

文章编号: 1000-1301(2007)01-0117-08

基于高阶局部模态的弹性地基上框架 结构物理参数识别研究

易伟建, 周云

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 利用框架结构的整体振动模态信息进行局部损伤的判别具有明显的局限性。高阶模态逐渐被人们认识并用来进行局部物理参数识别并用来进行损伤判别。本文以弹性地基上独立基础的框架结构底层柱为研究对象, 利用增加的质量块对柱子进行局部损伤的制造, 利用脉冲锤击法和激振器扫频实验进行高阶模态对比测试, 利用 PolyMAX 模态分析方法进行损伤前后高阶模态的识别, 发现了“高灵敏度高阶模态”的存在。最后通过两端约束 Euler 梁的计算模型, 通过高阶模态来识别物理参数以及地基参数, 其中物理参数结果具有较好的可靠性。

关键词: 高阶局部模态; 土-结构动力相互作用; PolyMAX 方法; 损伤诊断; 参数识别

中图分类号: TU 317+.1 **文献标识码:** A

Research on physical parameter identification of concrete frame structure on elastic foundation based on higher modes

Yi Weijian, Zhou Yun

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract Using the global modal information of a frame to diagnose local damage has obvious limits. The higher modes were recognized and used to identify the local physical parameters and to diagnose the damage. Based on the research on the column of the first story with isolated footing, the additional mass was used to cause the damage, the hammer impact method and the sweeping frequency by using vibrator were used to measure contrastively. The PolyMAX modal analysis method was used to identify the modal parameters and the "high sensitive higher modes" were found. Finally, the Euler beam model with two ends constrained were used as the calculating model. The higher modes were used to identify the physical parameters and the foundation parameters and the physical parameters have high reliability.

Key words high local mode; the soil structure interaction; PolyMAX method; damage diagnosis; parameter identification

引言

利用动力测试方法进行结构的物理参数识别及损伤诊断国内外有着大量的研究。Cawley^[1]等最早利用特征值进行结构物理参数的识别。通常利用频率和振型的信息进行结构的损伤诊断研究有着一定的局限

收稿日期: 2006-10-20 修订日期: 2006-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50378034); 教育部博士点基金项目 (20030532020)

作者简介: 易伟建 (1954-), 男, 教授, 主要从事混凝土基本理论与损伤诊断研究。

性,特别是对于大型结构,结构整体模态信息对构件级局部损伤不敏感,因此直接利用局部激励进行局部高阶模态测试有着较强的工程背景和广阔的应用前景。

在位移整体模态对局部损伤不敏感的情况下,人们又利用各种方法和指标进行损伤识别。G. C. Yao^[2]用损伤前后应变模态变化对钢框架结构进行损伤诊断研究。Pendey^[3-4]提出利用振型曲率和柔度矩阵进行损伤诊断。Chen^[5]提出利用模态应变能、Shi^[6]用模态应变能的变化来诊断损伤。以上的各种指标均须对结构整体进行测试及动力学分析,对于大型结构诊断而言有明显的局限性。

力学系统的振动模态局部化现象一直受到人们极大的关注,如对斜拉桥的拉索进行动力测试来诊断拉索的索力。沈浩等^[7]指出模态局部化通常发生在周期结构中,它们是由完全相同的子结构组成的,如循环对称结构、连续梁以及通信天线等大型空间桁架结构,理想周期结构存在破坏周期性的缺陷时就容易发生模态局部化现象。国内外许多学者对土木工程中结构的高阶局部模态进行了研究。Pierre^[8]从理论和实践上对不等跨连续梁进行了研究,发展一种摄动方法使获得较强的局部振动不需要整体特征值分析。Bendiksen^[9]指出打破周期性的失调能导致结构振型幅值局部变化剧烈,研究发现模态局部化往往集中在大型弱耦合结构中。Comwell^[10]对空间反射镜的局部模态进行研究。李国强等^[11]利用两端带弹簧的 Euler梁的计算模型进行了钢框架中钢梁和混凝土柱的局部振动研究并识别了结构物理参数和边界条件。徐丽^[12-13]对框架结构进行了物理参数识别,并基于最大能量的高阶模态选择进行框架结构局部损伤的物理参数识别。G. Z. Qi^[14]等对一钢框架桥局部构件在不同损伤程度下整体振动与局部振动特性进行了对比,验证了高阶模态比低阶模态对于局部损伤更加灵敏。

本文对一弹性地基上框架结构进行了整体脉冲锤击实验和底层框架柱局部激振实验,用 PolyMAX方法对传递函数的高阶部分进行模态参数提取,分析得到“高灵敏度高阶模态”。把局部激励模态与框架整体振动模态相结合进行分析比较,并利用两端带转角的 Euler梁的计算模型,识别结构物理参数及地基参数,说明高阶模态具有局部特性,低阶模态具有整体特性,局部的物理参数变化主要影响高阶模态。

