

文章编号:1674-2869(2019)02-0150-05

# 基于动静载试验的连续刚构桥梁模型修正

陈堃,卢海林,杨宏印\*,鄢张扬,边晓亚

武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074

**摘要:**为研究一种在役桥梁数值计算模型快速修正方法,针对某在役大跨度连续刚构桥梁,根据桥梁动载试验的结果,对一阶频率进行分析,比较了一阶频率对刚度矩阵和质量矩阵的灵敏度,使用矩阵型修正法对桥梁模型进行了有限元模型修正。对比了修正后模型在3种不同工况下的中跨跨中静挠度值,结果表明:修正后的模型误差均在5%以内,满足工程需求,修正结果与实测数据吻合良好,修正后模型更加符合桥梁服役现状。

**关键词:**连续刚构桥梁;模型修正;矩阵型修正;矩阵修正系数;灵敏度

**中图分类号:**U44 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2019.02.010

## Model Correction of Continuous Rigid Frame Bridge Based on Dynamic and Static Load Test

CHEN Kun, LU Hailin, YANG Hongyin\*, YAN Zhangyang, BIAN Xiaoya

School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** To study one method for the quick correction of the model of in-service bridge, we took a continuous rigid frame bridge as the research object, and analyzed the first order frequency according to the results of the bridge dynamic load test. The bridge model was corrected by matrix correction with the comparison of the sensitivity of first-order frequency to stiffness matrix and mass matrix, and the mid-span deflection values of under three working conditions were analyzed, indicating that the error of the corrected mode is within 5%, meeting the engineering requirements. The corrected results are consistent with the measured data, and accord better with the current status of the bridge in service.

**Keywords:** continuous rigid frame bridge; model correction; matrix correction; coefficient of matrix correction; sensitivity

为了对在役桥梁的安全性、可靠性做出准确的评价和预估,依据桥梁设计图纸建立的模型已无法满足精度需求。为此,众多学者对基于桥梁动静载试验的模型修正进行了探索和研究。宗周红等<sup>[1-5]</sup>提出了结合动力模态柔度和静力位移的有限元模型修正方法,结果表明基于竣工图纸和设计参数建立的桥梁模型静力特性、动力特性与实

测结果有偏差,需修正后才能反映桥梁服役状态。张征文等<sup>[6-10]</sup>根据交工验收荷载试验采集的静、动载实验数据,建立了多目标函数,对初始有限元模型进行了修正,对比结果表明了修正后的数值模型计算结果与荷载试验实测值能保持一致,该基于多目标函数的模型修正方法可行且有效。何涛等<sup>[11-12]</sup>综合运用动态加权系数和灵敏度

收稿日期:2018-10-08

**基金项目:**国家自然科学基金(51708429, 51708428);武汉工程大学科学研究基金(K201734);桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题(2017-04-GF)

**作者简介:**陈堃,硕士研究生。E-mail:545175762@qq.com

**\*通讯作者:**杨宏印,博士,讲师,硕士研究生导师。E-mail:yanghongyin@hust.edu.cn

**引文格式:**陈堃,卢海林,杨宏印,等.基于动静载试验的连续刚构桥梁模型修正[J].武汉工程大学学报,2019,41(2):150-154.

分析方法,基于动静载试验的数据进行预应力混凝土梁模型修正,成功地将有限元修正的方法用于评估混凝土主梁结构的性能,并明显提高了模型修正的精度。

然而,有限元模型修正技术发展至今,仍然存在众多难题,主要还是速率不够快、精度不够高。而将静载、动载试验与矩阵型修正法结合可在满足工程需求的误差范围内,快速修正有限元模型,具有较高的工程应用价值,值得深入研究。因此,本文以湖北省境内武黄高速某现役连续刚构桥为依托,首先根据设计图纸采用整体式方法建立了初始有限元模型,对比初始模型和静力荷载试验下3种不同工况的中跨跨中挠度值,结果误差均大于10%,而动载试验下竖向一阶振动频率误差为10.09%,且振幅远大于同类型桥梁,不能满足工程需求。故以竖向一阶振动频率为目标函数,首先通过比较一阶振动频率对刚度矩阵和质量矩阵的灵敏度,来确定修正次序;然后结合使用ANSYS和MATLAB,来智能选取和确定刚度矩阵 $K$ 和质量矩阵 $M$ 的修正系数,并使用MIDAS建立刚度矩阵和质量矩阵修正后的桥梁模型。通过与静载试验3种工况下的中跨跨中静挠度值对比分析表明,修正后模型计算误差明显减小,分别为2.56%、4.75%、5.25%,均满足工程需求。因此,该法能够快速有效地确定矩阵修正系数,并且该法修正的桥梁模型结果更加符合试验实测值,可为桥梁的性能评估及安全预测奠定可靠的基础。

