

大跨度连续刚构桥荷载试验研究

宋朋, 袁帅华

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2024年4月1日; 录用日期: 2024年4月21日; 发布日期: 2024年4月30日

摘要

因考虑构件模拟的相似度和合理性, 常规桥梁结构计算很难真实得出实际的承载能力。通过荷载试验了解某大桥主桥在试验荷载下的工作状态, 并和有限元分析计算得到的理论值对比, 确定本桥的强度和刚度是否符合规范要求。以一座三跨连续刚构桥为例, 确定各工况合理加载效率, 详细分析现场实际试验结果及各工况校验系数, 对荷载试验在评定桥梁承载力的作用中进行综合评价。在静力荷载作用下的强度和刚度都符合相关规范要求; 主桥结构振动的前五阶固有模态频率都高出相应的理论计算频率; 设计下的冲击系数理论值大于动荷载作用下的冲击系数实测值。结果表明主桥在荷载试验下, 它的承载能力和工作性能满足设计要求。

关键词

大跨度, 预应力混凝土, 刚构桥, 荷载试验

Load Test Research on Large-Span Continuous Rigid Frame Bridge

Peng Song, Shuaihua Yuan

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Apr. 1st, 2024; accepted: Apr. 21st, 2024; published: Apr. 30th, 2024

Abstract

Considering the similarity and rationality of component simulation, it is difficult for conventional bridge structure calculation to obtain the actual bearing capacity. Through the load test, the working state of the main bridge of a bridge under the test load is understood, and compared with the theoretical value calculated by the finite element analysis to determine whether the strength and stiffness of the bridge meet the requirements of the specification. Taking a three-span conti-

nuous rigid frame bridge as an example, the reasonable loading efficiency of each working condition is determined. The actual test results and the calibration coefficients of each working condition are analyzed in detail, and the load test is comprehensively evaluated in evaluating the bearing capacity of the bridge. The strength and stiffness under static load meet the requirements of relevant specifications; The first five natural modal frequencies of the main bridge structure vibration are higher than the corresponding theoretical calculation frequencies; The theoretical value of impact coefficient under design is greater than the measured value of impact coefficient under dynamic load. The results show that the bearing capacity and working performance of the main bridge meet the design requirements under the load test.

Keywords

Large-Span, Prestressed Concrete, Rigid Frame Bridge, Load Test

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

通常, 桥梁的理论计算不能完全模拟真实结构体系, 真实承载能力与设计承载能力也不可能完全相符[1], 理论计算对桥梁运营期间承载能力评定存在一定局限性; 了解桥梁结构的实际承载能力和工作性能从桥梁静、动载试验入手, 进一步分析和判断桥梁的健康情况; 可以通过荷载试验验证桥梁竣工后, 自身桥梁设计与施工质量的可靠性, 并将其作为竣工验收重要验证手段[2]。

目前, 关于各体系桥梁静动载试验已有大量相关研究, 但国内外学者对预应力混凝土刚构桥的研究相对较少, 理论体系还不够完善。因此, 本文以主跨 150 m 混凝土连续刚构桥静动载试验为背景, 评价桥梁的承载能力和整体可靠性, 为大跨度桥梁设计及后期运维提供科学依据, 同时, 评价静动载试验在大跨度混凝土连续刚构桥的应用效果。

2. 工程概况

大桥主桥上部结构采用 80 m + 150 m + 80 m 的预应力混凝土连续刚构, 主梁 C55 混凝土材料制成的箱梁。箱梁的根部梁高是 8.875 m, 跨中梁高为 3.3 m, 箱梁顶板宽是 12.5 m, 底板宽度是 7 m, 翼缘板的悬臂长度为 2.75 m。箱梁顶板除了 0#块以外的部分厚度为 0.5 m, 其它梁段的厚度为 0.3 m。箱梁的高度按照 1.7 次抛物线的曲线改变。底板的厚度从跨中到根部逐渐改变, 从 0.32 m 增加到 1.15 m。底板的厚度也按照 1.5 次抛物线的曲线变化。主墩墩身所使用的是 C30 混凝土, 并且墩高都是 65 m, 而墩身则是以单肢薄壁空心墩为结构。设计荷载为公路-I级, 桥面宽度为 0.5 m 防撞护栏、11 m 车行道和 0.5 m 防撞护栏。该桥立面图和 0#块横断面图见图 1 和图 2。

