

某预应力混凝土连续桥梁车辆荷载作用下力学性能试验研究

朱中城¹, 朱珍珍², 曾在平³, 朱云云², 郝俊¹

(1. 信阳市园林绿化事务中心, 河南 信阳 464000; 2. 淮滨县实验小学, 河南 信阳 464000; 3. 甘肃建筑职业技术学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为保证某预应力混凝土连续桥建成通车后的结构安全, 对该桥进行静载试验。采用 Midas Civil 2020 软件, 在城-A 级荷载下对桥梁进行结构计算分析, 通过对称加载、偏载(右侧)等 6 种不同静力加载工况, 对各控制截面进行挠度与应变性能指标进行对比分析。结果表明: 在城-A 级静力荷载作用下, 桥梁处于弹性工作状态, 各工况下控制截面主要测点的挠度和应变均表现为随荷载增加而增长, 且接近线性变化; 偏载对桥梁挠度影响较大, 最大挠度增幅为 26.15%; 右侧偏载作用下, 左腹板应变幅度最大增加达 37.10%, 表明偏载对左腹板应变影响显著。

关键词: 预应力混凝土连续桥; 测试截面控制; 静载试验; 荷载效率系数

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)07-0014-09

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.07.073

Experimental study on mechanical properties of a prestressed concrete continuous bridge under vehicle load

ZHU Zhongcheng¹, ZHU Zhenzhen², ZENG Zaiping³, ZHU Yunyun², Hao Jun¹

(1. Xinyang City Landscape and Greening Affairs Center, Xinyang 464000, Henan, China;

2. Huaibin County Experimental Primary School, Xinyang 464000, Henan, China;

3. Gansu Construction Vocational Technical College, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: To ensure the structural safety of a prestressed concrete continuous bridge after its opening to traffic, static load tests were conducted on the bridge upon its completion. Structural analysis was performed using MIDAS Civil 2020 under City-A level loads. Through six different static loading conditions, including symmetrical loading and eccentric loading (right-side), the deflection and strain performance indicators of each control section were analyzed. The results indicate that under City-A level static loads, the bridge remains in an elastic working state. The deflection and strain at the main measuring points of the control sections increase with the applied load and exhibit an approximately linear variation. Eccentric loading has a significant effect on bridge deflection, with a maximum deflection increase of 26.15%. Under right-side eccentric loading, the strain in the left web increases by up to 37.10%, indicating that eccentric loading significantly influences the strain response of the left web.

Key words: prestressed concrete continuous bridge; test section control; static load test; load efficiency coefficient

桥梁不仅是连接两地的重要交通枢纽,也是国家基础设施的重要组成部分,对于促进经济发
展、社会进步和人民幸福具有不可替代的作用,也是我国交通强国建设的关键一环。其中,预应

收稿日期: 2025-08-28

基金项目: 甘肃省住房和城乡建设厅 2024 年建设科技项目(JK2024-34)

作者简介: 朱中城(1992—),男,助理工程师,从事空间结构与钢结构,大跨度桥梁耐久性等方面的研究。

通信作者: 曾在平(1983—),男,博士,副教授,从事桥梁、钢管组合结构耐久性及钢结构等方向的研究。

力混凝土连续桥因其自重轻、抗裂性能好、跨度大、行车噪声小、耐久性好等优点,是桥梁工程师设计时优先考虑的方案之一。但桥梁事故频发,如2019年10月10日,江苏省无锡市桥面侧翻事故,造成3人死亡、2人受伤,其直接原因可能为货车超载^[1];2021年12月18日,湖北省鄂州市境内G50沪渝高速花湖互通D匝道桥梁发生侧翻,事故原因系承运人违法超载运输,违反大件运输车辆通过桥梁时居中行驶的规定,导致桥梁倾覆^[2]。因此,对新建桥梁在偏载及对称加载车辆荷载作用下的力学性能研究具有重要工程意义。

为了更清楚地了解新建或者既有桥梁的承载力,以确保桥梁的安全运营,部分学者开展了系列研究,取得了一些成果。针对桥梁检测方面,主要通过桥梁结构进行竖向承载力加载,检测桥梁结构承载力及其强度^[3-4]。静载试验时,要确保箱梁结构及其性能的检测以效率系数为基准,所有的数据参数控制在规范限值范围内,并需要按照公路桥梁工程建设的规程或者标准开展工作,目的是及时发现桥梁潜在的结构问题和安全隐患,做好防患措施^[5]。

