

某宽幅连续箱梁桥承载能力评定

贾毅^{1,2}, 田浩^{1,2}, 李晓章¹, 奎智尧^{1,2}

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省抗震工程技术研究中心, 云南 昆明 650500)

摘要 目的 评定宽幅连续箱梁桥在试验荷载下的承载能力及其动力特性, 确定桥梁的使用情况, 为桥梁的运营养护提供可靠的资料。方法 采用现场加载试验的方法及有限元数值模拟分析, 以福贡木尼玛大桥为工程背景, 基于静载试验测定各个工况下桥梁的应力和变形, 并结合动载试验测定桥梁的自振特性及车辆对桥梁的冲击效果, 最后将实测值与有限元结果进行比较和分析。结果 该桥挠度校验系数介于 0.62~0.80, 应变校验系数介于 0.48~0.80, 相对残余应变最大为 19.1%, 第一阶竖向自振频率为 1.17 Hz, 最大冲击系数为 0.022。结论 静载试验数据表明桥梁强度和刚度均满足设计要求, 相对残余位移也未超限, 桥梁的变形恢复能力较好; 动载试验数据表明桥梁桥面较平整。

关键词 连续箱梁桥; 静载试验; 强度; 刚度; 动载试验; 承载能力

中图分类号 TU395 文献标志码 A

Bearing Capacity Evaluation of a Wide Continuous Box Girder Bridge

JIA Yi^{1,2}, TIAN Hao^{1,2}, LI Xiaozhang¹, KUI Zhiyao^{1,2}

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, China, 650500; 2. Earthquake Engineering Research Center of Yunnan, Kunming, China, 650500)

Abstract: Evaluate the bearing capacity and dynamic characteristics of wide continuous box girder bridge under test load, determine the use of the bridge, provide reliable information for bridge operation and maintenance. The method of on-site loading test and finite element numerical simulation analysis are adopted. Taking Munima Bridge in Fugong County as the engineering background, the stress and deformation of the bridge under various working conditions are measured based on the static load test, and combined with the dynamic load test to determine the bridge's natural vibration characteristics and the impact effect of vehicles on the bridge. Finally, the measured values are compared with the finite element results are compared and analyzed. The deflection calibration coefficient of the bridge is between 0.62 and 0.80, the strain calibration

收稿日期: 2021-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52068037); 云南省自然科学基金项目(140520210091); 云南省博士后科研基金项目(109820210012); 云南省人培项目(241120200027)

作者简介: 贾毅(1988—), 男, 博士, 主要从事桥梁检测与承载能力评定等方面研究。

coefficient is between 0.48 and 0.80, the maximum relative residual strain is 19.1%, the first-order vertical natural frequency is 1.17 Hz, and the maximum impact coefficient is 0.022. The static load test data shows that the strength and stiffness of the bridge meet the design requirements, the relative residual displacement does not exceed the limit, the deformation recovery ability of the bridge is better, and the dynamic load test data shows that the bridge deck is relatively flat.

Key words: continuous box girder bridge; static load test; strength; stiffness; dynamic load test; bearing capacity

随着国家深入扶贫,公路事业发展迅猛,桥梁作为道路的关键一环也在日益增加。在桥梁运营过程中,混凝土梁桥易碳化开裂,对桥梁的安全使用产生严重影响。因此对既有桥梁的工作状态进行评估,以确定其各性能状况是否良好显得十分重要。

对于桥梁承载能力的评定,荷载试验是最直接和有效的方法之一。可以基于静载试验测得桥梁的强度和刚度,基于动载试验测得桥梁的自振特性和桥面平整度,从而分析桥梁的工作状态。贾毅等^[1-2]研究了宽幅简支梁桥及高墩大跨连续刚构桥的承载能力;于玲等^[3]采用灰色 $\cos(x^2)$ 变换对箱梁内力进行了比较精准的预测;张征文等^[4]利用荷载试验对有限元模型进行了有效修正;T. Adamakos^[5]等将梁状结构单元空间系统对复合材料桥梁进行建模的新方法应用于弯曲复合材料桥梁的建模,更准确地计算了弯曲复合材料桥梁的内力和变形。目前已有研究主要集中在普通连续箱梁桥的承载能力,而很少有学者对宽幅连续箱梁桥进行研究。基于此,笔者基于福贡木尼玛大桥为工程背景,以荷载试验为手段,对宽幅连续箱梁桥的承载能力和工作性能进行研究。静载试验表明桥梁强度和刚度均满足设计要求,相对残余位移也未超限,桥梁的变形恢复能力较好;动载试验数据表明桥梁桥面较平整。研究结果为宽幅连续箱桥梁的发展和应用提供了有效依据。

