

Vibration Analysis and Field Test of a Footbridge under Human Jumping Load

Changhui Cui¹, Zhiqiang Zhang^{1,2}

¹School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

²Key Laboratory of Concrete and Pre-Stressed Concrete Structures of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing Jiangsu

Email: 220151023@seu.edu.cn, zzq1969@seu.edu.cn

Received: Mar. 15th, 2018; accepted: Mar. 28th, 2018; published: Apr. 4th, 2018

Abstract

By combining the methods of field test and finite element analysis, vibration under human jumping load of a footbridge in Nanjing was studied, and tuned mass dampers (TMD) were used to control vibration and carry out comfort design. A three-dimensional finite element model of the structure was developed by ANSYS software for modal analysis and dynamic time-history analyses with different human jumping loads before and after the installation of TMD. Ambient vibration tests were conducted to get the dynamic properties of the structure, and the actual acceleration responses of the structure under single person and multiple people jumping with and without TMD were compared. The research indicates that the first vertical frequency of the original structure is less than 3 Hz, and the vertical maximum acceleration exceeds the threshold value of the code; after the installation of TMD, the acceleration is reduced obviously, and TMD can effectively control human induced vertical vibration of the bridge.

Keywords

Footbridge, Dynamic Properties, Dynamic Response Test, Vibration Serviceability, TMD

某人行天桥跳跃荷载下振动分析与测试

崔常慧¹, 张志强^{1,2}

¹东南大学土木工程学院, 江苏 南京

²东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京

Email: 220151023@seu.edu.cn, zzq1969@seu.edu.cn

收稿日期: 2018年3月15日; 录用日期: 2018年3月28日; 发布日期: 2018年4月4日

摘要

采用有限元分析与现场测试相结合的方法, 研究南京某人行天桥在人跳跃荷载下的振动问题, 并选取调谐质量阻尼器(TMD)进行振动控制和舒适度设计。利用ANSYS软件建立结构三维模型, 进行模态分析及不同跳跃工况下减振前后桥面动力响应时程分析; 对实际结构进行环境激励下的动力特性测试, 对比分析减振前后单人、多人跳跃情况下实测加速度响应。研究表明, 原结构竖向基频小于3 Hz, 在跳跃荷载下不满足规范的加速度要求; 设置TMD后, 加速度明显减小, TMD可有效控制该桥的人致竖向振动。

关键词

人行桥, 动力特性, 动力响应测试, 振动舒适度, 调谐质量阻尼器

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市人行天桥是城市公共交通中不可缺少的基础设施。随着人行天桥逐渐向着大跨度方向发展, 人行桥的自振频率较低, 与人活动频率范围接近, 人致动力响应明显。人的活动主要包括: 慢走、快走、跑、跳、站立、起立和音乐节奏等行为。研究表明人在不同活动状态下的频率范围大致如下: 步行 1.6~2.4 Hz, 跑步 2.0~3.5 Hz, 跳跃 1.8~3.4 Hz, 弹跳 1.5~3.0 Hz, 身体水平晃动 0.4~0.7 Hz [1]。自从 2000 年伦敦千禧桥开放日大量人流引起桥面大幅振动后[2], 人行桥的振动和行人振动舒适度问题引起国内外众多学者的研究兴趣[3] [4]。对于人行桥的振动舒适度设计问题, 一些规范规定了人行桥竖向频率的要求。我国《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ69-1995) [5]中规定, 人行桥上部结构竖向自振频率不应小于 3.0 Hz。欧洲规范 Eurocode 5 [6]、英国规范 BS 5400 [7]、加拿大规范 CSA (S6-06) [8]等均规定人行桥竖向频率不应小于 5 Hz, 欧洲规范 HIVOSS [9]要求人行桥竖向频率避开 1.25~4.6 Hz 的敏感范围, 否则需要计算人致振动下结构响应, 并采取相应措施进行振动控制。调谐质量阻尼器(TMD)是结构被动控制的常用方法之一, 目前国内已经积累了大量的工程实践经验, TMD 已经在众多大型工程项目中得到应用, 如北京奥林匹克公园国家会议中心[4]、青岛北站[10]等。

