

文章编号:1001-7372(2015)04-0035-09

桥面板分片子结构模态柔度综合理论与试验

周 云,蒋运忠,谢利民

(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:为了研究桥面板分片子结构模态柔度综合的理论和实现方法,对 2 种进行动力计算分析模态柔度的方法及其一致性进行了介绍。利用这 2 种方法获取不同子结构的质量归一的振型,并对子结构振型进行拼接得到整体结构的振型,进一步得到整体结构模态柔度(称为分片子结构模态柔度综合技术)。通过简支混凝土板的数值试验和实际钢-混凝土组合梁桥的真实试验,验证了利用分片子结构模态柔度综合技术测试识别桥面板模态柔度的可行性。在进行分片子结构模态测试的基础上,将单点输入多点输出(SIMO)子结构综合的模态参数与多点输入多点输出(MIMO)得到的整体结构模态参数进行比较。结果表明:单点输入单点输出(SISO)、SIMO 和 MIMO 方法均能准确获取桥梁结构激励点的模态柔度系数,并能通过子结构振型拼接的方法获得与静力方法相差很小的模态柔度矩阵,可作为传统卡车加载测试有效补充的新型桥梁测试方法。

关键词:桥梁工程;分片子结构模态柔度综合;多参考点脉冲锤击法;模态柔度;静载试验;数字信号中图分类号:U446.1 文献标志码:A

Sub-structural Modal Flexibility Integration Theory and Experiment of Bridge Deck

ZHOU Yun, JIANG Yun-zhong, XIE Li-min

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

Abstract: In order to research sub-structural modal flexibility integration theory and implementation, two dynamic calculation methods of modal flexibility and their consistency were introduced. Mass normalized vibration modes of different sub-structures could be got by the two methods, and the whole structural vibration mode could be obtained by combining two sub-structural vibration modes. Further more, the whole structural modal flexibility could be got, which was called sub-structural modal flexibility integration technique. The feasibility of recognizing bridge deck modal flexibility by using sub-structural modal flexibility integration test was verified through a numerical test of simply supported reinforced concrete slab and a real test of steel-concrete composite beam bridge. Based on the sub-structural modal test, sub-structural integration modal parameters with single input multiple output (SIMO) could be compared with whole structural modal parameters with multiple input multiple output (MIMO). The results show that single input single output (SISO), SIMO and MIMO can be used on the exciting point of real bridge to obtain the modal flexibility coefficient accurately. The modal flexibility matrix got by the method of combining two sub-structural vibration modes has a small difference with

收稿日期:2014-06-03

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51208190);湖南省自然科学基金青年科学基金项目(12JJ4053);

教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120161120029);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,工学博士,E-mail:zhouyun05@gmail.com。

that of static test. The presented method can be used as a beneficial supplement for traditional truck loading test in an efficient and economic way.

Key words: bridge engineering; sub-structural model flexibility integration; multiple-reference impact test method; modal flexibility; static test; digital signal

0 引言

桥梁是连接现代交通建设的“咽喉”，由于反复受到车轮的磨损冲击以及暴雨洪水、风沙冰雪、日晒冻融等的侵蚀，部分建筑材料性能随着时间延长开始发生衰变，桥梁的安全性能也因此受到威胁^[1]。由于设计施工达不到应有的要求，再加上汽车数量的增长以及汽车超载的频繁发生，中国桥梁出现使用功能退化，甚至发生垮塌事故，以致人员伤亡和财产损失，留下惨痛的代价和教训^[2-3]。为了随时掌握桥梁的安全状况，应加强对桥梁的健康监测，同时通过有效的方法来核实桥梁的承载能力。与西方发达国家相同，中国当前的桥梁检测多依靠视觉检查为主。桥梁结构检测评估决策方法的不可靠性导致需要更快速、可靠的桥梁评估方法为桥梁管理部门提供有力的决策支持。

对于桥梁结构性能的评估，需要进行结构识别。结构识别(St-Id)的概念是由 Liu 等^[4]在 1978 年提出来的，被 Doebling 等^[5]定义为利用试验数据校验的模型来进行与参数相关的结构反应预测。结构识别的范式被描述为理论-试验-决策的 6 步综合图^[6]，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。

从 1980 年开始，Aktan 等开始利用多参考点脉冲锤击测试(MRIT)进行了一系列的桥梁试验。脉冲锤击法相比随机振动法最大的优势在于能够获得模态质量，Hogue 等^[7-12]利用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，并发现模态柔度能成为桥梁结构和性能评估的极好指标。根据 MRIT 激励点和拾振点的数目，MRIT 可分为单输入单输出(SISO)、单输入多输出(SIMO)、多输入多输出(MIMO)和多输入单输出(MISO)四种类型。MIMO 是测试时常用一种方法，利用多参考点激励，可以使输入点处的振幅变得更均匀，减小了非线性因素的影响，频率响应函数矩阵中的不同列和不同行可以同时确定，提高了频率响应函数的一致性，因此其测得的频率响应函数的准确性较高。在理论

上，把一个单独的加速度传感器放置在激励点处就能得到结构所有的频率、阻尼比和单点模态振型分量。SISO 和 SIMO 方法的缺点在于区分可疑的或者模棱两可的模态极点时需人为判断，且很难区分出轴对称结构的重复模态，利用一个单独的输入点来激发结构模态很容易遇到该激励点与结构某阶振型节点相重合，其优点是不需要进行多点激励，能节约锤击时间。

在实际桥面板脉冲锤击法测试中，通常需要中断桥面交通，以便布设大量的传感器，因此需要耗费大量的人力、物力和财力。如果能够进行分片子结构试验，即先测试桥面板某区域子结构的模态以及模态柔度，再测试其他区域的模态柔度，最后将各分片子结构模态柔度综合起来，得到整个桥面板的模态特性及整体模态柔度，进一步对桥面板的性能进行评估，这样可避免测试时交通中断，并节约传感器布设的个数，从而节省人力、物力、财力和时间。本文中主要通过理论分析结合实验室试验和现场桥梁试验来验证该方法的可行性。

