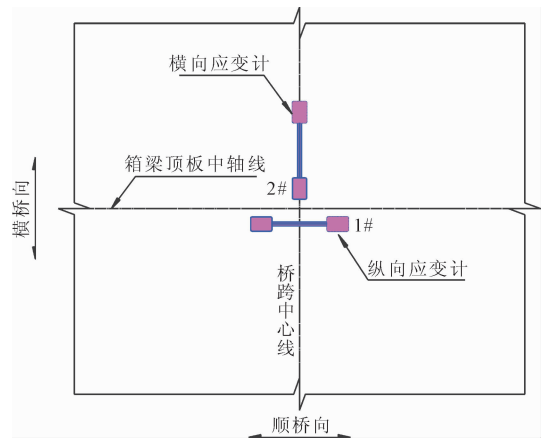


图 10 应变计布置示意图

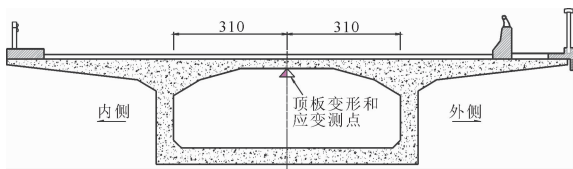


图 8 箱梁顶板变形和应变测点布置图(单位:cm)

箱梁顶板竖向变形采用百分表进行观测,为保证测试精度,每个测点处布置三个百分表。测试装置的示意图如图 9 所示,固定百分表的表座要确保其底面水平且稳固可靠,细钢丝绳及百分表要保持铅直,吊锤底面接触并挤压百分表顶杆。应变采用稳定性好、精度高的振弦式应变计进行测量,应变测点布置于箱梁顶板底面双向跨中处的纵、横向,具体布置情况如图 10 所示。

2.4 加载位布置

箱梁顶板局部加载试验采用重 455 kN 的工程车进行等效加载。试验车辆的布载位置与有限元模

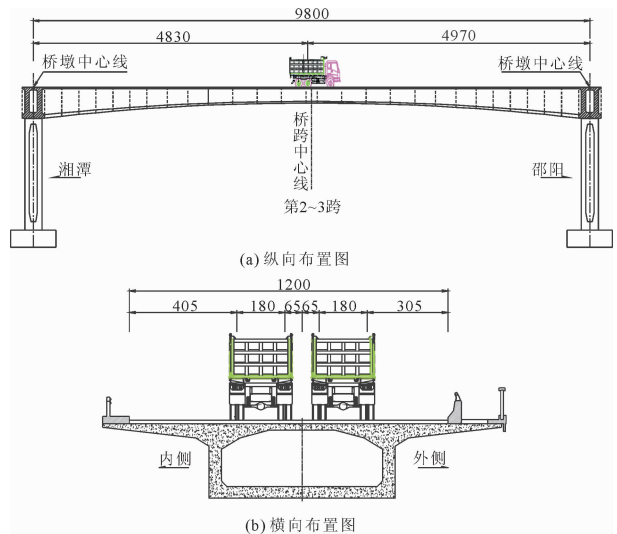


图 11 加载车辆布置图(单位:cm)

2.5 测试结果及分析

箱梁顶板在局部加载工况下的变形和应变测试结果如表 1、表 2 所示,表 1 中数据负值为变形向

下;表2中数据正值表示拉应变,S和H分别表示顺桥向和横桥向应变测点。

表1 局部加载竖向挠度测试结果

测试桥跨	测点位置	满载挠度/mm			残余挠度/mm	挠度校验系数	相对残余位移
		理论值	实测值	弹性值			
第二跨	A-1	-0.41	-0.54	-0.50	-0.04	1.22	0.07
	A-2	-0.41	-0.53	-0.49	-0.04	1.20	0.08
	A-3	-0.41	-0.57	-0.52	-0.05	1.26	0.09
第三跨	B-1	-0.41	-0.49	-0.43	-0.06	1.05	0.12
	B-2	-0.41	-0.52	-0.44	-0.08	1.07	0.15
	B-3	-0.41	-0.51	-0.45	-0.06	1.10	0.12

表2 局部加载应变测试结果

测试桥跨	测点位置	满载应变/ $\times 10^{-6}$			残余应变/ $\times 10^{-6}$	应变校验系数	相对残余应变
		理论值	实测值	弹性值			
第二跨	A-S	16	21	19	2	1.19	0.10
	A-H	24	30	27	3	1.13	0.10
第三跨	B-S	16	18	17	1	1.06	0.06
	B-H	24	27	25	2	1.04	0.07

