

某城市交通枢纽中新型钢结构梁拱组合体系 桥梁静动力性能分析

谭丰哲

深圳市交通工程试验检测中心有限公司 广东 深圳 518049

摘要：采用MIDAS CIVIL建立某城市交通枢纽中新型钢结构梁拱组合体系桥梁空间有限元模型，计算得到该桥理论静力性能及自振特性参数。对该桥实施桥梁荷载试验，对比分析实测结果与有限元计算值，进而评价桥梁的使用性能。结果表明：本新型结构桥梁的静力性能、动力特性水平均满足要求，可在后续城市交通枢纽建设中加以应用推广。

关键词：梁拱组合体系桥梁；静力性能；自振特性参数；荷载试验

引言

钢结构梁拱组合桥作为一种创新结构体系，将梁、拱这两种基本结构形式组合在一起，共同受力，充分发挥梁受弯、拱受压的结构特性，兼有梁桥和拱桥的构造特性^[1]。相对于不设拱肋的连续梁桥，组合体系桥梁具有优美造型及良好的经济技术指标。结构中拱肋与主梁刚性连接，拱脚水平推力与梁的轴向拉力形成自平衡体系，使得梁拱组合桥梁能在一般地基条件下修建^[2]。另外拱肋与主梁共同承担车辆等外荷载，因此其抗弯承载能力和刚度均有所提升。因此，梁拱组合结构桥梁以其跨越能力强、刚度大、动力性能好、造型美观等显著特点，受到桥梁研究与设计人员的青睐。21世纪以来我国在铁路和公路领域陆续建成了数十座公路及铁路梁拱组合桥^[3]。通过分析我国已建成的桥梁概况可知：组合结构中主梁和拱肋分别以预应力混凝土梁和钢管混凝土结构居多，少部分桥梁主梁与拱肋均采用钢箱形式，使其具备自重轻、施工工期短等特点。

本文将某城市交通枢纽中新型钢结构梁拱组合桥（以下简称“枢纽组合桥”）为研究对象，对其静动力性能进行理论计算与现场试验，再对比分析试验中结构应变、挠度、模态参数及冲击系数等，综合评价桥梁在设计荷载作用下的静动力性能，并为类似梁拱组合桥

梁设计提供数据支撑。

1 工程概况

枢纽组合桥上跨地面主干道与地下地铁交通枢纽，成为现代城市交通枢纽的重要组成部分。桥梁采用了钢结构下承式拱桥与梁桥组合设计，主跨呈现为双索面单脊坦拱结构，桥跨采用（39.5+42+125（拱结构）+43.5+39.9）m五跨一联梁拱组合体系。桥梁拱轴线平面位置为主墩与路线设计线的交点连线，拱肋矢高17.593m，矢跨比1:7.1，拱轴中心线采用二次抛物线，抛物线方程 $y = (-4 \times 17.593) / 124.988 \times (x - x^2 / 124.988)$ ；两片拱肋净距为80cm，两片拱肋之间通过7道倒梯形横梁连接，增加拱肋横向稳定性。单片拱肋采用六边形断面，外侧腹板为斜腹板，内侧腹板为竖腹板，拱肋断面高度在拱脚位置为变高截面，高度为2.5m~3.5m，其余位置拱肋高度均为2.5m。拱肋顶底板、加劲肋及横隔板、横梁钢材材质采用Q345qC。拱肋与主梁之间设置飘带，飘带在拱脚位置与拱肋顶板连接，在次跨位置与主梁顶板连接，飘带安装是在主梁及拱肋安装完成，且吊杆张拉完成之后进行安装。

本桥吊杆采用极限抗拉强度为1670MPa高强钢丝拉索，型号分 $\phi 7-91$ ， $\phi 7-85$ 两种。其中，全桥共24根吊杆，吊杆上部锚固在拱肋横隔板内，吊杆下部锚固在箱梁横梁内。

