

人行天桥振动时程分析方法的研究

蔡静敏¹ 陈学伟²

(1. 广东名都设计有限公司,广州 510000; 2. 华南理工大学土木与交通学院,广州 510640)

摘要:人行天桥在人群走动引起的振动作用下的舒适度成为评价人行天桥适用性的重要指标。现行规范给出的静力挠度控制并不能充分体现大跨度结构的正常使用要求。国外规程对楼板振动问题采用稳态响应分析方法,但该方法局限于平面规则、边界条件简单楼板,不适用复杂的楼板体系。根据人群的行走规律,对人群走动进行仿真的基础上编制了人行荷载时程生成程序,并采用人群行走致使天桥板面振动的时程分析方法,对特定边界条件、跨度及阻尼的天桥结构进行时程分析。最后将计算结果与人行荷载试验进行对比,表明该时程分析方法能较精确反映楼板人致振动的特性,并适用于任意形状及边界条件的楼板舒适度的评估。

关键词:人行天桥;人行荷载;人群走动仿真;时程分析

THE RESEARCH OF TIME-HISTORY RESPONSE ANALYSIS OF FOOTBRIDGE VIBRATION BASED ON STIMULATION OF GROUP WALKING

Cai Jingmin¹ Chen Xuewei²

(1. Guangdong Mingdu Architecture and Design Company, Guangzhou 510000, China;

2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

ABSTRACT: Occupant comfort when footbridge systems are subjected to crowd-induced vibrations has become an important index to evaluate serviceability of structures. Control of static deflections stipulated in current code cannot sufficiently represent the serviceability requirements of long-span systems. Harmonic vibration analysis procedure is introduced by foreign code requirements to deal with floor vibrations, with the restriction to those with regular shapes and simple boundary conditions. This paper proposes a time-history analysis program based on load induced by human activities and the stimulation of group walking. Footbridge systems with special boundary condition, span and damping are analyzed by time-history method. Compared with the results of crowd-induced load experiment, the analytical results confirmed the accuracy of this analysis procedure in representing the characteristic of crowd-induced floor vibrations, which is applicable for evaluation of floor systems with arbitrary shape and boundary condition.

KEY WORDS: passenger footbridge; crowd-induced load; group walking stimulation; time-history analysis

随着施工技术的发展以及材料性能的改善,刚度大、重量轻的材料越来越多地在建筑中使用。这种趋势使人行天桥对于诸如步行荷载等较小荷载的作用也变得比较敏感。因此,建立天桥振动对使用性能的评价方法和评价标准,并且在设计阶段就对此进行考虑,可以有助于设计出更经济、更舒适的钢结构人行天桥。

1 研究背景

人致振动问题是人体工程学与结构工程学的交叉课题,国内研究工作较少。美国、日本、欧洲等一些国家对此进行过一些研究并发布过有关设计指南,如英国混凝土协会发布的《Critical Review of Guidelines for Checking Vibration Serviceability of Post-Tensioned Concrete Floors》^[1];英国钢结构协会(SCI)与英国建筑业研究和信息协会(CIRIA)发

布的《Design Guide on the Vibration of Floors》^[2];英国SCI发布的《Design Guide on the Vibration of Floors in Hospitals》^[3];美国钢结构协会(AISC)发布的《Floor Vibration due to Human Activity》^[4]及加拿大国家建筑法规《National Building Code of Canada》^[5];我国现行规范标准还没有这方面规定。国外对楼板振动问题主要采用稳态响应分析方法,把楼板简化为单自由度体系,边界条件简化为简支,但该分析方法由于过于简化,与实际情况相差很大。Chen^[6]和Pavic^[1]的研究表明,采用有限元时程分析可以得到非常理想的计算结果,但由于荷载处理的复杂性,实际应用中非常困难。

