

## 基于动力测试的锈蚀钢筋混凝土梁有限元模型修正

张鑫迪, 刘才玮\*, 王大龙, 苗吉军

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

**摘要:** 为了建立适用于锈蚀钢筋混凝土梁的精确有限元模型, 采用基于随机森林回归算法的模型修正方法对锈蚀钢筋混凝土梁进行模型修正。使用 ABAQUS 建立锈蚀钢筋混凝土梁的有限元模型, 根据工程经验初步选择待修正的参数和参数取值范围。通过灵敏度分析筛选待修正的参数, 在取值范围内选择 3 组随机参数进行数值模拟。利用基于随机森林回归算法的有限元模型修正方法对参数进行修正, 结果表明修正后的模型动力响应计算值与数值模拟值误差较小。选取锈蚀试验梁进行动力测试, 使用其试验数据进行修正, 参数误差在 5% 以内。提出的有限元模型修正方法能够更好地模拟构件的动力特性, 为后续的火災损伤识别及评估提供精确的基准模型。

**关键词:** 结构健康监测; 模型修正方法; 随机森林回归算法; 锈蚀钢筋混凝土梁; 动力测试

**中图分类号:** TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)06-0018-09

## Finite element model correction of corroded concrete beams based on dynamic testing

ZHANG Xindi, LIU Caiwei\*, WANG Dalong, MIAO Jijun

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** In order to establish a precise finite element model applicable to corroded reinforced concrete beams, this study employs a model correction approach based on the random forest regression algorithm to correct the model of corroded reinforced concrete beams. The finite element model of corroded reinforced concrete beams is developed using ABAQUS, and the parameters to be corrected and their ranges are preliminarily selected according to engineering experience. The parameters to be corrected are identified through sensitivity analysis, and three sets of random parameter values within the specified ranges are chosen for numerical simulation. The finite element model correction method which is based on random forest is employed to correct the parameters. The results show that the error between the calculated value of the dynamic response of the corrected model and the numerical simulation value is small. Corroded test beams are selected for dynamic test, and their experimental data are used for model correction. The parameter correction error is between 3% and 5%. The finite element model correction method proposed in this study could simulate better the

收稿日期: 2024-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(52178487); 山东省自然科学基金(ZR2021ME228)

作者简介: 张鑫迪(1999—), 男, 山东德州人。硕士, 研究方向为结构健康监测。E-mail: 1914767752@qq.com。

\* 通信作者: 刘才玮(1983—), 男, 山东聊城人。博士, 教授, 主要从事混凝土结构抗火、结构检测鉴定及健康监测等方面的研究。  
E-mail: 03150053@163.com。

dynamic characteristics of structural components, offering a precise baseline model for subsequent identification and assessment of fire damage.

**Key words:** structural health monitoring; model correction method; random forest regression algorithm; corroded reinforced concrete beams; dynamic test

临海环境中,由于大气与土壤中氯离子浓度显著高于内陆地区,混凝土结构内的钢筋易发生局部或整体锈蚀<sup>[1]</sup>。这种电化学腐蚀不仅降低了钢筋的材料力学性能,更会引发混凝土保护层开裂、剥落等连锁损伤反应,已成为导致结构耐久性退化的主导因素之一<sup>[2]</sup>。结构动力特性作为损伤敏感指标,其变化规律与锈蚀损伤程度存在显著关联,因此通过振动响应数据识别结构损伤状态已成为结构健康监测领域的核心课题。在此背景下,构建高精度有限元模型是实现结构静力、动力响应分析的基础,需通过模型修正确保数值仿真结果与实测数据的一致性,从而为锈蚀损伤识别提供可靠的力学表征模型。