1 工程概况

1.1 结构形式

该连续刚构桥位于湖北省境内武黄高速公路

上,建成于1991年。桥跨结构为三跨一联布置的连续刚构跨径组合为(40.00+56.00+40.00) m,截面形式为单箱单室预应力混凝土箱梁。桥梁原设计荷载为:汽车—超20级、挂车—120级,人群350 kg/m<sup>2</sup>。抗震设防烈度为6度。2009年10月,该桥经检测表明主要技术指标达到了荷载承载能力要求,但是安全储备不足。2010年11月,该桥进行了维修加固。维修措施如下:对混凝土表面缺陷进行修补;在部分区域的箱梁腹板、底板外侧及顶板内侧粘贴钢板;更换桥面铺装混凝土等。

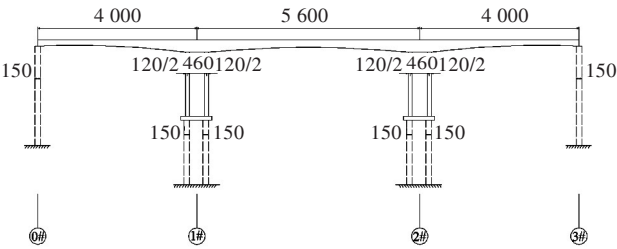


图1 连续刚构桥立面布置图(单位:cm)  
Fig. 1 Elevation layout of continuous rigid frame bridge (unit: cm)

1.2 桥梁初始模型的建立

桥梁主梁截面为单箱单室,桥墩选用圆形截面。箱梁变截面段以施工块的端截面作为关键截面,施工块内部截面使用插值法逼近,桥墩与主梁连接部分采取共节点来实现耦合。有限元模型共有34个梁单元,大桥下部结构等效为2个柱式桥墩,每个墩柱9个梁单元,共18个单元,所有梁单元长均为4 m。桥梁结构有限元模型如图2所示。

1.3 桥梁静载试验结果

静载试验选择三轴载重汽车,加载位置、试验工况和荷载等级情况见表1,各工况荷载作用下中跨跨中静挠度值见表2。

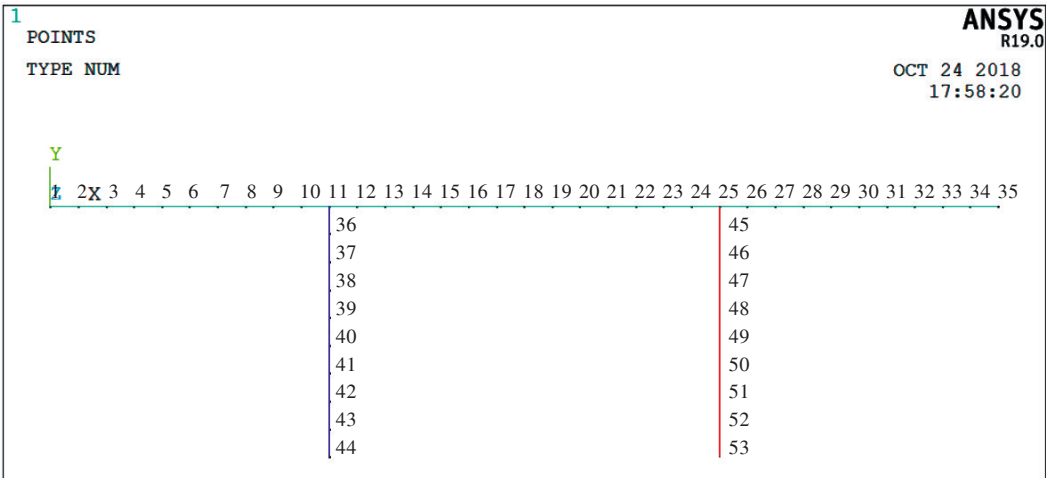


图2 桥梁结构有限元模型图  
Fig. 2 Finite element model of bridge structure

表 1 静荷载作用工况表

Tab. 1 Working conditions under static loading

工况	加载位置	试验工况	荷载等级
工况 1	3#墩左侧	对 3#墩最大剪力加载	挂—120 级
工况 2	2#墩顶	对 2#墩顶最大负弯矩加载	挂—120 级
工况 3	中跨跨中	对中跨跨中最大正弯矩加载	挂—120 级

