

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0025-05

# 一座桥梁研究新平台的静动力试验研究

周 云, 易伟建

(湖南大学土木工程学院建筑工程系, 湖南, 长沙 410082)

**摘 要:** 美国新泽西州的一座四跨简支梁桥被选为 Benchmark 模型, 作为国际旧桥性能研究和评估的新平台, 国际上近十多所知名高校和测试咨询检测机构对该桥进行了系统的结构静动力试验及无损检测研究。该文简要介绍了该桥的选择过程和项目的基本情况, 对该桥的南侧第 2 跨静动力试验结果进行了介绍。动力试验采用多参考点脉冲锤击法以得到结构的动力模态柔度, 静载试验利用卡车进行加载, 对比模态柔度下的弯沉与静载试验下的弯沉显示该方法能为结构损伤识别提供有效的决策支持。

**关键词:** 结构识别; 基准模型; 脉冲锤击试验; 静载试验; 模态柔度

中图分类号: TU997 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.S070

## THE STATIC AND DYNAMIC TEST STUDY OF A NEW BRIDGE PLATFORM

ZHOU Yun, YI Wei-jian

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

**Abstract:** A 4-span simply-supported beam bridge in New Jersey is selected as a benchmark model, as a new platform for international old bridge performance evaluation and study. More than ten well-known universities and consulting firms took part in this project and conducted the static test, dynamic test and non-destructive test on this bridge. This paper simply introduces the bridge selection process and the general situation of the project. The static and dynamic test results of the southbound second span of the bridge are presented. Multiple reference impact test is performed to capture dynamic modal flexibility, and the static test is conducted with the dump trucks. The comparison of the deflection using modal flexibility and which from the static load shows this method can provide effective decision support for structural damage identification.

**Key words:** structural identification; benchmark model; hammer impact test; static test; modal flexibility

对于桥梁结构的性能评估, 需要进行结构识别。“结构识别”(St-Id)的概念是由 Liu 和 Yao<sup>[1]</sup>于 1978 年提出来的, 它被 Doebling 等<sup>[2]</sup>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-决策的六步综合图<sup>[3]</sup>, 它包括: 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) 进行结构实验; 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。在结构识别的第 3 步中, 可控的桥梁结构试验包括静载试验, 外部动力激励试验(FVT)或者两者的结合。1996 年 Doebling 等<sup>[4-5]</sup>和 2003 年 Sohn 等<sup>[6]</sup>对之前十余年基于振动的试验应用进行了很好的总结和归纳。利用结构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, 并受到激励源频率成分的影响, 对刚度较大的中小型桥梁进行工作模态分析得到的模态测试结果离散性较大。然而多参考点

收稿日期: 2012-06-19; 修改日期: 2013-05-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51208190); 湖南省自然科学基金青年基金项目(12JJ4053); 高校博士点基金新教师基金项目(20120161120028); 湖南大学青年教师高校基本业务费项目

通讯作者: 周 云(1979), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士后, 从事结构损伤识别研究(E-mail: zhoyun05@gmail.com)。

作者简介: 易伟建(1954), 男, 湖南黔阳人, 教授, 博士, 博导, 从事健康监测、混凝土基本原理和结构抗震研究(E-mail: hunuyi2006@gmail.com)。

脉冲锤击激励(MRIT)则能够快速有效地在桥梁上实施,并且能够得到重复性较好且质量较高的频率响应函数,因此深受广大工程师和研究者的欢迎。

从1980年开始,Drexel Intelligent Infrastructure Institute (DI3)研究所的Aktan教授和Cincinnati结构动力学试验室Brown教授领导的团队开始利用MRIT进行了一系列的桥梁试验<sup>[7-11]</sup>研究。在桥梁上成功应用的例子有HAM-42-0992桥和Seymour桥等。脉冲锤击法相比随机振动法最大的优势在于它能够获得模态质量,Aktan教授等利用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,并建立了静力实验和动力模态实验之间的一座桥梁,使得模态测试的目的不再局限于利用模态数据进行模型修正或进行动力指标的计算,也可用来了解结构的DNA——柔度信息。