1 弹性地基上框架结构的局部激振实验

1.1 实验模型

实验模型为 4层 1跨 2开间钢筋混凝土框架结构结构模型(如图 1),模型的比例为 1:3。框架结构底层层高为 1.333 m,2~4层层高为 1m。框架模型的基础为 $L \times B \times H = 0.6\text{m} \times 0.6\text{m} \times 0.06\text{m}$ 的柱下独立板式埋置基础。柱尺寸为 $133\text{mm} \times 133\text{mm}$,楼板厚度为 30mm。框架模型的梁、柱、板的受力钢筋为 I级,设计混凝土强度为 C25。

实验在湖南大学结构试验室试验土槽中进行。挖方土槽深度为 1.2m,填土深度为 1.10m,填土类型为粉质粘土,按照每层 20cm~30cm 分层夯实。环刀测试地基密度为 1.9652kg/m^3 ,含水率为 18.85%。用承载板法选择 10个点测得的地基弹性模量为 48MPa 。利用 TSZ-30B 土工三轴压力实验系统,测定 $\Phi 391\text{mm}$ 原状土试样在周围压力 σ_3 作用下总抗剪强度,测定 $C = 55.8137\text{kPa}$ $\varphi = 8.519^\circ$ 。地基动特性的测试采用瞬态脉冲激振方法^[15]。通过混凝土立方体试块抗压强度和回弹法测试强度综合评价,计算混凝土的弹性模量如表 2所示。

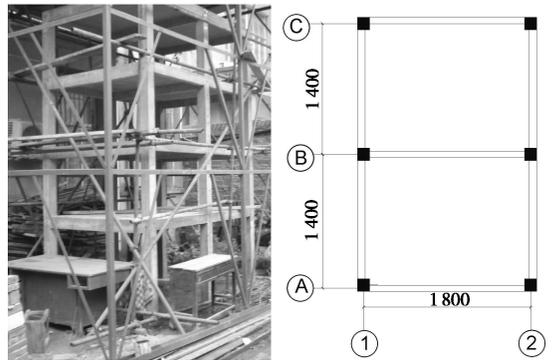


图 1 地基上混凝土框架模型及梁板平面图
Fig 1 Plan and model of frame structure on elastic foundation

表 1 地基动特性指标

Table 1 Dynamic character indexes of foundation

地基指标	取值
瑞雷波波速 v_R	145.54 m/s
横波波速 $v_s = \xi_2 v_R$	156.88 m/s
动剪模量 $G_d = \rho v_s^2$	4.837 eN/m ²
动弹模量 $E_d = 2(1+\nu)\rho v_s^2$	1.258 e8 kN/m ²

表 2 混凝土弹性模量值 ($\times 10^9\text{N/m}^2$)

Table 2 Elastic modulus of concrete ($\times 10^9\text{N/m}^2$)

层数	第一层	第二层	第三层	第四层
弹性模量	3.265	3.148	3.199	2.857

1.2 振动测试

首先对底层②-③轴线上的框架柱进行脉冲锤击法实验, 利用美国 PCB 力锤, 加速度信号由 626A 12 型 PCB 系列传感器采集, 利用 DP-730 信号分析仪进行实验数据结果采集。采用频率设置为 500 Hz, 将 1 m 柱分为 5 段, 1.333 m 柱分成 6 段, 进行了整列框架柱的脉冲锤击法模态实验研究, 柱子上面共有 22 个点激励点, 地地板对称位置有 2 个激励点。

高阶模态研究对象为②-③轴线底层柱, 激振器作用于图 2 中第 11 点, 利用正弦扫频激励, 加速度传感器在②-④点进行拾振, ⑧-⑭点还利用 PCB740B02 压电式应变传感器拾振以测试应变模态。其中②、③、④点位于第二、三、四层中柱中点, 以分辨②-③轴线各层柱与底层柱振动的关系。另外利用⑤、⑥点拾振 A、C 轴线上底层柱, 以分辨三榀框架在各自平面内振动模态是否一致。