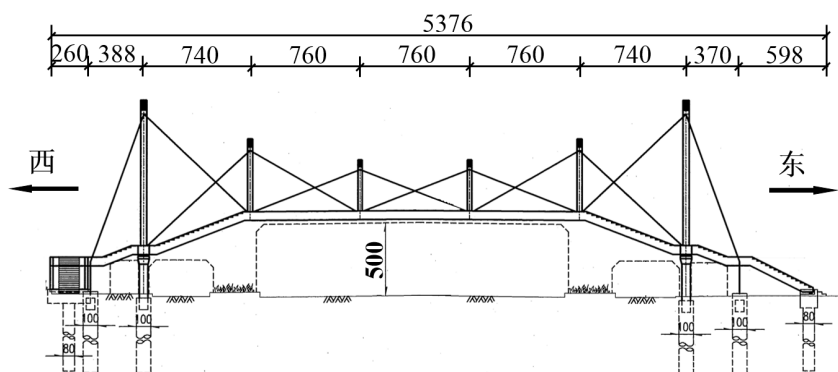
本文主要研究南京首座桅杆式斜拉人行天桥在人跳跃荷载下的振动舒适度问题, 采用有限元分析与现场测试相结合的方法, 分析了结构的动力特性及在不同跳跃荷载工况下的加速度响应, 并采用减振控制理论, 选取 TMD 对人致振动进行控制。

2. 结构特点

南京市太平北路文昌桥路口的过街天桥曾由于南京地铁三号线施工被拆除, 现在已复建完成并投入使用。复建的人行天桥采用桅杆斜拉桥形式, 结构轻盈, 造型美观, 与周围环境协调一致, 其效果图及立面图如图 1 所示。该桥主跨 37.6 m, 桥面总宽 5 m, 桥面以上高度 10 m。主墩处桥塔及中间的塔杆采用三种圆形钢管, 截面为 $\Phi 426 \times 30$ 、 $\Phi 351 \times 20$ 和 $\Phi 299 \times 16$, 主梁采用截面为 $\square 600 \times 600 \times 24 \times 24$ 的双边箱钢梁, 双边箱主梁之间设置横梁和水平斜撑, 横梁主要截面为 $\square 450 \times 300 \times 12 \times 16$, 斜撑主要截



(a) 效果图



(b) 立面图(单位: cm)

Figure 1. The footbridge
图 1. 人行天桥

面为 $\Phi 152 \times 12$ 。桥面板采用正交异形板。墩柱采用 C40 混凝土, 基础采用 C30 混凝土, 结构主钢材采用 Q345C 钢材。

3. 有限元模型

本文采用大型通用有限元软件 ANSYS 建立三维模型, 并对结构进行减振前后的动力响应分析, 采用 Beam189 和 Link180 单元分别模拟主梁和拉索, 采用 Shell181 模拟桥面板, 建立的全桥模型如图 2 所示。

本文主要考察结构的竖向振动特性, 有限元分析得到的原结构前三阶竖向自振频率依次为: 2.46 Hz、5.93 Hz 和 10.30 Hz, 对应的振型见图 3。其中, 第一阶竖向振型呈单个正弦波形式, 其振型位移最大的位置为跨中。该结构竖向第一阶振型频率为 2.46 Hz, 不满足规范的要求, 且处于人跳跃频率范围(1.8~3.4 Hz)内, 易发生共振, 因此需要计算结构人致振动响应。

该桥在设计之初就考虑采用调谐质量阻尼器(TMD)进行振动控制。TMD 是一种常用的调频减振装置, 主要由质量块、弹簧和阻尼器组成。当 TMD 的自振频率与主结构的基本频率或激励频率相接近时, 主结构发生振动时, TMD 会产生一个与主结构振动方向相反的惯性力作用在结构上, 从而将结构自身的振动能量转换到 TMD 装置上, 使主结构动力响应衰减。

