



Research
Bridge Engineering—Article

非平稳环境振动下桥梁的阻尼识别

Sunjoong Kim, Ho-Kyung Kim*

Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 April 2017
Revised 27 August 2017
Accepted 22 November 2017
Available online 23 November 2017

关键词

阻尼
运行模态分析
交通导致振动
非平稳
信号平稳化
调幅
大桥
斜拉
悬索

摘要

本研究着重于使用非平稳的环境振动数据来识别桥梁的阻尼比。我们通常使用基于输入信号的静态白噪声假设的运行模态分析 (OMA) 来识别使用中的桥梁的阻尼比。然而, 大多数桥梁在使用时通常会受到非平稳激励, 而违反这种基本假设会导致阻尼识别的不确定性。为了处理非平稳性, 根据测量的响应来计算幅度调制函数, 以消除由非平稳输入引起的整体趋势。采用自然激励技术 (NExT) - 特征系统实现算法 (ERA) 估算平稳过程中的阻尼比。为了提高基于 OMA 的阻尼估计的准确性, 在提取的平稳过程和非平稳数据之间进行比较分析, 以评估消除非平稳性的效果。在信号平稳化后, 第一竖向模态的阻尼比的平均值和标准偏差会减小。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

阻尼比与大跨度桥梁中涡激振动的发生有很强的相关性[1,2]。为了估算大跨度桥梁的阻尼比, 许多研究人员已经使用了唯输出运行模态分析 (OMA), 而并非使用需要暂时关闭使用中的桥梁的重型激励器。唯输出 OMA 的重要假设之一是结构系统应处于平稳的环境振动之下。然而, 非平稳负荷如地震、极端风力和交通是民用基础设施激励信号的主要来源, 并且这些负荷会导致非平稳响应[3–5]。因此, 对于经典 OMA 的基本假设, 违反激励条件可能是阻尼比估测不准确的原因之一。

交通荷载是桥梁的主要荷载源[6,7], 并且可以表示为平稳的随机过程, 这是因为道路的粗糙度被模拟为零均值平稳高斯随机过程[8]。但是, 当交通量较低时, 传感器位置处的环境振动信号在车辆接近并远离时被视为信号包络。在特定位置观察到的交通导致振动 (TIV) 可以被看作是一个非平稳过程, 其表示为静止白噪声和包络函数[9]的乘积。因此, 受到交通负荷影响的桥梁荷载加速度会在特定位置含局部化特征[8]。

交通荷载通常会激发与车辆频率相对应的结构模态。《安大略公路桥梁设计规范》[10]建议当结构的主要固有频率为 2 ~ 5 Hz 时, 增加放大系数, 美国国家

* Corresponding author.

E-mail address: hokyoungk@snu.ac.kr (H.-K. Kim).

高速公路和交通运输协会 (AASHTO) 规定一般卡车的频率应该是 2.5 Hz [11]。Bartos [11] 也提出, 当结构频率为 1.5 ~ 5 Hz 时, 动态放大效应可能会超过限制。车桥相互作用也会受驱动频率的影响, 这取决于车辆穿越单个纵梁的持续时间 [12,13]。Brewick [14] 发现这些模态信息的失真增加了基于 OMA 方案的阻尼估计的不确定性。

本研究的重点是交通荷载引起的非平稳性及其对基于 OMA 的阻尼估计的影响。交通荷载的影响通过悬索桥的现场测量数据进行检查。通过引入调幅 (AM) 函数, 我们提出了一种信号平稳化算法, 并应用于悬索桥的运行监测数据来进行阻尼估计。

2. 悬索桥的 TIV 研究

2.1. 索罗克大桥

索罗克大桥 (图1) 是韩国连接索罗克岛和大陆的自锚式单索悬索桥。桥梁全长 470 m, 由 250 m 主跨和两个 110 m 的对称边跨组成。其钢箱梁总宽度为 15.7 m, 提供两条车道。该桥于 2009 年 3 月通车。从那时起, 研究者详细检测, 并进行了一系列的动态测试, 同时出于维护目的进行了模型更新。表 1 总结了桥梁的模态频率, 由 OMA 使用从环境振动测试 (AVT) 获得的数据频域分解 (FDD) 来识别。采用基于手动调节和基于参数化灵敏度的模型更新方法, 表 1 还包括从已更新的有限元模型获得的计算固有频率 [15,16]。测量频率与计算频率的一致性见表 1。

