DOI: 10.7672/sgjs2026020039

高墩大跨不对称连续刚构桥承载力试验研究*

谭 达[1],黄晓敏[1],茹兴伦[2],毛德均[3]
(1.昆明理工大学建筑工程学院,云南 昆明 650500; 2.云南正发工程设计有限公司,
云南 昆明 650500; 3.昆明学院建筑工程学院,云南 昆明 650214)

[摘要] 以某高墩大跨不对称连续刚构桥为工程背景,通过静动载试验,对比分析试验实测结果与有限元计算结果,评估其承载力。结果表明:静载试验条件下,梁体结构应力校验系数在 0.44~0.89,表明桥跨结构整体强度较好;挠度校验系数在 0.42~0.87,表明桥跨结构整体刚度较好。各工况卸载后,相对残余应力及变形均未超出规范规定的 20%,表明梁体基本处于弹性工作状态。动载试验条件下,A—A,B—B,C—C 截面实测无障碍行车试验冲击系数分别在 0.041~0.049,0.031~0.050,0.042~0.044,A—A,C—C 截面冲击系数小于设计值,说明结构在设计荷载的正常行驶状态下不会产生过大冲击,B—B 截面冲击系数趋于设计值,在今后桥梁运营中,应加强桥梁 B—B 截面的观察及养护。该桥结构自振频率实测值大于理论计算值,桥梁实测阻尼比在正常范围内。该桥的承载力满足设计(公路-I 级)承载力要求。

[关键词] 桥梁;刚构桥;高墩;大跨度;承载力;冲击系数;自振特性;试验
[中图分类号] U446.1;U448.23 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2026)02-0039-07

Experimental Study on Bearing Capacity of High-pier and Large-span Asymmetric Continuous Rigid Frame Bridge

TAN Da[1], HUANG Xiaomin[1], RU Xinglun[2], MAO Dejun[3]
(1. *Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan* 650500, *China*; 2. *Yunnan Zhengfa Engineering Design Co., Ltd., Kunming, Yunnan* 650500, *China*; 3. *College of Architecture and Civil Engineering, Kunming University, Kunming, Yunnan* 650214, *China*)

Abstract: Taking a high-pier and large-span asymmetric continuous rigid frame bridge as engineering background, the bearing capacity of the bridge is evaluated by comparing the measured results with the finite element calculation results through static and dynamic load tests. The results show that under static load test conditions, the stress calibration coefficient of the girder body is between 0.44 and 0.89, which indicates that the overall strength of the bridge span structure is good; The deflection calibration coefficient is between 0.42 and 0.87, which indicates that the overall stiffness of the bridge span structure is good. After unloading, the relative residual stress and deformation do not exceed 20% of the specifications, indicating that the girder body is basically in elastic working state. Under the conditions of dynamic load test, the impact factor of A—A section measured in barrier-free driving test ranges from 0.041 to 0.049, the real impact factor of B—B section ranges from 0.031 to 0.050, and the impact factor of C—C section ranges from 0.042 to 0.044. The impact factors of A—A and C—C sections are less than the design value. It shows that the structure will not produce too much impact under the normal driving state of the design load, and the impact factor of B—B section is close to the design value. In the future bridge operation, the observation and maintenance of B—B section of the bridge should be strengthened. The measured natural frequency of the bridge structure is greater than the theoretical

*2023 年云南省“三区”科技人才项目(ZX20230237);2023 年云南省科技特派员项目(ZX20230180);昆明学院引进人才科研项目(XJ20220031)
[作者简介] 谭 达,硕士研究生,E-mail:tanda@stu.kust.edu.cn
[收稿日期] 2025-04-21

calculated value, and the measured damping ratio of the bridge is in the normal range. The bearing capacity of the bridge meets the design (highway-Ⅰ class) bearing requirements.