在结构和桥梁健康监控和结构识别研究领域,为了评价和比较结构测试的手段及理论分析方法,许多国内外学者们纷纷提出利用Benchmark模型来进行结构测试和分析,比较有名的有Z24桥<sup>[12]</sup>、I40桥<sup>[13]</sup>以及加拿大的Benchmark钢框架模型<sup>[14]</sup>等的

测试,并通过共享试验数据和背靠背地进行研究结果分析,产生了一大批优秀的成果。近三年来,由美国Rutgers大学和Drexel大学为首的研究团队,邀请了亚欧美三大洲近十多所科研院校的专家和测试咨询检测机构的工程师,共同对新泽西州附近的一座高等级公路桥进行了系统的静动力测试及无损检测,通过该平台用以评估旧桥的结构性能。笔者参加了该项目的多次结构试验,并作为Drexel大学团队一员对该桥进行了静动力试验及数据分析处理工作。本文主要是向国内同行介绍该项目的概况以及最新的动态。

## 1 国际桥梁研究项目

美国联邦公路局(FHWA)桥梁长期性能评估项目是用来应对日益老化和腐蚀对旧桥带来的危害。该项目的主要目标包括三部分:发展更加精确的桥梁健康评估方法,提高结构性能的认识以及提高高速公路交通系统的安全、寿命和可靠性。作为该旗舰项目的一部分,FHWA发起了一个国际桥梁研究项目,其目标是建立世界范围内“最佳实践”(best practices)来诊断、预测、设计应对措施来减缓桥梁性能缺陷的发生。参加的单位 and 机构如表1所示<sup>[15]</sup>。

表1 短期测试项目中参与单位  
Table 1 Participated organizations in short-term test

科研院校	测试项目	测试咨询检测机构	测试项目
University of Tokyo (日本)	随机振动测试/无线传感器	Vienna Consulting Engineers	快速随机振动测试
University of Sheffield (英国)	强迫振动/随机振动	Olson Engineers	非接触位移测量
Drexel University (美国)	活载试验(跑车及静载)/强迫振动测试/随机振动测试	KAIST	局部损伤检测
Seoul National University (韩国)	随机振动监测	NEXCO	视觉检查和评估
Utah State University (美国)	随机振动监测/地震检波器	Pennoni Associates	视觉检查和评估
Rutgers University (美国)	桥面板无损评估	Keisoku Research Group	视觉检查和评估
Georgia Tech (美国)	无线传感器测量	Smart Structures	非接触变形监测
Univ. of Western Michigan (美国)	非接触位移测量	/	/
Princeton University (美国)	光纤应变传感器测量	/	/
Southeast University (中国)	光纤应变传感器测量	/	/

该项目研究首先需要寻找在各技术手段运用方面具有专长的学术界和工业界的专家,邀请他们前来将各自擅长的技术应用到该桥梁测试上,并以此来评估桥梁的性能。本轮的研究需要完整地记录技术运用的手段和过程,而且允许其对比各自不同的技术工具。首轮集中于基于结构识别范畴的短期结构试验,使用的手段局限于车辆活载试验、强迫振动试验,随机振动监测和无损检测用来评估混凝土桥面板的结构性能。另外,该项目也为一系列新型的传感器和测试技术的应用提供了一个平台,能

够背靠背地与成熟的技术进行比较,以对比其优劣。

## 2 桥梁的选择

为了验证各种技术对于保护或更换已有的桥梁提供决策支持,选择一座具有普遍代表性且具有一定的结构性能缺陷的桥梁结构。一支研究小组与新泽西交通管理局(NJDOT)的工程师进行了一系列待选桥梁的筛选,由于没有清晰可行的方法能够明确量化结构性能缺陷,总共有15座待选桥梁被NJDOT选中。进行测试桥梁选择的标准包括:1)有

