

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202303102024081988

文章编号:1674-599X(2024)04-0032-08

引用格式:贾毅,黄子秋,韦朝宽,等.高墩大跨连续刚构桥的荷载试验研究[J].交通科学与工程,2024,40(4):32-39.

Citation: JIA Yi, HUANG Ziqiu, WEI Chaokuan, et al. Research on load test of long-span continuous rigid frame bridge with high piers[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 32-39.

# 高墩大跨连续刚构桥的荷载试验研究

贾毅<sup>1</sup>,黄子秋<sup>1,2</sup>,韦朝宽<sup>1</sup>,柳其钱<sup>1</sup>

(1.昆明理工大学 建筑工程学院,云南 昆明 650500;2.云南交通运输职业学院,云南 安宁 650300)

**摘 要:**为探明某高墩大跨连续刚构桥在正常运营状态及最不利受力状态下的动静态荷载特性,基于成桥荷载试验方法,开展不同车辆位置、车速等条件下大跨连续刚构桥动静荷载现场试验。试验主要包括正载及偏载两种情况,静荷载试验测试了这两种情况下的主梁应变与挠度,动荷载试验分别在20、30、40 km/h车速下,通过无障碍行车试验和刹车试验,测试了桥梁的冲击系数、自振频率及动应变。在采集处理完现场数据后,将其与有限元软件的理论计算结果进行对比分析。研究结果表明:该连续刚构桥在正载及偏载两个工况下,挠度和应变实测值均小于理论计算值,相对残余应变最大值为18.8%,相对残余挠度最大值为11.71%,均不超过20%;在动载试验中,主桥一、二、三阶竖向实测振动频率均大于理论计算值;该连续刚构桥承载能力满足要求。

**关键词:**连续刚构桥;动静荷载试验;承载能力;冲击系数;自振频率

中图分类号:TU395

文献标志码:A

## Research on load test of long-span continuous rigid frame bridge with high piers

JIA Yi<sup>1</sup>, HUANG Ziqiu<sup>1,2</sup>, WEI Chaokuan<sup>1</sup>, LIU Qiqian<sup>1</sup>

(1. School of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Vocational College of Transportation, Anning 650300, China)

**Abstract:** To investigate the dynamic and static load characteristics of a high-pier long-span continuous rigid frame bridge under normal operational conditions and the most unfavorable stress states, dynamic and static load field tests were conducted based on the bridge load test method. These tests considered various vehicle positions and speeds. The testing encompassed two primary scenarios: positive load and partial load. In the static load tests, the strain and deflection of the main beam under these two conditions were measured. Dynamic load tests assessed the bridge's impact coefficient, natural frequency, and dynamic strain through barrier-free driving and braking tests at speeds of 20, 30, and 40 km/h. Upon collecting and processing the field data, a comparative analysis was performed against theoretical calculations obtained from finite element software. The results indicate that the measured deflection and strain values of the continuous rigid frame bridge are lower than the theoretical values under both positive and partial load conditions. The maximum relative residual strain is found to

收稿日期:2023-03-10

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)

通信作者:贾毅(1988—),男,副教授,主要从事高性能纤维混凝土、桥梁检测与承载能力评定等方面的研究工作。E-mail: h846793187@163.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

be 18.8%, and the maximum relative residual deflection is 11.71%, both of which are below 20%. Furthermore, the measured vertical vibration frequencies of the first, second, and third mode of the main bridge exceed the theoretical values. Overall, the bearing capacity of the continuous rigid frame bridge meets the required standards.

**Key words:** continuous rigid frame bridge; dynamic and static load test; carrying capacity; impact coefficient; natural frequency

交通工程是我国现代化建设的重中之重,而公路、桥梁又是交通网络中既基础又重要的组成部分。为保证桥梁在其运营期间的安全,桥梁养护工作已成为确保桥梁安全运营的必要手段<sup>[1]</sup>。桥梁在不同工况下的应变、挠度、自振频率等响应数据可作为评估桥梁健康与安全的重要依据<sup>[2]</sup>。目前,荷载试验是检验各种桥梁(斜拉桥、拱桥、悬索桥等)性能及工作状态最直接、最有效的方法<sup>[3]</sup>。近年来,随着西南地区交通的发展,高墩大跨连续刚构桥得到了广泛应用。由于其独特的结构形式,高墩大跨连续刚构桥与常规简支梁桥的荷载试验有所不同<sup>[4]</sup>。