本文基于人群走动的规律,通过编制程序实现

第一作者:蔡静敏,女,1981年1月出生,工程师。

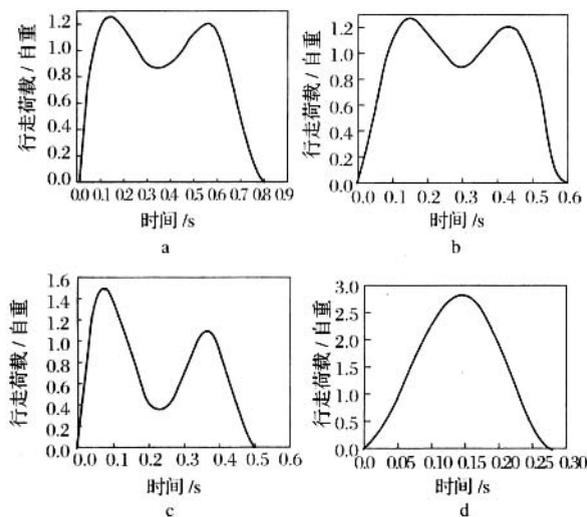
Email:cm8989@qq.com

收稿日期:2009-02-26

人群走动仿真模拟,生成人行走的荷载时程数据,自动接口有限元软件,避免了荷载数据处理的麻烦,可实现楼板振动的时程分析。

2 人走动引起的动力荷载模型

研究人致楼板振动问题之前应先了解不同的人的走动引起的动力荷载模式。人的行走活动按频率大小可分为慢速行走、正常行走、快速行走及跑步等模式,行走的频率为 1.7~3.2 Hz。Buchman 和 Ammann^[7]测出各种人行走模式的频率与荷载时程,如图 1 所示。



a—慢速行走 ($f_p = 1.7$ Hz); b—正常行走 ($f_p = 2.0$ Hz);
c—快速行走 ($f_p = 2.3$ Hz); d—跑步 ($f_p = 3.2$ Hz)

图 1 不同行走模式的荷载时程曲线

文献^[8]中将常见的 4 种行走模式的速度、频率和步距列出,如表 1 所示。

表 1 不同行走模式的速度、步距和频率

行走模式	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	步距/m	频率/Hz
慢速行走	1.10	0.60	1.70
正常行走	1.50	0.75	2.00
快速行走	2.20	1.00	2.30
跑步	3.30	1.30	2.50

人在行走过程中,脚步接触楼面产生冲击荷载,荷载的时程可以简化成半个正弦波函数,当脚步脱离楼面,荷载为 0。行走荷载的数学模型可以采用式(1)进行描述^[8]。

$$\begin{cases} F(t) = k_p P \sin(\pi f_p t) & t < t_p \\ F(t) = 0 & t_p < t < T_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_p 为荷载周期; f_p 为行走频率; t_p 为在荷载周期内接触楼面的时间; k_p 为冲击荷载的放大系数, $k_p =$

$F(t)_{\max}/P$; P 为人的自重。荷载时程曲线如图 2 所示。

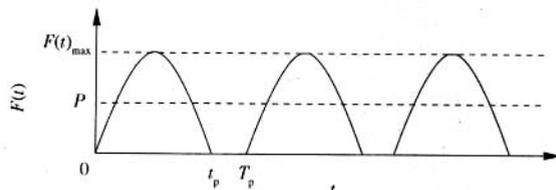


图 2 人行荷载简化时程曲线

3 人群走动仿真模拟及人行荷载生成程序 FVAP 的编制

楼板振动主要是由人群活动的动力荷载引起的,人群活动过程可以通过人群数量、每个人的体重、每个人的行走起点、行走方向、行走模式(包括步距、频率、冲击放大系数)等属性进行描述。为了得到楼板各点的荷载时程,需要对人群活动进行数值仿真。由于人群活动具有随机性,为简化仿真模型可做出以下假定:1)人的自重、行走模式、开始时间及行走路线是随机的;2)行走路线为直线,行人匀速行走;3)行人自重为 (700 ± 145) N,属于正态分布随机变量。根据上述理论,本文通过面向对象的语言编制了人行荷载生成程序 FVAP(Floor Vibration Analysis Program),对特定行走边界的人群走动进行仿真,并得到人致动力荷载时程数据。程序界面如图 3 所示,可导入楼板的单元信息,划定活动边界、定义人群数量及行走模式等。

