

多拱肋异型系杆钢拱桥静载试验分析

刘勇¹,徐松²,易欢乐³,邓星辉²

(1.南京市市政工程质量安全监督站,江苏南京 210000;2.南京工大桥梁与轨道交通研究院有限公司,江苏南京 210031;
3.中铁四局集团第二工程有限公司,江苏苏州 215131)

摘要:以多拱肋异型系杆钢拱桥为工程背景,从有限元计算分析、控制断面选取、测试内容及测点布置、试验加载工况确定等方面详细阐述了复杂结构桥梁静载试验方法和过程。在各试验工况加载下,对控制断面的应变、变形、吊杆索力进行测试,并与理论计算值进行比较分析。结果表明:现场实测值与理论计算值吻合较好,且均小于理论计算值,该异型系杆钢拱桥结构具有足够的强度和刚度安全储备,满足设计要求,所得结论可作为桥梁承载能力评定的依据。

关键词:异型拱桥;钢拱桥;静载试验;分析

中图分类号: U441+2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)05-0204-06

0 引言

近年来,随着桥梁建设的迅猛发展,人们不仅仅满足于桥梁建筑的使用功能,对桥梁建筑的结构合理性和美观的要求也越来越高。为适应这一发展需求,经过研究者们大量的理论研究和实桥设计后,提出了结构合理、造价经济、外形美观的异型拱桥结构。对于大跨度、复杂结构的桥梁而言,桥梁静载试验是其竣工验收和质量评定最直接有效的手段。通过静载试验可以验证桥梁的施工质量和结构受力性能,判定桥梁结构的实际承载能力,确定桥梁的实际运营状况和使用条件,为竣工验收、投入运营使用提供科学的依据^[1-3]。因此,本文基于某异型系杆钢拱桥实例,对新建异型结构桥梁进行静载试验分析和研究,并进行现场实际应用,研究成果可为类似复杂结构桥梁承载能力评定提供一定的参考。

1 工程概况

南京市承天大道跨外秦淮河大桥主桥为157 m下承式空间三索面非对称多拱肋异型系杆钢拱桥,主梁采用正交异性板扁平钢箱梁,桥面宽度为42 m,

标准节段钢箱梁横向分为5个箱体,跨中梁高3.030 m,两端支座处非标准节段为上下双层钢箱梁,支点梁高4.532 m。拱肋采用A、B、C 3道拱肋的布置形式,拱肋内侧为规则矩形钢箱,外侧焊接厚12 mm装饰板,形成六边形异型钢箱拱,拱轴线采用直线、圆曲线组成。拱肋A在拱顶处分为2支A1和A2。每道拱肋通过吊杆与主梁连接,形成空间三索面结构。拱肋A和拱肋B的吊杆沿主梁纵向轴线对称布置,每一侧分别布置12根和9根吊杆;拱肋C布置11根吊杆于主梁纵向轴线上。3道拱肋相邻2根吊杆间距均为6 m,全桥共计53根吊杆。

南京市承天大道跨外秦淮河大桥主桥的桥梁立面布置图和桥梁横断面布置图见图1、图2。

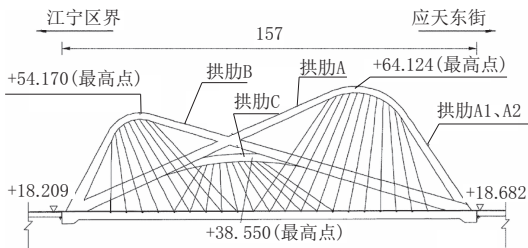


图1 桥梁立面布置图(单位:m)

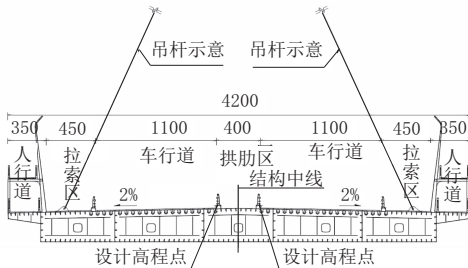


图2 桥梁横断面布置图(单位:cm)

收稿日期: 2023-06-12

基金项目: 江苏省住房和城乡建设厅科技指导性项目(2019 ZD0011118)

