

文章编号:1674-2974(2015)05-0036-10

## 基于模态柔度理论的结构损伤诊断试验研究\*

周云<sup>†</sup>, 蒋运忠, 易伟建, 谢利民, 贾凡丁

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**利用多参考点脉冲锤击法的输入输出动力信号获取结构的模态柔度,可以对结构进行损伤识别,设计了一根钢筋混凝土简支梁和一块钢-混凝土组合板的静动力试验.对不同损伤状态下的简支梁和组合板进行了动力测试,得到其模态柔度矩阵,并用来预测结构在荷载作用下的位移.简支梁试验结果表明,随着损伤程度的加深,结构自振频率降低,阻尼比增大,柔度增大,但自振频率只能判断结构损伤的出现,模态柔度则能够综合全面地反映钢筋混凝土简支梁结构的损伤位置和损伤程度.组合板试验表明,在线弹性状态下,动力测试与静力测试获得的模态柔度矩阵相差很小.设计了支座刚度变化、连接件损伤和横向支撑破坏这3种损伤工况,并用这3种工况来模拟实际桥梁结构可能出现的损伤状况.通过对比结构损伤前后的模态柔度位移信息,成功实现了组合板的损伤识别.

**关键词:**多参考点脉冲锤击法;模态柔度;损伤识别;简支梁;组合结构

中图分类号:TU317.1;TU375.3

文献标识码:A

DOI:10.16339/j.cnki.hdxzbk.2015.05.006

## Experimental Research on Structural Damage Detection Based on Modal Flexibility Theory

ZHOU Yun<sup>†</sup>, JIANG Yun-zhong, YI Wei-jian, XIE Li-min, JIA Fan-ding

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

**Abstract:** The utilization of the input and output dynamic signals from multiple reference hammer impact method (MRIT) for modal flexibility extraction and structural damage identification was studied. Static and dynamic experiments on a Reinforced Concrete (RC) simply supported beam and a steel-concrete composite bridge deck were designed. MRIT was conducted on the simply supported beam and composite plate under different damage states, and modal flexibility was obtained in the test, which can be used to predict the displacement under applied loading. The beam test results demonstrated that the natural frequency decreased while the damping ratio and flexibility increased with the development of damage. Changes of natural frequency can only determine the existence of structural damage, while the changes of modal flexibility can indicate the damage location and damage degree of RC beam. Steel-concrete composite slab test results demonstrated that the differences between dynamic flexibility and static flexibility match well under the linear elastic state. Three damage cases were designed to simulate the damage situation on real bridges, which are the removal of cross diaphragm, changes of boundary condition and damage of connec-

\* 收稿日期:2014-08-01

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51208190), Youth Fund of National Natural Science Foundation Projects (51208190);湖南省自然科学基金青年基金资助项目(12JJ4053);高校博士点基金新教师基金资助项目(20120161120028);湖南大学青年教师成长计划资助项目

作者简介:周云(1979-),男,湖南长沙人,湖南大学副教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail:zhouyun05@126.com

tors. By comparing modal flexibility information before and after structural damage, the damage of steel-concrete composite slab was achieved.

**Key words:** multiple reference impact test; modal flexibility; damage identification; simply-supported beam; composite structures

结构识别是一门跨学科的综合研究领域,自20世纪70年代以来一直处于热门研究中.2011年,Catbas等<sup>[1]</sup>正式提出了结构识别六步圆:1)观察和概念;2)先验模型;3)控制实验;4)数据分析与阐述;5)模型校验和参数识别;6)模型模拟预测.基于结构识别的损伤评估诊断方法是用来进行结构性能评估的先进技术手段,其核心内容是结构损伤识别.所谓损伤,主要是指结构系统中材料和几何特性的改变,包括边界条件和系统的连续性,影响着系统目前和未来的性能.Rytter<sup>[2]</sup>将结构损伤诊断分为4个层次:1)损伤的判定;2)损伤的定位;3)损伤的量化;4)结构剩余寿命预测.目前对于结构损伤诊断的研究主要停留在第1层次,对于第2、第3层次的损伤诊断大多存在于实验室状态,对于大型复杂结构的准确识别相对而言较少.

从1980年开始,Aktan和Brown等<sup>[3-8]</sup>利用多参考点脉冲锤击测试(MRIT)进行了一系列实验室和工程实际的桥梁试验,发现柔度以及柔度的变化能成为桥梁结构和性能评估的极好指标.Pandey和Biswas<sup>[9]</sup>提出了基于柔度矩阵差的结构损伤方法,研究表明柔度矩阵差对识别结构损伤的定位和严重程度非常有效.Allbright等<sup>[10]</sup>对预应力钢筋混凝土梁的模态柔度矩阵和静力柔度矩阵进行了比较.Zhao等<sup>[11]</sup>通过比较频率、振型和柔度的灵敏度,验证了柔度矩阵比频率和振型对结构损伤更加敏感.Catbas等<sup>[12]</sup>将模态柔度的应用进一步推广,阐述和验证实际模态试验获取模态柔度的方法.李永梅等<sup>[13]</sup>提出了基于柔度差曲率的结构损伤识别方法.

用于动力测试的外部激励方法包括偏心质量激励器测试,电动激励器测试,多参考点脉冲锤击激励(MRIT)<sup>[14]</sup>和步进式松弛激励等等.其中,MRIT能够得到重复性较好且质量较高的真实频率响应函数(FRF),并能够从FRF中识别得到模态质量,进一步获取结构的模态柔度.

目前,在国内的研究中,直接利用动力输入和输出信号获得结构的模态柔度从而进行结构损伤识别的研究还比较少,尤其是对于混凝土结构以及钢-混凝土组合结构在不同损伤状态下的损伤识别及其鲁棒性研究得较少.本文基于此进行了一根简支梁和一块钢-混凝土组合板在不同损伤工况下的脉冲

锤击法动力学实验,并对各因素造成的损伤利用模态柔度这一指标进行了识别.