针对预应力混凝土桥梁方面的研究,梁俊怡^[6]以某桥梁工程为背景,通过Midas Civil 2017软件建立有限元模型,分析结果表明:不同工况荷载下应变、挠度的相对残余均控制在规范范围内,主梁的结构强度和竖向刚度都处于合理范围内,符合设计要求。张守军^[7]以某特大桥的静载试验为对象,采用Midas Civil对大桥进行建模分析,结果表明:静力荷载试验有限元分析结果与实测结果的校验系数满足相关规范要求。齐文彬^[8]等通过Midas Civil软件对某预应力混凝土连续梁高架桥建模分析,依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)中B类预应力混凝土构件的规定,桥梁桥面材料的裂缝限值为0.1 mm。静载试验结果表明,各变形最不利控制截面在加载过程中均未发现裂缝,符合规范要求。王燕^[9]以预应力混凝土连续梁桥为研究对象,通过荷载试验,施加车辆荷载后依据评定标准判定主梁的挠度和应变指标,结果显示校验系数均能满足规范要求,且一般要求校验系数 $\eta \leq 1$ 。 η 值越小,表示结构具有更大的安全储备;如果 η 值过小,多数是因为材料实际强度和弹

性模量高、理论计算不考虑桥面铺装的共同受力; η 值过大,则表示结构安全储备不足,多因材料强度低、结构连接性差等因素导致。窦俊鹏^[10]选取2孔分别为16 m和32 m预应力混凝土简支T梁进行动静载试验,分析梁体在静载加载和运营列车荷载作用下的受力性能。胡晓东^[11]对大跨度混合梁斜拉桥进行动静载现场试验,分析桥梁在静力试验荷载作用下的变形和内力,通过将试验截面的应力、挠度实测值与理论计算值进行比较,获得校验系数,评定了桥梁的真实承载能力。潘忠岳等^[12]对望安高速公路北盘江特大桥进行了荷载试验,通过对该桥控制截面的变形和应力进行分析。结果表明:该桥结构刚度、承载能力均满足设计荷载标准要求。

桥梁工程建设好后,需要对其进行检测以评判工程质量,确保行车安全。长期服役的桥梁也需定期检测,以防患倾斜、倒塌等事故。而不同的桥梁因建设地质条件不同,当地行车车流不同,大车荷载、抗震设防和抗倾覆要求不同,具体桥梁需要针对性分析。本文将对当地现有预应力混凝土连续桥开展荷载试验,探究其承载力和变形规律,保障正常的通车要求,以期可为后期桥梁的养护提供参考。

1 工程概况

1.1 桥梁概况

该桥为预应力混凝土连续桥梁,上部结构采用(40+60+40)m变截面,桥面横桥向布置:0.5 m(防撞墙护栏)+12 m(车行道+路缘带)+0.5 m(防撞墙)+12 m(车行道+路缘带)+0.5 m(防撞墙护栏)。设计车速:主线60 km/h。设计荷载标准:城-A级荷载。桥面布置按双向六车道,大桥立面见图1,标准横断面见图2。图中, R 为圆的半径。

1.2 确定测试截面

利用Midas Civil 2020结构分析软件对该桥建模^[13],进行不同工况下的计算分析。以城-A级荷载对桥梁进行加载,横向6个车道,主梁混凝土强度采用C50混凝土,弹性模量 $E_c = 3.45 \times 10^4$ MPa,桥梁计算模型如图3所示,活载作用下的弯矩包络图(考虑冲击)如图4所示。根据活载作用下的内力包络图,可确定各测试控制截面,根据包络图最终确定各控制截面具体位置如图5所示,测试截面