作者简介: 刘勇(1987—),男,硕士,高级工程师,从事市政工程质量安全监督管理工作。

通信作者: 徐松(1992—),男,硕士,工程师,从事桥梁监控测评及加固设计工作。电子信箱: 1103194267@qq.com

2 试验内容及目的

异型拱肋系杆钢拱桥可分为拱肋 A、拱肋 B、拱肋 C、主梁、拱肋 A 吊杆、拱肋 B 吊杆、拱肋 C 吊杆这几部分。桥梁静载试验前首先要进行桥梁结构计算分析,针对这几部分选择设计计算活载作用下能够产生最大截面应力和变形的控制断面位置,再采用等效加载原则,使其控制断面产生最不利荷载效应。通过测量桥梁结构在等效加载作用下各控制断面的应力及结构变形,并与理论计算值进行对比,从而确定桥梁实际工作状态与设计期望值是否相符。这是检验桥梁结构工作状态或实际承载能力最直接、最有效的一种试验手段。

3 静载试验

3.1 结构静力计算

采用 MIDAS Civil 2021 有限元模拟软件建立全桥空间梁格模型;采用梁单元对 6 片纵梁、拱肋 A、拱肋 B 和拱肋 C 进行模拟,采用桁架单元对全桥 53 根吊杆进行模拟。该桥有限元梁格计算分析模型见图 3;桥梁各构件在设计活载作用下的内力、变形以及吊杆索力增量见图 4~图 6。这些结果可为静载试验控制目标的确定提供理论计算依据。

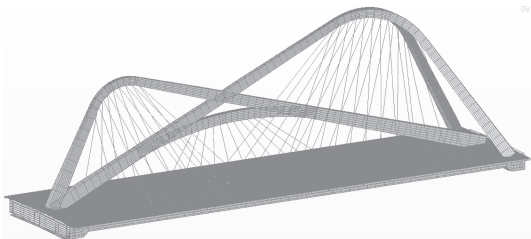


图 3 有限元梁格计算分析模型

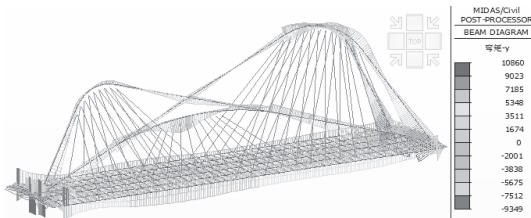


图 4 设计活载作用下桥梁结构内力包络(单位:kN·m)

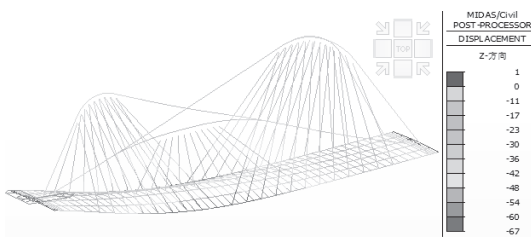


图 5 设计活载作用下桥梁结构变形(单位:mm)

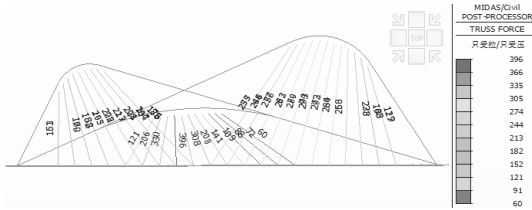


图 6 设计活载作用下吊杆索力增量(单位:kN)

3.2 试验控制目标

异型拱肋系杆钢拱桥主要受力结构分为主梁、拱肋 A、拱肋 B、拱肋 C、吊杆,根据设计活载作用下的结构内力与位移包络情况,选取结构受力不利位置,来确定各结构部位的试验控制断面。异型系杆拱桥静载试验的内力、位移控制断面布置图见图 7,10 个试验工况的分级情况及其具体控制目标见表 1、表 2。

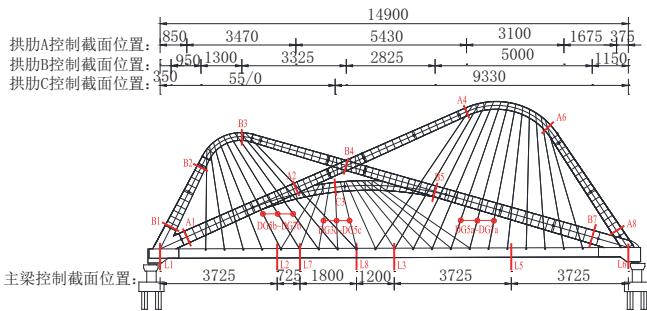


图 7 试验控制断面布置图(单位:cm)