## 1 模态柔度的计算方法

柔度的物理意义是单位力作用下的位移.静力柔度是通过静载试验或静力分析得到的柔度矩阵;而模态柔度是通过动力模态分析或模态试验获得的柔度矩阵.对于在线弹性状态下的结构而言,模态柔度与结构的静力柔度相等,相反,如果结构出现损伤,则静动力柔度之间会出现一定的差别.Clough等<sup>[15]</sup>率先提出了模态柔度的概念.Raghavendrachar等<sup>[16]</sup>将模态柔度引入MRIT桥梁动力测试中,并作为一个反映桥梁状态的有效指标.模态柔度的计算依赖于MRIT试验获取的动力模态参数,有2种方法能够计算模态柔度:1)基于圆频率和质量归一振型合成模态柔度(方法1);2)基于频率响应函数的截距提取模态柔度(方法2).

### 1.1 方法1

柔度矩阵可以利用测试结构的圆频率和质量归一的振型矩阵直接利用公式(1)计算.

$$f = \Phi \Omega \Phi^T. \quad (1)$$

式中: $f$ 为柔度矩阵; $\Phi$ 为质量归一的振型矩阵; $\Omega$ 为一对角矩阵为圆频率平方的倒数按照降序排列.

该方法的特点是,无论是利用前1阶,前2阶,……前 $n$ 阶振型,得到的柔度矩阵都为与识振自由度维数相等的方阵,计算得到的模态阶数越多,则结果越收敛到精确值.由于模态柔度与圆频率平方的倒数成正比,故低频模态的变化对柔度的变化最为敏感.值得强调的是,公式中的振型是利用质量归一的方法获取的,而实际上,很难精确地获得复杂结构的质量矩阵,因此该方法在理论形式上简洁,但在实际应用中有难度.

### 1.2 方法2

在有明确可测量的动力输入情况下,结构激励和响应在频域上表达为频响函数,模态质量系数可以直接从MRIT测量得到的频率响应函数中提取出来.在传统的结构动力信号的测试中,为了保证振动测试的高精度,常利用加速度传感器测试结构反应,因此测试得到的频响函数为“加速度导纳”,而要

计算模态柔度,则需要将“加速度导纳”转化为“位移导纳”。因此,在计算频响函数的过程中,需要在频域中除以 $(j\omega)^2$ 。但是应用中存在一个不容忽视的问题,当频率接近 0 时,加速度导纳频响函数除以 $(j\omega)^2$ 将会导致位移导纳趋于无穷大,而结构真实的位移导纳为一确定有限值。

针对上述病态问题,可采取复模态曲线拟合的方法,将多自由度体系拟合为多个单自由度体系。利用模态参数估计算法<sup>[17]</sup>,在 $\omega=0$ 处计算自由度  $p$  和  $q$  点的频响函数,得到<sup>[18]</sup>:

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

式中: $H_{pq}$ 为在第  $q$  点敲击第  $p$  点拾振动的频响函数; $\varphi_{pr}$ 和 $\varphi_{qr}$ 分别为第  $r$  阶模态在第  $p$  点和第  $q$  点的模态振型系数; $M_{Ar}$ 为第  $r$  阶模态的模态质量系数; $\lambda_r$ 为系统的极点, $\lambda_r = \sigma + j\omega$ , $\lambda_r^* = \sigma - j\omega$ 。

分别获取每个单自由度体系频响函数在频率为 0 处的截距,利用模态叠加法获得多自由度体系的模态柔度,则柔度矩阵可由下式表达:

$$f = \begin{bmatrix} f_{11} = H_{11}(\omega = 0) & \cdots & f_{1q} = H_{1q}(\omega = 0) \\ \vdots & & \vdots \\ f_{p1} = H_{p1}(\omega = 0) & \cdots & f_{pq} = H_{pq}(\omega = 0) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

该柔度矩阵同样为静力柔度矩阵的近似,需要利用多个模态进行截断处理。通常情况下,低阶模态对模态柔度贡献大,但当有足够的测试模态被识别时,则模态柔度趋近于静力柔度。

上述 2 种获取模态柔度方法的关键在于得到模态质量系数。只有在有确定的动力信号输入及相应输出的情况下,即通过 FRF 才能得到结构的模态质量,而 MRIT 又是获取 FRF 最方便快捷的途径,因此本文的研究都基于 MRIT 测试方法。

## 2 钢筋混凝土简支梁损伤识别研究

### 2.1 试验概况

国内外关于简支梁静动力试验的类似研究很多,刘纲等<sup>[19]</sup>利用损伤力影响线的拐点来识别静定梁结构的损伤部位,并通过影响线峰值直接识别单元损伤程度。但目前国内对于直接利用动力信号获得模态柔度从而诊断损伤的研究很少。本文通过对试验梁进行静力加载制造出不同程度的损伤工况,同时利用动力测试获取试验梁在各损伤工况下的模

态参数,从而研究模态柔度识别钢筋混凝土简支梁损伤的有效性。

试验对象为一根钢筋混凝土简支梁,其尺寸为 3 600 mm×150 mm×300 mm,采用 C30 混凝土。试验梁的截面尺寸和配筋如图 1 所示,中部为 900 mm 长的纯弯段,梁底布置 2 根直径 16 mm 的 HRB335 受力钢筋,纵筋配筋率为 0.89%。箍筋和架立筋为直径 8 mm 的 HPB300 钢筋,纯弯段两侧箍筋间距为 150 mm。

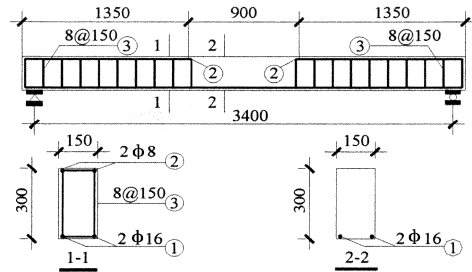


图 1 简支梁的截面尺寸和配筋(单位:mm)  
Fig.1 Section size and reinforcement layout of simply-supported beam(Unit; mm)

钢筋混凝土简支梁的静载试验装置和测点布置如图 2 所示。9 个均匀布置的机械式百分表被用来测量各级荷载作用下钢筋混凝土简支梁的挠曲变形,贴于梁顶的 1#~9#电阻应变片和等距分布于跨中梁侧的 10#~14#应变片,用来量测混凝土截面的应变,15#~16#应变片被用来测量纵筋中部的拉应变。

