

# 基于检测结果的飞燕式拱桥承载力评定

杨涛

(长沙理工检测咨询有限责任公司, 湖南 长沙 410076)

**摘要:** 为研究钢管混凝土拱桥运营期间承载力的评定方法,以服役期间的湖南南县茅草街大桥为研究对象,对该桥开展外观检查、吊杆频率检测及桥梁基频、主拱圈和边跨拱圈线形等检测,基于检测结果,结合《公路桥梁承载能力检测评定规程》对该桥服役期承载力进行评定。结果表明茅草街大桥外观质量良好,结构整体刚度、线形均符合设计要求,少数吊杆索力偏大,综合分析得出茅草街大桥运营期间的承载力满足设计及规范要求。

**关键词:** 桥梁;飞燕式拱桥;钢管混凝土;承载力;试验检测

中图分类号:U446.3

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)01-0140-04

随着桥梁服役时间的增加,重载超载、构件锈蚀、混凝土破损脱落、开裂等对桥梁造成的损伤不断累积,对运营期桥梁进行整体性能检测、病害分析及承载力评定十分重要。不少学者对服役期间钢管混凝土拱桥的检测方法和承载力评定方法进行了研究,如程晓东对某异形拱桥进行了病害分析,并研究了异形吊杆更换方法<sup>[1]</sup>;杨吉新、解威威等对大跨径钢管混凝土拱桥的稳定性及承载力进行了研究<sup>[2-3]</sup>;周海成、龚江烈、陈俊等通过静力、动力试验评定拱桥的承载力,并对既有拱桥承载力评定方法进行了分析对比<sup>[4-6]</sup>;张召金等对某双曲拱桥的承载力进行评定,结果显示活载对该桥已造成一定损伤,并提出了加固方法<sup>[7]</sup>;孟闻远等采用有限元分析方法,结合荷载试验对中承式系杆拱桥进行承载力评定,并提出了加固方案<sup>[8]</sup>;王勤征等对某桁架拱桥加固前后的承载力进行了对比分析<sup>[9]</sup>;杨若斌等采用多种规范对主跨为 160 m 的哑铃形钢管混凝土拱桥承载力进行对比分析,提出了钢管拱承载能力评定对策<sup>[10]</sup>;江京翼等建立基于塑性区理论的数值分析模型,对跨径超过 500 m 的中承式钢箱桁架拱桥进行了极限承载力分析<sup>[11]</sup>。本文以湖南南县茅草街大桥为工程实例,结合现场检查结果,对桥梁外观质量、结构线形、吊杆频率等进行分析,同时构建 MIDAS /Civil 有限元模型,结合 JTG/T D65—06—2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》和 JTG/T J21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》对其进行承载力评定。

## 1 工程概况

茅草街大桥为三跨连续自锚中承式钢管混凝土系杆拱桥(俗称飞燕式拱桥),主桥全长 528 m,桥跨布置为 80 m+368 m+80 m。主拱圈由 2 根拱肋构成,单根拱肋由 4 根钢管混凝土管组成,钢管混凝土管之间采用竖向连杆和斜向连杆连接。主拱圈上共设  $2 \times 37 = 74$  根吊杆,边拱采用上承式双肋悬链线半拱,边跨和中跨拱上设钢管混凝土立柱,两边跨端部之间设置钢绞线系杆。图 1 为桥梁立面图。

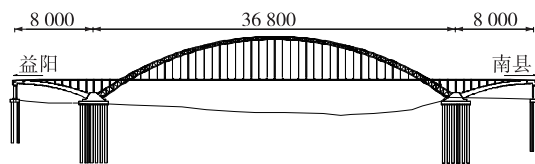


图 1 茅草街大桥主桥立面图(单位:cm)

## 2 桥梁检测结果

### 2.1 外观检测结果

#### 2.1.1 上部结构

拱肋病害主要为拱脚附近宽度达 0.12 mm 的水平裂缝,拱肋部分位置锈胀露筋,拱肋横梁多处破损;吊杆中热缩带及保护罩出现破损,大部分吊杆锚头出现黄油乳化、锚头锈蚀,锚头保护罩出现破损、锈蚀等病害;部分系杆限位装置钢条锈蚀;桥面板中横梁、纵梁出现多处锈胀露筋,露筋面积最大达  $0.4 \text{ m}^2$ 。