3. 理论计算

3.1. 计算模型

本桥采用空间杆系程序进行结构计算分析。主梁和主墩均采用梁单元模拟, 墩底设置固定支座, 主梁与墩柱之间采用刚性连接, 限制转动和移动, 边跨梁端设置活动自由度, 限制竖向方向移动自由度。全桥总共分为 170 个单元, 其中主梁分为 106 个单元, 主墩分为 64 个单元。该桥空间计算模型见图 3。

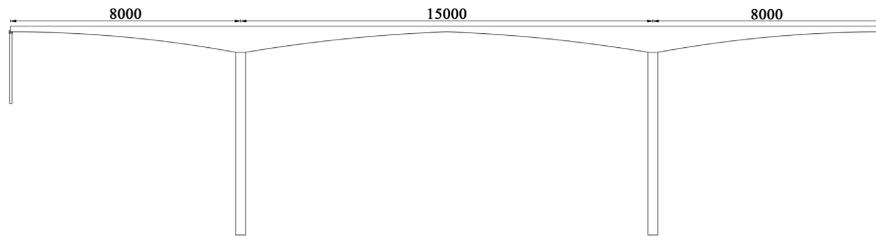


Figure 1. Elevation (unit: cm)
图 1. 立面图(单位: cm)

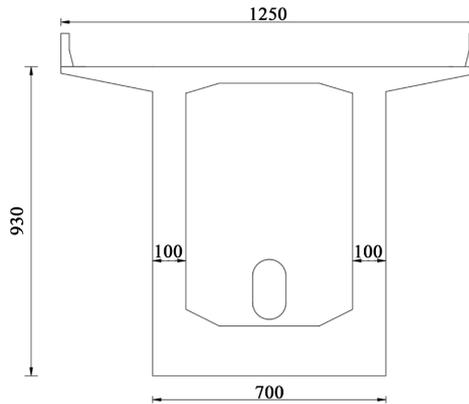


Figure 2. Block 0# cross section (unit: cm)
图 2. 0#块横断面图(单位: cm)

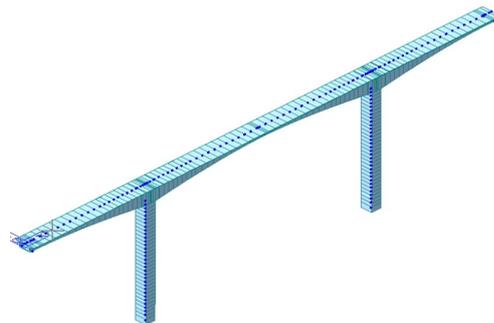


Figure 3. Main bridge space calculation model
图 3. 主桥空间计算模型

3.2. 计算结果

经计算, 在桥面活载作用下(车辆荷载), 主梁结构内力包络图如图 4 所示。

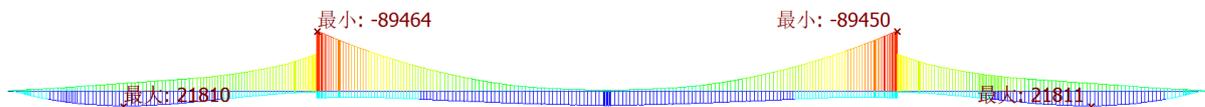


Figure 4. Bridge moment envelope diagram (kN·m)
图 4. 桥梁弯矩包络图(kN·m)

3.3. 测试截面

加载分正载及偏载两种情况, 根据本桥结构的内力包络图、位移图。选取如图 5 所示截面内力计算

值作为静载试验主要控制计算参数。

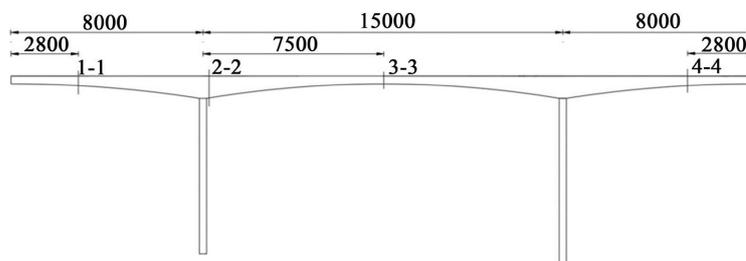


Figure 5. Schematic diagram of test section location (unit: cm)

图 5. 测试截面位置示意图(单位: cm)