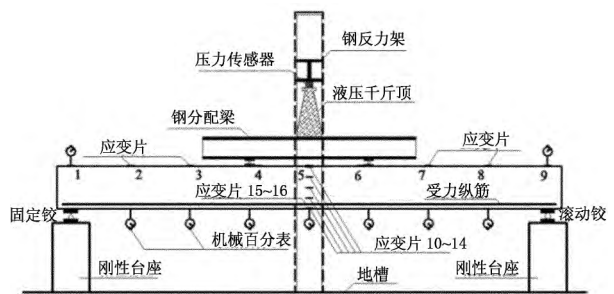


图 2 钢筋混凝土简支梁静载装置及测点布置  
Fig.2 Static loading device and instrumentation layout of RC simply-supported beam

### 2.2 有限元分析

在 ATENA 有限元软件建立简支梁的实体单元模型,采用力控制的两点对称加载,每个荷载步施加 0.5 kN。图 3 为 ATENA 分析得到的简支梁跨中荷载 挠度曲线以及梁的裂缝开展图和应力云图。初步定义的 5 个损伤工况对应的荷载分别为 6, 20, 35, 50 和 54 kN。

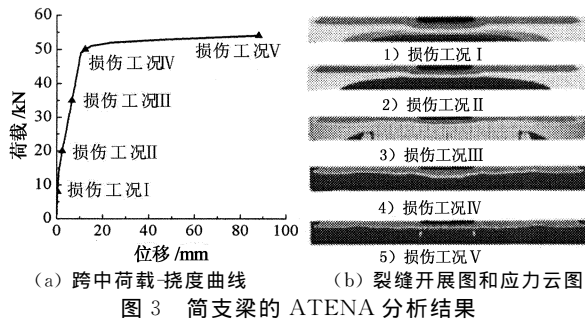


Fig. 3 ATENA analysis result of simply-supported beam

### 2.3 静载试验和损伤工况定义

根据有限元分析结果,对试验梁按不同等级进行加载,得到其荷载-挠度曲线如图 4(a)所示,其他测试结果具体见文献[20]. 简支梁呈现典型的适筋梁弯曲破坏,开裂前位移线性缓慢增长,其开裂荷载为 7 kN. 开裂后,应变及挠曲变形增长加快,裂缝向两侧对称发展,并出现贯通裂缝. 纵筋屈服对应荷载为 60 kN,此时简支梁裂缝分布趋于稳定,其挠度急剧增大以致肉眼可观察到明显的挠曲变形.

依据试验过程中所观测的裂缝开展、挠曲变形以及钢筋和混凝土的应变变化,将钢筋混凝土简支梁分为 5 个损伤工况,如图 4(b)和表 1 所示.

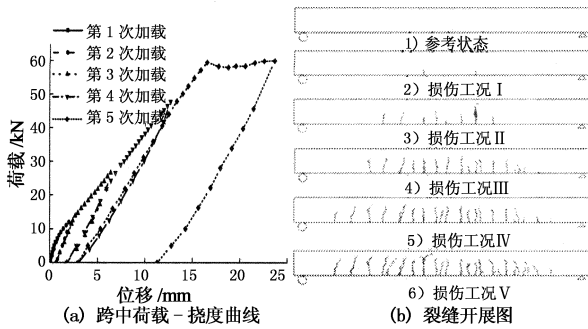


Fig. 4 Static test result of simply-supported beam

简支梁的静载试验和动力学模态试验交替进行,首先对未损伤的简支梁进行 MRIT 模态试验,作为后续各损伤工况的参考状态,然后静力加载至损伤工况 I,卸去载荷后对损伤试验梁进行模态测试,然后依次交替循环进行静动载试验,直至完成损伤工况 V 的动力学试验.

表 1 6 个动力测试工况  
Tab. 1 Six dynamic test cases

测试工况	荷载/kN	裂缝宽度/mm	损伤状况
参考状态	均布自重	0	完好
工况 I	7	0~0.1	微开裂
工况 II	12	0.1~0.4	轻度损伤
工况 III	27	0.5~0.9	中度损伤
工况 IV	48	1.0~1.5	严重损伤
工况 V	60	> 1.5	破坏状态

### 2.4 模态试验

采用 MRIT 对钢筋混凝土简支梁进行动载试验. 为了获得与静载位移对应的模态柔度位移结果,动力传感器的布置位置与静载位移计一致并置于梁上表面,其测点布置如图 2 所示. PCB-086D20 力锤用于提供脉冲力,9 个 KD1010L 加速度传感器用于拾取响应. 脉冲力和加速度信号均由 SignalCalc DP730 采集,采样频率设为 2 560 Hz,采样时间为 3.2 s.

通过脉冲锤击法测试得到简支梁加速度响应数据,并进行试验模态分析. 对力脉冲和响应信号分别添加矩形窗和指数窗以减少信号泄露,加窗后的时域信号进行点数为 8 192 的快速傅里叶变换. 然后基于 6 次信号频域平均获取自功率谱、互功率谱及相干函数,采用  $H_1$  算法进行频响函数估计. 最后利用复模态指示函数(CMIF)方法提取极点、留数和放大因子,识别得到结构模态参数信息.

在力锤脉冲激励作用下,试验梁的加速度响应幅有较大的信噪比,其加速度导纳频响函数峰值明显. 以钢筋混凝土简支梁的参考状态为研究对象,对第 3 点和第 5 点的加速度导纳频响函数进行互易性检验,图 5(a)显示出较好的线性相关性. CMIF 方法提取加速度导纳的模态极点见图 5(b),识别出钢筋混凝土简支梁前 5 阶弯曲模态.

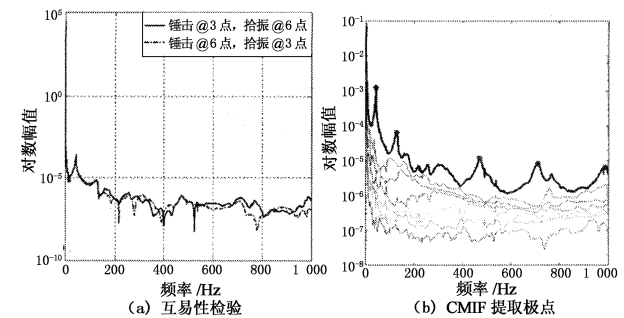


图 5 加速度导纳频响函数

Fig. 5 FRF of inertia

### 2.5 模态参数识别结果

根据动力试验数据进行模态参数识别,其结果如表 2 所示. 结构发生损伤会引起其刚度降低,必然导致模态参数发生变化. 如阻尼比反映结构振动的衰减速度,频率变化率则可以表征结构损伤的出现及严重程度.