由表2测试结果可见,在试验荷载作用下,两个试验桥跨箱梁顶板的挠度和应变实测值均大于理论计算值,挠度和应变校验系数介于1.04~1.26之间,超出规程^[17-18]规定范围,说明试验区段的局部刚度不足,结构受力状态异常。测试结果验证了前述关于桥面铺装破损、箱梁顶板开裂的病害成因推测,即桥面铺装和箱梁顶板共同受力效果不佳、变形不协调,在车辆荷载作用下更易导致桥面铺装破损、箱梁顶板开裂。桥面铺装与箱梁顶面之间黏结力的丧失是相关病害产生的根本原因:随着桥梁运营年限的增长,桥面铺装微裂缝的形成,雨水的下渗、冻融以及结合面处的材料老化,导致了桥面铺装与梁顶面之间黏结力的逐渐退化。

根据箱梁顶板局部加载试验的测试结果,结合桥面铺装大面积损坏的病害情况,建议后续维修处治对既有桥面铺装进行铲除、更换,新桥面铺装可采用超高性能混凝土(UHPC)材料。本研究建议采用UHPC材料作为桥面铺装层主要基于其多重技术优势:①密实性和抗裂性好,可有效阻断水分渗透路径,从根本上抑制铺装层与箱梁顶板界面因渗水侵蚀、冻融循环引发的剥离破坏;②高强度特性^[19],与箱梁顶板形成协同承载机制,可大幅提高箱梁顶板的承载力;③高弹性模量与高刚度特性,可有效分担车轮荷载引起的局部应力,缓解顶板混凝土的应力集中;④全寿命周期成本优势显著,虽然初始材料成本较高,但其超长服役年限结合低维护需求,其综合

成本较普通混凝土反而更低,而且因减少封路维修频率,可提升路网通行效率,间接提升经济效益。

3 桥梁整体静载试验

大桥服役至今已有20多年,受外界环境的影响,其材料特性及结构性能不可避免地会发生退化。为反映结构当前的运营状态,进一步开展该桥的整体静载试验,按设计荷载效应进行等效布载,通过测试控制截面的变形和应变,对结构的工作状况和受力性能进行评估。

3.1 有限元模型

采用midas CIVIL软件建立该桥的整体有限元模型,全桥共划分为352个单元,359个节点,如图12所示。上部结构箱梁和下部结构桥墩均采用梁单元进行模拟,桥墩承台底部节点边界条件为完全固结,主墩墩顶节点与相应位置的主梁节点采用主从约束模拟墩梁固结,过渡墩墩顶节点与相应位置的主梁节点采用释放水平 D_x 及转动 R_y 自由度的刚性连接模拟盆式橡胶支座。

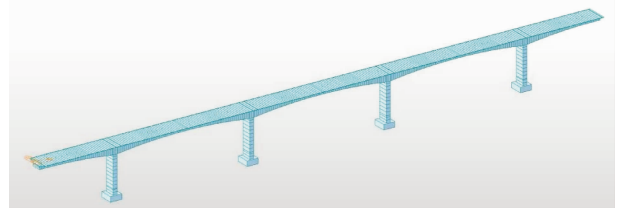


图12 结构整体有限元模型

3.2 试验工况

通过活载分析得到上部结构的弯矩包络图,根据《公路桥梁荷载试验规程》^[18]相关要求,选取试验跨弯矩最大处作为试验控制截面,按照内力等效原则布置试验荷载的大小和位置,使试验荷载作用下控制截面的内力状态与设计荷载作用下的内力相近,保证试验效率系数在 0.85~1.05 之间。静载试验的控制截面见图 13 中的截面 A—截面 E,相应的测试工况、控制截面内力及试验效率如表 3 所示。

表 3 静载试验工况及试验效率

工况号	测试断面	工况名称	试验荷载效应 / (kN·m)	设计荷载效应 / (kN·m)	试验效率
1	A 截面	1#跨最大正弯矩工况 M_{max}	15228.0	15113.2	1.01
2	B 截面	2#跨最大正弯矩工况 M_{max}	16889.3	17931.2	0.94
3	C 截面	2#跨最大负弯矩工况 M_{min}	-44625.4	-46022.4	0.97
4	D 截面	3#跨最大正弯矩工况 M_{max}	17112.4	18078.9	0.95
5	E 截面	3#跨最大负弯矩工况 M_{min}	-47376.4	-47792.4	0.99