1 工程概况

某连续梁桥上部结构为 67 m + 122 m +

67 m 预应力连续箱梁,车道布置形式为 0.5 m (防撞护栏) + 2.5 m (人行横道) + 14.5 m (行车道) + 2.5 m (人行横道) + 0.5 m (防撞护栏) = 20.5 m,桥墩支座顶梁高 7.2 m,跨中位置梁高 3 m,顶宽 20.5 m,底宽 11.5 m,腹板端部厚 90 cm,跨中厚 50 cm,跨中设横隔板一道。大桥设计荷载为城市 - A 级,设计速度为 30 km/h,人群荷载 2.4 kPa。桥型立面图如图 1 所示。

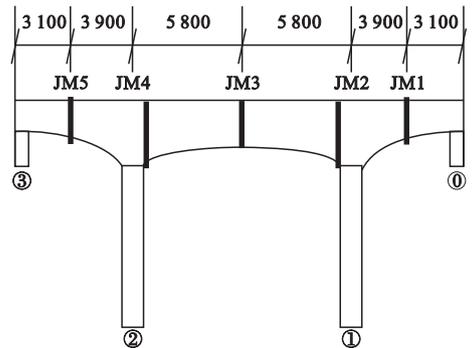


图1 桥型立面及应变测试截面

Fig. 1 Bridge elevation and strain test section

采用专业桥梁结构软件 Midas Civil 建立福贡木尼玛大桥的计算模型(见图 2)。依据《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21—01—2015),结合实际情况按影响线确定试验荷载的大小和位置^[6]。

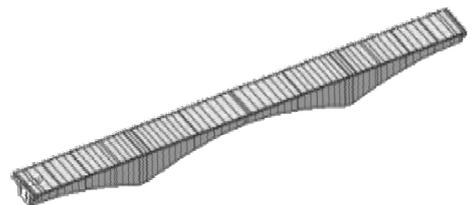


图2 有限元计算模型图

Fig. 2 Finite element model

2 静载试验

2.1 测点布置

为了满足《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21—01—2015)及设计要求,测试截面按照最不利受力原则选定^[7]。JM1、JM3、JM5 测试截面应变测点布置于截面底

板,共 5 个测点,如图 3(a)所示;JM2、JM4 测试截面应变测点布置于截面底板以及靠近顶板位置的侧腹板上,共 6 个测点,如图 3(b)所示。在 L/4 跨、跨中、3L/4 跨、墩台顶处各设 1 个挠度截面(见图 3(c)),各挠度测试截面的测点布置于桥面两侧,共两个测点,分别距人行道路缘石 20 cm(见图 3(d))。