从整体上来看,随着损伤程度的加深,简支梁的自振频率减小,阻尼比增加,但第 2 阶模态的前 2 个损伤工况的自振频率反而增大,原因是损伤位置和第 2 阶振型节点重合,且损伤位置处的振型幅值较小. 低阶模态比高阶模态更能反映出简支梁的损伤,第 1 阶模态频率随损伤程度依次降低 6.47%,

11.8%, 19.4%, 20.4% 和 24.4%, 阻尼比分别为 2.20%, 3.52%, 3.61%, 3.67%, 4.15% 和 5.26%.

模态频率在一定程度上显示出结构发生损伤, 但不足以直观反映出损伤的位置和严重程度.

表 2 加速度导纳频响函数识别模态参数  
Tab. 2 Modal parameters identified by inertance FRF

工况	1 阶			2 阶			3 阶			4 阶			5 阶		
	频率 /Hz	变化率 /%	阻尼比 /%	频率 /Hz	变化率 /%	阻尼比 /%	频率 /Hz	变化率 /%	阻尼比 /%	频率 /Hz	变化率 /%	阻尼比 /%	频率 /Hz	变化率 /%	阻尼比 /%
参考状态	41.57	—	2.20	127.5	—	3.19	472.7	—	1.78	708.8	—	1.66	985.4	—	1.01
工况 I	38.88	-6.47	3.52	129.5	+1.57	2.80	469.9	-0.59	1.41	689.7	-2.70	2.46	957.6	-2.82	1.68
工况 II	36.65	-11.80	3.61	128.2	+0.55	2.62	458.3	-3.05	2.36	668.4	-5.70	2.38	934.6	-5.16	1.97
工况 III	33.50	-19.40	3.67	118.4	-7.41	3.95	413.7	-12.50	1.41	621.3	-12.30	2.42	875.0	-11.20	2.47
工况 IV	33.11	-20.40	4.15	115.6	-9.33	3.95	406.3	-14.00	1.66	593.2	-16.30	2.50	850.7	-13.70	2.58
工况 V	31.44	-24.40	5.26	112.8	-11.50	4.89	382.6	-19.10	3.19	532.7	-24.80	3.41	735.2	-25.40	5.61

位移模态振型是指结构振动相对位移幅值的变化. 利用 CMIF 方法对加速度导纳进行模态识别得到简支梁的位移模态振型, 并采用振型系数最大值为 1 的归一法对模态振型进行规格化, 其结果如图 6 所示. 由图 6 可见, 试验梁的各损伤工况与参考状态的位移振型变化不明显, 表明位移振型对结构损伤具体位置不敏感.

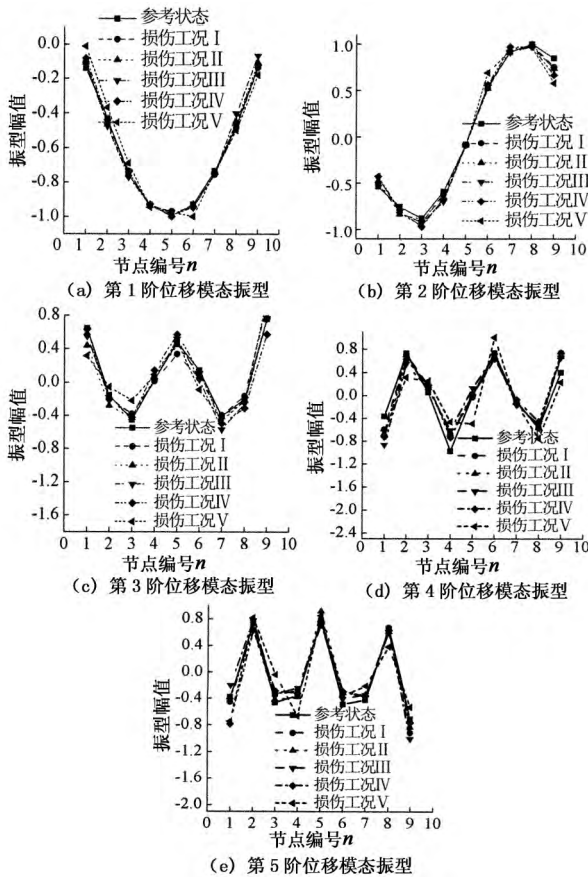


图 6 钢筋混凝土梁的位移模态振型  
Fig. 6 Mode shapes of RC beam

### 2.6 模态柔度位移分析

由前面的试验结果可以看出, 频率和振型难以直观地判断结构在何处刚度降低, 尤其在结构只有轻微损伤的情况下, 而柔度矩阵能够很好地反映结构刚度的变化.

利用 MRIT 模态测试分析得到结构的 FRF, 采取复模态曲线拟合的方法, 对应于本试验, 柔度矩阵为  $9 \times 9$  的方阵. 在第 4 点和第 6 点分别作用 10 kN 的力与柔度矩阵相乘, 得到结构在不同损伤工况下的模态柔度位移. 图 7 比较了 6 个分析工况的钢筋混凝土简支梁的模态柔度位移, 结果显示模态柔度位移随着损伤工况的逐步累积而增大.

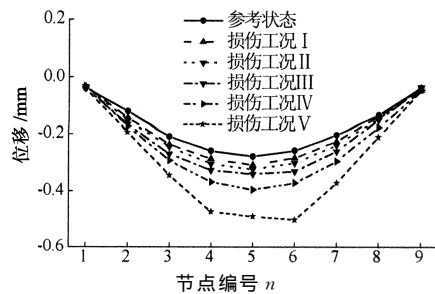


图 7 钢筋混凝土简支梁的模态柔度位移比较  
Fig. 7 Comparison of modal flexibility displacement for RC simply-supported beam

### 2.7 静力和模态柔度位移对比

图 8 为钢筋混凝土简支梁的静载位移与模态柔度位移的比较图. 表 3 给出了 6 个分析工况的对应荷载、试验梁的静载位移和模态柔度位移及误差. 由图 8 和表 3 可知, 线弹性范围内静载位移和模态柔度位移吻合良好, 后 3 个损伤工况的静载位移与模态柔度位移的误差较大, 最大误差接近 35%.