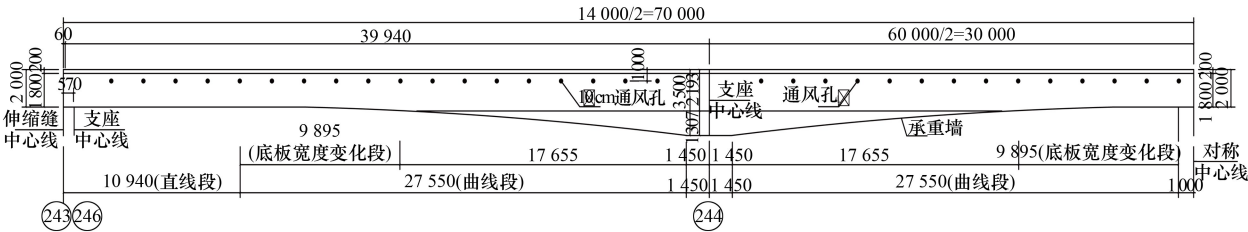


图 1 桥梁立面

mm

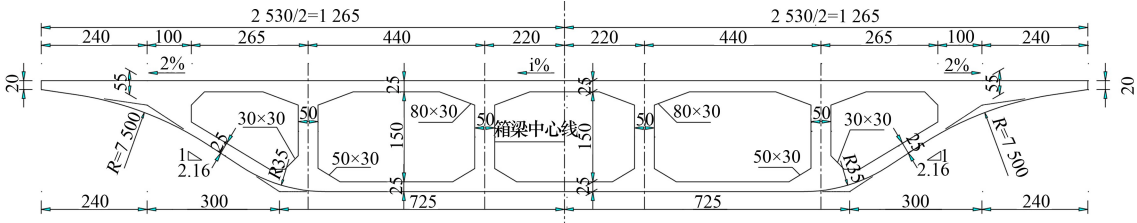


图 2 桥梁标准横断面

cm

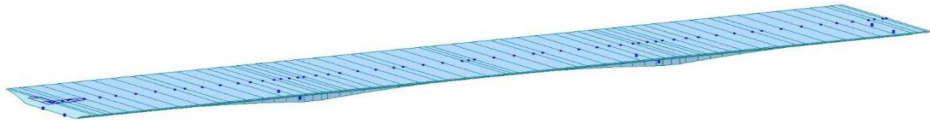


图 3 整桥有限元模型

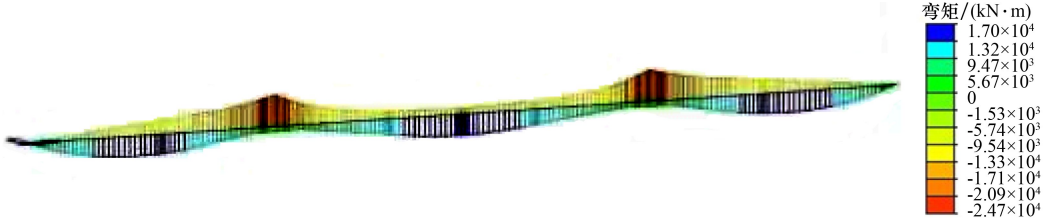


图 4 主梁在移动荷载作用下的弯矩包络图

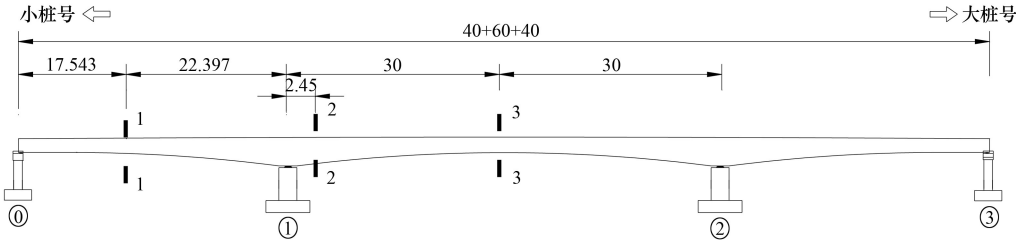


图 5 桥梁静载试验测试截面位置示意

m

的具体测试内容见表 1。

表 1 各测试截面测试项目

截面编号	位置	测试项目
1-1	第 1 跨最大弯矩截面	挠度、应力
2-2	2 [#] 墩支点截面附近	应力
3-3	第 2 跨跨中最大弯矩截面	挠度、应力

1.3 测点布置

1.3.1 应力测点

主梁各截面的混凝土表面应力采用稳定性好、精度高并适合于野外环境的 HY65 型应变计进行测量，主要测试控制截面的应力分布规律和受力

性能。测点应变传感器布置示意图 6。

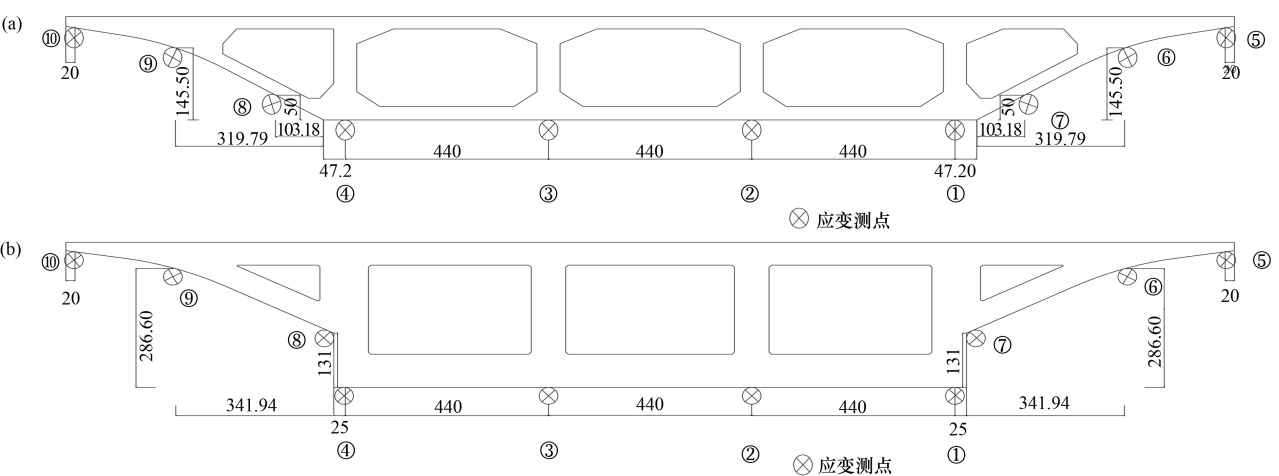
1.3.2 挠度测点

主梁截面的挠度采用高精度数码位移计进行测量，主要测试控制截面的挠度变化情况，测点布置示意图 7 所示。

2 桥梁静载试验

2.1 加载车型

静载试验采用 8 辆总质量为 36 t 的三轴车作为试验加载车，车型如图 8 所示，实际加载车轴载荷如表 2 所示。在汽车试验荷载作用下的工况静



(a) 1-1、3-3 截面；(b) 2-2 截面

图 6 应变测点布置 cm

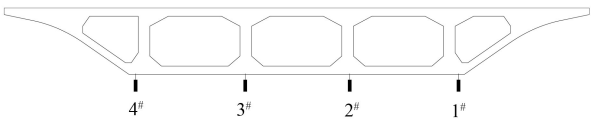


图 7 1-1 截面、3-3 截面挠度测点布置

载效率系数见表 3。车队纵向位置按 Midas Civil 软件计算的影响线进行布设，为保证试验效果，对于某一特定荷载工况，试验荷载的大小和加载位置的选择采用静载试验效率系数进行控制，静力试验荷载效率系数比值宜为 0.95 ~ 1.05；对交

(竣)工验收性质的试验荷载效率系数宜为 0.85 ~ 1.05^[14]。

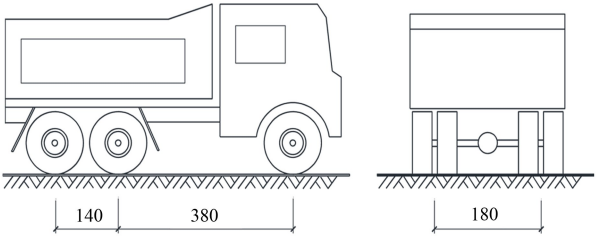


图 8 重车加载车型 cm

表 2 实际加载车轴载荷 kN

加载车编号	前轴载荷	中轴载荷	后轴载荷	总载荷