3.4. 试验荷载效率

静载试验荷载效率 η_q 是通过比较在试验荷载下测试部位的内力(或变形)计算值 S_i 与考虑动力扩大效应的设计标准荷载下相同部位的内力(或变形)计算值 $S_d(1+\mu)$, 来进行评估的[3]。

$$\eta_q = \frac{S_i}{S_d(1+\mu)}$$

式中: μ 为设计取用的冲击系数。本次试验为交工荷载试验, 为达到较好的验证效果, 通过有限元模型计算设计荷载下的内力, 根据荷载等效原则, 在静载试验中控制了荷载效率在 0.85~1.05 [4] 之间。同时, 根据计算结果分析, 确定了静载试验加载所需的车辆数量、重量和加载位置。最终, 使用了 9 辆总重 40 t 的载重车进行了加载试验, 主桥静载试验工况及加载效率如表 1 所示。

Table 1. Static load test conditions and loading efficiency of main bridge

表 1. 主桥静载试验工况及加载效率

加载工况		控制弯矩(kN/m)	试验弯矩(KN/m)	效率系数	加载车辆数量/辆	
正载	工况 1	Mmax1	22181.93	22266.31	1.00	6
	工况 2	Mmin2	-81991.17	-78897.13	0.96	9
	工况 3	Mmax3	18528.88	16215.66	0.88	9
	工况 4	Mmax4	22181.93	22266.31	1.00	6
偏载	工况 5	Mmax1	25065.58	25160.93	1.00	6
	工况 6	Mmin2	-91014.84	-89014.19	0.98	6
	工况 7	Mmax3	21678.78	18972.32	0.88	9
	工况 8	Mmax4	25065.58	25160.93	1.00	9

4. 试验方案

4.1. 静载试验

4.1.1. 挠度测试

在本次测量中, 在桥面上进行了挠度测点的布置。根据图 6 中显示的布置方式, 使用了电子水准仪监测主梁上各个标高测点的挠度, 并测得相应的挠度数值[5]。

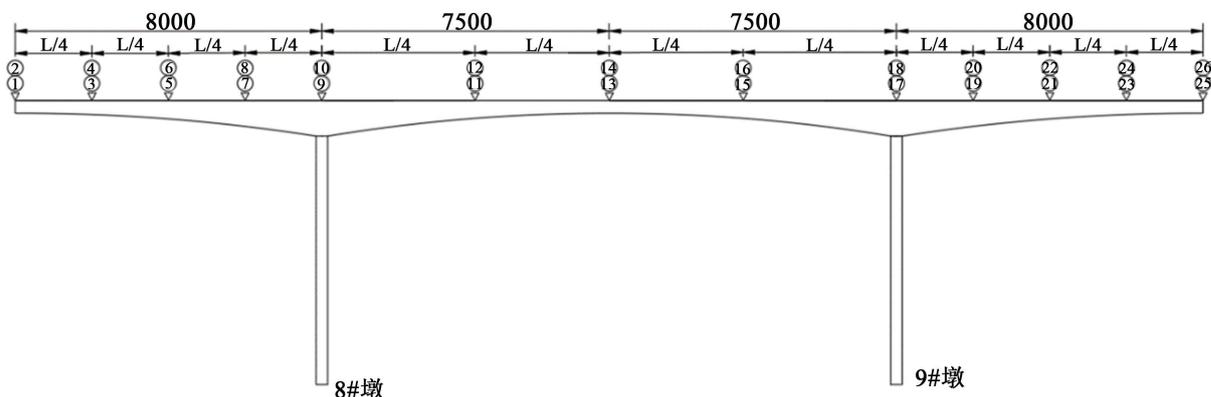


Figure 6. Elevation diagram of deflection measuring point of main bridge (unit: cm)

图 6. 主桥挠度测点立面示意图(单位: cm)

4.1.2. 应变测试

应变控制截面共有 4 个截面, 它们依次是 1-1/2-2/3-3/4-4, 每个截面都布设了 6 个测点, 测点采用粘贴在混凝土表面的高精度电阻应变片, 使用无线静态应力应变测试系统对结构的应变(应力)进行测试[6]。测点截面布置如图 7 所示。

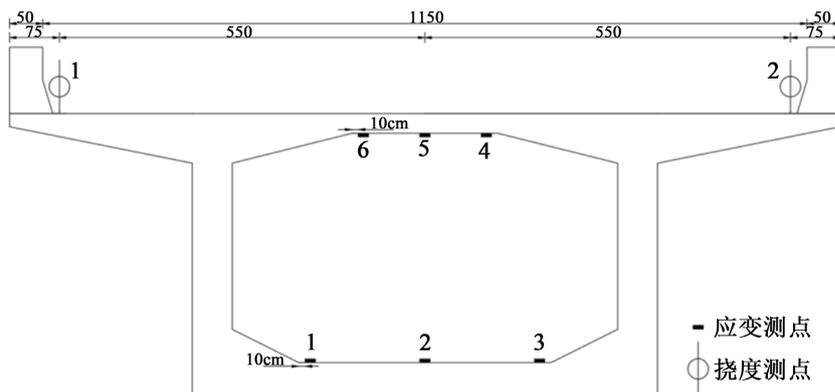


Figure 7. Schematic diagram of measuring points for strain and deflection of cross-section from 1-1 to 4-4 (unit: cm)