1 分片子结构脉冲锤击法模态测试基本思想

分片子结构模态参数测试基本思路是利用脉冲锤击法的基本原理，在桥面板上进行局部分片锤击测试，获得局部区域的模态柔度系数，然后将各局部区域的子结构柔度集成。脉冲锤击法的实施见图 1(a)，可以利用轮载机动式落锤，该落锤的核心部分为自由式落锤，落锤能从一定的高度自由落下，利用反弹控制装置将落锤刹住防止其反弹。该机动式落锤可以由牵引车辆拖拽至结构任何地方，车上可安装信号处理系统。落锤从一定高度落下后能保持每次的锤击力基本相同，轮载式落锤下部有传感器安装臂，安装臂上可安装各种传感器如加速度、速度、位移或声学传感器等。轮载车辆沿着桥面板一条车道向行驶，进行单点输入多点输出的锤击并获取锤击信号，测试完一点后，再移动到另一点进行锤击，如图 1(b)所示，直至将整桥测试完毕，最终将各锤击点独自锤击识别的局部模态柔度整合得到整个桥面板的全局模态柔度。

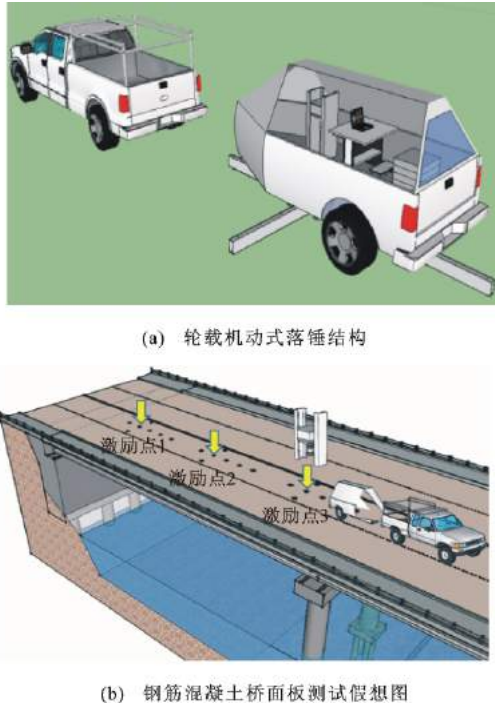


图 1 轮载机动式落锤测试钢筋混凝土桥面板假想图
Fig. 1 Image of Reinforced Concrete Bridge Deck Tested by Wheel Selfpropelled Drop Hammer

2 模态柔度计算方法

柔度的物理意义为单位力作用下结构产生的位移。当结构处于线弹性状态时,理论上模态柔度与静力柔度相等,当有足够多的模态被利用时,该方法被证明是一种精确的方法。Clough 等^[13]在 1975 年第 1 次提出模态柔度的概念,Raghavendrchar 等^[8]指出模态柔度是反映桥梁安全状态评估的可靠指标,可以被用来验证模态试验结果。现有 2 种方法计算结构的模态柔度:方法 1,基于质量归一的模态振型和模态频率;方法 2,在频率响应函数 $\omega = 0$ Hz 处提取模态柔度。

2.1 基于质量归一振型的计算方法

把自然频率和模态振型变换为单位载荷下的柔度矩阵,如式(1)~(3)所示,即

$$f_{m \times n} = \Phi \Omega \Phi^T \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} f_{1,1} & \cdots & f_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ f_{n,1} & \cdots & f_{n,n} \end{bmatrix}_{n \times n} = \begin{bmatrix} \varphi^1(1) & \cdots & \varphi^m(1) \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi^1(n) & \cdots & \varphi^m(n) \end{bmatrix}_{n \times m} \cdot \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_1^2} & 0 & 0 \\ 0 & \vdots & \\ 0 & \cdots & \frac{1}{\omega_m^2} \end{bmatrix}_{m \times m} \begin{bmatrix} \varphi^1(1) & \cdots & \varphi^m(1) \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi^1(n) & \cdots & \varphi^m(n) \end{bmatrix}_{m \times n} \tag{2}$$

$$f_{i,j} = \sum_{r=1}^m \frac{\varphi^r(i)\varphi^r(j)}{\omega_r^2} \tag{3}$$

式中: $f_{m \times n}$ 为柔度矩阵,其中下标 n 为结构自由度,下标 m 为模态阶数; Φ 为质量归一的振型矩阵; $f_{i,j}$ 为柔度矩阵中第 i 行第 j 列的模态柔度系数, $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, n$; Ω 为模态圆频率平方的倒数按照降序排列的对角矩阵; $\varphi^m(n)$ 为振型矩阵中的振型模态分量; ω_r 为圆频率, $r=1, 2, \dots, m$ 。

在实践中对复杂结构很难获得较为精确的质量矩阵,因此难以获得质量归一的振型,从而限制了该方法的应用。该方法的特点是,对于一个 n 自由度结构,无论使用 1 阶模态还是逐步扩大到 m 阶模态,所得到的模态柔度均为 $n \times n$ 阶。

2.2 在频率响应函数 $\omega = 0$ Hz 处提取模态柔度的计算方法

脉冲冲击法试验提供了另外一种求解模态柔度的可能性,质量归一系数可以直接从测量的频率响应函数中提取出来。利用模态参数估计算法^[14],将第 p 点和第 q 点之间的频率响应函数在 $\omega = 0$ Hz 时写成式(4)所述形式,即

$$H_{pq}(\omega) = \sum_{r=1}^m \left(\frac{\Psi_{pr}\Psi_{qr}}{-\lambda_r M_{Ar}} - \frac{\Psi_{pr}^* \Psi_{qr}^*}{\lambda_r^* M_{Ar}^*} \right) \tag{4}$$

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;* 代表共轭复数; λ_r 为第 r 阶复模态频率; Ψ_{pr} 为第 p 点第 r 阶模态的模态振型系数, Ψ_{qr} 为第 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, $M_{Ar} = 1/Q_{Ar}$, Q_{Ar} 为第 r 阶模态的模态比例因子。

模态柔度矩阵可表示为^[15]

$$f_{m \times n} = \begin{bmatrix} f_{11} = H_{11}(\omega=0) & \cdots & f_{1q} = H_{1q}(\omega=0) \\ \vdots & & \vdots \\ f_{p1} = H_{p1}(\omega=0) & \cdots & f_{pq} = H_{pq}(\omega=0) \end{bmatrix} \tag{5}$$

对于线弹性状态的结构,该方法所求得的柔度与静力柔度近似,如(4)式所示,对于由多阶模态集成得到的结构,越低阶的模态对柔度的贡献越大,且随着阶数的增加,其贡献越低。

