

基于荷载试验的直腹式带翼小箱梁桥 承载能力研究

潘文超, 袁胜涛, 游鹏升, 聂良鹏, 许鹏

(云南通衢工程检测有限公司, 云南 昆明 650041)

摘要:为评价直腹式带翼小箱梁桥在荷载作用下的受力状况和工作性能,通过静载试验测试在偏载和中载作用下主梁各断面测点的应力和位移,通过动载试验测试桥梁的固有基频、阻尼比和冲击系数,分析桥梁的承载能力。结果表明,在静力荷载作用下,该桥挠度和应变校验系数均未超出规范容许值,结构工作性能很好,相对残余应变和相对残余变形最大值分别为 8.33%、2.94%,均未超出规范容许值,桥梁整体处于弹性变形阶段;在动力荷载作用下,桥梁第 1 阶竖向自振频率为 10.866 Hz,阻尼比为 0.015%,应变冲击系数为 1.08~1.27,竖向实测基频大于计算基频,桥梁整体刚度满足规范要求。

关键词: 桥梁;直腹式带翼小箱梁桥;承载能力;荷载试验

中图分类号: U446.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)04-0120-05

过桥车辆超载在中国十分普遍,桥梁超负荷运营会增加桥梁损伤概率。常通过荷载试验了解桥梁的真实受力状况,评估其承载能力,如杨松等对某三跨简支变连续小箱梁桥进行了静载试验;周宏宇等对城际轨道交通高架桥进行了车行疲劳累积损伤试验研究;王燕等对新建变截面连续箱梁桥进行了静动载试验与性能评价;刘大鹏对变截面预应力混凝土箱梁桥进行了荷载试验分析;Demek B. 等对斜交小箱梁动力特性进行了试验分析;Mohseni Iman 等研究了中横隔板对多室箱梁荷载横向分布的影响;杨美良等通过荷载试验研究了组合式小箱梁桥荷载横向分布;钟小军通过空间有限元计算和荷载试验,分析了装配式小箱梁桥荷载横向分布。该文通过荷载试验分析直腹式带翼小箱梁桥在荷载作用下的承载能力。

1 工程概况

某直腹式带翼小箱梁桥,上部结构由 6 片 20 m 预应力混凝土箱梁组成,桥跨连接为简支变连续,各箱梁之间横向无横隔梁连接,腹板为直腹式;下部结构由肋板桥台、双柱桥墩和墩台桩基础组成。全长 60 m,共三跨;桥梁总宽为 0.5 m+10 m+0.5 m;梁高为 1.8 m。桥面铺装由 10 cm 厚 C50 混凝土和无机防水层组成,桥面横坡为 2%,设计荷载等级为公路—I 级。

2 静载试验

2.1 静载试验原则

静载试验主要测试桥梁上部主体结构各控制截面测点的应变、位移及卸载后残余应变和残余变形,评价桥梁主体结构性能。采用载重汽车模拟设计荷载,在梁体结构控制截面内力影响线最不利位置加载,使其试验荷载效率系数满足规范要求。通过计算分析确定静载试验所需载重车的重量,载重车轴距见图 1。

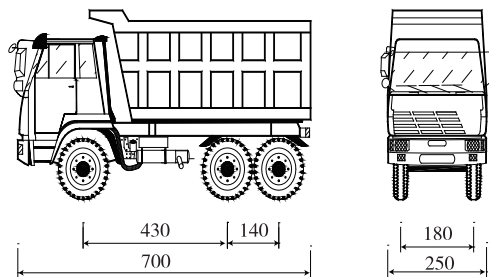


图 1 试验车辆示意图(单位:cm)

应变测试:应变片布置于测试截面箱梁底部和箱梁腹板,其电阻为 120 Ω ,灵敏度系数为 2.08,标距为 10 cm。采用 DH3819 无线静态应变测试仪回收数据。