精确的基准有限元模型是结构损伤识别的关键基础<sup>[3]</sup>,其核心在于通过参数修正减少数值模拟与实测数据的差异<sup>[4]</sup>。SEOK 等<sup>[5]</sup>通过优化材料参数和边界条件,提出了具有良好性能和鲁棒性的有限元模型更新方法。徐恒志等<sup>[6]</sup>修正了钢筋混凝土 T 形简支梁的材料参数与支座刚度,并联合静动力数据构造了简支梁损伤特征参数。LIU 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于灵敏度分析的逐步模型修正方法,获得了精确的钢筋混凝土梁有限元模型,能够较准确地模拟火灾前和火灾过程中的结构动力响应。李忠诚等<sup>[8]</sup>对核电厂预应力混凝土安全壳进行了有限元模型修正,并基于该模型预测了安全壳在试验荷载下的结构变形。翁顺等<sup>[9]</sup>利用修正后的有限元模型对超高层建筑进行损伤识别,验证了模型修正应用于大型土木工程结构损伤识别的实用性。LIN 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于时程分析的大跨度斜拉桥非线性有限元模型更新方法,通过振动台试验验证了该方法的可行性与准确性。张建等<sup>[11]</sup>利用加速度响应信号对大跨度的圆竹拱结构有限元模型进行了修正,结果表明修正后的有限元模型可以充分反映圆竹拱结构的动力特征。

随着计算机算力不断提高,机器学习算法在有限元模型修正中的应用也越来越广泛。模型修正本质上可视为以数据驱动的非线性回归任务<sup>[12]</sup>,而随机森林回归算法因其独特的性能优势成为解决此类问题的优选策略。该算法由 BREIMAN<sup>[13]</sup>于 2001 年提出,其核心在于通过双重随机化构建多棵决策树<sup>[14]</sup>,并集成多棵决策树的预测结果以提升模型泛化能力<sup>[15]</sup>。相较于支持向量机回归<sup>[16]</sup>等传统算法,随机森林回归算法在处理有限元模型修正中的多参数耦合问题时展现出显著优势。基于上述特性,本文选择随机森林回归算法作为有限元模型修正的基础算法。

为了得到精确的有限元模型以完成后续的损伤识别任务,提出了一种基于随机森林回归算法的锈蚀钢筋混凝土梁模型修正方法。基于 ABAQUS 构建了 SPRING2 弹簧单元模拟锈蚀梁界面损伤的精细化有限元模型,并综合工程经验与参数灵敏度分析筛选出黏结滑移刚度、混凝土弹性模量等关键修正参数。通过构建有限元模型数据集,验证了随机森林回归算法在解决多参数耦合修正问题中的可行性。最终通过锈蚀梁动力试验数据进行模型修正,修正结果与真实值误差在 5% 以内,验证了该模型修正方法的实用性与准确性。

## 1 基于随机森林回归算法的模型修正方法

### 1.1 随机森林回归算法基本原理

随机森林回归算法采用自助法(Bootstrap)进行样本的重新采集,从原始训练样本集  $N$  中有放回地重复随机抽取  $k$  个样本。随后从  $k$  个样本的  $M$  个输入特征中随机选择  $m$  个特征作为决策树分支节点的备选特征( $M > m$ )。然后根据特征的不纯度指标确定最佳节点和最佳分支,分别建立  $k$  个决策树回归模型,得到  $k$  个回归预测结果。最后,根据  $k$  个回归预测结果求得平均值  $P$ ,作为最终预测结果。随机森林回归算法的基本原理如图 1 所示。

### 1.2 模型修正样本及评价指标

基于实测的动力数据修正有限元模型。选取结构模态信息作为损伤信号,进一步构造损伤特征参数作为有限元模型修正方法的输入。本文构造的损伤特征参数如式(1)~(3)所示。