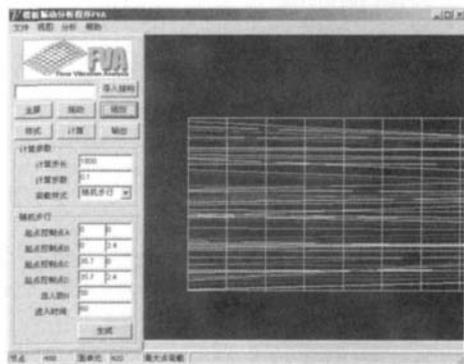


图 3 FVAP 界面

楼板时程分析计算流程如图 4 所示。

通过该程序生成的楼板动力荷载时程数据流量大,为方便工程应用,程序自动与结构有限元软件如 SAP 2000、ETABS、MIDAS 等软件接口,实现数据流的导入。通过有限元软件可以对楼板进行动力时程分析。

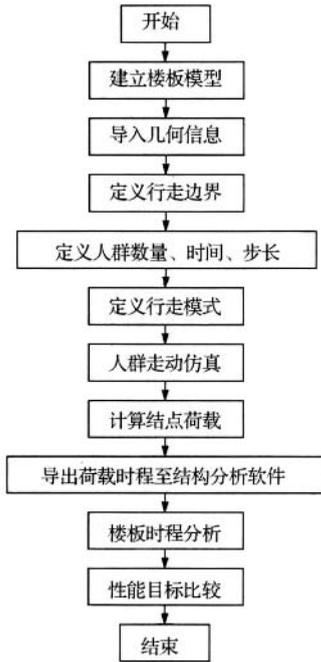


图4 楼板时程分析流程

4 天桥结构振动时程分析

本文以某人行天桥结构为例,介绍楼板振动时程分析方法的分析过程。

4.1 建立有限元模型

文献[9]对某人行天桥进行人行荷载试验。该天桥为两跨的钢结构,天桥截面如图5所示。天桥两跨长度分别为 16.32, 19.83 m, 楼板采用 16 mm 的钢板,主梁采用截面 460 - UB 型钢,楼板与钢梁上翼缘焊接。在活荷载为 3.5 kN/m² 作用下的静力挠度为 $L/503$,其中 L 为主跨的长度。

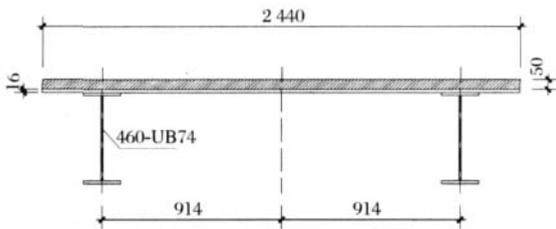
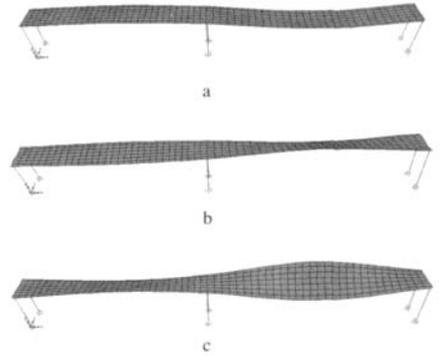


图5 天桥截面示意

本文采用有限元软件 SAP 2000 对结构进行分析。分析模型为杆系单元与壳单元的整体模型,如图6所示。楼板的划分网格大小应小于步距(约 750 mm),以便于结点时程荷载的输入。对结构进行模态分析得到振型如图6所示。试验测得的楼板振动第一阶频率为 $f_{1,exp} = 3.2$ Hz,有限元分析结果为 $f_{1,calc} = 3.3$ Hz,表明模型基本能反映实际结构的动力特性。该天桥的自振频率与行走频率接近且挠度偏大,需要进行楼板振动验算,保证结构舒适度。



a - $T_1 = 0.302$ s; b - $T_2 = 0.240$ s; c - $T_3 = 0.238$ s

图6 有限元模型及模态分析结果

4.2 人群走动仿真及荷载生成

将有限元模型中的楼板单元数据导入 FVAP 中,划定行走边界。为了对有限元分析和试验结果进行比较,行走模式取正常行走,参数取值如表1所示。人群进入楼板时间设为 60 s,统计时间设为 120 s,步长为 0.1 s。人群数量分别取 1, 15, 30, 60 人共 4 种工况进行仿真。图7为单人行走时的楼板弯矩 M_{max} 云图。

