

# 基于响应面法的混凝土连续刚构桥模型修正

付波<sup>1</sup>, 余毅<sup>2</sup>, 王建凯<sup>3</sup>

(1.杭州都市高速公路有限公司, 浙江 杭州 310024; 2.中铁大桥科学研究院有限公司; 3.交通运输部公路科学研究院)

**摘要:**为建立适用于混凝土桥梁的高精度有限元分析模型,获取桥梁在荷载作用下的准确力学响应,提出了一种结合实桥试验的混凝土桥梁有限元模型修正方法。首先以一座混凝土连续刚构桥为工程背景建立了初始三维有限元模型。在考虑依托工程桥梁结构的特点和施工误差的基础上选取桥面铺装厚度、主梁弹模以及桥墩弹模3个影响因素作为待修正结构参数;根据实桥试验条件选择中跨跨中挠度、中跨跨中截面底板应力、墩顶截面顶板应力以及第1阶竖向振动频率4个覆盖了结构静、动力力学性能的指标作为目标函数;其次采用中心复合设计方法生成待修正参数的样本集,并导入初始有限元模型进行分析后获取对应的结构响应信息。最后采用响应面法建立了待修正结构参数和目标函数的二次多项式函数关系,得到了响应面方程。结合实桥试验结果对响应面方程进行了修正,得到了高精度的混凝土连续刚构桥有限元分析模型。结果表明修正后的有限元模型计算值与实桥试验结果吻合良好;采用二次多项式的响应面方程即使在不考虑交叉项时也能够较好地拟合待修正参数与结构静、动力响应之间的函数关系;修正后的有限元模型具有较高的精度,可真实反映桥梁实际结构的受力状态,为桥梁结构运营期间的健康监测、状态评估、损伤检测提供可靠的分析手段。

**关键词:**桥梁工程;有限元模型修正;响应面法;混凝土连续刚构桥;实桥试验

高精度的有限元模型在桥梁状态评估、损伤识别以及健康监测等领域具有重要的作用,但目前采用传统方法依据设计图纸建立的有限元模型的精度较低,且模型的材料属性、边界条件、结构尺寸的取值也会产

生一定的误差,使得有限元模型不能真实地反映桥梁结构的力学状态,导致有限元计算结果与真实情况存在差异,消除这个差异的过程称之为有限元模型的修正。

结果表明:该文提出的铰缝相对位移差为 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$  mm数量级,是实际可测的。相比商用软件,有限条计算理论很好地符合了装配式空心板梁桥的条带特点,能用较少单元进行空心板铰缝的横向抗剪性能分析,计算效率高。另外,有限条元法可以把铰缝划分为单独的条带单元,有利于采用优化算法对铰缝损伤进行识别。

## 参考文献:

- [1] 胡肇滋.桥梁结构简化分析——荷载横向分布[M].北京:人民交通出版社,1996.
- [2] 宋宇锋,孙勇,杨立坡.空心板梁桥铰缝受力特性与破坏模式的试验与理论研究[J].中外公路,2018(2).
- [3] 张娟秀,刘军,叶见曙,等.空心板侧表面粗糙处理研究[J].中外公路,2013(6).

- [4] Arthur A. Huckelbridge Jr., Hassan El-Esnawi, Fred Moses. Shear Key Performance in Multi-Beam Box Girder Bridges[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1995, 9(4): 271-285.
- [5] Deng L. Z., Michel G., Ales Z., et al. Nonlinear Flexural Behavior of Prestressed Concrete Girder Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(4): 276-284.
- [6] Barbosa A. F., Ribeiro G. O. Analysis of Reinforced Concrete Structures Using ANSYS Nonlinear Concrete Model[J]. Computational Mechanics: New Trends and Applications, Barcelona, Spain, 1998.
- [7] Y. K. Cheung. 结构分析的有限条元法[M].北京:人民交通出版社,1980.
- [8] Lezin S. Minsili, 夏禾, Mamba Mpele, 等. 混凝土板梁的有限条法简化分析(英文)[J]. 北京交通大学学报, 2009(6).