挠度测试:在各控制截面箱梁顶部布设挠度测点,采用徕卡全站仪测量桥梁挠度。

2.2 测试截面及测点布置

根据受力最不利原理,选择 1[#] 跨作为测试跨,主要测试 1[#] 跨 J1、J2 截面各主梁的应力及变形,测试截面布置见图 2。在各控制截面箱梁底部和 5[#]

梁侧面布设应变测点,沿大里程方向,从左往右,J1 断面布设 18 个应变测点,J2 断面布设 12 个应变测点,其中 J2 断面腹板未设置应变测点;在各控制截面底部布设挠度测点(见图 3)。

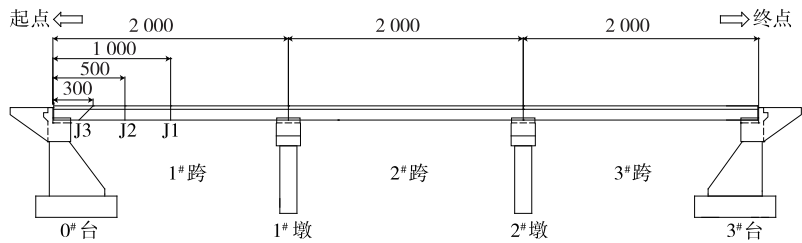


图 2 测试截面布置(单位:cm)

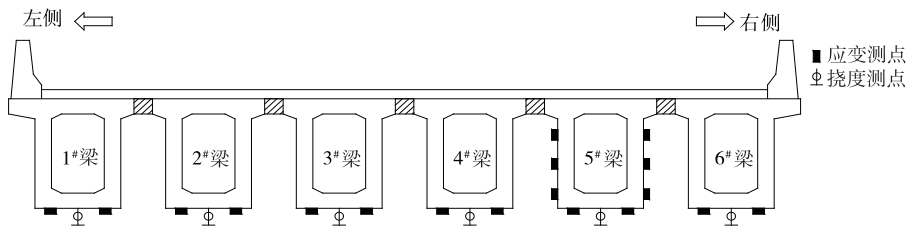


图 3 各控制截面应变和挠度测点布置(单位:cm)

2.3 荷载布置与测试工况

在 1[#] 跨 J1 和 J2 截面依次进行加载,每个截面沿横向布置 2 辆加载车,加载方式分为中载和偏载;每个截面纵向加载车以相同的方式布置,其中梁端剪力截面加载方式为偏载。结构计算按公路—Ⅰ级在最不利位置布载,取控制截面最大正弯矩加载截面的控制值。荷载试验工况见表 1。

表 1 荷载试验工况

荷载工况	控制截面	加载方式	测试内容
工况 1	J1 截面	偏载	挠度与应变
工况 2	J1 截面	中载	挠度与应变
工况 3	J2 截面	偏载	挠度与应变
工况 4	J2 截面	中载	挠度与应变

2.4 静载试验效率

根据控制内力等效原则选择测试车数量和轴重,使静载效率 η_q 为 0.85~1.05,满足公路—Ⅰ级荷载效应要求。该桥静载效率值见表 2。

表 2 静载试验荷载效率系数

工况	荷载效应/(kN·m)		荷载效率系数 η_q
	试验	设计	
工况 1	1 497.5	1 580.3	0.95
工况 2	1 296.4	1 319.8	0.98
工况 3	1 090.8	1 152.3	0.95
工况 4	897.4	958.1	0.94

2.5 试验结果分析

2.5.1 梁底应变测试结果分析

各工况下 1[#]~6[#] 梁底测点的应变测试值 S_e 、理论值 S_s 、残余值 S_p 和相对残余应变值 S'_p 见表 3。由表 3 可知:各工况下各测点的应变校验系数 η 为 0.46~0.90,说明桥梁结构和材料均符合设计要求,结构整体工作性能良好;相对残余应变最大值为 8.33%,小于规范允许值 20%,说明该桥整体刚度有一定余量,桥梁上部结构处于弹性变形阶段。综上,在受力作用下,各测试截面无异常,桥梁整体处于正常受力状态。