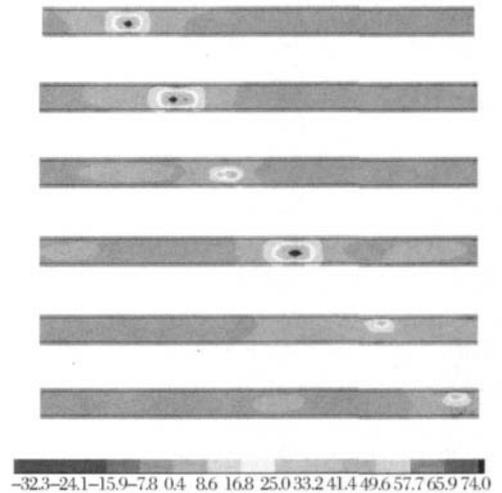


图7 单人经过天桥时楼板弯矩响应 kN·m

通过程序计算生成荷载时程文件,并自动导入 SAP 2000 中,某结点在行走人数为 60 人时荷载时程曲线如图8所示。

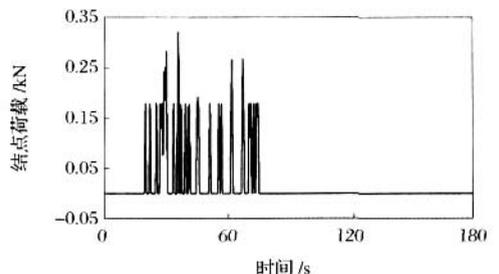


图8 结点 430(人数 $N = 60$) 竖向荷载时程

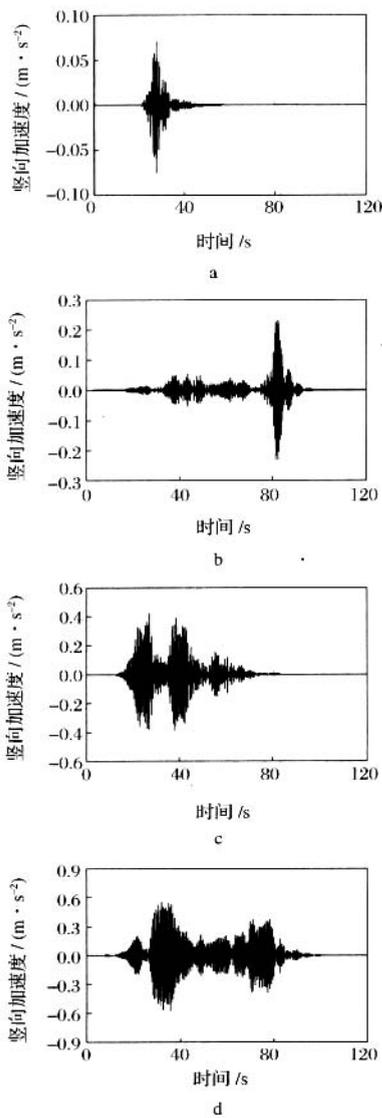
4.3 楼板振动时程分析

时程分析算法采用 Newmark 逐步积分法,其中 $\alpha=0.5, \beta=0.25$; 阻尼采用瑞利阻尼,取第一振型与第二振型的阻尼比为 0.02; 分析步长为 0.1 s, 步数为 1 200。

计算耗时描述:有限元模型, 结点数为 448, 杆单元为 10, 壳单元数为 420; 计算机 CPU 为 Inter (R) Pentium(R)1.50 GHz, 内存为 760 MB。单个工况时程分析用时 82 s。该楼板振动时程分析方法的计算量在工程应用上是可以接受的。