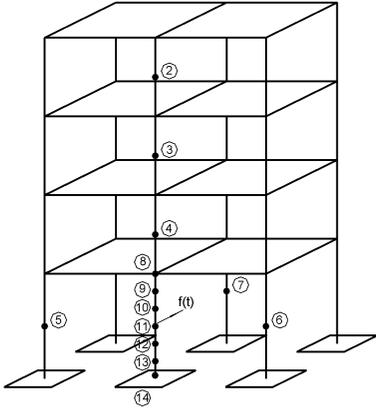


图 2 局部激励传感器位置布置图

Fig 2 Placement of transducers with local exciting



图 3 由钢板引起的损伤

Fig 3 Damage caused by steel plate

1.3 损伤的形成以及框架局部损伤的灵敏度

为了解高阶局部模态对局部损伤的敏感性, 在框架结构中形成局部损伤。对中框架底层局部单元框架柱第 2 单元(⑧-⑨点之间)增加质量, 形成局部损伤, 利用两块 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.015\text{ m}$ 的钢板用螺栓紧固于框架柱上(如图 3), $\Delta M = 9.36\text{ kg}$ 该质量大小正好与底层柱单元质量大小一致。以上均进行了损伤前和损伤后两种情况的测试, 以了解高阶模态对损伤的灵敏度。形成损伤的目的是使结构失调, 以挑选出对于局部损伤敏感的局部模态。

1.4 模态参数识别方法

本文的模态参数识别均利用 IMS 公司最新推出的 IMS Test Lab 中模态分析软件中 PolyMAX 模态识别方法, 也称为多参考点最小二乘复频域法 (Polyreference least square complex frequency domain method)^[16]。其识别步骤首先建立稳态图, 以判定真实的模态频率、阻尼和参预因子, 通过建立可以线性化的直交矩阵分式模型, 然后基于正则方程消去系数 β_0 , 以缩减最小二乘问题, 其余的分母多项式系数可通过求解下列最小二乘问题来得出。它对模态重叠较严重的高阶和大阻尼系统, 或者 FRF 数据受到严重的噪声污染的情况, 都能给出清晰的稳态图, 因此可以识别高密度密集模态。对于本例框架结构中整体振动频率均位于 100 Hz 以下的情况, 分析主要针对于 100 Hz ~ 500 Hz 的情况。

2 高阶局部实验模态分析

2.1 损伤前后整体模态的比较

由表 3 可见, 利用实测得到的损伤前后整体振动四阶频率值比较, 局部的损伤使前后两阶频率阻尼值基本无变化。由图 4 可见, 振型值在第二阶和第三阶有较小的改变, 因此整体振动的模态值难以进行局部构件局部损伤的判别。

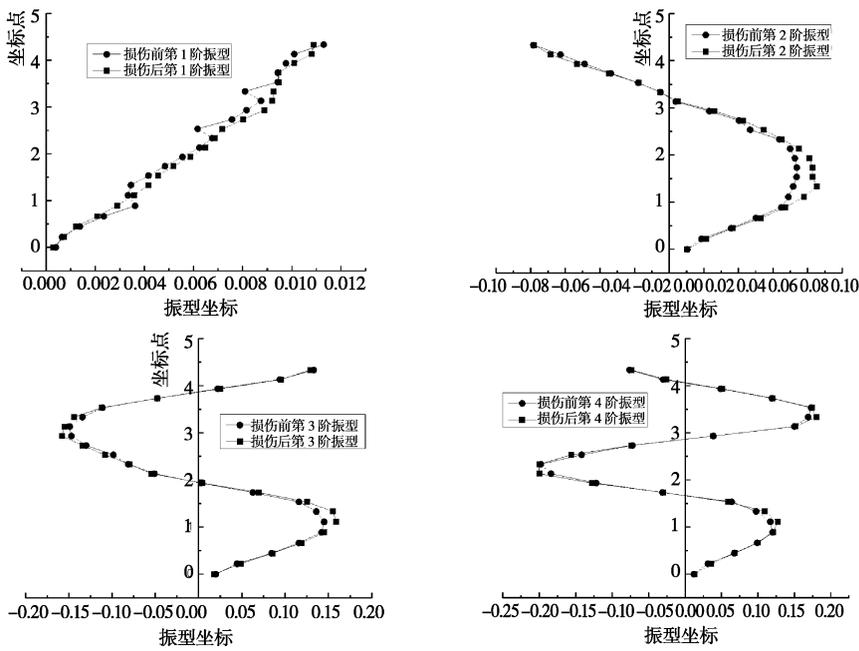


图 4 损伤前后四阶整体模态比较

Fig 4 Comparison of first four global modes before and after damage

2.2 高阶模态参数识别

图 5和图 6为损伤前后用脉冲锤击法测试集总传递函数用 PolyMAX 进行模态提取的稳态图。稳态图中, *o*表示未找到极点; *j*表示在给定精度内频率稳定; *v*表示频率和模态参与因子稳定; *d*表示频率和阻尼稳定; *s*表示 3种参数全部稳定。PolyMAX 强大的分析功能可分析出尽可能多的模态值, 因此给出的稳态图中可能存在虚假模态, 对于该种模态值的剔除, 主要依据模态指示函数 (MIF), 模态指示函数所依据的事实是在纯模态情况下, 在共振频率处结构的谐波响应滞后激励力 90° 。另外利用模态置信准则 (MAC) 矩阵, 不同模态的两个向量之 MAC 值一般比较小^[17]。利用 MIF 值和 MAC 值可以进行虚假模态剔除。