收稿日期:2019-04-11

作者简介:付波,男,工程师,E-mail:fubo1818@126.com

近年来,采用响应面法对桥梁结构的有限元模型进行修正得到了越来越广泛的应用。该修正方法首先通过试验设计得到一系列待修正的参数组合,再将这些参数组合代入初始有限元模型进行计算,根据有限元计算结果拟合模型结构响应与修正目标参数间的显式函数关系,即响应面函数。最后通过响应面函数计算的模型响应与桥梁结构实测响应的差异为优化目标进行优化设计,最终获得修正目标参数最优值。该方案中使用响应面函数代替有限元模型大大节约了计算时间,经过修正后的有限元模型也达到了较高的精度。

响应面法所需的试验数量随修正参数数量的增加显著增长,且修正参数越多拟合响应面函数就越困难,因此,控制修正参数的数量十分必要。该文以一座混凝土连续刚构箱梁桥为工程背景,在考虑施工误差的影响下选取主梁弹模、主墩弹模以及桥面铺装厚度3个具有代表性的结构参数,结合响应面法建立响应面函数,并依据实桥试验结果对有限元模型进行修正,以得到高精度的有限元模型。

## 1 基于响应面的有限元模型修正方法

基于响应面的有限元模型修正通过重复试验,将复杂结构的有限元模型转化为简单的响应面数学模型,结合实测数据,采用优化算法寻求到响应面模型中的最优解,再代入有限元模型进行验证,从而达到模型修正的目的,其函数表达式为:

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \epsilon \quad (1)$$

式中: $f$ 为选取的参数与目标参数之间的映射关系; $\xi$ 为待修正参数; $k$ 为参数的数量; $\epsilon$ 为统计误差,即与选取的参数无映射关系的量值。

应用响应面法主要包含3个步骤,确定试验设计、响应面拟合以及优化计算过程。

首先确定试验设计。试验设计有正交试验设计、均匀试验设计以及中心复合试验设计等。其中中心复合设计(简称CCD)是一种最常用的响应面试验设计方法,它是根据二次多项式的特点来构造的,首先应给每个待修正参数赋予+1和-1两个水平值,分别代表了待修正参数在设计空间的上下界限,然后利用正交表确定试验方案,进行 $2^k$ 次试验,然后同样在设计空间的中心点 $n$ 次试验以及臂长为 $\pm a$ 的两个对称点处进行 $2k$ 次试验。共计需要进行 $2^k + 2k + n$ 次试验,3参数的试验点分布模型如图1所示。该试验设计方法可以准确地预估1次项和2次项,该文也采用该方法

进行试验参数组合的设计。

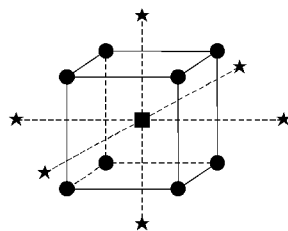


图1 中心复合设计试验点分布模型

其次应根据有限元的计算结果对响应面采用二次多项式进行拟合,并进行 $R^2$ 检验拟合精度。

最后结合实桥试验的实测数据对响应面方程运用最优化理论进行优化计算,得到最贴近实桥试验结果的一组修正后参数和对应的响应值。

## 2 工程概况及实桥试验

### 2.1 工程概况

依托工程为一座连续刚构混凝土梁桥。主桥上部结构为双幅单箱单室变截面箱梁,跨径布置为 $(73+3 \times 138+73)$  m,立面示意如图2所示。主梁采用C55混凝土,纵、横、竖三向预应力体系。箱梁根部高度8.3 m,跨中梁高3.2 m,其间梁高按2次抛物线变化。箱梁顶板宽16.65 m,底板宽8.65 m。顶板厚0.32 m,底板跨中厚度0.33 m,根部1.1 m,其间按1.8次抛物线变化。腹板跨中段厚度0.52 m,根部厚度0.71 m,渐变段长度7.5 m,横断面示意如图3所示。