图 7. 1-1~4-4 截面应变、挠度测点布置示意图(单位: cm)

4.1.3. 裂缝开展情况观测

静载试验过程中, 需对可能受力的裂缝安装跨缝振弦式应变计以测试加载前后裂缝宽度变化量, 对非受力裂缝采用裂缝宽度观测仪测试其加载前后宽度变化量。裂缝长度延伸量采用钢卷尺测量。

4.2. 动载试验

桥梁的动载试验主要包括主桥脉动试验、无障碍试验和有障碍试验。使用 DH5907N 无线桥梁模态测试分析系统进行测试分析的是脉动试验, 利用多点动态位移检测系统(BJQN-V2.0)与无线动态应变测试分析系统(DH5908N)采集分析的是无障碍试验以及有障碍试验[7]。

4.2.1. 脉动实验

评估桥梁结构荷载动态响应时, 桥梁自振特性是至关重要的基础。自振特性试验主要通过测试固有动力特性指标来评估, 这些指标包括振幅、频率、振型和阻尼比。一般情况下, 通过使用环境随机振动法来测定桥梁结构的微小振动响应, 可以获得较好的效果。这些微小振动响应是由于桥址处的风荷载、

地微动以及其它非规律荷载的作用而引起的[8]。

4.2.2. 无障碍试验

在无障碍行车试验中, 使用 2 辆重约 40 t 的试验车以 20~60 km/h 速度一起驶过桥跨结构进行试验, 从而造成桥梁结构发生振动[9]。这是由于车辆在行驶过程中对桥面施加冲击作用所导致的。