Keywords: bridges; rigid frame bridges; high piers; large span; bearing capacity; impact factor; self-excited characteristics; testing

0 引言

连续刚构桥因具有诸多优点而被广泛应用于山区复杂地形的高速公路建设中[1]。然而,在跨越“U”形或“V”形深切峡谷等复杂地形时,受限于两岸阶地显著的高差或非对称分布,传统对称式连续刚构桥往往面临结构适应性挑战。为此,工程实践中需因地制宜采用差异化墩高设计或非对称跨径组合等特殊结构形式[2]。然而,针对高墩大跨非对称连续刚构桥承载力的试验研究相对较少,现有研究多集中于数值模拟分析,缺乏足尺模型试验验证,难以准确反映结构真实受力状态[3-4]。

荷载试验是通过施加静、动力荷载对桥梁结构力学响应进行实测分析的重要手段,其测试结果可直接反映桥梁的实际承载性能与运营安全状态,为结构性能评估提供科学依据[5-7]。通过荷载试验可了解桥梁结构在试验荷载作用下的实际工作状态,从而判断桥梁结构承载力[8]。尽管 JTG/T J21-01—2015《公路桥梁荷载试验规程》为荷载试验提供了基本指导,但针对特殊结构,其荷载试验工况选取、测点布设方案及评价指标仍缺乏针对性[9-11]。

目前关于连续刚构桥的荷载试验研究较多,但对高墩大跨不对称连续刚构桥研究较少,本文以某高墩大跨不对称连续刚构桥为工程背景,根据规范[11]要求,合理布置测点和截面,对其进行动静载试验,判断桥梁结构承载力是否满足设计要求,并为相关荷载试验提供参考[12-13]。

1 工程概况

某跨径布置为(90+190+228+123+60)m 的高墩大跨不对称连续刚构桥全长 718m,全桥共有 4 个桥墩和 2 个重力式桥台,其中 2,3 号主桥墩分别高 101,102m,两墩间跨径 228m,立面如图 1a 所示。上部结构为单箱单室截面,箱梁顶宽 13m、底宽 7.5m,如图 1b 所示。桥面采用沥青混凝土铺装,该桥设计荷载为公路-Ⅰ级。桥面布置为 2.0m(人行道)+9.0m(行车道)+2.0m(人行道)。

2 静载试验

2.1 桥梁结构静力计算

采用有限元软件 MIDAS Civil 建立桥梁空间计算模型,如图 2 所示。依据 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》,车辆荷载采用公路-Ⅰ级标准荷载,考虑双向 2 车道横向布载,按规范 4.3.1 条进行横向与纵向折减。混凝土材料本构关系按 C55 强度等级取值,弹性模量取 3.55×10^4MPa,泊松比取 0.2。桥梁两端设置铰接约束,墩顶与主梁通过主从约束实现刚性连接,墩底采用刚接边界。考虑桥梁实际运营荷载情况,对桥梁设计规范中各项指标进行核算。计算结果为制订荷载试验详细方案提供参考依据。

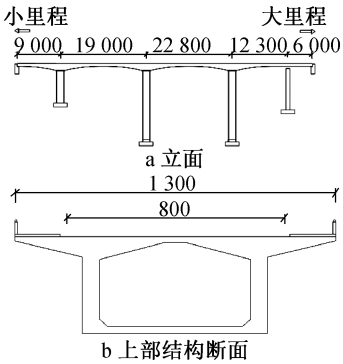

图 1 桥梁立面与上部结构断面(单位:cm)

Fig. 1 The facade and superstructure section of the bridge(unit:cm)

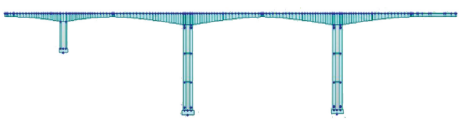

图 2 试验桥跨计算模型

Fig. 2 Calculation model of test bridge span

2.2 静载试验内容与测点布置

基于桥梁设计控制荷载,通过有限元影响线分析确定目标截面的最不利效应值,依据《公路桥梁荷载试验规程》,以满足式(1)所定原则等效换算而得:

$$0.95 \leqslant \eta = \frac{S_{\text{state}}}{(1+\mu)S} \leqslant 1.05 \qquad (1)$$

式中:S_{state} 为静载试验荷载作用下试验项目对应的加载控制截面内力或位移的最大计算效应值;S 为控制荷载产生的同一加载控制截面内力或位移的最不利效应计算值;μ 为按规范取用的冲击系数值;η 为静载试验荷载效率。