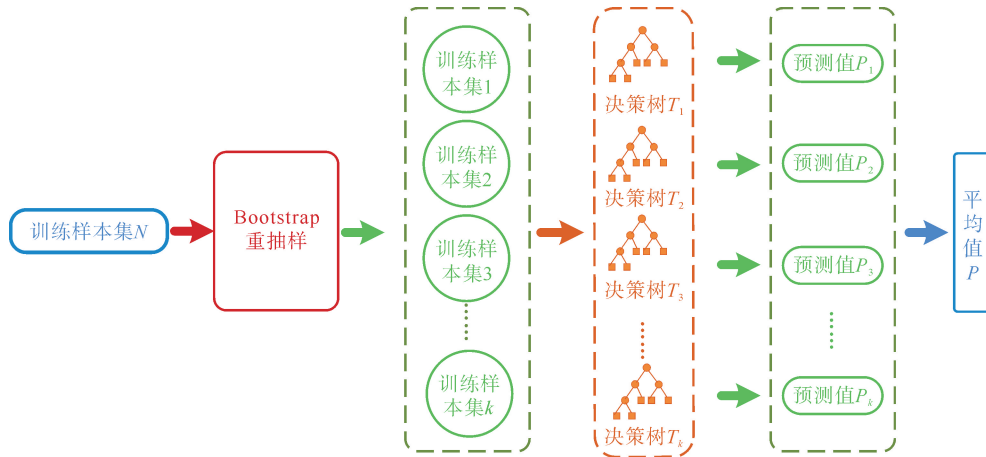


图1 随机森林回归算法基本原理

$$A = \{R_1, \dots, R_l, \dots, R_x; O_1, \dots, O_i, \dots, O_h\} \quad (1)$$

$$O_i = (\varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \dots, \varphi_{io}) \quad (2)$$

$$\varphi_{ij} = \varphi_{ij} / (\varphi_{ij})_{\max} \quad (3)$$

式中:  $A$  为损伤特征参数;  $R_l$  为结构第  $l$  阶频率, 其中  $1 \leq l \leq x$ ,  $x$  为模型修正的最大频率阶数;  $O_i$  为第  $i$  阶振型参数, 其中  $1 \leq i \leq h$ ,  $h$  为参与组合的最大振型阶数;  $\varphi_{ij}$  为第  $i$  阶振型在测点  $j$  位置处的最大值归一化振型分量,  $1 \leq j \leq o$ ,  $o$  为振型测点数量。

考虑到实测模态信息的精度及算法建立的数据库大小, 取前 3 阶模态构造损伤特征参数, 即  $x = h = 3$ 。本文动力响应修正误差主要通过结构的频率误差与振型误差来体现, 振型的计算值与实测值之间的误差可用模态置信准则(MAC)表达:

$$M = \frac{(\boldsymbol{\varphi}_i^T \boldsymbol{\psi}_j)^2}{(\boldsymbol{\varphi}_i^T \boldsymbol{\varphi}_i)(\boldsymbol{\psi}_j^T \boldsymbol{\psi}_j)} \quad 0 \leq M \leq 1 \quad (4)$$

式中:  $M$  为模态置信准则;  $\boldsymbol{\varphi}_i$  为数值模型的第  $i$  阶振型列向量;  $\boldsymbol{\psi}_j$  为理论模型的第  $j$  阶振型列向量。

振型模态相关性越好, MAC 值越大, 一般默认  $M \geq 0.8$  时两者相关性较好, 从侧面反映出修正模型的好坏。当模型的计算振型与实际振型是同阶时, 误差频率越小表示模型的精准度越高。误差频率为

$$E_{\lambda}^i = \left( \frac{\lambda_{ai} - \lambda_{ei}}{\lambda_{ei}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $E_{\lambda}^i$  为第  $i$  阶频率的误差百分比;  $\lambda_{ai}$ 、 $\lambda_{ei}$  分别为第  $i$  阶频率的理论值与实测值。

## 2 锈蚀梁有限元模型建立

### 2.1 试件尺寸及配筋

本节构建的锈蚀钢筋混凝土梁(以下简称为锈蚀梁)长 4 m, 两端支撑长度为 0.1 m, 有效长度为 3.8 m。混凝土强度等级为 C40, 受拉钢筋采用直径为 18 mm 的 HRB400 钢筋。架立筋采用直径为 12 mm 的 HRB400 钢筋。箍筋采用直径为 8 mm 的 HPB300 钢筋, 间距为 100 mm。在锈蚀梁计算跨度内均匀布置 5 个加速度传感器。锈蚀梁尺寸及配筋布置如图 2 所示。

### 2.2 有限元模型初始参数设置

采用 ABAQUS 建立锈蚀梁有限元模型, 其中混凝土采用 C3D8R 实体单元, 钢筋采用 T3D2 桁架单元。在建模过程中考虑了支座的刚度以及锈蚀梁钢筋与混凝土之间的黏结强度。由于笛卡尔属性的连接器仅用于连接三维实体之间的线性与非线性关系模拟, 本文采用 ABAQUS 自带的 SPRING2 单元来模拟钢筋与混凝土之间的黏结强度。在支座处设立 3 个线性弹簧, 类型选择接地, 以模拟两支座的线性刚度。在简支梁有限元模型构建后, 对混凝土部件进行切分, 使钢筋单元与混凝土单元网格共结点。使用脚本快

