

文章编号: 1001-7372(2015)09-0046-11

多参考点脉冲锤击法识别桥梁模态柔度的实践

周云, 易伟建, 蒋运忠, 谢利民, 米斯特

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为了验证利用多参考点脉冲锤击法识别桥梁模态柔度的理论和实现方法, 利用1根3个自由度悬臂梁结构验证了该理论和方法的可行性, 并将该方法应用到实际桥梁的结构识别中, 对2座旧桥分别进行了多参考点脉冲锤击法动力试验以及相应的静载试验。通过对钢-混凝土组合结构桥梁的模态试验, 研究了多种参考点的选择方法, 以比较参考点选择的不同对桥梁柔度计算结果的影响。研究表明: 利用从多参考点脉冲锤击法动力实测数据的频响函数中直接获取的模态柔度, 可估算结构在载荷下的位移, 将其与结构静载试验获得的结构位移进行对比, 结果可作为桥梁结构状况和性能评估的有效指标, 并能成功实现对桥梁损伤位置的识别。

关键词: 桥梁工程; 模态柔度; 多参考点脉冲锤击法; 结构识别; 动力信号分析

中图分类号: U448.34

文献标志码: A

Practice of Bridge Modal Flexibility Identification Using Multiple-reference Impact Test

ZHOU Yun, YI Wei-jian, JIANG Yun-zhong, XIE Li-min, MI Si-te

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

Abstract: In order to apply the theory and implementation of using multiple-reference impact test (MRIT) to identify bridge modal flexibility, a 3 degree of freedom cantilever beam was utilized to verify the feasibility of this theory and approach. The approach was applied to structural identification of two real bridges, and the old bridges have been tested by using MRIT as well as the corresponding static load test. Through the modal test for steel-concrete composite bridge, the rational choices of different reference points in MRIT were researched to compare the effects of different reference points on results of bridge flexibility. The results show that the modal flexibility deflection extracted from FRF by using the dynamic experiment can be directly compared with the static test deflection. The results can be used as an effective index to evaluate bridge performance, and the method can successfully identify damage location on the bridge.

Key words: bridge engineering; modal flexibility; multiple-reference impact test; structural identification; dynamic signal analysis

0 引言

随着国民经济的迅速发展, 中国桥梁工程建设

规模跃居世界首位, 但由于交通量增加, 超载严重, 桥梁质量缺陷以及管养不足, 再加上磨损冲击、暴雨洪水、风沙冰雪、日晒冻融等因素的侵蚀, 导致桥梁

收稿日期: 2014-11-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51208190); 教育部高等学校博士学科点基金新教师基金项目(20120161120029);

湖南省青年骨干教师培养计划项目; 湖南大学青年教师成长计划项目

作者简介: 周云(1979-), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: zhouyun05@hnu.edu.cn。

病害普遍存在,垮塌事件屡屡发生,桥梁安全问题日益突出^[1-3]。

截至2011年底,中国仅公路桥梁就达68.94万座,其中危桥9.18万座,占13.3%。据统计,自2001年起至2012年年底,中国投入的危桥改造资金达438.8亿元。在未来10~20年内,既有桥梁仍将出现大范围的桥梁工作性能退化,病害诊治任务依然艰巨。

面对服役桥梁性能的退化,工程师逐渐意识到目前以视觉检查为主的桥梁检测评估方法并不可靠,而基于“结构识别”的桥梁诊断方法是目前最先进的技术手段。结构识别的范式被描述为“理论-试验-决策”的六步综合圆^[4],具体包括:①通过观察结构对象建立总体概念;②建立初始有限元模型;③进行结构试验;④分析、验证和阐述测试数据;⑤模型校验和参数识别;⑥利用校验的模型进行决策和预测。当进行可控的载荷试验时,桥梁识别需要专家知识的支持以及大量的费用因而阻碍了其在桥梁状况评估中的应用和发展。

在结构识别的第3步中,载荷可控的桥梁结构试验包括静载试验,外部动力激励试验或者两者的结合。Doebeling等^[5-7]对之前15年基于振动的试验应用进行了很好的总结和归纳。外部动力激励试验是一种强大的试验工具,它不但能提高激励的信噪比,还能获得真实的频率响应函数。不同的外部激励方法包括:电动激励器测试^[8],瞬态释放测试^[9],多参考点脉冲锤击激励(MRIT)^[10-11]和步进式松弛激励^[12]等。本文基于多参考点脉冲锤击法,研究其用于识别模态柔度的适用性与可靠性,并对该方法进行了实验室验证性试验和实际桥梁结构的静动载对比试验,以期为其进一步应用于实际桥梁结构状态评估奠定理论基础。

1 多参考点脉冲锤击法

利用随机振动的方法进行桥梁结构的模态测试需要很长的采样时间,且基于各态历经平稳随机过程的假设受到激励源频率成分的影响,对于刚度较大的中小型桥梁其测试结果离散性较大,仅能得到虚拟频响函数(Pseudo-FRF)。脉冲锤击法相比随机振动法最大的优势在于其能够从频率响应函数(FRF)中获得模态质量。MRIT即利用多参考点识别法对多个激励点测试得到的结构动力响应信号同时进行参数识别,可快速有效地在桥梁上实施,因此受到广大工程师和研究者的欢迎。

多参考点激励使输入点处的振幅变得更均匀,减小了单点激励时输入点可能进入微小非线性等因素的影响,且频率响应函数矩阵中的不同列和不同行可以同时确定,提高了频响函数的一致性,因此其测得的频响函数的准确性较高^[13]。从1980年起,Drexel DI3研究所的Aktan教授和Cincinnati结构动力学试验室的Brown教授领导的团队就开始利用MRIT进行了一系列广泛的桥梁试验^[14-19]。在桥梁上成功应用的例子有HAM-42-0992桥和Seymour桥。Raghavendrchar等^[15-17]利用多参考点脉冲锤击法进行模态分析进而得到桥梁上部结构的模态柔度,并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。这一研究结果大大促进了MRIT技术的发展和运用,并建立了结构在线弹性状态下静力数据和动力数据之间的一座桥梁。在中国,脉冲锤击法应用到实际桥梁结构中的例子并不多,主要有东方所应怀樵课题组^[20]运用变时基技术进行的黄河铁路桥的模态测试。

桥梁结构静载试验的变形观测通常受限于桥下的传感器安装条件和场地的制约,MRIT技术能够直接从结构的频响函数中得到模态柔度,这样就能预测静载试验下结构的变形,从而成为静载试验的有力补充。它与静载试验结果比较,能成为桥梁性能评估的有力判据。