采用载重汽车(500kN/300kN 轴重组合)作为加载车辆,按最不利效应等效原则,通过车辆位置

调整与数量配置实现设计荷载效应的复现。最后根据现场情况,选取第 1 跨跨中截面(A—A)、第 2 跨跨中截面(B—B)、第 3 跨跨中截面(C—C)、1 号墩顶截面(D—D)、2 号墩顶截面(E—E)为控制截面,如图 3 所示。

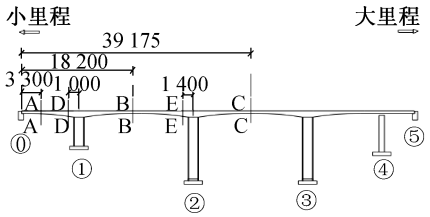

图 3　应力测试控制截面(单位:cm)

Fig. 3　Control section for stress test(unit: cm)

分别在 A—A,B—B,C—C 截面箱外底面布置 3 个应力测点、腹板布置 2 个应力测点,测试最大正弯矩应力,如图 4a 所示。在 D—D,E—E 截面箱内底面布置 3 个应力测点、腹板布置 2 个应力测点,测试最大负弯矩应力,如图 4b 所示,5 个截面共 25 个测点,采用静态应变测试系统测试。

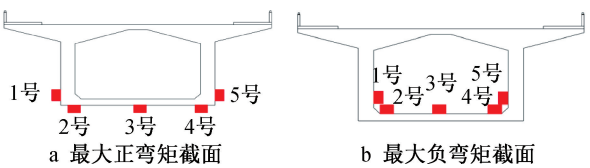

图 4　应力测点布置

Fig. 4　Layout of stress measuring points

挠度测试截面如图 5a,5b 所示,分别在Ⅰ—Ⅰ,Ⅱ—Ⅱ,Ⅲ—Ⅲ,Ⅳ—Ⅳ,Ⅴ—Ⅴ,Ⅵ—Ⅵ,Ⅶ—Ⅶ截面左、右侧各布置 1 个测点,如图 5c 所示,7 个截面共计 14 个测点,采用电子水准仪测试。

2.3　加载方式、试验工况与加载效率

桥梁结构静载试验是根据桥梁的设计荷载等级,按荷载等效原则,在荷载最不利位置布置静载[14-16]。本次桥梁静载采用载重汽车,车辆参数如图 6 所示。

在每个控制截面分别进行正载和偏载的加载试验。该桥梁荷载试验共设 5 种试验工况,如表 1 所示,荷载效率系数均为 0.95~1.04,满足规范[11]中 0.95~1.05 的要求。不同工况分别测试如下内容:①工况 1,A—A 加载时 A—A 截面测点的应力和Ⅰ—Ⅰ,Ⅱ—2 中截面挠度;②工况 2,B—B 加载时 B—B 截面测点的应力和Ⅱ—2,Ⅲ—Ⅲ截面的挠度;③工况 3,C—C 加载时 C—C 截面测点的应力和Ⅱ—Ⅱ,Ⅲ—Ⅲ截面的挠度;④工况 4,D—D 加载时 D—D 截面测点的应力和Ⅳ—Ⅳ,Ⅴ—Ⅴ截面的挠度;⑤工况 5,E—E 加载时 E—E 截面测点的应力和Ⅵ—Ⅵ,Ⅶ—Ⅶ截面的挠度。

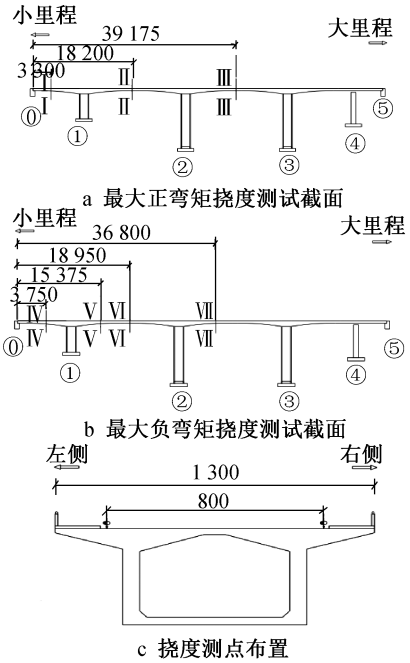

图 5　挠度测试截面及测点布置(单位:cm)