速建立混凝土单元结点与钢筋单元结点之间的线性弹簧,其中沿钢筋纵向方向的弹簧刚度取  $K_1$ ,垂直于钢筋纵向方向的弹簧刚度取极大值。线性弹簧的刚度  $K_1$  由能量等值定理确定<sup>[17]</sup>。有限元模型参数初始值见表 1。锈蚀梁有限元模型见图 3。

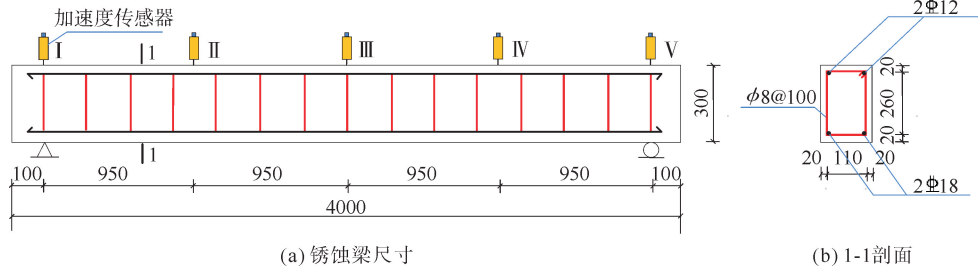


图 2 锈蚀梁尺寸及配筋(单位:mm)

表 1 有限元模型参数初始值

参数	$E/$ ( $10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ )	$D_s/$ ( $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{mm}^{-3}$ )	$D_1/\text{mm}$	$D_2/\text{mm}$	$K_1/$ ( $10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	$K_2/$ ( $10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	$K_3/$ ( $10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )
初始值	3.2	2.5	0.1	0.1	5.5	1.5	1.5

注: $E$  为混凝土弹性模量; $D_s$  为混凝土密度; $D_1$  和  $D_2$  为梁两侧支座偏移; $K_1$  为钢筋与混凝土之间的黏结弹簧刚度; $K_2$  和  $K_3$  为左右两侧支座弹簧刚度。

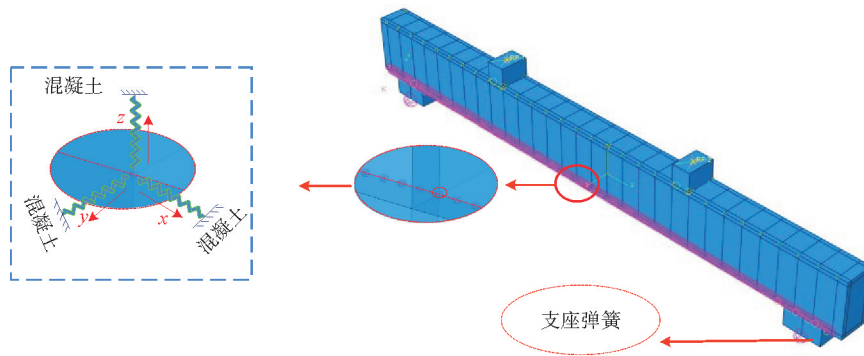


图 3 锈蚀梁有限元模型

### 3 测试梁有限元模型修正

#### 3.1 待修正参数的确立

根据工程经验选定  $E$ 、 $D_s$ 、 $D_1$  和  $D_2$ 、 $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$  作为待修正参数。由工程经验确定锈蚀梁参数取值区间,见表 2。

表 2 待修正参数取值区间

参数	$E/$ ( $10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ )	$D_s/$ ( $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{mm}^{-3}$ )	$D_1/\text{mm}$	$D_2/\text{mm}$	$K_1/$ ( $10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	$K_2/$ ( $10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	$K_3/$ ( $10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )
最小值	2.4	2.0	0.05	0.05	4.0	0.6	0.6
最大值	3.6	3.0	0.15	0.15	7.0	2.5	2.5

使用设计灵敏度分析标准操作程序(Design Sensitivity Analysis Standard Operating Procedure, DSA-SOP)对 ABAQUS 有限元模型进行灵敏度分析。通过 ABAQUS 运行已经建好的有限元模型,生成对应的 INP 文件,随后修改 INP 文件进行 DSA-SOP 分析,DSA-SOP 流程如图 4 所示。对锈蚀梁有限元模型进行灵敏度分析,其动力测试敏感度系数结果如表 3 所示。