2.3 2 种方法的一致性

以上 2 种模态柔度分析方法虽然在表达式上有所不同,但能相互转化,当模态向量为质量归一的模态振型时,其频率响应函数可写成

$$H_{pq}(\omega) = \sum_{r=1}^m \left(\frac{Q_r \varphi_{pr} \varphi_{qr}}{-\lambda_r} - \frac{Q_r^* \varphi_{pr}^* \varphi_{qr}^*}{\lambda_r^*} \right) \tag{6}$$

式中: Q_r 为质量归一化振型对应的模态比例因子; φ_{qr} 和 φ_{pr} 分别是质量归一的第 q 和 p 点第 r 阶模态

的振型系数。如果结构是比例阻尼结构, Q_r 与模态质量以及模态频率的关系如式(7)所示^[16], 当其为质量归一的模态振型时, 式中质量矩阵 $M_r = 1$ 。

$$Q_r = \frac{1}{2j\omega_r M_r} \quad (7)$$

当式(4)等于式(6)时有

$$Q_{A_r} \Psi_{pr} \Psi_{qr} = Q_r \varphi_{pr} \varphi_{qr} \quad (8)$$

在脉冲锤击法的信号分析和处理中, Q_{A_r} , Ψ_{pr} 和 Ψ_{qr} 为已知参数, 能直接从模态分析中提取出来, 而 Q_r 可以由式(6)直接计算得到。当拾振点与输入点相同(即 $p=q$)时, 则该点称为驱动点或参考点, 这时式(8)可写成

$$Q_{A_r} \Psi_{pr} \Psi_{qr} = Q_r \varphi_{pr} \varphi_{pr} \quad (9)$$

联立式(7), (9), 可得第 p 点的质量归一的模态振型系数, 其计算式为

$$\varphi_{pr} = \sqrt{2j\omega_r Q_{A_r}} \Psi_{pr} \quad (10)$$

则对第 r 阶模态其他点的模态振型系数能直接从式(8)中求得, 即

$$\varphi_{qr} = Q_{A_r} \Psi_{pr} \Psi_{qr} / (Q_r \varphi_{pr}) \quad (11)$$

利用在参考点求解出的模态振型系数, 从而获得其他点的相应振型系数, 这样就能把多参考点模态分析中获取的振型转化为质量归一振型。获得了质量归一振型之后, 则可利用方法 1 求解出模态柔度。这种处理手段为 2 种模态柔度的计算方法之间建立了一座桥梁, 且在处理过程中, 并未用到结构的质量矩阵, 因为对于复杂结构而言, 质量矩阵很难预先准确获得。

2.4 子结构模态综合

利用分片子结构模态综合的策略进行桥面板测试时, 将遇到以下的技术难题, 即无论采用单点激励多点拾振 SIMO, 还是多点激励多点拾振 MIMO, 获得的频率响应函数矩阵行数均与传感器拾振点个数有关。对某点进行 SIMO 试验, 能获得与拾振点数目相同行数的频率响应函数, 并能得到与自由度和模态阶数相同的方阵, 这样得到的模态柔度也是方阵。要将 2 个子结构的方阵综合起来, 常规的办法如图 2 中思路 1 所示, 该方法得到的整体柔度矩阵将出现右上角和左下角的缺失。图 2 中: F_{RF} 为频响函数矩阵; S_{hape} 为振型矩阵; F_{lex} 为柔度矩阵; Ψ 为模态振型系数; φ 为质量归一的模态的振型系数。为了解决该问题, 则需要利用第 2.3 节中的方法。首先利用多参考点脉冲锤击法方法 2 获取子结构的质量归一的模态振型, 然后将 2 个子结构对应于同阶的模态振型进行拼接, 在振型上把子结构的维数扩

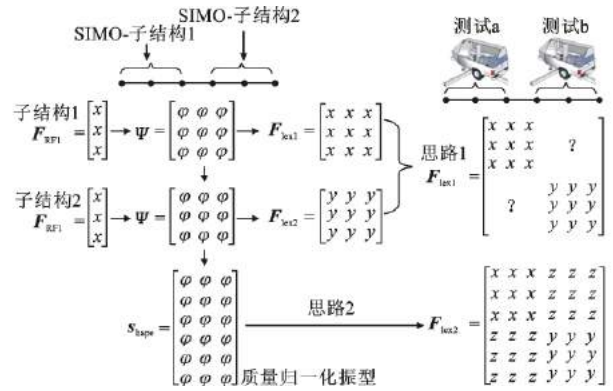


图 2 子结构综合示意

Fig. 2 Diagram of Sub-structural Integration

充为 n' 维, 再利用方法 1 进行计算, 最终得到 n' 维的柔度满阵, 该方法能够将直接拼接时缺失的右上角和左下角的矩阵填满。本文将结合算例的数值试验和实桥试验来验证该思路的可行性。

3 简支混凝土板的数值计算

为了验证该方法的有效性, 设计长、宽、厚分别为 10.972 8, 2.743 2, 0.254 m 的简支混凝土板, 边界条件采用一边固定铰支, 一边滚动支座。简支混凝土板的弹性模量为 3.448×10^5 MPa, 密度为 2.4×10^3 kg · m⁻³。在进行模拟脉冲锤击法试验中, 将结构的有限元模型划分为 36 个子单元(长、宽均为 52.4 mm), 如图 3 所示。

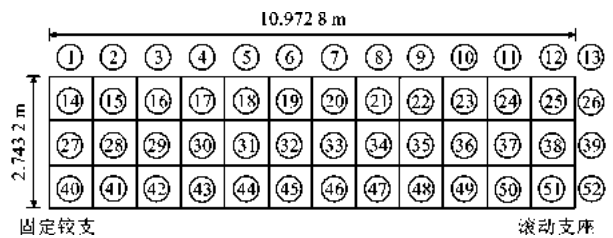


图 3 板的有限元划分

Fig. 3 FEM Division for Simulated Slab

在结构通用有限元计算软件 SAP2000 中建立该板的模型, 对其中 1 个测点施加 1 kN 的三角形脉冲力, 持续时间为 0.002 s, 采用 Newmark- β 法对板进行线弹性状态下的动力时程分析, 得到结构各输出点的加速度响应信号以及锤击输入点的力信号, 即完成了 1 次 SIMO 数值测试。如果对模型中不同测点分别施加脉冲力, 并利用动力时程分析得到其力信号和响应信号, 即完成了 1 次 MIMO 数值测试。将数值试验得到的力信号和响应信号导出, 然后进行信号分析, 分析其频率响应函数并进行模态参数提取, 得到结构的频率、振型等动力信息, 最后