2.2. 从 AVT 中获取数据

利用主跨中心部署的两个加速度计来测量采样频率为 100 Hz 的桥面的垂直加速度。使用激光位移传感器同



图1. 索罗克大桥。

表1 索罗克大桥的模态频率

Mode	AVT (Hz)	Calculated (Hz)
1st vertical	0.406	0.403
2nd vertical	0.478	0.463
3rd vertical	0.839	0.829
1st lateral	0.521	0.521
1st torsional	1.550	1.530

时测量桥面的相应位移, 该传感器配备为用于监测桥梁运营行为的内置传感器。通过安装在桥面上的超声风速计记录风向和风速。将现有数据以 10 min 为间隔来划分以进行深入调查。

尽管现场测试基本上是为了确保 AVT 数据的安全, 但重型卡车也准备好创造高幅激励的运行条件。我们已经分析了悬架桥的一系列加速度, 以确定 TIV 的性能。特别是考虑了两种类型的测试——卡车荷载测试和使用普通车辆的 AVT, 以便根据不同类型的车辆调查 TIV 的特性。卡车装载测试使用总重为 25 t、速度为 25 km·h⁻¹ 和 40 km·h⁻¹ 的三轴卡车进行。这座桥没有关闭正常交通, 但与卡车相比, 普通车辆的重量相对较轻, 并且在调查卡车引起的振动方面没有很大的价值。

2.3. AVT 中的非平稳特征

为了检验交通荷载引起的非平稳效应, 采用符合经典 OMA 假设的稳定响应作为参考。为了从一组操作监测数据中选择平稳的响应, 我们对一系列振动数据评估了峰度值。峰度值数据低于 10, 并且不包含峰值响应的可归类为平稳 [17]。具体而言, 选择最高风速来表示稳定数据以确保较高的信噪比。

表 2 总结了 TIV 数据统计。在表 2 中, 由卡车荷载引起的 TIV 数据被称为“重型卡车”, 而在正常操作期间测量的振动被分类为“普通车辆”。

图 2 所示的平稳应激数据因过往的车辆而没有极端的峰值, 并且峰度值被识别为 4.17, 这表示平稳状态。功率谱密度 (PSD) 表明主要结构模态第一个 (0.415 Hz) 和第三个竖向模态 (0.842 Hz) 占据优势。

相反, 如图 3 所示, 当重型卡车通过桥时, 2 Hz 附近的结构模态被放大。当一辆卡车进入主跨时, 振幅逐渐增加, 并引起非平稳响应。峰度值为 12.47, 其已经超过了平稳模态的标准。

如图 4 所示, 与平稳模态相比, 普通车辆也放大了较高的结构模态。4 ~ 5 Hz 的结构模态由较轻的车辆激发, 其激发相对较高的频率。峰度值为 49.69, 超过了

表2 TIV数据统计和相应的风速

	Vibration categorized as stationary	Vibration induced by heavy truck	Vibration induced by ordinary vehicle
Root-mean-square (Gal) ^a	0.49	2.61	1.74
Peak (Gal)	2.98	21.82	26.08
Kurtosis	4.17	12.47	49.69
10 min averaged wind velocity (m·s ⁻¹)	8.81	6.91	2.43

^a 1 Gal=1×10⁻² m·s⁻².