葛新民等<sup>[5]</sup>为了最大限度地确保桥梁的健康与安全,提出了考虑剪力、弯矩及扭矩共同作用的荷载试验加载方案。邵贵平等<sup>[6]</sup>、李辉<sup>[7]</sup>对大跨连续刚构桥的开裂截面进行加固,并对加固前后的荷载试验数据进行分析,结果表明,通过施加黏性钢板及体外预应力可使桥梁的结构刚度有所提升。国内外许多学者对各种桥型结构进行了大量荷载试验及理论研究<sup>[8-9]</sup>,但基于连续刚构桥荷载试验结果对桥梁结构的健康状态及安全性能进行评估的研究尚在起步阶段<sup>[10]</sup>。此外,在公路交通网络中,连续刚构桥占比较大,其受力也较为复杂<sup>[11]</sup>。因此,开展连续刚构桥荷载现场试验,并对桥梁结构的健康与安全状态进行评估具有非常重要的理论研究和工程实践意义。

本文以云南省会泽县白鹤滩水电站大水沟大桥为工程背景,进行大水沟大桥动静荷载试验,得出该桥在不同工况下的荷载响应参数,并通过数据分析来判断桥梁的日常运营状况,综合评估该连续刚构桥的健康与安全状态,为今后不同桥型的健康与安全评估以及相关规范的编制提供一定的试验数据和理论依据。

## 1 工程概况及有限元模型

### 1.1 工程概况

大水沟大桥位于云南省会泽县,是会泽县白鹤

滩水电站淹没道路的复建工程之一。该桥梁上部结构主桥为长(73.0+135.0+73.0) m的变截面预应力混凝土连续刚构桥;箱梁采用单箱单室截面,顶宽9.50 m,底宽5.50 m,悬臂长2.00 m,悬臂端部厚0.20 m,根部厚0.75 m;根部梁高8.30 m,端部梁高3.00 m,其间梁高按二次抛物线变化;根部腹板厚0.70 m,跨中腹板厚0.50 m,在 $L/4$ ( $L$ 为桥长)附近通过一个节段线性变化;顶板厚0.30 m;0号块顶板厚0.50 m,底板厚1.20 m,腹板厚0.90 m。设计荷载为公路-I级荷载。大水沟大桥箱梁结构横截面图见图1,大水沟大桥挠度测试截面的挠度测点布设在桥面两侧,距车道护栏底10 cm,每个截面2个测点。JM1~JM3截面的应变测点布设在箱梁截面底板及两侧翼缘上,每个截面5个测点,如图2所示。

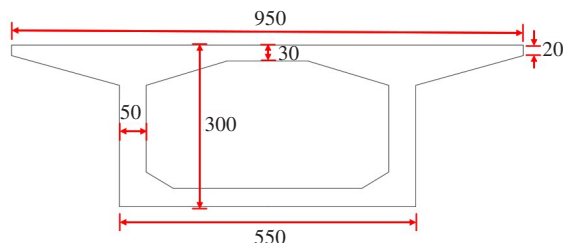


图1 大水沟大桥箱梁结构横截面(单位:cm)

Fig. 1 Cross section of box girder structure of Dashuigou Bridge (unit: cm)

### 1.2 有限元模型

采用大型有限元软件 Midas Civil 2020 针对大水沟大桥建立模型,并对其结构内力进行计算分析。有限元模型及由其得到的弯矩如图3所示。

## 2 荷载试验方案

### 2.1 静载试验

桥梁上部结构在受到静力荷载时会产生弯矩与形变,可通过观测结构在静力作用下形变与弯矩的变化来确定桥梁的健康状态。若观测结果未超过设计期望值,则说明桥梁的工作状态良好,满足规范要求<sup>[12]</sup>。根据结构力学理论,通过有限元软件

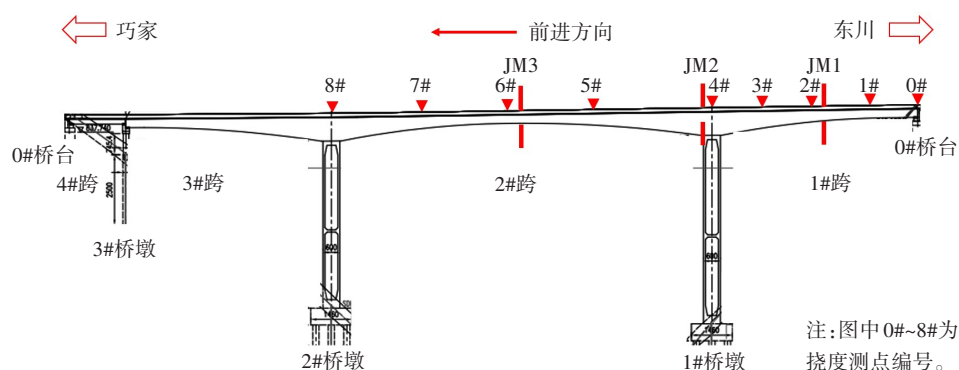


图2 大水沟大桥立面图(单位:cm)

Fig. 2 Elevation drawing of Dashuigou Bridge (unit: cm)

