

# 钢-混凝土组合板的结构识别及损伤评估\*

方亮<sup>1,2</sup>, 周云<sup>1</sup>, 易伟建<sup>1</sup>, 蒋运忠<sup>3</sup>, 胡翔<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

5

2. 湖南农业大学 工学院, 湖南 长沙 410128;

3. 中国轻工业长沙工程有限公司, 湖南 长沙 410114 )

**摘要:** 结构识别技术是对既有结构进行损伤诊断的有效手段, 而用于预测结构反应的有限元模型与实际组合结构的符合程度, 直接影响识别结果的准确性。为正确地建立识别模型并对其进行有效修正, 保证识别结果的准确性和合理性, 以试验研究为基础, 对一块钢-混凝土组合板进行了基于灵敏度的模型修正和结构识别研究。通过有限元软件 Strand7 采用符合实际的壳-实体单元模型对组合板建模; 采用灵敏度分析, 合理选取 4 个高灵敏度的物理参数作为修正指标; 运用 Strand7 软件和 Matlab 应用程序的交互访问技术(API), 对有限元模型进行多参数模型校验, 并将校验后模型分析结果与试验实测数据对比, 验证模型修正效果; 最后通过引入损伤函数, 对钢-混凝土组合板损伤状态下的混凝土刚度退化进行了识别。

10

15

**关键词:** 组合结构; 模型修正; 灵敏度; 结构损伤识别

**中图分类号:** TU317.1; TU375.3

## The Structure Identification and Damage Estimation of Steel-Concrete Composite Slab

20

FANG Liang<sup>1,2</sup>, ZHOU Yun<sup>1</sup>, YI Weijian<sup>1</sup>, JIANG Yunzhong<sup>3</sup>, HU Xiang<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan Unit, Changsha, Hunan, 410082, China;

2. College of Engineering, Hunan Agricultural Unit, Changsha, Hunan, 410128, China

3. China CEC Engineering Corporation, Changsha, Hunan, 410114, China; )

25

**Abstract:** Structural identification technology was an effective means of damage detection of existing structures. The accuracy of structural identification method relied on whether the finite element model which used to predict structural response got better accordance with the practical structure. In order to make identification result validity and rationality, building up finite element model and updating it correctly was important. Therefore, the sensitivity-based model updating and structural identification were studied based on static and dynamic experiments on a steel-concrete composite slab. Composite slab models were built by using finite element analysis software Strand7, and the shell-brick model was selected. 4 high sensitive physical parameters were selected reasonably as modification indices by sensitivity analysis. Then, model updating method of steel-concrete composite slab based on Strand7-Matlab application programming interface (API) strategy was researched. And the analysis results of verification model were compared with test data, to verify the effect of model updating. Finally, the stiffness degradation distribution of the tested slab under damage condition was achieved by introducing damage function into model identification.

30

35

**Key words:** composited structures; model updating; sensitivity analysis; damage identification

40

## 0 引言

钢-混凝土组合板能充分发挥了钢材和混凝土的优点, 承载能力高、韧性好、耐疲劳、施工方便, 在现代桥梁结构中运用广泛<sup>[1]</sup>。聂建国等<sup>[2-5]</sup>对钢-混凝土组合构件的变形计算简化

**基金项目:** 基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (51208190); 教育部高校博士点基金青年基金

(201201611120028); 湖南省优秀青年骨干教师培养计划; 中央高校基本科研业务费支持——湖南大学青年教师成长计划。

**作者简介:** 方亮 (1981—), 女, 湖南, 湖南大学博士研究生在读, 湖南农业大学讲师

**通信联系人:** 周云 (1979—), 男, 湖南人, 副教授, 博士, 主要从事结构健康监测及动力识别的研究. E-mail: zhouyun05@hunu.edu.cn

公式、截面刚度折减系数、剪力滞效应弹性解析解等问题进行了一系列研究；余志武等<sup>[6]</sup>通过试验研究了不同形式荷载作用下组合结构的滑移变形，并推导了界面滑移及变形的理论计算公式。但随着桥梁的增多及服役年限增长，桥梁的状态评估及损伤识别工作变得十分重要。对既有组合结构构件进行损伤评估，是评价结构工作状态、估计剩余寿命的核心问题<sup>[7-8]</sup>。结构损伤识别技术，正迅速发展成有效诊断结构损伤的重要手段。工程理论及实践证明：以结构损伤识别为核心的结构性能评估，依赖于识别模型与结构实际情况的吻合程度<sup>[9]</sup>。在实际工作中，如何利用实测数据进行模型修正(Model updating)，使得校验后的模型符合结构的实际情况，以保证参数识别的有效性和准确性是具有挑战的工作。