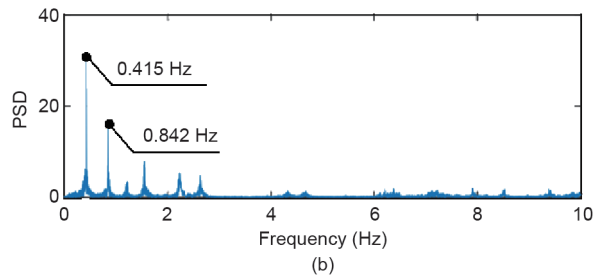
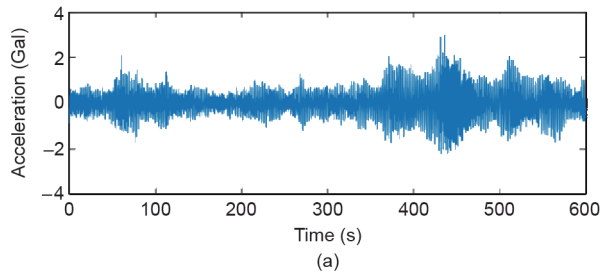


图2. (a) 测量的加速度; (b) 稳定应激的PSD。

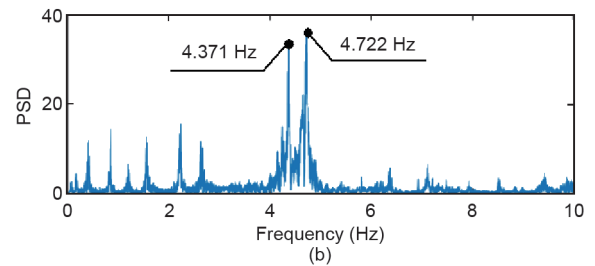
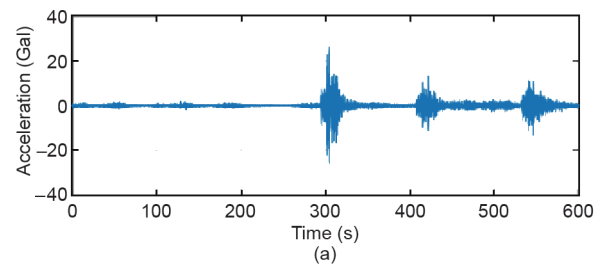


图4. (a) 测量的加速度; (b) 普通车辆的PSD。

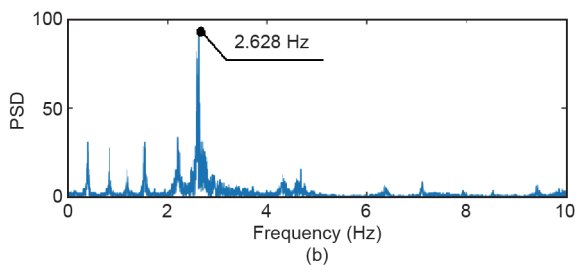
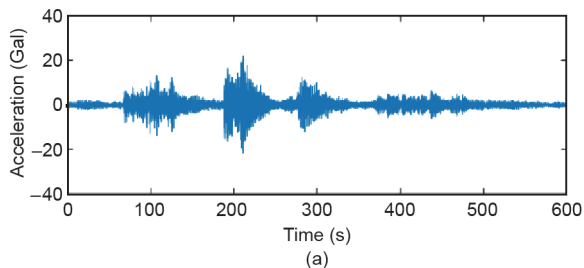


图3. (a) 测量的加速度; (b) 重型卡车的PSD。

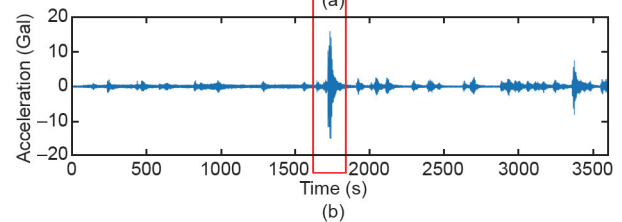
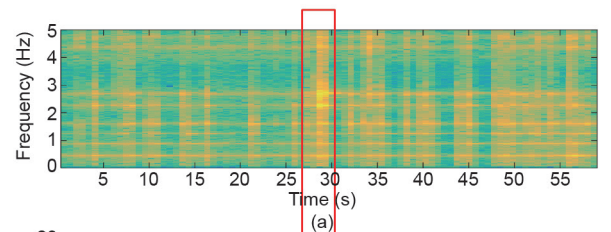