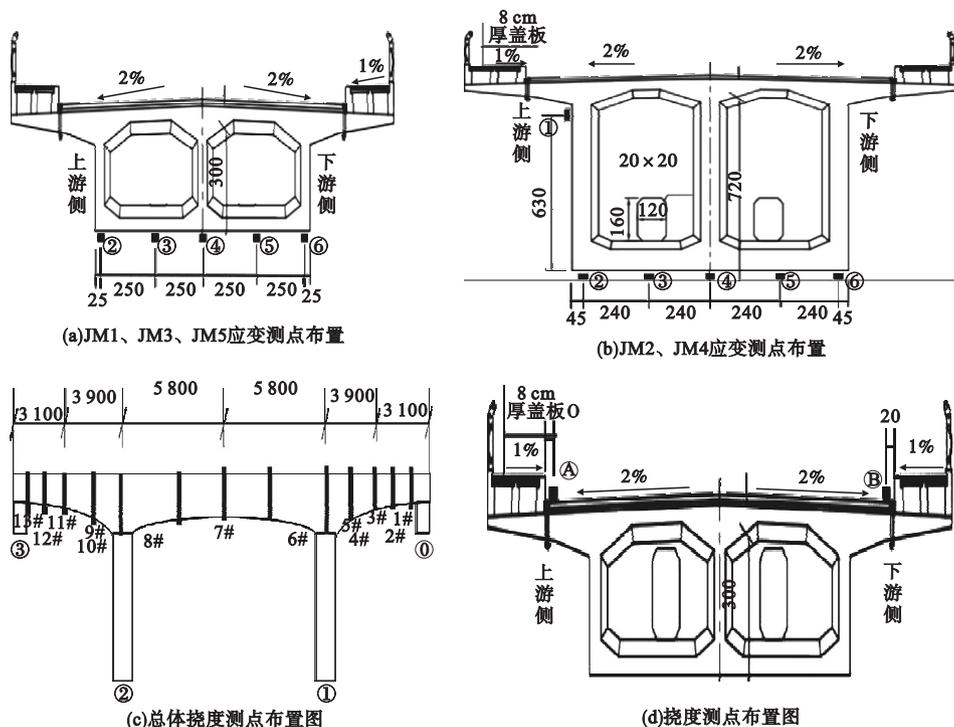


图 3 挠度和应变测点布置

Fig. 3 Arrangement of deflection and strain measuring points

2.2 桥梁静载试验工况

桥梁静载试验主要测其在静力荷载下的变形和位移,是评定桥梁承载能力最直接和最有效的手段和方法^[8-10]。选取关键截面进行加载,一般为结构最不利位置,试验荷载的大小和位置需按内力等效原则确定,使试验荷载和控制荷载的比值控制在规范要求之内,同时确保在加载过程中各个工况的安全处于可控中^[11-12]。

通过计算分析并结合相关规范,静载试验工况有 JM1: 西侧边跨 M_{\max}^+ 工况; JM2: ①号桥墩墩顶 M_{\max}^- 工况; JM3: 中跨 M_{\max}^+ 工况; JM4: ②号桥墩墩顶 M_{\max}^- 工况; JM5: 东侧

边跨 M_{\max}^+ 工况。

2.3 静载试验效率系数

确定车辆的多少是静载试验的关键步骤,按最不利控制内力和内力等效原则来确定车重,使得其荷载效率满足《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21—01—2015)中要求的 $0.95 \leq \eta_q \leq 1.05$ 。根据计算结果,本次试验需要 8 辆 370 kN 级两轴载重车。

已有试验数据表明,当采用中载加载时,桥梁结构最易产生不利影响,计算得到工况 1~工况 10 的荷载效率系数(见表 1)。从表中可以看出,各个工况下荷载效率系数介于 0.95~1.05,满足《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21—01—2015)的要求。

表1 静载试验效率系数
Table 1 Efficiency coefficient of static load test

序号	工况名称	加载位置	截面位置	控制荷载作用下 计算值/(kN·m)	试验荷载作用下 计算值/(kN·m)	荷载效率
1	西侧边跨 M_{\max}^+ 工况	中载	JM1	37 835.0	36 035.8	0.95
		偏载		34 783.0	36 035.8	1.04
2	①号桥墩墩顶 M_{\max}^- 工况	中载	JM2	-81 470.4	-69 386.6	0.85
		偏载		-81 470.4	-69 386.6	0.85
3	中跨 M_{\max}^+ 工况	中载	JM3	36 248.4	34 346.6	0.95
		偏载		36 248.4	34 346.6	0.95
4	②号桥墩墩顶 M_{\max}^- 工况	中载	JM4	-81 470.4	-69 386.6	0.85
		偏载		-81 470.4	-69 386.6	0.85
5	东侧边跨 M_{\max}^+ 工况	中载	JM5	34 783.0	36 035.8	1.04
		偏载		34 783.0	36 035.8	1.04