本次研究以基于模态柔度的结构识别技术和计算方法，及基于 API 的灵敏度分析计算为理论基础，结合文献<sup>[10]</sup>中钢-混凝土组合板进行的多参考点脉冲锤击法试验(MRIT)，建立组合板的有限元模型；通过灵敏度分析选取灵敏度较高的参数，修正初始有限元模型(FEM)；最后对钢-混凝土组合板进行损伤状态下的混凝土刚度退化识别研究。

## 1 基本理论

### 1.1 结构识别

结构识别，即：“利用试验数据校验后的修正模型来预测与参数相关的结构反应”<sup>[11]</sup>。结构识别研究在上世纪 70 年代由 Hart<sup>[12]</sup>, Liu 和 Yao<sup>[13]</sup>等人引入土木工程领域，2011 年 ASCE-SEI 正式提出的结构识别“六步圆”理论<sup>[14]</sup>，使该理论得到极大提升和完善。

利用动力测试获得结构的基本模态信息，对比结构在损伤前后的模态信息变化，能够有效地识别出结构的损伤，而用于损伤识别的这些模态参数称为损伤指纹。模态柔度就是常用的一种动力损伤指纹。模态柔度的概念由 Clough 等<sup>[15]</sup>率先提，即：通过动力模态分析或模态试验获得的柔度矩阵。国内外大量的研究<sup>[16-18]</sup>表明：结构柔度及其变化是评估结构性能的有效指标，并且比频率和振型对结构的损伤更加敏感。

### 1.2 基于模态柔度的计算方法

模态柔度计算依赖于 MRIT 试验获得的动力模态参数，具体计算方法有两种<sup>[19]</sup>：1) 基于圆频率和质量归一振型合成模态柔度；2) 基于频率响应函数的截距提取模态柔度。

本次研究是基于 MRIT 测试数据，采用基于频率响应函数的截距提取模态柔度的方法。在该方法中，模态质量系数可以直接从 MRIT 测量得到的频率响应函数(FRF)中提取。通常使用部分分式表达频率响应函数来拟合试验测试的频率响应函数，如式(1)所示：

$$H_{pq}(\omega) = \sum_{r=1}^n \left[ \frac{A_{pqr}}{(j\omega - \lambda_r)} + \frac{A_{pqr}^*}{(j\omega - \lambda_r^*)} \right] \quad (1)$$

式中， $H_{pq}(\omega)$ 为在第  $q$  点敲击第  $p$  点拾振的频响函数， $j$  为虚数符号， $\omega$  为频率值， $\lambda_r$  表示系统的第  $r$  阶极点， $A_{pqr}$  表示第  $q$  点敲击第  $p$  点拾振时第  $r$  阶模态的留数， $A_{pqr} = Q_{Ar} \psi_{pr} \psi_{qr}$ ，其中  $Q_{Ar}$  为第  $r$  阶模态的模态比例因子， $\psi_{pr}$  和  $\psi_{qr}$  分别为第  $p$  点和第  $q$  点第  $r$  阶模态的模态振型系数，\*表示复数共轭。

利用模态参数估计算法<sup>[20]</sup>，在  $\omega=0$  处计算自由度  $p$  和  $q$  点的频响函数，得到结果，如式(2)所示<sup>[21]</sup>：

$$H_{pq}(\omega) = \sum_{r=1}^m \left[ \frac{\psi_{pr} \psi_{qr}}{M_{Ar}(-\lambda_r)} + \frac{\psi_{pr}^* \psi_{qr}^*}{M_{Ar}^*(-\lambda_r^*)} \right] \quad (2)$$

80 式中,  $H_{pq}(\omega)$ 为第  $q$  点输入和第  $p$  点输出获得的频率响应函数;  $\lambda_r$  为第  $r$  阶极点;  $\psi_{pr}$  和  $\psi_{qr}$  分别为第  $p$  点和第  $q$  点第  $r$  阶模态的模态振型系数,  $M_{Ar}$  为第  $r$  阶模态的模态质量系数,  $M_{Ar}=1/Q_{Ar}$ 。