4.4 分析结构对比

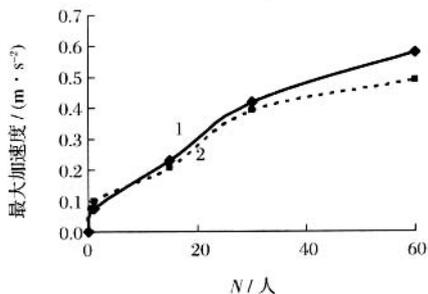
算例对人群数量为 1, 15, 30, 60 人的 4 种工况下的楼板振动进行分析。4 种工况下楼板竖向加速度时程如图 9 所示。



a-N=1; b-N=15; c-N=30; d-N=60

图 9 4 种工况下竖向加速度时程曲线

将 4 种工况的竖向加速度最大值与文献[9]进行的人行荷载试验进行对比, 结果如图 10 所示。图 10 表明该时程分析结果比实测结果略大, 其主要原因是外围结构的支承作用和阻尼的增大以及高阶模态的影响导致的差异。由此可以认为, 时程分析的结果比实际的结构效应偏于安全。



1-时程分析法; 2-试验值

图 10 人行天桥最大加速度与人数关系

4.5 楼板振动评估

国际标准化组织(ISO)通过测定人对步行荷载(Heel-Drop Load)的感知度, 确定了一个基本标准(Baseline)^[4]。即通过限制最大加速度来规定不同用途的建筑物对步行荷载的抗振指标。如对办公楼及住宅取系数 10、商场取 30、桥梁取 100, 利用这些系数计算的最大加速度的规定值如图 11 所示。

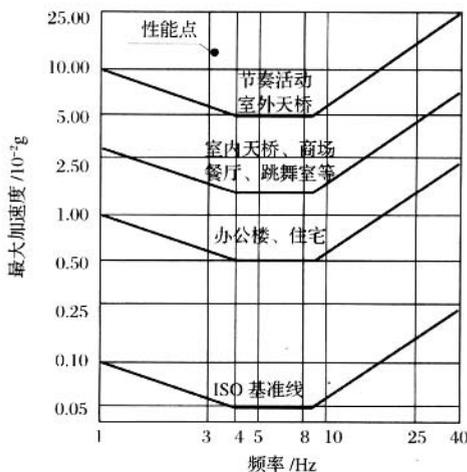


图 11 ISO 2631-2:1989 性能评价曲线及

天桥结构振动性能点示意

由图 10 可知, 楼板振动与人群数量有关, 在楼板时程分析之前, 应先确定人数 N 。人行天桥的活荷载按我国 GB 50009-2001《建筑结构荷载规范》^[10] 取 3.5 kN/m^2 , 频遇值组合系数为 0.5, 有效活荷载为 $3.5 \times 0.5 = 1.75 \text{ kN/m}^2$, 相当于 $1.75/0.7 = 2.333 \text{ 人/m}^2$ 的人群密度, 楼板面积 87.11 m^2 , 总人数 $N = 87.11 \times 2.333 = 203$ 。按正常行走模式,

步行频率为 2 Hz,步距为 0.75 m,天桥总长度为 35.7 m,经过天桥的时间约为 $35.7/\frac{0.75}{2}=23.8$ s。因此设人群数量 N 为 210,进入楼面时间为 25 s。取 10 个随机样本进行时程分析,得到结果如图 12 所示。楼板竖向最大加速度平均值为 1.406 m/s^2 ,由图 12 可知求解值比较稳定。该值与 ISO 2631-2 的性能指标曲线进行对比,如图 11 所示。楼板加速度性能点在指标曲线的上方,反映出天桥的加速度不满足要求,应提高天桥结构的刚度。