该桥的竖向振动主要由第一阶竖向振型决定, 因此在第一阶竖向振型位移最大的位置(即跨中)布置 4 套 TMD 减振装置, 经过多次反复优化, 计算得到 TMD 减振装置的主要设计参数见表 1。在 ANSYS 有限元软件中建模时, 选用 Mass21 单元模拟 TMD 的质量块, 选用 Combin14 单元模拟弹簧和阻尼器。

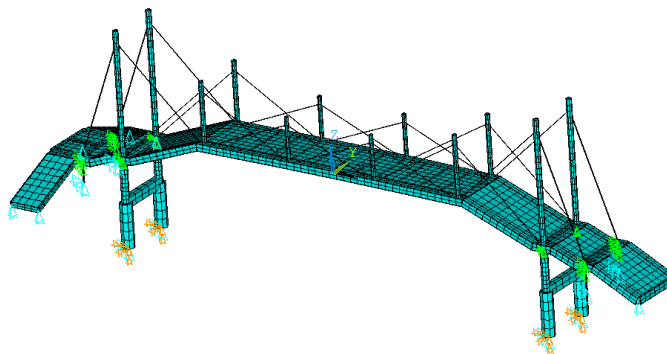


Figure 2. Finite element model of the footbridge
图 2. 人行桥有限元模型

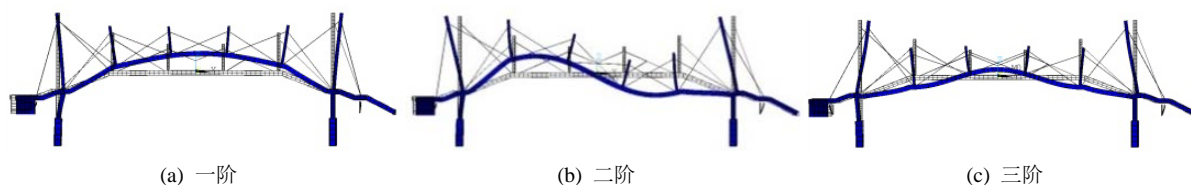


Figure 3. Calculated first three vertical modal shape
图 3. 计算得到的结构前三阶竖向振型

Table 1. Main parameters of tuned mass dampers
表 1. TMD 主要设计参数

调频频率/(Hz)	质量/(kg)	阻尼系数/(N·s/m)
2.4	412	547

4. 跳跃荷载下结构响应计算

4.1. 跳跃荷载的模拟

人的跳跃活动对结构产生的荷载为冲击力, 近似采用正弦函数曲线模拟, 荷载频率取为结构竖向第一阶自振频率(2.5 Hz), 动力系数取为 1.5, 单人重量取为 700 N。单人跳跃荷载曲线如图 4 所示。

在该桥跨中位置施加跳跃荷载, 计算单人、两人、三人同步跳跃情况下结构的响应。利用 ANSYS 软件进行动力时程分析(即瞬态动力学分析)的流程如图 5 所示。对结构进行动力响应计算时, 需要设置阻尼。人行桥的阻尼比一般取 0.2%~2.0%之间[3], 本文采用 Rayleigh 阻尼, 阻尼比设定为 1.5%, 后文 5.2 节通过现场动力特性测试得到的各阶阻尼比也在该范围内。

4.2. 动力响应分析

在跨中施加跳跃荷载, 跨中的加速度响应最大。表 2 为计算得到的减振前后桥面最大加速度数值, 图 6 为三种跳跃工况下跨中位置的加速度时程曲线。参考 AISC Design Guide 11 [11]的有关规定, 将人跳跃荷载作用下引起的桥面竖向振动加速度限值定为 0.7 m/s^2 。从表中可以看出, 未设置 TMD 的原结构在单人跳跃下的加速度最大达到 0.5 m/s^2 , 在两人和三人跳跃荷载下加速度均超过 0.7 m/s^2 的限值要求。采用 TMD 控制后, 加速度响应均小于 0.7 m/s^2 , 满足要求。由于结构处于弹性状态, 施加的荷载为理想的正弦波曲线, 因此两人跳跃、三人跳跃的加速度响应近似为单人跳跃的 2 倍、3 倍。计算得到的减振率约为 55.3%。