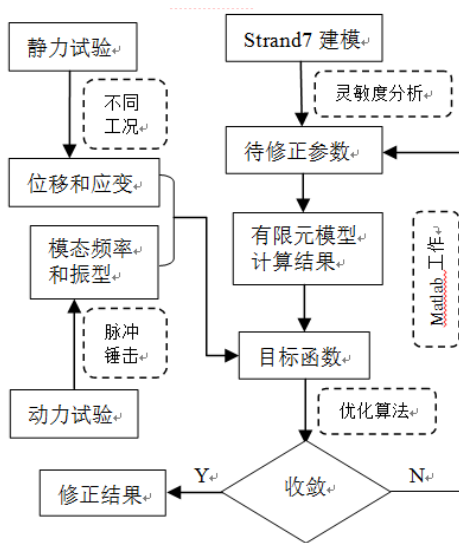
计算模态柔度, 需要将测试得到的频响函数由“加速度导纳”转化为“位移导纳”。为避免出现分母频率值  $\omega$  趋近于“0”导致不合理, 需对多个自由度的加速度频率响应函数进行拟合, 分别提取出每个单自由度拟合曲线在  $\omega=0$  时的截距, 计算它们的截距之和, 获得多自由度体系的模态柔度矩阵。

### 1.3 基于 API 的灵敏度分析的模型修正

90 在“六步圆”理论中: 模型校验(Model calibration)和参数识别(Parameter ID), 也可以称为模型修正, 即模型-试验匹配过程<sup>[22]</sup>。通常是选择模型中的一个或多个参数进行修正, 使模型能更好反映出结构的静、动力特性<sup>[23]</sup>。而灵敏度分析则帮助选择灵敏度高的待修正参数, 以提高模型校验的效率。

本次有限元模型进行对修正, 是先基于非线性最小二乘法建立带边界约束条件的目标函数, 将损伤识别问题转化为目标函数的优化, 然后采用具有全局收敛特性的信赖域方法<sup>[24]</sup>对该目标函数进行求解。优化过程具有较强的鲁棒性, 计算时间较短, 能有效识别出 FEM 各部分的刚度降低系数, 从而实现对结构的损伤识别。

95 Strand7 是一款功能强大的集前处理、分析和后处理于一体的有限元仿真软件系统<sup>[25]</sup>。本次模型修是通过 Strand7 软件特有的 API 模块与 Matlab 软件进行交互访问实现的, 其流程详见(图 1)。



100 图 1 软件 Strand7-API 和 Matlab 交互访问流程图  
Fig.1 Flow chart of interactive access Strand7-API and Matlab

研究中, 设立了两个目标函数式(3)和式(4), 同时进行位移和模态数据的模型修正。

$$obj_{Disp}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (d_E^i - d_A^i(x))}{n} \quad (3)$$

$$obj_{Modal}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i(x) + (1 - MAC_i))}{n} \quad (4)$$

105 其中:

$$MAC_i(x) = \frac{(f_{Ai}^T(x)f_{Ei})^2}{(f_{Ai}^T(x)f_{Ai}(x))(f_{Ei}^T f_{Ei})} \quad (5)$$

$$f_i = \frac{f_E^j - f_A^j(x)}{f_E^j} \quad (6)$$

式中：下标 E 表示实验测试数据；下标 A 表示有限元软件 Strand7 分析数据； $d$  表示位移； $s$  表示应变； $f$  表示频率； $f$  表示振型向量； $x$  表示待识别的参数，如弹性模量等。

110 模型修正过程主要使用基于 Matlab 软件开发的 3 个程序<sup>[10]</sup>：(1)ApiTest.m 程序，用于模型的打开、运行求解和结果提取；(2)ObjectiveFunction.m 程序，定义目标函数，通过调用 ApiTest 文件，将有限元模型的计算结果与实测结果代入到目标函数中；(3)UpdateModel.m 程序，利用优化工具对有限元模型的参数进行更新，并读取预测结果，判断目标函数是否满足迭代收敛的精度。