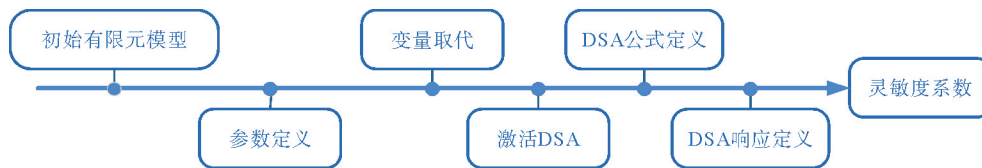


图 4 DSA-SOP 流程

表 3 动力测试灵敏度系数

参数	$E$	$D_S$	$D_1$	$D_2$	$K_1$	$K_2$	$K_3$
系数	0.81	-0.67	0.04	-0.06	0.32	0.21	0.23

由灵敏度分析结果(表 3)可知,左右支座偏移  $D_1$  和  $D_2$  对动力测试的敏感度远低于其他参数,故在模型修正过程中忽略此参数。通过 DSA-SOP 对 ABAQUS 有限元模型的待修正参数筛选后,最终选择混凝土弹性模量  $E$ 、混凝土密度  $D_S$ 、钢筋与混凝土之间的黏结弹簧刚度  $K_1$ 、左右支座弹簧刚度  $K_2$  和  $K_3$  作为有限元模型待修正参数。

### 3.2 基于随机森林回归算法的模型修正

在物理参数取值范围内随机选取 3 组参数作为数值模型测试数据,参数取值如表 4 所示。

表 4 测试数据参数值

工况	$E/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2})$	$D_S/(10^{-6} \text{ g} \cdot \text{mm}^{-3})$	$K_1/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$K_2/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$K_3/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$
L1	3.13	2.67	5.72	1.39	1.68
L2	2.40	2.34	6.17	1.06	1.68
L3	3.23	2.86	5.70	1.85	1.81

经过基于随机森林回归算法的模型修正方法修正后的有限元模型模态计算值与测试值对比结果如表 5 所示。由表 5 可知,修正后,前 3 阶频率与真实频率差距大幅减小,修正后误差绝对值在 6.36% 以内;同时前 3 阶振型的 MAC 值也有不同程度的提升,计算结果均达到了 0.990 以上,反映出修正后的模型与测试梁振型相关性较好,说明锈蚀梁的动力特性模拟需求可以得到很好的满足。

表 5 测试梁修正前后模态结果对比

工况	阶次	真实频率/Hz	修正前			修正后		
			计算频率/Hz	误差/%	MAC 值	计算频率/Hz	误差/%	MAC 值
L1	1	70.23	74.65	6.29	0.977	70.84	0.87	0.996
	2	335.61	313.99	-6.44	0.985	341.94	1.89	0.995
	3	575.78	631.43	9.67	0.964	539.15	-6.36	0.998
L2	1	69.45	74.65	7.49	0.987	68.52	-1.34	0.995
	2	345.23	313.99	-9.05	0.989	332.19	-3.78	0.993
	3	588.34	631.43	7.32	0.979	573.92	-2.45	0.992
L3	1	66.71	74.65	11.90	0.998	65.72	-1.48	0.999
	2	318.34	313.99	-1.37	0.985	326.58	2.59	0.996
	3	534.63	631.43	18.11	0.978	534.06	-0.11	0.995

经过基于随机森林回归算法的模型修正方法修正前后的有限元模型参数如表 6 所示。可以看出,不同工况下各个参数值的误差绝对值在修正后基本得到了不同程度地减小,且误差绝对值均控制在 9% 以

内,效果良好。其中误差绝对值降低幅度最大的参数为工况 L2 的左侧支座竖直刚度  $K_2$ ,从修正前的 41.51%降低至修正后的 4.72%,降幅达到 36.79%。上述结果表明模型参数经过基于随机森林回归算法的模型修正方法修正后十分接近测试梁参数值,从而验证了所提模型修正方法的可行性和高效性。