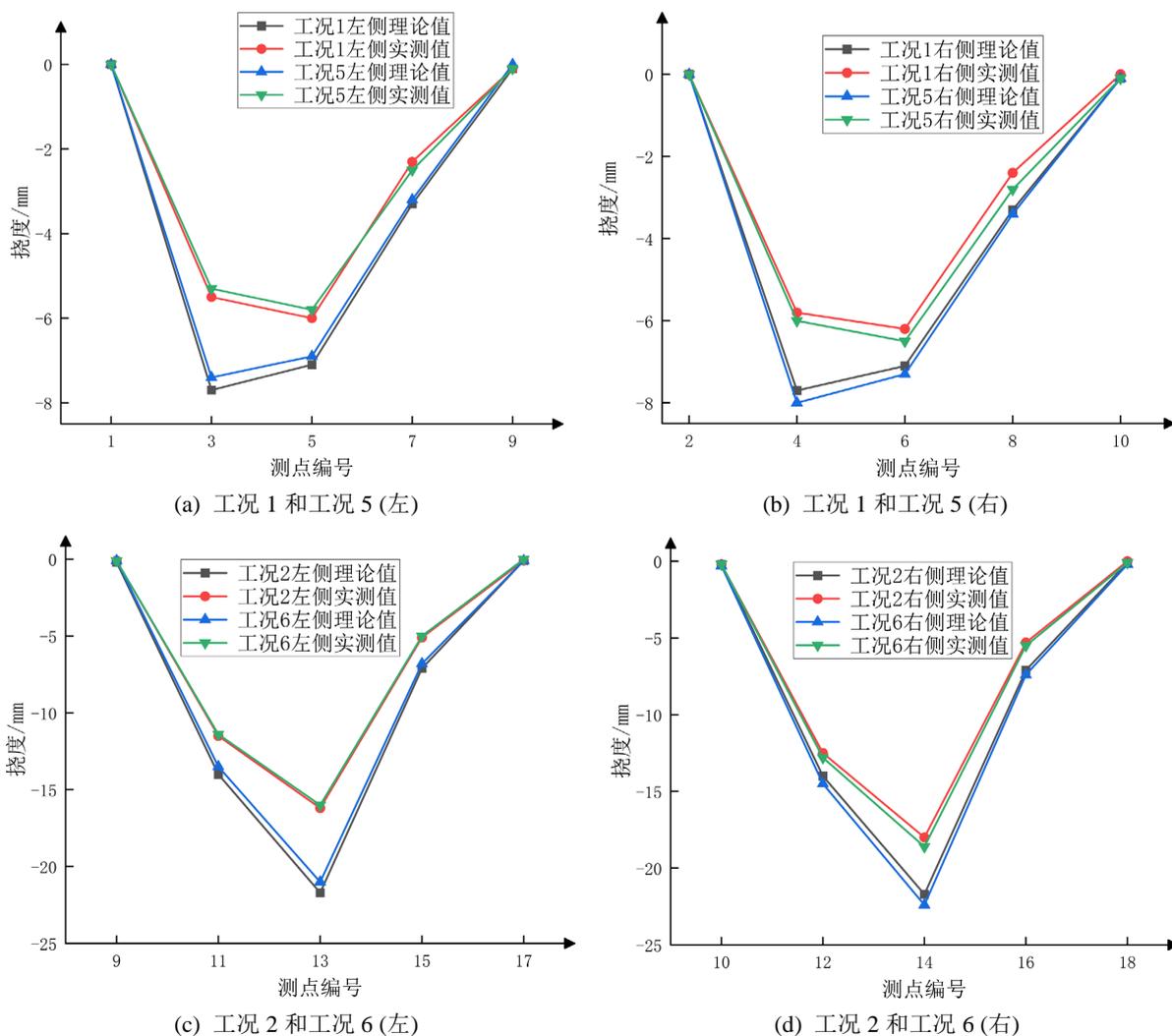
4.2.3. 有障碍试验

进行障碍行车试验时, 会在主跨跨中放置高度为 5~7 cm 的弓形障碍物来模拟桥面的坑洼。这样, 2 辆试验车以 20~30 km/h 的速度穿过障碍物, 从而对桥梁产生冲击作用, 并进一步引起桥梁的竖向振动[10]。通过对结构振幅响应变化的测定, 能够得到相关数据。

