

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.01.008

弯曲型结构简化动力模型分析及 TMD 减振设计

王菁菁^{1,2}, 张超¹, 李浩博¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 采用等效刚度参数识别法对某高层建筑主体结构进行模型简化。对比了简化模型和 ETABS 原模型的动力特性和包括地震作用的多种激励下的结构响应。为了说明在高层建筑结构动力分析中使用正确模型的重要性, 对剪切型模型和弯曲型模型的固有频率和振型进行了对比分析。以弯曲型模型和剪切型模型为基础, 进行了调谐质量阻尼器(简称 TMD)减振设计, 将所得 TMD 附加于弯曲型主体结构, 并对比结构的位移响应。结果表明, 剪切型结构和弯曲型结构的动力响应存在较大差异, 而弯曲型简化模型能准确地代表原模型, 故不建议或者应谨慎使用剪切型模型对高层建筑结构进行减振装置设计。

关键词: 高层结构; 模型简化; 等效刚度参数识别法; 弯曲型模型; 剪切型模型

中图分类号: TU973.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2020)01-0045-06

引文格式: 王菁菁, 张超, 李浩博. 弯曲型结构简化动力模型分析及 TMD 减振设计 [J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(1): 45-50.

A Dynamic Analysis of Condensed Model and Tuned Mass Damper Design for Curved Structures

WANG Jingjing^{1,2}, ZHANG Chao¹, LI Haobo¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The equivalent stiffness identification method has been used to simplify the model of a high-rise primary structure. A comparison has been made of the dynamic characteristics of the simplified model and the original model of ETABS, followed by a comparison between the structural response under various excitations including earthquake action as well. In order to illustrate the importance of utilizing the correct model for the high-rise structure in the dynamic analysis, a comparison and an analysis have been made of the natural frequency and mode shape of shear-typed model and curved model. TMD is to be designed based on the curved model and the shear-typed model, to be added to the curved primary structure, with the displacement response of the structure also compared. The results show that the dynamic response of the shear-typed structure is quite different from that of the curved structure. With the simplified model of curved structure accurately representing the original model, the shear-typed model is not recommended or at least should be used with caution in the structural control design for high-rise buildings.

Keywords: high-rise structure; model condensation; equivalent stiffness identification method; simplified curved model; shear-typed model

收稿日期: 2019-04-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51608190), 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3123)

作者简介: 王菁菁(1986-), 女, 湖南株洲人, 广州大学讲师, 主要从事结构振动控制方面的教学与研究,

E-mail: wangjj@hut.edu.cn

0 引言

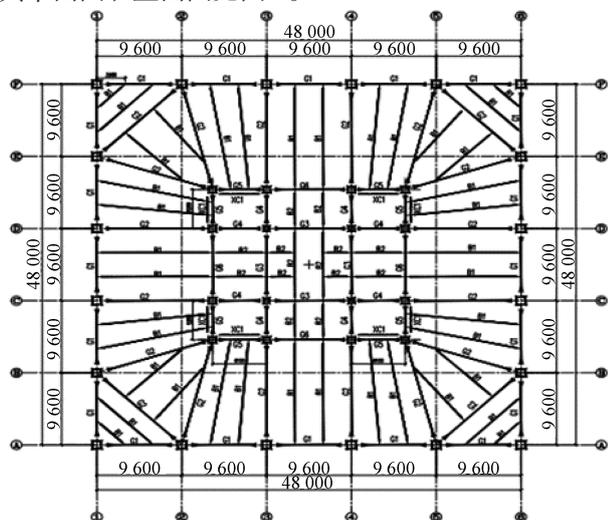
目前,我国高层 structures 的发展极其迅速,不仅数量多,而且层数多、高度大、形体越来越复杂。高层 structures 的有限元模型通常很大,对这种模型进行动力响应分析时需要较高的计算机配置和大量的运行时间。因而,模型简化对高层 structures 的动力响应分析非常重要。

国内外比较常用的简化模型为剪切型层串模型,它适用于强梁弱柱型框架结构^[1]。而对于高层 structures 结构,其整体弯曲变形的特点不容忽视,采用剪切型模型不能很好地反映其实际结构的变形特点^[2]。不合理的简化模型必然会导致结构动力响应分析结果产生较大的误差,也会影响基于结构参数和响应进行的减振装置设计。因此,有学者提出了采用弯剪型层间模型、剪切型-剪弯型组合模型等对高层 structures 进行模型简化和动力响应分析^[3-4]。