3.3 测点布置

根据上部结构箱梁的特点,选取边跨最大正弯矩截面、边跨墩顶支点截面,中跨 1/4 截面共 11 个截面布置 22 个挠度测点,选取边跨最大正弯矩截面、中跨最大正弯矩和墩顶最大负弯矩截面共计 5 个截面布置 27 个应变测点。挠度和应变测试断面和测点的具体布置情况如图 14、图 15 所示。挠度采用瑞士莱卡 TM50I 0.5 型全站仪进行测量,应变采用表贴式钢弦应变计结合综合测试仪采集。

3.4 试验加载

静载试验采用后八轮工程车等效加载,加载车的技术参数如表 4 所示,典型工况的车辆载位如图 16 所示。试验时间选择在凌晨,以减小温度变化对测试结果的干扰。试验之前,对结构进行预荷载,正式加载分三级完成,加载时间间隔应满足结构反应稳定的时间要求。加载过程中随时观察结构各部位可能产生的新裂缝以及既有裂缝的开展情况,当出现异常声响、振动时,应立即停止加载、查明原因。

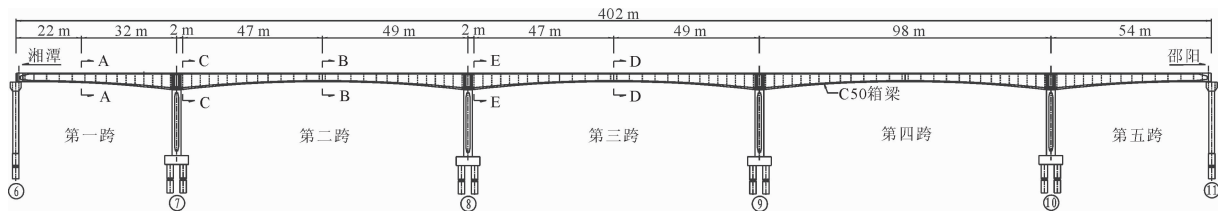


图 13 控制截面布置图(单位:m)

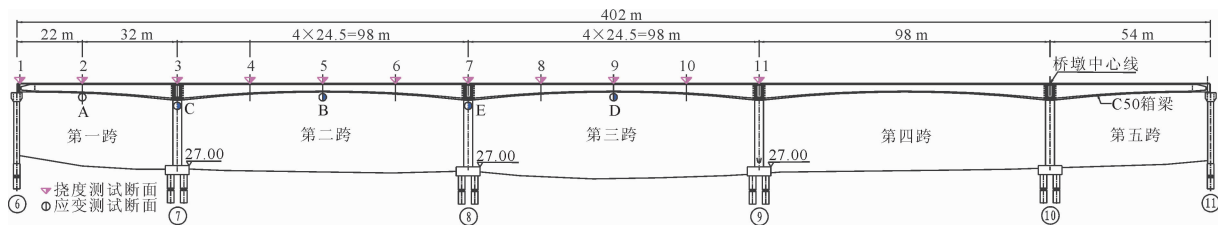


图 14 挠度和应变测试截面(单位:m)

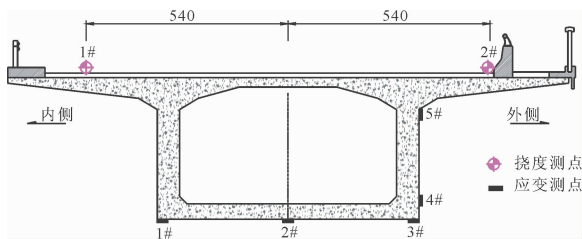


图 15 挠度和应变测点布置示意图(单位:cm)

表 4 试验加载车主要技术参数

轴距 A/m	轴距 B/m	轮距 C/m	前轴重 /kN	中轴重 /kN	后轴重 /kN	总重 /kN
3.5	1.4	1.8	76	152	152	380

3.5 测试结果及分析

剔除支点沉降和温度变化对实测数据的影响,对试验结果进行分析。限于篇幅,仅示出第二、三跨最大正弯矩工况相应的控制截面 B 和 D 在试验荷载下的挠度和应变测试结果,如表 5、表 6 所示,表中“—”表示该测点不作为校验系数和相对残余值分析的主要测点。

在试验荷载作用下,试验桥跨四分点实测挠度变化趋势与理论挠曲规律一致,上、下游测点的变形基本相同;各控制断面的挠度和应变实测值均小于理论计算值,挠度校验系数在 0.68~0.71 之间,应