表 3 实测应变与理论应变的比较

工况	梁号	$S_e/\mu\epsilon$	$S_p/\mu\epsilon$	$S_s/\mu\epsilon$	η	$S'_p/\%$
工况 1	1	25	1	31	0.70	4.55
	2	36	1	40	0.90	2.70
	3	49	2	58	0.66	4.88
	4	61	0	71	0.62	0.00
	5	63	1	72	0.56	2.44
	6	65	1	77	0.54	2.38
工况 2	1	35	0	43	0.65	0.00
	2	51	1	61	0.58	2.78
	3	54	1	66	0.56	2.63
	4	55	1	67	0.61	2.38
	5	48	0	61	0.61	0.00
	6	37	2	44	0.68	6.25

续表 3

工况	梁号	$S_e/\mu\epsilon$	$S_p/\mu\epsilon$	$S_s/\mu\epsilon$	η	$S'_p/\%$
工况 3	1	20	1	25	0.46	8.33
	2	27	0	30	0.57	0.00
	3	35	1	42	0.56	4.17
	4	41	1	47	0.55	3.70
	5	42	0	48	0.60	0.00
	6	43	2	51	0.55	6.67
工况 4	1	26	0	35	0.55	0.00
	2	39	1	43	0.58	3.85
	3	40	1	45	0.64	3.33
	4	41	2	46	0.64	6.45
	5	40	0	43	0.63	0.00
	6	28	1	34	0.59	4.76

注:实测弹性值和实测残余值为两测点的平均值。

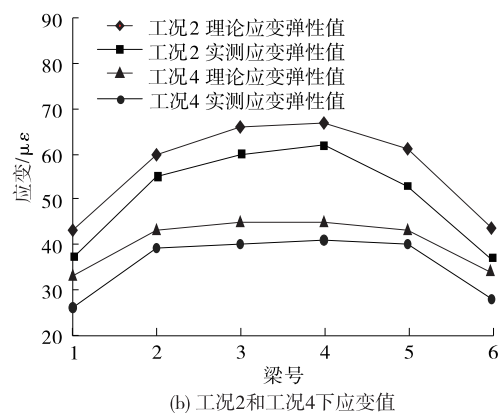
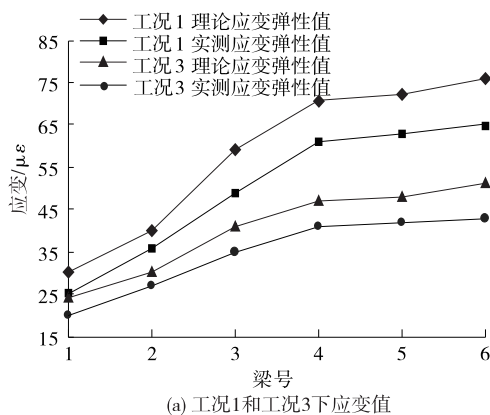


图 4 各工况下理论弹性应变与实测弹性应变对比

表 4 5# 梁侧面实测应变—梁高比较

测点位置	测点高度/cm	实测应变/ $\mu\epsilon$	测点位置	测点高度/cm	实测应变/ $\mu\epsilon$
左腹板上	140	-6	右腹板上	140	-6
左腹板中	70	18	右腹板中	70	18
左腹板下	20	37	右腹板下	20	37

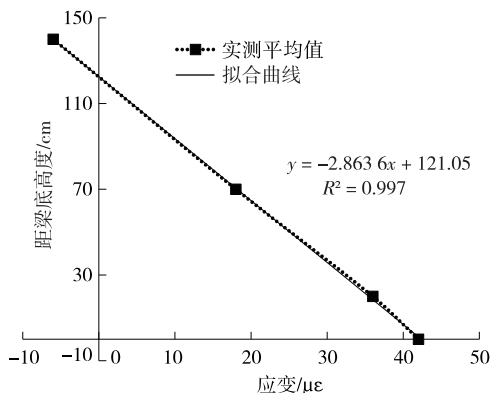


图 5 实测弹性应变—梁高分布

各测点弹性应变与理论弹性应变对比见图 4。由图 4 可知:不同荷载作用下,各截面的测试应变沿桥横向变化规律与计算值一致,且测试值均小于理论值,说明该桥横向力传递正常,桥梁整体刚度分布较均匀。