由图中可见高阶模态分别集中于若干区域, 每一个区域集中了大致三阶振型, 这与测试方向三榀框架, 每榀框架是柱下独立基础的基础条件不同有关。对于连续梁的振动分析可知, 多跨连续梁固有频率表现出按照单跨梁振动模态密集成组分布的特点, 固有频率密集分布的区间称为“模态密集区”, 在模态密集区, 固有频率数目一般与连续梁的跨数相等。结构各连接梁柱分别出现一个正弦半波称为“第一模态密集区”, 其余的依次称为“第二密集区”、“第三密集区”等等。根据振型表现出来的现象, 本文图 5、图 6中第一~第四区均属于“第一模态密集区”, 第五区以上属于“第二模态密集区”, 本文针对高阶模态研究主要集中于 500 Hz 以前, 高阶的“模态密集区”没有进行测试。

由图中可见高阶模态分别集中于若干区域, 每一个区域集中了大致三阶振型, 这与测试方向三榀框架, 每榀框架是柱下独立基础的基础条件不同有关。对于连续梁的振动分析可知, 多跨连续梁固有频率表现出按照单跨梁振动模态密集成组分布的特点, 固有频率密集分布的区间称为“模态密集区”, 在模态密集区, 固有频率数目一般与连续梁的跨数相等。结构各连接梁柱分别出现一个正弦半波称为“第一模态密集区”, 其余的依次称为“第二密集区”、“第三密集区”等等。根据振型表现出来的现象, 本文图 5、图 6中第一~第四区均属于“第一模态密集区”, 第五区以上属于“第二模态密集区”, 本文针对高阶模态研究主要集中于 500 Hz 以前, 高阶的“模态密集区”没有进行测试。

表 3 损伤前后频率阻尼值

Table 3 frequencies and damping ratios before and after damage

浇注完成	第一层	第二层	第三层	第四层
损伤前频率	7.62	25.2	50.2	76.8
损伤后频率	7.62	25.1	50.1	76.8
频率变化值	0	0.397%	0.199%	0

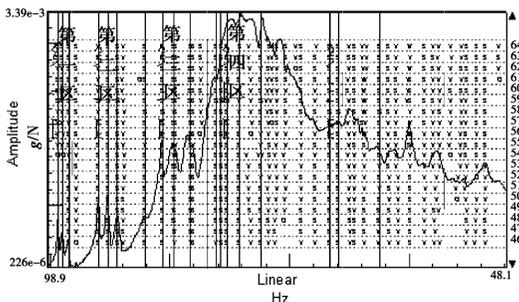


图 5 局部损伤前集总传递函数模态提取示意图

Fig 5 The stabilization diagram of assembled transfer function before damage

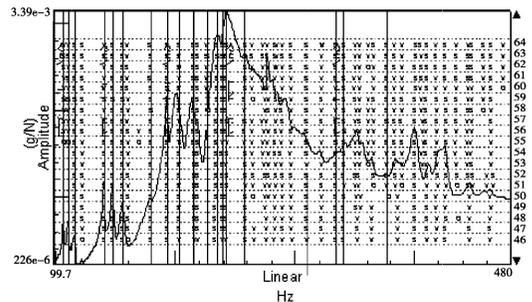


图 6 局部损伤后集总传递函数模态提取示意图

Fig 6 The stabilization diagram of assembled transfer function after damage

2.3 单榀局部模态判断

利用激振器进行的 11 点 ($f(t)$) 正弦扫频激振, ② ~ ⑭ 点拾振, 研究平面结构模态特性, 即图 1 中 A、B、C 三榀框架在某一阶频率处是否是同一响应水平或共同运动。对结构单榀局部模态的初步判别可从传递函数峰值上面进行, 结构的固有频率一般会出现在传递函数的峰值处, 因此传递函数峰值间接上可以比较两个点响应水平的大小。

