DOI 编码：10.13646/j.cnki.42-1395/u.2022.03.050

枯柯河大桥荷载试验研究

罗瑛[1]，施汝军[2]，黄林[3]，张森[4]

（1. 保山公路局，云南 保山 678000；2. 云南云岭公大公路工程有限公司，云南 昆明 650051；
3. 云南省公路信息中心，云南 昆明 650051；4. 云南省公路科学技术研究院，云南 昆明 650051）

摘　要：本文以枯柯河大桥为工程背景，对其进行了荷载试验，其中，静载试验测试了该桥桥跨结构控制截面的应变与挠度，动载试验通过无障碍行车试验、有障碍行车试验测试该桥桥跨结构的动力响应和冲击系数，最后，通过脉冲试验测试了固有模态、阻尼比及各阶振型。试验结果表明：各试验工况下桥跨结构的结构校验系数均处于合理范围，表明桥跨结构具有足够的刚度储备和强度储备。桥梁的实测频率高于理论计算频率，实测阻尼比属正常范围，桥梁的动力性能良好。桥跨结构实测无障碍行车动力增大系数、有障碍行车动力增大系数，桥跨结构的激振响应正常。

关键词：桥梁工程；荷载试验；效率系数；检验系数；承载能力

中图分类号：TU1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006—7973（2022）03-0149-03

1 引言

桥梁荷载试验是判断桥梁结构实际承载能力最直观的方法[1]。通过施加荷载使桥梁达到某种最不利受力状态，使桥梁产生变位或振动等响应，从而获得桥梁特定截面的应变、位移、加速度等数据。按照桥跨结构的受荷反应，可将施加荷载分为静载和动载，静载试验是指将静止的荷载施加到桥梁结构的指定位置，测试桥梁控制截面的静应变、静位移及裂缝等数据。从而推断出桥梁结构在荷载作用下的工作状态和使用能力[2-3]。动载试验是使用激振力使桥梁发生振动，测得桥梁的振动信号，得出相应的振型、周期、阻尼等数据来评价桥梁的动力特性[4-5]。

本文以枯柯河大桥荷载试验为背景，对桥梁结构的实际承载能力进行评价，为后续的投入使用提供依据。

2 工程概况及试验编号

2.1 工程概况

枯柯河大桥左右线孔跨布置为：1×40+(80+150+80)+1×40m。其中主桥采用跨度的（80+150+80）m 变截面预应力混凝土连续刚构箱梁桥，箱梁根部梁高 9.2m，跨中梁高 3.2m。箱梁顶板横向宽 12.5m，箱底宽 7.0m，翼缘悬臂长 2.75m。桥梁编号布置图及立面见图 1。

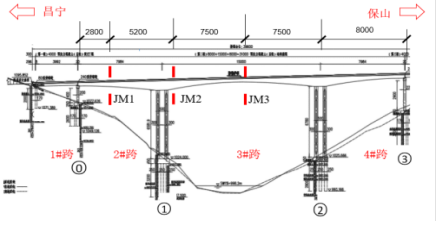


图 1　枯柯河大桥立面图

2.2 试验编号

本次检测以“昌宁→保山”方向为前进方向，面向路线前进方向，左手边为左侧，右手边为右侧。如图 1 所示。

3 荷载试验

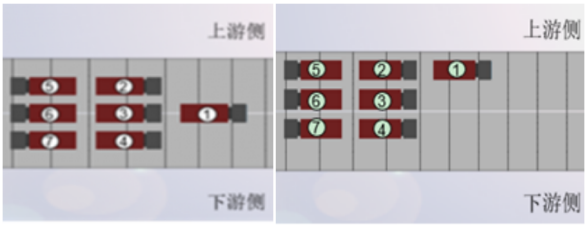
3.1 静载试验方案及车辆布置

枯柯河大桥为一座连续刚构桥，由于桥跨结构和墩台刚性连接，在竖向荷载作用下，会在主梁的端部产生较大的支座负弯矩，结合其受力特点，拟定试验工况如表 1 所示：

表 1　试验工况表

序号	位置	截面编号	内容
1	2#跨	JM1	最大正弯矩（中载）
2	3#跨	JM1	最大正弯矩（偏载）
3	1#墩&3#跨	JM2&JM3	最大负弯矩&最大正弯矩（中载）
4	1#墩&4#跨	JM2&JM3	最大负弯矩&最大正弯矩（中载）

