

某V形刚构-挂梁组合体系桥梁载荷试验分析

卢 的

(广东全科工程检测有限公司, 广东 广州 511483)

摘要: 为验证某3跨V形刚构+挂梁组合体系桥梁的设计科学性, 支撑交工验收及积累养护资料, 开展了静动载试验研究。首先采用MIDAS Civil NX建立梁格模型, 并通过MIDAS FEA NX构建实体模型进行校核, 以城-A级荷载为标准, 结合4类针对性工况的3轴载重车辆加载方案, 完成了静动力数值模拟, 实测了主梁关键截面的变形、应力应变、动挠度和自振频率等核心指标。静荷试验结果表明: 静应变和静挠度校验系数为0.54~0.72, 相对残余比均不大于20%, 无明显可见损伤; 动载试验结果表明: 实测自振基频为理论值的1.7倍, 冲击系数低于理论值, 阻尼比符合混凝土桥梁正常范围。整体试验结果表明: 该桥梁结构强度与刚度均满足城-A级设计荷载要求, 整体工作性能良好, 其结构形式可为同类大跨度高刚度桥梁提供参考, 且试验数据补充了该类桥梁的行业数据库。

关键词: V形刚构; 挂梁; 荷载试验; 有限元; 动挠度; 振型

中图分类号: U441; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0366-05

Load Test Analysis of a V-shaped Rigid Frame and Hanging Beam Composite System Bridge

LU Di

(Guangdong Quanke Engineering Testing Co., Ltd., Guangzhou 511483, China)

Abstract: To validate the design rationality of a three-span V-type rigid frame + hanging beam composite system bridge, the static and dynamic load tests are conducted to support acceptance and maintenance data collection. The process begins with establishing a beam grid model using MIDAS Civil NX, followed by verification through a solid model in Midas/FEA NX. Using Class-A load standards and four targeted scenarios with three-axle heavy-duty vehicle loading schemes, the static-dynamic numerical simulation is conducted. The loading tests measure key parameters including deformation, stress-strain, dynamic deflection, and natural frequency at critical cross-sections of the main beam. That static load tests demonstrated: calibration coefficients for static strain and deflection ranging from 0.54 to 0.72, with relative residual ratios below 20% and no visible damage. Dynamic load tests show that: the natural frequency is 1.7 times the theoretical value, impact coefficients below theoretical thresholds, and damping ratios within normal concrete bridge ranges. The overall test results indicate: The bridge's structural strength and stiffness fully meet Class A urban design load requirements, demonstrating excellent overall performance. This structural configuration provides valuable reference for similar large-span high-stiffness bridges, while experimental data enriches the industry database for such bridge types.

Keywords: V-shaped rigid frame; hanging beam; load test; finite element; dynamic deflection; vibration modes

0 引言

随着城市交通和景观建设需求的提升, 桥梁结构逐渐向大跨度、多功能、高颜值方向发展。V形刚构桥具有刚性强、车辆荷载下竖向位移小的优势, 挂梁结构则能有效拓展跨越能力, 因此兼具这两者优点的V形刚构+挂梁组合体系可适应景观河、湖心岛

等复杂跨越场景, 且造型美观。但该体系在工程实践中应用较少, 其动力响应敏感的特性尚未得到充分研究。开展对应体系的载荷测试工作, 是验证设计逻辑合理性、筑牢营运安全防线的关键环节, 具有重要现实意义。

国内外研究者针对V形刚构或挂梁相关结构的荷载性能开展了研究。王永祯^[1]通过荷载试验, 分析了高桩承台基础带挂梁V形刚构桥的承载能力, 为该类型桥的基础评估提供了数据; 杨勇等^[2]对带挂梁的V形墩刚构桥进行原位荷载试验, 阐明了其局