Fig. 5　Deflection test section and measuring points layout(unit:cm)

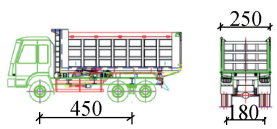

图 6　加载车辆(单位:cm)

Fig. 6　Loading vehicles (unit: cm)

表 1　试验工况及荷载效率

Table 1　Test conditions and load efficiency

工况	测试控制截面	荷载类型	试验荷载计算值/(kN·m)	标准荷载计算值/(kN·m)	试验荷载效率
工况 1	第 1 跨跨中截面 A—A	正载	21 096.0	22 175.5	0.95
		偏载	21 096.0	22 175.5	0.95
工况 2	第 2 跨跨中截面 B—B	正载	29 537.6	30 162.8	0.98
		偏载	29 537.6	30 162.8	0.98
工况 3	第 3 跨跨中截面 C—C	正载	30 459.4	32 153.5	0.95
		偏载	30 459.4	32 153.5	0.95
工况 4	1 号墩顶截面 D—D	正载	−46 761.7	−45 151.4	1.04
		偏载	−46 761.7	−45 151.4	1.04
工况 5	2 号墩顶截面 E—E	正载	−116 680.3	−117 058.7	1.00
		偏载	−116 680.3	−117 058.7	1.00

2.4　静载试验结果

2.4.1　挠度测试结果

静载试验过程中,测试试验现场环境温度在 28~35℃,风速在 0.8~3.2m/s,试验环境均满足《公路桥梁荷载试验规程》要求。不同荷载工况下实测

挠度值均小于挠度计算值且最大实测挠度值为18.95mm,如图 7 所示。

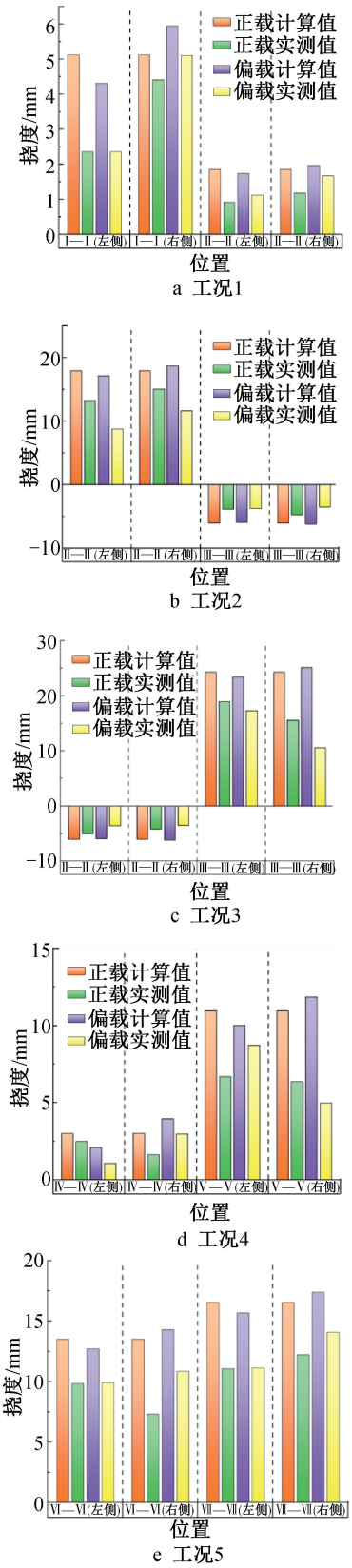

图 7 挠度测试结果(挠度以向下为正、向上为负)

Fig. 7 Deflection test results (the deflection is positive downward and negative upward)

梁体结构挠度校验系数在 0.42~0.87(见图 8),在规范规定范围内,表明桥跨结构整体刚度较好且各工况挠度相对残余均<20%。

2.4.2 应力测试结果

每个工况从加载至卸载过程中环境温度变化(<1℃)均较小,因此非均匀温度对应变测试的结果可忽略,均匀温度对测试结果的影响已进行了补偿。不同荷载工况下梁体各截面应力实测值均小于理论计算值,最大实测应力为 5.11MPa,如图 9 所示。