如何从频响函数中有效识别结构的柔度是一个具有挑战性的问题,主要是由于实际桥梁测试过程中周围环境随时空的变化具有不确定性,测试得到的频率响应函数受各种噪声干扰而辨识困难。解决这个问题可以从2个方面入手:①改进脉冲锤击装置,加大力锤的锤击力以提高动力试验的信噪比,目前湖南大学的周云等和Drexel大学的Moon等正在研制一种脉冲可控的落锤装置以用于桥梁的激励^[21];②发展强大的信号处理手段以提高模态参数识别的准确度。

2 模态柔度计算方法

柔度为结构在单位力作用下的位移。对处于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。模态柔度能直接从模态试验信号中提取,当有足够多的模态被利用时,其被证明为一种精确的估计静力柔度的方法,该方法最早由Clough和Penzien提出^[22]。Raghavendrchar等^[15]也利用模态柔度来反映桥梁的性能。现有2种方法能够计算模态柔度:①方法1,提取质量归一的模态振型和模

态频率;②方法2,利用综合的频率响应函数。这2种方法是等效的^[23],本文将采用第2种算法。

2.1 在频率响应函数的 $\omega=0$ 处识别模态参数的方法

由于质量矩阵信息未知,通常很难直接从试验中获得。而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。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,即

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

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

利用模态参数估计算法^[8],在 $\omega=0$ 处计算第 p 点和 q 点的频响函数,将其代入式(1)中,得到^[24]

$$H_{pq} = \sum_{r=1}^N \left[\frac{\Psi_{pr} \Psi_{qr}}{M_r(-\lambda_r)} + \frac{\Psi_{pr}^* \Psi_{qr}^*}{M_r^*(-\lambda_r^*)} \right] \quad (2)$$

式中: M_r 为第 r 阶模态的模态质量系数, $M_r = 1/Q_r$ 。

获取结构频响函数在0 Hz处的截距从而得到结构的模态柔度系数,柔度矩阵可由式(3)表达,即

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

式中: f_{pq} 为模态柔度系数。

该柔度矩阵同样为静力矩阵的近似,需要利用多个模态进行截断处理。通常低阶的模态对模态柔度贡献大,当足够的测试模态被识别,模态柔度和静力柔度之间的差别就会降低。

2.2 频响函数中模态柔度的提取

传统的结构动力信号测试中,常利用加速度传感器测试结构反应。由这种情形计算出的频响函数为“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 $(j\omega)^2$ 。这样理论上可以直接在位移导纳频率为0的纵轴上量取频响函数的截距,即为柔度矩阵中的柔度系数。在这中间存在一个不可忽视的问题,即当频率较小时,由于频响函数在转化过程中除以了 $(j\omega)^2$,因此获得的位移导纳将增大。当频率接近0时,位移导纳为无穷大。这样用测量在加速度导纳0 Hz截距的方法获取柔

度系数就遇到了实际困难,因为它得到的是一个无穷大的数值。

为了解决上述问题,本文提出了一种获取模态柔度系数的新方法。即在实际计算过程中,利用模态拟合的方式,将多个自由度体系分别拟合为单自由度体系,然后分别获取单个自由度体系在0 Hz处的截距,最后将多个单自由度体系在0 Hz处的截距相加,从而获得总的模态柔度系数。

上述2种方法要求动力测试过程中外部动力激励的力信号能够被检测到,从而得到相应输出和输入对应的频率响应函数(FRF),进一步利用频率响应函数获取模态柔度系数。因此该方法适用于中小型桥梁,其可使用通常的激励设备激发桥梁的整体振动并能测量到输入力。大跨桥梁的质量较大,现有的外部激励方法难以激发大型结构的整体振动,使其运用受限。以下的算例中将采取这2种方法来获取柔度矩阵。

3 悬臂梁理论与试验分析

为了验证前述模态柔度矩阵获取方法的正确性,特设计一实验室空心方钢管结构试验。该结构如图1所示,结构的截面面积为 685.5 mm^2 ,惯性矩为 $1.649 \times 10^5 \text{ mm}^4$,弹性模量为 $2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$,单位长度质量为 $5.381 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$,图1(a)所示点1,2,3均为试验过程中传感器的测点位置。对该梁建立有限元模型作正问题计算分析,用方法1,2进行验证,再通过实验室脉冲锤击法试验来验证2种方法的可靠性。

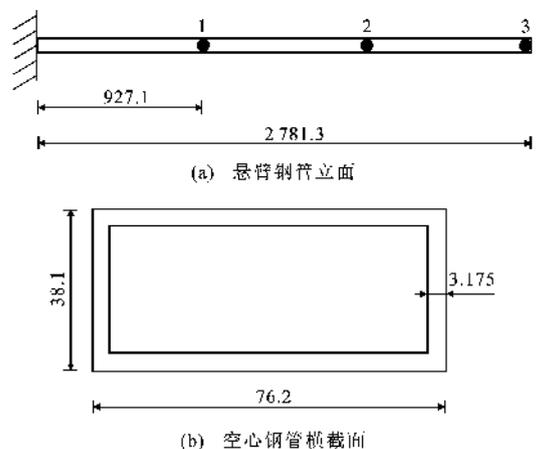


图1 方形空心钢管截面尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Sectional Dimension of Rectangular Tube (Unit:mm)

3.1 方法1获得的模态柔度

先对该钢梁划分3个单元的有限元模型,在

MATLAB 中以梁单元 4×4 的一致质量矩阵和刚度矩阵建立结构的总刚度矩阵和总质量矩阵,直接求解模态频率和振型。经过分析计算,获得前 3 阶圆频率分别为: $\omega_1 = 35.4593 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $\omega_2 = 224.5608 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $\omega_3 = 632.9027 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。得到的相应振型矩阵如式(4)所示,由此通过方法 1 根据式(1)可求得模态柔度矩阵如式(5)所示,即

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1.1330 & 4.0984 & 5.0440 \\ 3.7558 & 2.9040 & -4.6426 \\ 6.8731 & -7.0025 & 6.9764 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$f = \begin{bmatrix} 0.0080 & 0.0205 & 0.0325 \\ 0.0205 & 0.0651 & 0.1142 \\ 0.0325 & 0.1142 & 0.2209 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2 方法 2 获得的模态柔度

同样先进行正问题分析。首先用 Laplace 变换进行解析分析获得传递函数,图 2(a)为 Laplace 变换传递函数矩阵中 1 个元素 H_{11} 的幅值,设阻尼系数 σ 为 0,作 1 个平面截断 Laplace 三维幅值曲线,这样就能得到频域从 $-\infty \sim +\infty$ 的频响函数曲线[图 2(b)]。0~900 Hz 的频率幅值截断如图 3 所示,利用式(1)进行曲线拟合,得到 3 个自由度在 0 Hz 点的截距分别为 $0.0057, 1.901 \times 10^{-3}, 3.626 \times 10^{-4} \text{ mm} \cdot \text{N}^{-1}$ 。这 3 个值之和 $0.0080 \text{ mm} \cdot \text{N}^{-1}$ 正好为柔度矩阵所对应的柔度系数 f_{11} 。柔度矩阵中其他的系数也可以通过在“位移导纳”这种频响函数的 0 Hz 的截距上直接求得,如图 4 所示。图 4 中所示数值为 3 个自由度在频响函数 0 Hz 处的截距之和。由图 4 可见,该方法获得的柔度系数与方法 1 获得的柔度系数是一样的。值得注意的是,这里的“位移导纳”频响函数不是从“加速度导纳”频响函数中直接获得的,而是从解析解推导而来的,因此不需要除以 $(j\omega)^2$ 这一项,可以通过测量 0 Hz 处的截距直接获取柔度系数。