收稿日期: 2025-12-09

作者简介: 卢的(1994—), 男, 学士, 工程师, 从事桥梁检测与监测工作。

部区域的受力特性;殷艳萍^[3]则聚焦 V 形墩连续刚构桥,通过静载试验探究其静态力学行为。但现有研究多集中于单一结构形式或小跨度体系,针对“V 形刚构+挂梁”组合体系的系统静动载试验研究较为匮乏,尤其缺乏 50 m+80 m+50 m 大跨度下该体系刚度、强度、动力特性(如自振频率、冲击系数)的全面验证数据,难以支撑此类组合桥的设计优化、交工验收和长期养护,相关试验方法和数据支撑均有待完善。

为完善相关研究内容,同时验证某 3 跨 V 形刚构+挂梁组合体系桥梁的设计科学性,支撑其交工验收并积累养护资料,本文开展了专项静动载试验研究。研究采用 MIDAS Civil NX 建立梁格模型,并通过 MIDAS FEA NX 构建实体模型进行校核,以城-A 级荷载完成静动力数值模拟;同时基于模拟结果制定 4 类针对性试验工况,通过 3 轴载重车辆加载,实测了该桥主梁关键截面的变形、应力应变、动挠度和自振频率等核心指标,最终明确了桥梁整体力学性能。此项研究工作不仅能直接为该桥的验收核验和常态化养护提供核心参考,更能为同类大跨度 V 形刚构+挂梁组合体系桥梁的性能评估提供有效参考,补充该类桥梁的行业试验数据库。

1 工程概况

某城市桥梁为满足跨越景观河和湖心岛的使用功能要求,综合考虑经济、美观和施工可行性等要求,设计桥跨布置为 50 m+80 m+50 m=180 m 的 3 跨 V 形刚构+挂梁结构型式。桥梁为双幅结构,桥梁标准横断面总宽度 43.0 m,具体布置如下:两侧对称设置 6.5 m(人行道+非机动车道)、1.5 m 绿化带、12.0 m 车行道及 0.5 m 防撞护栏,中部设置 2.0 m 中央分隔带,总宽度计算为:2×(6.5 m+1.5 m+12.0 m+0.5 m)+2.0 m=43.0 m。汽车荷载等级为城市-A 级。

桥梁上部结构主梁采用单箱 5 室箱形断面,单箱顶宽 20.5 m,底宽 19.5 m,悬臂翼缘 0.5 m,箱梁梁高与底板厚度按圆曲线变化,腹板采用直腹板。挂梁采用 20 m 跨刚接空心板,梁高为 0.95 m。主梁及挂梁均按 A 类预应力构件设计,均采用后张法施工。下部结构 1#、2#桥墩均采用实体桥墩,V 形斜腿的结构设计采用普通钢筋混凝土材质。0#、3#桥台均采用扶壁式一字台,基础沿顺桥向为双排桩。

桥梁布置如图 1 所示,结构标准横断面图如图 2 所示。

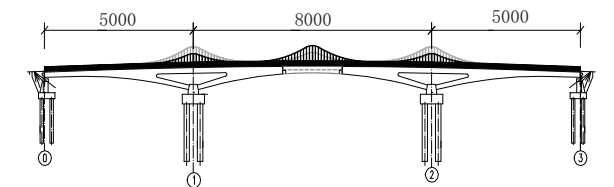


图 1 桥梁立面图(单位:cm)

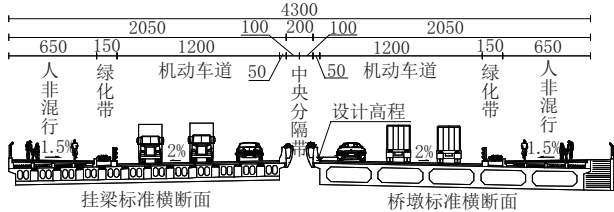


图 2 桥梁标准横断面图(单位:cm)

2 有限元分析

针对 V 形刚构+挂梁组合体系,运用空间有限元软件 MIDAS Civil NX 构建梁格离散模型并开展分析。该模型共包含 2 270 个节点、3 963 个单元;V 构纵梁为单箱 5 室结构,基于腹板稀疏,将其划分为 6 片工字梁;虚拟横梁的刚度(特别是抗扭刚度)根据桥面板实际刚度等效计算,这是横向传力的关键。各支点边界条件采用一般支承形式^[4],空心板挂梁与 V 构悬臂端弹性连接,采用一般类型模拟支座。通过软件内置程序对桥梁进行整体静动力特性分析计算,以城-A 级荷载作为验证标准开展理论计算,采用偏载方式进行静力模拟;同时,借助 MIDAS FEA NX 建立结构实体精细化模型,以验证结构特征参数的合理性,并提取荷载作用效应的理论计算结果^[5]。