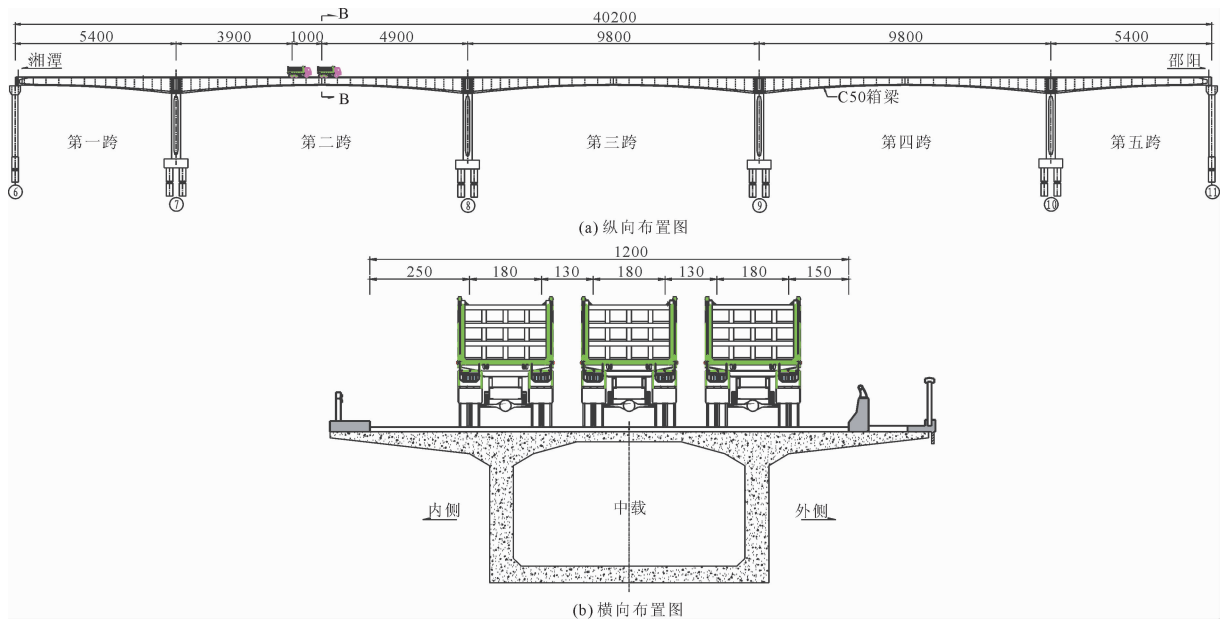


图 16 典型工况车辆载位布置图(单位:cm)

表 5 挠度测试结果

测试桥跨	测点位置	满载挠度/mm			残余挠度/mm	挠度校验系数	相对残余位移
		理论值	实测值	弹性值			
第二跨	1/4	1#	-8.7	-6.6	-6.2	-0.4	—
		2#	-8.7	-7.0	-6.0	-1.0	—
	1/2	1#	-16.8	-13.0	-11.4	-1.6	0.71
		2#	-16.8	-13.1	-12.0	-1.1	0.68
	3/4	1#	-7.8	-5.5	-5.5	0.0	—
		2#	-7.8	-6.4	-5.5	-0.9	—
第二跨	1/4	1#	-9.1	-6.5	-6.3	-0.2	—
		2#	-9.1	-6.8	-6.2	-0.6	—
	1/2	1#	-17.3	-13.1	-12.0	-1.1	0.70
		2#	-17.3	-13.5	-12.1	-1.4	0.69
	3/4	1#	-8.0	-5.6	-5.2	-0.4	—
		2#	-8.0	-6.2	-5.4	-0.8	—

表 6 应变测试结果

测试桥跨	测点位置	满载应变/ $\times 10^{-6}$			残余应变/ $\times 10^{-6}$	应变校验系数	相对残余应变
		理论值	实测值	弹性值			
第二跨	B-1	78	56	53	3	0.68	0.05
	B-2	78	59	56	3	0.72	0.05
	B-3	78	49	48	1	0.62	0.02
	B-4	58	37	36	—	—	—
	B-5	1	1	1	—	—	—
第三跨	D-1	79	55	52	3	0.66	0.05
	D-2	79	55	54	1	0.68	0.02
	D-3	79	54	51	3	0.65	0.06
	D-4	58	36	36	—	—	—
	D-5	2	3	2	—	—	—