梁体结构应力校验系数在 0.44~0.89(见图 10),表明桥跨结构整体强度较好。该桥最大相对残余为 15.08%,如图 10 所示,未超过规范规定的 20%,说明桥跨结构在试验荷载下处于弹性工作状态。

3 动载试验

3.1 动力响应试验

本次开展无障碍行车测试,受现场条件制约,该桥选用 1 辆加载车,依次以 10,20,30km/h 速度在试验桥跨正常行驶,测试动态应变并计算试验冲击系数,测试工况如表 2 所示。在测试截面 A—A,B—B,C—C 箱外底部各布置 3 个动应变测点,共计 9 个动应变测点。

表 2 无障碍行车工况及实测冲击系数

Table 2 Barrier-free driving conditions and measured impact factor

工况	测试截面	测试车速/(km·h^{-1})	实测冲击系数
工况Ⅰ	A—A 截面	10	0.041
		20	0.047
		30	0.049
工况Ⅱ	B—B 截面	10	0.031
		20	0.042
		30	0.050
工况Ⅲ	C—C 截面	10	0.043
		20	0.044
		30	0.042

工况Ⅱ行车应力时程曲线如图 11 所示。对不同工况下测试截面实测冲击系数分析可知,A—A,B—B,C—C 截面实测无障碍行车试验冲击系数分别在 0.041~0.049,0.031~0.050,0.042~0.044。按设计规范计算的理论冲击系数为 0.05,A—A,C—C 截面冲击系数小于设计采用值。