2.4 挠度测试结果

在工况1~工况10的作用下,测得各个测点的挠度,并与其对应的挠度理论值相比较,结果如图4所示,各个工况下的挠度校验系数如图5所示。从图4可以看出,在试验荷载作用下,每个截面测点测得的挠度值均小于其相应的理论计算值。桥跨结构挠度曲线光滑连续,与理论计算曲线走向一致,表明桥跨结构整体工作性能正常。从图5可以看出,挠度校验系数在0.62~0.80,满足《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21—01—2015)的要求,表明结构刚度符合设计要求。

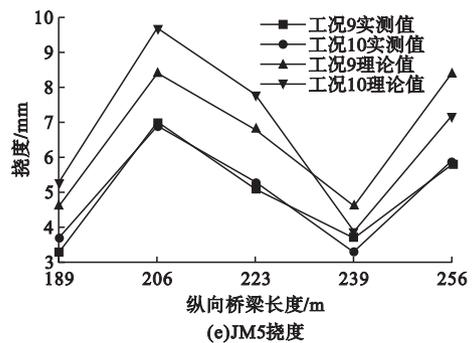
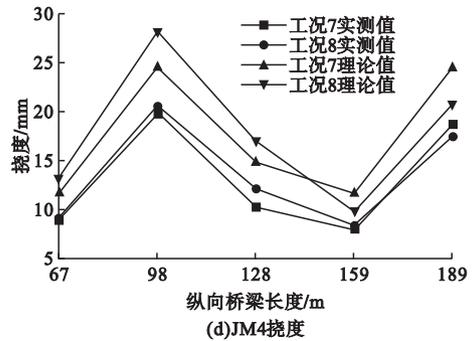
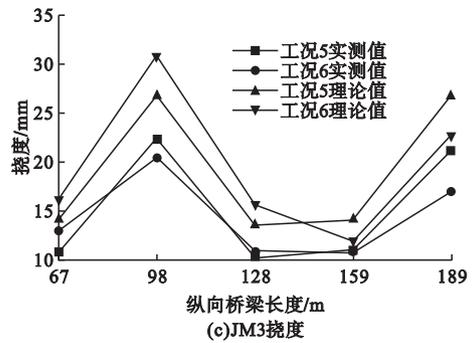
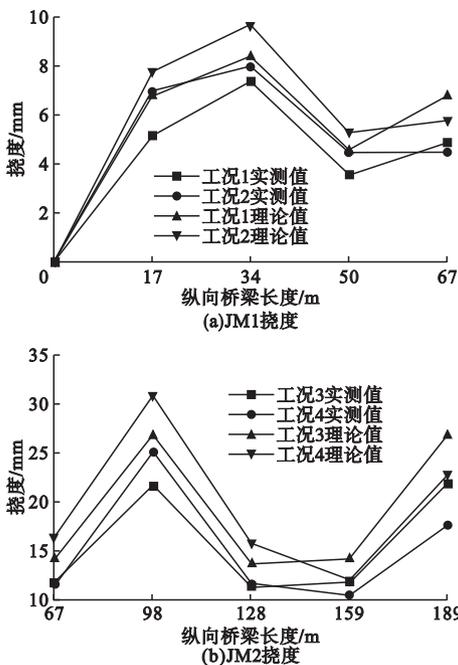


图4 各截面挠度结果

Fig. 4 Results of deflection of each section

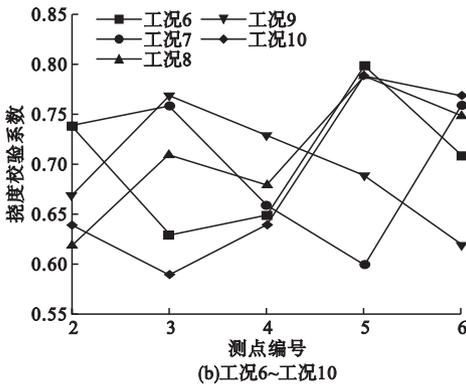
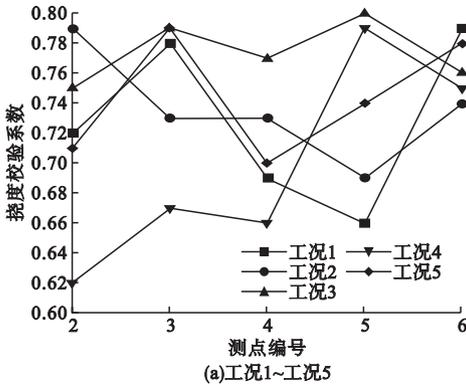