115 优化算法采用非线性最小二乘优化算法(Isqnonlin)中的信赖域反射算法。

## 2 钢-混凝土组合板试验介绍

### 2.1 组合板及测点布置

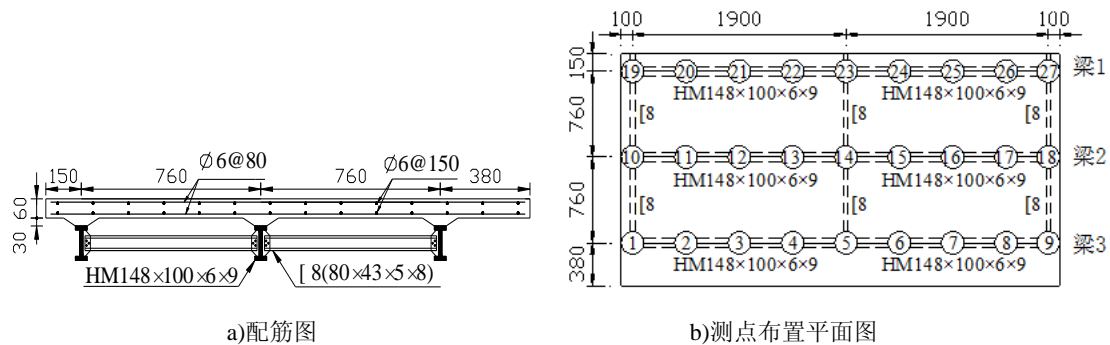


图 2 钢-混凝土组合板

Fig.2 Steel-concrete composite slab

120 钢-混凝土组合板长 4.0m，宽 2.05m，采用 3 根 Q235 工字型钢作为主梁，强度等级为 C50 的混凝土板厚 60cm，板内配筋为双层双向直径 6mm 的 HPB300 钢筋。组合板为对边支撑，共 6 个支座，一端 3 个为固定铰支座，另一端 3 个为滚动支座，组合板尺寸及测点布置详见图 2。

### 2.2 分级加载工况

钢-混凝土组合板采用分级静力加载，共设置了 3 种加载工况：损伤工况 1 将试验板加载至出现肉眼可见的裂缝；损伤工况 2 将试验板加载至中度开裂(约 200kN)；损伤工况 3 将试验板加载至破坏。关于板的静、动力试验介绍详见参考文献[10]。

## 3 钢-混凝土组合板模型建立

### 3.1 材料物理参数及本构

130 混凝土的本构关系采用 Hognestad 表达式；钢材的本构关系采用二折线模型<sup>[10]</sup>。钢筋基于等效原理，看成一种均匀分布在混凝土内的材料，对混凝土板和板内钢筋采用整体式建模。混凝土的抗压强度  $f_c=53.86\text{MPa}$ ，等效弹性模量  $E_c=3.51 \times 10^4\text{MPa}$ ，泊松比  $\lambda_c=0.2$ ，密度  $\rho_c=2450\text{kg/m}^3$ 。钢梁的弹性模量  $E_s=2.0 \times 10^6\text{MPa}$ ，泊松比  $\lambda_s=0.25$ ，密度  $\rho_s=7850\text{kg/m}^3$ 。

### 3.2 Strand7 有限元模型建立

采用 Strand7 有限元软件对钢-混凝土组合板建模时采用壳-实体模型，其中 Beam 单元 1437 个，Shell 单元 2400 个，Link 单元 264 个，Brick 单元 9280 个。

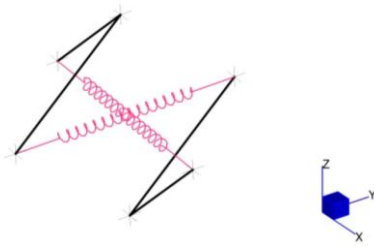


图 3 连接件弹簧-阻尼单元

Fig. 3 The spring-damp unit of connection

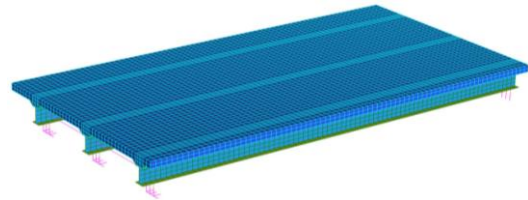


图 4 组合板有限元模型

Fig. 4 The finite element model of composite slab

表 1 灵敏度分析的修正参数取值

Tab. 1 The parameter of sensitivity analysis

修正参数	参数下限	参数上限	采样数	比例间距
弹性模量 $E$	$0.8E_0$	$1.5E_0$	15	线性平均
密度 $\rho$	$0.8\rho_0$	$1.5\rho_0$	15	线性平均
支座弹簧轴向刚度 $K_1$	$0.01 K_1$	$100 K_1$	15	对数平均
梁-板弹簧轴向刚度 $K_2$	$0.01 K_2$	$100 K_2$	15	对数平均
连接件弹簧轴向刚度 $K_3$	$0.01 K_3$	$100 K_3$	15	对数平均