明显和众多的性能问题；2)具有可供查找的详细档案和施工图资料；3)具有载荷评级和检测的挑战性；4)桥梁能正常运行且测试人员能够到达其关键部位。

项目小组结合之前的检测报告，调查和踏勘了各座桥梁并研究其分布情况，依照以上提到的标准，将新泽西 Wayne 小镇的双向两幅四跨的钢-混凝土组合梁桥选为满足各项要求的 Benchmark 模型(见图 1)。该桥于 1983 年和 1984 年之间建成，目前显示出非常普遍的病害，包括沉降、支座倾斜、桥面较大的振幅和疲劳裂缝等等。另外这座桥梁共有南北两幅共八跨可供进行测试，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，桥下基本可无限制到达，为研究者开展各种测试提供了便利。

该桥的桥面系统由八根截面参数可变的工字型钢梁组成。截面的宽度变化平滑，其翼缘宽度可根据钢梁跨度的变化而改变，顶部翼缘变化 1 次而底部翼缘变化 2 次。这导致了整根钢梁结构截面变化 5 次，因此增加了由于截面变化导致的不规则性和建模复核工作的复杂性。两根梁之间利用压型钢板作为模板并上铺钢筋后浇筑混凝土，因此难以对混凝土的状况进行视觉检查。桥底钢梁之间设有对角的风撑以增强横向稳定性，混凝土柱通过盖梁支撑桥面板。该结构具有一系列的疲劳裂缝，支座和节点有雨水的侵蚀，该桥梁平均日交通量为 93400 台并有 4% 为卡车荷载<sup>[15]</sup>。



图 1 测试桥梁全貌

Fig.1 Overview of the tested bridge

### 3 桥梁结构动力测试

多个研究小组对该桥进行了动力测试，其中 Drexel DI3 小组的动力实验主要利用多参考点脉冲锤击法，用来获取各阶模态频率、振型、阻尼比等模态参数，并可获得结构模态质量，因此可以方便地得到桥面板的质量归一振型，以便进一步得到桥面板的模态柔度及其在荷载下的弯沉。脉冲锤击试验利用落锤和手锤分别进行(见图 2)。落锤为 Drexel 大学 DI3 研究小组自主设计的一种反弹可控的落锤装置，该锤的锤头有一个 PCB 200C50 的力传感器

(0.10mv/lb)外加一个可变换硬度的聚氨酯锤头(Model 084A32)，测试人员可以调节其重力质量从一可调节的高度落下。锤头落下时有反弹，反弹控制装置阻止该反弹的发生并有一刹车系统能够控制落锤在反弹后能被抓住，利用 NI LabVIEW 软件通过一镭射激光测距装置进行高度识别，该装置的具体设计见参考文献[16]。落锤能提供约 90kN 的锤击力，远远高于一般的落锤和普通的水锤，目的是提高在测试桥面半封闭状态且有车辆运行情况下的信噪比。



(a) 手锤脉冲锤击法实验



(b) 落锤脉冲锤击法实验

图 2 手锤和落锤脉冲锤击法实验

(Drew Noel 2011, 版权所有)

Fig.2 Hammer impact test by sledge hammer and drop hammer (Drew Noel 2011, all right reserved)

### 4 传感器布设

南侧第 2 跨被选为静动力测试的对象(见图 3)，National Instrumentation 9234 动力信号采集模块合并 CompactRIO 系统被用来采集数据。ABSignal 公司的 ModalView 软件被用来进行试验控制并进行实时数据采集，31 个 PCB 系列的加速度传感器被用来进行振动测试。加速度传感器安装在第 6#梁和第 8#梁底部，其余的加速度计被安装在桥面板上部，所有的传感器均被用来测试垂直于桥面的加速度信号。安装位置分布广泛充分考虑了避免振型节