图 5 各工况下的挠度校验系数

Fig. 5 Deflection check coefficient under various working conditions

2.5 应变测试结果

在各工况试验荷载作用下,测试主梁各测试截面中各测点的应变值,并与相应的有限元结果进行对比,其中应变以受拉为正,受压为负。采用 DH3819 应变测试系统分别对各个测点进行应变测试,主要测试这些截面的弹性应变值及总应变值以确定其受力性能。在工况 1~工况 10 作用下,各截面应变实测值、理论值和应变检验系数如图 6、图 7 所示,相对残余应变结果见表 2。

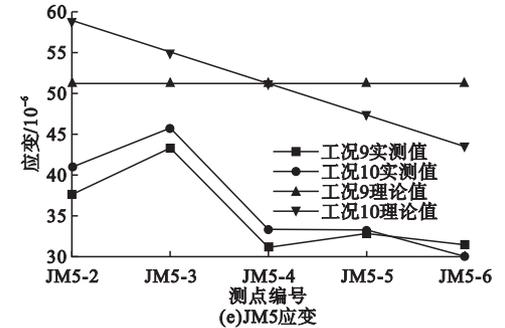
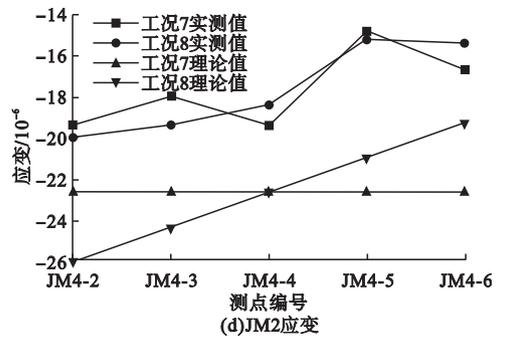
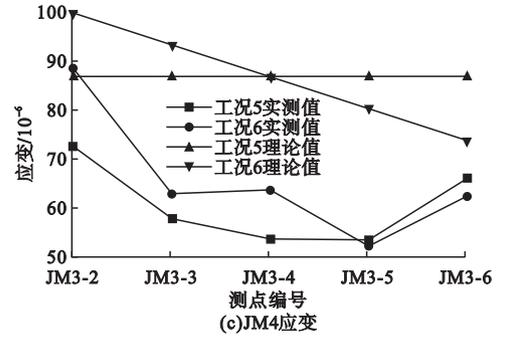
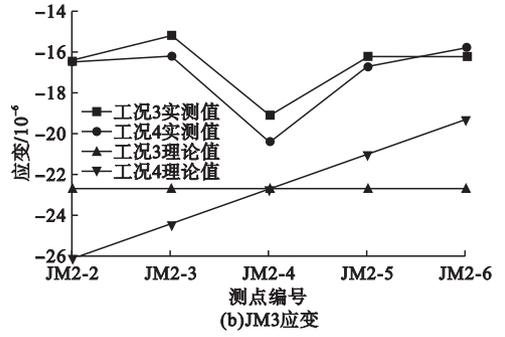
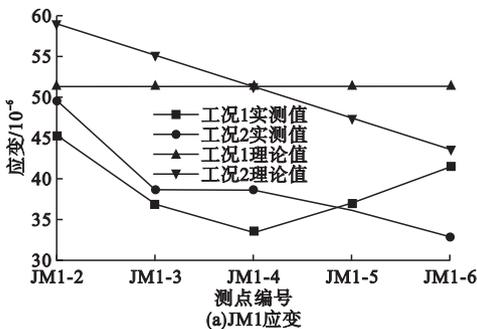


图 6 各工况下应变对比图

Fig. 6 Strain comparison diagram under various working conditions

从图 6 可以看出,在荷载作用下,各截面的应变值均小于其相应的理论值,桥梁强度满足设计要求。从图 7 看出,各工况下应变校验系数在 0.48~0.80;从表 2 可以看出,相对残余应变均小于 20%。结构强度和刚度均满足设计要求。