3.3 脉冲锤击试验获得的模态柔度

获得模态柔度的解析解后,在实验室架设悬臂梁进行脉冲锤击法试验,如图 5(a)所示,对该梁进行 3 点激励 3 点拾振的测试,将加速度传感器获得的信号进行数字信号分析,并将所获得的 3×3 矩阵 9 条频率响应函数叠加在对数幅值图中,如图 5(b)所示,计算分析得到其模态柔度矩阵。利用 MRIT 测试得到的柔度矩阵,可以预测结构在荷载作用下的位移。另外,利用前述方法 1,2 获得的柔度矩阵,也可以得到一个理论位移计算值。对该梁 3 点加载进行位移计算,获得的测试静载位移与 MRIT 试验

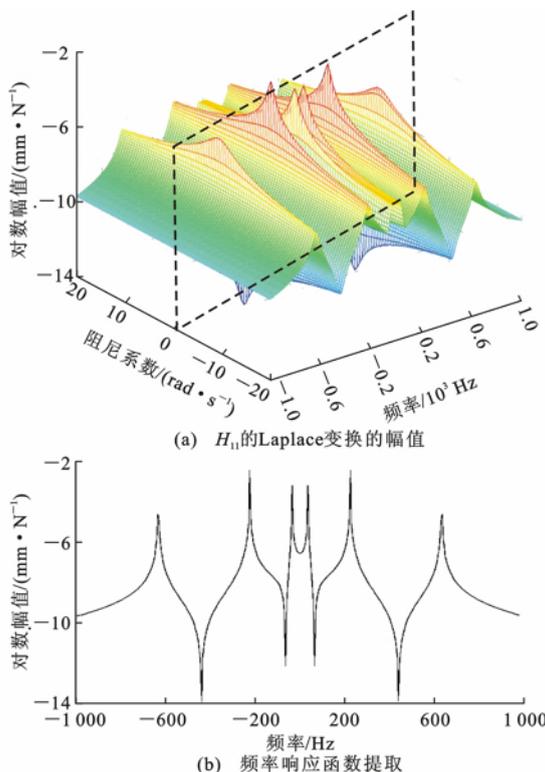


图 2 H_{11} 的 Laplace 变换幅值与频率响应函数提取
Fig. 2 Magnitude of Laplace Transformation for H_{11} and Extraction of Frequency Response Function

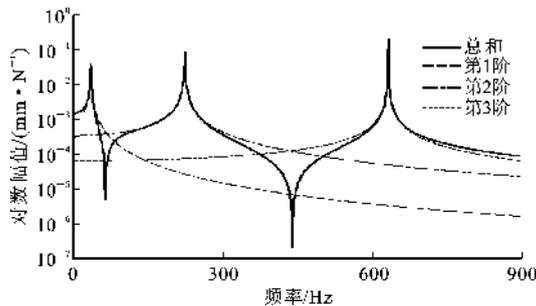


图 3 H_{11} 频率响应函数中提取的模态柔度系数
Fig. 3 Modal Flexibility Coefficient Extracted from H_{11} Frequency Response Function

和理论分析计算得到的位移进行比较,结果如图 5(c)所示。由图 5(c)可知,通过多参考点脉冲锤击法获得的模态柔度结果准确可靠。

实际桥梁结构的动力测试过程中,由于受外界噪声干扰及各种不确定性误差的影响,多参考点脉冲锤击法识别柔度是否能成功实现,需要进一步验证。下面结合 2 座实际桥梁的静动力测试,对多参考点脉冲锤击法在桥梁结构识别中的应用作进一步深入研究。