根据方法 2 计算模态柔度。

现设计 5 种工况,并计算在第 29 点的模态柔度系数。不同工况下模态柔度系数的比较如表 1 所示,可见,各阶模态柔度系数识别结果基本相似。在无噪声干扰的情况下,模态柔度系数差异的主要原因在于结构模态提取过程中,激励点和拾振点位于振型节点上,造成了部分模态的缺失。

表 1 不同工况下模态柔度系数的比较

Tab. 1 Comparison of Modal Flexibility Coefficients in 5 Cases

| 工况 | 输入点 | 输出点 | 模态柔度系数/ (10 ⁻⁵ mm · N ⁻¹) |
|------------|---------------|------------------|---|
| 工况 1(SISO) | 29 | 29 | 6.743 |
| 工况 2(SIMO) | 29 | 3, 16, 29, 42 | 6.571 |
| 工况 3(SIMO) | 29 | 27~39 共 13 个点 | 6.400 |
| 工况 4(MIMO) | 29, 30 | 16, 28~31, 42 | 6.571 |
| 工况 5(MIMO) | 16, 28~31, 42 | 16, 28~31, 42 | 6.628 |

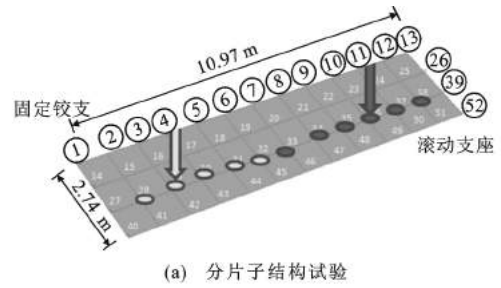
为了验证分片子结构模态综合理论的可靠性,设计如图 4(a)所示的子结构综合工况,将结构沿着板纵向划分为 2 个子结构:子结构 1 分别为第 29 点输入,第 28~32 点输出;子结构 2 为第 36 点输入,第 33~38 点输出。对子结构 1 和子结构 2 分别进行有限元脉冲锤击动力分析,将导出的时域信号进行模态分析,其各自的模态提取分别如图 4(b), (c) 所示。采取复模态指示函数(CMIF)峰值提取的方法进行模态参数识别,识别得到的前 8 阶模态频率和阻尼比如表 2 所示,同时用 SAP2000 进行整体结构模态分析得到的频率也在表 2 中列出。利用子结构 SIMO 试验获取结构的模态之后,再利用子结构综合的方法将子结构的振型进行综合,得到的前 3 阶模态如图 5 所示,由图 5 可见分段试验的模态拼接顺滑,与计算模态振型一致,可见该方法的准确性较好。如果参考点遇到振型节点,如子结构 2 的第 6 阶模态,该阶模态将无法识别。

将识别得到的子结构模态柔度系数与真实模态柔度系数进行比较,获得的子结构 1(5×5 阶)和子结构 2(6×6 阶)柔度系数相对误差如图 6 所示,可见柔度系数相对误差均在 2% 之内,说明该方法在理论上可行。

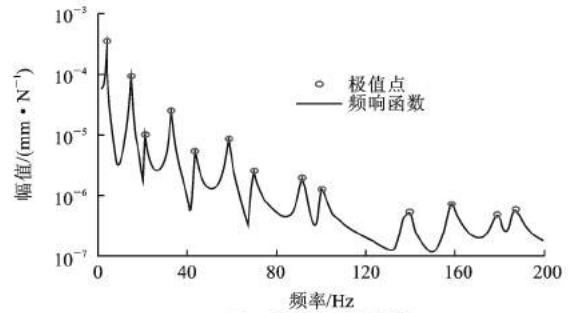
4 钢-混凝土组合梁桥试验

4.1 桥梁概况

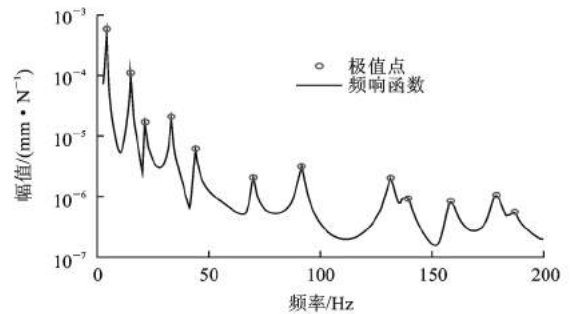
1 座三跨简支钢-混凝土组合梁桥试验被用来



(a) 分片子结构试验



(b) 子结构 1 模态提取



(c) 子结构 2 模态提取

图 4 分片子结构模态测试

Fig. 4 Sub-structural Modal Test

表 2 前 8 阶模态的分析

Tab. 2 Analysis of First 8 Modes

| 阶数 | 子结构 1 | | 子结构 2 | | SAP2000 频率 计算结果/Hz |
|----|----------|---------|----------|---------|-----------------------|
| | 频率/Hz | 阻尼比/% | 频率/Hz | 阻尼比/% | |
| 1 | 3.626 6 | 4.209 1 | 3.626 8 | 4.194 6 | 3.628 7 |
| 2 | 14.558 8 | 1.740 0 | 14.558 8 | 1.732 6 | 14.559 7 |
| 3 | 20.893 1 | 1.035 3 | 20.890 9 | 1.200 2 | 20.876 7 |
| 4 | 32.847 4 | 1.333 4 | 32.847 7 | 1.333 6 | 32.849 5 |
| 5 | 43.579 4 | 1.067 4 | 43.577 4 | 1.089 2 | 43.558 3 |
| 6 | 58.495 3 | 1.198 0 | | | 58.502 1 |
| 7 | 69.719 4 | 0.968 1 | 69.649 9 | 1.085 5 | 69.635 2 |
| 8 | 91.454 6 | 1.136 4 | 91.471 6 | 1.140 7 | 91.486 4 |

进一步验证该方法的可靠性,如图 7 所示。每跨长 14.94 m,宽 15.54 m,混凝土人行道宽 1.07 m,桥梁为双向四车道。桥梁上部结构由钢筋混凝土桥面板和 7 根间距为 2.18 m 的简支工字形钢梁组成,下部结构为钢筋混凝土支墩。桥面板、人行护栏等部件在 2004 年进行了翻修。测试的桥梁结构为一跨