⑪点和⑦点位于结构③轴线框架上, 在图 7 的高阶模态第四区 (如图 A 位置所示), 这一模态密集区峰值明显, ⑦点在该区的峰值示于 B 位置, 说明③榀框架底层两根柱在该密集区是共同运动, ⑪点的响应比⑦点大得多。而由图 8 可以看出, 对于不在同一榀框架上的⑪点和⑤、⑥点, 如图 8C 位置和 D 位置所示, D 位置在该处没有峰值, 因此可以认为第四区不包括相邻榀的局部振动。由于软件的限制, 功率谱和相关系数仅仅在响应接收点与激振点的, 无法比较⑤、⑥、⑦、⑪点之间的关系。所以使用传递函数来提供一种判断证据。

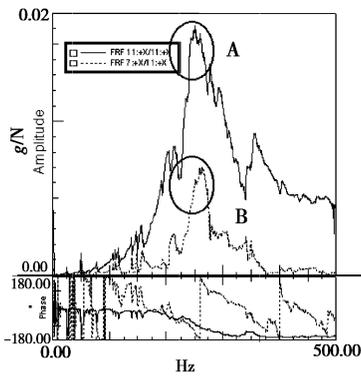


图 7 11 点、7 点频响应函数比较

Fig 7 Comparison of frequency response functions between point 11 and point 7

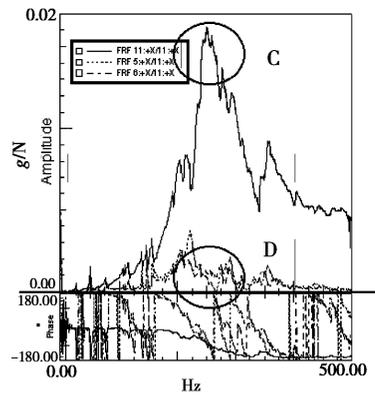


图 8 11 点、5 点、6 点频响应函数比较

Fig 8 Comparison of frequency response functions among Point 11, point 5 and point 6

2.4 高阶位移模态参数识别结果

对于框架底层柱, 通过位移模态和应变模态相互印证, 用 Polymax 分析在 100 ~ 500 Hz 分析得到了 15 阶振型。对于局部损伤而言, 可以发现如图 6 所示第四区的所有频率都有明显下降的现象, 频率比较值如表 4 所示, 频率变化率如图 9 和图 10 所示。而对于一、二、三、五区, 频率变化并不大。这说明对于局部损伤而言, 不一定每一阶高阶模态均对结构损伤敏感。高阶振型的变化如图 11 和图 12 所示, 对损伤敏感的第四区的位移模态局部振型变化显著, 局部的应变模态也有相应的变化。

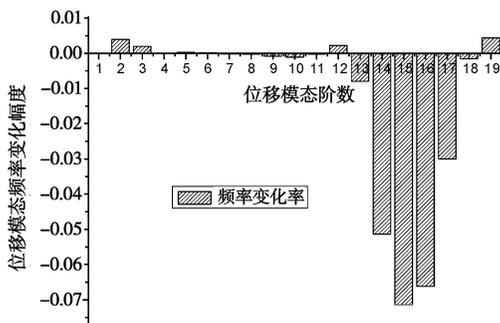


图 9 位移模态损伤后频率变化率

Fig 9 Changing ratios of the deflection modes before and after damage

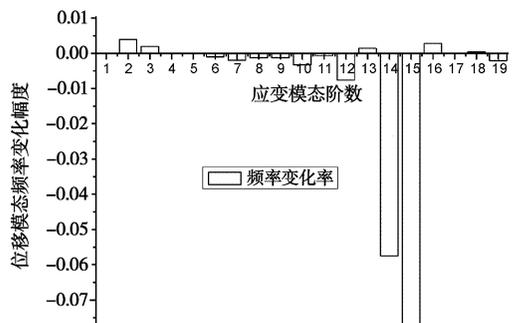


图 10 应变模态损伤后频率变化率

Fig 10 Changing ratios of the strain modes before and after damage

表 4 损伤前后高阶位移模态频率值对比表

Table 4 Comparison of higher modes frequencies before and after damage

阶数	第 5 阶	第 6 阶	第 7 阶	第 8 阶	第 9 阶	第 10 阶	第 11 阶	第 12 阶
损伤前	106.724	110.815	115.550	139.942	148.019	156.046	193.499	203.204
损伤后	106.751	110.823	115.524	139.905	147.902	155.876	193.441	203.658
变化值	0.025%	0.007%	-0.023%	-0.026%	-0.079%	-0.109%	-0.030%	0.223%
阶数	第 13 阶	第 14 阶	第 15 阶	第 16 阶	第 17 阶	第 18 阶	第 19 阶	/
损伤前	217.128	247.496	257.341	276.175	333.776	341.047	375.031	/
损伤后	215.403	234.807	238.958	257.907	333.686	340.509	376.696	/
变化值	-0.795%	-5.13%	7.143%	-6.615%	-0.027%	-0.158%	0.444%	/