图5. (a) 时间频率分布; (b) 测量的相对加速度 (2012年7月14日, 早6:00)。

值为10的平稳标准, 并指出了非平稳模态。

图5表示使用短时傅里叶变换计算的时频分布。Hamming窗口用于计算谱段长度为2¹³和50%重叠的谱图。图5清楚地表明, 当一辆汽车穿过桥时, 2~5 Hz的较高结构模态变得极其活跃。

3. 使用 AM 功能的信号平稳化

3.1. AM 功能

Chiang和Lin[18]提出了一种从非平稳环境振动下收集到的结构响应数据来识别模态参数的方法。如图6所示, 非平稳测量加速度 $a(t)$ 可以模拟为平稳加速度 $\tilde{a}(t)$ 和AM函数 $\Gamma(t)$ 的乘积, 如下所示:

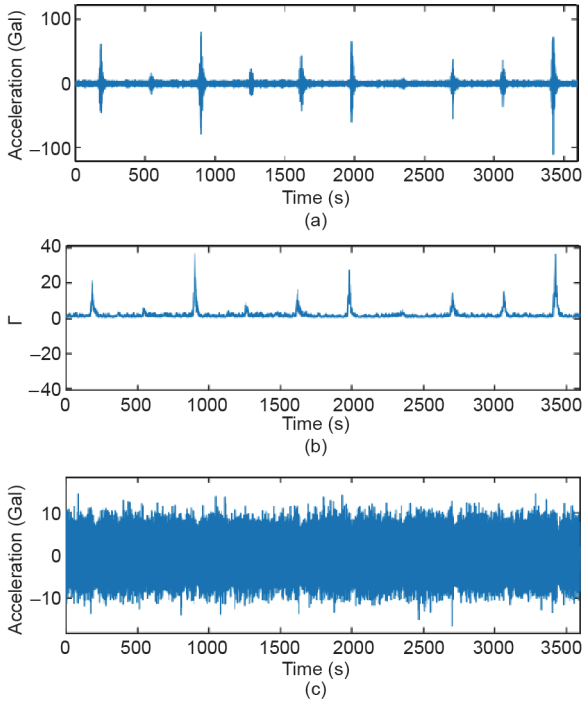


图6. 利用AM函数的非平稳过程建模。(a) 测量的加速度 $a(t)$ ；(b) AM函数 $C(t)$ ；(c) 静止加速度 $\tilde{a}(t)$ 。

$$a(t) = \Gamma(t)\tilde{a}(t) \quad (1)$$

在这个模型中，平稳过程可以通过AM函数 $\Gamma(t)$ 的调制从非平稳响应估算得出。AM函数可以从非平稳数据的时间均方根（RMS）[19]估算如下：

$$\Gamma(t) = C \sqrt{\frac{1}{T_w} \int_{t-T_w/2}^{t+T_w/2} a^2(\tau) d\tau} \quad (2)$$

式中， C 为遍历过程部分的平方根的期望值； T_w 为用于计算时间RMS的片段长度。因此，可以获得近似的稳态加速度：

$$\tilde{a}(t) = a(t)/\Gamma(t) \quad (3)$$

3.2. AM 函数在操作监控数据中的应用

拟议的平稳化过程适用于从索罗克大桥获得的运行监测数据。AM函数是通过计算测得的加速度的时间均方根函数来评估，然后将测量的加速度除以AM函数来提取近似平稳加速度。

图7 (a)、(b) 分别显示了信号平稳化前后的交通引起的加速度。在信号平稳化过程之前，时间历史中测得的加速度具局部特征。峰度值超过了10的标准。然而，在稳定过程之后，由于交通负载而引起的峰值被从时间历史中移除。峰度值也从12.83降至2.36。