1	80.6	142.9	142.9	366.4
2	80.2	142.2	142.2	364.6
3	79.1	140.2	140.2	359.5
4	77.9	138.1	138.1	354.1
5	78.3	138.8	138.8	355.9
6	78.6	139.3	139.3	357.2
7	78.4	139.0	139.0	356.4
8	80.2	142.2	142.2	364.6

表 3 各工况弯矩静载效率系数

项目工况	弯矩/(kN·m)		加载效率	控制截面编号
	设计荷载	加载车辆		
工况一:对称加载	16 285.2	16 219.9	1.00	1-1
工况二:右侧偏载	16 285.2	16 219.9	1.00	1-1
工况三:对称加载	-19 929.9	-17 259.0	0.87	2-2
工况四:右侧偏载	-19 929.9	-17 259.0	0.87	2-2
工况五:对称加载	17 086.9	17 050.3	1.00	3-3
工况六:右侧偏载	17 086.9	17 050.3	1.00	3-3

2.2 加载工况及其荷载纵向布置

工况一、工况二：第 1 跨(边跨)最大正弯矩 1-1 截面正弯矩影响线如图 9 所示，1-1 截面加载图如图 10 所示。

工况三、工况四和工况五、工况六：第 2 跨中最大正弯矩 3-3 截面正弯矩影响线如图 11 所示，2-2 截面加载图如图 12 所示。

2.3 现场检测

该桥结构形式为变截面连续箱梁桥，结合工程的具体特点，现场试验与数据采集如图 13 所示。

3 试验结果分析

3.1 挠度分析

表 4 给出了桥梁各个工况主要测点的实测弹性挠度值、理论挠度值以及主要测点的校验系数。由各工况比较可以看出，桥梁试验跨主要测点的实测

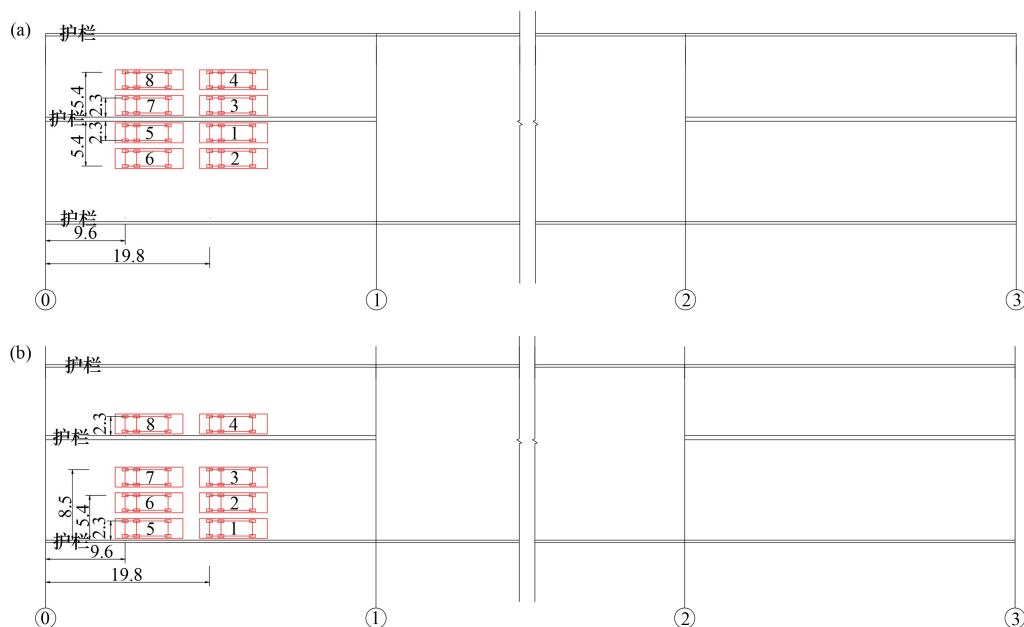
挠度值均小于理论挠度值，主要测点的挠度校验系数在 0.71 ~ 0.76 之间，均满足《城市桥梁检测与评定技术规范》(CJJ/T 233—2015)中挠度校验系数不大于 1.0 的要求，说明结构工作性能较好，实际抵抗变形能力要比理论上抵抗变形能力要好，有一定的安全储备；在对称荷载作用下(工况一和工况五)，各测点截面挠度均匀；右侧荷载作用下(工况二和工况六)，挠度幅度值变化较大，右侧荷载(工况二)相对对称荷载(工况一)，测点 1 挠度幅度值增加 26.15%，测点 4 挠度幅度值减少 16.05%；工况六相对工况五，测点 1 挠度幅度值增加 11.58%，测点 4 挠度幅度值减少 13.50%。