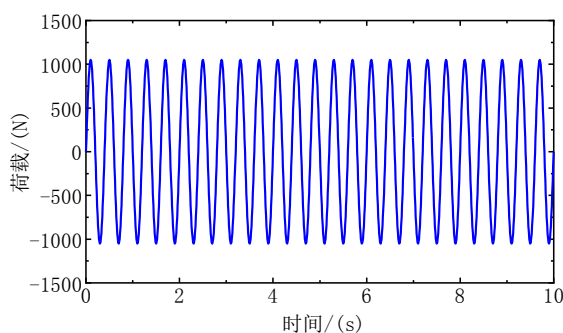


Figure 4. Curve of jumping force
图 4. 跳跃荷载曲线

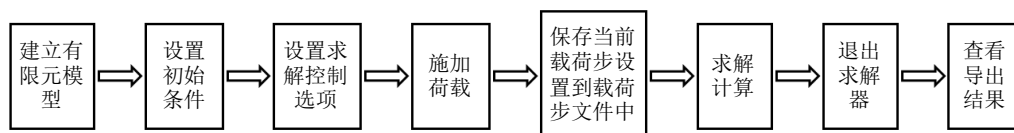


Figure 5. Flow chart of dynamic time history analysis in ANSYS
图 5. ANSYS 动力时程分析流程图

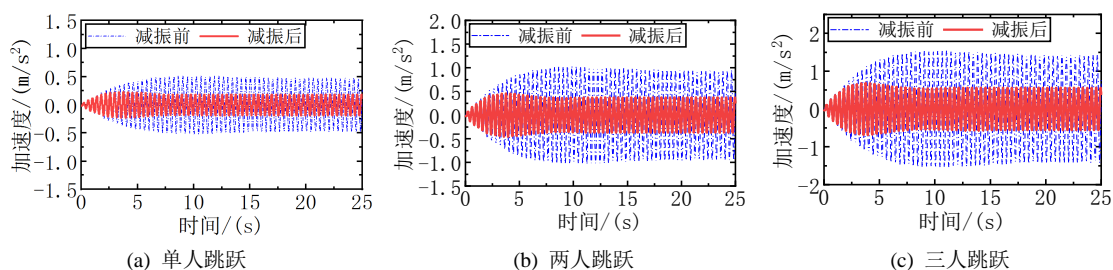


Figure 6. Calculated acceleration time series at mid-span with and without TMD
图 6. 计算得到的桥面跨中加速度时程曲线

Table 2. Calculated max acceleration with and without TMD
表 2. 计算得到的最大加速度

	单人跳跃	两人跳跃	三人跳跃
减振前/(m/s ²)	0.515	1.030	1.545
减振后/(m/s ²)	0.230	0.461	0.691
减振率	55.30%	55.30%	55.30%

5. 人行桥人致振动现场测试

5.1. 测试仪器

由于该桥的振动以低频为主, 振动频率一般小于 50 Hz, 因此采用 941B 型超低频加速度传感器和振动及动态信号采集分析仪, 对该桥进行模态测试及跳跃荷载作用下的振动响应测试。测试仪器系统如图 7 所示, 现场测试所用主要仪器及技术指标见表 3。

5.2. 人行桥动力特性测试

首先采用环境激励法对原结构进行动力特性测试。环境激励法是目前建筑结构试验中使用较多的一

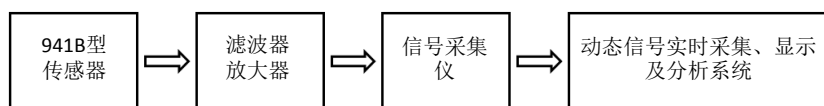


Figure 7. Test instrument system
图 7. 测试仪器系统

Table 3. Main test equipment and technical indicators
表 3. 测试所用主要仪器及技术指标

仪器名称	数量	主要技术指标
941B 型超低频拾振器	8 个	通频带 0.25~80 Hz
信号采集仪	1 台	8 通道
滤波器、放大器	1 台	8 通道
动态信号测试分析系统	1 套	7.0 版
传感器同轴电缆数据线	8 根	—
笔记本电脑	1 台	—
节拍发生器	1 台	—
供电箱	1 台	电压 220 V、三插座