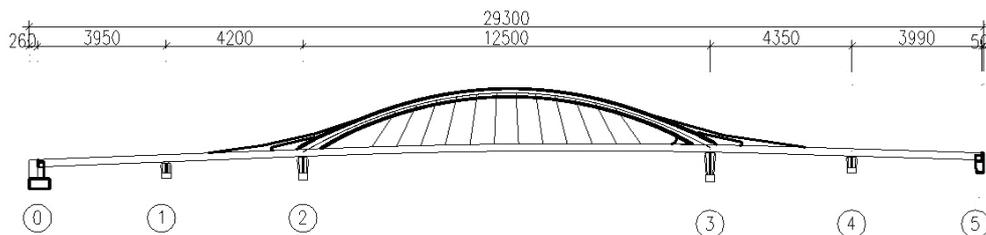


图1 桥梁立面图（单位：mm）

2 静力性能理论及试验分析

根据设计图纸建立MIDAS有限元计算模型，采用内力等效原则确定试验车辆布载并得到关键部位的应变、变形及索力增量，再进行现场试验采集相关数据，最后对比分析有限元计算值和试验值。

2.1 有限元建模

按设计图纸，采用MIDAS建立全桥空间计算模型。模型共有节点1273个、单元1496个。其中，钢主梁及横梁采用梁单元、吊杆采用桁架单元；主梁与拱脚采用刚性连接，吊杆与拱肋及主梁均采用共节点连接；全桥支座约束参照支座参数模拟；桥梁护栏、铺装及其余附加荷载均按设计图考虑。

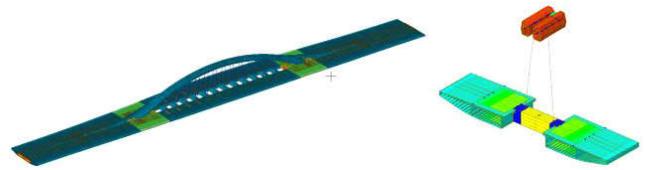


图2 桥梁有限元模型

2.2 试验加载工况

根据设计活载计算结果，采用载物后重300kN的四轴泥头车进行加载，加载车轴重根据每轴车轮数量均分。理论加载采用单元影响线法快速确定加载车数量及分布，同时确保加载效率满足[0.85, 1.05]的区间范围。经计算最终确定试验加载工况如表1所示。

表1 按拟定车重计算的静载试验效率

工况	测试内容	设计效应值	试验效应值	加载效率	加载车数量
工况一（中载）	拱顶处最大压应力	-20.60	-20.50	1.00	10
	拱顶处最大挠度	-24.06	-21.46	0.89	
	中跨跨中梁底最大应力	20.0	19.3	0.97	
工况二（中载）	1/4拱肋最大压应力	-19.5	-19.9	1.02	10
	1/4拱肋最大挠度	-22.27	-20.59	0.92	
工况三（偏载）	中跨跨中梁底最大挠度	-32.89	-29.44	0.90	5

对桥梁进行上述工况加载，测试该桥拱肋、主梁的应力、挠度、吊杆索力的变化。

根据结构受力特点，选取拱顶、拱脚、拱肋四分点及主梁跨中部位进行应力测试，同时对中跨主梁与拱肋的八分点挠度及中跨两支墩处沉降进行测量。试验选在温度较为恒定的晚上进行。其中，应力测试采用弦式应变计测试数据；主梁挠度采用百分表测得；拱肋挠度采用全站仪测量；支墩沉降采用水准仪测得；索力变化则

通过索力动测仪测试。

2.3 试验结果分析

静载试验数据一般根据《公路桥梁荷载试验规程》的应力校验系数（试验弹性值/理论值）来判定结构强度、刚度、弹性工作状态及相应的安全储备。另外，也能较好判定墩台的稳定性。拱肋、主梁及吊杆关键测点校验系数汇总如表2所示，工况一满载时主梁及拱肋线形结果曲线如图3~图4所示。

表2 静载试验各测试项关键测点校验系数一览表

测试构件	位置	工况一			工况二			工况三		
		应变	变形	索力	应变	变形	索力	应变	变形	索力
拱肋	拱顶	0.85	0.85		0.81	0.83		0.82	0.8	
	L/4	0.82	0.83		0.79	0.87		0.76	0.82	
	拱脚	0.75	0.8		0.72	0.78		0.7	0.76	
主梁	跨中		0.9	0.89				0.85	0.87	
吊杆	2、3#吊杆						0.8			
	6、7#吊杆			0.86						0.75