3.2 应变分析

表 5 给出了桥梁试验跨测试截面各工况主要测点的实测应变、理论应变值以及校验系数。由各工况表比较可以看出，桥梁试验跨在试验荷载



图 9 1-1 截面正弯矩影响线



(a) 工况一；(b) 工况二

图 10 最终车辆加载图

m

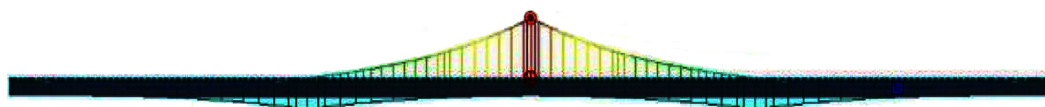
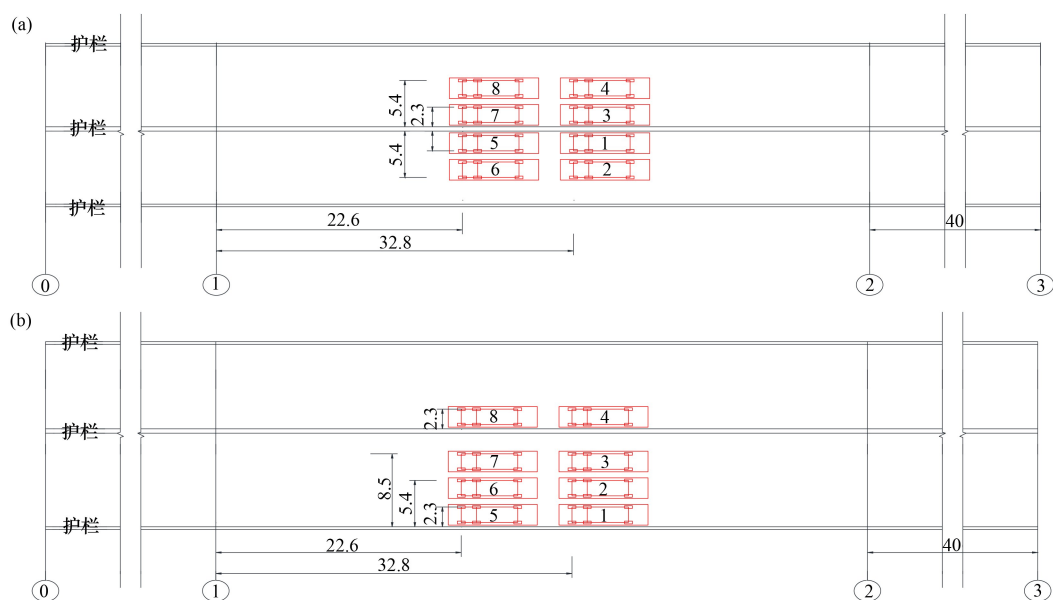


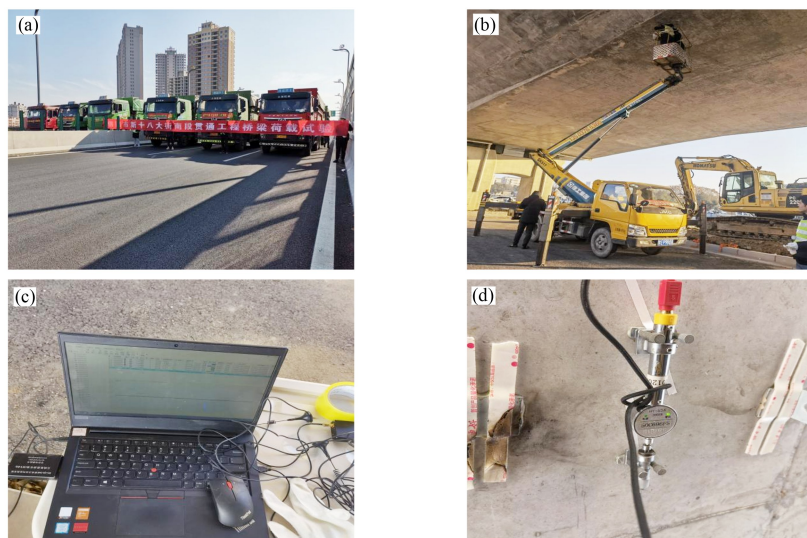
图 11 3-3 截面正弯矩影响线



(a) 工况三 (工况五); (b) 工况四 (工况六)