5. 静载试验结果

5.1. 主梁挠度测试结果

各工况下的主梁挠度如图 8 所示, 图中挠度负值表示下挠, 正值表示上拱。经计算各工况挠度的校验系数以及相对残余挠度计算的结果见表 2。



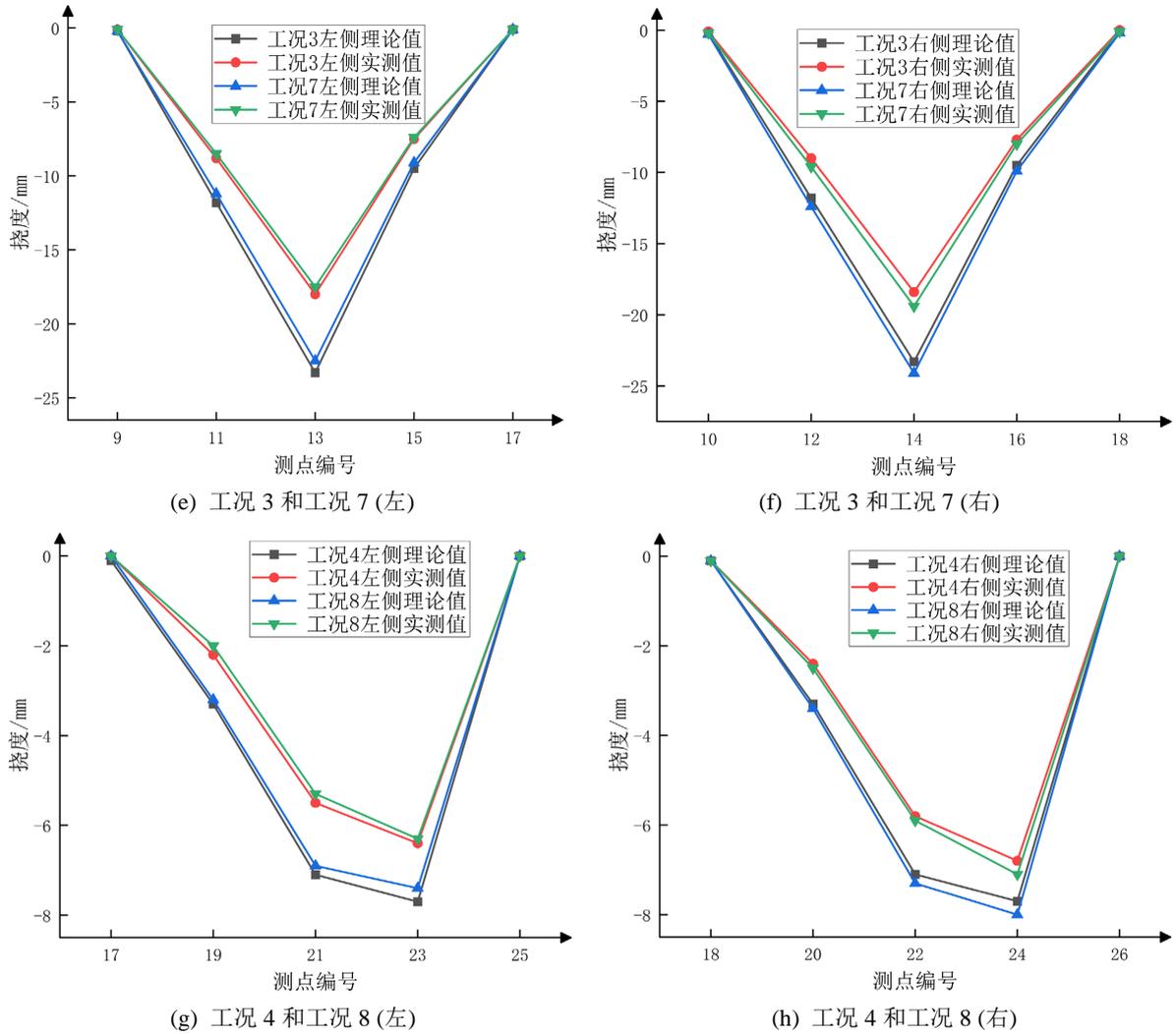


Figure 8. Displacement test results for each operating condition
图 8. 各工况位移测试结果

Table 2. Deflection calibration coefficients and relative residual deflections for each condition
表 2. 各工况挠度校验系数和相对残余挠度

工况	测点编号	挠度校验系数	相对残余挠度/%	工况	测点编号	挠度校验系数	相对残余挠度/%		
工况 1	3	0.71	8.30	工况 2	11	0.82	8.70		
	4	0.75	6.50		12	0.89	7.40		
	5	0.85	9.10		13	0.75	7.40		
	6	0.87	7.50		14	0.83	4.30		
	7	0.70	8.00		15	0.72	7.30		
	8	0.73	7.70		16	0.75	8.60		
	工况 3	11	0.75		5.40	工况 4	19	0.67	8.30
		12	0.76		3.20		20	0.73	7.70

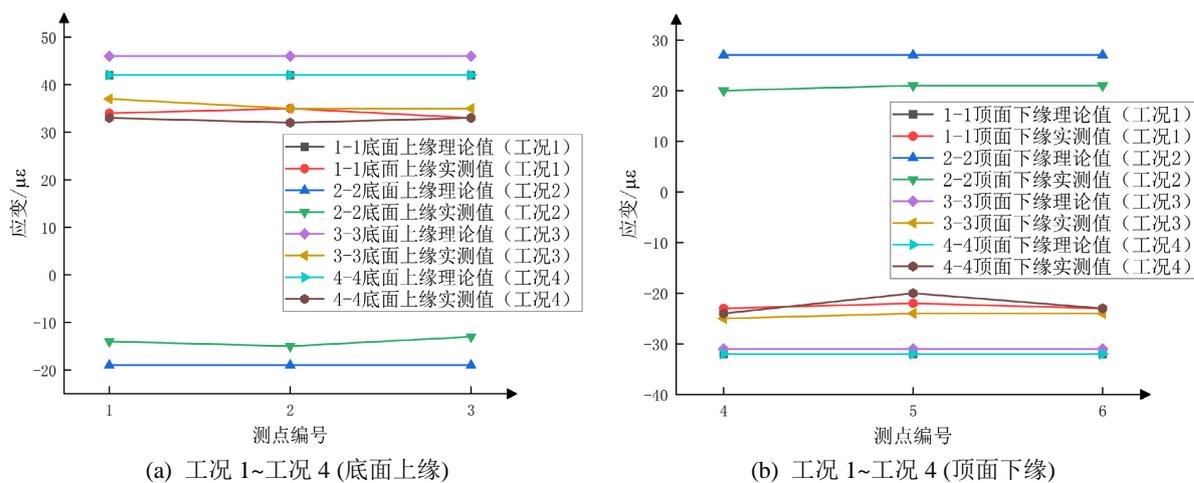
续表

工况 3	13	0.77	4.30	21	0.77	8.30	
	14	0.79	7.10	22	0.82	9.40	
	15	0.79	8.50	23	0.83	9.90	
	16	0.81	6.10	24	0.88	6.80	
工况 5	3	0.72	7.00	工况 6	11	0.84	6.60
	4	0.75	7.70		12	0.88	5.20
	5	0.84	4.90		13	0.76	7.00
	6	0.89	7.10		14	0.83	5.60
	7	0.78	7.40		15	0.74	3.80
工况 7	8	0.82	9.70	16	0.74	1.80	
	11	0.76	8.60	工况 8	19	0.63	4.80
	12	0.77	5.90		20	0.74	7.40
	13	0.78	6.90		21	0.77	7.00
	14	0.80	6.70		22	0.81	4.80
	15	0.81	9.80		23	0.85	7.40
16	0.81	4.80	24		0.89	5.30	