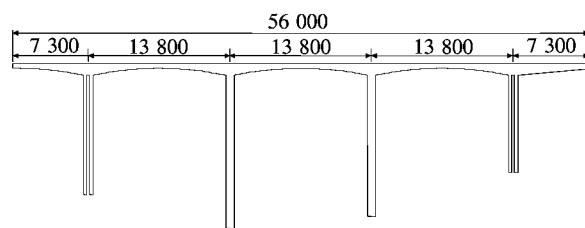


图2 依托工程立面尺寸示意(单位:cm)

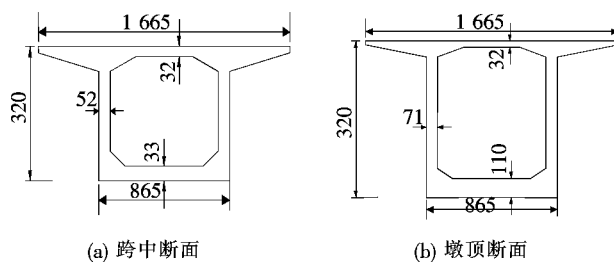


图3 依托工程横断面尺寸示意(单位:cm)

下部结构中中间桥墩采用混凝土单薄壁空心墩,横桥向宽8.65 m,顺桥向尺寸为7.5 m;边墩采用混凝

土双薄壁空心墩,横桥向宽 8.65 m,顺桥向单薄壁尺寸为 3.0 m。桥墩壁厚均为顺桥向 0.7 m,横桥向 0.9 m。最大墩高为 115 m。

2.2 初始有限元模型

采用 Midas/Civil 建立初始有限元模型,其中主梁及桥墩均采用梁单元建立,墩梁采用刚性连接。桥面铺装同样采用梁单元建立,其与主梁单元共节点。由于该有限元模型仅用于分析实桥试验时桥梁的力学性能,因此建模时不考虑施工阶段且忽略桥墩底部桩土的相互作用,故墩底采用固结连接。桥梁两端设立了滑动支座,故在模型中仅对其竖向位移进行约束。

车辆荷载采用节点荷载进行模拟。主梁、桥墩 C55 混凝土弹性模量为 34 500 MPa。全桥模型共计 263 个节点,452 个单元。

2.3 实桥试验

试验采用总重为 500 kN 的加载卡车共计 18 辆进行了加载,加载卡车的轴重及轴距示意如图 4 所示。试验前对加载车进行过磅,实测加载车辆参数如表 1 所示,限于篇幅,仅列出了 18 辆加载卡车的轴重和总重的平均值。

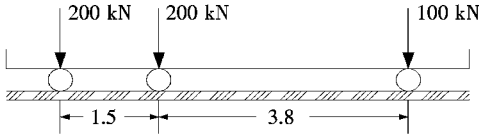


图 4 加载车轴重及轴距示意(单位:m)

表 1 实测加载车轴重均值

编号	轴距(前轴+后轴)/m	轴重/kN		总重/kN
		前轴	后轴	
1~18	1.50+3.80	100.5	401.3	501.8

在正式试验前先采用 3 辆加载车进行 1~2 次预加载,以消除非弹性变形,确认试验以及设备处于良好的工作状态。试验采用 18 辆加载车分 6 级进行跨中加载,加载位置如图 5 所示。每一级加载持荷 2~3 min,待实测应变及挠度数据稳定后进行数据的采集工作,然后再进行下一级的加载工作。