种方法, 它的最大优点是不需要人工激励, 特别适用于测量整体结构的动力特性。根据基于环境激励的模态试验理论, 可以利用环境激励的结构响应信号来识别系统的模态参数。环境激励法假定系统的输入和响应为平稳的各态历经的随机过程, 激励信号为白噪声信号, 对于小阻尼比的结构, 由于各阶模态之间耦合较小, 可以较准确的得到结构的自振频率及阻尼比[12]。

为了准确得到结构动力特性并且保证测量精度, 选择桥下路面通行车辆较少的时段进行测试, 测试时桥面无行人通行, 以减少周围环境对测试的干扰。选用两个传感器两通道进行测试, 在主跨布置 11 个测点(M1~M11), 如图 8 所示, 其中 M6 测点为参考点。

对传感器采集的各测点竖向加速度时程数据进行模态参数识别, 将得到的结构前三阶竖向自振频率及阻尼比列于表 4 中, 并与有限元计算得到的结构自振频率进行对比。前两阶自振频率的计算值略小于测试值, 两者相对误差均小于 5%, 第三阶计算值略大于测试值, 两者相对误差为 6.74%, 处于合理范围内, 有限元计算的振型与测试振型也较吻合, 说明有限元模型与实际结构相符合。测试得到的前三阶阻尼比分别为 1.78%、0.94%和 1.60%, 均在 2%以内, 这也说明前文 4.1 节进行动力时程分析时选取 1.5%的阻尼比是合理的。

5.3. 跳跃荷载下结构响应测试

5.3.1. 测试工况

对该桥进行人致振动响应测试时, 在主跨两边共设置 8 个加速度测点, 测点布置如图 9 所示, 测点编号依次为 C1~C8。实际测试时, 组织 1 人及 2 人、3 人在跨中位置按照节拍器的提示同步跳跃, 跳跃频率为 2.5 Hz (与人行桥竖向共振频率及 TMD 调频频率接近), 跳跃时长约为 40 s。定义测试工况分别为: TY-1P、TY-2P、TY-3P。现场跳跃测试情况如图 10 所示。

5.3.2. 测试结果

由于结构的对称性, 测点 C1~C4 的加速度响应分别与 C5~C8 的加速度响应接近, 其中响应最大的测点为 C8, 限于篇幅, 表 5 仅给出测点 C5~C8 各跳跃工况下减振前后的加速度响应峰值及减振率。