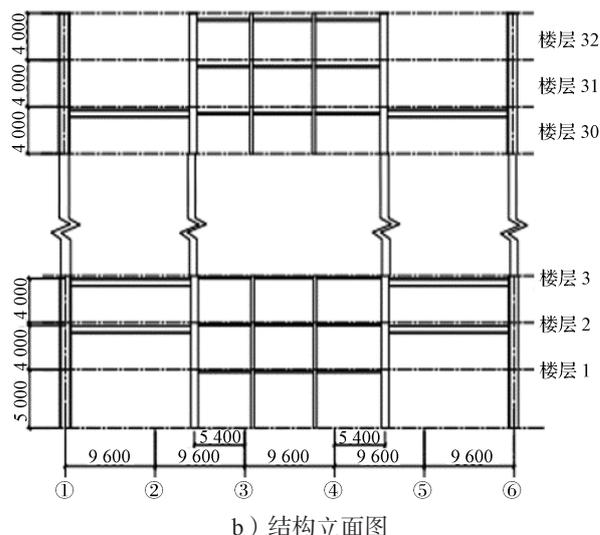
本文拟基于高层 structures 发生弯曲变形的特点,采用弯曲型模型,对某 32 层办公楼进行模型简化和动力响应分析。首先,将办公楼主体结构简化为一个 32 自由度的集中质量模型;然后,对弯曲型模型和剪切型模型的固有频率和振型进行了对比分析;最后,分别以弯曲型模型和剪切型模型为基础,对其进行调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)减振设计,再将所得 TMD 附加于弯曲型主体结构,并对比结构的位移响应。结果显示,所得动力响应分析结果合理准确,应采用弯曲型模型对高层 structures 进行模型简化。

1 主体结构

本研究中采用的主体结构为一 32 层的办公楼,其平面图和立面图见图 1。



a) 结构平面图



b) 结构立面图

图 1 主体结构的平面图和立面图

Fig. 1 Structural plan and elevation map of the primary structure

该办公楼的总高度为 129 m,其钢框架-核心筒结构的楼面尺寸为 48 m×48 m,除首层的高度为 5 m 外,其他各层的高度均为 4 m。该建筑的前六阶固有频率依次为 0.24, 0.73, 1.33, 1.94, 2.58, 3.21 Hz。采用结构分析和工程设计软件 ETABS 建立主体结构的高精度有限元分析模型。

通过实际工程监测发现,对于 100~300 m 的高层钢结构建筑,其基本模态阻尼比为 0.4%~1.0%。随着荷载的不断增加,结构阻尼呈非线性增加,并且会迅速达到一个峰值,许多结构的实测峰值约为 0.5%。此外,高阶模态阻尼比约为前一阶模态阻尼比的 1.3 倍,但由于高阶模态参与系数非常小,低阶模态对结构振动更为重要^[5-8]。考虑到以上因素,本研究中主体结构的所有模态阻尼比均取 1%。

2 模型简化

在本研究中,结构响应分析的重点不是结构构件的应变和应力,而是层间位移。因此,可以采用简化的主体结构模型,即采用集中层质量模型来简化结构进行分析,控制装置可以通过弹簧和阻尼单元与主体结构相连。本研究所采用的主体结构模型,是基于原 ETABS 模型进行简化后得到的,其荷载和响应可以通过 ETABS 模型准确导出,最终将主体模型简化为仅在一个水平方向上运动的 32 自由度的集中层质量模型。

在简化的 32 自由度模型中,可以快速得到其质量矩阵,每层质量即为每层柱的总轴力减去相邻上层柱的总轴力再除以重力加速度,但是模型的总刚

度矩阵形成较为复杂。根据观察到的细长柔性结构的弯曲特性, 层间位移和层间剪力不仅与相邻层有关, 而且与建筑物的其他层有关。剪切型结构的刚度矩阵为三对角矩阵, 而弯曲型结构的刚度矩阵为非奇异满秩矩阵。