模型的连接单元根据连接的具体对象不同分为：梁-支座连接单元、梁-板连接单元和连接件连接单元。前两种连接单元采用竖向弹簧-阻尼单元进行模拟，通过定义弹簧轴向刚度和侧向刚度来考虑不同的连接情况。连接件连接单元采用水平 X 和 Y 两个方向的弹簧-阻尼单元进行模拟，如图 3 所示。连接件中的弹簧-阻尼单元只考虑弹簧的轴向刚度。横向支撑槽钢均采用 Beam 单元。用 Strand7 软件建立的组合板有限元模型如图 4 所示。

## 4 钢-混凝土组合板的模型修正

### 4.1 修正参数的灵敏度分析

本次选取了钢-混凝土组合板的 5 个物理参数，分别利用静动力试验数据进行灵敏度分析。待修正参数的取值上下限和采样个数见表 1，表中参考状态下，支座弹簧轴向刚度  $K_1=200\text{kN/mm}$ ，梁-板弹簧轴向刚度取  $K_2=100\text{kN/mm}$ ，连接件弹簧轴向刚度  $K_3=100\text{kN/mm}$ 。

采用静力数据进行灵敏度分析时，目标函数如式(3)所示，在组合板的 3 根主梁上各选取 5 个均布实测点位移，共 15 个点的位移数据参与构建静力目标函数。动力数据灵敏度分析的目标函数如式(4)所示，剔除有限元分析中 MAC 值较小的模态后，选择 1、2、3、5、7 阶模态构建灵敏度分析过程中的目标函数。

对比基于静力数据和动力数据的灵敏度分析结果可知：静力数据构成的目标函数对混凝土弹性模量的变化十分敏感，但对于其他参数的变化则不太敏感；动力数据对梁-板弹簧轴向刚度不太敏感，而对其他 4 个参数都比较敏感。

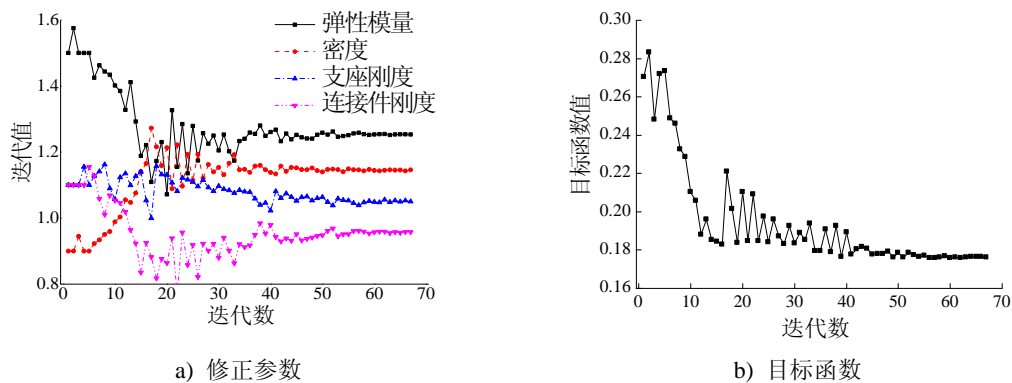


图 5 基于动力数据的多参数模型修正

Fig. 5 The multi-parameter model correction based on dynamic data

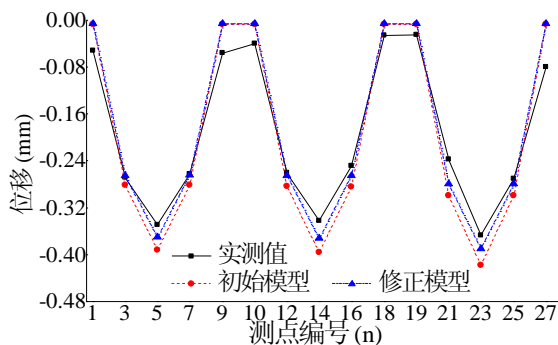


图 6 模型修正前后的均布荷载位移

Fig.6 Uniformly distributed load displacement of before and after model updating

表 2 模型校验前后的模态数据

Tab. 2 The model data of before and after model updating

阶数	实测		初始模型		修正模型		
	频率(Hz)	频率(Hz)	频率差值(%)	MAC 值	频率(Hz)	频率差值(%)	MAC 值
1	24.78	23.67	-4.48	0.966	24.68	-0.40	0.977
2	31.26	31.30	0.13	0.959	30.79	-1.51	0.964
3	56.77	62.16	9.49	0.503	59.37	4.91	0.612
5	82.68	76.20	-7.84	0.870	78.55	-4.99	0.919
7	120.01	114.42	-4.66	0.755	122.52	2.09	0.788