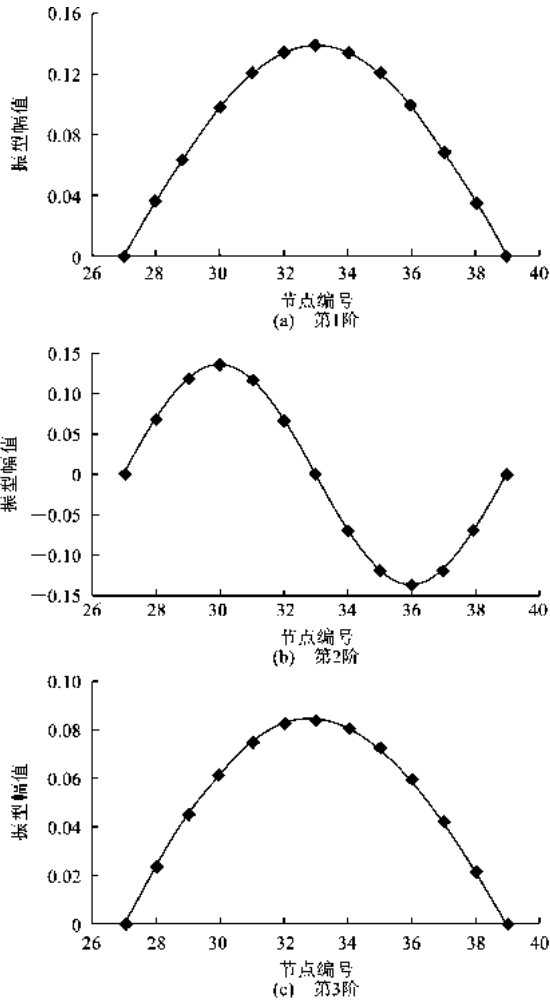


图5 子结构集成前3阶模态

Fig. 5 First 3 Modes During Sub-structural Integration

桥梁结构的半幅,限制2条车道车辆通行。笔者对该跨半幅桥面进行了多参考点脉冲锤击法试验。利用反弹可控落锤来进行锤击法测试。该试验的目的主要是验证在实际工程中模态柔度计算的可靠性以及分片子结构模态柔度综合的可行性。

4.2 多参考点脉冲锤击法测试

脉冲锤击法测试采用反弹可控落锤,落锤能提供大约111 kN的力。在此次试验中,数据采集系统采用美国国家仪器(National Instruments)公司系统,同时利用ABSignal公司的ModalView软件进行信号采集。经过校验,共有24个PCB393A-03加速度传感器被用来测试垂直于桥面的振动,如图8(a)所示。其中7个位置被用来进行锤击法试验,分别是第⑩,⑪,⑭,⑯,⑰,⑱,⑳点^[17]。

脉冲锤击试验的采样频率设置为1 600 Hz,对原始时域信号加矩形窗和指数窗以减少信号的泄露。加窗后的时域信号采用16 384点的快速傅里

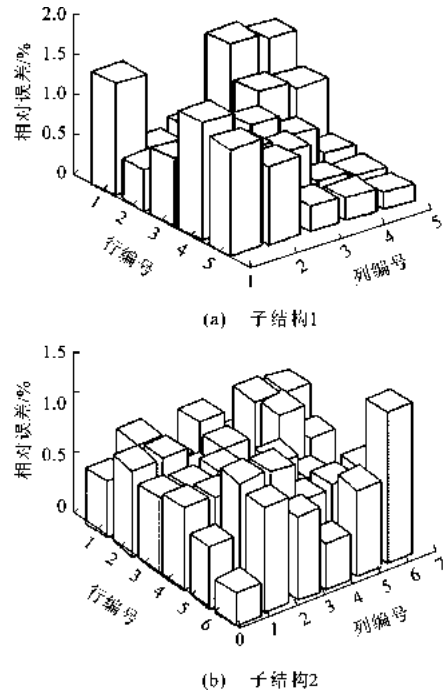
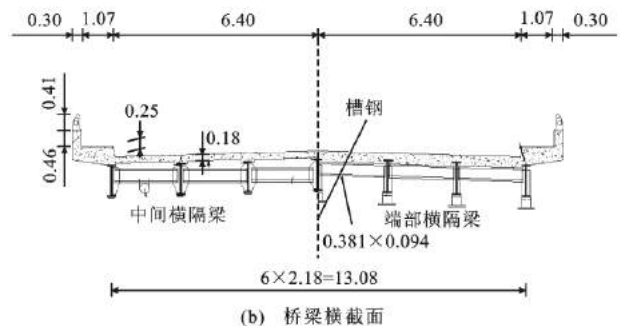


图6 分片子结构模态柔度系数相对误差

Fig. 6 Relative Error of Sub-structural Modal Flexibility Coefficient



(a) 测试桥梁



(b) 桥梁横截面

图7 桥梁概况和截面示意(单位:m)

Fig. 7 Diagram of General Situation and Cross Section of Tested Bridge (Unit:m)

叶变换(FFT)进行自功率谱和互功率谱计算,该频率响应函数采用 H_1 算法,并用CMIF模态分析方法提取极点、留数和放大因子。进行模态提取时频率响应函数的峰值提取如图8(b)所示,识别得到的