中载和偏载加载车车辆横向分布位置布置图见图 2。



（a）中载加载车位置示意图　（b）偏载加载车位置示意图

图 2　车辆位置布置

3.2 试验荷载加载效率

为确保试验数准确可靠，静载试验荷载施加效率应

满足下式规定：

$$0.85 \le \eta_q = \frac{S_s}{(1+\mu)\ S'} \le 1.05$$

式中：Ss －静力荷载作用下，试验工况所对应控制截面的内力计算值。

S' －设计荷载作用下控制截面内力计算值；

μ －规范规定的冲击系数；

ηq －静力试验的荷载加载效率。

通过计算各工况效率系数介于 0.862~1.023 之间，均满足加载效率要求。

3.3 动载试验方案

本次动载试验需检验该桥的自振特性及结构动力响应，故拟定测验工况如表 3 所示。

表 3　动载工况表

工况序号	工况类型	车速 km/h	工况描述
工况 I	无障碍行车试验	20	2 辆加载车并排同步行驶，匀速通过桥跨结构。通过动力测试系统测定测试截面处的动应变时间历程曲线
工况 II		30	
工况 III		40	
工况 IV	跳车试验	20	1 辆加载车匀速行驶至中跨 L/2 处跨越障碍物，测试结构动应变响应，以观察桥梁结构动力响应情况。
工况 V		30	
工况 VI		40	

3.4 测点布置

桥梁静载试验加载方案，结合该桥的受力特点，选取 JM1、JM2 和 JM3 作为控制截面（如图 1 所示）。

挠度测点布置于桥跨的两端、L/4 和跨中位置，每个截面布置 2 个测点，共布置 18 个测点，布置见图 3。

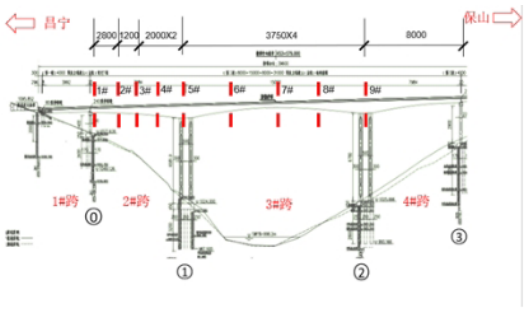


图 3　挠度测点布置图

应力测点布置：JM1、JM3 截面的 1~5# 应变测点均布置于箱梁底部，6# 测点位于左侧翼缘，7#、8# 测点分别位于腹板外侧；每个截面 8 个测点，共 16 个测点。

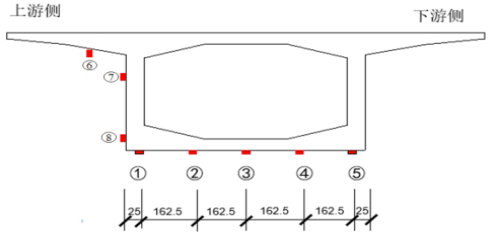


图 4　JM1、JM3 应变测点

JM2 截面的 1~4# 应变测点布置在左侧翼缘，5~8# 应变测点布置在腹板外侧。该截面共布置 8 个测点，具体布置图如图 5 所示。

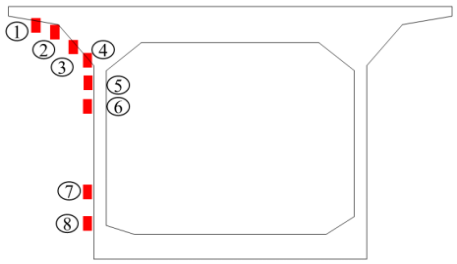


图 5　JM2 应变测点

说明：图中“”标记为应变测点。

在桥梁中跨跨中底板布置五个动应变测点（纵向），布置如图 6 所示：

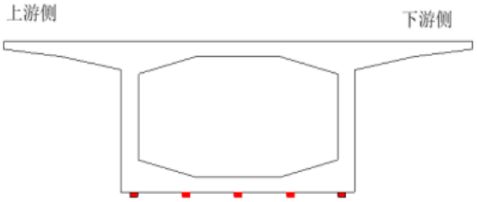


图 6　动载应变测点示意图

4 试验结果分析

4.1 静载试验结果分析

该桥的应变测点数据及其相应的理论值，校验系数和相对残余应变见表 4、表 5。各工况静载试验作用下，桥梁未发生明显的形变，也未出现明显的裂缝。荷载施加后，各测点的应变增量均处于合理范围，其变化规律与理论值一致，每个测点的实测应变增量比相应的理论计算值小。多数测点应变校验系数在 0.6~0.7 内，表明该桥的强度安全储备较高，有一定的富余量。卸载后，各测点的应变恢复能力强，其相对残余应变的最大值为 17.40%，满足规范要求。

表 4　各工况应变校验系数表

	JM1-1	JM1-2	JM1-3	JM1-4	JM1-5	JM1-6	JM1-7	JM1-8
工况 1	0.69	0.631	0.672	0.765	0.686	0.823	0.853	0.72
工况 2	0.665	0.611	0.635	0.612	0.65	0.668	0.775	0.626
	JM3-1	JM3-2	JM3-3	JM3-4	JM3-5	JM3-6	JM3-7	JM3-8
工况 3	0.663	0.669	0.66	0.673	0.642	0.789	0.784	0.638
工况 4	0.633	0.631	0.618	0.706	0.697	0.721	0.795	0.635
	JM2-1	JM2-2	JM2-3	JM2-4	JM2-5	JM2-6		
工况 3	0.669	0.624	0.669	0.644	0.654	0.626		
工况 4	0.612	0.665	0.612	0.6	0.608	0.63		