随着损伤程度的加深, 静载位移与模态柔度位移的误差越来越大. 这是由于静载位移指的是简支

梁每一个工况的峰值点位移,其倒数为前一个损伤工况起点和峰值点的割线斜率;而模态柔度位移是对损伤简支梁按线弹性分析得到,其倒数为后一个损伤工况的起点切线斜率.图 9 为模态柔度位移与静载位移的对应关系,由图 9 可知,由于切线斜率大于割线斜率,故模态柔度位移小于静载位移.

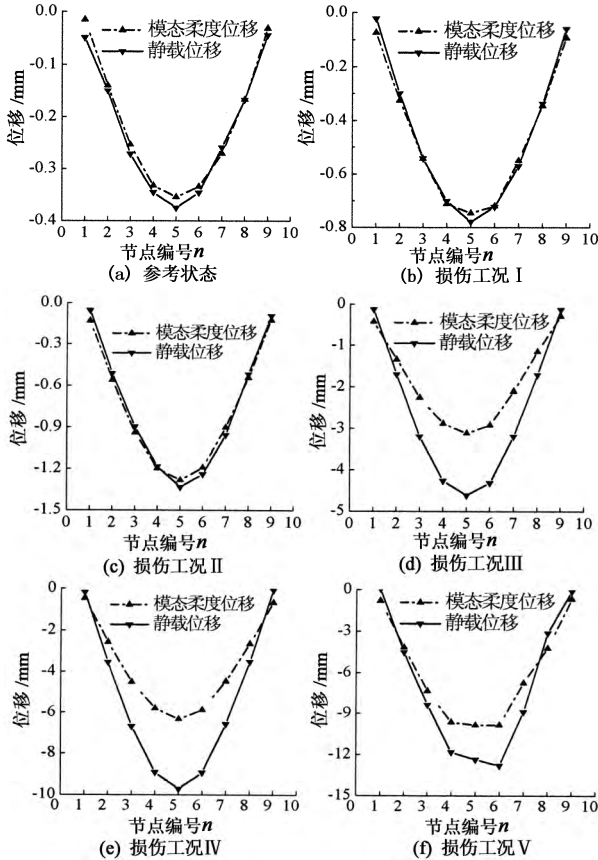


图 8 模态柔度位移与静载位移的比较  
Fig. 8 Comparison of modal flexibility displacement and static displacement

表 3 模态柔度位移与静载位移比较

Tab. 3 Comparison of modal flexibility generated displacement and static displacement

分析工况	荷载 /kN	静载位移 /mm	模态柔度位移/mm	相对误差 /%
参考状态	2.00	0.37	0.35	5.41
工况 I	3.50	0.79	0.75	5.06
工况 II	6.00	1.33	1.28	3.76
工况 III	13.50	4.61	3.11	32.54
工况 IV	24.00	9.71	6.32	34.91
工况 V	30.00	12.35	9.84	20.32

从以上简支梁的试验表明,直接利用动力输入和输出信号获得的模态柔度及其对应应在荷载作用下的变形比频率和振型对结构的损伤更为敏感,模态柔度位移是直接诊断结构性能和损伤的极好指标.

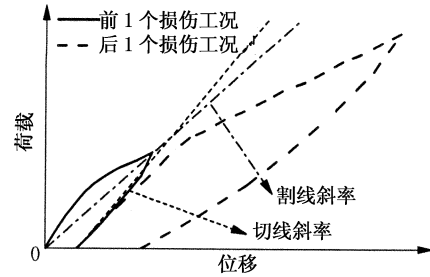


图 9 模态柔度位移与静载位移的对应关系  
Fig. 9 Relations between modal flexibility generated displacement and static displacement

### 3 钢-混凝土组合板试验研究

为了进一步研究模态柔度在复杂结构损伤识别中的运用,设计了一个钢-混凝土组合板试验,组合结构是国际上比较多见的一种桥梁结构形式,因此对其进行结构识别的研究有着重要的意义和明确的国际工程背景.

#### 3.1 试件概况

该试验采用 3 根 Q235 工字形钢梁作为主梁,在其上部铺设 C40 混凝土面板形成组合板结构.整个试件宽 2.05 m,长 4.0 m.混凝土面板厚 60 mm,板内布置双层双向直径 6 mm 的 HPB300 钢筋,钢筋纵向间距 150 mm,横向间距 80 mm.试验构件的截面图及其配筋如图 10 所示.

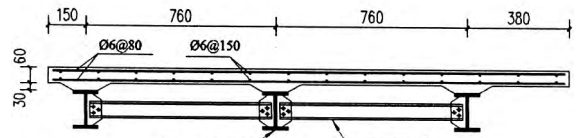


图 10 组合桥面板截面图

Fig. 10 Cross section of composite bridge specimen

组合板试件的平面图和测点布置如图 11 所示.整个试件由 6 个支座支撑,其中位于 1,10,19 号点处的为滚动铰支座;位于 9,18,27 号点处的为固定铰支座.3 根主梁之间,设有 6 根横向支撑,其型号为 8 号槽钢.

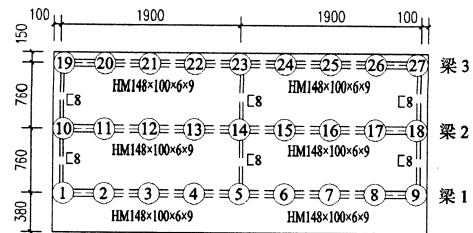


图 11 钢梁平面位置和测点布置图

Fig. 11 Plan of steel girder and instrumentation layout

抗剪连接件是钢梁和混凝土板协同工作发挥其特点的关键部件。钢-混凝土组合结构的抗剪连接件最常用的是圆柱头栓钉,如图 12(a)所示。栓钉底端与钢梁焊接在一起,顶端有一扩大的圆柱头,从而防止栓钉从混凝土板中拔出。为了在实验室条件下模拟连接件的损伤,设计了螺栓加套筒的连接件形式模拟传统的栓钉连接件,如图 12(b)和(c)所示。