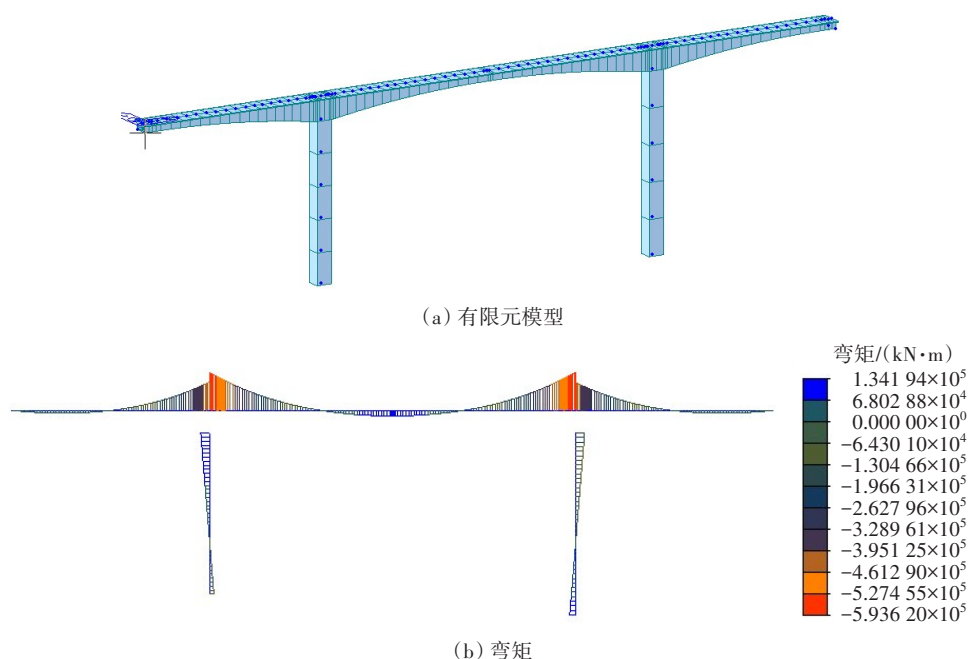


图3 大水沟大桥有限元模型及弯矩

Fig. 3 Finite element model and bending moment diagram of Dashuigou Bridge

计算出桥梁上部结构的最大受力位置,并在该位置布置应变片,以确保试验过程中所采集的数据真实可靠。在试验过程中,尽可能地使控制荷载与试验荷载的比值在规范限值内,同时需要确保桥梁结构在不同试验工况下均处于安全状态<sup>[13]</sup>。

#### 2.1.1 静载试验工况

根据大水沟大桥的结构特点及计算分析结果,本次静载试验共设置6个试验工况。各工况下的试验内容见表1。

#### 2.1.2 测点布置

为了使试验结果能较准确、全面地反映大水沟大桥的承载力状况,根据现场实际情况及计算分析结果,本文将大水沟大桥的1#跨、2#跨作为试验跨,并选取3个控制截面进行试验,即JM1(1#跨最大正

表1 试验工况

Table 1 Loading conditions

工况	试验内容
1	1#跨最大正弯矩加载(正载)
2	1#跨最大正弯矩加载(偏载)
3	1#桥墩支点最大负弯矩加载(正载)
4	1#桥墩支点最大负弯矩加载(偏载)
5	2#跨最大正弯矩加载(正载)
6	2#跨最大正弯矩加载(偏载)

弯矩截面)、JM2(1#桥墩支点最大负弯矩截面)、JM3(2#跨最大正弯矩截面)。各截面应变片的布置如图4所示。

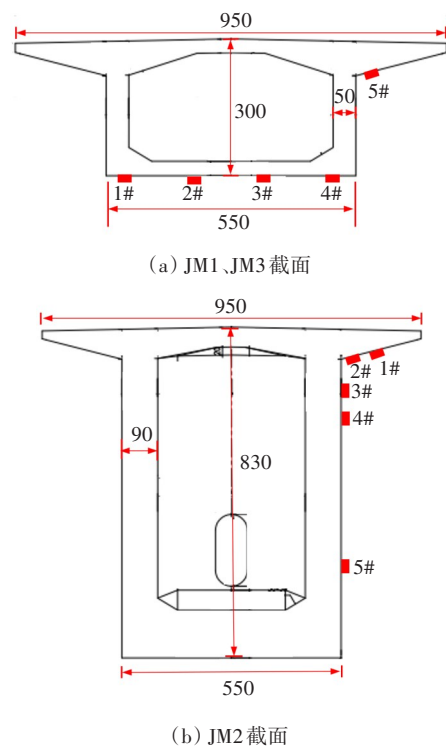


图4 截面应变测点布置示意图(单位:cm)

Fig. 4 Schematic diagram of layout of strain measurement points on the cross-section (unit: cm)