表 1 各工况分级加载车桥面布置

工况	前轴距 D19# 侧拱脚距离 /m					备注
	一级	二级	三级	四级	五级	
工况 1/2	7.5	29.8				
工况 3/4	7.1	37.5	54.6			中载 / 偏载, 每级 6 辆车
工况 5/6	47.2	68.8	87.5			
工况 7/8	75	99.5	114.8			
工况 9	水袋	19.5	35.2	57.2		左幅加载,每 级 3 辆车
工况 10	加载	61.5	74.5	98.5	116.5	

3.3 试验测试内容

3.3.1 应变测量

应变测量采用在钢结构表面焊接基座,安装振弦式应力计进行测试,同时考虑环境温度等因素的补偿,采用综合测试仪自动采集存储数据。应力测试部分利用施工监控布置的应力测试断面,具体测点布置如图 8、图 9 所示。

3.3.2 变形测量

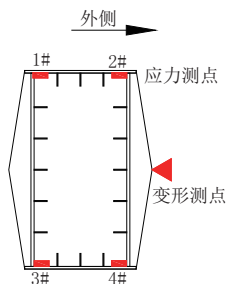
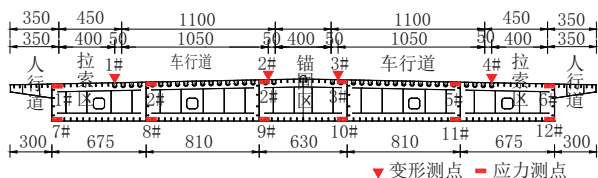
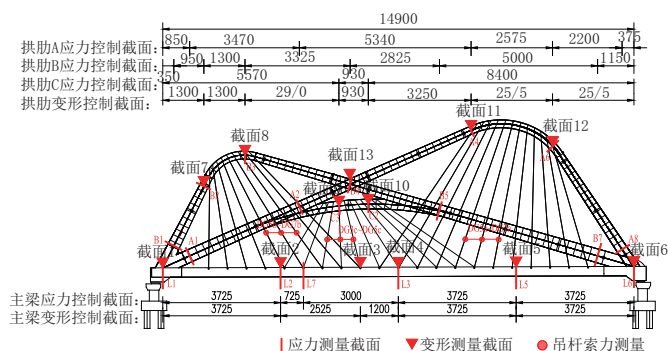
主梁竖向变形采用电子水准仪测试,桥梁变形测点具体布置见图 8、图 9;拱肋变形采用全站仪测试,其应力、变形测点的横桥向布置见图 10。