#### 2.1.2 下部结构

桥台护坡存在梁间沉降、开裂;桥墩盖梁、挡块及立柱破损、锈胀露筋,桥墩盖梁存在竖向裂缝、渗

水侵蚀等病害,桥墩拱座出现多处混凝土破损和锈胀露筋。

2.2 拱肋灌注混凝土质量检测

采用敲击法对主桥钢管混凝土拱肋中混凝土灌注质量进行检测(拱肋编号见图 2),采用抽检模式,共检测 24 处,检测结果见表 1。

由表 1 可知:主桥拱肋中灌注混凝土局部存在小面积脱空,但脱空占比较小。

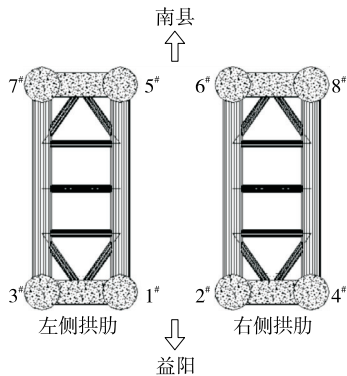


图 2 钢管混凝土拱肋编号示意图

表 1 钢管混凝土拱肋混凝土灌注质量测试结果

拱肋编号	测点位置	检测结果
1#	7# 桥墩拱脚处	轻微脱空
2#	7# 桥墩拱脚处	轻微脱空
3#	7# 桥墩拱脚处	轻微脱空
4#	7# 桥墩拱脚处	轻微脱空
7#	拱肋(益阳侧)与桥面交接处	良好
	4# 吊杆	轻微脱空
	9# 吊杆	良好
	13# 吊杆	良好
	16# 吊杆	良好
	21# 吊杆	良好
	25# 吊杆	良好
	29# 吊杆	轻微脱空
	32# 吊杆	良好
	拱肋(南县侧)与桥面交接处	良好
8#	拱肋(益阳侧)与桥面交接处	良好
	4# 吊杆	良好
	9# 吊杆	良好
	13# 吊杆	良好
	17# 吊杆	轻微脱空
	22# 吊杆	良好
	26# 吊杆	良好
	29# 吊杆	轻微脱空
	32# 吊杆	良好
	拱肋(南县侧)与桥面交接处	良好

2.3 拱轴线的测量

2.3.1 主桥中跨拱轴线

采用无棱镜全站仪对主拱圈拱轴线进行测量。受限于现场实际情况,无法测量主拱圈中轴线。为此,测量主拱圈上游侧上弦管与竖杆连接处各点高程,获得主拱圈上弦管轴线。如图 3 所示,实测主桥中跨拱轴线较平顺,拟合线形为  $y = -5 \times 10^{-9} x^3 - 0.002 2 x^2 + 0.775 4 x + 1.018 2$ ,符合设计要求。

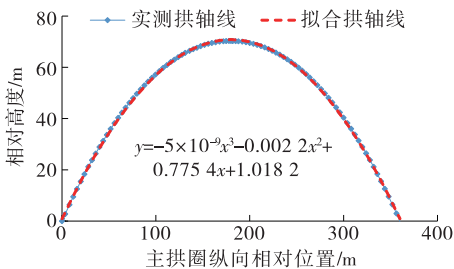


图 3 主桥中跨实测拱轴线与拟合拱轴线对比

2.3.2 主桥边跨拱轴线

采用无棱镜全站仪对边拱上游侧进行拱轴线测量。根据现场实际情况,选取拱圈下缘进行测量,由于拱顶位置被桥墩挡块遮挡,没有进行测量。如图 4 所示,实测主桥边跨拱轴线较平顺,拟合线形为  $y = 1 \times 10^{-5} x^3 - 0.004 9 x^2 + 0.540 4 x + 0.053 3$ ,符合设计要求。

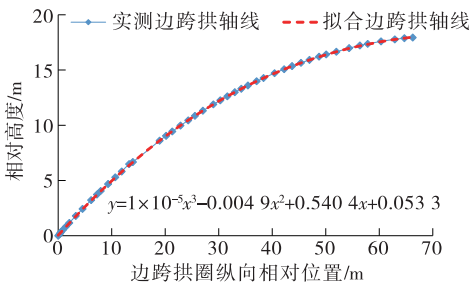


图 4 主桥边跨实测拱轴线与设计拱轴线对比

2.4 吊杆张力检测

采用 JMM-268 索力动测仪检测全桥吊杆频率,考虑到 1# 及 37# 吊杆较短,其约束条件复杂,测试所得频率受外界因素影响较大,不进行频率检测。实测吊杆频率见表 2,其中 1-2# 为上游侧 2# 吊杆,2-2# 为下游侧 2# 吊杆,以此类推。

