

# 消能减震建筑结构的附加有效阻尼比估计

杨朋超<sup>1</sup>, 薛松涛<sup>1,2</sup>, 谢丽宇<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 日本东北工业大学 建筑系, 日本仙台 982-8577)

**摘要:** 为估计一栋实际消能减震建筑结构在地震作用下的附加有效阻尼比, 提出了一种基于有限元模型修正技术的阻尼比估计和验证方法。考虑到结构初始有限元模型存在较大模型误差, 采用基于结构振动模态参数的直接模型更新方法修正初始有限元模型。其中, 对于实测振型不完整问题, 利用振型扩阶方法补充完整振型。基于模态应变能概念, 利用整体结构模态参数识别值, 推导了油阻尼器支撑系统附加给结构的有效阻尼比和有效频率的计算公式, 并估计了主体结构的有效频率和阻尼比。以一组实际地震动监测数据为例, 采用建议方法估计有效阻尼比和有效频率, 通过对比修正模型的预测响应与实际监测数据, 验证了建议方法的有效性。

**关键词:** 消能减震结构; 附加阻尼比; 油阻尼器; 模型修正; 地震监测数据

**中图分类号:** TU352.1 TU311 **文献标志码:** A

## Estimation of equivalent damping ratios of a real-world passively controlled building structure

YANG Pengchao<sup>1</sup>, XUE Songtao<sup>1,2</sup>, XIE Liyu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan)

**Abstract:** The estimation of equivalent damping ratios of a real-world passively controlled building structure subjected to earthquake excitation was presented in this study. It was carried out and validated by using finite element (FE) model updating techniques. Considering that the initial FE model of this building has large modelling errors, the direct model updating technique was first adopted to calibrate this FE model by using the measured modal parameters of the building and mitigate modeling errors. In addition, the mode shape expansion method was utilized to deal with the spatial incompleteness of identified incomplete mode shapes due to the limited number of sensors installed in this building. Based on the concept of modal strain energy, the equivalent damping ratios and equivalent frequencies provided by the oil damper brace system were derived analytically by using the identified system modal frequencies. Frequencies and damping ratios of the main building can be further estimated by deducting these supplemental contributions from the corresponding identified system modal parameters. At last, a set of earthquake measurements of the building was selected to demonstrate the effectiveness of the proposed approach for estimation of equivalent damping ratios and equivalent frequencies through comparing the measured and predicted seismic responses by the updated FE model.

**Keywords:** passively controlled structure; equivalent damping ratio; oil damper; model updating; earthquake measurement

基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0127600) 国家自然科学基金项目(51778490)。

作者简介: 杨朋超, 出生于 1988 年, 男, 博士研究生, 主要从事结构模型修正和贝叶斯方法研究。email: murphy\_ypc@126.com

通信作者: 谢丽宇, 出生于 1978 年, 男, 讲师, 主要从事结构健康监测研究。email: liyuxie@tongji.edu.cn

收稿日期: 2020 年 1 月

## 0 引言

消能减震技术是一种成熟的结构被动控制方法,通过在新建结构或既有结构中设置阻尼器耗能设备,如黏滞、黏弹性及油阻尼器等,可显著增强结构在地震作用下的耗能能力,进而减弱结构响应,减少地震对结构及附属设备的破坏。目前,消能减震技术在土木工程领域已获得深入研究<sup>[1-3]</sup>,并随着新一代基于性能的抗震设计的推广,其在实际工程中的应用前景将更为广泛。

消能减震技术的可靠性已在实际大地震中得到验证,在2011年发生的东日本大地震中,大量减隔震建筑结构都经受了强烈地震考验,震后的灾害调查<sup>[4]</sup>表明了消能减震结构的卓越抗震性能,但亦暴露出现有消能减震技术在实际应用中的问题<sup>[5-7]</sup>。在此背景下,有关消能构件实际工作性能的评估问题变得突出,需要准确量化消能阻尼器对实际结构性能的影响,支撑和反馈实际消能减震结构的设计方法<sup>[8]</sup>。

在消能减震结构的设计中,常以有效阻尼比和有效刚度为量化指标,估计阻尼器附加给结构的阻尼和刚度。对复杂的实际消能减震结构,基于结构设计图纸建立的初始有限元模型通常不能准确代表结构实体,初始有限元模型存在不可忽略的模型误差,模型预测的结构响应与实际量测数据不符<sup>[9]</sup>。因此,在实际消能减震结构的有效阻尼比和有效刚度估计中,结构初始有限元模型并不可靠,需要利用实际量测数据进行修正。此外,由于阻尼器的实际工程应用情况复杂,现有的附加有效阻尼比估计方法<sup>[8,10-13]</sup>存在一定差异,在附加有效阻尼比及有效刚度评估两个方面没有统一的理论框架。