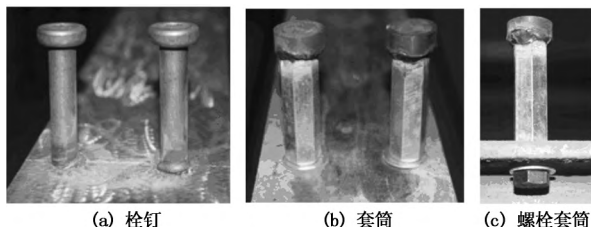


图 12 栓钉和螺栓套筒连接件  
Fig. 12 Connector of stud and bolt-sleeve

梁 1 和梁 3 采用可松动的螺栓连接,梁 2 则采用传统的栓钉连接,栓钉的尺寸和间距与螺栓相同。连接件设计为完全抗剪,在梁 1 上涂有黄油,消除了混凝土和钢梁表面之间的粘结作用,从而梁 1 的大部分剪力由抗剪连接件承受。组合板钢梁的整体连接件分布如图 13 所示。

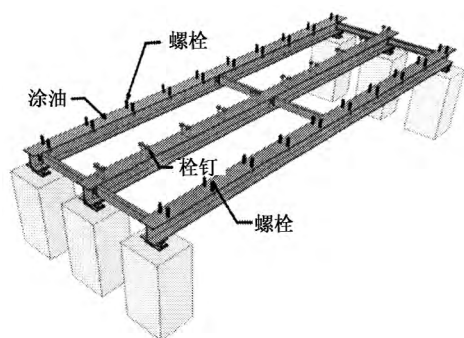


图 13 钢梁连接件示意图  
Fig. 13 Connector distribution of girder

### 3.2 多参考点脉冲锤击测试

为研究不同损伤工况对于组合结构板不同位置处柔度系数的影响,主要以梁 1 和梁 2 为研究对象进行了一系列的静动力试验。动力试验过程中,采用 DP730 采集系统进行数据采集。为了使脉冲信号有充分的数据点,采样频率设置为 4 096 Hz。通过对比实验表明,试件在每次锤击 8 s 后已经充分衰减,因此采样时间设置为 8 s。每根梁布置有 9 个传感器,测点位置如图 11 所示,其中除支座外的 7 个位置被用来进行锤击法试验。将采集的力时域数据和响应时域数据进行傅里叶变换得到其频响函数,利用 CMIF 方法进行模态参数提取峰值图如图 14 所

示,进一步分析得到结构的模态柔度。

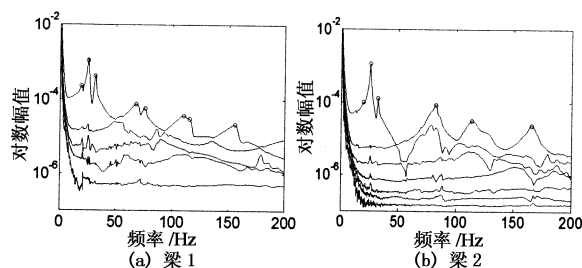


图 14 CMIF 峰值提取图  
Fig. 14 Peak-picking figure in CMIF

为了验证动力测试结果的准确性,对梁 1 和梁 2 分别进行了一组静载试验。对梁 1 和梁 2 除支座处的其他 7 个测点分别进行砝码堆载,每个测点上的砝码为 50 kg,然后用百分表测试结构在荷载下的挠度。将动力测试得到的模态柔度预测结构在荷载下的位移值与静载试验实际测得的位移值进行对比,如图 15 所示。由图 15 可见,利用模态柔度预测的位移值与结构在荷载下的位移实测值吻合良好,说明了模态柔度识别的准确性。

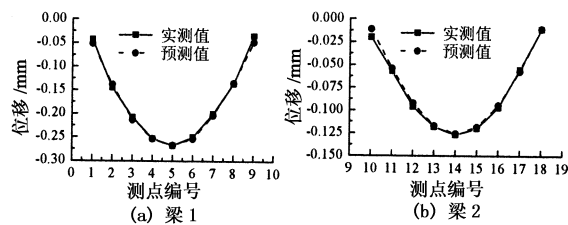


图 15 位移实测值和预测值  
Fig. 15 Measured and predicted displacement

### 3.3 损伤工况定义

在实验室条件下对试验构件造成不同程度的损伤,如图 16~图 18 所示。对实际桥梁可能出现的损伤情况分 3 种工况进行实验室模拟。

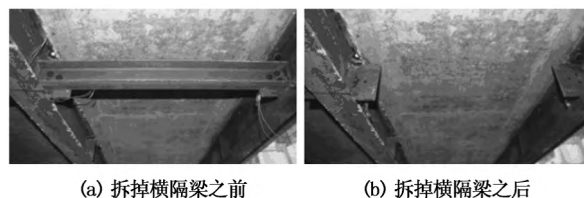


图 16 工况 1  
Fig. 16 Case 1

以组合板的初始状态为参考状态,各种损伤工况的具体定义如下所示。

工况 1:将 5 号点和 14 号点之间的横隔梁拆

掉,如图 16 所示.该工况的设计是使工字钢的侧向刚度发生变化.

工况 2:将 1 号点的支座由钢支座换成橡胶支座,钢支座的弹性模量为 200 000 MPa,橡胶支座采用聚氨酯板,弹性模量为 60 MPa,如图 17 所示.该工况使支座刚度产生变化.

工况 3:将梁 1 中位于 5~9 号点区域的螺栓完全松掉,如图 18 所示.该工况使混凝土和钢梁的连接情况发生变化.

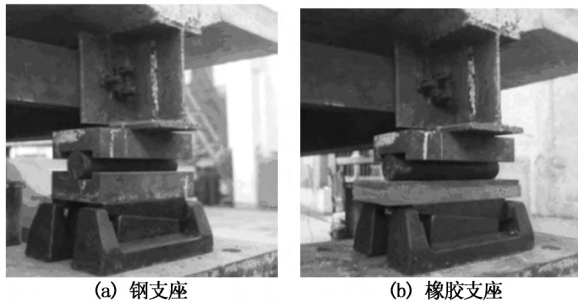


图 17 工况 2  
Fig. 17 Case 2

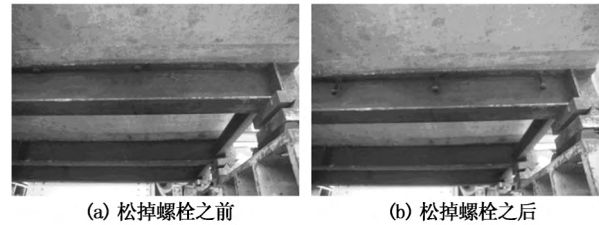


图 18 工况 3  
Fig. 18 Case 3

### 3.4 频率和阻尼比的对比

对不同工况下的试验板进行模态测试,利用 CMIF 方法对 FRF 进行峰值极点提取得到结构的模态参数,如频率、阻尼比等,将损伤工况下的模态参数与参考状态进行对比,如表 4 所示.