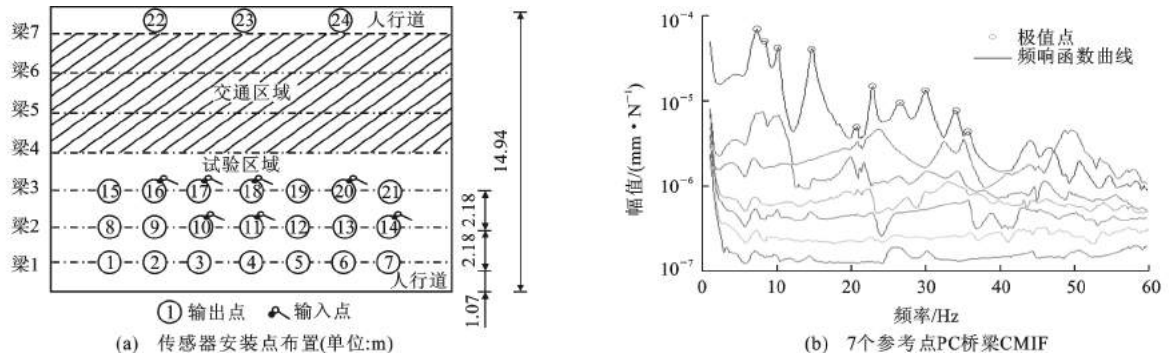


图 8 测试点布置和模态提取

Fig. 8 Instrument Layout and Modal Parameter Extraction

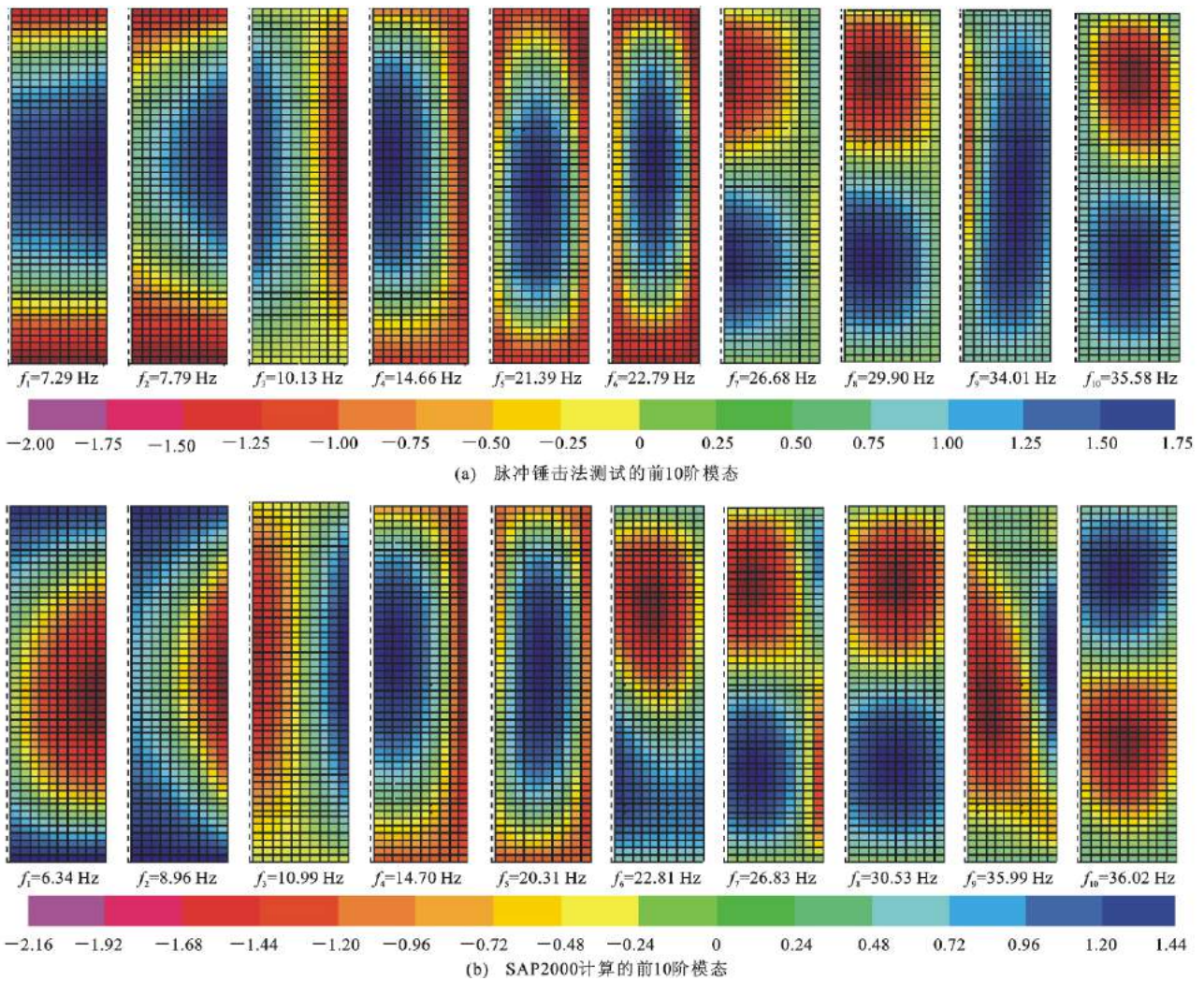


图 9 实测模态和 SAP2000 计算模态对比

Fig. 9 Comparisons of Tested Modes and Calculated Modes by SAP2000

振型如图 9(a)所示。采用 SAP2000 有限元软件对该桥进行建模,混凝土抗压强度取 $f_c = 27.6 \text{ MPa}$,弹性模量 $E_c = 2.15 \times 10^4 \text{ MPa}$;钢材屈服强度 $f_y = 344.7 \text{ MPa}$,弹性模量 $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。纵梁和横隔梁采用 Beam 单元,混凝土面板采用 Shell 单

元,钢梁和混凝土之间的连接采用 Link 单元进行模拟,整桥共划分为 2 223 个 Beam 单元,6 048 个 Shell 单元,1 722 个 Link 单元。利用 SAP2000 有限元分析得到的结构前 10 阶频率如图 9(b)所示。由图 9 可见,多参考点锤击法很好地识别了结构的

振动特性。其中第 1 阶频率计算值与测试值之间差异相对其他阶较大,这是因为进行实桥动力测试时,地基、环境温度及模态试验方法等因素对低阶模态的影响较大,而这些因素难以在有限元模型中准确地反映,故低阶频率测试值与计算值的差异较其他阶大。

4.3 子结构测试

为了验证分片子结构综合技术的可行性和可靠性,特设计了 2 种工况进行分析:工况 1 为在第 10 点进行敲击,并在其他 21 个点布设传感器进行拾振,工况 2 为子结构分别在第 10 点和第 14 点局部区域激励和拾振的 2 种测试工况,如图 10 所示。