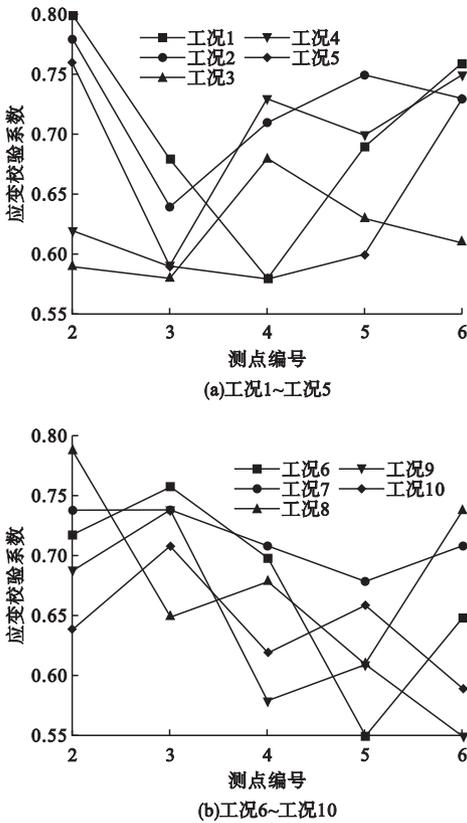


图7 各工况下应变校验系数

Fig. 7 Strain check coefficient under various working conditions

表2 相对残余应变

Table 2 Relative residual strain

截面位置	相对残余应变/ 10^{-2}				
	测点②	测点③	测点④	测点⑤	测点⑥
JM1	9.3	5.7	10.2	4.6	6.0
	7.3	8.8	5.4	1.1	3.3
JM2	18.9	13.8	18.8	11.1	14.2
	2.4	10.5	19.1	12.0	8.9
JM3	9.2	11.2	6.0	2.2	4.7
	10.9	3.3	6.9	6.7	11.9
JM4	14.3	16.0	3.9	17.5	15.5
	5.4	3.0	6.7	12.0	6.6
JM5	6.1	12.0	4.5	5.2	9.8
	8.0	14.2	5.4	6.3	14.3

3 动载试验

3.1 自振特性测试

本次桥梁结构的动载试验包括脉动试验、无障碍行车试验、有障碍行车试验^[13]。桥梁结构的自振特性(自振频率、阻尼比和振型)是桥梁的一种固有特性^[14]。笔者采用环境随机激振法(脉动法)进行测试,利用DH5907N无线桥梁模态测试分析系统进行桥梁结构模态分析。经数据分析处理后得到结构自振频率实测值与其相应的理论计算值,结果见表3。

表3 模态分析结果

Table 3 Results of modal analysis

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	0.95	1.17	0.005
2	二阶竖向自振	1.98	2.15	0.002
3	三阶竖向自振	2.75	2.88	0.002

3.2 动应变分析

无障碍行车试验用于测试桥面行车道铺装层较平整,车辆正常行驶的状况^[15-18]。用37 t的货车1辆,分别以表4中各个工况的速度通过桥梁,测量桥梁的动力响应,通过软件分析得到冲击系数。有障碍行车试验是车辆通过路面缺陷所反映的动力响应^[19-20]。用高度5 cm左右的木条模拟路面缺陷,再以表4中速度行驶通过该截面。根据动应变计算出的冲击系数与理论冲击系数结果见表4。

3.3 动载试验结果

通过模态试验分析得到该桥前三阶竖向频率分别为1.17 Hz、2.15 Hz、2.88 Hz,均大于相应的理论值(0.95 Hz、1.98 Hz、2.75 Hz)。表3数据表明,桥梁的前三阶竖向频率大于相应的理论值,其实际刚度要优于理论刚度^[21]。

表4 动载试验各工况实测及分析结果

Table 4 Measured and analyzed results of dynamic load test under various working conditions