图 12 最终车辆加载图

m



(a) 现场车辆加载; (b) 荷载试验仪器安装; (c) 仪器数据收集; (d) 荷载试验仪器布置

图 13 现场检测

作用下测试截面主要测点的实测应变值均未超出理论应变值, 应变的校验系数在 0.66 ~ 0.73 之间, 实测值均小于理论值, 符合《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21—01—2015) 要求, 说明桥梁具有很好的安全储备; 右侧偏载和对称荷载作用下, 底板测点均处于弹性状态, 应变幅度值变化不明显; 比较对称荷载作用下测点 6 和测点 9 的应变可知, 对称结构、对称点位、对称荷载作用下, 测点 6 和测点 9 应变值相近; 右侧偏载作用下, 左腹板上测点 9 在工况二、工况四、工况六作用下应变幅度分别增加 37.10%、-25.00%、

30.16%, 偏载荷载对左腹板上应变影响明显。

4 结 论

(1) 各工况主要测点实测挠度值均小于理论挠度值, 挠度校验系数在 0.71 ~ 0.76 之间, 均满足《城市桥梁检测与评定技术规范》(CJJ/T 233—2015) 不大于 1.0 的要求, 说明实际抵抗变形能力要比理论上抵抗变形能力要好, 有较高的安全储备。

(2) 桥梁试验跨在试验荷载作用下控制截面的主要测点实测应变值均未超出理论应变值, 应变的校验系数在 0.66 ~ 0.73 之间, 符合《公路桥

表 4 各工况实测挠度和理论挠度分析

工况号	控制 截面	测点 编号	理论 值/mm	分级 1 实 测值/mm	分级 2 实 测值/mm	分级 3 实 测值/mm	实测弹性位 移值/mm	幅度 值/%	校验 系数
一	1-1 截面	1 [#]	-6.322	-2.558	-3.621	-4.764	-4.517	—	0.71
		2 [#]	-6.322	-2.355	-3.680	-4.788	-4.532		0.72
		3 [#]	-6.322	-2.530	-3.545	-4.737	-4.579		0.72
		4 [#]	-6.322	-2.529	-3.573	-4.690	-4.567		0.72
二	1-1 截面偏载	1 [#]	-7.521	-3.170	-4.589	-5.910	-5.698	26.15	0.76
		2 [#]	-6.759	-2.788	-4.027	-5.294	-4.972	9.71	0.74
		3 [#]	-5.998	-2.379	-3.324	-4.486	-4.330	-5.44	0.72
		4 [#]	-5.236	-2.044	-3.094	-4.057	-3.834	-16.05	0.73
五	3-3 截面	1 [#]	-12.581	-4.863	-7.282	-9.342	-9.152	—	0.73
		2 [#]	-12.581	-4.841	-7.236	-9.394	-9.045		0.72
		3 [#]	-12.581	-4.859	-7.238	-9.292	-9.183		0.73
		4 [#]	-12.581	-4.490	-6.998	-9.163	-9.021		0.72
六	3-3 截面偏载	1 [#]	-14.396	-5.593	-7.908	-10.523	-10.212	11.58	0.71
		2 [#]	-13.251	-5.238	-7.608	-10.056	-9.823	8.60	0.74
		3 [#]	-12.107	-4.921	-7.133	-9.227	-9.095	-0.96	0.75
		4 [#]	-10.962	-4.165	-6.139	-7.944	-7.803	-13.50	0.71