表 5　各工况残余应变表

	JM1-1	JM1-2	JM1-3	JM1-4	JM1-5	JM1-6	JM1-7	JM1-8
工况 1	0.57%	11.08%	8.80%	9.95%	2.79%	2.26%	12.40%	2.05%
工况 2	1.77%	0.30%	0.62%	2.70%	6.33%	15.60%	6.80%	4.36%
	JM3-1	JM3-2	JM3-3	JM3-4	JM3-5	JM3-6	JM3-7	JM3-8
工况 3	4.10%	11.60%	1.90%	11.90%	11.00%	9.80%	12.90%	9.90%
工况 4	2.16%	1.79%	10.85%	3.64%	3.03%	12.16%	4.81%	2.26%
	JM2-1	JM2-2	JM2-3	JM2-4	JM2-5	JM2-6		
工况 3	17.40%	6.40%	14.80%	4.10%	1.24%	5.98%		
工况 4	7.60%	5.40%	11.00%	9.80%	0.65%	3.16%		

表 6　挠度校验系数表

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
A-2	0.754	0.751		
A-3	0.787	0.816		
A-4	0.705	0.7		
B-2	0.754	0.726		
B-3	0.787	0.769		
B-4	0.705	0.79		

表 7　相对残余变形汇总表

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
A-2	17.00%	14.50%		
A-3	14.60%	12.00%		
A-4	16.70%	14.30%		
B-2	14.60%	18.40%		
B-3	14.60%	18.20%		
B-4	16.70%	17.60%		
A-6			14.50%	14.50%
A-7			10.60%	10.60%
A-8			10.40%	10.40%
B-6			6.90%	6.90%
B-7			1.70%	1.70%
B-8			3.00%	2.90%

结构在荷载作用下的变形是衡量结构工作性能的另一个重要指标，其挠度校验系数及相对残余应变见表 6、表 7。试验结果表明：该桥的刚度和强度都有较高的安全储备，抵抗和恢复变形的能力较强，其实际的承载能力能够满足正常使用要求。

4.2 动载试验结果分析

本项目采用桥梁结构分析专用有限元程序 Midas Civil 对枯柯河大桥进行结构动力分析，获取结构的自振频率和振型计算结果，为测点布置和评估分析提供理论依据，一阶至三阶竖向弯曲振型计算频率分别为 1.102Hz、1.894Hz，2.424Hz，本桥脉动工况下模态试验测试结果见表 8。

表 8　模态分析结果表

序号	自振特性	理论自振频率 (Hz)	实测自振频率 (Hz)	实测阻尼比
1	一阶竖向自振	1.102	1.216	0.018
2	二阶竖向自振	1.894	2.184	0.013
3	三阶竖向自振	2.424	2.696	0.021

表 9　实测动力响应及结果分析见表

工况	工况类型	车速 (km/h)	测试截面	理论冲击系数	实测动力放大系数
工况 I	无障碍行车试验	20	JM3	1.05	1.019
工况 II		30			1.029
工况 III		40			1.025
工况 IV	跳车试验	20		/	1.206
工况 V		30			1.140
工况 VI		40			1.208

桥梁自振特性测试得到主桥一阶竖向实测振动频率为 1.216 Hz，大于相应的理论计算值 1.102 Hz，实测振型与理论振型基本吻合，表明结构的整体刚度较大。

不同车速的无障碍行车作用下，实测桥跨最大冲击系数为 0.029，小于依据《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60–2015）第 4.3.2 条计算值 μ=0.05，表明桥面总体较平顺；桥梁结构在跳车工况下冲击系数比无障碍行车（匀速跑车）工况下冲击系数明显增大，最大值为 0.208，表明桥面铺装不平整或局部缺陷会给桥梁结构的工作状况带来不利的影响，保持桥面平整度对改善桥梁结构的受力行为较为重要。

5 结论

（1）桥梁结构的刚度和强度都具有充足的富余量，抵抗和恢复变形的能力强，能够满足实际运营需求

（2）桥梁的实测频率高于理论计算频率，实测阻尼比属正常范围，桥梁的动力性能良好。

（3）桥跨结构实测无障碍行车动力增大系数、有障碍行车动力增大系数，与同类型桥梁相比，桥跨结构的激振响应正常。

参考文献：

[1] 唐利科，贾毅，纪云涛，李福海，赵人达．高墩大跨连续刚构桥的荷载试验 [J]. 铁道建筑，2017(07):43–46.

[2] 张哲，邵旭东，李文光，朱平，陈洪．超高性能混凝土轴拉性能试验 [J]. 中国公路学报，2015,28(08):50–58.

[3] 任东华，唐英．基于可靠度理论的桥梁荷载试验效率的研究 [J]. 铁道建筑，2013(11):5–7.

[4] 巴力，钟鸣，梁志广．混凝土连续刚构桥加固前后荷载试验效果分析 [J]. 铁道建筑，2009(03):56–59.

[5] 贾毅，王永宝，廖平．金鱼大桥成桥荷载试验研究 [J]. 铁道建筑，2016(06):33–35.