为了得到弯曲型刚度矩阵, 可以采用等效刚度参数识别法^[9]。首先, 锁定不相关的自由度, 即另一水平方向上所有的自由度。然后, 对结构施加数组静力荷载, 并记录在水平方向上所考虑的楼层位移。接下来, 通过求解荷载-响应方程, 得到简化的刚度矩阵。由于刚度矩阵是对称的, 则 n 阶对称满秩矩阵的总未知数为 $n(1+n)/2$, 其中 n 是结构的自由度。在每组荷载工况下, 记录 n 个楼层的层间位移。因此求解荷载-响应方程所需要的最小荷载工况数为 $(1+n)/2$ 。为了保证最小二乘法结果的精度, 最终的荷载工况数为 $(1.5\sim 2)(1+n)/2$ 。对于本研究的主体结构来说, 使用了 32 组荷载-响应。值得提出的是, 等效刚度参数识别法不仅可以被用于得到一个满秩的刚度矩阵, 同时可以被用于得到任意形式的刚度矩阵, 是求解刚度矩阵的一般方法。剪切型刚度矩阵为三对角对称矩阵, 亦可以遵循上述过程形成。

简化模型与 ETABS 模型的固有频率几乎一致。此外, 两种模型的响应在各种动力荷载下均能很好地吻合, 这表明用 32 自由度的集中层质量模型可以精准地表示原始高精度模型。图 2 比较了两种模型在地面加速度峰值为 1.56 m/s^2 、持续时间为 79.98 s 的 Kern 地震 (1952 年) 作用下的顶层位移变化情况。由图 2 可以得知, 两种模型响应之间的均方根误差仅为 $6.48 \times 10^{-6} \text{ m}$ 。

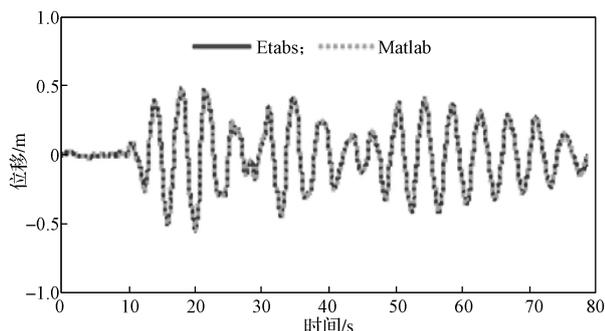


图 2 32 层主体结构原始模型和简化模型的顶层位移响应对比

Fig. 2 Top displacement response comparison between the original and condensed models of the 32-story primary structure

3 弯曲型与剪切型结构动力特性对比

为了说明在高层结构动力分析中使用正确模型

的重要性, 本节将对剪切型模型和弯曲型模型的动力特性和响应特性进行对比分析。

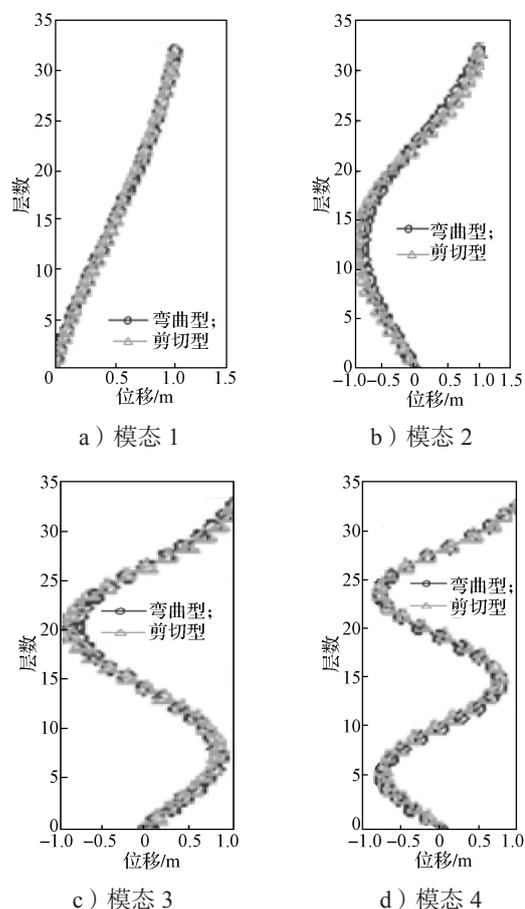
表 1 比较了剪切型模型和弯曲型模型的前六阶固有频率, 以及两种模型间的固有频率百分差值, 该差值以弯曲型模型的固有频率为参照。