由表 4 可见,不同损伤工况下钢-混凝土组合板的自振频率均有所下降,而阻尼比的变化则不明显.相对于高阶模态,低阶模态对钢-混凝土组合板的损伤更为敏感,其中第 1 阶模态频率在不同工况下分别降低 4.76%,7.49%,4.35%,可见结构的模态频率对支座刚度的变化最为敏感.从结构的频率变化能够判断损伤的发生,但无法判断其损伤位置.

表 4 不同工况下频率和阻尼比的比较  
Tab. 4 Comparison of frequencies and damping estimated by different tests

阶数	参考状态		工况 1			工况 2			工况 3			
	频率 /Hz	阻尼比 /%	频率 /Hz	阻尼比 /%	频率差 /%	频率 /Hz	阻尼比 /%	频率差 /%	频率 /Hz	阻尼比 /%	频率差 /%	
梁 1	1	19.75	2.67	18.81	4.62	4.76	18.27	2.73	7.49	19.89	2.85	4.35
	2	25.21	1.64	25.26	1.36	0.20	23.91	1.86	5.16	24.77	2.39	1.75
	3	31.47	1.96	31.57	1.77	0.32	30.75	1.60	2.29	31.13	1.54	1.08
	4	69.40	6.80	68.31	6.68	1.57	65.63	2.71	5.43	69.50	8.03	2.74
	5	74.54	4.11	74.30	3.31	0.32	—	—	—	73.75	3.05	1.06
	6	110.61	4.60	109.18	4.29	1.29	103.40	3.76	6.52	—	—	—
	7	113.91	2.28	113.14	2.56	0.68	—	—	—	110.53	3.83	2.97
	8	154.39	2.75	152.68	3.18	1.11	149.80	3.80	2.97	150.13	3.69	2.76
梁 2	1	20.26	2.26	20.38	2.35	0.59	19.24	3.43	5.03	19.92	2.57	1.70
	2	25.43	1.39	25.51	1.35	0.31	24.21	1.74	4.80	25.09	1.64	1.34
	3	32.00	1.47	31.98	1.49	0.06	31.02	1.74	3.06	31.60	1.53	1.24
	4	82.33	2.34	81.70	1.91	0.77	85.68	2.43	4.07	82.10	2.07	0.27
	5	113.09	4.09	113.31	3.99	0.19	117.55	3.49	3.94	112.32	3.53	0.68
	6	166.07	2.34	165.22	2.25	0.51	165.43	2.46	0.39	164.28	2.35	1.08

### 3.5 模态柔度位移的对比

利用 CMIF 方法对 FRF 进行曲线拟合,根据方法 2 中公式(3)进一步得到结构的模态柔度矩阵.将柔度矩阵乘以测点位置对应的力向量,可以得到一个模态柔度位移值,作为结构损伤判定的指标.将 3 个损伤工况下获得的模态柔度位移与参考状态位移进行对比,如图 19 和图 20 所示.

为了进一步量化结构的损伤程度,以试验板的原始状态为参考状态,定义不同损伤工况下的模态柔度位移差值为:

$$E = \frac{|D_d - D_r|}{D_r} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $E$  为模态柔度位移差值; $D_d$  为损伤工况下的模态柔度位移值; $D_r$  为参考状态下的模态柔度位移



值. 根据式(4)计算梁1和梁2在不同工况下的模态位移差值如图21所示.

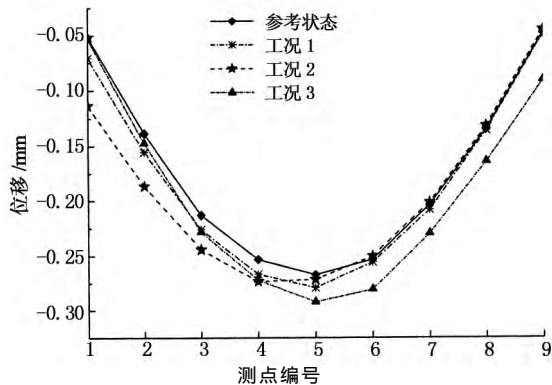


图19 梁1的模态柔度位移对比

Fig. 19 Modal flexibility displacement comparison of girder 1

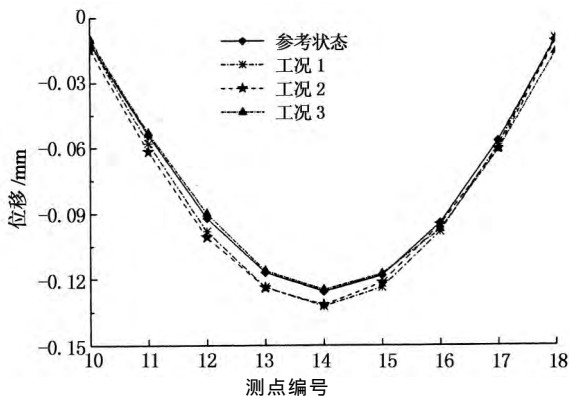


图20 梁2的模态柔度位移对比

Fig. 20 Modal flexibility displacement comparison of girder 2

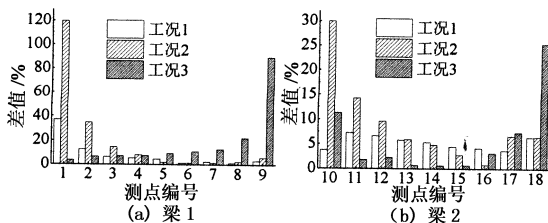


图21 模态柔度位移差值

Fig. 21 Modal flexibility displacement difference

由图21可见,对于工况1,去掉横隔梁后对梁1的滚动支座一侧的位移值有较大影响.除支座位置外,损伤前后模态柔度位移值变化最大的点为2号点,前后变化12.5%.梁2损伤前后模态柔度位移变化比梁1要小些,其变化最大值为7.3%,为11号点.