表 6 测试梁修正前后参数值结果对比

工况	参数	参数值			误差/%	
		真值	修正前	修正后	修正前	修正后
L1	$E/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2})$	3.13	3.20	3.15	2.24	0.64
	$D_S/(10^{-6} \text{ g} \cdot \text{mm}^{-3})$	2.67	2.55	2.63	-4.49	-1.50
	$K_1/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	5.73	5.50	5.73	-4.01	0.00
	$K_2/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	1.39	1.50	1.43	7.91	2.88
	$K_3/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	1.68	1.50	1.64	-10.71	-2.38
L2	$E/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2})$	2.34	3.20	2.29	36.75	-2.14
	$D_S/(10^{-6} \text{ g} \cdot \text{mm}^{-3})$	2.39	2.55	2.52	6.69	5.44
	$K_1/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	6.17	5.50	5.91	-10.86	-4.21
	$K_2/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	1.06	1.50	1.11	41.51	4.72
	$K_3/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	1.68	1.50	1.77	-10.71	5.36
L3	$E/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2})$	2.86	3.20	2.95	11.89	3.15
	$D_S/(10^{-6} \text{ g} \cdot \text{mm}^{-3})$	3.23	2.55	3.18	-21.05	-1.55
	$K_1/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	5.70	5.50	5.71	-3.51	0.18
	$K_2/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	1.85	1.50	1.81	-18.92	-2.16
	$K_3/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	1.82	1.50	1.97	-17.58	8.24

## 4 锈蚀梁有限元模型修正

### 4.1 锈蚀梁概况

通过 3 根试验锈蚀钢筋混凝土梁验证前文所述有限元模型修正方法的实用性。试件纵向长度为 3 m,其中有效长度为 2.4 m。梁横向截面尺寸为 150 mm×300 mm。采用 C40 混凝土浇筑,钢筋及设计参数见图 5。

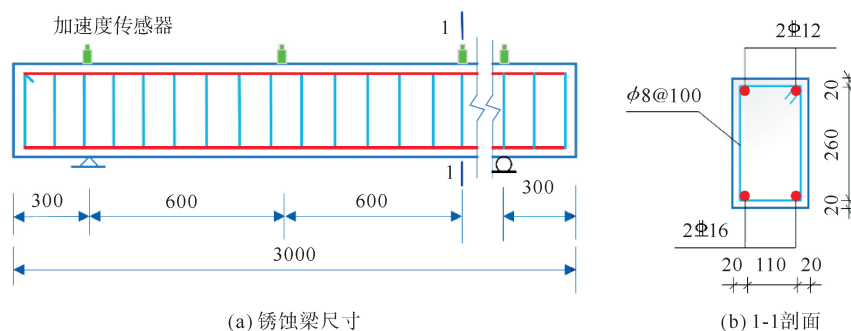


图 5 试验锈蚀梁尺寸及配筋

采用通电加速锈蚀的方法对试件进行锈蚀试验<sup>[2]</sup>。待试件达到相应的锈蚀程度后,对试件进行振动测试,以提取试件的结构振动信息进行有限元模型修正。动力测试现场布置如图 6 所示。



图6 振动测试现场布置

限于篇幅,本文以锈蚀率为0.05的试件B-C05为例进行振动模态分析,其时域如图7(a)所示。通过DHDAS动态信号采集分析系统得到试件B-C05的一阶振型,如图7(b)所示。不同试件的锈蚀率及各阶频率,如表7所示。

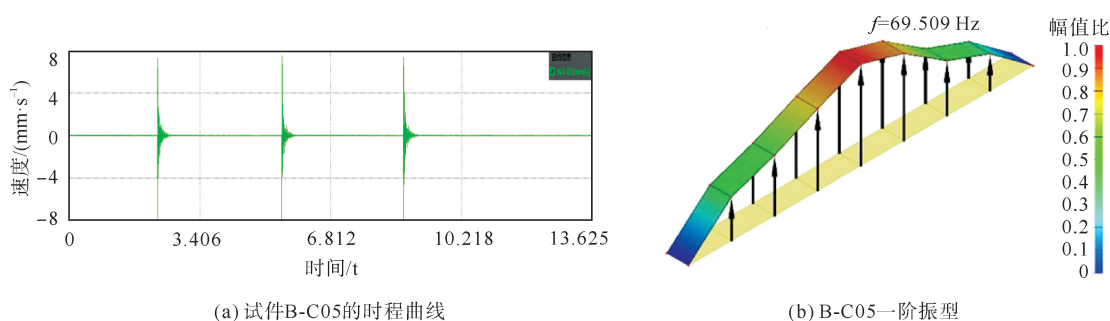


图7 B-C05 振动测试试验结果

表7 试件锈蚀率及频率

试件	锈蚀率	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz
B-C00	0.00	69.672	348.410	657.491
B-C05	0.05	69.509	346.334	651.901
B-C15	0.15	68.860	338.571	625.924