表 1 弯曲型模型和剪切型模型的固有频率及差值
Table 1 Natural frequencies and differences of curved model and shear-typed model

模态	固有频率 / Hz		差值 / %
	弯曲型	剪切型	
1	0.24	0.23	-4.17
2	0.73	0.98	34.25
3	1.33	1.65	24.06
4	1.94	2.30	18.56
5	2.58	2.94	13.95
6	3.25	3.56	9.54

分析表 1 中的数据可以得知, 剪切模型和弯曲模型两模型的一阶固有频率基本相同。但是与一阶频率的相比, 高阶频率的差异较大。随着模态数的增加, 两种模型的固有频率均依次增大, 但是两者间的差值逐渐减小。

图 3 所示为剪切型模型和弯曲型模型前六阶模态下的相应振型比较。



a) 模态 1

b) 模态 2

c) 模态 3

d) 模态 4

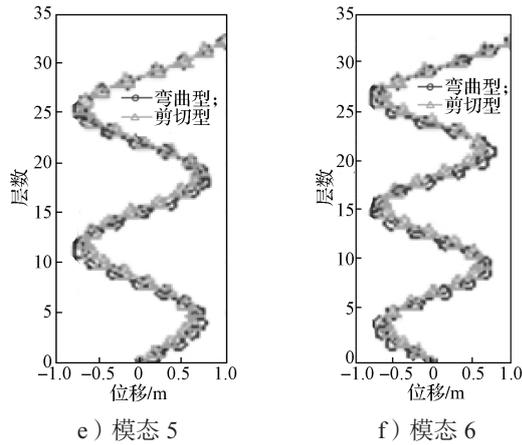


图3 主体结构简化模型的振型

Fig. 3 Mode shapes of the simplified model of the primary structure

由图3可以得知,各模态下弯曲线模型和剪切型模型的振型非常相似。

由表1和图3可以得知,相比于自由度较小的结构,自由度较大的结构,即高层建筑中,高阶模态更容易参与结构振动。

对两个模型均设置每层1 m/s的初始速度,以研究其结构响应的差异。该初速度将产生1/129的平均层间位移比,约为我国抗震规范中8级中震下的层间位移比限值。图4比较了剪切型模型和弯曲线模型在该初速度作用下的最大楼层位移和最大层间位移。

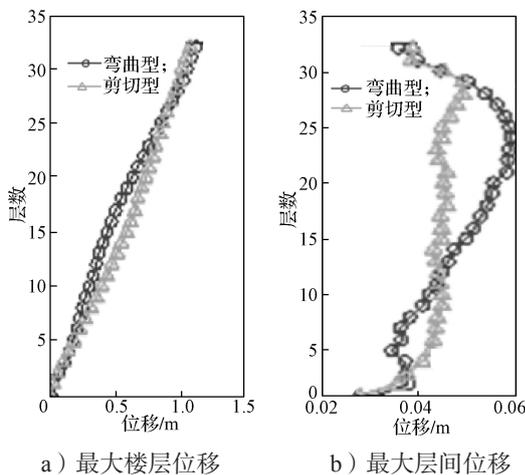


图4 弯曲线模型和剪切型模型的最大楼层位移和层间位移

Fig. 4 Maximum displacement and story drift of curved model and shear-typed model

由图4可以得知,弯曲线模型中间层(7层到24层)的变形小于剪切型模型的,并且在弯曲线模型中,层间位移从7层到24层逐渐增大,而在剪切型模型中,层间位移分布较为均匀。通过以上对比分析可以得知,即使在非常简单的荷载作用下,弯曲线模型

和剪切型模型两种模型的动力特性也有明显的区别。值得强调的一点是,弯曲线模型与高精度模型的响应情况非常接近。

4 弯曲线与剪切型 TMD 性能对比

不准确的模型必然会影响到基于结构参数和响应进行的控制装置优化设计。本节将以弯曲线模型和剪切型模型为主体结构,分别附加 TMD 减振为例进行说明。设 TMD 质量为主体结构总质量的 1%, TMD 的阻尼系数和刚度系数取相关文献中设计公式计算值的平均值,具体见表 2。