由上表可知，该桥的强度与刚度均满足规范要求；由图2可知拱肋实测挠度与理论值分布一致，且实测值均小于理论值。

工况三偏载作用下，主梁两侧翼缘端部及主梁中心线挠度分别为38.94mm、18.66mm、28.74mm，通过线性差值得主梁截面形心处偏载系数为1.25，桥梁空间受力

特征明显。

工况一~工况三主要测点的应变、变形及索力的相对残余为1.3%~5.7%，表明结构处于弹性工作状态；工况一作用时，2#、3#墩沉降量为-0.19~0.18mm，数据整体平稳，数据波动与测试误差量级基本相同，表明墩柱沉降量未发现明显变化。

综上,该桥静力性能满足设计荷载要求。

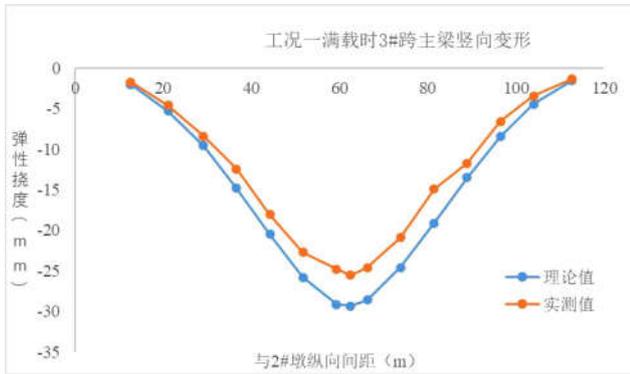


图3 工况一满载时3#跨主梁竖向变形

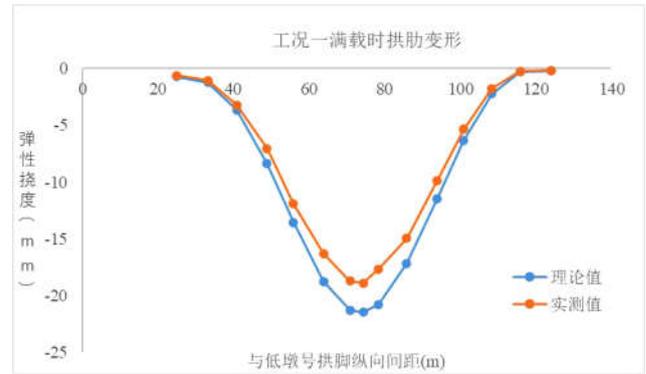


图4 工况一满载时拱肋竖向变形

3 动力特性理论及试验分析

桥梁动力特性主要关注自身振动特性(自振频率、振型及阻尼比)和动力响应(冲击系数)。鉴于该桥空间受力特性明显,需重点关注桥梁振型。利用有限元分析得到桥梁自振频率、振型与冲击系数。试验时通过脉动试验和无障碍行车试验采集数据得到相应实测值。

3.1 自振特性分析

采用有限元分析得出结构自振频率和振型(见图5),同时通过基频计算理论冲击系数。现场进行脉动试验,使用拾振器采集桥梁加速度数据,采用随机子空间分析法得到桥梁的实测振型及自振频率。对比分析详见表3。

表3 桥梁自振频率与振型对比分析

阶数	实测振型	自振频率			阻尼比
		实测值(Hz)	理论值(Hz)	实测值/理论值	
1	一阶扭转	1.313	1.309	1.00	0.595%
2	一阶竖弯	1.746	1.458	1.20	0.316%
3	二阶竖弯	1.791	1.612	1.11	0.514%
4	二阶扭转	1.975	1.908	1.04	0.278%
5	三阶扭转	2.963	2.799	1.06	0.455%
6	三阶竖弯	3.329	2.916	1.14	0.583%