点、考虑多阶模态的情况并考虑了边界条件的拾振。动力测试在晚上进行，四条车道中三条车道封闭，留下一条车道通行，以实现桥梁的半封闭状态。

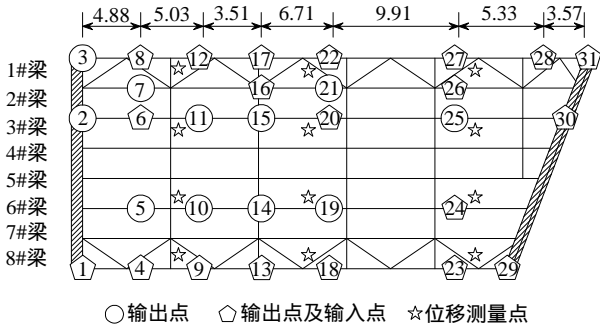


图3 测点布置图 /m

Fig.3 Instrumentation layout

### 5 桥梁结构静力测试

桥面板的静载试验利用卡车载荷试验加载，同样对南侧第2跨进行变形测量。由于所有的传感器被安装在第1#梁、第3#梁、第6#梁和第8#梁上。位移传感器的布置如图3所示，12个位移传感器呈现一矩形格。这些位置与应变及加速度传感器的位置重合。利用分布式NI CompactRIO(cRIO)模块系统进行数据采集。用Lab View软件进行程序编辑来驱动NI硬件系统，以实现可视的实时的数据观测。静力测试于2010年10月1日晚上进行，最大有6辆卡车加载于跨中(见图4)，在该试验中，结果基本上保持在线性范围内，而在第1#梁、第3#梁结果中有弱非线性现象。



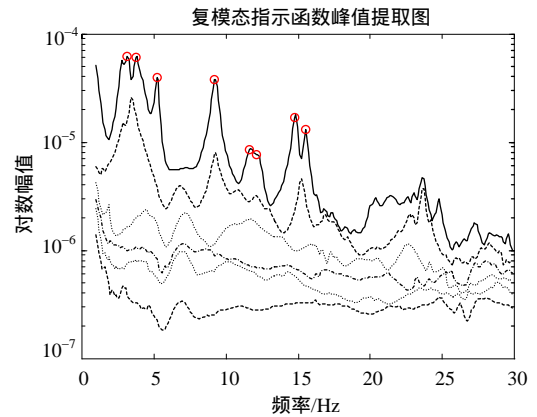
图4 六台卡车静载试验

Fig.4 Static tests loaded by 6 trucks

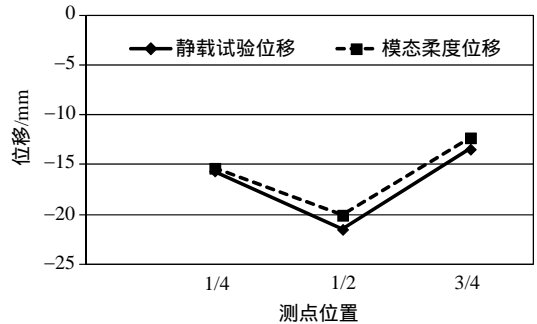
### 6 结构位移对比分析

模态柔度的概念最早由 Clough 提出来，在有输入和输出响应对应的情形下的结构动力测试，能够识别得到结构的模态质量，从而进一步得到结构的模态柔度，Aktan 教授等<sup>[17]</sup>成功应用结构模态柔度的方法进行桥梁结构识别。利用脉冲锤击法得到

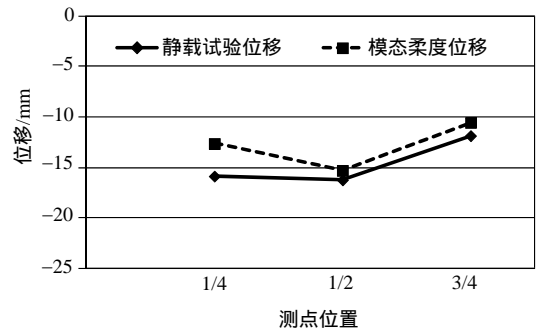
的结构模态柔度与外力作用相乘得到结构在外力作用下的模态柔度位移，与实际重车加载下的测试位移能够相互对比，如果相互匹配对应则表明结构性能良好。利用6个参考点进行的脉冲锤击法分析，通过CMIF法峰值提取识别得到前若干阶模态，如图5(a)所示。第3#梁、第6#梁和第8#梁的模态柔度位移与静载试验位移符合良好，第3#梁结果如图5(b)所示，而位于1#梁的端点如图5(c)的1/4处，位移有着明显的差别，清晰地显示出结构存在着潜在的问题，经过调查发现在盖梁上有着明显的裂缝(见图5(d))，它导致了实测加载车辆下的位移明显偏大，出现弱非线性现象，而在动力试验识别结构的模态柔度中，它还处于线弹性阶段。因此图5(c)的测试位移误差反映了这种差别。