表 2 弯曲线模型和剪切型模型的 TMD 参数

Table 2 Parameters of TMD for curved model and shear-typed model

计算方法编号及对应文献	弯曲线 TMD		剪切型 TMD	
	刚度系数 / (N·m ⁻¹)	阻尼系数 / (N·s·m ⁻¹)	刚度系数 / (N·m ⁻¹)	阻尼系数 / (N·s·m ⁻¹)
1* [10]	1.55 × 10 ⁶	1.39 × 10 ⁵	1.76 × 10 ⁶	1.48 × 10 ⁵
2* [10]	1.53 × 10 ⁶	1.38 × 10 ⁵	1.74 × 10 ⁶	1.47 × 10 ⁵
3 [11]	1.47 × 10 ⁶	1.07 × 10 ⁵	1.66 × 10 ⁶	1.44 × 10 ⁵
4 [12]	1.52 × 10 ⁶	1.09 × 10 ⁵	1.72 × 10 ⁶	1.16 × 10 ⁵
5 [13]	1.57 × 10 ⁶	1.03 × 10 ⁵	1.78 × 10 ⁶	1.09 × 10 ⁵
6 [14]	1.53 × 10 ⁶	1.03 × 10 ⁵	1.73 × 10 ⁶	1.09 × 10 ⁵
平均值	1.53 × 10 ⁶	1.17 × 10 ⁵	1.73 × 10 ⁶	1.24 × 10 ⁵

注: 1* 为定位移的地面激励, 2* 为定加速度的地面激励。

分析表 2 中的数据可以得知, 所得两个 TMD 的阻尼系数均约为 1.2 × 10⁵ N·s/m, 而弯曲线 TMD 和剪切型 TMD 的刚度系数分别约为 1.5 × 10⁶ N/m 和 1.7 × 10⁶ N/m。此处刚度系数间的差异是由两种模型基本固有频率不同造成的。

将弯曲线 TMD 和剪切型 TMD 分别附加于弯曲线主体结构中。图 5 和图 6 比较了在 1 m/s 的初始速度下, 第一个振动周期和第四个振动周期内楼层位移的均方根和层间位移。

由图 5 和图 6 可以得知, 由于在脉冲荷载作用下初始时的结构响应最大, 且 TMD 此时尚未发生有效振动。因此, 在第一个振动周期内, 弯曲线 TMD 系统、剪切型 TMD 系统以及无控的弯曲线系统的响应差异并不明显。然而在第四个振动周期内, TMD 已经发生了作用, 此时弯曲线 TMD 系统和剪切型 TMD 系统的最大楼层位移和层间位移响应均比无控的弯曲线系统的响应小, 弯曲线 TMD 系统和剪切型 TMD 系统顶层位移值分别约为 0.09 和 0.21, 表明弯曲线 TMD 系统的顶层位移小于剪切型 TMD 系统顶层位移的 50%, 且在第 10 层处弯曲线 TMD 系统和剪切型 TMD 系统的层间位移值分别约为 0.000 5 和 0.006, 表明在第 10 层处弯曲线 TMD 系统的层间位移小于

剪切型 TMD 系统层间位移的 10%。以上结果表明, 弯曲型 TMD 系统明显优于剪切型 TMD 系统。

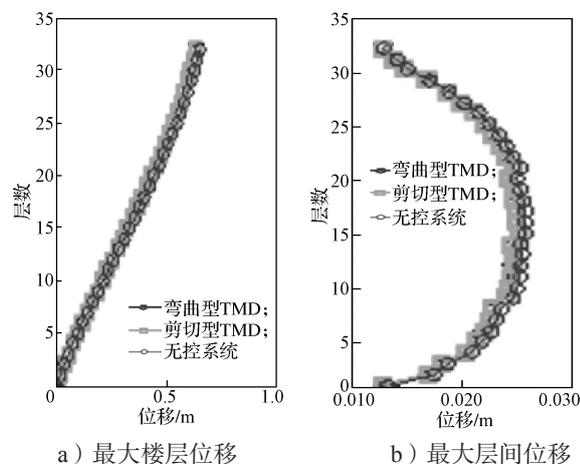


图 5 第一振动周期内弯曲型 TMD 和剪切型 TMD 系统的楼层位移均方根与层间位移

Fig. 5 RMS displacement and story drift of curved TMD and shear-typed TMD systems during the first oscillation