注：幅度值 = (| 右侧偏载测点挠度值 | - | 对称荷载测点挠度值 |) / | 对称荷载测点挠度值 | 。

表 5 各工况实测应变和理论应变对比

工况号	控制 截面	测点 编号	测点 位置	理论值	分级 1 实测值	分级 2 实测值	分级 3 实测值	实测弹 性应变	幅度 值/%	校验 系数
一	1-1 截面	1	底板	58.3	21.3	31.4	40.7	39.4	—	0.68
		2	底板	58.3	21.1	31.8	41.8	41.0		0.70
		3	底板	58.3	21.2	31.7	41.5	41.1		0.70
		4	底板	58.3	20.9	33.2	42.6	41.7		0.72
		5	右翼缘板	-32.2	-11.2	-16.9	-22.1	-21.7		0.67
		6	右腹板上	-9.0	-3.5	-5.2	-6.7	-6.3		0.70
		7	右腹板下	34.2	12.8	18.5	24.7	24.5		0.72
		8	左腹板下	34.2	12.4	17.7	23.8	23.6		0.69
		9	左腹板上	-9.0	-3.5	-5.1	-6.6	-6.2		0.69
		10	左翼缘板	-32.2	-12.4	-17.5	-23.5	-23.1		0.72
二	1-1 截面偏载	1	底板	61.2	22.4	33.3	44.1	42.8	8.63	0.70
		2	底板	59.9	21.4	32.2	43.7	43.0	4.88	0.72
		3	底板	58.6	22.4	32.3	43.2	42.8	4.14	0.73
		4	底板	57.4	21.1	31.5	41.7	40.7	-2.40	0.71
		5	右翼缘板	-31.6	-11.1	-17.0	-21.8	-21.6	-0.46	0.68
		6	右腹板上	-8.7	-3.3	-4.9	-6.3	-6.1	-3.17	0.70
		7	右腹板下	34.2	13.0	18.5	24.9	24.8	1.22	0.73
		8	左腹板下	35.9	12.9	18.5	24.6	24.3	2.97	0.68
		9	左腹板上	-12.2	-4.4	-6.7	-8.9	-8.5	37.10	0.70
		10	左翼缘板	-32.8	-12.4	-18.0	-23.5	-23.2	0.43	0.71

表 5(续)

工况号	控制 截面	测点 编号	测点 位置	理论值	分级 1 实测值	分级 2 实测值	分级 3 实测值	实测弹 性应变	幅度 值/%	校验 系数
三	2-2 截面	1	底板	-20.6	-7.5	-11.0	-14.7	-14.4	—	0.70
		2	底板	-20.6	-7.6	-11.1	-14.8	-14.6		0.71
		3	底板	-20.6	-7.6	-11.4	-14.7	-14.4		0.70
		4	底板	-20.6	-7.5	-11.1	-14.5	-14.1		0.68
		5	右翼缘板	13.3	4.9	7.6	9.8	9.5		0.71
		6	右腹板上	9.3	3.4	5.2	6.7	6.4		0.69
		7	右腹板下	-11.6	-4.2	-6.6	-8.5	-8.4		0.72
		8	左腹板下	-11.6	-4.2	-6.0	-8.1	-7.6		0.66
		9	左腹板上	9.3	3.6	5.1	6.9	6.8		0.73
		10	左翼缘板	13.3	4.9	7.6	9.8	9.5		0.71
四	2-2 截面偏载	1	底板	-19.4	-7.4	-10.4	-14.1	-13.8	-4.17	0.71
		2	底板	-20.1	-7.1	-10.7	-14.5	-14.3	-2.05	0.71
		3	底板	-20.8	-7.4	-11.2	-15.2	-14.9	3.47	0.72
		4	底板	-21.4	-8.1	-11.9	-15.7	-15.2	7.80	0.71
		5	右翼缘板	15.4	5.6	8.5	11.3	10.9	14.74	0.71
		6	右腹板上	10.7	4.1	6.0	7.8	7.4	15.63	0.69
		7	右腹板下	-9.3	-3.6	-5.2	-7.0	-6.7	-20.24	0.72
		8	左腹板下	-11.3	-4.1	-6.1	-8.1	-8.0	5.26	0.71
		9	左腹板上	7.5	2.9	4.3	5.5	5.1	-25.00	0.68
		10	左翼缘板	11.3	4.2	6.1	8.1	7.7	-18.95	0.68
五	3-3 截面	1	底板	63.5	23.1	33.9	45.7	45.3	—	0.71
		2	底板	63.5	23.8	35.4	46.1	45.7		0.72
		3	底板	63.5	23.4	34.4	45.9	45.8		0.72
		4	底板	63.5	21.7	33.5	44.9	44.6		0.70
		5	右翼缘板	-31.6	-11.5	-17.0	-22.3	-21.9		0.69
		6	右腹板上	-9.6	-3.5	-5.3	-6.9	-6.6		0.69
		7	右腹板下	36.5	13.1	20.2	26.2	26.0		0.71
		8	左腹板下	36.5	12.9	20.1	25.9	25.6		0.70
		9	左腹板上	-9.6	-3.5	-5.1	-6.7	-6.3		0.66
		10	左翼缘板	-31.6	-11.2	-16.9	-22.5	-22.1		0.70
六	3-3 截面偏载	1	底板	64.9	23.9	34.9	46.8	46.4	2.43	0.71
		2	底板	64.0	23.2	34.1	45.7	45.1	-1.31	0.70
		3	底板	63.0	23.6	33.9	45.3	44.9	-1.97	0.71
		4	底板	62.0	22.9	33.2	44.2	43.7	-2.02	0.70
		5	右翼缘板	-29.0	-10.9	-15.7	-20.6	-20.3	-7.31	0.70
		6	右腹板上	-7.5	-3.0	-4.4	-5.8	-5.4	-18.18	0.72
		7	右腹板下	37.7	13.9	20.4	26.3	25.8	-0.77	0.68
		8	左腹板下	34.8	12.7	18.6	24.4	24.2	-5.47	0.70
		9	左腹板上	-11.6	-4.3	-6.5	-8.4	-8.2	30.16	0.71
		10	左翼缘板	-34.2	-12.7	-18.2	-24.0	-23.6	6.79	0.69