(a) CMIF 奇异值峰值图识别模态



(b) 3#梁测量位移与模态柔度识别位移比较



(c) 1#梁测量位移与模态柔度识别位移比较



(d) 盖梁裂缝

图5 模态识别和位移比较

Fig.5 Modal identification and Comparison of displacement

## 7 结论

本文介绍了一座国际合作研究桥梁性能新平台的背景和意义,详细介绍了该桥梁的选择过程及简况。结合与 Drexel 大学 DI3 研究所进行的该桥南侧第 2 跨的桥面板脉冲锤击法试验和结构静载试验,通过将模态柔度下的位移与结构静载试验下的位移进行比较,能够准确判断结构损伤的发生,证明以模态柔度为指标的桥梁结构性能评估方法的有效性和实用性。本项目对国内同行进行同类型研究具有借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] Liu S C, Yao J T P. Structural identification concept [J]. ASCE Journal of the Structural Division, 1978, 104(12): 1845-1858.
- [2] Doebling S W, Farrar C R, Aktan A E, Beck J, Cornwell P H, Safak A E, Yao J. 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.
- [3] Aktan A E, Moon F L. ASCE-SEI performance of structures track technical committee: structural identification of constructed systems [R]. <http://www.di3.drexel.edu>, 2005.
- [4] Doebling S W, Farrar C R, Prime M B, Shevitz D W. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review [R]. Los Alamos National Laboratory, New Mexico, Report LA-13070-MS, 1996.
- [5] Doebling S W, Farrar C R, Prime M B. A summary review of vibration-based damage identification methods [J]. The Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2): 91-105.
- [6] Sohn H, Farrar C R, Hemez F M, Shunk D D, Stinemates S W, Nadler B R, Czarnecki J J. A review of structural health monitoring literature from 1996-2001 [D]. Report LA-13976-MS, Los Alamos National Laboratory Report, New Mexico, 2003.
- [7] Hogue T D, Aktan A E, Hoyos A. Localized identification of constructed facilities [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(1): 128-148.
- [8] Raghavendrachar M, Aktan A E. Flexibility by multireference impact testing for bridge diagnostics [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(8): 2186-2203.
- [9] Aktan A E, Catbas N, Turer A, Zhang Z F. Structural identification: Analytical aspects [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(7): 817-829.
- [10] 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.
- [11] 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(1): 921-930.
- [12] Bart Peeters, Guido De Roeck. One-year monitoring of the Z24-bridge: Environmental effects versus damage events [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2001, 30(2): 149-171.
- [13] Farrar C R W E, Baker T M, Bell K M, et al. Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Rio Grande [R]. Los Alamos National Laboratory Report LA-12767-MS, 1994.
- [14] Johnson E A, Lam H F, Katafygiotis L S, Beck J L. Phase I IASC-ASCE structural health monitoring benchmark problem using simulated data [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(1): 3-15.
- [15] John Prader. Rapid impact modal testing for bridge flexibility—towards objective condition evaluation of infrastructures [D]. Philadelphia: Drexel University, 2012.
- [16] Zhou Yun, John Prader, John Deitis, et al. Application of rebound controlled drop hammer for multiple reference impact test on bridges [R]. Varenna, Italy, EVACES 2011: Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, 2011.
- [17] 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.