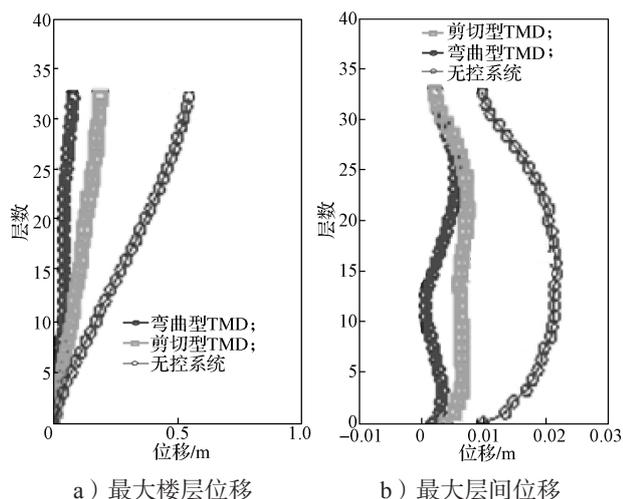


图 6 第四振动周期内弯曲型 TMD 和剪切型 TMD 系统的楼层位移均方根与层间位移

Fig. 6 RMS displacement and story drifts of curved TMD and shear-typed TMD systems during the fourth oscillation

5 结论

本文基于高层建筑结构发生弯曲变形的特点, 用弯曲型模型对某 32 层高层建筑结构办公楼进行了模型简化和动力响应分析, 同时, 对弯曲型模型和剪切型模型的差异进行了对比分析。

1) 弯曲型模型与剪切型模型的结构动力特性对比结果表明, 两类模型的动力响应存在较大的不同, 前六阶固有频率下, 两模型的振型非常相似。在自由度较大的结构, 即高层建筑中, 高阶模态更容易参与结构振动。当弯曲型模型与剪切型模型均设置

每层 1 m/s 的初始速度时, 弯曲型模型中间层的变形小于剪切型模型的, 且在弯曲型模型中, 层间位移从 7 层到 24 层逐渐增大, 而在剪切型模型中, 层间位移分布较为均匀。可见, 即使在非常简单的荷载作用下, 两种模型的动力特性也有明显的区别, 但是弯曲型模型与高精度模型的响应情况非常接近。

2) 弯曲型 TMD 与剪切型 TMD 性能对比结果表明, 在第一个振动周期内, 弯曲型 TMD 系统、剪切型 TMD 系统, 以及无控的弯曲型系统的响应差异性并不明显; 然而在第四个振动周期内, 因为 TMD 的作用, 弯曲型 TMD 系统的顶层位移小于剪切型 TMD 系统的顶层位移的 50%, 并且在第 10 层处, 弯曲型 TMD 系统的层间位移小于剪切型 TMD 系统的层间位移的 10%, 这表明弯曲型 TMD 系统明显优于剪切型 TMD 系统。

由以上结论可以得知, 采用剪切型模型对弯曲特性显著的高层建筑结构进行动力分析, 会导致结构响应预测不准确等问题的发生, 而基于剪切型模型进行振动控制设计, 其有效性将大大降低。因此, 不建议或者应谨慎使用剪切型模型对高层建筑结构进行减振装置设计, 而应采用弯曲型模型对弯曲性显著的高层结构进行模型简化, 这样才能使所得动力响应分析结果合理准确。

参考文献:

- [1] 张敏. 高层框架动力分析刚度矩阵的弯剪层模型[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(5): 33-36.
ZHANG Min. Bending-Shearing Layer Model of Rigidity Matrix for Dynamic Analysis of High-Rise Frame Structure[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2005, 22(5): 33-36.
- [2] 高菲, 王倩. 层间结构的非线性地震反应分析[J]. 工程建设, 2008, 40(1): 16-21.
GAO Fei, WANG Qian. Non-Linear Seismic Response Analysis of Layer Model[J]. Engineering Construction, 2008, 40(1): 16-21.
- [3] 曹征良, 洪翔, 吴兵. 层间弯剪型高层结构的弹塑性地震反应分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2004, 21(2): 116-122.
CAO Zhengliang, HONG Xiang, WU Bing. Elasto-Plastic Earthquake Response Analysis of Storey-Post Shear-Bending Tall Building Structures[J]. Journal of Shenzhen University(Science & Engineering), 2004, 21(2): 116-122.
- [4] 潘育耕, 梅占馨, 傅学怡, 等. 用剪切型-剪弯型组合模型对高层建筑结构进行动力弹塑性时程分析