165

## 170 4.2 参考状态下的模型修正

综合灵敏度分析结果选择混凝土弹性模量、混凝土密度、支座弹簧轴向刚度和连接件弹簧轴向刚度 4 个参数进行参考状态下的模型修正。修正参数的初始赋值和灵敏度分析的初始值相同。模型修正过程采用笔者团队开发的 Strand7 -Matlab API 交互访问的模型修正方法。

175 因通过分析动、静力修正结果，发现静力数据的分析结果对除混凝土弹性模量外的其它参数变化并不敏感，因此采用动力修正的参数比例系数结果，作为最终修正模型的参数值。图 5 是基于动力测试数据的多参数模型迭代结果，修正过程中模型参数的初值和迭代后的收敛值如表 2 所示。

180 图 6 是对修正后模型施加均布集中力荷载的静力解与砝码加载实测位移进行对比。对修正后的模型进行模态工况分析，得到修正模型的频率和振型。整理模型修正前后的模态分析结果以及动力测试试验值如表 所示。结果显示修正模型的静动力分析结果相对于初始模型得到了较大地改善，这说明基于应用程序交互式访问的模型修正方法能够成功地对模型参数进行修正。

### 4.3 损伤状态下的模型修正

185 损伤函数采用 Teughels [26]提出的表达式。它被用来产生一系列光滑分布的模型物理特性，修正参数为因子通过损伤函数与之相乘，可用一维形函数来计算(式 7)。

$$N_1^e(x_1) = \frac{1-x_1}{2}; N_2^e(x_1) = \frac{1+x_1}{2} \quad (7)$$

其中:  $-1 \leq x_1 \leq 1$ ,  $\max|N_2^e(x_1)| = 1$

190 在损伤诊断中，它被后处理地映射到“损伤单元”上，被定义为一系列有限元模型的相邻单元，通过相邻节点连接。连接参数  $a^e$  对于每个有限单元被确定为整体损伤函数  $N_i$  的线性组合，其计算公式如式(8)所示。

$$a^e = \sum_{i=1}^{n_i} p_i N_i(x^e) \quad (8)$$

195  $n_i$  为损伤函数  $N_i$  的数量， $p_i$  为它们之间的相乘因子， $x_e$  为单元  $e$  的中心点坐标。未损伤状态的初始参数为杨氏模量  $E_0 = 4.31 \times 10^4 \text{MPa}$  表示，结构的惯性矩被选为原始截面特性，弹性模量为待修正参数，如式(9)所示，连接参数  $N_i$  位于 0 到 1 之间：

$$E^e = (1 - a^e) E_0 \quad (9)$$

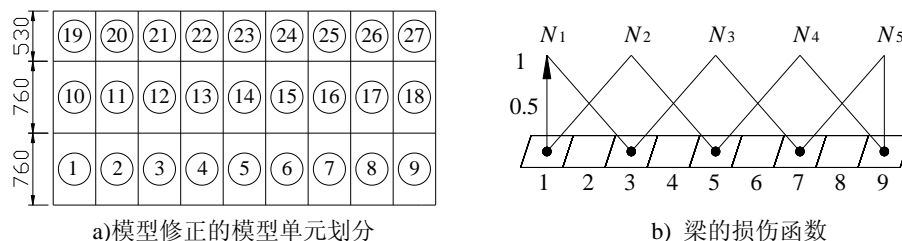


图 7 单元划分和损伤函数

Fig. 7 The element division and damage function

200 钢-混凝土组合板 3 根钢梁的处理方法是：在软件 Strand7 中，将每根钢梁划分为 9 个区域，如图 7(a)所示；每根梁又划分出 5 个损伤单元域，如图 7(b)所示。每个损伤单元域的形函数为一个三角形函数，避免在识别过程中相邻的物理参数产生较大的离散和偏差。每根梁的待识别参数为 5 个。