针对上述问题,文中建议一种基于有限元模型修正技术的附加有效阻尼比和有效频率估计和验证方法,研究阻尼器对结构频率和阻尼比参数的影响。首先,基于估计的主体结构模态参数,采用经典直接模型修正方法<sup>[14-15]</sup>修正结构初始有限元模型,该方法具有计算简单高效和精确匹配目标模态参数的优点。其次,基于应变能的概念,推导油阻尼器附加给结构的有效阻尼比和有效频率的计算公式,并估计与主体结构质量、刚度和阻尼矩阵相对应的模态参数。最后,以一栋油阻尼器钢框架建筑结构为研究对象,利用一组实际地震监测数据,说明建议方法的计算流程,并验证该方法的有效性。

## 1 实例概况

图1为一栋油阻尼器建筑结构外观,该建筑位于日本宫城县仙台市,建筑长48 m、宽9.6 m,高34.2 m,地下1层为钢筋混凝土结构,地上8层为混凝土预制楼板钢框架结构。该建筑结构设计满足日本抗震规范对学校建筑的要求,为进一步提高结构的阻尼耗能能力,沿各楼层及长短边方向均匀布置了共计56组油阻尼器,油阻尼器的力学特性和试验研究见文献[6,16]。图2为油阻尼器及其附属支撑在楼层间的典型连接方式。



图1 一栋油阻尼器钢框架建筑结构  
Fig. 1 A steel-framed building structure with oil dampers



图2 油阻尼器支撑系统  
Fig. 2 Oil damper brace system

为研究该建筑结构和油阻尼器在实际地震中的工作性能,结构中配备了一套健康监测系统。最初在结构第1、4、8层中布置了双向加速度计,用于采集监测楼层在结构长边和短边方向的地震加速度响应。在结构第1层和第8层中,沿结构长边和短边方向选取了4组油阻尼器,并安装了力和位移传感器,用于采集油阻尼器在地震中的力和位移响应。图3和图4分别给出了1组实测的楼层和油阻尼器地震响应数据(结构长边方向),该组数据采集于2003年5月26日发生的一次较大地震( $M_w = 7.0$ ),以该组实测数据为例,说明建议方法的计算流程。

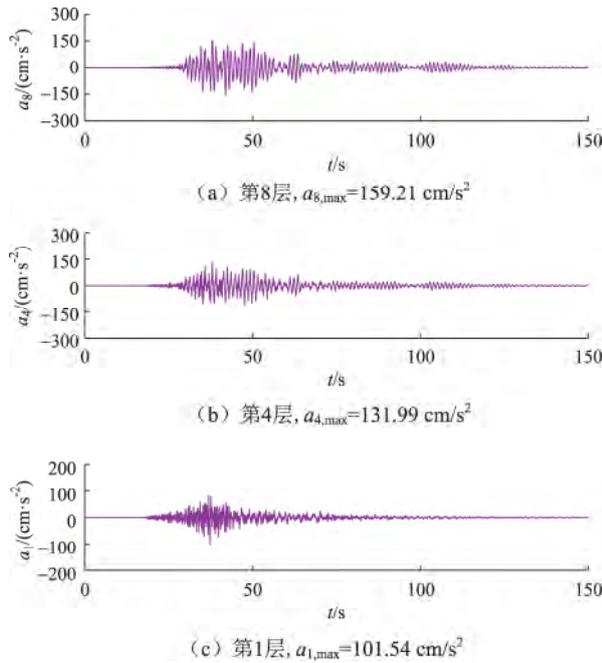


图3 楼层加速度响应

Fig. 3 Acceleration responses of monitored floors

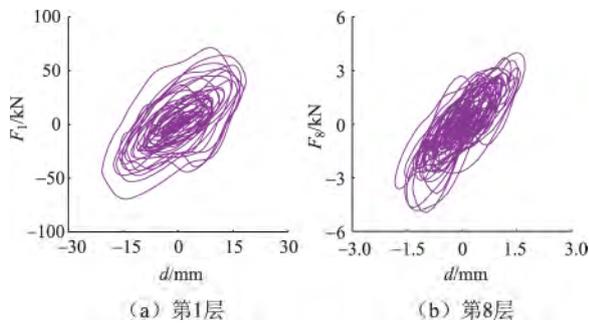


图4 油阻尼器响应监测数据

Fig. 4 Response measurements of monitored oil dampers

## 2 有限元模型修正

不失一般性,假设主体结构为线弹性,消能减震结构在地震激励作用下的运动控制方程可描述为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + f_D(x, \dot{x}) = MI\ddot{x}_g \quad (1)$$