- [J]. 西北建筑工程学院学报(自然科学版), 1997, 14(1): 1-7.
- PAN Yugeng, MEI Zhanxin, FU Xueyi, et al. Using a Shear Type and Shear-Bending Type Combinative Model Solving the Problem of Elastoplastic Dynamic[J]. Journal of Northwestern Institute of Architectural Engineering (Natural Science), 1997, 14(1): 1-7.
- [5] BROWNJOHN J M W, PAN T C, MITA A, et al. Dynamic and Static Response of Republic Plaza[J]. Journal-Institution of Engineers Singapore, 1998, 38(2): 35-41.
- [6] SATAKE N, SUDA K, ARAKAWA T, et al. Damping Evaluation Using Full-Scale Data of Buildings in Japan[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(4): 470-477.
- [7] BROWNJOHN J M W. Ambient Vibration Studies for System Identification of Tall Buildings[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(1): 71-95.
- [8] SMITH R, MERELLO R, WILLFORD M. Intrinsic and Supplementary Damping in Tall Buildings[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 2010, 163(2): 111-118.
- [9] 孙焕纯, 徐卫真. 框架结构的串联多自由度简化体系等效刚度参数的识别法[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(2): 100-108.
- SUN Huanchun, XU Weizhen. A Parameter Identification Method for Determining the Equivalent Rigidity Coefficients of the Simplified Series Multidegree-of-Freedom System for a Framed Structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(2): 100-108.
- [10] TSAI H C, LIN G C. Optimum Tuned-Mass Dampers for Minimizing Steady-State Response of Support-Excited and Damped Systems[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1993, 22(11): 957-973.
- [11] BAKRE S V, JANGID R S. Optimum Parameters of Tuned Mass Damper for Damped Main System[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2007, 14(3): 448-470.
- [12] HOANG N, FUJINO Y, WARNITCHAI P. Optimal Tuned Mass Damper for Seismic Applications and Practical Design Formulas[J]. Engineering Structures, 2008, 30(3): 707-715.
- [13] CHUNG L L, WU L Y, YANG C S W, et al. Optimal Design Formulas for Viscous Tuned Mass Dampers in Wind-Excited Structures[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2013, 20(3): 320-336.
- [14] CHEY M H, KIM J U. Parametric Control of Structural Responses Using an Optimal Passive Tuned Mass Damper Under Stationary Gaussian White Noise Excitations[J]. Frontiers of Structural & Civil Engineering, 2012, 6(3): 267-280.

(责任编辑: 廖友媛)



(上接第 44 页)

- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 12-13.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings: GB50011—2016[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2016: 12-13.
- [11] 补国斌. P-M-M 曲线分析工具汇集[EB/OL]. [2019-03-14]. http://blog.sina.com.cn/s/blog_bde1f86f0101ef3i.html.
- BU G B. Assemble of Analysis Tool for P-M-M Curve[EB/OL]. [2019-03-14]. http://blog.sina.com.cn/s/blog_bde1f86f0101ef3i.html
- [12] LI K N. Three-Dimensional Nonlinear Static/Dynamic Structural Analysis Computer Program-Users's Manual of Canny[M]. Vancouver: Canny Seismic-Control Technology Press, 2019: 10-50.
- [13] Center for Engineering Strong Motion Data. CSMIP Station 24386[EB/OL]. [2019-03-14]. <http://strongmotioncenter.org/cgi-bin/CESMD/stationhtml.pl?stationID=CE24386&network=CGS>.
- [14] 补国斌. 速度脉冲强震下偏心 RC 框架结构抗震设计法的基础研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- BU Guobin. Basic Research on Seismic Design Method of Eccentric RC Frame Structures Subjected to Pulse-Like Ground Motions[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

(责任编辑: 廖友媛)