图8比较了信号稳定之前和之后的归一化PSD。在信号平稳化期间，通过应用AM函数，车辆频率2 ~ 5 Hz周围的频率分量明显减少。因此，平稳化数据的PSD显示出与平稳情况的PSD类似的频率分量。

4. 基于 OMA 的信号平稳化阻尼估计

4.1. 基于 OMA 阻尼估计的参数选择

将自然激励技术(NExT)-特征系统实现算法(ERA)应用于记录了4天（自2016年6月13日至6月16日）的1 h加速度数据。为计算NExT中测量加速度的自相关函数程序，我们应用了一个长度为 2^{15} 、重叠率为50%的Hanning窗口[2]。通过设定此参数，平均数为21的频率

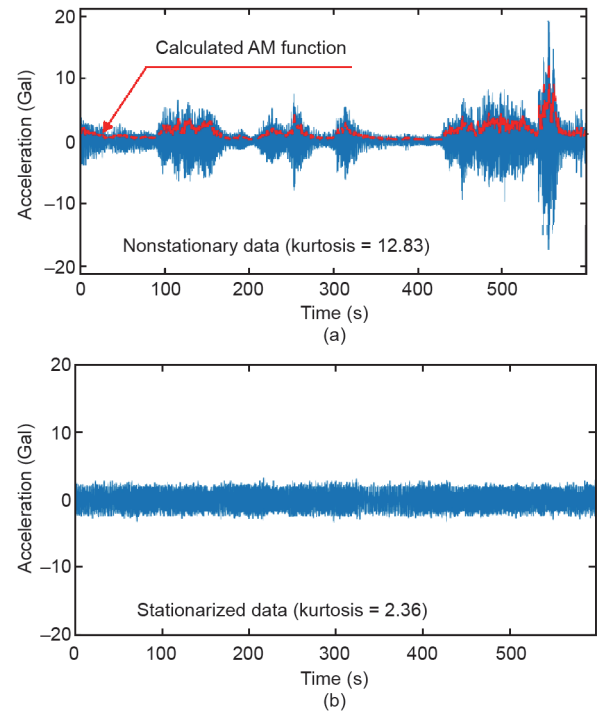


图7. 利用AM函数测量加速度。(a) 信号稳定之前；(b) 信号稳定之后。

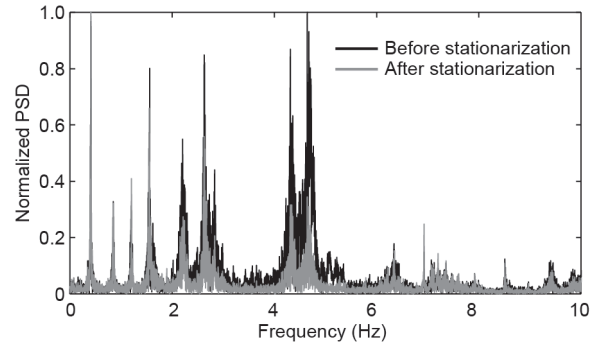


图8. AM函数信号平稳化之前和之后的测量加速度的归一化PSD。

分辨率为0.0031 Hz。图9显示了结构的模拟脉冲响应函数（IRF）的计算相关函数。

如图9所示，基于计算出的IRF的形状选择汉克尔矩阵的大小。例如，从IRF正/负包络函数中确定计算的IRF降低至50%水平所需的时间（ $t_1 = 17.77$ s, $t_2 = 18.08$ s），然后选择时间较长的一组（18.08 s）。

基于OMA的阻尼估计对ERA的系统阶数非常敏感。为了获得收敛的阻尼比，应该在稳定图的辅助下选择一个系统的阶数，如图10所示。我们应该从1到50执行一系列的模态分析来检查所有的系统阶数，并且识别和记录满足频率范围、正阻尼和扩展模态振幅相干性（EMAC）等标准的第一个竖向模态（0.406 Hz）。接下来，我们应该确定识别的阻尼比的中值。