桥梁梁格计算模型见图 3,桥梁实体单元计算模型见图 4,弯矩内力计算结果见图 5。

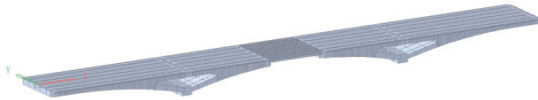


图 3 桥梁梁格计算模型

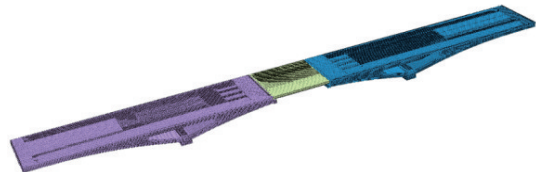


图 4 桥梁实体单元计算模型

3 静载试验

3.1 荷载试验工况及加载效率

按照《城市桥梁检测标准》(DBJ/T 15-87-2022)的相关技术规定,综合考虑该桥结构自身受力特征

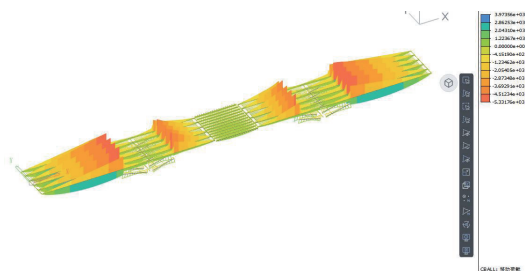


图5 弯矩内力图(移动荷载)(单位:kN·m)

及现场施工、交通等实际情况,本次静载试验确定4个关键控制断面,并划分成4个独立测试工况^[6]。试验加载设备采用3轴载重车辆,其前中轴间距

3.5 m,中后轴间距1.4 m。上述标准明确要求试验控制荷载应与设计标准荷载一致,因此本次试验基于各测试截面的内力等效或挠度等效原则,通过桥梁影响线分析确定最不利车载布置位置,进而完成加载布载^[7]。经计算,本次试验各测试工况的荷载效率均处于上述标准规定的0.85~1.05合理区间内,且各工况试验效应计算值均达到城—A级荷载对应的设计效应标准,确保了布载工况满足设计荷载要求^[8]。

4种试验工况下,桥梁具体荷载效率数据见表1。

表1 某V形刚构+挂梁组合体系桥梁试验检测工况及荷载效率

试验工况	试验桥梁控制断面	测试内容	设计效应计算值	试验效应计算值	试验荷载效率	加载车辆数/辆
工况1	第2跨挂梁跨中主梁A截面	最大正弯矩	738.5 kN·m	743.3 kN·m	1.00	4
工况2	第2跨斜腿顶主梁B截面	最大负弯矩	-5 331.8 kN·m	-4 795.8 kN·m	0.90	8
工况3	第1跨锚固孔主梁C截面	最大正弯矩	3 973.5 kN·m	3 417.2 kN·m	0.86	6
工况4	第2跨主梁悬臂端D截面	最大挠度	18.18 mm	16.15 mm	0.89	8

3.2 控制断面及测点布置

为监测主梁竖向位移,沿主跨偏载侧防护栏旁及跨中位置设置测试点位,选用高精度电子水准仪完成量测;应力测试在最不利截面布置振弦应变计,对设置在控制断面腹板及底板的应变测点进行应变测试^[9],再通过混凝土弹性模量转换为相对的应力结果^[10]。本次静载试验确定的4个关键控制断面A~D见图6。