注: B-C $xx$  中  $xx$  代表试件锈蚀率的百分比。

由表7可知,随着锈蚀率的增加,频率逐渐衰减,尤其是高阶频率衰减最为明显。这表明了对锈蚀参数进行修正的必要性。从图7中可以看出实测振型数据较好,可以满足模型修正的基本要求。

#### 4.2 试验锈蚀梁有限元模型修正结果

试验锈蚀梁模型修正前后的模态计算值与实测值对比结果如表8所示,试验锈蚀梁模型修正前后参数值如表9所示。由表8可知,修正后3根试验锈蚀梁的前3阶真实频率与数值模型计算频率之间的误差显著降低,误差绝对值范围由修正前的7.17%~19.61%减小到修正后的0.53%~4.11%,误差绝对值范围总体在5%以内;同时试验锈蚀梁前3阶振型的MAC值也有较大的提升,计算结果均达到了0.995以上。说明修正后的有限元模型振型与试验锈蚀梁相关性较好,能够精确地反映试验锈蚀梁的动力特性。如表9所示,修正后的模型参数结果符合实际工程经验,其中锈蚀弹簧刚度 $K_1$ 随着锈蚀率的增加而逐渐降低。由此可见,通过随机森林回归算法进行模型修正,能够有效提升有限元模型的精度,修正效果达到预期,为后期损伤识别任务建立了精确的有限元模型。

表 8 试验锈蚀梁修正前后模态结果对比

试件	阶次	实测频率/Hz	修正前			修正后		
			计算频率/Hz	误差/%	MAC 值	计算频率/Hz	误差/%	MAC 值
B-C00	1	69.29	62.65	-9.58	0.967	67.84	-2.09	0.998
	2	348.69	297.99	-14.54	0.987	336.94	-3.37	0.998
	3	658.63	531.43	-19.31	0.979	662.15	0.53	0.999
B-C05	1	67.58	62.65	-7.30	0.976	68.52	1.39	0.997
	2	349.69	297.99	-14.78	0.982	339.14	-3.02	0.998
	3	661.07	531.43	-19.61	0.981	633.92	-4.11	0.998
B-C15	1	67.49	62.65	-7.17	0.988	65.72	-2.62	0.997
	2	363.26	297.99	-17.97	0.984	356.58	-1.84	0.999
	3	659.92	531.43	-19.47	0.979	635.03	-3.77	0.998

表 9 试验锈蚀梁修正前后模型参数值结果对比

参数名称	初始值	B-C00	B-C05	B-C015
$E/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2})$	3.00	3.16	3.08	3.11
$D_S/(10^{-6} \text{ g} \cdot \text{mm}^{-3})$	2.40	2.49	2.53	2.51
$K_1/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	5.50	5.73	5.45	5.32
$K_2/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	1.50	1.53	1.61	1.58
$K_3/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$	1.50	1.57	1.59	1.55

## 5 结论

1) 本文提出了一种基于随机森林回归算法的有限元模型修正方法,使用该方法对 3 根有限元测试梁进行了模型修正。在修正过程中考虑了锈蚀钢筋与混凝土之间的黏结刚度,并使用 ABAQUS 中的 SPRING2 单元进行模拟。模型修正后的结果表明,有限元模型频率与设定的数值模型频率较为吻合,误差有显著降低。修正结果充分验证了该修正方法的有效性。

2) 为了进一步验证基于随机森林回归算法的模型修正方法的实用性,先对真实的锈蚀钢筋混凝土简支梁进行动力测试,随后使用该方法进行模型修正。结果表明,修正后的有限元模型能够在误差允许范围内反映结构的动力特性,该修正方法精确程度高,具有一定的工程实用价值。