2.1.3 静载试验方法

静载试验以 Midas Civil 2020 计算得到的梁弯矩值作为控制依据,并将质量为 35 t 的加载车布置在桥梁各跨最不利的影响线上。根据有限元软件分别计算试验荷载下与控制荷载下的弯矩值,然后计算荷载效率系数  $\eta_q$ ,其值宜为 0.85 ~ 1.05。荷载效率系数  $\eta_q$  的计算式为<sup>[14]</sup>:

$$\eta_q = \frac{S_s}{(1 + \mu)S'} \quad (1)$$

式中: $S_s$ 为试验荷载作用下的截面弯矩值; $S'$ 为控制荷载作用下的截面弯矩值; $\mu$ 为冲击系数。

大水沟大桥 JM1 ~ JM3 截面在各静载试验工况下的荷载效率系数的计算结果见表 2。

表2 静载试验的荷载效率系数

Table 2 Load efficiency coefficients of static load test

工况	截面	控制荷载	试验荷载	荷载效率 系数
		弯矩/(kN·m)	弯矩/(kN·m)	
1	JM1	16 331.50	16 952.10	1.038
2				
3	JM2	-53 515.40	-45 702.20	0.854
4				
5	JM3	16 233.90	16 104.03	0.992
6				

2.1.4 静载试验结果

桥梁静载试验的结果可作为结构安全性、施工质量、桥梁健康评估的重要依据<sup>[15-16]</sup>。现对各工况下在控制截面测得的应变及挠度数据进行初步分析。由于大水沟大桥的最不利工况为正载工况,因此仅对工况 1、3、5 下的应变、挠度进行分析,结果如图 5 ~ 7 所示。需要注意的是, JM2 截面 4#测点的实测应变由于应变片的脱落而缺失,其数值按零处理,而并非真正为零。

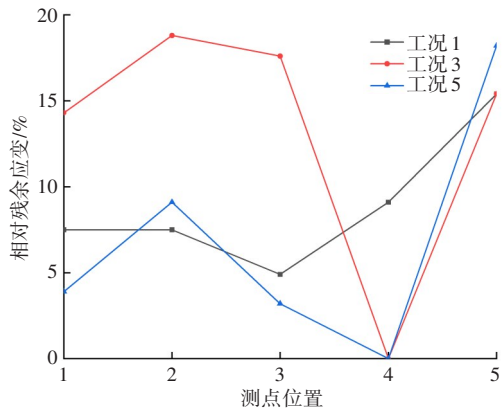


图5 不同工况下相对残余应变的比较

Fig. 5 Comparison of relative residual strain under different loading conditions

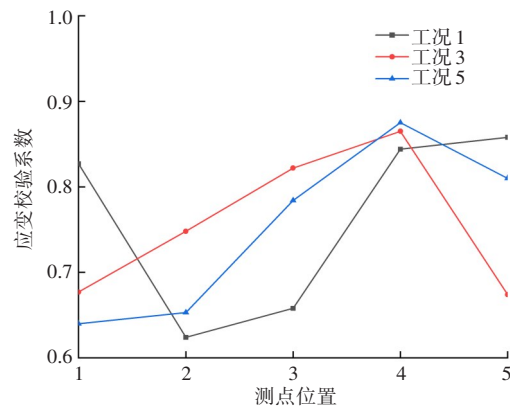
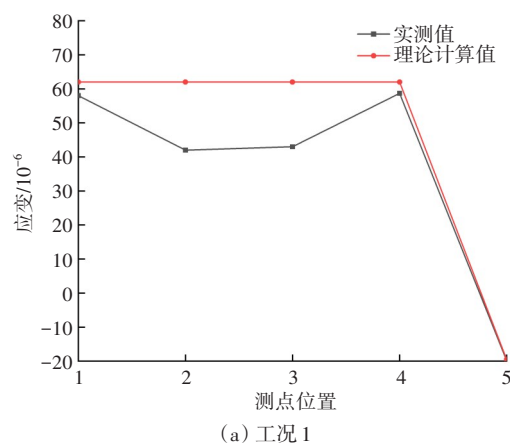


图6 不同工况下应变校验系数的比较

Fig. 6 Comparison of strain calibration coefficients under different loading conditions