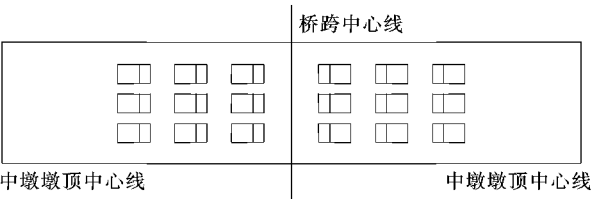


图 5 加载车布置示意

实桥试验的挠度采用水准仪进行测量,应变则采用施工阶段预先埋入混凝土的振弦式应变计进行测量,采用 TDS-460 进行数据的收集。应变及挠度测点均布设在中跨跨中及中墩墩顶附近,共计布设挠度测点 5 个,应变测点 18 个,测试断面上的测点布置如图 6 所示。此外还采用 DS5938N 动态数据采集仪对桥梁的自振频率进行了测量。

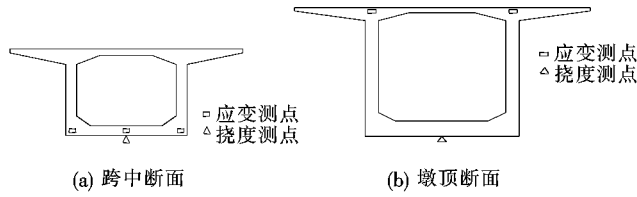


图 6 测点布置

3 考虑施工误差的有限元模型修正

3.1 目标函数与修正参数的选取

在工程中,为了提高效率同时又能得到较高的计算精度,并且能通过响应面方程较好地反映输入参数与输出结构响应的关系,应选择合适的参数及样本。

根据该桥实际施工状况,确定主梁弹模、主墩弹模及桥面铺装厚度 3 个受施工误差影响且对桥梁正常使用阶段力学性能影响较大的因素作为修正参数进行有限元模型的修正。

依托工程主梁采用挂篮悬臂浇筑施工,主墩采用液压滑模施工,因此主梁混凝土弹模的离散性较大,按 20% 的参数变化范围考虑,桥墩混凝土弹模按 10% 的变化范围考虑。桥面铺装的调整值则与桥面标高误差有关,按±20 mm 考虑。最后得到的待修正结构参数的水平设置如表 2 所示。

表 2 结构参数及水平值

水平	主梁弹模 (A)/MPa	主墩弹模 (B)/MPa	桥面铺装 厚度(C)/mm
低水平	27 600	21 050	10
初始值	34 500	34 500	30
高水平	41 400	37 950	50

根据实桥试验的现场条件,选取中跨跨中挠度(R1)、中跨跨中截面底板应力(R2)、墩顶截面顶板应力(R3)以及第 1 阶竖向振动的桥梁频率(R4)共 4 个目标函数。这 4 个目标函数充分利用了现场的实桥试验条件,且包含了桥梁静、动力性能指标,可较为全面、准确地反映依托工程桥梁的力学性能。

3.2 试验设计及响应面拟合

采用中心复合设计的方法进行试验设计,修正参数  $m=4$ ,水平数  $t=2$ 。首先利用正交表构造  $2^{4-1}$  次试验,然后在 3 个因素的臂长端点进行  $3 \times 2$  次试验,

最后在中心点进行 1 次试验,共计进行 15 次有限元模拟。将上述不同参数组合分别代入初始有限元模型中进行计算,并最终得到不同组合下目标函数的有限元计算值(表 3)。

表 3 参数组合及有限元计算结果

序号	A/ MPa	B/ MPa	C/ mm	R1/ mm	R2/ MPa	R3/ MPa	R4/ Hz
1	27 600	31 050	15	55.244	3.5	1.5	0.898
2	41 400	31 050	15	44.331	4.0	1.7	0.979
3	27 600	37 950	15	51.570	3.3	1.5	0.944
4	41 400	37 950	15	41.286	3.8	1.7	1.028
5	27 600	31 050	45	47.523	3.3	1.0	0.846
6	41 400	31 050	45	38.965	3.8	1.2	0.916
7	27 600	37 950	45	44.339	3.2	1.0	0.888
8	41 400	37 950	45	36.330	3.6	1.2	0.960
9	22 895	34 500	30	53.915	3.1	1.1	0.961
10	46 104	34 500	30	37.762	3.9	1.5	0.990
11	34 500	28 697	30	46.773	3.7	1.3	0.893
12	34 500	40 302	30	41.526	3.5	1.4	0.969
13	34 500	34 500	4.7	50.090	3.7	1.9	0.990
14	34 500	34 500	55	39.447	3.4	1.0	0.889
15	34 500	34 500	30	43.843	3.6	1.3	0.933