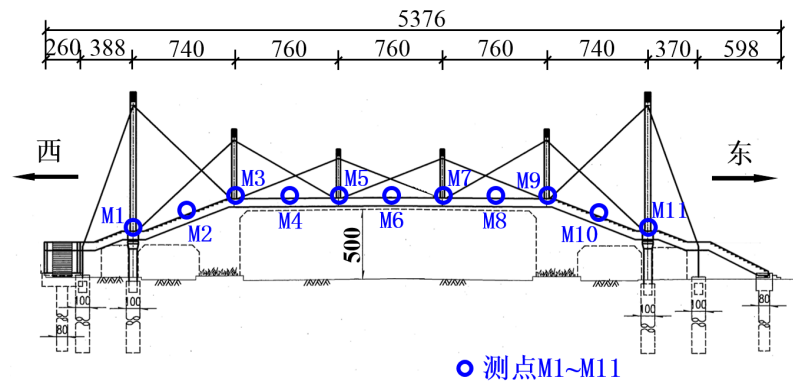


Figure 8. Measurement points of modal test
图 8. 动力特性测试测点布置图

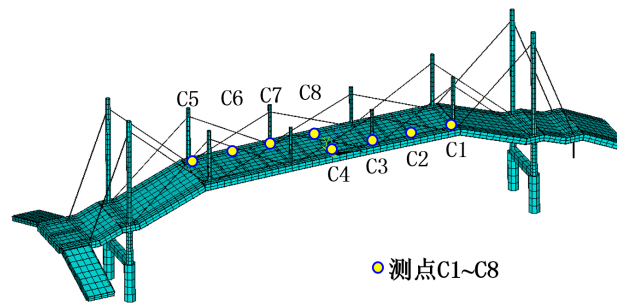


Figure 9. Location of acceleration measurement points
图 9. 加速度测点布置位置

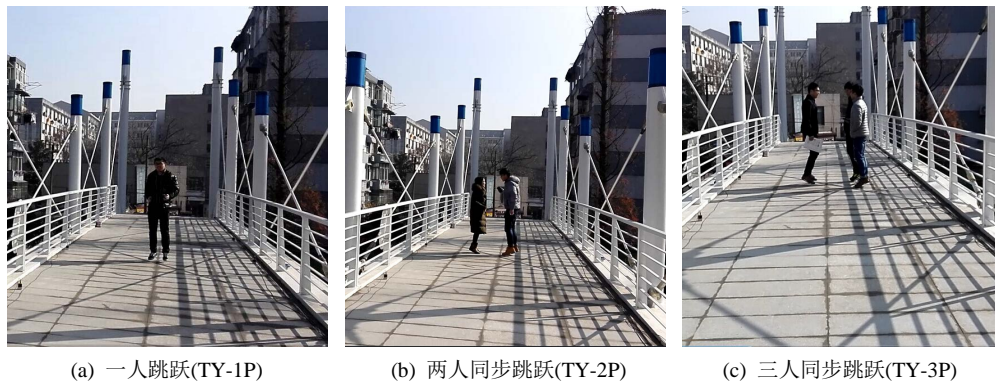


Figure 10. Site test of pedestrians jumping
图 10. 跳跃现场测试情况

Table 4. Summary of the modal parameters
表 4. 模态参数汇总

阶次	频率/(Hz)			测试 阻尼比
	测试值	计算值	相对误差	
1	2.55	2.46	-3.53%	1.78%
2	6.00	5.93	-1.17%	0.94%
3	9.65	10.30	6.74%	1.60%

注: 相对误差 = (计算值 - 测试值)/测试值。

Table 5. Peak acceleration at C5 to C8 with and without TMD
表 5. 减振前后测点 C5-C8 加速度响应峰值

测点	TY-1P			TY-2P			TY-3P		
	减振前	减振后	减振率	减振前	减振后	减振率	减振前	减振后	减振率
C5	0.309	0.088	71.48%	0.427	0.234	45.20%	0.679	0.318	53.16%
C6	0.585	0.144	75.38%	0.803	0.426	46.92%	1.264	0.600	52.51%
C7	0.684	0.176	74.26%	0.937	0.511	45.48%	1.465	0.727	50.37%
C8	0.784	0.208	73.52%	1.073	0.583	45.65%	1.657	0.868	47.58%