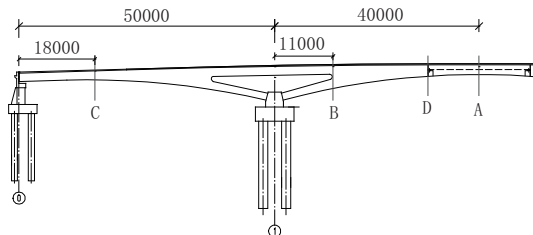


图6 桥梁控制断面布置图(单位:mm)

3.3 结果分析评定

静载试验启动时气温为21.0℃,试验期间大气温度变化幅度不超过0.5℃,因此认定检测过程中温度处于基本恒定状态^[11]。加载后各控制断面的应变、挠度实测值与理论值的对比见表2。由表2数据可得以下结论:

(1)该桥刚度和强度达标。4种工况下,该桥各控制断面的校验系数均小于1,且远低于规范上限。其中挠度校验系数为0.54~0.57,应变校验系数为0.56~0.72,均显著小于1.0,表明桥梁主梁实际刚度、强度优于理论设计值。也就是说,在城—A级荷载作用下,该桥主梁竖向位移、截面应变均未达到理

论限值,结构抗变形能力充足,满足日常通行中“车辆荷载下竖向位移小”的设计预期。这些数据可直接验证该结构“主梁整体较刚”的优势。

(2)该桥弹性恢复良好。4种工况下,该桥各控制断面的残余比均小于20%规范限值。各工况残余比最高仅9.51%(D截面挠度),远低于规范允许的20%,说明在试验荷载作用下主梁处于弹性工作阶段^[12],无塑性变形累积,构件材料性能完好,不存在因刚度衰减导致的“残余变形过大”问题,结构长期服役稳定性有保障^[13]。

(3)该桥无可见损伤。整个试验过程中(环境温度波动幅度不大于0.5℃,可排除温度因素对试验数据的干扰影响),试验跨未发现肉眼可见的新裂缝,结合应变和挠度数据可知,桥梁控制断面未达到开裂临界状态,结构强度满足城—A级荷载下的抗裂、承载要求,从而进一步验证了结构完整性。

4 动载试验

动载试验阶段,试验车辆以不同行驶速度驶过桥梁,使结构产生受迫振动,采集该工况下桥梁的振动频率及最大振幅;同时,在桥梁完全无车辆、行人通行的条件下,采集自然环境(风、水流等)激励作用下结构的固有振动频率和模态参数。

4.1 测点布置

沿主桥桥跨方向,于桥面上游侧、下游侧分别设置动态拾振传感器测点,如图7所示。

表2 加载后各控制断面的应变和挠度实测值与理论值对比

试验工况	试验桥梁控制断面	测试内容	实测值	理论值	校验系数	残余比/%
工况1	第2跨挂梁跨中主梁A截面	A截面最大挠度/mm	-6.80	-12.15	0.56	7.23
		A截面最大拉应变/($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	83	116	0.72	4.60
工况2	第2跨斜腿顶主梁B截面	B截面最大压应变/($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	-9	-14	0.64	0
工况3	第1跨锚固孔主梁C截面	C截面最大挠度/mm	-5.21	-9.06	0.54	3.88
		C截面最大拉应变/($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	31	55	0.56	0
工况4	第2跨主梁悬臂端D截面	D截面最大挠度/mm	-9.21	-16.15	0.57	9.51

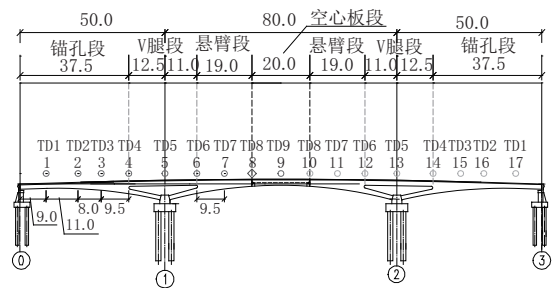


图7 加速度传感器测点布置图(单位:m)