对响应面精度采用  $R^2$  检验,其计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N [y_{RS}(j) - y(j)]^2}{\sum_{j=1}^N [y(j) - \bar{y}]^2} \quad (2)$$

式中: $y_{RS}$  为响应面的计算结果; $y$  为有限元的计算结果; $N$  为设计空间上检验点的数量; $\bar{y}$  为有限元计算结果的平均值。判定系数  $R^2$  的范围为 0~1,其值越大表明响应面方程的拟合情况越好。

将上述有限元计算结果采用二次多项式对响应面方程进行拟合,并对响应面方程的精度采用  $R^2$  进行精度检验。表 4 为考虑交叉项和不考虑交叉项的拟合精度结果。

表 4 目标函数回归  $R^2$  值

项目	以下各目标函数的 $R^2$ 值			
	R1	R2	R3	R4
考虑交叉项	0.999 9	0.995 3	0.994 1	0.993 2
不考虑交叉项	0.993 9	0.991 5	0.994 1	0.992 1

由表 4 可得:无论是否考虑交叉项,响应面拟合的

精度均较高,即交叉项对响应面拟合方程的精度影响较低。因此该文采用不考虑交叉项的响应面拟合方程如式(3)~(6)所示。

$$R1 = 108.395 - 1.700A - 1.038B - 0.296C + 0.015A^2 + 0.008B^2 + 0.001C^2 \quad (3)$$

$$R2 = 2.815 + 0.081A - 0.041B - 0.002C - 0.001A^2 \quad (4)$$

$$R3 = 2.569 + 0.022A - 0.074B - 0.030C + 0.001B^2 \quad (5)$$

$$R4 = 0.482 - 0.013A + 0.032B - 0.002C + 0.002A^2 \quad (6)$$

3.3 响应面优化

根据实桥试验的实测值对响应面方程进行修正。待修正参数 A、B、C 修正结果见表 5。目标函数 R1~R4 的实测值及修正后的结果见表 6。

表 5 结构参数修正结果

目标值	A/GPa	B/GPa	C/cm
初始模型计算值	34.50	34.50	30.00
修正后	38.95	37.82	33.19
修正幅度/%	12.90	9.62	10.63

表 6 目标函数修正结果

项目	R1/mm	R2/MPa	R3/MPa	R4/Hz
实测值	39.000	3.650	1.340	0.970
初始模型计算值	43.843	3.600	1.300	0.933
修正后	38.000	3.645	1.320	0.966
初始偏差/%	12.42	1.37	2.99	3.81
修正后偏差/%	2.56	0.27	2.23	0.41

由表 5 可得:修正后的参数均大于初始参数,其中主梁弹模和桥墩弹模分别较 34.5 GPa 的初始值提高了 12.9% 和 9.62%,桥面铺装厚度较设计值平均增加了 3 cm,说明依托工程的施工质量也较为可靠,同时参数的变动范围仍在工程实践的常见范围之内,说明了修正结构的可靠性。

由表 6 可以得出:修正前实测中跨跨中挠度与有限元模拟结果相差较大,误差达到了 12.42%,其余目标函数值也存在一定的误差。而采用修正后的有限元模型进行计算,得到的各目标函数值与实测值的误差均大大降低,为 0.27%~2.56%,表明经过修正的有限元模型达到了较高的精度。