4 钢筋混凝土 T 形梁桥试验

实例 1 为一座 1930 年建造的带 18° 斜度的钢筋

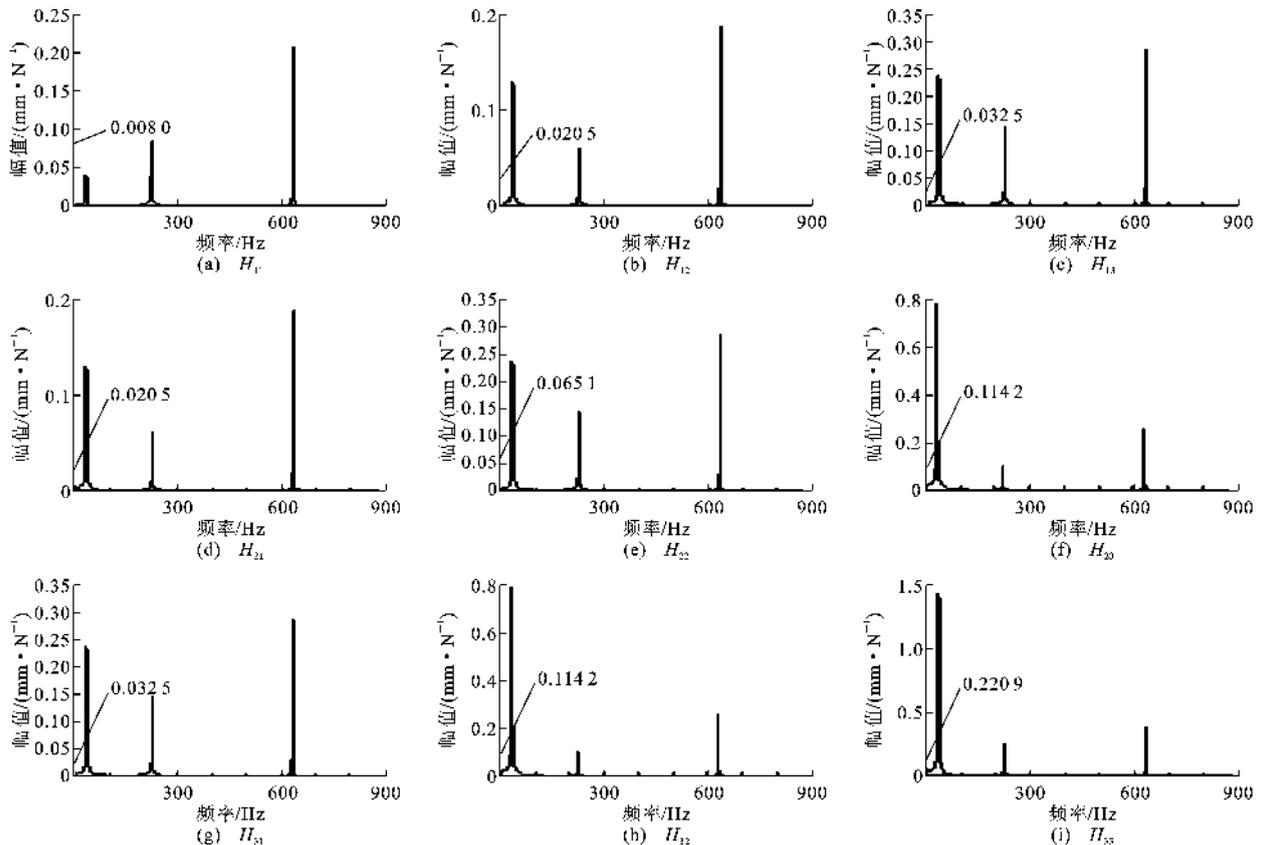


图4 频率响应函数矩阵中提取的模态柔度

Fig. 4 Modal Flexibility Extracted from FRF Matrix

混凝土 T 形简支梁桥,如图 6(a)所示。每跨长 14.40 m、宽 14.63 m。该桥桥面系总共有 6 根 1.22 m×0.61 m 的纵梁,设有混凝土横隔梁,并在其中一侧增加了横隔梁,如图 6(b)所示,此举增加了半幅桥面的质量和刚度。该桥图纸缺失,通过实测得到桥梁的截面资料如图 6(c)所示。该桥梁存在一定的病害,如柱和柱盖梁的混凝土剥离,梁表面的初始弯曲裂缝和剪切裂缝,以及铺装层的表面裂缝等。混凝土取样测试抗压强度为 5.3×10^7 Pa,混凝土弹性模量取值为 3.46×10^{10} Pa,钢筋弹性模量取值将近为 2×10^{10} Pa。

布设 40 个传感器用以测量桥梁静载试验的裂缝、梁钢筋的应变和垂直位移,如图 7(a)所示,图 7 中所示编号 1~6 代表该桥的梁编号,A~E 代表梁的横截面编号。采用 OPTIM MegaDAC 系统进行位移信号采集,数据的采样频率为 20 Hz。静载试验利用 6 台卡车进行,平均每台质量为 45 t 左右,对该桥逐级加载,从 3 台车加载到 6 台车,加载过程中无明显非线性现象出现。

另外,对该桥进行多参考点脉冲锤击法动力测试,获取其动力时域数据。脉冲锤击测试采用 PCB

手锤(Model 086D50)进行锤击激励。该力锤质量为 5.5 kg,锤头直径 7.6 cm,长 89 cm。该型号力锤能提供大约 22 kN 的锤击力,是 PCB 公司生产的最大型号力锤。在力锤端部配置不同硬度的锤头进行锤击,力锤与锤击点的接触时间不同,其范围大概为 0.001~0.005 s。PCB393C 加速度传感器安装在梁底部用于加速度信号测试,采用 HBM 数据采集系统进行数据采集。为获取较高的时域响应分辨率,采样频率设置为 2 400 Hz。使用 PCB 力锤敲击桥面 6 次进行平均,峰值力平均约为 18 kN。

利用复模态指示函数(Complex Mode Indicator Function, CMIF)峰值提取的方法对 6 点激励 24 点拾振的多参考点脉冲锤击测试进行模态参数识别,其奇异值峰值提取结果如图 7(b)所示,分析获得的前 8 阶模态云图如图 8 所示。该桥动力信号分析与模态柔度计算存在 2 个明显的困难:①该桥的阻尼比较大,峰值的提取容易造成误判,从而增加了问题的难度,为了准确获得该桥面板的振型,特利用有限元分析模态与测试模态相对应的方法进行模态辨识;②脉冲锤击法所获得的桥面板自由度与静载试验的自由度不对应,实际操作时需将该桥的

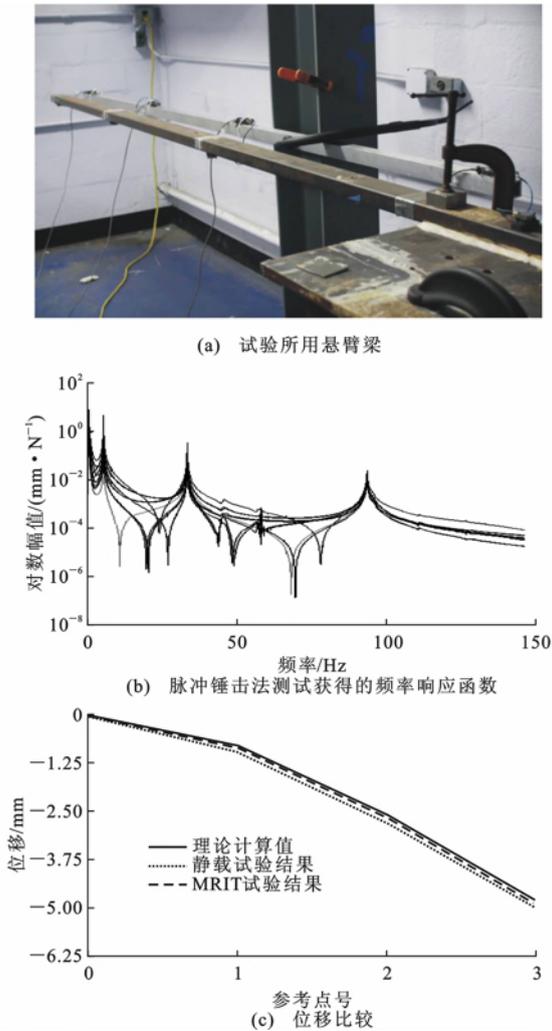


图 5 悬臂梁试验及位移结果比较

Fig. 5 Cantilever Beam Test and Comparison of Displacement Results

振型自由度扩展为较密的网格,再将车辆荷载恰好施加在网格点上,这 2 个问题的详细阐述可参见参考文献[25]。计算模态柔度所获得的位移与测试得到的实际位移的比较如图 9 所示,由图 9 可知两者吻合良好。另外各阶模态对于该位移的总贡献在图 9 中均有显示,低阶的模态对模态柔度的贡献越大,高阶的模态越小。因此模态柔度方法可作为静载试验的有益补充,并可用于结构的状态识别。

5 钢-混凝土组合梁桥试验

实例 2 为一座钢-混凝土组合桥梁结构,该桥建于 1983 年,目前有比较普遍病害,包括支座沉降、倾斜、桥面有较大的振幅以及桥面龟裂等。该桥有南北两幅共八跨可以利用,具有不同跨度的双向斜交、双向正交和单向正交及单向斜交各种形式,如图 10(a)所示。桥下基本可无限制到达,便于开展测