表 2 各工况荷载作用下中跨跨中静挠度值

Tab. 2 Mid static deflection values of mid span under load conditions

工况	实测挠度 / mm		实测挠度 平均值 / mm	理论值 / 误差 /	
	左幅桥	右幅桥		mm	%
工况 1	2.60	2.80	2.70	3.12	13.46
工况 2	3.00	3.20	3.10	3.99	22.31
工况 3	3.10	3.30	3.20	4.21	23.99

3 种工况中,实测挠度值与理论挠度值之间的误差均超过 10%,即初始模型无法准确地反映实际桥梁结构的工作状态。

1.4 桥梁动载试验结果

由于本文选取矩阵修正系数时,只需考虑实测竖向一阶频率,所以此处仅展示动载试验测定一阶频率的相关内容。表 3 为桥梁动力特性测试的结果。

表 3 桥梁动力特性测试结果表

Tab. 3 Test results of dynamic characteristics of bridge

频率 类型	测试一阶频率 / Hz		阻尼比 / %		振型
	左幅	右幅	左幅	右幅	
横向	1.575	1.575	5.42	5.49	主梁横向一阶 对称弯曲振动
竖向	2.800	2.800	3.35	3.95	主梁竖向一阶 对称弯曲振动

与其它同类桥相比,本桥竖向振幅较大,主要

原因有:一是由于本桥损耗,桥梁结构与车辆荷载发生共振;二是桥面铺装采用刚性混凝土铺装,路面破损,桥面平整性较差。左幅桥和右幅桥横向振幅最大值均为 0.20 mm,横向振幅处于正常水平。

参考类似桥跨结构振幅统计结果,竖向振幅均在 1 mm 以内,由 ANSYS 数值模拟的该连续刚构桥左幅桥竖向一阶频率理论值为 3.106 Hz,由动载试验测得的竖向一阶频率实测值为 2.800 Hz。大桥左幅桥竖向一阶频率理论值与实测值误差为 10.9%。故有必要修正提取的桥梁结构刚度矩阵与质量矩阵,使大桥数值模拟结果更为准确地反映桥梁真实工作状况。

2 桥梁模型修正

2.1 一阶频率对刚度和质量的灵敏度分析

灵敏度分析决定了对结构刚度矩阵和质量矩阵修正的先后次序,可通过计算桥梁模型刚度与质量对于一阶频率的变化率,消除由于修正次序不当而产生的误差<sup>[13-14]</sup>。通过刚度矩阵以及质量矩阵乘修正系数后误差变化的正负交替确定修正系数区间,进而结合枚举拟合法的思路在该区间内缩小步长,以误差极小值为目标函数,确定最佳修正系数。

分析计算桥梁模型刚度与质量对于一阶频率的变化率,结果见表 4 所示,其中  $K$  为桥梁刚度矩阵, $M$  为桥梁质量矩阵。

在相同步距的增量条件下,当刚度修正系数在 0.85 $K$ ~0.90 $K$  内时,一阶频率数值的最小变化量为 0.203 Hz,变化率为 7.30%;当质量修正系数在 1.05 $M$ ~1.10 $M$  内时,一阶频率数值的最大变化量

表 4 左幅桥刚度的改变与一阶频率的变化关系表

Tab. 4 Relationship between change of stiffness of left bridge and first order frequency

序号	相同步距的修正系数		频率变化数值 / Hz		相同步距变化率 / %	
	刚度矩阵	质量矩阵	刚度矩阵	质量矩阵	刚度矩阵	质量矩阵
1	0.81 $K$ ~0.86 $K$	1.05 $M$ ~1.10 $M$	0.228	0.096	8.79	3.21
2	0.82 $K$ ~0.87 $K$	1.10 $M$ ~1.15 $M$	0.224	0.089	8.47	3.05
3	0.83 $K$ ~0.88 $K$	1.15 $M$ ~1.20 $M$	0.217	0.082	8.05	2.90
4	0.84 $K$ ~0.89 $K$	1.20 $M$ ~1.25 $M$	0.209	0.076	7.62	2.76
5	0.85 $K$ ~0.90 $K$	1.25 $M$ ~1.30 $M$	0.203	0.070	7.30	2.62
6		1.30 $M$ ~1.35 $M$		0.064		2.48
7		1.35 $M$ ~1.40 $M$		0.059		2.35
8		1.40 $M$ ~1.45 $M$		0.055		2.22
9		1.45 $M$ ~1.50 $M$		0.050		2.09