根据上图和上表可以得出的结论是：实际测得的桥梁结构的挠度值小于理论计算的挠度值，这说明桥梁结构的实际刚度要大于理论上的刚度。各工况相对残余挠度均不超过 20%，整个结构的受力状态符合规范要求。主梁挠度校验系数符合规范，并且规范中对结构变形的限制也满足要求，这说明结构刚度符合设计要求。

5.2. 应变测试结果

在各加载工况满载作用下，各断面相应应变测试结果见图 9 所示，图中应变值以受拉为正，受压为负。经计算各工况的应变校验系数以及相对残余应变见表 3。



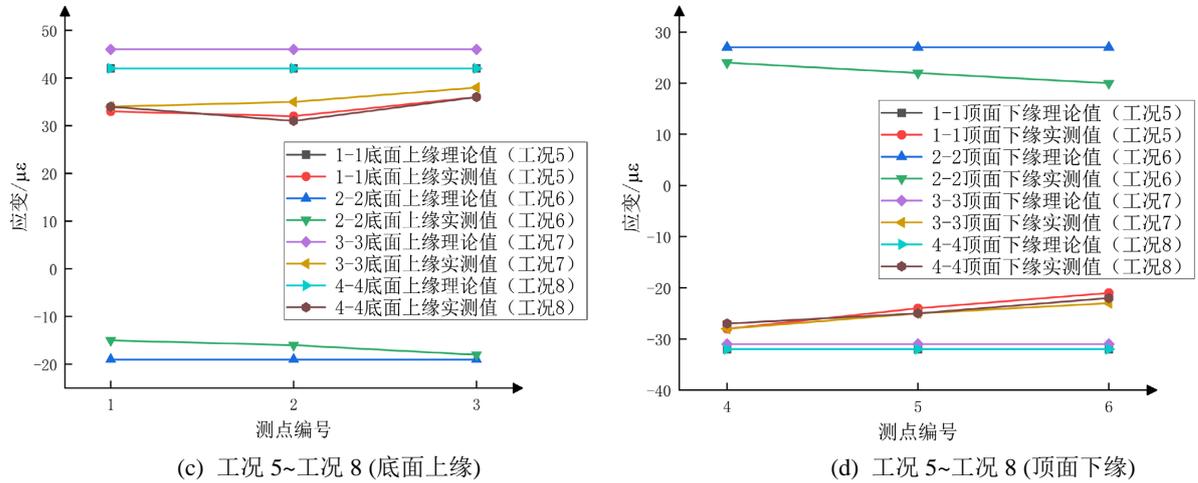


Figure 9. Strain test results under various working conditions
图 9. 各工况应变测试结果

Table 3. Strain calibration coefficients and relative residual strains for each condition
表 3. 各工况应变校验系数和相对残余应变

工况	测点编号	应变校验系数	相对残余应变/%	工况	测点编号	应变校验系数	相对残余应变/%
工况 1	1	0.81	5.56	工况 2	1	0.74	6.67
	2	0.83	5.41		2	0.79	11.76
	3	0.79	5.71		3	0.68	7.14
	4	0.72	4.17		4	0.74	4.76
	5	0.69	4.35		5	0.78	4.55
	6	0.72	4.17		6	0.78	4.55
工况 3	1	0.80	2.63	工况 4	1	0.79	2.94
	2	0.76	5.41		2	0.76	5.88
	3	0.76	2.78		3	0.79	2.94
	4	0.81	7.41		4	0.75	4.00
	5	0.77	7.69		5	0.63	9.09
	6	0.77	4.00		6	0.72	4.17
工况 5	1	0.79	2.94	工况 6	1	0.79	6.25
	2	0.76	3.03		2	0.84	5.88
	3	0.86	5.26		3	0.95	5.26
	4	0.88	3.45		4	0.89	4.00
	5	0.75	4.00		5	0.81	4.35
	6	0.66	4.55		6	0.74	4.76

续表

工况 7	1	0.74	5.56	工况 8	1	0.74	5.56
	2	0.76	2.78		2	0.76	2.78
	3	0.83	5.00		3	0.83	5.00
	4	0.90	3.45		4	0.90	3.45
	5	0.81	7.41		5	0.81	7.41
	6	0.74	4.17		6	0.74	4.17