(a) 测试桥梁照片

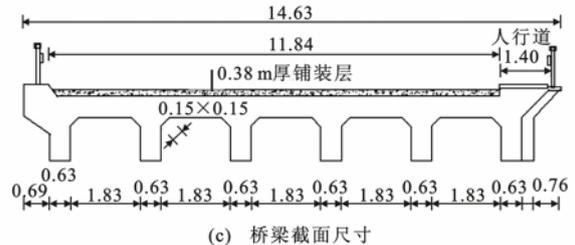
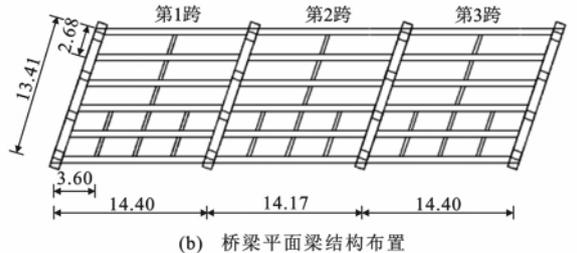


图 6 测试桥梁概况(单位:m)

Fig. 6 General Situation of Tested Bridge (Unit: m)

试。该桥桥面系由多根截面厚度变化的工字形钢梁组成。整根钢梁结构截面变化 5 次,增加了建模工作的复杂性。2 根梁之间利用压型钢模板连接,其上铺设钢筋网并浇捣混凝土,桥面梁之间设有对角的风撑以增强横向稳定性,这种形式是国外最常见的桥梁形式,该桥的详细描述可见参考文献[25]。南边第 2 跨被选为静动力测试的对象(图 10)。

利用多参考点脉冲锤击法对该结构进行振动测试。Drexel 大学 DI3 研究小组自主设计的反弹可控落锤被用于该试验的锤击激励。该落锤能够提供约 90 kN 的足够大的激励力,并可以对落锤的反弹进行控制,其具体设计见参考文献[26]。落锤能提高信号的信噪比,特别是在测试中有车辆运行的半封闭状态下。

测试过程中,采用 NI 9234 动力信号采集模块合并 CompactRIO 系统进行数据采集。利用 AB-Signal 公司的 ModalView 软件来进行试验控制和实时数据采集。采用 31 个 PCB393A03 系列地震加速度传感器进行振动测试,其测点布置如图 10(b)所示,图 10 中圆形标记表示该点为输出点,五边形标记表示该点同时为输出点和输入点,正方形标记则表示

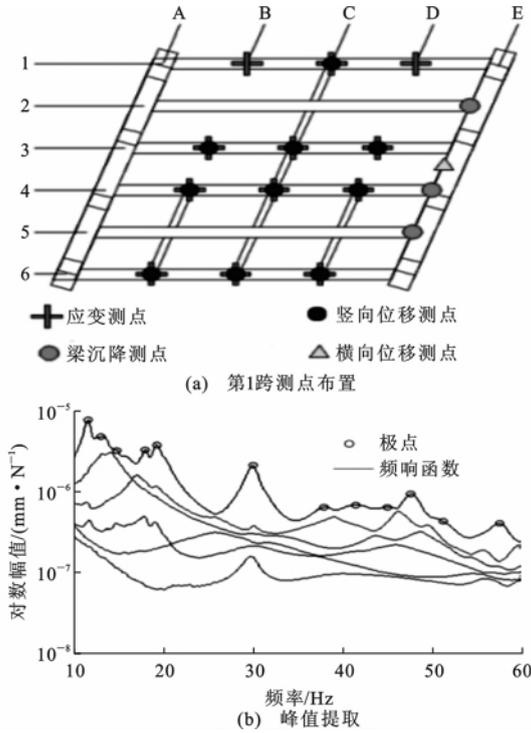


图7 传感器安装布置和峰值提取

Fig.7 Sensor Instrumentation Layout and Peak Extraction

该点还进行了位移测量。动力测试在晚上进行,留1条车道以供车辆通行。

桥面板的静载试验利用卡车进行加载,并同样

对南边第2跨进行变形测量。变形测量的位置与应变及加速度测试的位置重合。用 Lab View 软件进行程序编辑来驱动 NI 硬件系统,以实现实时数据观测。静载试验的结果基本保持在线性范围内,局部区域内的梁出现弱非线性现象。利用6个参考点进行脉冲锤击法测试,通过 CMIF 的峰值提取识别 [图 10(c)] 得到前9阶模态,如图 11 所示,图 11 中, X, Y 分别为测试区域宽度和长度。

受外界环境干扰和模态节点重合的影响,不同参考点的组合和选择,所获模态柔度矩阵的数值将有所不同。为了研究参考点选择对柔度矩阵的影响,选取了除边界激励点以外的6个敲击点用以进行参考点组合。本文考虑2种情况的影响,在6个参考点里选择3个参考点产生20种组合,另外考虑5个参考点的组合产生5种组合,总共25种工况。不同参考点的选择对各阶模态的贡献不同,因此计算出的模态柔度也有所不同。对梁上各测点进行卡车载荷下的位移估计,剔除掉部分与平均位移偏离很大的估计值,图12为梁3测点11和梁1测点12的位移,图12中横轴代表位移估计值,纵轴代表落入某一位移区间的组合数目。测试得到的静力位移和计算得到的模态柔度平均位移的相对误差见表1。梁8的测点由于其绝对变形值很小而没有进行计算。