为 0.096 Hz,变化率为 3.21%。显然,桥梁模型的一阶频率对刚度矩阵的改变相较于对质量矩阵的改变更加敏感,调整刚度矩阵比调整质量矩阵对结构一阶频率的影响更大。

2.2 刚度矩阵的修正

由于在 0.85K~0.86K 范围内误差值出现正负交替,故存在一个刚度修正系数,使修正后的一阶频率与实测值相近。利用枚举拟合法在该区间内取 100 个点做为刚度修正系数,每个点的间距均为 0.000 1,通过数值计算软件 MATLAB 分别计算所有点对应的一阶频率。由表 5 知,一阶频率随刚度修正系数的改变大致呈线性变化,因此,基于 MATLAB 输出的数据绘制线性拟合曲线,见图 3(a)。

由图 3(a)可知,当刚度矩阵修正系数为 0.854 2 时,一阶频率为 2.800 0 Hz,其精度为小数点后 4 位数字,故该修正值与实测值的误差小于 0.01%,满足要求。因此,该连续刚构桥左幅桥刚度矩阵修正系数取 0.854 2。

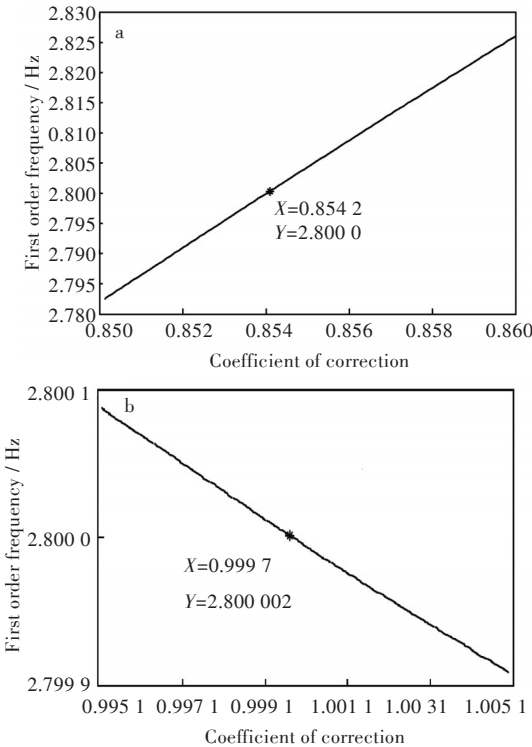


图3 一阶频率与矩阵修正系数的关系:  
(a)刚度矩阵,(b)质量矩阵

Fig. 3 Relationships between first order frequency and correction coefficient of matrix:  
(a) stiffness matrix, (b) mass matrix

2.3 质量矩阵的修正

刚度矩阵修正系数取 0.854 2,此时一阶频率的修正值已与实测值相近,所以质量矩阵修正系数只需在 1.000 0 左右的极小范围内取某一修正系数值,使得一阶频率的修正值与实测值更为接

近。为使结果更加精确,将修正后的一阶频率保留小数点后 6 位数字。

在 1.000 0 左右对称选取 100 个点作为质量修正系数值,即在 1.000 0 左、右各 0.005 范围内取 50 个点,使每个点之间的间距为 0.000 1。故取 0.995 1 到 1.005 0,利用 MATLAB 分别计算所有点对应的一阶频率。基于 MATLAB 输出的数据绘制线性拟合曲线,见图 3(b)。

由图 3(b)可知,在选取刚度矩阵修正系数为 0.854 2 的前提下,对质量矩阵进行微调,由于一阶频率值保留小数点后 6 位数,精度较修正刚度矩阵时有所提高。当质量矩阵修正系数为 0.999 7 时,一阶频率为 2.800 002 Hz,此时修正后的一阶频率与实测一阶频率误差极小,满足工程要求。因此,质量矩阵修正系数取 0.999 7。

2.4 静载试验扰度值验算

现利用桥梁有限元模拟软件 MIDAS,建立连续刚构桥左幅桥修正后的有限元模型,将材料弹性模量定义为  $E=0.854\ 2\times E_0$ ,材料密度定义为  $\rho=0.999\ 7\times \rho_0$ 。其中  $E_0$  为原混凝土或钢筋的弹性模量, $\rho_0$  为原混凝土或钢筋密度。