对于工况2,模态柔度位移值对支座刚度的变化非常敏感,在支座刚度变化一侧尤其明显,1号点和2号点的位移值变化分别为119.6%和34.9%.

梁1的支座变化对梁2的位移值也有一定影响,在10号点和11号点变化最为明显,为29.3%和14.2%.

对于工况3,梁1在连接件损伤一侧的模态柔度位移值变化明显,越靠近支座变化越大,如9号点和8号点的变化分别为89.8%和22.1%.而梁2损伤前后模态柔度位移值变化不大,这是因为该损伤没有直接作用在梁2上,可见模态柔度能够很好地识别出局部损伤.

总之,横向支撑变化对梁1和梁2的模态柔度位移的影响相对其他两个工况要小.支座变化和连接件松动时,梁1和梁2均在靠近损伤的位置产生非常明显的位移差值,表明模态柔度位移能够很好地识别出结构损伤及其损伤位置.

## 4 结论

本文利用脉冲锤击法通过输入输出的动力信号获取结构模态柔度,以及基于柔度矩阵进行了结构损伤识别问题的研究.在实验室条件下设计了一根钢筋混凝土简支梁试验和一块钢-混凝土组合板试验.得到的主要结论如下:

1)利用多参考点脉冲锤击法(MRIT)能够直接从结构的输入输出信号中获取模态质量,而无需利用测试对象事先并不明确的质量矩阵,进而得到结构的模态柔度矩阵,并可以对结构在明确荷载作用下的位移进行预测,为结构静载试验和结构动力模态试验之间建立了一座桥梁.

2)简支梁试验表明,自振频率和振型信息只能判断结构损伤的出现,随着损伤程度逐渐加深,结构的自振频率降低,阻尼比增大.模态柔度则能够综合全面地反映钢筋混凝土简支梁结构的损伤位置和损伤程度.模态柔度比频率和振型对结构损伤更加敏感,模态柔度位移能作为结构损伤的极好指标.

3)组合板试验表明,在初始状态下,利用模态柔度预测的位移值与静载试验下的实测值非常吻合.对组合板设计了几种损伤工况,通过对比损伤前后结构的模态柔度位移值,能够准确地识别横向刚度、支承条件和连接性能的变化等局部损伤,并能有效地判定结构的损伤位置.

需要指出的是,模态柔度只能在结构输入和输出都非常明确的情况下,才能从模态分析中获得,因此要求试验前对输入和输出进行严格的标定.对于只有输出信号的随机振动,如何获取模态质量并进

一步得到模态柔度需进一步深入研究. 另外,在实际工程中需要设法提高采集信号的信噪比.

## 参考文献

- [1] CATBAS F N, KIJEWski-CORREA T, AKTAN A E. Structural identification (St-Id) of constructed facilities: approaches, methods and technologies for effective practice of St-Id[C]//A State-of-the-Art Report by ASCE SEI Committee on Structural Identification of Constructed Systems. Philadelphia: Drexel University, 2011.
- [2] RYTTER A. Vibration based inspection of civil engineering structures [D]. Aalborg: Aalborg University, 1993.
- [3] HOGUE T D, AKTAN A E, HOYOS A. Localized identification of constructed facilities [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1991, 117(1):128-148.
- [4] RAGHAVENDRACHAR M, AKTAN A E. Flexibility by multireference impact [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1992, 118(8):2186-2203.
- [5] AKTAN A E, CATBAS N, TURER A, *et al.* Structural identification: analytical aspects[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1998, 124(7):817-829.
- [6] CATBAS F N, AKTAN A E. Condition and damage assessment: issues and some promising indices [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2002, 128(8):1026-1036.
- [7] CATBAS F N, BROWN D L, AKTAN A E. Parameter estimation for multiple-input multiple-output modal analysis of large structures [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(1):921-930.
- [8] CATBAS F N, BROWN D L, AKTAN A E. Use of modal flexibility for damage detection and condition assessment: case studies and demonstrations on large structures [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2006, 132(11):1699-1712.
- [9] PANDEY A K, BISWAS M. Damage detection in structures using changes in flexibility [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169(1):3-17.
- [10] ALLBRIGHT K, PAREKH K, MILLER R, *et al.* Modal verification of a destructive test of a damaged prestressed concrete beam [J]. Experimental Mechanics, 1994, 34(4):389-396.
- [11] ZHAO J, DEWOLF T J. Sensitivity study for vibration parameters used in damage detection [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(4):410-416.
- [12] CATBAS F N, BROWN D L, AKTAN A E. Use of modal flexibility for damage detection and condition assessment: case studies and demonstrations on large structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(11):1699-1712.
- [13] 李永梅,周锡元,高向宇. 基于柔度差曲率矩阵的结构损伤识别方法. [J]. 工程力学, 2009, 26(2):188-195.  
LI Yong-ming, ZHOU Xi-yuan, GAO Xiang-yu. Detection indicator of structural nondestructive damage based on curvature-flexibility matrix[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2):188-195. (In Chinese)
- [14] AVITABILE P. Modal space-back to basics: is there any difference between a roving hammer and roving accelerometer test [J]. Experimental Techniques, 1998, 22(5):9-10.
- [15] CLOUGH R, PENZIEN J. Dynamics of structure [M]. Berkeley: McGraw-Hill Book Co, 1975:175-176.
- [16] RAGHAVENDRACHAR M, AKTAN A E. Flexibility by multireference impact testing for bridge diagnostics [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(8):2186-2203.
- [17] BROWNJOHN J M W, MOYO P, OMENZETTER P, *et al.* Assessment of highway bridge upgrading by dynamics testing and finite element model updating[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(3):162-172.
- [18] 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.
- [19] 刘纲,黄宗明,高建莉. 基于损伤力影响线的静定梁损伤识别研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009, 36(8):23-27.  
LIU Gang, HUANG Zong-ming, GAO Jian-li. Damage identification based on damage load influence line to statically determinate beam [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(8):23-27. (In Chinese)
- [20] 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.  
XIE Li-min. Theoretical and experimental research on damage identification of reinforced concrete structures with modal flexibility[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2014. (In Chinese)