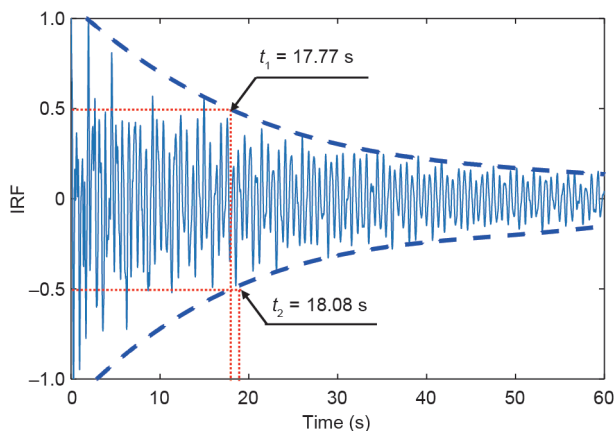


图9. 基于包络函数确定IRF的使用时间长度。

为了选择合适的信号平稳化段长度，我们对从索罗克大桥获得的一天运行监测数据进行了参数研究。图11显示了估算阻尼比的平均值和方差系数（COV），根据分段比率定义，该分段比率定义为分段长度和目标固有周期（ T_n ）之间的比率。如图11所示，估测的阻尼比的平均值从0.5的分段比收敛到1%，而COV值从分段比为1.5开始变得稳定。因此，对于索罗克大桥使用移动RMS的信号分段过程，建议采用比目标自然周期长1.5倍的分段长度。

4.2. 信号平稳化的估测阻尼比

在估算索罗克大桥第一模态的阻尼比时采用了三种比较方法。第一种情况没有考虑平稳化，只是将NExT-ERA用于测量数据；在下文中，这种情况被称为“未平稳化”。具有信号平稳化的识别阻尼比在下文中被称为“平稳化”，并且“组合”表示信号平稳化是根据测得的加速度的峰度值选择性地应用。正如Guo [17]所建议的那样，峰度值10被用作区分平稳和非平稳测量数据的标准。如果测得的加速度的峰度值大于10，则应用信号平稳化程序。从96个数据集中，有80个测得的加速度数据被确定为非平稳数据。如图11所示，对目标固有周期采用5倍的分段长度进行信号平稳化。