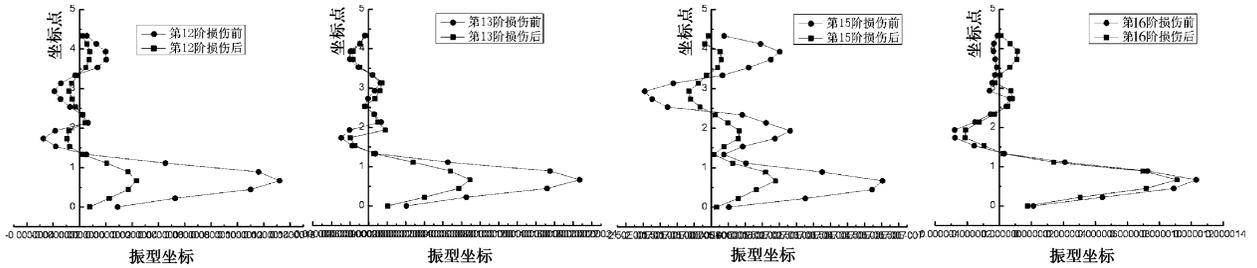


图 11 局部损伤前后位移模态变化

Fig. 11 Changing of the deflection modes before and after damage

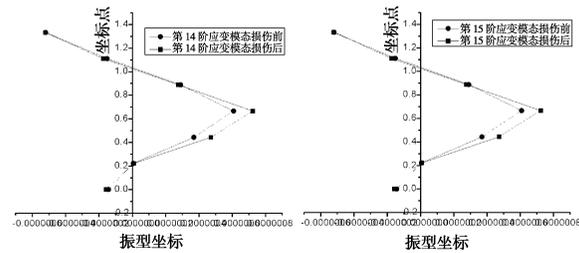


图 12 局部损伤后应变模态变化

Fig. 12 Changing of strain modes before and after damage

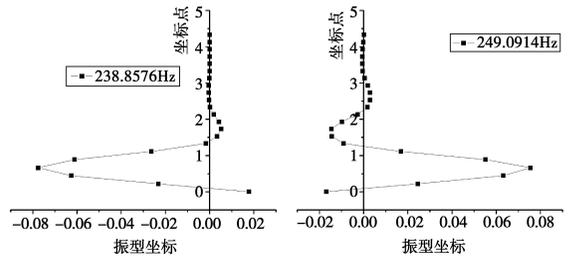


图 13 计算得到的底层高阶模态图

Fig. 13 Higher modal shapes by calculating

通过损伤变化前后频率和振型变化值的大小可以了解到, 大型结构中的单根杆件存在着对于结构局部损伤十分敏感的高阶模态, 对于本文中的情况 (底层柱质量增加) 的损伤, 高阶模态变化率最大的是整体平动模态的 18 倍, 振型幅值变化 2~3 倍, 因此频率和振幅值本身就是优良的损伤诊断的指标。

这种高阶模态集中于一个较小的区域 (图 5 和图 6 中的第四区), 其特征是高阶振型在该杆件上的振型幅值远大于与其相连杆件振型幅值的 3 倍以上, 而且楼板位置处结点振型幅值近似为 0 我们定义为“高灵敏度高阶模态”, 以区别于其它对损伤不甚敏感的高阶模态。用连续梁模型考虑, 与底层杆件的长度大于结构其它各层长度有关, 因此高阶振型相当突出。在实际的检测工作中对于构件级的损伤可以直接利用动力测试同类杆件, 寻找“高灵敏度高阶模态”来判别损伤。以下将对用高阶模态进行物理参数和边界条件识别进一步论述。

3 高阶模态的计算分析

3.1 实验计算模型确定

按图 14 所示模型进行高阶模态的计算, 该计算模型把空间三榀框架简化为平面框架, 楼板的质量集中于梁上, 边梁刚度取为 1.5I 中梁刚度取为 2I 梁合成刚度为 5I 柱合成刚度取为 3I 基础质量集中于底层柱底部, 结构共有 74 个单元, 72 个结点。

地基模型的选取本文利用文献 [18] 中的矩形埋置板阻抗函数模型。该模型动力阻抗地基刚度和阻尼系数是频率 $\omega = \omega B / N_s$ 的函数, 其值的大小并非一常数。埋置矩形基础的动力刚度如下所示, 水平、摇摆、水平摇摆组合阻抗分别为:

$$\bar{K}_{Hx}^d = K_{Hx}^s (G B, \nu L, e) (1 + i a_0 c) \quad (1)$$

$$\bar{K}_{Rx}^d = K_{Rx}^s (G B, \nu L, e a_0) (k + i a_0 c) \quad (2)$$

$$\bar{K}_{HR}^d = (e B) \bar{K}_{Hx}^d / \beta \quad (3)$$

其中 K^s 为埋置基础的静刚度, ω 为振动圆频率, L 和 B 为矩形基础长边和短边边长的一半, V_s 为土中的剪切波速, k 和 c 分别是反映基础动刚度和阻尼的系数。