变校验系数在 0.62 ~ 0.72 之间,满足规程^[17-18]规定的范围,说明桥梁整体刚度满足要求,结构受力状态正常;卸载后,各点最大相对残余挠度为 0.12,最大相对残余应变为 0.06,满足规程规定的范围(≤ 0.20),说明试验桥跨处于弹性工作状态。

4 结构动力特性测试

桥梁的动力特性参数包含振型、固有频率和阻尼比,与结构的材料特性、质量、刚度分布和边界条

件有关,是评价结构整体性能的重要指标。本次结构动力特性测试采用脉动法,采用东方所 INV3062 型动态信号分析仪结合 941-B 型拾振器采集结构在环境激励下的微小振动信号,通过功率谱平均分析及测点的振幅和相位关系,求得结构各阶振动频率和对应的振型,利用幅频图上各峰值处的半功率带宽确定模态阻尼比。结构前三阶竖向自振特性测试结果以及理论值的对比如图 17 和表 7 所示。

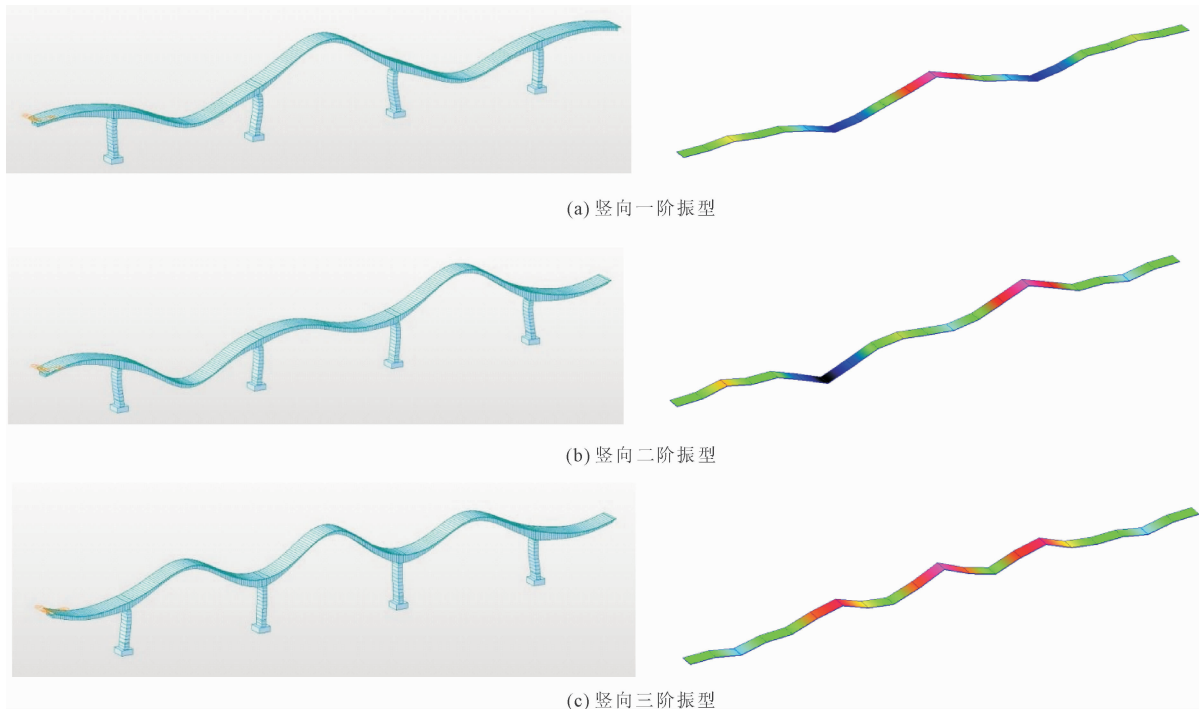


图 17 结构理论振型与实测振型对比(左侧为理论振型,右侧为实测振型)

表 7 自振特性测试结果

序号	振型特征	实测结构 频率 f_{mi} /Hz	理论计算 频率 f_{di} /Hz	f_{mi}/f_{di}	阻尼比 /%
1	一阶正对称竖弯	1.485	1.367	1.086	0.747
2	二阶反对称竖弯	1.855	1.626	1.141	0.639
3	三阶正对称竖弯	2.315	1.952	1.186	0.741