建立的 MIDAS 有限元模型如图 4 所示,主梁、桥墩及桩柱均采用梁单元模拟,桩土作用采用土弹簧模拟,全桥共划分为 231 个节点,230 个单元。

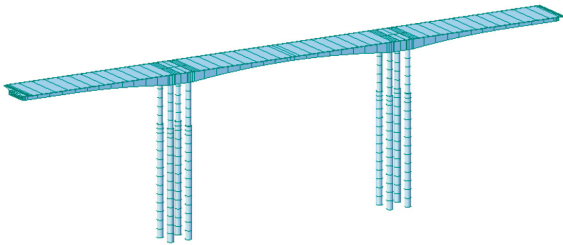


图4 左幅桥 MIDAS 有限元模型示意图

Fig. 4 Sketch map of MIDAS finite element model for left amplitude bridge

通过桥梁有限元模拟软件 MIDAS 分析修正后的连续刚构桥有限元模型,在 3 种工况下的静挠度计算值见表 5 所示。

表5 修正前后桥梁三种工况下的静挠度值比较

Tab. 5 Comparison of static deflection values before and after correction

工况	实测值 /	初始值 /	修正值 /	误差 / %	
	mm	mm	mm	修正前	修正后
工况 1	2.70	3.12	2.77	13.46	2.56
工况 2	3.10	3.99	3.25	22.31	4.75
工况 3	3.20	4.21	3.31	23.99	3.44



由表 5 可以看出,修正后该连续刚构桥中跨跨中在 3 种工况下的静挠度值分别为 2.77 mm、3.25 mm 和 3.31 mm。比较修正前后误差,修正后误差明显减小,分别为 2.56%、4.75%、3.44%,均在允许误差范围以内,满足工程要求。

3 结 语

1)依据桥梁设计图纸,建立了桥梁初始有限元模型,计算跨中静挠度值和一阶频率,并与静动载实验的数据进行对比,两者误差均大于 10%,无法满足工程需求。

2)分析了桥梁的刚度矩阵和质量矩阵对于一阶频率的灵敏度,确定了修正的先后次序,使模型修正更高效精确。

3)利用枚举拟合法的思路,结合 MATLAB 软件快速地建立线性拟合曲线,以修正后的误差极小为函数,先后确定刚度和质量矩阵的修正系数。修正后的静挠度值结果与实测数据吻合良好,误差在允许误差以内,为快速修正有限元模型提供了一种新的方法。

参考文献

[1] 宗周红,夏樟华. 联合模态柔度和静力位移的桥梁有限元模型修正方法[J]. 中国公路学报,2008,21(6): 43-49.

[2] 刘纲,杨溥,侍刚,等. 大跨度桥梁模型修正方法研究[J]. 桥梁建设,2008(1):19-22.

[3] 张国刚,刘传乐,张贵明. 某异形拱桥模态分析与有限

元模型修正[J]. 中外公路,2018,38(3):135-139.

[4] 张挣鑫,刘黔会,黄方林. 面向桥梁工程的响应面技术在有限元模型修正中的应用探讨[J]. 公路工程, 2018,43(4):145-149.

[5] 包龙生,漆宪,于玲. 基于 BP 神经网络的桥梁有限元模型修正[J]. 公路交通科技(应用技术版),2018,14 (3):182-186.

[6] 张征文,李永庆. 基于荷载试验数据修正桥梁结构有限元计算模型的研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(2):233-240.

[7] 焦宇. 基于测试数据的桥梁模型修正方法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2015.

[8] 邓苗毅,邵凤菊. 结构静力有限元模型修正中的目标函数构造分析[J]. 河南科学,2014,32(8): 1486-1490.

[9] 李元吉. 基于监测数据的系杆拱桥有限元模型修正[J]. 公路与汽运,2018(4):106-109.

[10] 叶青,胡美. 基于荷载试验的大跨斜拉桥有限元模型修正方法研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2015,33(3):391-394.

[11] 何涛,张巍,吴植安. 基于动静载试验数据的预应力混凝土梁模型修正方法试验研究[J]. 公路交通科技,2015,32(12):75-80.

[12] 谢海龙. 装配式连续梁桥有限元模型修正技术研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017,13(8): 210-213.

[13] 胡斌. 基于灵敏度分析的模型修正方法在隔震桥梁的运用[J]. 华南地震,2014,34(增刊1):53-56.

[14] 安玖臻,康宝龙. 基于灵敏度分析的桥梁模型修正[J]. 科技信息,2013(11):344-345.

本文编辑:苗 变