2.5.2 梁体侧面应变测试结果分析

试验荷载作用下 5# 梁腹板的应变测试结果见表 4。根据测试应变沿梁高度的分布,分析 5# 梁中性轴的高度及工作状态,结果见图 5。

由图 5 可知:5# 梁测试应变分布沿梁高具有良好的线性关系,梁腹板截面的变形符合平面假设,说明 5# 梁在车辆荷载作用下处于弹性变形阶段;根据线性回归方程,5# 梁测试中性轴与梁底距离为 122.15 cm,理论计算中性轴高度为 111.06 cm,两者存在一定偏

差,原因是桥面铺装、混凝土护栏等参与受力,属于正常现象。

2.5.3 挠度测试结果分析

各工况下 1#~6# 梁测点的挠度实测值 f_e 、理论值 f_s 、残余值 f_p 和相对残余变形值 f'_p 见表 5。由表 5 可知:各工况下各测点的挠度校验系数 η 为 0.56~0.98,挠度测试值的最大增量为 2.16 mm,为计算跨径(19.5 m)的 1/9 000,表明结构刚度有一定富余;大部分测点的残余变形为零,表明该桥变形恢复较好;最大相对残余变形为 2.94%,整体结构处于弹性阶段和正常受力状态。

各测点弹性挠度与理论弹性挠度对比见图 6。由图 6 可知:各工况下各测点的弹性挠度值与理论弹性挠度值沿桥横向变化基本一致,且实测弹性挠度均小于理论弹性挠度,表明结构整体横向传力正常,刚度分配较均匀。工况 1 和工况 3 下 6# 梁实测弹性挠度降低,这是由混凝土护栏参与主梁受力所

引起,属于正常现象。

表 5 实测挠度与理论挠度比较

工况	梁号	f_e/mm	f_p/mm	f_s/mm	η	$f'_p/\%$
工况 1	1	0.88	0.00	0.99	0.59	0.00
	2	1.15	0.01	1.28	0.70	1.10
	3	1.56	0.03	1.78	0.74	2.24
	4	1.93	0.02	2.13	0.69	1.34
	5	2.05	0.01	2.26	0.71	0.62
	6	2.16	0.03	2.38	0.56	2.19
工况 2	1	1.15	0.01	1.49	0.59	1.12
	2	1.52	0.01	1.85	0.61	0.88
	3	1.84	0.03	2.04	0.69	2.10
	4	1.86	0.00	2.06	0.68	0.00
	5	1.68	0.00	1.87	0.69	0.00
	6	1.42	0.01	1.51	0.65	1.01
工况 3	1	0.46	0.01	0.58	0.79	2.13
	2	0.66	0.02	0.73	0.90	2.94
	3	0.93	0.02	0.99	0.98	2.02
	4	1.12	0.01	1.18	0.93	0.90
	5	1.18	0.01	1.24	0.92	0.87
	6	1.25	0.03	1.31	0.79	2.80
工况 4	1	0.76	0.01	0.84	0.83	1.41
	2	0.88	0.00	1.03	0.86	0.00
	3	0.97	0.00	1.12	0.97	0.00
	4	1.01	0.01	1.13	0.95	0.93
	5	0.89	0.00	1.05	0.91	0.00
	6	0.77	0.01	0.85	0.85	1.37