(a) 工况 1



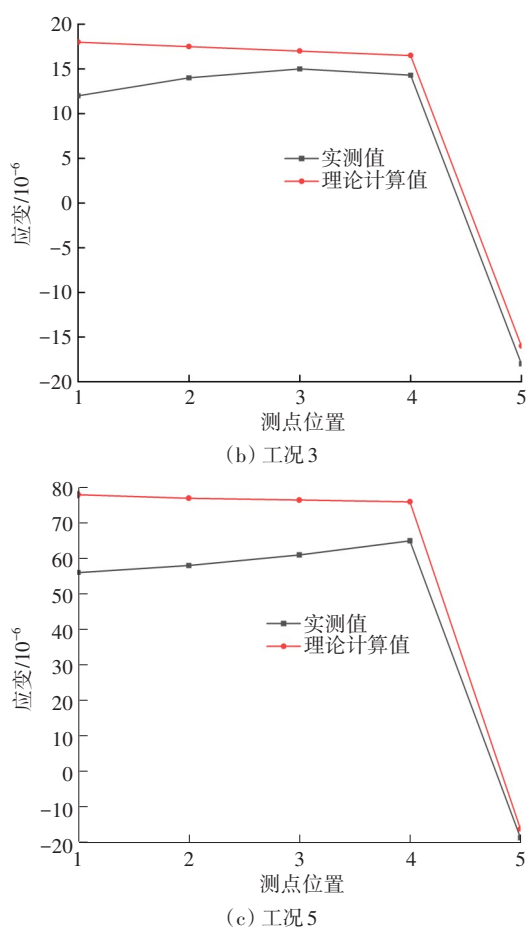


图7 不同工况下应变实测值与理论值的比较

Fig. 7 Comparison of measured values and theoretical values of strain under different loading conditions

从图5~7可以看出,在工况1、3、5下应变实测值均不大于应变的理论计算值,并且两者的变化规律基本一致;在工况1、3、5下,各截面应变测点的校验系数为0.624~0.886,相对残余应变为0%~18.8%(未超过规范限值20%)。

### 2.1.5 挠度结果分析

为了分析桥梁结构实际刚度与设计值的偏差程度<sup>[17]</sup>,用高精度水准仪对大水沟大桥的挠度进行测量,结果如图8~10所示,图中A-1~A-3分别对应工况1~工况3下桥梁前进方向的左侧测点,B-1~B-3分别对应其右侧测点。

从图8~10可以看出,在工况1、3、5下,挠度实测值均不大于其理论计算值,且两者的变化规律基本一致。在工况1、3、5下,各截面挠度测点的校验系数为0.708~0.875,相对残余挠度为0%~11.71%(未超过规范限值20%)。

## 2.2 动载试验

为测定桥梁上部结构的振型及动力冲击系数等参数,可通过某种适合该桥的激振方式,使上部

结构产生相应的结构响应<sup>[18]</sup>,再通过分析所测数据来判断桥梁上部结构的整体刚度和工作状态是否满足规范要求<sup>[19-20]</sup>。本文主要对大水沟大桥进行脉动试验、无障碍行车试验、刹车试验。

在脉动试验中,主要比较桥梁试验冲击系数与理论计算冲击系数,以分析桥面的行车舒适性和平顺性<sup>[21]</sup>。

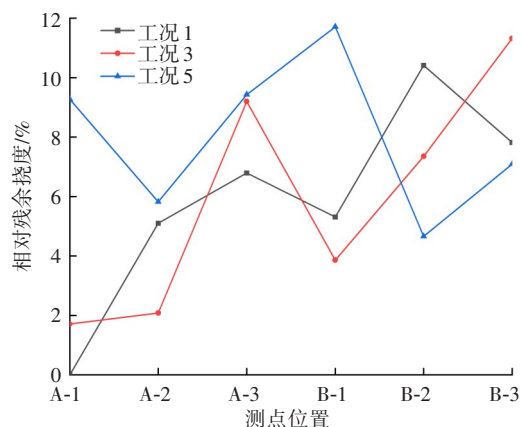


图8 不同工况下相对残余挠度的比较

Fig. 8 Comparison of relative residual deflection under different loading conditions

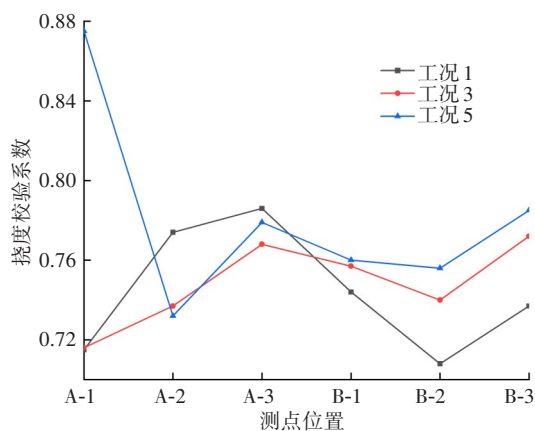
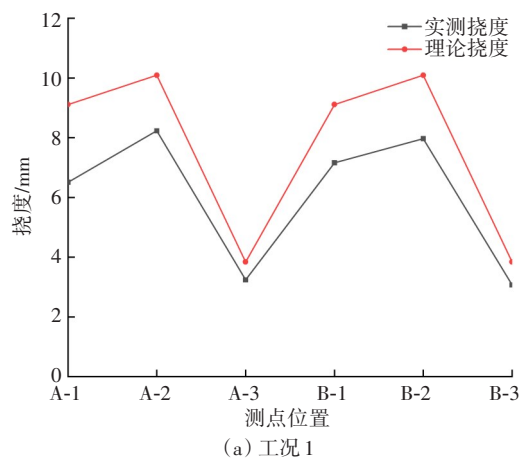