3.3.3 索力测量

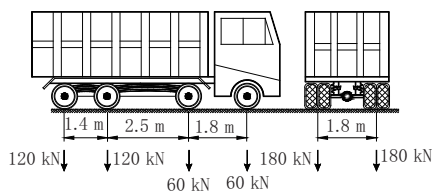
吊杆索力采用频谱法进行测试,通过测试缆索

表 2 静载试验主要工况测试内容及试验效率

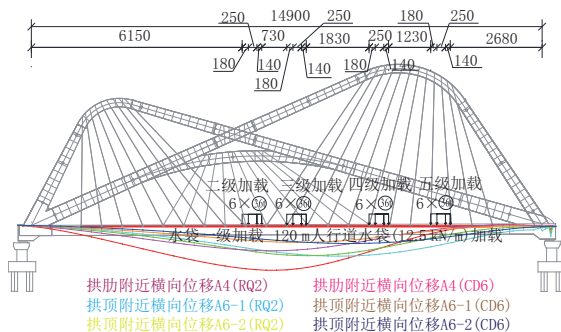
工况	部位	控制目标	测试断面 / 吊杆	试验效率
工况 1/2	拱肋 A	拱脚最大正弯矩 /(kN·m)	A1	0.98
		拱脚最大正弯矩 /(kN·m)	B1	0.89
	拱肋 B	DG1b 吊杆锚点位置正弯矩 /(kN·m)	B2	1.04
		DG8b 吊杆锚点位置负弯矩 /(kN·m)	B3	1.00
工况 3/4	主梁	主梁 D19# 墩附近最大负弯矩 /(kN·m)	L1	0.50~0.86
		主梁 1/4 跨正弯矩 /(kN·m)	L2	0.49~0.86
		主梁 1/4 跨挠度 /mm	L2/ 截面 1~6	0.52~0.95
		主梁 1/4 跨附近最大正弯矩 /(kN·m)	L7	0.52~0.95
	拱肋交界处	A、C 拱肋交界处最大正弯矩 /(kN·m)	A2	0.98
	拱肋 B	DG1b\DG8b 吊杆锚点位置挠度 Z/mm	B2/ 截面 7、8、13	0.97
			B3/ 截面 7、8、13	0.74
	拱肋交界处	A、B 拱肋交界处正弯矩 /(kN·m)	B4	0.95
		B、C 拱肋交界处负弯矩 /(kN·m)	B5	0.91
	吊杆	B 拱吊杆最大索力增量 /kN	DG5b~DG7b	0.78~0.88
工况 5/6	主梁	主梁跨中正弯矩 L3/(kN·m)	L3	0.69~1.02
		主梁跨中挠度 L3/mm	L3/ 截面 1~6	0.62~1.00
		主梁 DG5c 吊杆索梁锚点处最大挠度 L8/mm	L8/ 截面 1~6	0.56~0.98
	拱肋 A	DG12a 吊杆锚点位置负弯矩 /(kN·m)	A6	0.54
		DG1a 吊杆锚点位置挠度 Z/mm	A4/ 截面 7~13	1.03
	拱肋 B	DG1b\DG8b 吊杆锚点位置挠度 Z/mm	B2/ 截面 7~13	0.61
			B3/ 截面 7~13	0.93
	拱肋 C	DG4c 吊杆锚点位置最大正弯矩 /(kN·m)	C3	1.03
		DG4c 吊杆锚点位置最大挠度 Z/mm	C3/ 截面 7~13	0.95
	吊杆	C 拱吊杆最大索力增量 /kN	DG3c~DG5c	0.85~1.01
工况 7/8	主梁	主梁 3/4 跨正弯矩 /(kN·m)	L5	0.76~0.96
		主梁 3/4 跨挠度 /mm	L5/ 截面 1~6	0.87~1.09
		主梁 D20# 墩附近最大负弯矩 /(kN·m)	L6	0.44~0.92
	拱肋 A	拱脚最大正弯矩 /(kN·m)	A8	0.68
	拱肋 B	拱脚最大正弯矩 /(kN·m)	B7	0.95
	吊杆	A 拱吊杆最大索力增量 /kN	DG5a~DG7a	0.80~0.86
工况 9	拱肋 B	拱顶附近横向位移 Y/mm	B2/ 截面 7~10、13	0.95
			B3/ 截面 7~10、13	0.93
	拱肋 C	DG4c 吊杆锚点位置横向位移 Y/mm	C3/ 截面 7~10、13	0.87
	主梁	主梁 D19# 墩附近最大负弯矩 /(kN·m)	L1	0.95~0.98
		主梁 1/4 跨正弯矩 /(kN·m)	L2	0.83~0.96
		主梁 1/4 跨挠度 /mm	L2/ 截面 1~6	0.90~0.98
		主梁 1/4 跨附近最大正弯矩 /(kN·m)	L7	0.72~0.91
		主梁 DG5c 吊杆索梁锚点处最大挠度 /mm	L8/ 截面 1~6	0.74~0.86
工况 10	拱肋 A	DG1a、DG12a 吊杆锚点位置横向位移 Y/mm	A4/ 截面 9~13	0.95
			A6/ 截面 9~13	0.99~1.05
		DG1a 吊杆锚点位置负弯矩 /(kN·m)	A4	1.00
	主梁	主梁跨中正弯矩 /(kN·m)	L3	0.80~0.87
		主梁 3/4 跨正弯矩 (kN·m)	L5	0.31~0.41
		主梁 D20# 墩附近最大负弯矩 /(kN·m)	L6	0.90~0.98
		主梁跨中挠度 /mm	L3/ 截面 1~6	0.91~1.01
		主梁 3/4 跨挠度 /mm	L5/ 截面 1~6	0.89~1.05



的自振频率,利用自振频率与索力的关系得到实际索力值,并与设计索力进行对比分析,判断其是否满足设计要求。



试验加载过程中逐级加载,达到最大荷载后一次卸载。每次加载或卸载后应在结构达到相对稳定后进行读数,当控制断面的变形、应变或索力增量实测值超过计算值时应停止加载,待查清原因并采取措
施后再确定是否进行试验。