注:挠度向下为正,向上为负。

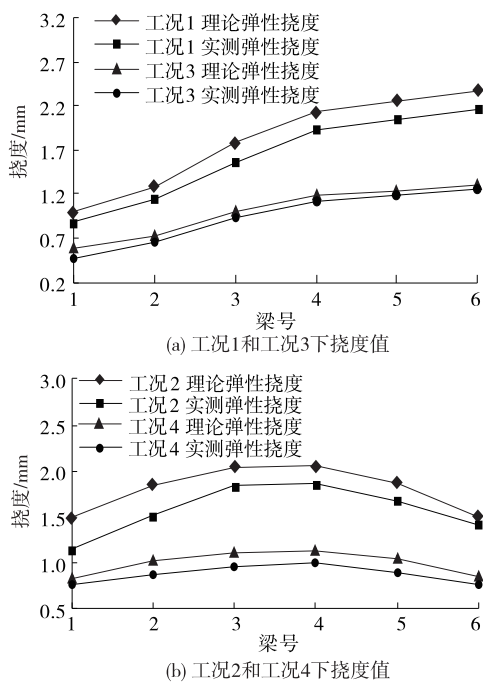


图 6 各工况下理论弹性挠度与实测弹性挠度对比

3 动载试验

3.1 试验方案

动力荷载试验主要包括脉动试验和跑车试验。脉动测试采用 DH5907N 无线模态测试仪测试桥梁自振特性。跑车试验采用 DH5908 动态信号测试仪收集和分析动应变,采用 1 辆 950 kN 的特重汽车以 10~30 km/h 的速度沿行车道中心线匀速过桥,在移动荷载下测试桥梁上部结构的动应变。

3.2 自振特性测试结果分析

根据环境激振下桥梁的动态响应信号和跑车试验的余振信号,可得出桥梁的自振特性和阻尼比。该桥自振基本频率测试值与有限元软件计算值见表 6。

表 6 脉动试验结果与计算值对比

阶次	理论基频/Hz	实测基频/Hz	实测阻尼比/%	实测基频/理论基频
1 阶	9.508	10.866	0.015	1.143
2 阶	12.897	13.993	0.022	1.085

由表 6 可知:实测基频高于理论固有基频,表明结构刚度高于理论刚度;1 阶、2 阶竖弯实测基频与理论基频的比值分别为 1.143、1.085,满足 ≥ 0.9 的要求,该桥整体结构刚度较强;1 阶、2 阶测试竖弯振型与理论振型吻合较好,阻尼比很小,表明桥梁整体性能良好,结构具有较强的抗衰减能力。

3.3 冲击系数测试结果分析

选择 1# 跨 J1、J2 截面的 3# 梁、4# 梁进行跑车试验,测试车辆荷载作用下桥梁上部结构的动态应变,根据动态应变的峰值和谷值计算应变冲击系数,结果见表 7。根据理论计算基频,该桥理论计算冲击系数 $\mu=0.39$ 。

表 7 冲击系数测试值

测试截面	行车速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	最大动应变/ $\mu\epsilon$	冲击系数
J1	10	23	1.08
	20	26	1.16
	30	31	1.22
J2	10	17	1.15
	20	21	1.18
	30	24	1.27

由表 9 可知:随着车速的提高,冲击系数递增,但变化很小,最大冲击系数为 1.27,相应动应变增量

为 0.27, 小于理论计算值 0.39, 桥面行车舒适。

4 结论

(1) 各工况下桥梁静载效率为 0.94~0.98, 在规范允许值 0.85~1.05 范围内。

(2) 各工况下偏载和中载挠度校验系数为 0.56~0.98, 应变校验系数为 0.46~0.90, 表明桥梁整体刚度较大且具有一定富余。

(3) 各工况下测试截面 10 个测点的相对残余变形和残余应变均为零, 相对残余应变和残余变形最大值分别为 8.33%、2.94%, 都未超出 20% 的规范极限值, 表明该桥整体处于弹性工作状态, 整体刚度较大。

(4) 根据动载试验结果, 该桥竖向 1 阶、2 阶振实实测频率与理论频率的比值分别为 1.143、1.085, 满足规范 ≥ 0.9 的要求; 动态应变增量为 0.27, 小于理论计算值 0.39, 表明桥面行车舒适, 桥梁结构满足承载力要求。

参考文献:

- [1] 杨松, 石泽雄. 某三跨简支变连续小箱梁桥静载试验[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020(10): 295—298.
- [2] 周宏宇, 麻全周, 赵晓花, 等. 城际轨道交通高架桥车行

疲劳累积损伤试验研究[J]. 工业建筑, 2020(10): 282—290.