205 每根梁  $n$  个区域的连接参数，可以利用其形函数矩阵和损伤因子向量两者相乘得到，计算公式如式(11)所示。针对本文中每根梁划分为 9 个区域的情况，式(10)可以写成式(11)的形式。

$$\{a\}_{n \times 1} = [N]_{n \times n_i} \{P\}_{n_i \times 1} \quad (10)$$

$$\begin{Bmatrix} a^1 \\ a^2 \\ \vdots \\ a^9 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1(x^1) & N_2(x^1) & N_3(x^1) & N_4(x^1) & N_5(x^1) \\ N_1(x^2) & N_2(x^2) & N_3(x^2) & N_4(x^2) & N_5(x^2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ N_1(x^9) & N_2(x^9) & N_3(x^9) & N_4(x^9) & N_5(x^9) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

210 每个单元区域的损伤函数值可以由形函数确定，只要求解出  $p_i$ ，则能够确定出每个单元区域的连接参数，即得到每个单元区域的刚度退化系数。本文仅利用动力数据进行钢-混凝土组合板的损伤状态模型修正。图 8 为钢-混凝土组合板结构经过模型修正得到的刚度退化曲线，钢-混凝土组合板模型修正后各阶模态参数与试验测试结果的比较详见表 3。

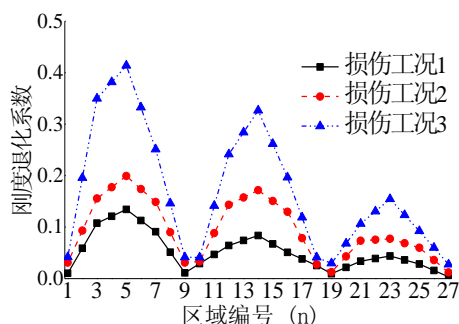


图 8 钢-混凝土组合板的刚度退化曲线

Fig. 8 The stiffness degradation curve of steel-concrete composite slab

表 3 模态识别结果与试验结果比较

Tab. 3 The compare of modal identification and test data

模态参数	损伤工况 1		损伤工况 2		损伤工况 3	
	试验	修正	试验	修正	试验	修正
频率/Hz	24.57	24.34	22.17	21.85	19.15	18.79
1 阶 误差/%	—	0.90	—	1.44	—	1.87
MAC	—	0.96	—	0.97	—	0.93
频率/Hz	31.09	31.65	30.90	31.42	28.46	29.28
2 阶 误差/%	—	1.81	—	1.68	—	2.88
MAC	—	0.96	—	0.94	—	0.91
频率/Hz	57.56	60.36	55.24	59.78	53.70	58.93
误差/%	—	4.86	—	8.21	—	9.74
MAC	—	0.63	—	0.59	—	0.61
频率/Hz	83.09	78.11	80.02	76.43	79.74	75.86
3 阶 误差/%	—	5.99	—	4.49	—	4.87
MAC	—	0.91	—	0.89	—	0.83
频率/Hz	121.13	122.09	119.56	121.43	117.25	120.85
误差/%	—	0.79	—	1.56	—	3.07
MAC	—	0.79	—	0.78	—	0.75

由表 3 的结果可知，钢-混凝土组合板在 3 种损伤工况下的修正模型能够很好地匹配结构的试验模型。结构随着损伤的增大，刚度退化越来越大。在同一损伤状态下，梁 1 的刚度退化最大，梁 3 的刚度退化最小，这与文献[10]中静载试验过程中裂缝发展的趋势是一致的。在线弹性损伤工况下，刚度退化系数最大出现在梁 1 的 5 号区域，其值为 13.4%。破坏状态下，混凝土的最大刚度退化系数为 41.4%。

## 5 结论

本文是在试验研究的基础上，采用创新的有限元软件 Strand7 和 Matlab 应用程序的 API 交互访问技术，对一块钢-混凝土组合板结构进行有限元模型修正和刚度退化的损伤识别，得到以下结论：

1) 通过参数灵敏度分析发现：静力数据对混凝土的弹性模量较为敏感，对其他物理参数的敏感性较差。而动力数据能够全面地检验结构的弹性模量、密度和支座刚度等物理参数，



其修正结果较静力修正的结果更为可信。

- 230        2) 通过与试验结果对比, 可知校验后的模型相对于初始模型有了明显地改善。  
      3) 基于 Teughels 提出的损伤函数, 对钢-混凝土组合板进行损伤状态下的混凝土刚度退化识别研究。其结果表明钢-混凝土组合结构开裂时混凝土刚度下降 13.4%, 破坏状态下的刚度下降为 41.4%。