4.2 动载试验结果和分析

模态分析法作为研究桥梁结构动力特性(固有频率、阻尼参数、振型形态)的核心方法,在现代工程中被广泛应用,且该仿真计算模拟技术在工程振动领域亦占据重要地位。各阶模态均具有专属的动力特性,主要体现为固有频率 f 、阻尼比 η 及振型这3个关键参数。本次分析通过子空间迭代法对主桥模型进行模态计算,得到前3阶自振频率和振型特征。前3阶计算振型和实测振型见图8至图10;跑车动挠度时程曲线见图11。

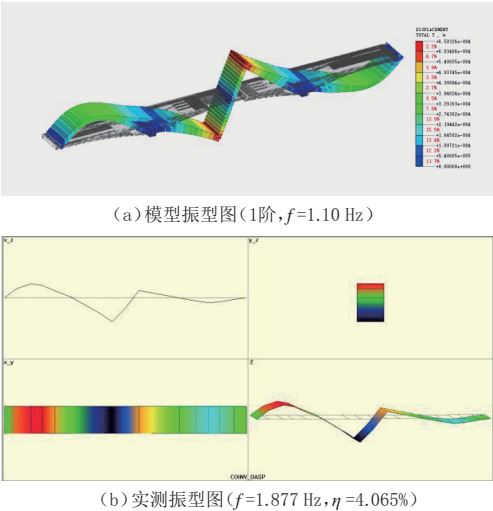


图8 1阶振型图

动载试验评定结果如下:
(1)该桥整体刚度更优。基频显著高于理论值,实测基频为1.877 Hz,是理论值1.10 Hz的1.7倍,且满足“实测基频/理论基频大于1.1”的评估标准,说明桥梁上部结构整体刚度比设计预期更强。自振基

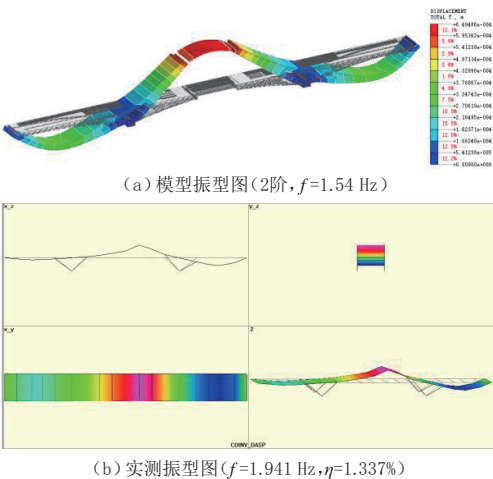


图9 2阶振型图

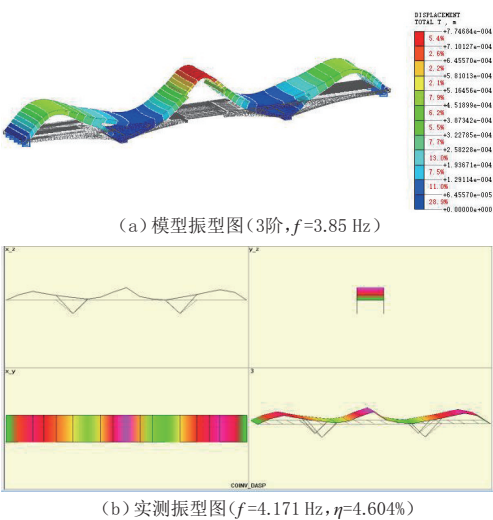


图10 3阶振型图

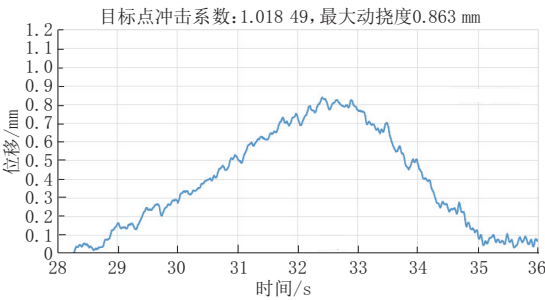


图11 跑车动挠度时程曲线

频与结构刚度正相关,基频越高,结构抗振动变形能力越强,可有效抵御日常通行中“车辆动力荷载激励”导致的振动累积,降低因振动疲劳引发的病害风险。

(2)该桥行车性能良好。冲击系数低于理论值,跑车工况实测冲击系数为1.018,略低于理论计算的1.05,表明车辆行驶时对桥梁的动力冲击效应较弱。结合“跑车最大动挠度仅0.836 mm”的数据可知,桥梁在动态荷载下的振动响应平稳,能有效减少车辆颠簸感,提升旅客舒适性^[14],同时降低冲击荷载反复作用对桥面铺装、支座的损伤,延长桥面及构件使用寿命。