- [3] 王燕, 张飞. 新建变截面连续箱梁桥静动载试验与性能评价[J]. 铁道建筑, 2021, 61(3): 19—23.
- [4] 刘大鹏. 变截面预应力混凝土箱梁桥荷载试验分析[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2020, 19(1): 66—72.
- [5] DEMEKE B Ashebo, TOMMY H T Chan, LING Yu. Evaluation of dynamic loads on a skew box girder continuous bridge[J]. Engineering Structures, 2007, 29(6): 1052—1063.
- [6] MOHSENI Iman, RASHID Khalim Abdul, KANG Junsuk. Effect of intermediate diaphragm on lateral load distribution factor of multicell box-girder bridges[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(7): 2128—2137.
- [7] 杨美良, 石恩崇. 先简支后连续斜交小箱梁桥荷载横向分布研究[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 142—146.
- [8] 钟小军. 装配式小箱梁桥荷载横向分布系数探究[J]. 中国市政工程, 2013(2): 17—19.
- [9] 交通运输部公路科学研究院. 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.
- [10] 宋泽冈, 邓旭东. 空腹式肋拱桥静载试验与荷载横向分布分析[J]. 中外公路, 2018, 38(1): 83—86.

收稿日期: 2021—08—13

(上接第 85 页)

略小于规范要求的 3 000 Pa·s, 高于 SBS 改性沥青和 70# Esso 重交沥青, 说明在 70# Esso 重交沥青中加入高强改性剂和抗车辙剂会大大增强沥青的黏性, 其工作性能有所降低, 但不影响其正常工作。

(5) 高温性能、抗水损害性能方面, 新型高强沥青混合料优于 SBS 改性沥青混合料。

(6) 进口高强沥青的成本为 13 000 元/t, 新型高强沥青的成本为 6 000 元/t, 仅为进口高强沥青的 46.15%, 新型高强沥青具有明显的价格优势。

参考文献:

- [1] 柳叶芳, 郝永峰, 王法雨, 等. 天然岩沥青改性沥青性能的 SHRP 试验研究[J]. 现代交通技术, 2011, 8(1): 4—6+19.
- [2] 赵晓康, 刘晨, 郑晨, 等. 基于 DSR 的沥青 SHRP 试验指标研究[J]. 河南科技, 2015(11): 76—77.
- [3] 李海军, 黄晓明. SHRP 沥青性能分级量度的探讨[J]. 公路交通科技, 2006, 23(2): 36—38.
- [4] 宋志宇, 陈兆坤. BRA(布敦岩沥青)改性沥青常规试验

指标与 SHRP 试验结果的比较[J]. 科技之友, 2010(17): 13—14.

- [5] 丁红霞, 程国香, 张建峰. SHRP 评价改性沥青的性能研究[J]. 石油沥青, 2012(4): 31—34.
- [6] 陈静云, 赵慧敏. 用 SHRP 方法评价再生沥青性能[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(1): 68—72.
- [7] 冯中良, 贾渝, 王瑞强. SHRP 沥青数据库蜡含量数据分析[J]. 公路, 2008(10): 211—213.
- [8] 郑南翔, 张霞, 李安. 对 SHRP 沥青分级存在问题的探讨[J]. 公路交通科技, 2004, 21(9): 44—46.
- [9] 樊永革, 樊鸿. 美国 SHRP 沥青混合料设计及主要试验方法简介[J]. 黑龙江交通科技, 2003, 26(10): 25—26.
- [10] 张国辉, 陈波, 郭宏斌. SHRP 规范检测标准在长余高速公路改性沥青路面施工中的应用[J]. 东北公路, 2003(3): 49—51.
- [11] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [12] 覃峰. 蔗渣纤维沥青混合料超薄路面层抗腐性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(2): 10—14.

收稿日期: 2021—07—24