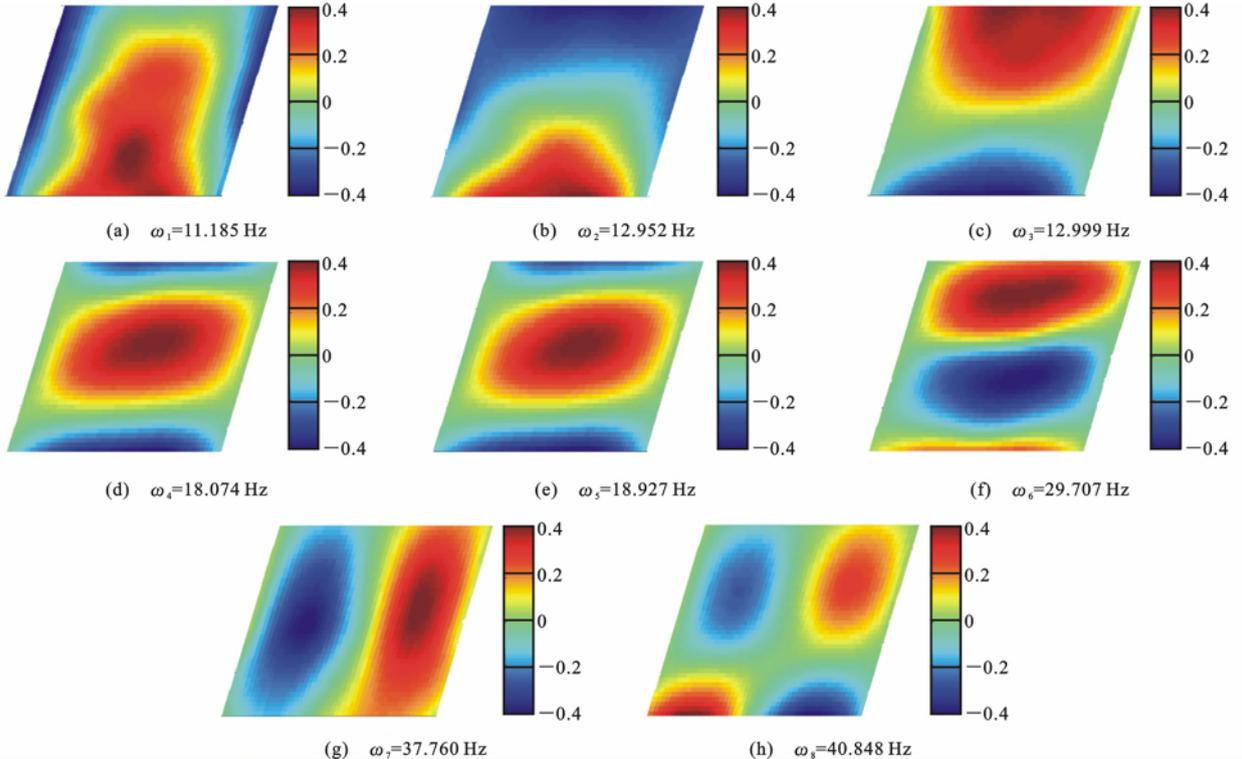


图8 多参考点脉冲锤击法前8阶模态云图

Fig.8 First 8 Modes Nephogram by MRIT

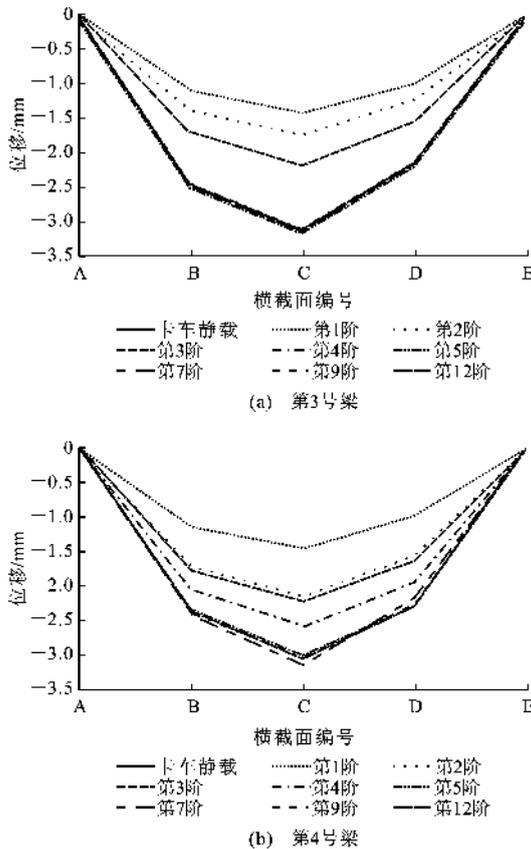


图 9 脉冲锤击法模态柔度位移与测试位移

Fig. 9 Modal Flexibility Displacement by Impact Test vs. Measured Displacement

表 1 测量位移与平均位移的比较

Tab. 1 Comparison of Measured Displacement and Average Displacement

梁号	测点	平均位移/cm	测量位移/cm	相对误差/%
梁 1	12	-1.19	-1.57	-31.92
梁 1	22	-1.45	-1.63	-12.28
梁 1	27	-1.04	-1.17	-12.20
梁 3	11	-1.75	-1.57	10.00
梁 3	20	-2.34	-2.16	7.61
梁 3	25	-1.42	-1.35	5.36
梁 6	10	-0.89	-0.91	-2.86
梁 6	19	-1.17	-1.14	2.18
梁 6	24	-0.53	-0.64	-19.00
梁 8	9	-0.08	-0.18	
梁 8	18	-0.08	-0.20	
梁 8	23	0.10	-0.05	

由表 1 可知:梁 3 和梁 6 位移比较的相对误差基本小于 10%,而梁 1 位移比较的相对误差较大,其中最大的相对误差发生在测点 12 处,表明该点附近可能存在潜在的结构缺陷。在数据分析发现异常后,返回实地考察,发现梁 1 架设在盖梁牛腿上,而

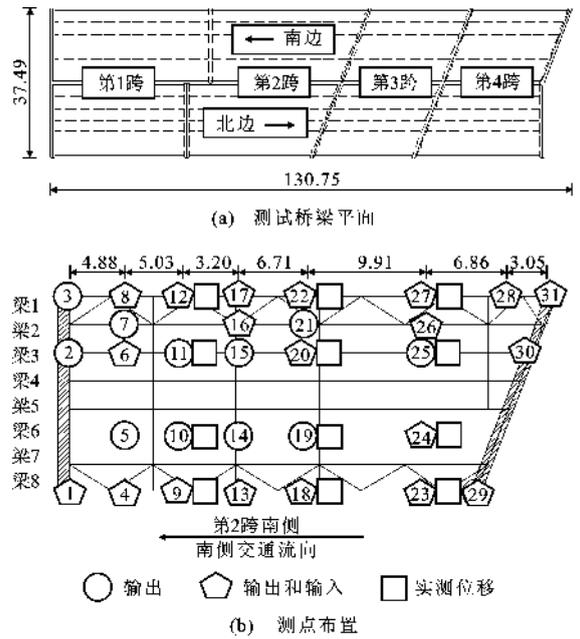


图 10 桥梁测点布置及 CMIF 模态极点提取 (单位:m)

Fig. 10 Instrumentation Layout for Bridge and Pick-peaking Mode from CMIF Method (Unit:m)

该牛腿出现了一些弯剪裂缝,如图 13 所示。出现这种结构的原因在于进行多参考点脉冲锤击法试验时,该裂缝呈闭合状态,动力信息不足以反映该损伤的存在,而当进行静力载荷试验时,该裂缝开展使梁出现非线性变形的现象,因此造成梁 1 上位移结果的差异较大。该实例表明了利用多参考点脉冲锤击法进行模态柔度预估,再与静载试验测试结果进行对比,能进行损伤位置的判别。另外,相对于确定性的方法,利用统计方法对位移进行预测,能更为有效地排除各种不确定性因素对结果造成的影响。