工况类型	工况	车速/(km·h ⁻¹)	测试截面	理论冲击系数	实测动力放大系数
无障碍行车试验	工况 I	5	JM3(中跨 L/2)	1.05	1.011
	工况 II	10	JM3(中跨 L/2)	1.05	1.021
	工况 III	20	JM3(中跨 L/2)	1.05	1.022
跳车试验	工况 IV	5	JM3(中跨 L/2)	1.05	1.100
	工况 V	10	JM3(中跨 L/2)	1.05	1.120
	工况 VI	20	JM3(中跨 L/2)	1.05	1.076

根据表4可知,在动应变测试试验中,比较桥梁试验冲击系数与理论计算冲击系数,无障碍行车时的最大冲击系数 $\mu_{\max} = 0.022$,小于《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中的冲击系数 $\mu = 0.05$,表明桥梁的冲击效应满足上述规范要求。该桥的实测自振特性及动力响应满足设计要求。

4 结 论

(1)某连续箱梁桥静载和动载试验表明,该桥挠度校验系数介于0.62~0.80,应变校验系数介于0.48~0.80,表明桥梁实际情况优于理论情况。同时测点的实测值(应变、挠度)均小于其相应的理论值,说明该桥符合设计要求。

(2)桥梁结构卸载后的相对残余应变最大值为19.1%,均小于20%,说明桥梁结构变形能迅速恢复,桥梁结构弹性较好。

(3)桥梁的前三阶竖向实测振动频率均大于相应的理论值,实测振型与理论振型较吻合,表明结构的整体刚度较大。

(4)无障碍行车工况下,桥梁的最大冲击系数小于规范值,表明桥面总体较平顺;桥梁有障碍行车工况下测得 $\mu_{\max} = 0.12$,是无障碍工况的6倍左右,表明桥面行车道不平整会影响桥梁的工作性能。

参考文献

[1] 贾毅,霍龙飞,李福海,等.某宽幅简支梁桥荷载试验研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(5):847-854.

(JIA Yi, HUO Longfei, LI Fuhai, et al. Load test study of a wide-simple supported beam bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33 (5): 847-854.)

[2] 贾毅,赵人达,李友河,等.高墩大跨连续刚构桥静动载试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(3):470-478.

(JIA Yi, ZHAO Renda, LI Youhe, et al. Static and dynamic load test for high-pier longspan continuous rigid frame bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(3): 470-478.)

[3] 于玲,宋吉宏,姜毅超,等.基于灰色理论对桥梁荷载试验的控制[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(6):1083-1089.

(YU Ling, SONG Jihong, JIANG Yichao, et al. Bridge load test based on the grey theory [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(6): 1083-1089.)

[4] 张征文,李永庆.基于荷载试验数据修正桥梁结构有限元计算模型的研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(2):233-240.

(ZHANG Zhengwen, LI Yongqing. Study of bridge structure FEM updating based on load test experimental data [J]. Journal of Xi'an university of architecture and technology (natural science edition), 2014, 46 (2): 233-240.)

[5] ADAMAKOS T, VAYASI, PETRIDIS S, et al. Modeling of curved composite I-girder bridges using spatial systems of beam elements [J]. Journal of constructional steel research, 2011, 67(3): 462-470.

[6] 谌润水,胡钊芳.公路桥梁荷载试验[M].北京:人民交通出版社,2003.

(SHEN Runshui, HU Zhaoang. Road and bridge load test [M]. Beijing: People's Transportation Press, 2003.)

[7] 刘学.钢筋混凝土桥梁技术状况及承载力评定方法[D].长春:吉林大学,2018.

(LIU Xue. Technology situation and carrying capacity assessment method of the reinforced concrete bridges [D]. Changchun: Jilin University, 2018.)

[8] 刘金平.独塔混合梁斜拉桥承载力的检测与评定[J].世界桥梁,2011(4):28-32.