这说明结构在设计荷载的正常行驶状态下不会产生过大冲击,B—B 截面冲击系数趋于设计采用值,在今后桥梁运营中,应加强对该截面观察。

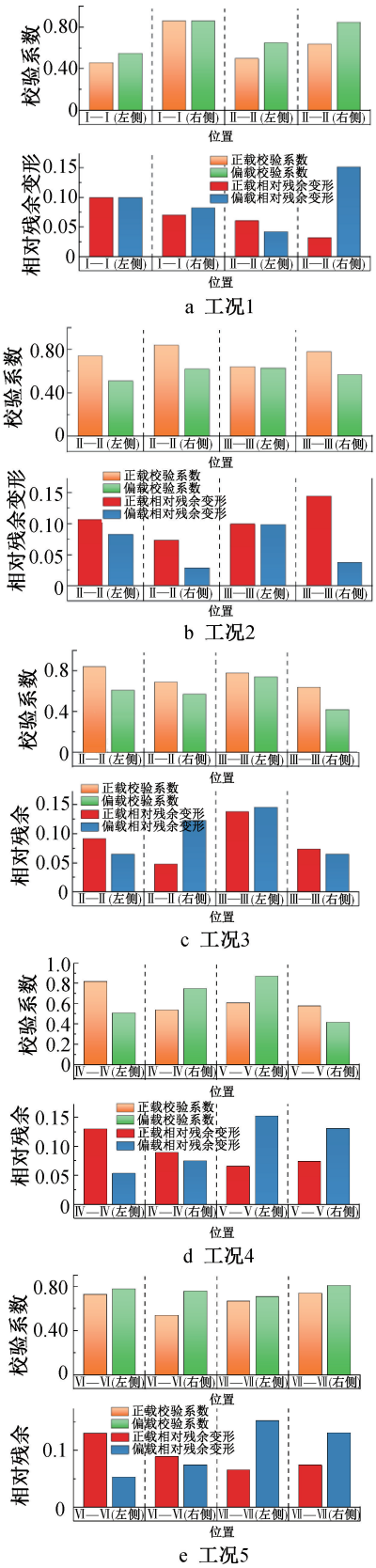

图 8　挠度检验系数及相对残余

Fig. 8　Deflection check coefficient and relative residual

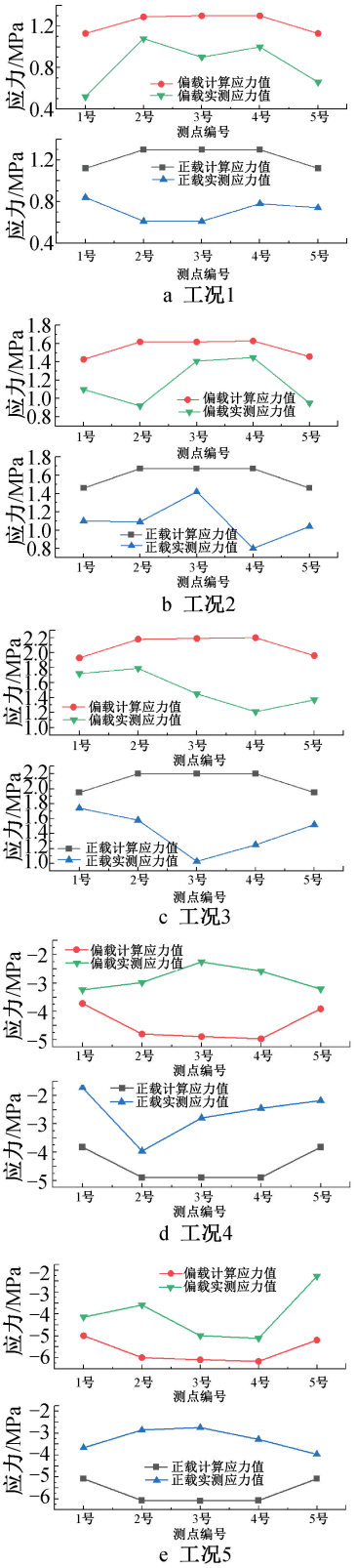

图 9　应力测试结果(应力以受拉为正、受压为负)

Fig. 9　Stress test results (stress is positive in tension and negative in compression)

3.2　动力特性试验

动力特性试验采用的环境随机激振法,是指在桥面无任何交通荷载及桥址附近无规则振源的情况下,通过测定桥梁由风荷载、地脉动、水流等随机激励引起的微幅振动来识别结构自振特性参数的