从上表可知,桥梁前六阶振型与理论振型基本一致,计算实测自振频率较理论值大说明结构刚度比理论刚度大。

3.2 冲击系数试验分析

本桥冲击系数测试通过采集中跨主梁跨中底板在重车以(10、20、30、40、50)km/h无障碍行车时动应变分析计算获得。

为了充分考虑桥梁运营时车辆通行状况,本次无障碍行车试验分为3种情形:①2辆车左、右幅各1辆同速度同向行驶由0#台至5#台通过桥梁;②2辆车一起经右幅由0#台至5#台同速度同向行驶通过桥梁;③2辆车一起经左幅由5#台至0#台同速度同向行驶通过桥梁。

将测试数据经滤波后再使用三点法^[4]计算各种试验情况下不同车速时主梁的冲击系数。经统计分析可知,3#跨主梁冲击系数为0.012~0.125,其中左、右幅冲击系数分别为0.016~0.125和0.012~0.103。另外,当2辆车以

40km/h一起经左幅由5#台至0#台同向行驶通过桥梁时,得到桥梁最大冲击系数为0.125,较规范计算的理论冲击系数0.083大,表明桥梁动力放大效应较明显。

4 总结

4.1 静力性能

经过对试验跨进行的静载试验及详尽的数据分析,我们得出以下主要结论:本次静载试验的主要工况试验效率均满足《试验规程》中规定的 $0.85 \leq \eta_q \leq 1.05$ 的要求,说明本次静载试验能够准确反映桥跨结构现有的技术状态。本次静载试验结论如下:

第一、在试验荷载作用下,拱顶、拱肋四分点、拱脚及主梁中跨跨中截面的强度满足要求;拱顶、拱肋四分点及主梁中跨跨中刚度均满足设计要求;各测试截面均处于弹性工作状态。

第二、在静载试验过程中2#、3#墩柱的沉降量未发生明显变化,桥梁墩柱处于稳定状态,为后期桥梁与下

穿地铁的开通运营提供了安全保障。

第三、偏心加载测试可知桥梁偏载系数为1.25，相较于设计中考虑的1.15的偏载系数偏大，表明桥梁空间受力特征明显。

综上，试验跨测试截面的整体受力性能满足设计荷载（城-A级）的要求，证明了桥梁结构的安全性、稳定性及可靠性。

4.2 动力性能

通过对试验联进行动载试验及数据分析，得到如下结论：

第一、桥梁3#跨（主跨）梁底的实测最大冲击系数为0.125，桥梁动力放大效应较明显；

第二、桥梁前六阶振型、自振频率与理论振型、频率值基本吻合，结构处于正常受力状态，且结构实际刚度较理论刚度大。

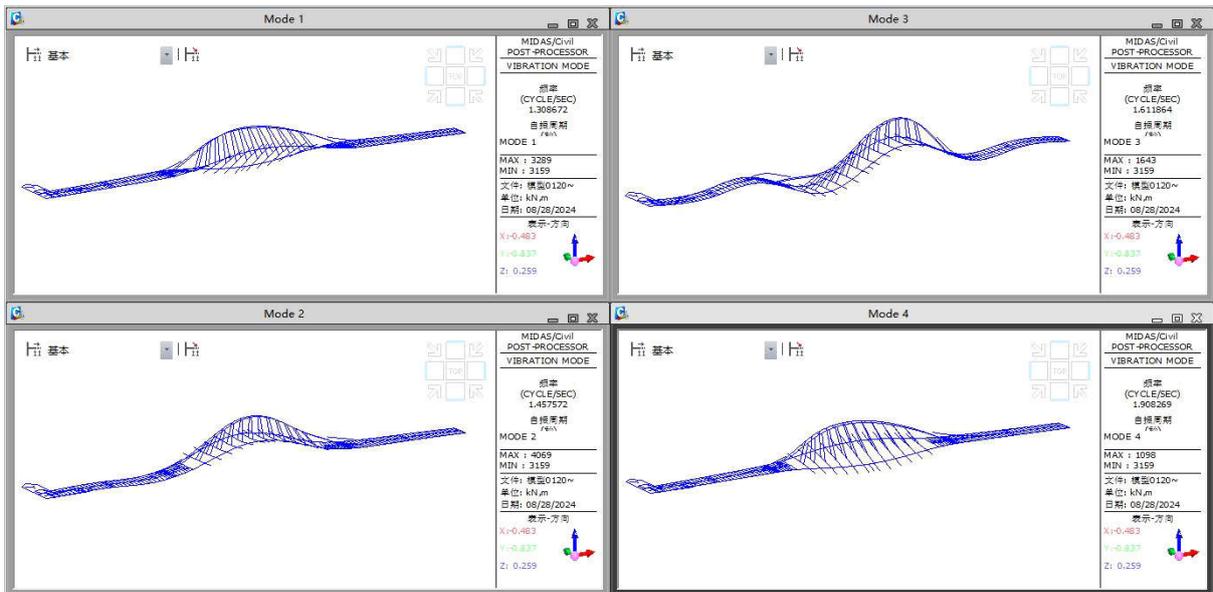


图5 桥梁前六阶理论振型 (1.2.3.4)

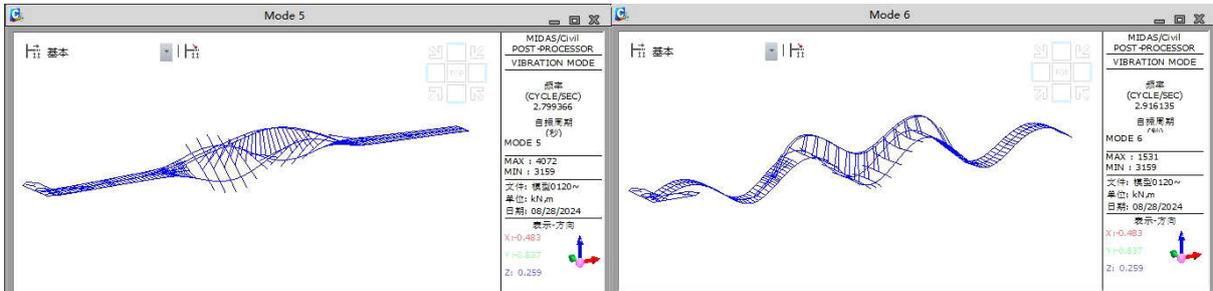


图6 桥梁前六阶理论振型 (5.6)

5 建议

基于静、动载试验的结果，结合桥梁站桥一体的特殊结构，建议如下：

第一、加强桥梁相关部位的检查与健康监测，特别关注薄壁杆件、桥面板及横隔板根部区域焊缝等易出现应力集中现象的部位，确保这些区域的安全储备情况符合设计要求；

第二、考虑到桥梁为站桥一体结构，地铁运行中的振动可能会对桥梁结构产生影响，建议加强对桥梁振动的监测，以便及时发现并处理任何异常情况；

第三、引导重型车辆靠内侧或中间车道行驶，同时限制超出设计标准的车辆过桥，以减少对桥梁结构的潜在损害，确保桥梁的安全运营。

通过实施以上建议，可以进一步提高桥梁结构的稳定性和安全性，延长其使用寿命，为公众提供更加安全、可靠的交通环境。

结束语

通过本次静载和动载试验，我们对该新型结构桥梁的性能进行了全面评估。试验结果表明，桥梁在强度和刚度方面均满足设计要求，且在动态荷载作用下表现

出良好的性能。尽管偏载效应及冲击较明显，但整体而言，桥梁结构的安全性和稳定性得到了验证。未来，我们建议加强桥梁关键部位的检查与健康监测，并限制超出设计标准的车辆过桥，以确保桥梁的安全运营。本次试验为桥梁的竣工验收提供了科学依据，并为未来类似桥梁的设计和维护提供了有价值的参考。

参考文献

- [1]盛兴旺,等.确定刚架系杆拱桥合理成桥状态和成桥吊杆力的方法探讨[J].广东建材,2024,44(01):190-192.
- [2]李亚东.桥梁工程概论[M].成都:西南交通大学出版社,2023,(01):60-62+86.
- [3]方芳,杨轩,武时宇,刘钊.中跨采用梁拱组合的三跨连续梁桥参数分析与结构设计[J].现代交通与冶金材料,2024,(04):93-96.
- [4]长安大学.公路桥梁荷载试验规程[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021,41(04):30-32.