图9 不同工况下挠度校验系数的比较

Fig. 9 Comparison of deflection calibration coefficients under different loading conditions



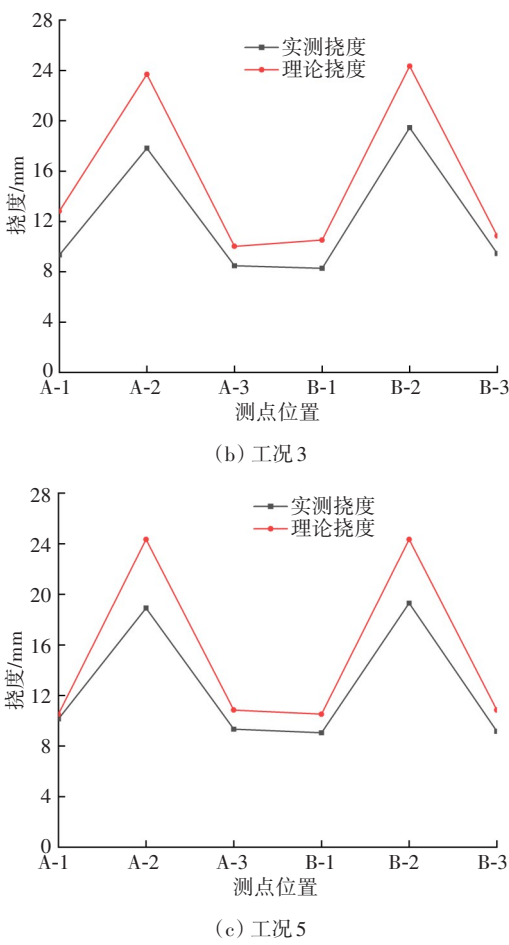


图 10 不同工况下挠度实测值与理论值的比较

Fig. 10 Comparison of measured deflection value and theoretical value under different loading conditions

2.2.1 动载试验工况

本次荷载试验动载工况包括无障碍行车试验和刹车试验,具体工况见表3。

表 3 动载试验工况

Table 3 Loading conditions of dynamic test

工况	试验类型	车速/(km·h <sup>-1</sup> )	试验内容
I	无障碍 行车	20	试验时,1 辆加载车分别以车速 20、30、40 km/h 匀速通过桥梁,测取控制截面的动应变,得到桥梁的冲击系数
II		30	
III		40	
IV	刹车	20	试验时,1 辆加载车分别以车速 20、30、40 km/h 匀速行驶至跨中位置刹车,测试结构动应变响应,以观察桥梁结构动力响应情况
V		30	
VI		40	

2.2.2 桥跨结构动力特性

通过 Midas Civil 2020 对大水沟大桥进行理论计算,其模态分析结果见表4,动力特性计算结果如图 11~12 所示。

自振频率是桥梁动力特性参数中的一个重要概念,它直接反映了桥梁的动刚度。桥梁的自振频率仅与桥梁结构的质量和刚度有关,且与刚度成正比,与质量成反比。

表 4 模态分析结果

Table 4 Modal analysis results

自振特性	理论自振 频率/Hz	实测自振 频率/Hz	实测阻 尼比/%
一阶竖向自振	1.160	1.270	3.907
二阶竖向自振	2.020	2.051	9.752
三阶竖向自振	2.450	2.734	3.503

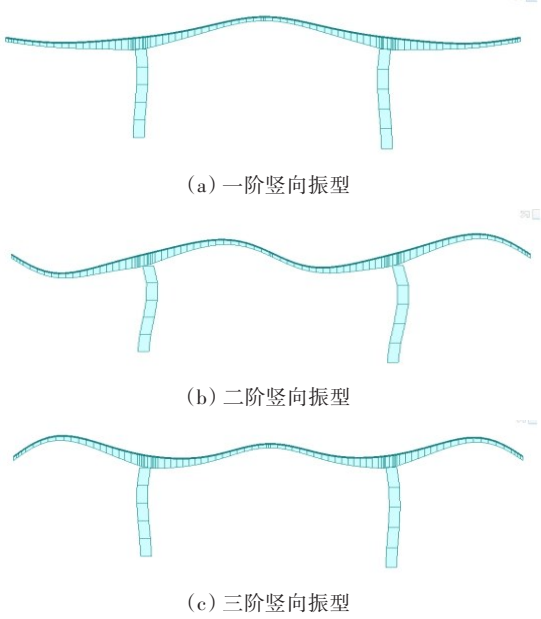
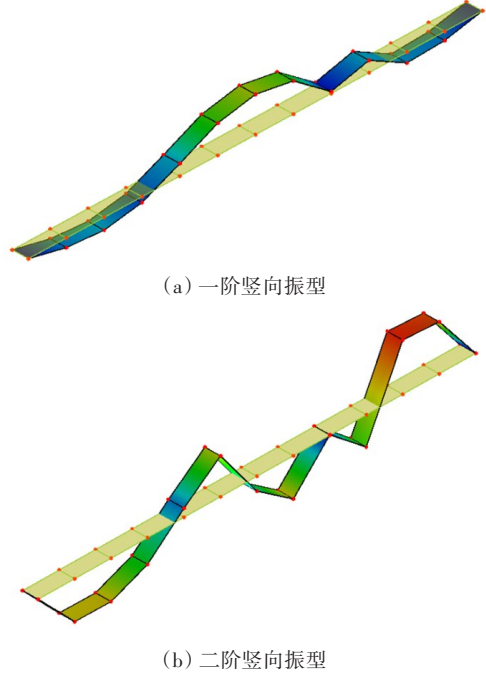
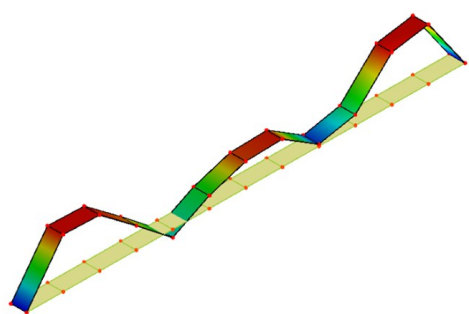