图 13 为对应于局部损伤灵敏度最大的两阶模态 238 859 Hz 和 249 091 Hz 该两阶模态值与测试结果符合较好, 即高阶模态第四区中的模态值。弹性地基上框架与刚性地基上框架结构的 500 Hz 之前的高阶模态频率值比较如表 5 所示, 质量损伤情况也列其中, 从振型上看出该两阶模态表现为底层杆的局部振动, 这从理论上说明存在“高灵敏度高阶模态”。由于实际测试中三榀框架不一定是整体振动, 因此由三榀框架合并的计算模态值少于实测模态值, 第 8 ~ 11 阶模态值在测试中没有识别得到。

表 5 弹性地基框架与固定基础框架频率对比表

Table 5 Comparison of the frequencies on elastic foundation and on fixed base

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
弹性地基	8.72	31.07	55.95	78.97	238.86	249.09	397.21	412.61	416.84	440.15	455.81
质量损伤	8.71	30.89	55.69	78.83	230.04	246.48	397.21	412.51	416.83	440.14	455.21
固定地基	10.56	33.52	57.77	80.04	268.20	279.18	397.24	413.06	417.07	440.28	457.23

3.2 利用局部模态的参数识别

实际工程中对结构构件进行局部模态动力测试, 寻找到“高灵敏度高阶模态”, 直接利用该模态值进行局部物理参数识别和边界条件识别具有很大的工程意义。应该说明, 由于本实验条件有限, 只能识别出构件振动形式为第一阶的“高灵敏度高阶模态”, 激励位置如选择在非振型结点处, 第二、三……阶的“高灵敏度高阶模态”从理论上也能够相应识别出来。

对于局部构件的参数和边界条件识别, 本文将使用两端带约束的 Euler 梁为计算模型来进行分析如图 15 所示, 梁两端各有一个水平弹簧和一个转角弹簧, 底部的 k_x, k_h, k_{rh} 为公式 (1), (2), (3) 所示的地基阻抗参数, 三个值均只与地基剪切模量有关, 柱上部模拟为 k_x 和 k_k 两弹簧, 该两值的大小仅用来修正模型。当选用该模型两端固定时, 计算得到第一阶频率为 283 849 Hz

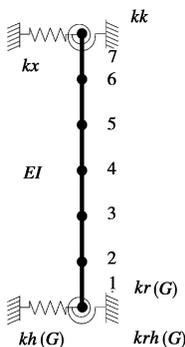


图 15 两端带约束的 Euler 梁模型

Fig 15 Euler beam model with two ends constrained

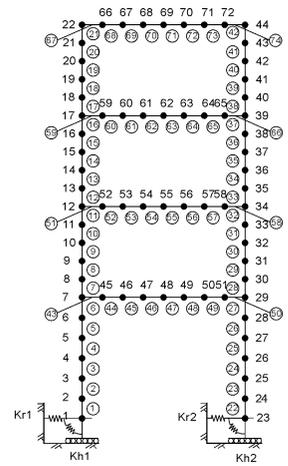


图 14 高阶模态计算模型

Fig 14 Calculating model of higher modes

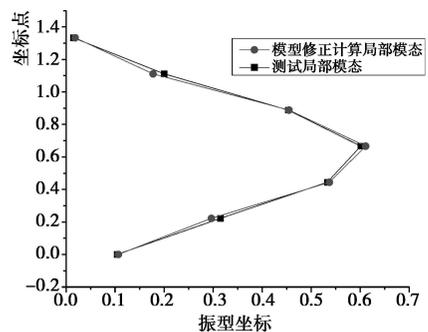


图 16 局部模态计算与实测比较

Fig 16 Comparison of calculated and measured local modes

以第 17 阶 257 341 Hz 的高阶模态振型为优化目标, 进行 G, E, k_k, k_x 的四个参数选择优化, 振型坐标有 7 个点外加频率值共 8 个待拟合值, 由灵敏度分析得到识别参数如表 6 所示, 振型的比较如图 16 所示, 可见拟合结果良好。从识别结果可以看出, 结构物理参数弹性模量值识别得比较准确, 但是地基剪切模量值则相