结构前三阶竖向实测振型与理论振型相吻合,节点振动相位正常,振型模态变形均匀、协调;实测固有频率均大于理论计算值,说明桥梁整体刚度满足要求;该桥测试阻尼比大小处于正常范围,说明结构耗散外部能量输入的能力较好。

5 结 论

(1) 采用箱梁顶板局部加载试验开展病害内部成因分析。在局部加载作用下,测试区域箱梁顶板

的挠度和应变实测值均大于理论计算值,说明箱梁顶板局部刚度不足,测试结果验证了桥面铺装破损、箱梁顶板开裂是由于二者共同受力效果不佳的病害成因推测。

(2) 提出采用超高性能混凝土(UHPC)材料对既有桥面铺装进行更换的建议。箱梁顶板局部加载试验揭示桥面铺装和箱梁顶板共同受力效果不佳、变形不协调,UHPC 材料凭借其超高强度、高韧性和抗裂性能,可有效提升箱梁顶板与桥面铺装协同受力能力,抑制桥面铺装开裂。在后续施工时应严格把控箱梁顶面的处理、铺装与箱梁顶面的结合以及 UHPC 材料的养护,确保充分发挥 UHPC 材料的性能。

(3) 采用桥梁整体静载试验和结构动力特性测试评估桥梁的结构安全和运营状态。控制截面测点的挠度和应变均小于理论计算值,校验系数和相对

残余值均处于规范允许范围;结构前三阶竖向振型与理论振型相吻合,实测固有频率大于理论计算值,测试阻尼比大小处于正常范围。桥梁整体刚度满足规范要求,结构弹性恢复能力良好,处于正常受力工作状态。

参考文献:

- [1] 毛伟琦,胡雄伟. 中国大跨度桥梁最新进展与展望[J]. 桥梁建设,2020,50(1):13-19.
- [2] 董丽娟,黄祯尹,卢刚,等. 我国桥梁工程技术发展趋势分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2020,16(7):187-190.
- [3] 王世伟,刘雅玲,高鑫. 公路桥梁易损构件病害分析及养护提升建议[J]. 公路,2024,69(9):99-106.
- [4] 安镜如,潘盛山,王峥峥,等. 基于 CiteSpace 和 VOSviewer 的路桥隧运维管理可视化分析[J]. 土木工程与管理学报,2023,40(3):88-95.
- [5] Heng J L, Dong Y, Lai L, et al. Digital twins-boosted intelligent maintenance of ageing bridge hangers exposed to coupled corrosion-fatigue deterioration[J]. Automation in Construction,2024,167:105697.
- [6] 陈灿明,郭壮,何建新,等. 闸首空箱顶板裂缝成因分析与加固方案探讨[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(5):157-161.
- [7] 马思航. 桥梁检测与监测技术及数字化发展方向的对策探讨[J]. 交通科技与管理,2023,4(14):14-16.
- [8] 欧阳歆泓,徐一超. 桥梁检测与监测技术的发展趋势[J]. 工程技术研究,2020,5(24):236-237.
- [9] 代建波,吕刚,张仁猛,等. 某景区人行玻璃索桥荷载试验及安全评估[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(4):16-20.
- [10] 关孝文,张莉,胡世浩,等. 基于行车激励的桥梁动力性能测试与状态评估[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):226-230.
- [11] He Yuwen, Li Junfei, Cheng Huacai, et al. Flexibility matrix identification using the moving vehicle induced responses for beam type bridge[J]. Engineering Structures,2022,261(5):114277.
- [12] Liang Zhouxi, Xiong Zhihua, Cong Tuotuo, et al. Damage identification of Chi River bridge based on vehicle excitation and WPEVCR[J]. Advances in Bridge Engineering,2023,21(4):1-14.
- [13] Casas J R, Moughty J J. Bridge damage detection based on vibration data: past and new developments[J]. Frontiers in Built Environment,2017(3):1-12.
- [14] Xiao Jinglin, Liu Yufei, Feng Haolong, et al. Field tests and structural performance evaluation of existing reinforced concrete hollow slab beam bridges[J]. Engineering Structures,2025,333:120128.
- [15] 郑旭,伊廷华,杨东辉,等. 中小跨径桥梁承载能力快速检测与虚拟评定方法研究[J]. 工程力学,2025,42(4):69-77.
- [16] 公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [17] 公路桥梁承载能力检测评定规程:JTG/T J21—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [18] 公路桥梁荷载试验规程:JTG/T J21-01—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [19] 代建波,吕刚,张仁猛,等. 含粗骨料的超高性能混凝土受弯试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(2):41-45.