图 11 理论振型

Fig. 11 Theoretical vibration mode





(c) 三阶竖向振型

图12 实测振型

Fig. 12 Measured vibration mode

现采用东华测试DHDAS分析软件进行大水沟大桥自振模态参数识别分析,并得到结构振型、固有频率及阻尼比(表4)。

从表4可以看到,大水沟大桥一阶竖向实测振动频率为1.270 Hz,大于理论计算值1.160 Hz,实测振型与理论振型吻合,表明结构的整体刚度较大。

### 2.2.3 动载试验结果

本文根据脉动试验测出大水沟大桥桥跨关键位置的加速度时程曲线,经频谱分析后得到桥梁的自振频率。各工况下无障碍行车试验和刹车试验的动应变实测及分析结果见表5。由表5可知,在无障碍行车试验中,当车速为20~40 km/h时实测冲击系数为1.012~1.034。在刹车试验中,当车速为20~40 km/h时实测冲击系数为1.021~1.047。在无障碍行车试验和刹车试验中,该桥的冲击系数测试值均小于1.05,满足规范中的相关要求。

表5 动载试验各工况结果分析

Table 5 Analysis of the results of dynamic load test under various loading conditions

工况	试验类型	车速/(km·h <sup>-1</sup> )	测试截面	理论冲击系数	实测冲击系数
I	无障碍行车	20	JM3	1.05	1.034
II		30			1.012
III		40			1.015
IV	刹车	20			1.043
V		30			1.021
VI		40			1.047

## 3 结论

1) 大水沟大桥各应变测点校验系数在0.624至0.886之间,未超过规范限值1.0,卸载后各测点的相对残余应变最大值为18.8%,未超过20%,表明结构

强度满足设计要求,工作性能良好。

2) 在设计荷载(公路-I级)的等效试验荷载作用下,大水沟大桥挠度校验系数在0.708至0.875之间,未超过规范限值1.0,卸载后各测点的相对残余挠度均未超过规范限值20%,表明结构刚度满足设计要求,结构接近于弹性状态。

3) 根据有限元软件的计算结果,大水沟大桥一、二、三阶竖向理论计算振动频率分别为1.160、2.020、2.450 Hz,而现场实测的结果分别为1.270、2.051、2.734 Hz,均大于相应的理论计算值,表明结构的整体刚度较大。

4) 在刹车试验中,大水沟大桥的最大冲击系数为1.047,小于《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中的规定值(1.05),表明该桥桥面总体较平顺;桥梁结构在刹车试验中未见异常,表明桥动力响应正常。

## 参考文献(References):

- [1] TSUHA C H C, FORAY P Y, JARDINE R J, et al. Behaviour of displacement piles in sand under cyclic axial loading[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(3): 393-410. DOI: 10.1016/j.sandf.2012.05.002.
- [2] 苏强. 基于荷载试验和健康监测系统的桥梁安全状态评估[J]. 中国公路, 2019(17): 100-103. DOI: 10.13468/j.cnki.chw.2019.17.032.
- SU Qiang. Bridge safety assessment based on load test and health monitoring system[J]. China Highway, 2019(17): 100-103. DOI: 10.13468/j.cnki.chw.2019.17.032.
- [3] 周海俊, 吴永昌, 谭也平, 等. 桥梁荷载试验研究综述[J]. 中外公路, 2008, 28(4): 164-166.
- ZHOU Haijun, WU Yongchang, TAN Yeping, et al. Summary of bridge load test research [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(4): 164-166.
- [4] 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. DOI: 10.11717/j.issn: 2095-1922.2019.03.11.
- JIA Yi, ZHAO Renda, LI Youhe, et al. Static and dynamic load tests for high-pier long span continuous rigid frame bridge [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2019, 35(3): 470-478. DOI: 10.11717/j.issn: 2095-1922.2019.03.11.
- [5] 葛新民, 何先明, 相其生, 等. 大跨径混凝土桥梁成桥静载试验研究[J]. 公路工程, 2008, 33(1): 130-134. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2008.01.034.
- GE Xinmin, HE Xianming, XIANG Qisheng, et al. Study of static load test on completed bridge of long-span concrete [J]. Highway Engineering, 2008, 33(1): 130-134. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2008.01.034.