- (LIU Jinping. Inspection and evaluation of load bearing capacity of a single pylon hybrid girder cable-stayed bridge [J]. World bridges, 2011 (4):28-32.)
- [9] 贾毅,廖平,王永宝,等. 基于荷载试验的三跨简支斜桥承载能力研究[J]. 建筑科学与工程学报,2017,34(1):76-83.
(JIA Yi, LIAO Ping, WANG Yongbao, et al. Research on bearing capacity of three-span simply supported skew bridge based on load test [J]. Journal of building science and engineering, 2017, 34(1):76-83.)
- [10] 杜朝伟. 在役桥梁结构检测鉴定与加固技术[M]. 北京:黄河水利出版社,2013.
(DU Chaowei. In-service bridge structure detection and reinforcement technology [M]. Beijing: The Yellow River Water Conservancy Press, 2013.)
- [11] 聂建国,李法雄,樊健生,等. 大跨钢-混凝土连续组合箱梁桥双重组合作用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(2):133-138.
(NIE Jianguo, LI Faxiong, FAN Jiasheng, et al. Double composite action of large-span steel-concrete composite continuous box-girder bridges [J]. Journal of Tsinghua university (natural science edition), 2012, 52(2):133-138.)
- [12] 李运生,史莉莉,王铮峰. 钢-混凝土简支组合箱梁桥在车辆荷载作用下的动力响应及冲击系数研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2012,25(1):7-13.
(LI Yunsheng, SHI Lili, WANG Zhengfeng. Research on dynamic response and impact factor of simple steel-concrete composite box beam bridges under vehicle loads [J]. Journal of Shijiazhuang tiedao university (natural science), 2012, 25(1):7-13.)
- [13] 贾毅,张莉亚,吴德宝,等. 某简支组合梁桥荷载试验研究[J]. 计算力学学报,2018,35(2):182-187.
(JIA Yi, ZHANG Liya, WU Debao, et al. Study on the load test of a simple branch combination beam bridge [J]. Chinese journal of computation mechanics, 2018, 35(2):182-187.)
- [14] 贾毅,唐利科,李福海,等. 基于荷载试验的预应力简支T梁桥承载能力评估[J]. 工业建筑,2017,47(4):71-75.
(JIA Yi, TANG Like, LI Fuhai, et al. Bearing capacity evaluation of a prestressed simply supported T girder bridge based on load testing [J]. Industrial construction, 2017, 47(4):71-75.)
- [15] 伍贤智,姜志刚,王敏. 基于静动载试验的钢-UHPC组合桥面应用研究[J]. 桥梁建设,2021,51(5):67-73.
(WU Xianzhi, JIANG Zhigang, WANG Min. Study of application of steel-UHPC composite deck based on static and dynamic load tests [J]. Bridge construction, 2021, 51(5):67-73.)
- [16] 王俊德,孙立. 某连续T梁桥荷载试验分析[J]. 建筑结构,2018,48(增刊1):241-243.
(WANG Junde, SUN Li. Load test analysis of a continuous T-beam bridge [J]. Building structure, 2018, 48(S1):241-243.)
- [17] 张劲泉,赵仲华,花迎春. 虎门悬索桥交工验收静力荷载试验与评价[J]. 公路交通科技,2000,5(17):31-34.
(ZHANG Jinquan, ZHAO Zhonghua, HUA Yingchun. Static loading test and assessment for completion acceptance of Humen suspension bridge [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2000, 5(17):31-34.)
- [18] 侯宁,王修山. 考虑结构损伤的在役混凝土桥梁有限元模型修正方法[J]. 公路交通科技,2021,38(10):64-71.
(HOU Ning, WANG Xiushan. A method for updating FE model of in-service concrete bridge considering structural damage [J]. Journal of highway and transport technology, 2021, 38(10):64-71.)
- [19] 王伟. 宽幅矮塔斜拉桥成桥荷载试验研究[J]. 公路,2015(10):72-77.
(WANG Wei. Load test study of extradosed cable-stayed bridge with wide deck [J]. Highway, 2015(10):72-77.)
- [20] 武勇. 武汉天兴洲公铁两用长江大桥主桥荷载验收试验研究[J]. 桥梁建设,2010(1):11-16.
(WU Yong. Study of acceptance load testing of main bridge of Wuhan Tianxingzhou Changjiang river rail-cum-road bridge [J]. Bridge construction, 2010(1):11-16.)
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 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,2016.
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Road and bridge load test procedures: JTG/T J21—01—2015 [S]. Beijing: People's Transportation Press, 2016.)
- (责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)