综上,基于实桥试验的响应面修正方法,修正后的有限元模型计算值与实桥试验结果吻合良好,修正后的桥梁结构静、动力响应计算值与实测值的误差均在 3% 以内。修正后结构参数变化范围为 9.62%~12.90%,且主梁及混凝土弹模均大于理论值,说明桥梁结构处于良好的弹性受力状态。

## 4 结论

(1) 基于实桥试验结果,采用响应面法选取主梁弹模、桥墩弹模以及桥面铺装厚度 3 个参数对初始有限元模型进行修正,修正后的有限元模型计算值与实桥试验结果吻合良好,修正后的桥梁结构静、动力响应计算值与实测值的误差均在 3% 以内。

(2) 基于实桥试验结果采用二次多项式作为响应面方程可以较好地拟合待修正参数与结构静、动力响应之间的函数关系,且不考虑交叉项时也具有较高的拟合精度。

(3) 采用实桥试验与响应面法相结合的方法是一种有效的有限元模型修正方法,修正后的参数结果仍然在工程实践接受范围之内,静、动力响应也与实测值

高度吻合,故修正后的有限元模型具有较好的参考价值,该修正方法在桥梁结构健康监测及损伤识别领域具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 丁幼亮,李爱群,韩晓林,等.润扬大桥斜拉桥结构安全评估的有限元建模与修正[J].东南大学学报(自然科学版),2006(1).
- [2] 宋汉文,王丽炜,王文亮.有限元模型修正中若干重要问题[J].振动与冲击,2003(4).
- [3] 杨新刚,冯新,周晶.基于现场测试的斜拉桥有限元模型修正[J].防灾减灾工程学报,2009(4).
- [4] 朱安文,曲广吉,高耀南,等.结构动力模型修正技术的发展[J].力学进展,2002(3).
- [5] 陈东.基于响应面法的桥梁结构有限元模型修正与应用[D].长安大学硕士学位论文,2017.
- [6] 陈洪武,王立原,高振帮,等.基于响应面法的桥梁主桁架结构优化设计[J].机械设计与研究,2017(3).
- [7] 陈力波,黄才贵,谷音.基于改进响应面法的公路简支梁桥地震易损性分析[J].工程力学,2018(4).
- [8] 陈林海.基于 Kriging 响应面法的刚构桥及连续梁桥可靠度分析[D].华南理工大学硕士学位论文,2013.
- [9] 单德山,孙松松,黄珍,等.基于试验数据的吊拉组合模型桥梁有限元模型修正[J].土木工程学报,2014(10).
- [10] 邬晓光,李冀弘,宋伟伟.基于改进响应面法的在役 PC 桥梁承载力可靠性[J].长安大学学报(自然科学版),2012(3).
- [11] 张银龙,王春明,从友良.用响应面法分析装配式公路钢桥的平面结构系统可靠度[J].公路交通科技,2005(1).
- [12] 张银龙,常大民.用响应面法分析装配式公路钢桥的结构响应[J].公路交通科技,2003(5).
- [13] 周华强,段成晓,常立新,等.基于响应面法的既有桥梁加固后时变可靠指标分析[J].建筑结构,2010(S1).
- [14] 方志,张国刚,唐盛华,等.混凝土斜拉桥动力有限元建模与模型修正[J].中国公路学报,2013(3).
- [15] 夏品奇,James M. WBrownjohn.斜拉桥有限元建模与模型修正[J].振动工程学报,2003(2).
- [16] 孙正华,李兆霞,陈鸿天.结构行为一致多尺度有限元模型修正及验证[J].东南大学学报(自然科学版),2009(1).
- [17] 田浩,陈艾荣.基于响应面法的混凝土桥梁时变可靠度分析[J].同济大学学报(自然科学版),2011(2).
- [18] 万利军,单炜,姜华.基于响应面法的桥梁动力学有限元模型修正[J].公路交通科技,2014(8).