### 参考文献(References):

- [1] DANG V H, FRANÇOIS R. Influence of long-term corrosion in chloride environment on mechanical behaviour of RC beam[J]. Engineering Structures, 2013, 48: 558-568.
- [2] ZHANG W P, SONG X B, GU X L, et al. Tensile and fatigue behavior of corroded rebars[J]. Construction and Building Materials, 2012, 34: 409-417.
- [3] RIBEIRO F, SENA-CRUZ J, BRANCO F G, et al. 3D finite element model for hybrid FRP-confined concrete in compression using modified CDPM[J]. Engineering Structures, 2019, 190: 459-479.
- [4] 杨智春, 王乐, 李斌, 等. 结构动力学有限元模型修正的目标函数及算法[J]. 应用力学学报, 2009, 26(2): 288-296.  
YANG Zhichu, WANG Le, LI Bin, et al. Objective functions and algorithms in structural dynamic finite element model updating[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2009, 26(2): 288-296.

- [5] SEOK S, HAIKAL G, RAMIREZ J A, et al. High-resolution finite element modeling for bond in high-strength concrete beam[J]. *Engineering Structures*, 2018, 173: 918-932.
- [6] 徐恒志, 刘才玮, 苗吉军, 等. 基于静动力测试的混凝土 T 形梁有限元模型修正[J]. *青岛理工大学学报*, 2020, 41(5): 45-51.  
XU Hengzhi, LIU Caiwei, MIAO Jijun, et al. Finite element model updating of concrete T-beams based on static and dynamic testing[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2020, 41(5): 45-51.
- [7] LIU C W, HUANG X H, ZHAO Y Y, et al. Vibration analysis of concrete T-beam at elevated temperatures based on modified finite element model[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 52: 104381.
- [8] 李忠诚, 周艳兵, 蓝天云, 等. 基于有限元模型修正的预应力混凝土安全壳结构性能评估[J]. *工业建筑*, 2022, 52(10): 84-88.  
LI Zhongcheng, ZHOU Yanbing, LAN Tianyun, et al. Performance evaluation of prestressed concrete containment structure based on finite element model updating[J]. *Industrial Construction*, 2022, 52(10): 84-88.
- [9] 翁顺, 朱宏平. 基于有限元模型修正的土木结构损伤识别方法[J]. *工程力学*, 2021, 38(3): 1-16.  
WENG Shun, ZHU Hongping. Damage identification of civil structures based on finite element model updating[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(3): 1-16.
- [10] LIN K Q, XU Y L, LU X Z, et al. Time history analysis-based nonlinear finite element model updating for a long-span cable-stayed bridge[J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 20(5): 2566-2584.
- [11] 张建, 钱孝文, 杨娜, 等. 大跨度圆竹拱结构动力测试及有限元模型修正[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(2): 94-104.  
ZHANG Jian, QIAN Xiaowen, YANG Na, et al. Dynamic test and finite element model modification of long-span round bamboo arch structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(2): 94-104.
- [12] EREIZ S, DUVNJAK I, JIMÉNEZ-ALONSO J F. Review of finite element model updating methods for structural applications[J]. *Structures*, 2022, 41: 684-723.
- [13] BREIMAN L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45: 5-32.
- [14] 陈威, 谢成心, 侯冀超, 等. 集成学习经典算法研究[J]. *河北建筑工程学院学报*, 2023, 41(3): 211-216.  
CHEN Wei, XIE Chengxin, HOU Jichao, et al. Research on classical algorithms of ensemble learning[J]. *Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering*, 2023, 41(3): 211-216.
- [15] 李庭洋, 栾新, 彭正洪. 决策树学习算法在交通方式选择模型中的应用[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2013, 46(3): 354-358.  
LI Tingyang, LUAN Xin, PENG Zhenghong. Application of traffic mode choice model based on decision tree algorithm[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2013, 46(3): 354-358.
- [16] HU J C, SZYMCZAK S. A review on longitudinal data analysis with random forest[J]. *Briefings in Bioinformatics*, 2023, 24(2): bbad002.
- [17] 梁岩, 李杰, 罗小勇, 等. 锈蚀钢筋混凝土构件抗震动力性能研究[J]. *振动工程学报*, 2016, 29(1): 140-147.  
LIANG Yan, LI Jie, LUO Xiaoyong, et al. Study on anti-seismic dynamic property of corroded reinforced concrete member[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2016, 29(1): 140-147.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)