## 235 [参考文献] (References)

- [1] 刘丽思. 多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥受力特性及试验研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院,2013,1-16.
- [2] 聂建国, 沈聚敏. 钢-混凝土简支组合梁变形计算的一般公式[J]. 工程力学. 1994,11(1):21-27.
- 240 [3] 聂建国, 王宇航. 混凝土翼板完全断开的钢-混凝土组合梁弹性刚度分析[J]. 土木工程学报,2010,43(7):1-13.
- [4] 李法雄, 聂建国. 钢-混凝土组合梁剪力滞效应弹性解析解[J]. 工程力学,2011,28(9):1-8.
- [5] NIE Jian-guo, MA Xiao-wei, WEN Ling-yan. Experimental and numerical investigation of steel-concrete composite waffle slab behavior[J]. Journal of Structure Engineering. 2015,141(2):1-13.
- 245 [6] 余志武, 蒋丽忠, 李佳. 集中荷载作用下钢-混凝土组合梁界面滑移及变形[J]. 土木工程学报,2003,36(8):1-6.
- [7] 宗周红, D. Z. Huang, T. L. Wang. 钢-混凝土组合桥损伤诊断[J]. 土木工程学报,2004,37(5):59-64,69.
- [8] 孙杰. 基于多模态参数的桥梁结构的损伤识别方法的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学交通学,2013:8-20.
- [9] 宗周红, 牛杰, 王浩. 基于模型确认的结构概率损伤识别方法研究进展[J]. 土木工程学报,2012,45(8):121-130.
- 250 [10] 蒋运忠. 基于分片结构综合的桥梁结构识别理论与试验研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院,2015:87-102.
- [11] Doebling S W, Farrar C R, Aktan A E, et al. The state of the art in structural identification of constructed facilities[R]. A draft report by the ASCE committee on structural identification of constructed facilities, 2000.
- [12] Hart G.C. and Yao J. T. P. System identification in structural dynamics [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division,1977,103(6):1089-1104.
- 255 [13] Liu S C, Yao J. T. P. Structural identification concept[J]. ASCE Journal of the Structural Division, 1978, 104(12): 1845-1858.
- [14] ASCE. Structural identification of constructed systems: A state-of-the-art report[R]. Reston, Va: American society of civil engineers, ASCE-SEI Structural identification of constructed systems committee, 2011.
- 260 [15] Clough R, Penzien J. Dynamics of structure[M]. Berkeley: McGraw-Hill Book Co., 1975:175-176.
- [16] Raghavendrchar M, Aktan A E. Flexibility by multireference impact. testing for bridge diagnostics[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(8):2186-2203.
- [17] Pandey A K, Biswas M. Damage detection in structures using changes in flexibility[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169(1):3-17.
- 265 [18] Zhao J, Dewolf T J. Sensitivity study for vibration parameters used in damage detection[J]. Journal of Structural Engineering, 1999,125(4):410-416.
- [19] 周云, 蒋运忠, 易伟建 等. 基于模态柔度理论的结构损伤诊断试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(5):36-45.
- [20] Allemang R J, Brown D L. A Unified Matrix Polynomial Approach to Modal Identification[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 211(3): 301-322.
- 270 [21] Zhou Y, Prader J, Weidner J, et al. Structural Identification of a Deteriorated Reinforced Concrete Bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(5):774-787.
- [22] 谢利民. 基于模态柔度的钢筋混凝土结构损伤识别理论与试验研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院,2014,2-7.
- 275 [23] 张纯, 宋固全, 吴光宇. 实测模态和结构模型同步修正的结构损伤识别方法[J]. 振动与冲击,2010,29(9):1-4.
- [24] 尹涛, 余岭, 朱宏平. 一种基于模型修正的结构损伤识别方法[J]. 振动与冲击,2007,26(6):59-66.
- [25] 周云, 谢利民, 蒋运忠 等. 多模型结构识别方法及在混凝土连续梁的应用[J]. 地震工程与工程振动,2015,35(3):1-9.
- 280 [26] Teughels A, Maeck J, Roeck G D. Damage assessment by FE model updating using damage functions[J]. Journal of Computers & Structures, 2002, 80(25):1869-1879.