采用频率法检测吊杆索力,索力与实测频率的平方成正比。吊杆检测频率的平方( $f_n^2$ )与成桥时吊杆频率的平方( $f_0^2$ )的比值见图 5。由图 5 可知:与成桥时吊杆索力相比,上游侧 2 根吊杆索力的变化量超过 25%,下游侧 4 根吊杆索力的变化量超过 25%。

表 2 全桥吊杆频率检测结果

吊杆 编号	成桥时频 率/Hz	检测频 率/Hz	吊杆 编号	成桥时频 率/Hz	检测频 率/Hz	吊杆 编号	成桥时频 率/Hz	检测频 率/Hz	吊杆 编号	成桥时频 率/Hz	检测频 率/Hz
1-2 <sup>#</sup>	8.365	8.416	1-20 <sup>#</sup>	1.750	1.468	2-3 <sup>#</sup>	4.618	5.452	2-21 <sup>#</sup>	1.806	1.752
1-3 <sup>#</sup>	5.106	5.361	1-21 <sup>#</sup>	1.741	1.737	2-4 <sup>#</sup>	4.578	4.580	2-22 <sup>#</sup>	1.851	1.863
1-4 <sup>#</sup>	4.576	4.577	1-22 <sup>#</sup>	1.811	1.863	2-5 <sup>#</sup>	3.618	3.659	2-23 <sup>#</sup>	1.874	1.882
1-5 <sup>#</sup>	3.593	3.669	1-23 <sup>#</sup>	1.721	1.894	2-6 <sup>#</sup>	2.911	3.289	2-24 <sup>#</sup>	1.854	1.896
1-6 <sup>#</sup>	3.042	3.191	1-24 <sup>#</sup>	1.895	1.935	2-7 <sup>#</sup>	3.073	2.968	2-25 <sup>#</sup>	1.979	2.033
1-7 <sup>#</sup>	3.043	3.057	1-25 <sup>#</sup>	1.992	2.012	2-8 <sup>#</sup>	2.454	2.556	2-26 <sup>#</sup>	1.950	1.993
1-8 <sup>#</sup>	2.388	2.333	1-26 <sup>#</sup>	1.932	1.922	2-9 <sup>#</sup>	2.304	2.370	2-27 <sup>#</sup>	1.934	2.171
1-9 <sup>#</sup>	2.421	2.418	1-27 <sup>#</sup>	2.093	2.193	2-10 <sup>#</sup>	2.364	2.387	2-28 <sup>#</sup>	2.133	2.043
1-10 <sup>#</sup>	2.046	2.314	1-28 <sup>#</sup>	2.212	2.254	2-11 <sup>#</sup>	2.259	2.101	2-29 <sup>#</sup>	2.394	2.331
1-11 <sup>#</sup>	2.240	2.244	1-29 <sup>#</sup>	2.331	2.235	2-12 <sup>#</sup>	1.997	1.991	2-30 <sup>#</sup>	2.634	2.687
1-12 <sup>#</sup>	2.032	2.040	1-30 <sup>#</sup>	2.503	2.570	2-13 <sup>#</sup>	1.988	1.962	2-31 <sup>#</sup>	2.718	3.008
1-13 <sup>#</sup>	1.862	1.906	1-31 <sup>#</sup>	2.991	2.781	2-14 <sup>#</sup>	1.880	1.905	2-32 <sup>#</sup>	3.201	3.133
1-14 <sup>#</sup>	1.873	1.906	1-32 <sup>#</sup>	3.231	3.264	2-15 <sup>#</sup>	1.802	1.800	2-33 <sup>#</sup>	3.694	3.730
1-15 <sup>#</sup>	1.795	1.845	1-33 <sup>#</sup>	3.613	3.705	2-16 <sup>#</sup>	1.847	1.806	2-34 <sup>#</sup>	3.973	4.076
1-16 <sup>#</sup>	1.776	1.776	1-34 <sup>#</sup>	4.152	4.170	2-17 <sup>#</sup>	1.771	1.653	2-35 <sup>#</sup>	5.674	5.766
1-17 <sup>#</sup>	1.789	1.774	1-35 <sup>#</sup>	5.606	5.688	2-18 <sup>#</sup>	1.830	1.825	2-36 <sup>#</sup>	8.070	6.869
1-18 <sup>#</sup>	1.748	1.803	1-36 <sup>#</sup>	7.965	8.103	2-19 <sup>#</sup>	1.796	1.705			
1-19 <sup>#</sup>	1.827	1.836	2-2 <sup>#</sup>	8.239	7.559	2-20 <sup>#</sup>	1.858	1.803			