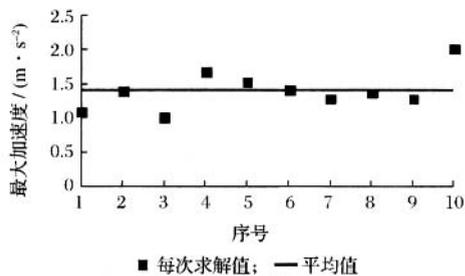


图 12 人行天桥在随机行人荷载作用下最大竖向加速度

5 结论

对于人群走动导致的楼板振动,通过限制其位移或自振频率可以达到限制振幅的目的,但对加速度的控制效果不理想。然而给使用者带来不适的是加速度,而且在高频区域也可能是速度。

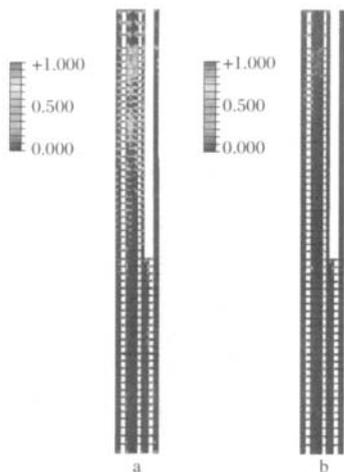
随着计算机技术的发展,楼板振动分析应从简化计算过渡到计算机分析。本文通过编制程序实现人群走动仿真并计算人群走动荷载时程,进行楼板振动时程分析。通过数据流的导入导出,避免了荷

载数据处理的麻烦,便于工程应用。该方法反映楼板的动力特性与步行荷载的时程特性,能相对准确地模拟楼板的人致振动响应。

参考文献

- [1] Pavic A, Reynolds P, Waldron P. Critical Review of Guidelines for Checking Vibration Serviceability of Post-Tensioned Concrete Floors [J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23(3):21 - 31.
- [2] Wyatt T A. Design Guide on the Vibration of Floors[R]. A Steel Construction Institute, 1989.
- [3] Hicks S J, Devine P J. Design Guide on the Vibration of Floors in Hospital[S]. The Steel Construction Institute, 2004.
- [4] Murray T M, Allen D E, Ungar E E. Steel Design Guide Series 11: Floor Vibration due to Human Activity[M]. AISC and CISC, 1997.
- [5] National Research Council of Canada. The Supplement to the National Building Code of Canada[S]. Ottawa, 1995.
- [6] Chen Y. Finite Element Analysis for Walking Vibration Problem for Composite Precast Building Floors Using ADINA: Modeling, Simulation, and Comparison [J]. Computer and Structures, 1999, 72(4):109 - 126.
- [7] Bachmann. Case Studies of Structures with Man-Induced Vibration[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 110(2): 401 - 418.
- [8] J G S da Silva, P C G da S Vellasco, S A L de Andrade. An Evaluation of the Dynamical Performance of Composite Slabs [J]. Computers and Structures, 2003, 81:1905 - 1913.
- [9] Sarah E Mouring, Bruce R Ellingwood. Guidelines to Minimize Floor Vibration from Building Occupants[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120:507 - 526.
- [10] GB 50011-2001 建筑结构荷载规范[S].

(上接第 46 页)



a—受拉损伤, b—受压损伤
图 7 剪力墙混凝土损伤情况

够抵御 El Centro 波及场地波(峰值加速度为 208.8 cm/s^2),能够实现“大震不倒”的性能目标。

6 结论

本文介绍了深圳卓越·皇岗世纪中心项目二号塔楼结构整体分析、弹性时程分析、中震不屈服分析和动力弹塑性分析的结果及相应结论。本文有关设计的思路和方法可为超高层建筑结构抗震设计提供参考。

参考文献

- [1] CECS 188: 2005 钢管混凝土叠合柱结构技术规程[S].
- [2] JGJ 3-2002 高层建筑混凝土结构技术规范[S].
- [3] GB 50011-2001 建筑抗震设计规范[S].
- [4] 卓越·皇岗世纪中心项目超限结构初步设计抗震设防专项审查申报表与超限可行性论证报告[R]. 中建国际(深圳)设计顾问有限公司, 2007.
- [5] GB 50010-2002 混凝土结构设计规范[S].