6 结 语

(1)利用频响函数在 0 Hz 位置处的截距来计算模态柔度,需将“加速度导纳”转化为“位移导纳”,为避免 0 Hz 处截距无穷大的情况出现,在实际计算过程中需要将多自由度体系转化为多个单自由度体系,再通过 0 Hz 处的频响函数截距求和的方式求解。

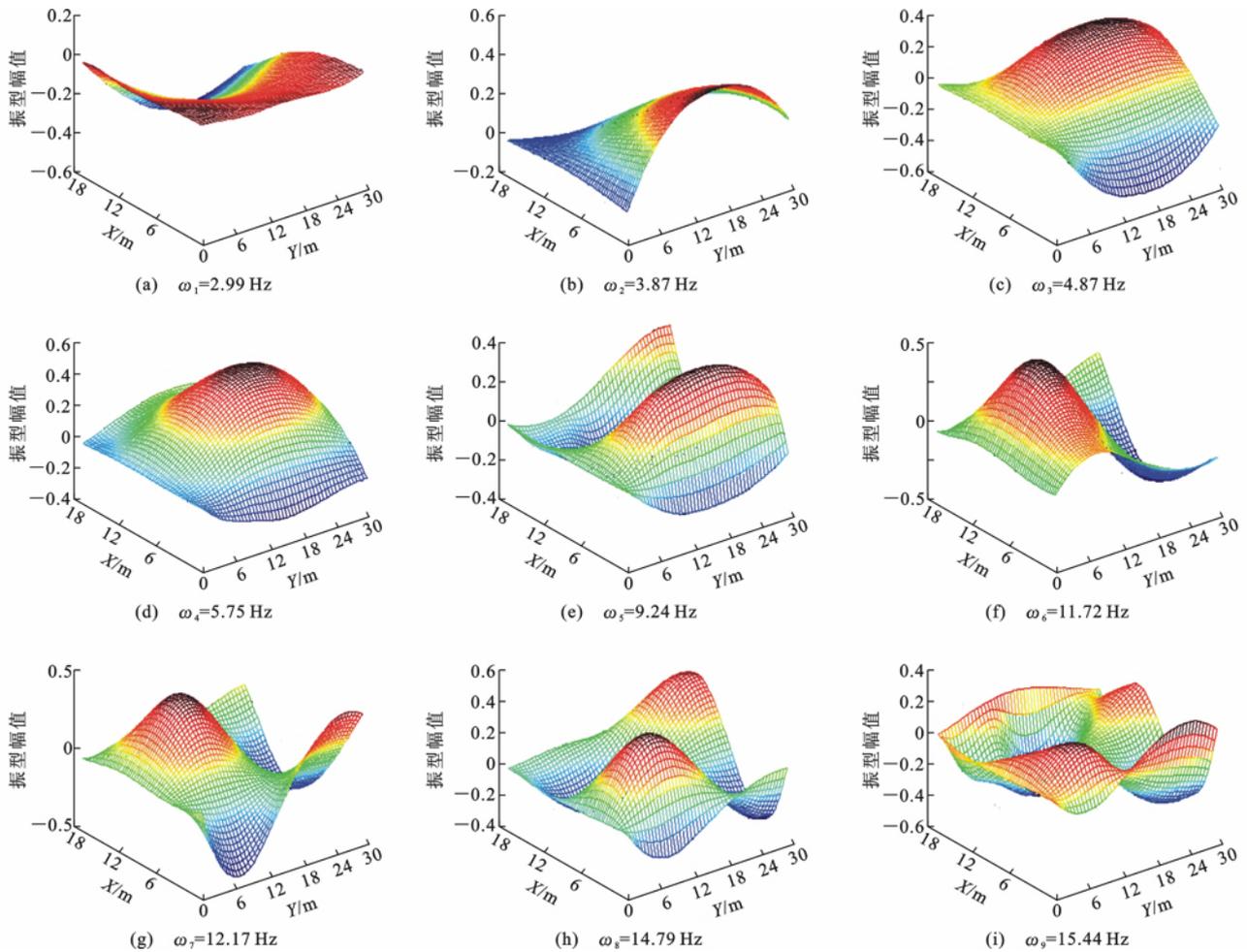


图 11 前 9 阶模态

Fig. 11 First 9 Modes

(2) 利用一个实验室三自由度悬臂梁的例子, 对比分析了理论计算、静载试验以及多参考点脉冲锤击法试验结果, 验证了多参考点脉冲锤击法试验用于模态柔度识别的可靠性, 为其进一步应用到实际桥梁结构中奠定了基础。

(3) 钢筋混凝土桥梁结构静动力试验结果表明, 高阻尼桥梁模态的识别存在着挑战性, 各阶模态对于模态柔度的贡献不同, 通常越低阶的模态对于模态柔度的贡献越大, 越高阶的模态对其贡献越小, 某阶模态的缺失将对最终位移预测结果产生很大的影响。模态柔度预测位移与实际桥梁位移的吻合表明结构具有良好的受力性能和状态。

(4) 钢-混凝土组合桥梁结构静动力试验结果表明, 参考点的选择对于最终模态柔度位移与实际测试位移的匹配影响很大, 各参考点对于各阶模态的贡献不一致。为了消除各种不确定性的影响, 利用统计方法预测桥面变形, 由此得到桥面位移测点位移值的合理估计, 其结果的不一致能有效指示出桥

梁结构的损伤。

(5) 多参考点脉冲锤击法动力测试, 能够作为桥梁静载试验的有力补充。通过测试获得的模态信息, 能够有效评估结构的安全性能。由于该方法需要能够检测得到外部激励的力信号, 适用于中小型桥梁结构。该方法在大型柔性结构桥梁中的运用, 需要进一步深入研究。

参考文献:

References:

- [1] 吉伯海, 傅中秋. 近年国内桥梁倒塌事故原因分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增): 495-498.
JI Bo-hai, FU Zhong-qiu. Analysis of Chinese Bridge Collapse Accident Causes in Recent Years[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S): 495-498.
- [2] 叶梅新, 黄琼. 钢结构事故研究[J]. 长沙铁道学院学报, 2002, 20(4): 6-10.
YE Mei-xin, HUANG Qiong. Study of Steel Structure Accidents[J]. Journal of Changsha Railway Universi-

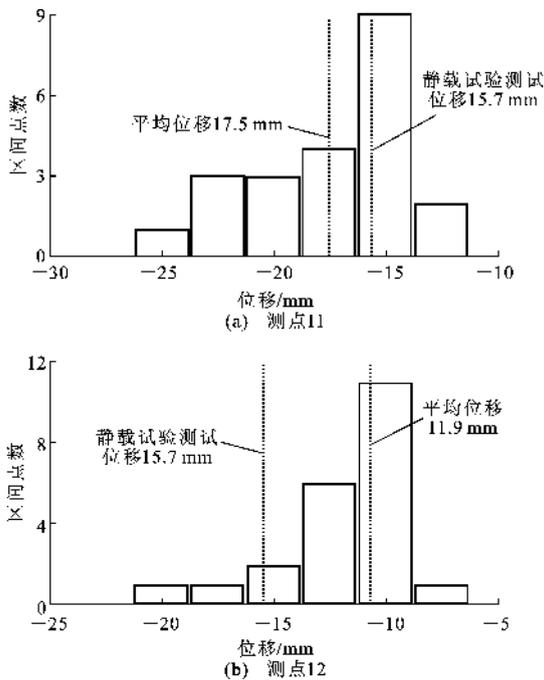


图12 测点11和测点12处的位移比较

Fig. 12 Displacement Comparison of Point 11 and Point 12



图13 盖梁裂缝

Fig. 13 Cracks on Pier Cap

ty, 2002, 20(4): 6-10.