(3)该桥模态特性合理。阻尼比符合材料特性,1阶阻尼比4.065%处于混凝土桥梁的正常阻尼范围(2%~5%),说明桥梁振动能量耗散能力正常,无因构件连接松动(如挂梁与刚构衔接处)导致的阻尼比异常增大问题,结构整体协同工作性能良好,动力传递路径完整^[15]。

5 结 语

(1)静载试验各工况下,应变、位移等核心力学控制指标的校验系数均满足《城市桥梁检测标准》(DBJ/T 15-87—2022)要求,相对残余比均控制在20%的规范允许范围以内。

(2)动载试验结果显示,主桥实测固有频率高于理论计算值,实测冲击系数低于理论计算值。

(3)结合静、动载试验结果分析,该桥主桥结构的强度和刚度均能达到城-A级设计荷载等级要求,整体工作状态表现良好。

(4)静载数据(主梁刚度优、弹性好)和动载数据(基频高、冲击小)可直接验证该组合体系桥梁既实现了50 m+80 m+50 m大跨度跨越(满足景观河、湖心岛的跨越需求),又保留了主梁整体较刚的优势,设计理念可行。后续同类桥梁(需大跨度+高刚度)可

参考此结构形式,减少设计试错成本。

(5)本次试验的4类工况加载效率、1~3阶模态参数、冲击系数与车速的关联数据均可补充行业数据库,为后续该类桥梁的荷载试验工况设计和动力参数评估标准提供参考,减少试验方案设计周期。

参考文献:

- [1] 王永祯.高桩承台基础的带挂梁V型刚构桥荷载试验分析[J].福建建材,2014(20):3-5.
- [2] 杨勇,赵新生,蔡卡宏.带挂梁的V形墩刚构桥原位荷载试验[J].城市道桥与防洪,2014(10):102-105.
- [3] 殷艳萍,周龙.V形墩连续刚构桥静荷载试验及分析[J].江西建材,2020(5):31-35.
- [4] 段文杰,裴强.某连续梁桥静动载试验研究[J].中外公路,2014,34(4):208-211.
- [5] 王祥寿,张晨.武汉青山长江公路大桥主桥荷载试验有限元分析[J].桥梁建设,2020(50):63-67.
- [6] 刘晓晨,刘文勃,曹跃.基于荷载试验方法的T型刚构带挂梁桥加固改造研究[J].学术交流,2023(1):76-78.
- [7] 陈伟盛.T型刚构桥荷载试验研究与分析[J].广东土木与建筑,2013(11):51-57.
- [8] 黄少新,赵文秀.连续刚构桥梁荷载试验分析[J].桥梁建设,2006(12):137-139.
- [9] 何佳,冉舵兵,梁波,等.某连续刚构桥荷载试验[J].中外公路,2020,40(5):149-152.
- [10] 谭达,黄晓敏,茹兴伦,等.基于荷载试验的V形墩连续刚构桥承载能力评估[J].建筑技术,2025(5):1276-1280.
- [11] 康丽.公路桥梁静载试验检测技术的研究[J].科学技术创新,2019(34):124-125.
- [12] 张秋陵,肖光宏.奉节长江大桥成桥荷载试验研究[J].世界桥梁,2009(1):46-48.
- [13] DBJ/T 15-87—2022 城市桥梁检测技术标准[S].
- [14] 牛国军,陈芳.市政桥梁荷载试验检测分析[J].工程质量,2008(1):16-18.
- [15] 袁金华,王胜.公路桥梁荷载试验控制水平[J].交通世界(运输·车辆),2015(10):30-32.