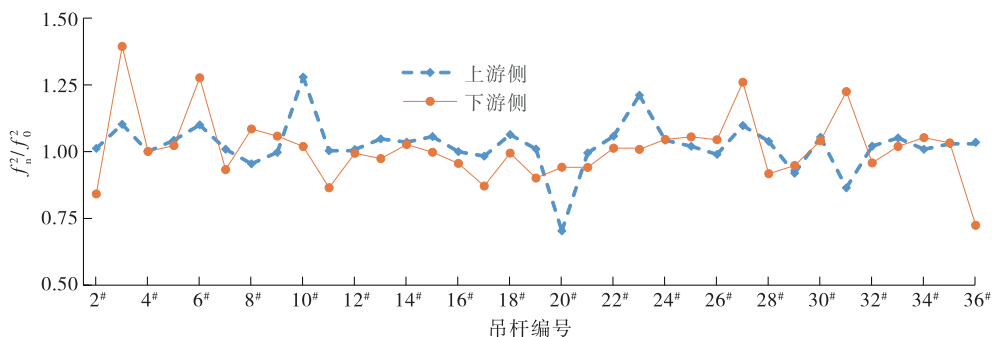


图 5 吊杆检测频率的平方与成桥时吊杆频率的平方的比值

## 2.5 桥梁基频采集结果

采用 DH5922N 通用型动态信号测试分析系统对桥梁自振频率进行采集,采用环境自然激励的测试方法。结果显示主桥的实测基频为 2.051 Hz,理论计算基频为 0.502 Hz,主桥基频实测值与理论计算值的比值为 4.09,桥梁的实际刚度与理论计算刚度之比大于 1.1,评定标度为 1。

## 3 桥梁承载能力评定

### 3.1 分项检算系数确定

该桥处于城市主干道,重载车辆较多,考虑到实际桥梁所承受汽车荷载与标准汽车荷载之间的差异,引入活载影响修正系数,计算公式见式(1)。计算得  $\xi_q = 1.082$ 。

$$\xi_q = \sqrt[3]{\xi_{q1} \xi_{q2} \xi_{q3}} \quad (1)$$

式中: $\xi_{q1}$ 为交通量的活载影响修正系数,根据典型代表交通量与设计交通量的比值和 JTG/T J21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》, $\xi_{q1}$ 取不利值 1.05; $\xi_{q2}$ 为大吨位车辆混入率的活载影响修正系数,根据实际交通量状况和 JTG/T J21—2011, $\xi_{q2}$ 取不利值 1.05; $\xi_{q3}$ 为轴荷分布的活载影响修正系数,根据实际车辆情况和 JTG/T J21—2011, $\xi_{q3}$ 取不利值 1.15。

结合上述检测结果确定其他各分项检算系数,结果见表 3~4。

### 3.2 有限元模型建立

采用 MIDAS/Civil 2020 建立杆系单元有限元

表 3 检算系数  $Z_1$  计算结果

检测指标	权重值 $\alpha_j$	评定标度 值 $D_j$	综合评定 度 $D$	构件检算 系数 $Z_1$
缺损状况	0.4	2		
材质强度	0.3	1	1.4	1.13
自振频率	0.3	1		

表 4 截面折减系数  $\xi_c$  计算结果

检测指标	权重值 $\alpha_j$	评定标度 值 $D_j$	综合评定 标度 $R$	折减 系数 $\xi_c$
材料风化	0.15	1		
物理及化学损伤	0.85	1	1	0.98

模型(见图 6),采用桁架单元模拟吊杆,采用梁单元模拟纵梁、横梁、主拱圈、立柱等。模型中索力采用检测频率换算所得索力,其余荷载按照桥梁原设计荷载进行设置。对桥梁实际状态进行模拟,按 JTG/T D65—06—2015 验算实际状态下桥梁的承载能力。