- [3] 徐洪涛, 郭国忠, 蒲焕玲, 等. 我国近年来桥梁事故发生的原因与教训[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(11): 90-95.
XU Hong-tao, GUO Guo-zhong, PU Huan-ling, et al. Cause and Lessons of Bridge Accidents in China in Recent Years[J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(11): 90-95.
- [4] AKTAN A E, MOON F L. ASCE-SEI Performance of Structures Track Technical Committee; Structural Identification of Constructed Systems [R]. Reston: ASCE, 2006.
- [5] DOEBLING S W, FARRAR, C R, PRIME M B, et al. Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics; A Literature Review

[R]. Los Alamos; Los Alamos National Laboratory, 1996.

- [6] DOEBLING S W, FARRAR, C R, PRIME M B. A Summary Review of Vibration-based Damage Identification Methods [J]. Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2): 91-105.
- [7] SOHN H, FARRAR C R, HERMEZ F M, et al. A Review of Structural Health Monitoring Literature from 1996-2001 [R]. Los Alamos; Los Alamos National Laboratory, 2003.
- [8] 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.
- [9] LUSCHER D L, BROWNJOHN J M W, SOHN H, et al. Modal Parameter Extraction of Z24 Bridge Data [C]//KISSIMMEE F L, BETHEL C T. Proceedings of the 19th International Modal Analysis Conference. Santa Barbara; IMAC, 2001; 836-841.
- [10] AVITABILE P. Modal Space Back to Basics: Is There a Difference Between a Roving Hammer and Roving Accelerometer Test [J]. Experimental Techniques, 1998, 22(5): 9-10.
- [11] REYNDERS E, DEGRAUWE D, DEROECK G D, et al. Combined Experimental-operational Modal Testing of Footbridges [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(6): 687-696.
- [12] GENTILE C, CABRERA F. Dynamic Investigation of a Repaired Cable-stayed Bridge [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26(1): 41-59.
- [13] ALLEMANG R J. Vibrations; Experimental Modal Analysis [M]//HARRIS C M. Shock and Vibration Handbook, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1996: 1-79.
- [14] HOGUE T D, AKTAN A E, HOYOS A. Localized Identification of Constructed Facilities [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(1): 128-148.
- [15] RAGHAVENDRACHAR M, AKTAN A E. Flexibility by Multi-reference Impact Testing for Bridge Diagnostics [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(8): 2186-2203.
- [16] AKTAN A E, CATBAS N, TURER A, et al. Structural Identification: Analytical Aspects [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(7): 817-829.
- [17] CATBAS F N, AKTAN A E. Condition and Damage Assessment; Issues and Some Promising Indices [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(8):

- 1026-1036.
- [18] CATBAS F N, BROWN D L, AKTAN A E. Parameter Estimation for Multiple-input Multiple-output Modal Analysis of Large Structures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(8): 921-930.
- [19] 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.
- [20] 沈松, 应怀樵, 雷速华, 等. 用锤击法和变时基技术进行黄河铁路桥的模式试验分析 [J]. *振动工程学报*, 2000, 13(3): 492-495.
SHEN Song, YING Huai-qiao, LEI Su-hua, et al. Modal Test for Yellow River Bridge Exciting with Hammer [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2000, 13(3): 492-495.
- [21] ZHOU Y, PRADER J, DEVITIS J, et al. Rapid Impact Testing for Quantitative Assessment of Large Populations of Bridges [C]//FELIX W. Proceedings of Conference of Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security. San Diego: SPIE, 2011: 1-12.
- [22] CLOUGH R, PENZIEN J. *Dynamics of Structure* [M]. New York: McGraw-Hill, 1975.
- [23] 周云, 蒋运忠, 谢利民. 桥面板分片子结构模态柔度综合理论与试验 [J]. *中国公路学报*, 2015, 28(4): 35-43.
ZHOU Yun, JIANG Yun-zhong, XIE Li-ming. Substructural Modal Flexibility Integration Theory and Experiment of Bridge Deck [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(4): 35-43.
- [24] ZHOU Y, PRADER J, WEIDNER J, DUBBS N, et al. Structural Identification of a Deteriorated Reinforced Concrete Bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17(5): 774-787.
- [25] JEFFREY S W. Structural Identification of a Complex Structure Using Both Conventional and Multiple Model Approaches [D]. Philadelphia: Drexel University, 2012.
- [26] ZHOU Y, PRADER J, DEITIS J, et al. Application of Rebound Controlled Drop Hammer for Multiple Reference Impact Test on Bridges [C]//BENEDETTINI F, GENTILE C, BUSATTA F, et al. Proceedings of EVACES 2011: Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. Rarenna: EVACES, 2011: 1-8.

《中国公路学报》入选 2015 年全国“百强科技期刊”

2015年9月18日,在第三届中国(武汉)期刊交易博览会上,国家新闻出版广电总局公布了2015年中国“百强报刊”名单,99种报纸、100种社科期刊、100种科技期刊入选。《中国公路学报》继2013年入选全国“百强科技期刊”后再次获此殊荣。

据了解,今年各省(区、市)新闻出版广电局、中央报刊主管单位共推荐694种报刊参评,其中报纸213种、社科期刊292种、科技期刊189种。新闻出版广电总局专门成立评审委员会,制定严谨科学的评审规则、评审程序和评审标准,组织专家进行初审、复评和终评三轮严格评审,并对入围报刊进行了公示。在我国的1912种报纸、9966种期刊中,此次“百强报刊”入选者无疑是实力强大的领跑者,基本代表了我国报刊业发展的最高水平。这是2013年以后,新闻出版广电总局第二次开展“百强报刊”推荐活动。

《中国公路学报》再次入选“百强科技期刊”,是对学报办刊理念、质量、行业影响力的进一步肯定,学报将继续强化精品意识,发挥品牌引领示范作用,为中国公路交通行业的发展做出更大贡献。