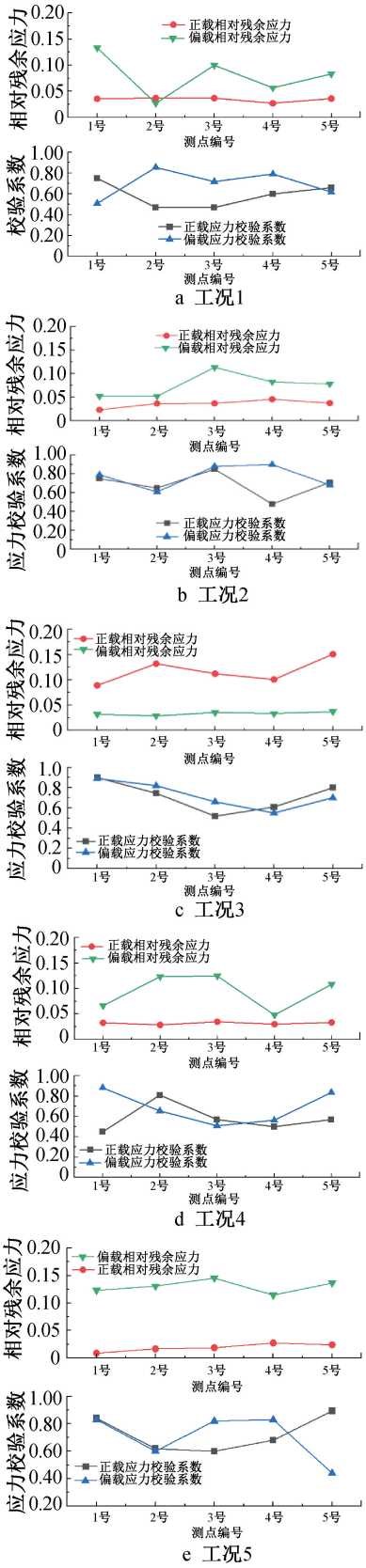

图 10 应力校验系数及相对残余应力

Fig. 10 Stress check coefficient and relative residual stress

方法[17-18]。该方法需对采集的长样本信号进行能量平均,以便消除随机因素的影响,采集时间≥

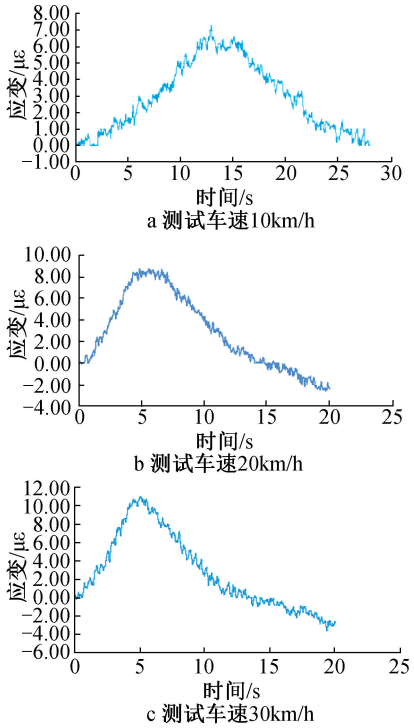

图 11 第 2 跨底面测点无障碍行车应力时程曲线

Fig. 11 The stress time history curves for barrier-free running at the measuring point on the bottom surface of the second span

30min[19-20]。测点布置如图 12 所示。测得的时程曲线采用专用软件进行分析,可得到桥梁结构的振型、频率及阻尼比等参数。一阶自振频率实测值为 1.06Hz,一阶频率计算值为 0.642Hz,实测自振频率在正常范围内。

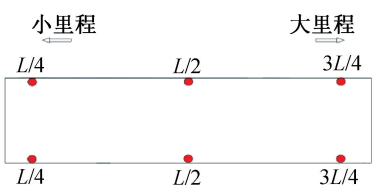

图 12 自振特性测点布置

Fig. 12 Arrangement of measuring points for self-excited characteristics

4 试验结果

1)本次静载试验根据设计荷载所产生的最不利结构效应进行模拟加载。试验荷载效率系数为 0.95~1.04,满足规定,表明本次试验荷载产生的结构效应能反映设计荷载产生的最不利状况。

2)梁体结构挠度校验系数介于 0.42~0.87,表明桥跨结构整体刚度较好。梁体结构应力校验系数介于 0.44~0.89,表明桥跨结构整体强度较好。所有测点的残余应力及变形均≤20%,表明桥梁基本处于弹性工作状态。

3)该桥 A—A,C—C 截面无障碍行车冲击系数最大值分别为 0.049,0.044,均小于规范值 0.05,说明桥面较平顺;B—B 截面无障碍行车冲击系数最大值 0.05 趋于设计采用值,在今后桥梁运营中,应加强该截面处的观察。

4)该桥自振频率实测值大于理论计算值,即结构实际刚度大于理论刚度;桥梁实测阻尼比在正常范围内。

参考文献:

[1] ZAYED T, MOHAMED E. A case productivity model for automatic climbing system[J]. Engineering, construction and architectural management,2014,21(1):33-50.

[2] 罗松涛,黄才良,荆友璋. 不对称连续刚构的不对称系数[J]. 公路交通科技,2012,29(4):62-66.
LUO S T, HUANG C L, JING Y Z. Asymmetric coefficient of asymmetric continuous rigid-frame structure[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2012, 29(4):62-66.

[3] 易修慧. 大跨度桥梁工程施工安全风险评估研究[D]. 长沙:中南大学,2022.
YI X H. Study on safety risk assessment of long-span bridge construction[D]. Changsha:Central South University,2022.

[4] 彭颖. 市政桥梁工程项目施工安全风险评估研究[D]. 南京:南京林业大学,2022.
PENG Y. Study on construction safety risk assessment of municipal bridge project[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2022.

[5] 王琳琳, 文剑. 袁卓亚的“跨越之路”[J]. 中国公路,2017(18):43-47.
WANG L L, WEN J. Yuan Zhuoya's “leaping road”[J]. China highway,2017(18):43-47.