由上图和上表可知: 主梁的实测应变小于理论计算应变, 应变校验系数在 0.63~0.95 之间, 测试断面混凝土相对残余应变都小于 20%, 说明桥梁结构处于弹性阶段。

5.3. 裂缝观测结果

静载试验过程中未发现裂缝产生。

6. 动载试验结果

6.1. 自振特性

通过使用空间有限元软件模拟主桥试验桥跨, 可以比较分析模型计算得出的结构自振频率和振型与实际试验结果[2], 从表 4 得到大桥主桥结构振动的前五阶实测固有模态频率均高于相应的理论计算频率, 试验表明该大桥主桥结构实际刚度大于理论刚度。

Table 4. Table of measured modal parameters

表 4. 实测模态参数表

阶次	振型	实测固有频率(Hz)	计算固有频率(Hz)	实测模态阻尼(%)
1	一阶竖弯, 反对称弯曲	0.561	0.477	1.32
2	二阶竖弯, 正对称竖弯	0.842	0.602	1.15
3	一阶侧弯, 反对称侧弯	1.239	0.895	2.69
4	三阶竖弯, 正对称弯曲(同向)	1.452	1.035	1.64
5	四阶竖弯, 正对称弯曲(反向)	1.807	1.310	1.44

6.2. 无障碍行车和有障碍行车

行车试验测定结构在动荷载作用下冲击系数, 测试结果如表 5 所示, 测得无障碍行车试验冲击系数在 0.024~0.047 之间, 平均值为 0.036; 当桥面处于有障碍行车时, 冲击系数较大, 达到 0.146。

Table 5. Measured value of impact coefficient

表 5. 冲击系数实测值

试验	车速	工况	位置	冲击系数
无障碍行车试验	20 km/h	跑车	下缘	0.029
	40 km/h	跑车	下缘	0.024

续表

无障碍行车试验	50 km/h	跑车	下缘	0.045
	60 km/h	跑车	下缘	0.047
有障碍行车试验	20 km/h	跳车	下缘	0.122
	30 km/h	跳车	下缘	0.146

7. 结论

本文针对大桥主桥, 将现场试验与理论计算进行对比, 得出以下结论。

(1) 静载试验加载效率符合相关规范, 范围在 0.88~1.00 之间。

(2) 试验荷载作用下, 试验挠度值、应变值均小于理论计算值, 相对残余变形和应变均小于 20%。表明桥梁在试验荷载作用下处于弹性工作状态, 桥梁的抗弯刚度和强度满足设计荷载要求[4]。

(3) 在多种偏载工况下, 主梁表现出了卓越的总体承载性能和出色的抗扭转刚度。抗裂性能满足设计标准。整体结构技术状况良好, 跨度和主墩在测试工况下未表现异常, 证实了桥梁设计的有效性[11]。

(4) 主桥结构振动前五阶固有模态频率高于理论计算频率, 表明动力刚度理论值小于实际值。动载试验显示, 在正常行驶状态下, 主梁的动态应力增量较小, 但在桥面不平整时增量较大[12]。建议增强桥面维护, 以减少不适应因桥面不平导致的车辆行驶冲击。

参考文献

- [1] 吴光宇, 杨升善, 汪劲丰, 等. 大跨预应力混凝土桥梁极限承载力计算[J]. 南昌大学学报(理科版), 2013, 37(2): 198-204.
- [2] 王冬雪. 高墩大跨连续刚构桥施工监控技术研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
- [3] 乔文斗, 吴永红, 贾毅, 等. 南汀河中桥荷载试验研究[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(4): 117-119.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [5] 孙鹏. 非对称独塔单索面预应力混凝土斜拉桥静载试验分析[J]. 广东土木与建筑, 2018, 25(5): 25-27.
- [6] 高浩. 托巴大桥施工线形和应力控制研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [7] 王丽, 孙立, 霍立飞. 某连续箱梁桥荷载试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2014(10): 29-31.
- [8] 魏国. 预应力砼变截面连续箱梁动静力荷载试验与分析[J]. 福建交通科技, 2011(5): 36-39.
- [9] 李铁军. 基于等效建模的大跨度钢桁梁斜拉桥静动力特性计算及荷载试验验证[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [10] 丁邦平. 桥梁荷载试验方案及承载能力评估[J]. 淮北职业技术学院学报, 2013, 12(5): 126-127.
- [11] 臧巨宝. 长期偏载作用下的钢管混凝土拱桥设计与结构安全稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2016.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T J21-01-2015 公路桥梁荷载试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.