注：幅度值 = (| 右侧偏载测点应变值 | - | 对称荷载测点应变值 |) / | 对称荷载测点应变值 | 。

梁荷载试验规程》(JTG/T J21—01—2015)要求,说明结构工作性能较好,有一定的安全储备。应变分析中,当右侧偏载和对称荷载作用时,底板测点均处于弹性状态,应变幅度值变化不明显;当称荷载、对称结构、对称点位作用时,测点应变值相近;偏载荷载对左腹板应变影响明显。

(3) 挠度分析,右侧荷载相对于对称荷载,荷载偏载右侧测点挠度增幅较大,最大增幅为 26.15%;荷载左侧测点挠度幅度值减少 16.05%,根据试验结果,建议车辆行驶时避免偏载情况,保证桥梁处于安全工作状态。经过荷载试验,该预应力混凝土连续桥梁的挠度、控制截面的应变等指标,均符合规范要求,暂时不需要维护加固,但考虑偏载情况,应限制单侧重型货车通行,对该桥梁树立限重标识,定期对关键截面进行检测,防患事故。对出现轻微裂缝处,可以采用砂浆,或者细石混凝土或者修补剂填充裂缝并平整表面,使裂缝封闭,保证混凝土的整体性,防止内部钢筋发生锈蚀影响结构性能。

参考文献:

- [1] 滕礼刚,胡康明,陈瑜. 基于无锡桥梁侧翻事故的桥梁全生命周期管理思考[J]. 市政技术, 2020, 38(4): 94-96.
- [2] 陶凤,吕银玲. 湖北高速桥梁侧翻超重又是罪魁祸首? [N]. 北京商报, 2021-12-20(2).

- [3] 田园,于建洋,鲍琪祥. 公路桥梁荷载试验过程控制要点分析[J]. 交通世界, 2019(19): 108-109.
- [4] 刘亦凡. 荷载试验在公路桥梁养护过程中的应用及作用分析[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(7): 244-245.
- [5] 胡静雯. 静载试验在公路桥梁检测中的应用探讨[J]. 青海交通科技, 2021, 33(4): 133-134; 141.
- [6] 梁俊怡. 预应力混凝土桥梁的静载试验研究[J]. 交通世界, 2020(17): 123-125.
- [7] 张守军. 预应力混凝土连续梁桥静载分析与试验研究[J]. 交通世界, 2020(34): 99-101; 131.
- [8] 齐文彬,王海军,王海龙,等. 基于静载试验的某预应力混凝土连续梁桥承载力评估[J]. 河北建筑工程学院学报, 2019, 37(4): 8-13.
- [9] 王燕. 静载试验在桥梁检测中的应用研究[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(2): 149-151.
- [10] 窦俊鹏. 重载铁路预应力混凝土简支 T 梁抗剪性能研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院, 2021.
- [11] 胡晓东. 基于动静载试验铁路混合梁斜拉桥静动力性能研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2020.
- [12] 潘忠岳,包天鹏. 山区大跨斜拉桥荷载试验研究[J]. 工程建设, 2020, 52(8): 78-82.
- [13] 林巍杰,汤宇,彭学军,等. 有限元分析软件在连续梁线形监控中的应用[J]. 工程建设, 2020, 52(11): 52-56.
- [14] 公路桥梁荷载试验规程: JTG/T J21—01—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2016.

(上接第 13 页)

- [3] 刘卫东,张超,江会华,等. 基于改进纯跟踪的低速智能汽车路径跟踪控制[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(25): 10983-10992.
- [4] 王鑫,凌铭,饶启鹏,等. 基于改进 Stanley 算法的无人车路径跟踪融合算法研究[J]. 汽车技术, 2022, (7): 25-31.
- [5] 王兴国,吴伟林,何伟. 基于 PSO 的 LQR 车辆横纵向跟踪控制研究[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(10): 136-142.
- [6] 伊力夏提·伊力哈木江,孟宇,白国星,等. 基于前馈非线性模型预测控制的类车机器人路径跟踪[J]. 工程科学学报, 2025, 47(1): 101-112.
- [7] 付景枝,尹泽凡,刘云平,等. 基于改进纯跟踪算法的

- 无人车路径跟踪研究[J]. 机械设计, 2022, 39(增刊 2): 41-45.
- [8] 胡丹丹,尹鹏飞,牛国臣,等. 基于滚动预瞄模型的纯跟踪算法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(9): 3787-3793.
- [9] 田宇洋,王金波,庞同嘉. MPC 算法与纯跟踪算法的横向控制策略研究对比[J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(8): 58-62.
- [10] 蒋元建. 基于激光雷达的铲运机自动驾驶系统关键技术研究[D]. 长沙:中南大学, 2023.
- [11] HESS W, KOHLER D, RAPP H, et al. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2016.