3.4.2 加载位置

各工况的车辆应考虑各控制断面内力影响线进行合理布置,尽可能合并工况以达到节省试验成本和时间的目的。经布载分析,本桥共分成 10 个试验工况,各工况分级加载车布置方式见表 1,其中工况 10 布载如图 12、图 13 所示。

图 12 工况 10 轮位纵向布置立面图(单位:cm)

图 13 工况 10 轮位布置横断面图(单位:cm)

3.4.3 各工况测试内容及效率

各工况加载下,桥梁各部位相应控制目标的测试内容及试验效率见表 2。

对于本桥进行验收性静载试验的各控制目标,其试验效率基本满足规范^[4-5]规定的 0.85~1.05,说明静载试验方案可应用于现场试验。

4 静载试验结果与评定

4.1 实测应变及其评定

各工况加载作用下,主梁、拱肋控制断面实测应变与理论计算值的对比如表 3 所示。

由表 3 可见:各工况加载作用下,控制断面实测应变值均小于理论计算值,主梁应变校验系数为 0.60~0.89,拱肋应变校验系数为 0.52~0.89,均小于 1.0;各工况卸载后,主梁相对残余应变为 0%~17.6%,拱肋相对残余应变为 1.2%~15.4%,均小于上述规范规定的 20%。表明桥梁结构具有足够的强度安全储备,且处于弹性工作状态。

4.2 实测变形及其评定

各工况加载作用下,主梁、拱肋控制断面实测变形与理论计算值的对比如表 4 所示。

由表 4 可见:各工况加载作用下,各控制断面实测变形值均小于理论计算值,主梁变形校验系数为

表 3 各工况主梁、拱肋实测应变值与理论应变值比较

工况	部位	总应变值 / ($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	弹性应变值 / ($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	理论应变值 / ($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	校验系数	卸载实测应变值 / ($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	相对残余 应变 /%
工况 1	拱肋	-47~27	-44~24	-29~50	0.52~0.88	-4~3	4.4~15.4
工况 2	拱肋	-45~30	-44~27	-54~33	0.63~0.88	-2~3	2.2~11.1
工况 3	主梁	-24~50	-21~44	-25~55	0.71~0.86	-4~7	4.7~16.7
	拱肋	-52~7	-50~6	-71~14	0.68~0.89	-4~1	3.8~14.3
工况 4	主梁	-24~50	-21~44	-25~55	0.71~0.86	-4~7	4.7~16.7
	拱肋	-57~7	-54~6	-72~15	0.69~0.87	-3~1	2.0~14.3
工况 5	主梁	-27~57	-23~55	-28~64	0.64~0.86	-4~5	3.5~14.8
	拱肋	-74~43	-71~42	-110~62	0.60~0.86	-6~3	2.3~12.5
工况 6	主梁	-26~57	-24~55	-31~68	0.68~0.86	-2~6	1.8~10.5
	拱肋	-81~53	-80~50	-111~63	0.60~0.88	-6~3	1.2~12.5
工况 7	主梁	-28~54	-25~52	-32~62	0.61~0.89	-3~6	3.1~11.1
	拱肋	-45~31	-43~30	-69~42	0.62~0.81	-3~2	2.6~11.8
工况 8	主梁	-27~54	-25~52	-32~62	0.67~0.88	-4~2	2.2~14.8
	拱肋	-52~35	-51~34	-75~44	0.65~0.77	-2~1	1.9~8.3
工况 9	主梁	-45~70	-40~62	-76~88	0.60~0.83	-5~8	0.0~17.6
工况 10	主梁	-27~61	-25~55	-33~72	0.69~0.86	-3~7	6.5~15.8
	拱肋	-108~121	-103~114	-162~164	0.64~0.79	-5~7	4.6~11.5