差比较远,因此用该方法进行边界条件识别时其值仅作为参考的依据。

计算得到的高阶模态频率值为 255 628 Hz,与计算结果吻合较好,可见在实际工程实践中,利用局部激励得到的“高灵敏度高阶模态”可以直接用来进行构件级的物理参数识别。

表 6 局部激励参数识别结果

识别参数	E	G	kk	kx
识别值	3.428e10	1.453e8	1.17e9	1.31e9

注:弹性模量和剪切模量单位为 N/m^2 ; kk 单位为 N/m ; kx 单位为 N/rad

4 结论

本文通过对一地基上混凝土框架结构进行底层柱的局部激励和脉冲锤击法模态测试,用增加质量块的方法来形成损伤,通过 PolyMAX 分析损伤前后结构的高阶模态,根据识别的高阶模态进行物理参数识别,得到的主要结论如下:

(1)高阶模态具有局部特性,低阶模态具有整体特性,局部的物理参数变化主要影响高阶模态。利用综合布点技术和位移模态和应变模态综合测试工作能够了解框架结构的局部模态特征信息,利用 PolyMAX 分析得到高阶模态以及通过传递函数分析框架平面运动特征,能够分析得到底层柱可信的高阶局部模态。

(2)框架结构的高阶模态分别集中于若干区域,每一个区域集中了若干阶振型,若干区域振型合称为一个“模态密集区”,“模态密集区”的阶数与框架单根杆件振动的正弦半波数一致。

(3)通过局部柱单元增加质量形成的损伤,发现存在对损伤十分敏感的“高灵敏度高阶模态”的存在,这种模态集中于一个小的区域,其特征是高阶振型在该杆件上的振型幅值远大于其它相连杆件振型幅值的 3 倍以上,其频率值和振型值就是很好的诊断损伤的指标。对于整体模态特征反应局部损伤不敏感的情况下,该类高阶模态具有较强的反映局部损伤的能力。

(4)有限元计算分析也证实了“高灵敏度高阶模态”的存在,用两端带弹簧的 Euler 梁为计算模型进行物理参数和地基参数识别,局部模态值与试验结果吻合良好,结构物理参数的识别结果具有较强的可靠性。

参考文献:

- [1] Cawley R, Adam S P D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies [J]. Journal of Strain analysis, 1979, 14(2): 49-57.
- [2] Yao G G, Chang K C and Lee G C. Damage diagnosis of steel frames using vibrational signature analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(9): 1946-1961.
- [3] Pandey A K, Biswas M and Samman M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes [J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2): 321-332.
- [4] Pandey A K, Biswas M. Damage detection in structures using changes in flexibility [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169(1): 3-17.
- [5] Jay-Ching Chen, John A Garba. On-orbit damage assessment for large space structures [J]. AIAA, 1988, 26(9): 1198-1126.
- [6] Shi Z Y, Law S S, Zhang L M. Structural damage detection from modal strain energy change [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(12): 1216-1223.
- [7] 沈浩,张若京.变质量密度简支梁的模态局部化[J].力学季刊,2004,25(1):118-123.
- [8] Christophe Piemontesi, Tang DeMa, Dowell Earl H. Localized vibrations of disordered multi-span beams: theory and experiment [J]. AIAA, 1987, 25(9): 1249-1257.
- [9] Oddvar O Bendiksen. Mode localization phenomena in large space structures [J]. AIAA, 1987, 25(9): 1241-1248.
- [10] Phillip J Cornwell, Oddvar O Bendiksen. Localization of vibrations in large space reflectors [J]. AIAA, 1989, 27(2): 219-226.
- [11] 李国强,李杰.工程结构动力检测理论与应用[M].北京:科学出版社,2002.
- [12] 徐丽,易伟建,吴高烈.混凝土框架结构参数的识别[J].地震工程与工程振动,2006,26(4):121-126.
- [13] 徐丽.基于模态参数的混凝土框架结构损伤诊断研究[D].[湖南大学博士学位论文].长沙:湖南大学,2004.
- [14] Qi G Z, Guo Xua, Qi Xiaozhai et al. Local measurement for structural health monitoring [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 4(1): 165-172.
- [15] 王杰贤.动力地基与基础[M].北京:科学出版社,2001.
- [16] Bart Peeters, Patrick Guillaume, Herman Van der Auweraer et al. Automotive and aerospace applications of the polyMAX modal parameter estimation method [C]. Proceedings of MAC 22 Dearborn MI USA, 2004.
- [17] 沃德·海伦,斯蒂芬·拉门兹,波尔·萨斯.模态分析理论与试验[M].北京:北京理工大学出版社,2001.
- [18] Pais A, Kausel E. Approximate formulas for dynamic stiffness of rigid foundations [J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 1988, 7(4): 213-227.