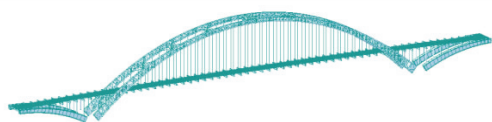


图 6 桥梁计算模型

### 3.3 承载力评定与分析

#### 3.3.1 钢管混凝土主拱圈验算

按偏心受压构件验算主拱圈承载力,计算公式见式(2)。按式(2)计算单侧拱肋抗力,得  $R = 63\,458.7\text{ kN}$ 。

$$\gamma N = \varphi'_i \sum K_p^i K_d f_{sc} A_{sc} \quad (2)$$

式中: $\gamma$ 为桥梁结构重要性系数, $\gamma=1.1$ ;  $N$ 为压弯构件轴向力设计值; $\varphi'_i$ 为长细比折减系数,取 0.56;  $K_p^i$ 为钢管的最大初应力折减系数,计算得  $K_p^i = 0.932$ ;  $K_d$ 为钢管内混凝土脱空折减系数,取 0.95;  $f_{sc}$ 为单管钢管混凝土组合轴心抗压强度设计值,计算得  $f_{sc} = 40.76\text{ MPa}$ ;  $A_{sc}$ 为单管钢管混凝土组合截面积,计算得  $A_{sc} = 0.785\text{ m}^2$ 。

采用上述有限元模型进行分析,得到承载能力极限状态下跨中截面钢管混凝土拱肋中单根上拱肋轴向压力为 12 634.8 kN,单根下拱肋轴向压力为 5 371.2 kN;钢管混凝土拱肋与主梁交界处由于系杆力作用,拱肋轴向压力为极值,单根上拱肋轴向压力为 9 083.4 kN,单根下拱肋轴向压力为 13 743.7

kN。跨中截面单侧拱肋轴向压力和为  $(12\,634.8\text{ kN} + 5\,371.2\text{ kN}) \times 2 = 36\,012.0\text{ kN}$ ,拱肋与主梁交界处单根拱肋轴向压力和为  $(9\,083.4\text{ kN} + 13\,743.7\text{ kN}) \times 2 = 45\,654.2\text{ kN}$ 。

JTG/T J21—2011 中承载力评定公式为:

$$\gamma_0 S \leq R Z_1 \quad (3)$$

由前文可知, $Z_1 = 1.13$ ,  $\gamma = 1.1$ ,承载能力极限状态下单侧拱肋轴线压力极值乘以结构重要系数均小于结构抗力乘以承载力检算系数,满足 JTG/T J21—2011 的要求。

#### 3.3.2 变形验算

(1) 主拱圈变形验算。根据 MIDAS/Civil 有限元分析结果,在车道荷载作用下,拱肋极值均出现在主拱圈  $3/4 L$  处;车道荷载极大值作用下,主拱圈最大位移为 53.52 mm;车道荷载极小值作用下,主拱圈最大位移为 -65.01 mm。车道荷载作用下最大竖向挠度为正负挠度绝对值之和,为 118.53 mm。JTG/T J21—2011 中结构变形评定公式见式(4),主拱圈挠度符合设计要求。JTG/T D65—06—2015 规定主拱圈挠度不应大于  $L/1\,000 = 368\text{ mm}$ ,计算得主拱圈变形满足规范要求。

$$f_{di} < Z_1 f_L \quad (4)$$

式中: $f_{di}$ 为计入活载影响修正系数的荷载变形计算值; $f_L$ 为变形限值。

(2) 主梁变形验算。根据 MIDAS/Civil 有限元分析结果,车道荷载作用下主梁极值出现在主跨  $3/4 L$  处,且位于桥梁中轴线处;车道荷载极大值作用下,主梁最大位移为 53.16 mm;车道荷载极小值作用下,主梁最大位移为 -102.95 mm。车道荷载作用下最大竖向挠度为正负挠度绝对值之和,为 156.11 mm,主梁挠度符合设计要求。JTG/T D65—06—2015 规定主梁挠度不应大于  $L/800 = 460\text{ mm}$ ,主梁变形满足规范要求。

## 4 结论

根据茅草街大桥的检测结果,结合该桥原始设计资料进行对比分析,建立 MIDAS/Civil 有限元模型对茅草街大桥进行承载能力评定,得出以下结论:

(1) 结构整体性能较好,主拱圈承载力、主拱圈及主梁变形均符合设计要求;主桥实测基频大于理论基频,其刚度及承载力满足 JTG/T D65—06—2015 和 JTG/T J21—2011 的要求。

(下转第 147 页)