注: 减振率 = (减振前 - 减振后)/减振前; 减振前后的加速度单位均为 m/s^2 。

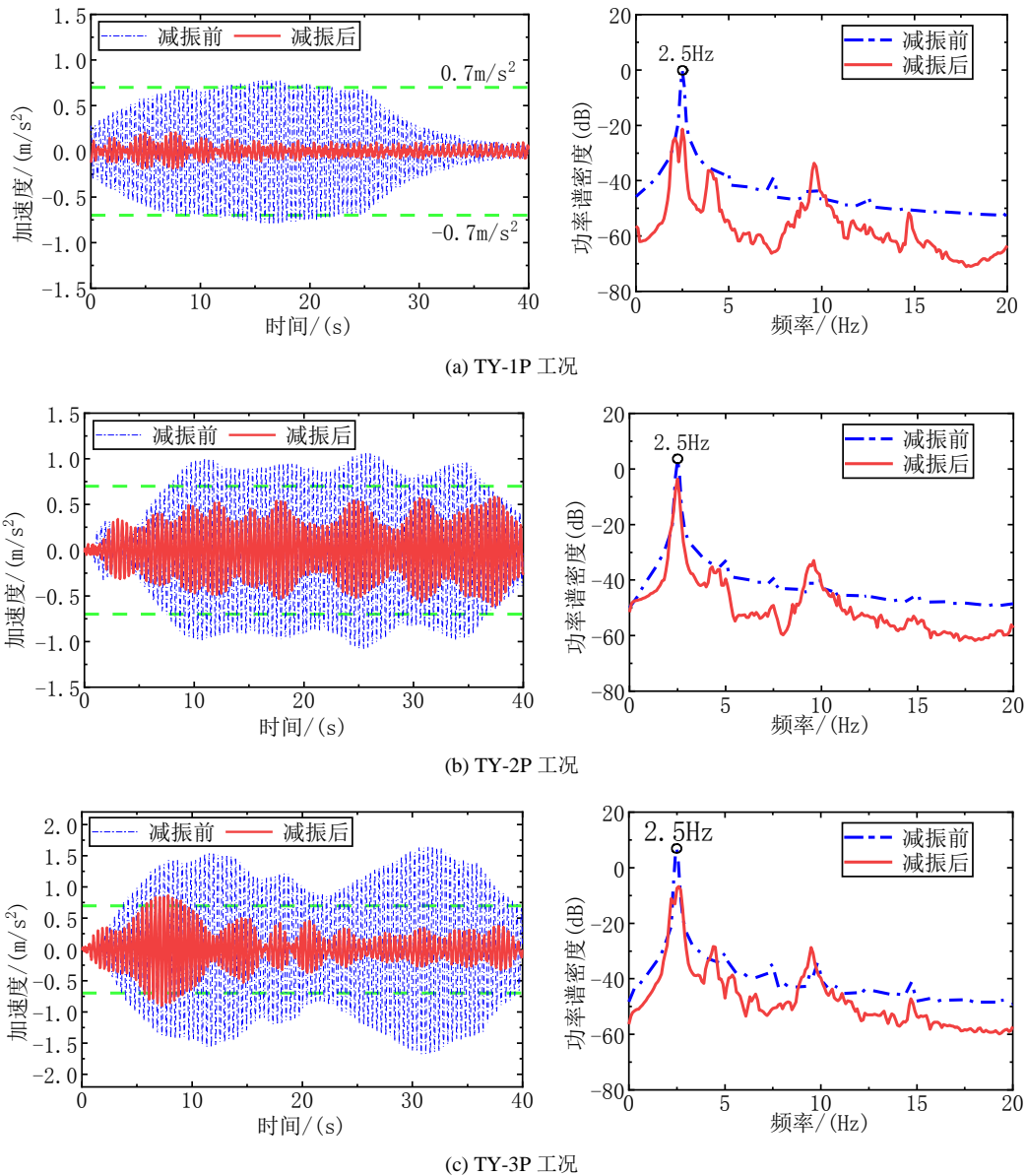


Figure 11. Acceleration time series and frequency spectra at C8 with and without TMD

图 11. 测点 C8 减振前后的加速度时程曲线及频谱曲线

从表 5 中可以看出, 对于未设置 TMD 的原结构, 各测点加速度响应峰值随着起跳人数的增加迅速增大, 一人跳跃时加速度最大为 0.784 m/s^2 , 大于 0.7 m/s^2 , 三人同时跳跃最大加速度达到 1.657 m/s^2 , 振动十分剧烈。实际测试时, 在桥上静止的人有很强的不舒适感。对于设置 TMD 后的结构, 加速度响应明显减小。三人跳跃工况下, 测点 C7 和 C8 的加速度峰值大于 0.7 m/s^2 , 虽然不满足规范的要求, 但两者依然有超过 45% 的减振率; 除此之外, 其余工况各测点的加速度均小于 0.7 m/s^2 , 符合规范要求。设置 TMD 后各测点减振率均在 45% 以上, 单人跳跃工况下的减振率超过 70%, 说明 TMD 发挥了很好的减振作用。