图12显示了索罗克大桥在运行过程中的估测阻尼比。估测的阻尼比根据从早到晚的时间段而波动，阻尼比看起来取决于交通量。在应用信号平稳化过程时，7

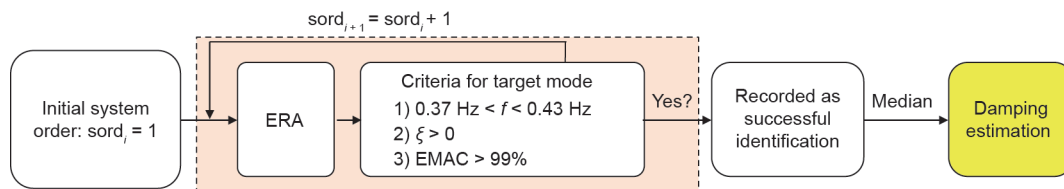


图10. 选择系统顺序和识别阻尼比的过程。

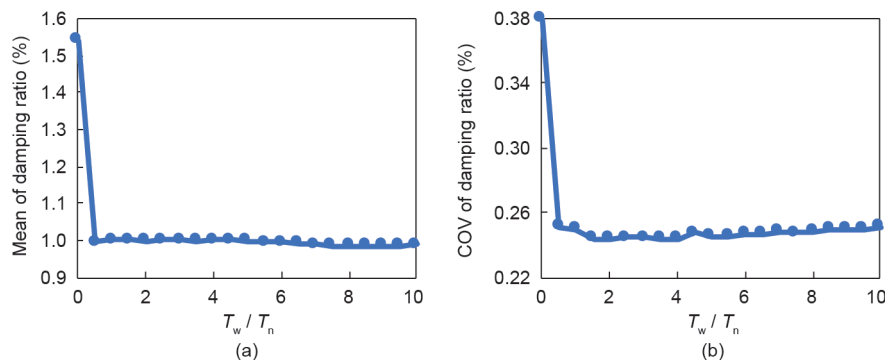


图11. 根据分隔比率统计索罗克大桥的阻尼估计值。(a) 估测阻尼比的平均值；(b) 估测阻尼比的COV。

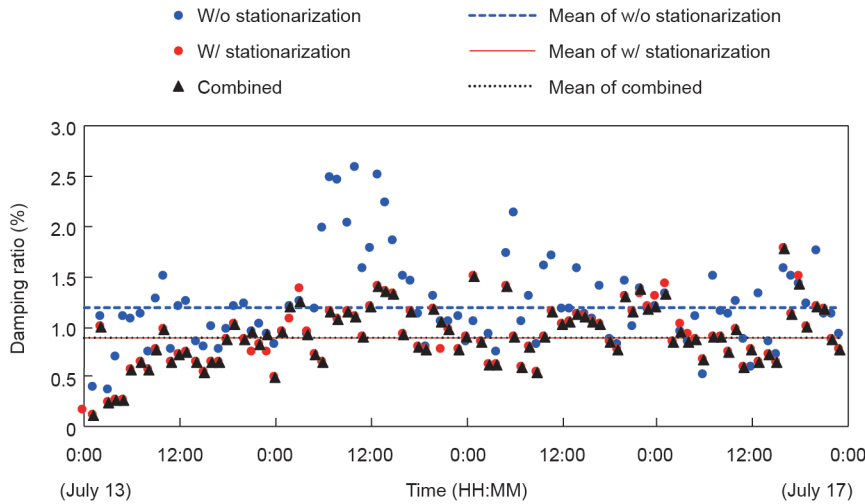


图12. 基于信号平稳化的索罗克桥的模式阻尼比估测。

月14日和15日所记录的严重分散现象减少。

在信号平稳后，第一竖向模式的阻尼比的平均值和标准偏差减小。信号平稳化后估计的阻尼比的COV为34%，与以前的AVT实践值相比是可接受的[20–24]。

5. 结语

本研究主要集中在韩国索罗克桥上的交通荷载造成的非平稳性以及它对基于OMA的阻尼估计的影响。文献调查和现场监测数据证实，TIV是局部的，导致了非平稳响应。车辆频率从2 Hz到5 Hz的结构模式被交通荷载放大，但较低的结构模式由稳定激励主导。我们提出了一种采用AM函数的信号平稳化过程。AM函数是从运行车辆引起的仅包络输出数据中获得的，并用于调制非平稳成分。通过信号平稳化程序成功地减少了由车辆引起的非平稳效应和频率失真值。信号平稳化后，峰度值显著降低，PSD函数与平稳数据近似。结果，TIV引起的过高/低估阻尼比被恢复，并且通过应用信号平稳化过程来减小阻尼比估计的不确定性。尽管本研究仅考虑了平稳化的AM函数，但在进一步的研究中可以对Hilbert变换等其他方法进行广泛的研究。

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIP) (2017R1A2B4008973) and also supported by grants (17SCIPB119960-02) from the Ministry of

Land, Infrastructure and Transport of the Korean Government. This work was also partially supported by the BK21 PLUS research program of the National Research Foundation of Korea and the New Technology Research Center for Bridges through the Institute of Engineering Research at Seoul National University. The authors are also grateful to the owner of the Sorok Bridge, TM E&C, and to the Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (KISTEC) for sharing operational monitoring data.