[6] 彭爱勤. 基于《公路桥梁荷载试验规程》的桥梁荷载试验分析[J]. 广东建材,2018,34(7):33-37.
PENG A Q. Bridge load test analysis based on *Code for highway bridge load test*[J]. Guangdong building materials,2018,34(7):33-37.

[7] 周桃兵. 桥梁荷载试验步骤要点与结果准确性分析[J]. 四川水泥,2024(7):267-270.
ZHOU T B. Key points of bridge load test steps and accuracy analysis of results[J]. Sichuan cement,2024(7):267-270.

[8] 郭琦,丁康峻,王俊峰,等. 山区多跨连续刚构桥合龙顶推力优化分析[J]. 公路工程,2024,49(5):34-38,92.
GUO Q, DING K J, WANG J F, et al. Closure jacking force of optimization analysis of multi-span continuous rigid frame bridge in mountain area[J]. Highway engineering, 2024, 49(5): 34-38,92.

[9] 王伟,张玉平,黄博,等. 高墩大跨长联连续刚构桥静力荷载试验优化研究[J]. 中外公路,2017,37(1):98-101.
WANG W, ZHANG Y P, HUANG B, et al. Study on static load test optimization of long-span continuous rigid frame bridge with high pier[J]. Journal of China & foreign highway,2017,37(1):98-101.

[10] 虢曙安,刘国坤,徐朔,等. 特大跨径悬索桥承载能力评定研究[J]. 桥梁建设,2020,50(6):73-78.
GUO S A, LIU G K, XU S, et al. Evaluation of load bearing capacity of super-long-span suspension bridge[J]. Bridge construction,2020,50(6):73-78.

[11] 长安大学. 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.
Chang'an University. Load test methods for highway bridge: JTG/T J21-01—2015[S]. Beijing: China Communications Press,2016.

[12] 陈超. 土建工程管理中的质量控制与安全管理挑战[J]. 城市建设理论研究(电子版),2024(31):49-51.
CHEN C. Quality control and safety management challenges in civil engineering management[J]. Theoretical research in urban construction,2024(31):49-51.

[13] 周明. 桥梁荷载试验中动态载荷作用下的结构响应分析[J]. 汽车周刊,2024(11):225-227.
ZHOU M. Structural response analysis under dynamic load in bridge load test[J]. Auto weekly,2024(11):225-227.

[14] 吴彬. 基于荷载试验的既有桥梁安全性评定研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
WU B. Research on safety evaluation of existing bridge based on load test[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2010.

[15] 赵晟棋. 东塔悬索桥健康监测与状态评估研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.
ZHAO S Q. Study on health monitoring and condition evaluation of Dongta Suspension Bridge[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2020.

[16] 孙志鹏,雷刚. 中承式钢管混凝土拱桥动静载试验分析[J]. 甘肃科学学报,2019,31(6):93-98.
SUN Z P, LEI G. Analysis of dynamic and static load test on half-through concrete filled steel tubular arch bridge[J]. Journal of Gansu sciences,2019,31(6):93-98.

[17] 唐怀平,王凤勤. 大跨径桥梁自振特性试验的环境随机激振法[J]. 西南交通大学学报,2000,35(2):126-128.
TANG H P, WANG F Q. Self-vibration characteristic test of long-span bridges by means of environment random excitation[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2000,35(2):126-128.

[18] 高毅雄. 独柱墩连续宽箱梁桥异常振动研究[J]. 黑龙江交通科技,2023,46(6):70-72.
GAO Y X. Study on abnormal vibration of continuous wide box girder bridge with single column piers[J]. Communications science and technology Heilongjiang,2023,46(6):70-72.

[19] 张毅. 三角式桁架拱桥技术状况及承载力评定[J]. 交通科技与管理,2024,5(10):108-110.
ZHANG Y. Technical condition and bearing capacity evaluation of triangular truss arch bridge[J]. Transportation technology and management,2024,5(10):108-110.

[20] 苏鹏,李恒,阳浩. 独塔双索面斜拉桥荷载试验研究[J]. 公路交通技术,2024,40(2):133-142,149.
SU P, LI H, YANG H. Experimental study on the loading of one-tower double plane cable-stayed bridge[J]. Technology of highway and transport,2024,40(2):133-142,149.