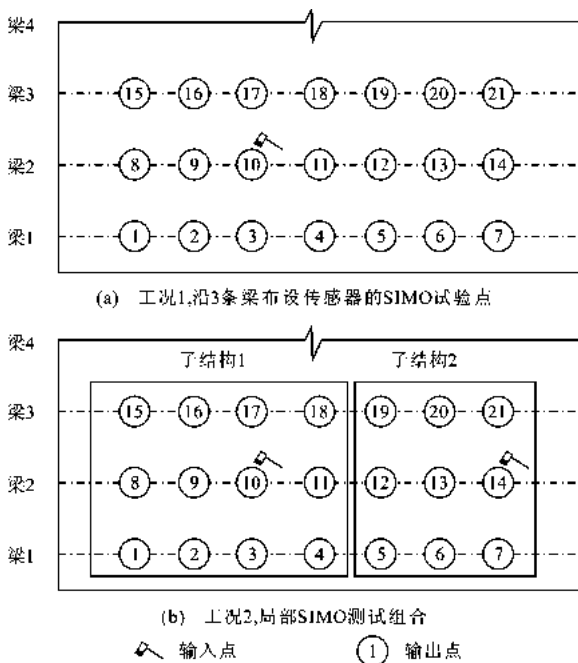


图 10 整体 SIMO 测试和局部 SMIO 测试工况

Fig. 10 Overall Test by SIMO and Local Test by SIMO

第 1 种工况为用 SIMO 进行模态柔度识别的可靠性,用 CMIF 方法进行模态提取;第 2 种工况是为了测试分片子结构集成的可能性,利用 SIMO 方法对 2 个子结构分别进行测试,然后再进行子结构综合,2 种工况用 CMIF 方法进行模态提取,如图 11 所示。所获得的频率和振型 MAC 值与 MIMO 方法的比较如表 3 所示。表 3 中,频率差是指不同测试方法得到的频率与 MIMO 方法得到频率的差值,MAC 值是衡量不同测试方法得到的振型的相关程度,该值越接近 1,说明 2 个振型的相关程度越高。由表 3 可知,除了第 3 阶模态差别稍大,用 SIMO 和 SIMO 子结构综合与 MIMO 获得的模态差别不大。MIMO 相对于 SIMO 而言,测得频率响应函数估计

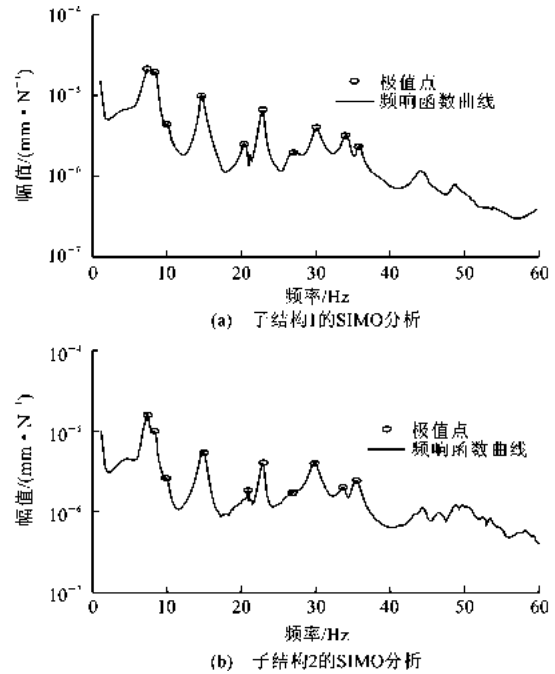


图 11 工况 2 子结构 SIMO 测试的模态提取

Fig. 11 Modal Extraction of Sub-structural Test by SIMO in Case Two

的准确性和一致性均得到提高。因此采用 MIMO 识别模态比 SIMO 在理论上更可靠,第 3 阶模态差异较大的原因可能是采用 SIMO 法识别模态时,锤击点恰好位于第 3 阶的振型节点附近,从而导致该阶模态的拾取误差较大,这也是 SIMO 方法的一个缺点。但从振型上判断,2 种方法获得的该阶模态振型基本一致。

利用柔度系数矩阵预测结构在均布荷载作用下的位移值称为 ULS 值,该值是比较柔度识别方法是否准确的最直观参数。为了比较 ULS 值的影响,在每个点施加 4 450 N 的载荷,然后直接提取进行比较,如图 12 所示。可见,SIMO 的工况 1 在第 3 号梁的结果误差较大,而 SIMO 的子结构模态柔度综合结果与 MIMO 结构基本符合,表明子结构模态柔度综合法能够应用到实际工程中。

5 结语

(1)利用脉冲锤击法进行结构柔度测试,可以采用 SISO, SIMO 和 MIMO 等多种形式。在理论上可以利用质量归一化的振型结合圆频率方法直接计算结构的柔度矩阵,但由于实际结构精确的质量矩阵无法获取,该方法在实际工程中的应用受到了限制,因此可采用在频率响应函数 $\omega=0$ Hz 位置处获取截距的方法来求得。

表 3 不同工况下模态频率和 MAC 值比较

Tab. 3 Comparison of Modal Frequencies & MAC Values in Different Cases

| 阶数 | MIMO | 工况 1(SIMO) | | | 工况 2(SIMO) | | | | |
|----|-------|------------|--------|---------|----------------|--------|----------------|-----------|---------|
| | 频率/Hz | 频率/Hz | 频率差/% | MAC 值 | 子结构 1 频率/Hz | 频率差/% | 子结构 2 频率/Hz | 频率差/ % | MAC 值 |
| 1 | 7.29 | 7.78 | 6.71 | 0.999 5 | 7.77 | 6.54 | 7.35 | 0.82 | 0.999 6 |
| 2 | 7.79 | 7.97 | 2.35 | 0.991 1 | 7.96 | 2.20 | 7.57 | -2.80 | 0.986 2 |
| 3 | 10.13 | 8.75 | -13.63 | 0.712 6 | 8.68 | -14.29 | 8.94 | -11.67 | 0.721 1 |
| 4 | 14.66 | 14.66 | 0.02 | 0.999 7 | 14.66 | 0.00 | 14.78 | 0.82 | 0.996 4 |
| 5 | 21.40 | 20.82 | -2.67 | 0.944 1 | 20.93 | -2.18 | 22.22 | 3.85 | 0.851 6 |
| 6 | 22.79 | 22.80 | 0.06 | 0.994 4 | 22.76 | -0.13 | 22.71 | -0.36 | 0.986 9 |
| 7 | 26.69 | 27.13 | 1.66 | 0.944 9 | 27.18 | 1.83 | 28.91 | 8.33 | 0.892 1 |
| 8 | 29.90 | 29.93 | 0.12 | 0.991 3 | 29.95 | 0.18 | 29.64 | -0.85 | 0.989 4 |
| 9 | 34.01 | 34.10 | 0.25 | 0.966 6 | 33.99 | -0.05 | 34.17 | 0.48 | 0.948 0 |
| 10 | 35.58 | 35.68 | 0.27 | 0.993 6 | 35.15 | -1.23 | 35.25 | -0.95 | 0.977 7 |