度来看能为施工提供一定参考,可根据预测结果分析哪些梁段误差较大。对于差值较大的梁端通过二次测量消除测量误差并进一步建立模型进行预测,提高模型预测精度。

### 3 结论与讨论

本文采用新陈代谢 GM(1,1)模型对莲阳河特大桥悬臂梁段进行施工监控,考虑到施工梁段对已完成梁段的影响,选择模型第一个值为初始值,充分利用灰色系统贫信息的优势,结合悬臂施工特点,完成4个梁段后即可进行建模,并对各梁段张拉后的标高进行控制和预测。结果显示,传统 GM(1,1)模型和新陈代谢 GM(1,1)模型在桥梁施工控制初期对梁段标高的预测精度较高,新陈代谢 GM(1,1)的整体精度比传统模型高,预测效果更好。

若要进一步提高模型预测精度,不能忽略未施工梁段对已施工梁段的影响,完成一个梁段后需要重新测量已施工梁段的高程变化,工作量大,实现较困难。可对模型进行优化,并引入结构理论,考虑材料、受力等的影响进一步提高预测精度。

#### 参考文献:

- [1] 包龙生,宋涛,于玲,等.基于 Kalman 滤波法与正装分析法对桥梁施工控制研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(4):653—660.
- [2] 张熙胤,陈兴冲,王常峰.多变量 GM(1,n)模型在桥梁

施工挠度控制中的应用[J].世界桥梁,2013,41(5):76—80.

- [3] 刘胜春,张开银,沈成武,等.神经网络方法在大跨度桥梁施工预拱度控制中的应用[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2001,25(3):270—272.
- [4] 邓聚龙.灰理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2002:361—369.
- [5] 刘思峰.灰色系统理论及其应用[M].9版.北京:科学出版社,2021.
- [6] 王辉,林基础.灰色系统理论在大跨度 T 型刚构桥施工中的应用研究[J].公路工程,2018,43(3):141—145.
- [7] 王赞芝,张锴,王森.用灰色系统理论确定高速铁路桥梁施工预拱度[J].铁道科学与工程学报,2015,12(3):482—488.
- [8] 包仪军,王常峰,赵继康.基于改进灰色预测 GM(1,1)模型的大跨度桥梁施工控制[J].铁道建筑,2016,56(2):18—22.
- [9] 程霄翔,韩晓林,缪长青,等.基于灰色理论悬臂施工中连续梁桥的应力预测与控制[J].世界桥梁,2009,37(4):46—49.
- [10] 刘来君,沈艺宁,张智举,等.基于线性规划的灰色模型在桥梁监控中的应用[J].公路,2021,66(11):101—106.
- [11] 包龙生,周子博,于玲.基于累积法的 GM(1,1)模型在桥梁施工监控上的应用[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(2):239—246.

收稿日期:2022-01-08

\*\*\*\*\*  
(上接第 143 页)

(2) 部分吊杆索力变化较大,建议定期检测,并在适当时机进行索力调整。

(3) 根据桥梁检测结果,建议更换部分吊杆锚头保护罩,对混凝土裂缝进行封闭处理,对混凝土锈胀露筋及破损进行修复。

#### 参考文献:

- [1] 程晓东.异形拱桥病害分析及吊杆更换方法研究[J].公路与汽运,2021(5):128—132.
- [2] 杨吉新,梁亚兰,余越,等.横撑对大跨度钢管砼拱桥稳定性的影响分析[J].公路与汽运,2018(5):118—120.
- [3] 解威威,杨绿峰,王建军,等.钢管混凝土桁式拱桥稳定承载力的参数分析[J].中外公路,2018,38(6):83—86.
- [4] 周海成.某下承式砼系杆拱桥静动力试验研究[J].公路与汽运,2021(5):142—148.
- [5] 龚江烈,周阳帆.既有桥梁承载能力评定方法的探讨

[J].公路工程,2015,40(1):201—204.

- [6] 陈俊,张宇胜,苏永华.基于静载试验的既有石拱桥技术状态评定[J].铁道建筑,2015(2):16—20.
- [7] 张召金,王伟笔,鲍雅军.某双曲拱桥加固案例分析[J].公路,2015,60(8):107—109.
- [8] 孟闻远,孟枫林.中承式系杆拱桥承载力评定与加固技术研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(1):33—37.
- [9] 王勤征,张华刚,陈红鸟,等.钢筋混凝土桁架拱桥承载力加固的力学性能对比分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2021,38(5):74—80.
- [10] 杨若斌,黄雨忠.哑铃形钢管混凝土拱桥承载力分析及对策[J].公路,2018,63(7):49—54.
- [11] 江京翼,周志祥,王邵锐.特大跨钢箱桁架拱桥极限承载力的数值模拟[J].兰州理工大学学报,2016,42(5):128—132.

收稿日期:2021-11-23