Compliance with ethics guidelines

Sunjoong Kim and Ho-Kyung Kim declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Kim SJ, Kim HK, Calmer R, Park J, Kim GS, Lee DK. Operational field monitoring of interactive vortex-induced vibrations between two parallel cable-stayed bridges. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2013;123(Pt A):143–54.
- [2] Kim S, Park J, Kim HK. Damping identification and serviceability assessment of a cable-stayed bridge based on operational monitoring data. *J Bridge Eng* 2016;22(3):04016123.
- [3] Feng MQ, Fukuda Y, Chen YB, Soyoz S, Lee S. Long-term structural performance monitoring of bridges: Phase II: Development of baseline model and methodology for health monitoring and damage assessment. Final report. Sacramento: California Department of Transportation; 2006. Oct. Report No.: CA07-0245. Contract No.: RTA59A0311.
- [4] Guo YL, Kareem A, Ni YQ, Liao WY. Performance evaluation of Canton Tower under winds based on full-scale data. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2012;104–106:116–28.
- [5] Lin CS, Chiang DY. Modal identification from nonstationary ambient response data using extended random decrement algorithm. *Comput Struct* 2013;119:104–14.
- [6] Kim CW, Kawatani M, Kim KB. Three-dimensional dynamic analysis for bridge-vehicle interaction with roadway roughness. *Comput Struct* 2005;83(19–20):1627–45.
- [7] Kim CW, Kawatani M. Pseudo-static approach for damage identification of

- bridges based on coupling vibration with a moving vehicle. *Struct Infrastruct Eng* 2008;4(5):371–9.
- [8] Guo WH, Xu YL. Fully computerized approach to study cable-stayed bridge–vehicle interaction. *J Sound Vib* 2001;248(4):745–61.
- [9] Sun H, Feng DM, Liu Y, Feng MQ. Statistical regularization for identification of structural parameters and external loadings using state space models. *Comput-Aided Civ Infrastruct Eng* 2015;30(11):843–58.
- [10] Ontario Ministry of Transportation, Quality and Standards Division. Ontario highway bridge design code. 3rd ed. Ontario: Ontario Ministry of Transportation, Quality and Standards Division; 1991.
- [11] Bartos MJ. Ontario writes new bridge code. *Civil Eng–ASCE* 1979;49(3):56–61.
- [12] Lin CW, Yang YB. Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification. *Eng Struct* 2005;27(13):1865–78.
- [13] Majka M, Hartnett M. Effects of speed, load and damping on the dynamic response of railway bridges and vehicles. *Comput Struct* 2008;86(6): 556–72.
- [14] Brewick PT. Improving the quantification and estimation of damping for bridges under traffic loading [dissertation]. New York: Columbia University; 2014.
- [15] Park W, Kim HK, Jongchil P. Finite element model updating for a cable-stayed bridge using manual tuning and sensitivity-based optimization. *Struct Eng Int* 2012;22(1):14–9.
- [16] Park W, Park JY, Kim HK. Candidate model construction of a cable-stayed bridge using parameterised sensitivity-based finite element model updating. *Struct Infrastruct Eng* 2015;11(9):1163–77.
- [17] Guo YL. Nonstationary system identification techniques [dissertation]. Notre Dame: University of Notre Dame; 2015.
- [18] Chiang DY, Lin CS. Identification of modal parameters from nonstationary ambient vibration data using correlation technique. *AIAA J* 2008;46(11):2752–9.
- [19] Newland DE. An introduction to random vibrations, spectral & wavelet analysis. 3rd ed. Mineola: Dover Publications, Inc.; 2012.
- [20] Benedettini F, Gentile C. Operational modal testing and FE model tuning of a cable-stayed bridge. *Eng Struct* 2011;33(6):2063–73.
- [21] Brownjohn JMW, Magalhães F, Caetano E, Cunha Á. Ambient vibration retesting and operational modal analysis of the Humber Bridge. *Eng Struct* 2010;32(8):2003–18.
- [22] Magalhães F, Cunha Á, Caetano E, Brincker R. Damping estimation using free decays and ambient vibration tests. *Mech Syst Sig Process* 2010;24(5):1274–90.
- [23] Magalhães F, Caetano E, Cunha Á, Flamand O, Grillaud G. Ambient and free vibration tests of the Millau Viaduct: Evaluation of alternative processing strategies. *Eng Struct* 2012;45:372–84.
- [24] Reynders E, Houbrechts J, De Roeck G. Fully automated (operational) modal analysis. *Mech Syst Sig Process* 2012;29:228–50.