- [6] 邵贵平, 李景成. 高墩大跨铁路刚构桥静动载试验研究[J]. 世界桥梁, 2012, 40(5): 69-72, 76. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2012.05.015.  
SHAO Guiping, LI Jingcheng. Static and dynamic load tests for high-pier long span rigid frame railway bridge[J]. World Bridges, 2012, 40(5): 69-72, 76. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2012.05.015.
- [7] 李辉. 大跨度连续刚构桥的病害原因分析及加固设计[J]. 铁道标准设计, 2011, 55(4): 52-54. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.2011.04.026.  
LI Hui. Cause analysis and reinforcement design of long-span continuous rigid frame bridge[J]. Railway Standard Design, 2011, 55(4): 52-54. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.2011.04.026.
- [8] TAKEMIYA H. Analyses of wave field from high-speed train on viaduct at shallow/deep soft grounds[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 310(3): 631-649. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.09.056.
- [9] NIE R S, CHEN Y F, LENG W M, et al. Experimental measurement of dynamic load parameters for pier pile caps of high-speed railway bridges[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2017, 231(2): 162-174. DOI: 10.1177/0954409715622965.
- [10] SUN L M, XIE W P, HE X W, et al. Prediction and mitigation analysis of ground vibration caused by running high-speed trains on rigid-frame viaducts[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 15(1): 31-47. DOI: 10.1007/s11803-016-0303-7.
- [11] 湛润水, 胡钊芳. 公路桥梁荷载试验[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
CHEN Runshui, HU Zhao Fang. Highway bridge load test [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [12] 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. Load test methods for highway bridge: JTG/T J21-01—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 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.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specification for inspection and evaluation of load-bearing capacity of highway bridges: JTG/T J21—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁技术状况评定标准: JTG/T H21—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standards for technical condition evaluation of highway bridges: JTG/T H21—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [15] 沙国华, 杨政, 郭晨, 等. 悬拼施工的预制节段箱梁桥预应力参数优化[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(3): 17-26. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202305142024061964.  
SHA Guohua, YANG Zheng, GUO Chen, et al. Optimization of prestress parameters of prefabricated segmental box girder bridge in cantilever construction[J]. Journal of Transportation Science and Engineering, 2024, 40(3): 17-26. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202305142024061964..
- [16] 宋一凡. 公路桥梁荷载试验与结构评定[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.  
SONG Yifan. Load test and structural evaluation of highway bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [17] 殷新锋, 岳晓沛, 林伟, 等. 大件运输车作用下宽幅斜拉桥动力响应分析[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(2): 79-87. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022021020240480.  
YIN Xinfeng, YUE Xiaopei, LIN Wei, et al. Dynamic response analysis of wide cable-stayed bridge under the action of large transport vehicle [J]. Journal of Transportation Science and Engineering, 2024, 40(2): 79-87. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022021020240480.
- [18] JU S H, LIN H T, CHEN T K. Studying characteristics of train-induced ground vibrations adjacent to an elevated railway by field experiments[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(10): 1302-1307. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:10(1302).
- [19] 朱坤宁, 万水. GFRP-钢组合梁桥的荷载试验[J]. 公路交通科技, 2011, 28(11): 48-54. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.11.009.  
ZHU Kunning, WAN Shui. Experiment of load test of GFRP-steel composite girder bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(11): 48-54. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.11.009.
- [20] 黄少新, 赵文秀. 连续刚构桥梁荷载试验分析[J]. 桥梁建设, 2006, 36(增刊1): 137-139.  
HUANG Shaoxin, ZHAO Wenxiu. Analysis of load tests for a continuous rigid-frame bridge [J]. Bridge Construction, 2006, 36(sup 1): 137-139.
- [21] 刁砚, 钱永久, 陈远久. 刚架拱桥震后加固及荷载试验对比分析[J]. 四川建筑科学研究, 2011, 37(1): 133-136. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1933.2011.01.034.  
DIAO Yan, QIAN Yongjiu, CHEN Yuanjiu. Post-earthquake reinforcement and load test comparison of rigid frame arch bridge [J]. Sichuan Building Science, 2011, 37(1): 133-136. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1933.2011.01.034.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:王佳)