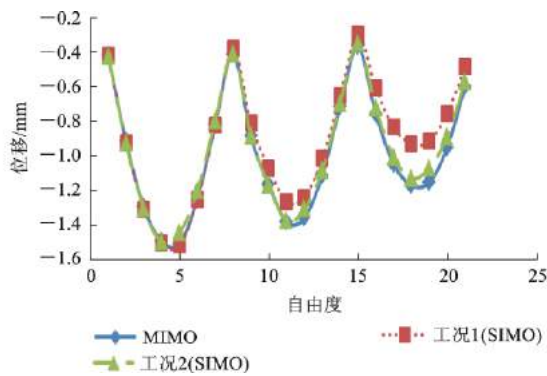


图 12 不同工况下 ULS 值比较

Fig. 12 Comparison of ULS Values in Different Cases

(2) 2 种模态识别方法进行模态柔度求解在本质上是一致的,能够相互转化。利用其相互转化的特点,可以利用在频率响应函数上取留数,再对留数进行转化从而获得不同子结构质量归一的振型,然后就可对子结构振型进行拼接得到扩充振型,但需要人为判别拼接振型的方向。

(3)对试验室结构进行模拟试验和实桥结构的锤击试验表明,SISO,SIMO 和 MIMO 方法均能获得结构激励点的模态柔度系数,并能通过子结构振型拼接方法获取可靠的结构模态柔度矩阵。

(4)值得指出的是,该方法的应用需要利用先验知识和人为干预手段进行 2 个子结构振型的拼接。对于实际结构中模态提取以及在模态振型节点位置易造成模态缺失等问题还值得进一步研究。

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):465-498.

JI Bo-hai, FU Zhong-qiu. Analysis of Chinese Bridge Collapse Accident Causes in Recent Years[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(S):465-498.

[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 University,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 of Lessons of Bridge Accidents in China in Recent Years[J]. China Safety Science Journal,2007,17(11):90-95.

[4] LIU S, YAO J T P. Structural Identification Concept [J]. ASCE Journal of the Structural Division, 1978, 104(12):1845-1858.

[5] DOEBLING S W, FARRAR, C R, AKTAN A, et al. The State of the Art in Structural Identification of Constructed Facilities[R]. Reston: ASCE, 2000.

[6] AKTAN A, MOON F. ASCE-SEI Performance of Structures Track Technical Committee; Structural Identification of Constructed Systems [R]. Reston: ASCE, 2006.

[7] HOGUE T D, AKTAN A, HOYOS A. Localized Identification of Constructed Facilities[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1991, 117(1): 128-148.

[8] RAGHAVENDRACHAR M, AKTAN A. Flexibility by Multireference Impact Testing for Bridge Diagnostics[J]. ASCE Journal of Structural Engineering,

(下转第 51 页)

- ture of Jiqingmen Bridge in Nanjing[J]. Bridge Construction, 2003(6):55-57,73.
- [9] 潘寿东. 连续刚构桥 V 型墩“平衡支架法”施工技术研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2005, 18(4): 100-104.
PAN Shou-dong. Construction Technology of V-shaped Pier for Continuous Rigid Bridge with Balanced Trestle Method[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2005, 18(4):100-104.
- [10] 刘宝龙. 水中大体积 V 型墩斜腿组合式支撑体系下施工技术研究[J]. 铁道工程学报, 2011(3):52-57.
LIU Bao-long. Research on Construction Technology of Massive V-shape Pier in Water Under Slant-leg Combined Supporting[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(3):52-57.
- [11] 张义和. 横桥向不等高 V 形墩施工关键技术研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2013.
ZHANG Yi-he. Study on the Construction Technique of Transverse V-shaped Pier with Columns of Unequal Height [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.
- [12] 罗甲生, 赵灿辉, 古松, 等. 连续刚架-拱桥三角刚架模型试验研究[J]. 桥梁建设, 2008(1):26-29.
LUO Jia-sheng, ZHAO Can-hui, GU Song, et al. Model Test Study of Triangle Frame of a Continuous Rigid-framed Arch Bridge[J]. Bridge Construction, 2008(1):26-29.
- [13] 勾红叶, 蒲黔辉, 施洲. 大跨度 V 形刚构拱组合桥 V 形墩梁节点模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3):99-105.
GOU Hong-ye, PU Qian-hui, SHI Zhou. Model Test for the V-shape Pier-girder Joint of Long-span V-shape Rigid Frame Composite Arch Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3):99-105.
- [14] 张国庆. V 形墩连续梁桥墩顶拉板病害仿真分析及对策[J]. 桥梁建设, 2006(1):76-78.
ZHANG Guo-qing. Simulation Analysis of and Countermeasures Against Deteriorations of Tensioning Plates Atop V-shape Piers of a Continuous Girder Bridge[J]. Bridge Construction, 2006(1):76-78.
- [15] LIN T Y, BURNS N H. Design of Prestressed Concrete Structures[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [16] BORESI A P, SCHMIDT R J. Advanced Mechanics of Materials [M]. 6th ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [17] 包世华, 张铜生. 高层建筑结构设计和计算[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
BAO Shi-hua, ZHANG Tong-sheng. Design and Analysis of Tall-building Structure[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- (上接第 43 页)
- 1992, 118(8), 2186-2203.
- [9] AKTAN A E, CATBAS N, TÜRER A, et al. Structural Identification: Analytical Aspects [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1998, 124(7):817-829.
- [10] CATBAS F N, AKTAN A. Condition and Damage Assessment: Issues and Some Promising Indices[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2002, 128(8):1026-1036.
- [11] CATBAS F N, BROWN D L, AKTAN A. Parameter Estimation for Multiple-input Multiple-output Modal Analysis of Large Structures[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(1):921-930.
- [12] CATBAS F N, BROWN D L, AKTAN A. 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.
- [13] CLOUGH R, PENZIEN J. Dynamics of Structure[M]. New York: McGraw-Hill Companies, 1975.
- [14] 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.
- [15] ZHOU Y, PRADER J, WEIDNER J, et al. Structural Identification of a Deteriorated Reinforced Concrete Bridge [J]. ASCE Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(5):774-787.
- [16] ALLEMANG R J. Vibrations: Analytical and Experimental Modal Analysis[R]. Cincinnati: University of Cincinnati, 1999.
- [17] ZHOU Y, PRADER J, DEVITIS J, et al. Rapid Impact Testing for Quantitative Assessment of Large Populations of Bridges[C]//WU H F. Proceeding of SPIE, The International Society for Optical Engineering. Bellingham: SPIE, 2011: 1-12.