图 11 为测点 C8 在 3 种跳跃工况下减振前后的加速度时程曲线及相应的频谱曲线, 图中用绿色虚线标出了结构在跳跃荷载下的加速度限值(0.7 m/s^2)。减振前桥面最大加速度均大于 0.7 m/s^2 , 减振后结构的加速度响应明显减小。减振前原结构的频谱曲线只有一个峰值为 2.5 Hz , 说明原结构在 2.5 Hz 的荷载频率下发生了明显共振; 在结构发生共振时, 减振后桥面跨中测点功率谱峰值及整个曲线趋势小于减振前, 这说明部分能量被 TMD 所消耗, TMD 起到了消能减振的作用。

与 4.2 节有限元计算的结果对比, 减振前后实测加速度普遍大于计算值, 这是因为实际人的跳跃荷载和理想正弦曲线有差别。实际测试时, 测试者被要求在跨中位置按照节拍器提示的频率跳跃, 且多人跳跃时步调基本一致, 因此有限元计算的结果与测试结果较接近。实测结果和理论计算结果均表明, 该桥设置 TMD 后, 加速度响应得到了有效的控制。

6. 结论

本文采用理论计算及现场测试两种手段研究了南京某人行天桥跳跃荷载下的振动情况。有限元分析得到的第一阶竖向自振频率为 2.46 Hz , 现场模态测试得到的为 2.55 Hz , 两种方法均表明该人行天桥第一阶竖向频率处于人活动敏感频率范围内, 需要计算人致振动响应。通过对有限元模型施加单人、两人、三人跳跃荷载, 计算得到两人、三人跳跃荷载下桥面最大加速度响应均大于 0.7 m/s^2 的限值要求, 采用调谐质量阻尼器控制桥面的加速度响应, 减振后计算得到的加速度均满足要求。对该桥进行现场跳跃工况下的振动测试, 实测结果和理论计算结果均表明, 本工程设置 TMD 装置后, 振动响应得到了有效控制, 减振效果明显, 达到了设计要求。

基金项目

国家自然科学基金(51278106; 51438002); 江苏省产学研前瞻性项目(BY2016076-11)。

参考文献

- [1] 吕西林, 丁鲲, 施卫星, 等. 上海世博文化中心 TMD 减轻人致振动分析与实测研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 32-37 + 150.
- [2] Dallard, P., Fitzpatrick, A.J., Flint, A., et al. (2001) The London Millennium Footbridge. *Structural Engineer*, **79**, 17-33.
- [3] 陈政清, 华旭刚. 人行桥的振动与动力设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 9-13, 74-106.
- [4] 李爱群, 陈鑫, 张志强. 大跨楼盖结构减振设计与分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 160-170.
- [5] CJJ69-1995. 城市人行天桥与人行地道技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [6] EN 1995-2. (2004) Eurocode 5: Design of Timber Structures-Part 2: Bridges. European Committee for Standardization, Brussels.
- [7] BS 5400. (1978) Steel, Concrete and Composite Bridge. British Standards Association, London.
- [8] CAN/CSA S6-06. (2011) Canadian Highway Bridge Design Code. Canadian Standards Association, Ottawa.
- [9] RFS2-CT-2007-00033. (2008) Human Induced Vibrations of Steel Structures (HIVOSS): Design of Footbridges. Re-

search Fund for Coal and Steel, Brussels.

- [10] 张志强, 胡心一, 张相勇, 等. 青岛北站西广厅减振设计[J]. 建筑结构, 2013(23): 17-22.
- [11] Murray, T.M., Allen, D.E. and Ungar, E.E. (2003) Steel Design Guide 11: Floor Vibrations Due to Human Activity. American Institute of Steel Construction (AISC).
- [12] 施卫星, 马秋玲. 结构振型脉动测试方法的应用[J]. 振动与冲击, 2006, 25(S): 886-888.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjce@hanspub.org