表 4 各工况主梁、拱肋实测变形值与理论变形值比较

工况	部位	总变形值 /mm	弹性变形值 /mm	理论变形值 /mm	校验系数	卸载实测变形值 /mm	相对残余变形 /%
工况 3	主梁	-20.6~-3.5	-19.0~-3.1	-28.8~-4.9	0.63~0.80	-1.6~-0.2	1.4~11.4
	拱肋	-6.6~-4.2	-6.2~-3.9	-9.9~-5.6	0.63~0.70	-0.5~-0.3	6.1~10.4
工况 4	主梁	-20.4~-3.9	-19.1~-3.5	-31.3~-4.5	0.61~0.80	-1.3~-0.2	1.1~11.9
	拱肋	-7.2~-4.3	-6.7~-4.0	-9.9~-5.6	0.65~0.82	-0.5~-0.3	6.9~9.8
工况 5	主梁	-27.2~-12.4	-26.9~-11.9	-37.9~-19.1	0.61~0.74	-1.1~-0.1	0.4~7.6
	拱肋	-12.3~-2.6	-11.9~-2.3	-19.0~-3.9	0.59~0.87	-0.9~-0.2	2.0~11.5
工况 6	主梁	-28.6~-11.3	-28.1~-11.0	-40.7~-17.7	0.62~0.76	-1.0~-0.1	0.4~6.2
	拱肋	-13.5~-3.3	-13.1~-2.9	-18.9~-3.9	0.60~0.86	-0.5~-0.2	3.0~12.1
工况 7	主梁	-24.9~-6.1	-23.7~-5.5	-33.7~-8.4	0.65~0.76	-1.4~-0.2	1.0~11.9
工况 8	主梁	-23.9~-6.1	-23.4~-5.6	-33.9~-7.2	0.60~0.78	-1.2~-0.2	1.5~9.7
工况 9	主梁	-35.9~7.7	-33.7~7.3	-51.1~10.9	0.51~0.84	-2.2~0.8	3.4~16.4
	拱肋	-44.1~-20.8	-41.6~-18.2	-28.4~-68.6	0.55~0.80	-3.6~-2.3	5.7~12.9
工况 10	主梁	-42.8~6.5	-41.2~5.9	-57.1~9.4	0.57~0.83	-3.4~0.6	3.1~14.8
	拱肋	-36.6~-13.3	-34.4~-11.2	-57.7~-20.6	0.54~0.62	-3.6~-1.7	6.0~15.8

0.51~0.84,拱肋变形校验系数为 0.54~0.87,均小于 1.0,处于合理范围;各工况卸载后,测点变形恢复较好,主梁相对残余变形为 0.4%~16.4%,拱肋相对残

余变形为 1.5%~15.8%,均小于上述规范规定的 20%。表明主梁结构具有足够的刚度储备,且处于弹性工作状态。

4.3 实测吊杆索力及评定

各试验加载工况下,吊杆索力增量实测值与理论计算值的对比如表 5 所示。

表 5 各工况吊杆实测索力增量与理论值比较 单位:kN

工况	吊杆编号	实测索力增量	理论值	校验系数
工况 3	DG5b~7b	111~134	162~186	0.62~0.80
工况 4	DG5b~7b	105~141	153~198	0.63~0.80
工况 5	DG3c~5c	210~256	284~380	0.65~0.82
工况 6	DG3c~5c	185~276	282~379	0.66~0.89
工况 7	DG5a~7a	145~172	215~236	0.63~0.73
工况 8	DG5a~7a	122~197	198~256	0.61~0.79

由表 5 可见,各工况下,主要控制吊杆实测索力增量均小于理论计算值,其校验系数为 0.61~0.89,处于合理范围,且均小于 1.0,满足规范要求。

5 结 语

(1)异型拱肋系杆钢拱桥要关注设计活载作用下

的侧向位移,为此本试验工况 9、工况 10 中采取水袋与加载车偏载方式来检验异型拱肋侧向位移状态。

(2)实测值与理论计算值的对比分析表明,实测值与有限元计算值整体吻合较好。说明该桥采用梁格法建立的空间有限元模型比较合理,可为类似桥梁建模分析提供参考。

(3)静载试验结果表明,多拱肋异型系杆钢箱梁桥跨结构具有足够的强度和刚度安全储备,处于弹性工作状态。所得结论可为桥梁交工验收提供依据。

参考文献:

[1] 王佳佳,姜维强.某钢结构系杆拱桥的仿真分析和静力荷载试验研究[J].黑龙江交通科技,2020,43(8):95-97.
[2] 杨建伟.京雄城际铁路简支大跨度钢箱系杆拱桥静动力性能[J].铁道建筑,2022,62(9):70-74.
[3] 周洁.某钢管混凝土系杆拱桥静动载试验研究[J].城市道桥与防洪,2019(1):79-83.
[4] CJJ/T 233—2015,城市桥梁检测与评定技术规范[S].
[5] JTG/T J21-01—2015,公路桥梁荷载试验规程[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com