其中:  $M$ 、 $K$  和  $C$  分别为主体结构的质量、刚度和阻尼矩阵;  $f_D(x, \dot{x})$  为阻尼器的滞回力向量,与结构的位移  $x$  和速度  $\dot{x}$  相关;  $I$  为单位列向量;  $\ddot{x}_g$  为结构的基底加速度。

对于复杂的实际工程结构,由于施工误差的不确定性和结构分析假设的存在,基于结构设计图纸建立的初始有限元模型通常存在较大的模型误差。主体结构的质量矩阵  $M$  和刚度矩阵  $K$  一般可表达如式(2)和式(3)。

$$M = M_a + M_{a,\Delta} \quad (2)$$

$$K = K_a + K_{a,\Delta} \quad (3)$$

其中:  $M_a$  和  $K_a$  分别为初始有限元模型的质量和刚度矩阵;  $M_{a,\Delta}$  和  $K_{a,\Delta}$  分别为质量和刚度的误差矩阵,需要依据结构实际量测数据进行修正。

直接模型修正方法<sup>[14-15]</sup>是一种经典的基于结构模态参数的模型更新技术,该方法具有计算简单高效和精确匹配目标模态参数的优点,适用于精确刻画结构模态参数的改变,适合研究附加阻尼器对结构模态参数的影响。文中采用该方法修正初始有限元模型的质量矩阵和刚度矩阵,并假定主体结构阻尼为经典阻尼模型。

### 2.1 直接模型修正方法

Berman 等<sup>[15]</sup>在文献[14]的基础上提出了一种经典的直接模型修正方法,该方法通过施加模态正交性、特征方程和误差矩阵最小化约束,利用拉格朗日乘子算法修正质量矩阵和刚度矩阵,即:

$$M = M_a + M_a \hat{\Phi} m_a^{-1} (I - m_a) m_a^{-1} \hat{\Phi}^T M_a \quad (4)$$

$$K = K_a + K_\Delta + K_\Delta^T \quad (5)$$

其中  $M_a$  与  $K_\Delta$  可按式(6)和式(7)进行表达。

$$m_a = \hat{\Phi}^T M_a \hat{\Phi} \quad (6)$$

$$K_\Delta = \frac{1}{2} M \hat{\Phi} (\hat{\Phi}^T K_a \hat{\Phi} + \hat{\Omega}) \hat{\Phi}^T M - K_a \hat{\Phi} \hat{\Phi}^T M \quad (7)$$

其中:  $\hat{\Omega} = \text{diag}\{\hat{\omega}_1, \dots, \hat{\omega}_k\}$  为待修正频率的对角矩阵;  $k$  为待修正模态个数;  $\hat{\Phi} = [\hat{\phi}_1, \dots, \hat{\phi}_k]$  为待修正的振型矩阵。

获取修正后的质量和刚度矩阵后,阻尼矩阵可采用下式计算

$$C = M \left( \sum_{i=1}^k 2\hat{\omega}_i \hat{\zeta}_i \hat{\phi}_i \hat{\phi}_i^T + \sum_{j=k+1}^n 2\omega_j \zeta_j \phi_j \phi_j^T \right) M \quad (8)$$

其中:  $\hat{\zeta}_i$  为待修正的阻尼比;  $\zeta_j$  为其他高阶阻尼比;  $\omega_j$  和  $\phi_j$  分别为修正模型的高阶频率和振型。

直接模型修正方法要求完整的量测信息或振型矩阵,但由于实际结构中布置的传感器数量通常有限,基于结构量测数据识别的振型不完整,有必要采用振型扩阶方法补充完整振型。

### 2.2 振型扩阶方法

不失一般性,结构的第  $i$  个完整振型  $\hat{\phi}_i$  可以表达为

$$\hat{\phi}_i = \begin{Bmatrix} \hat{\phi}_{i,m} \\ \hat{\phi}_{i,\mu} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

其中  $\hat{\phi}_{i,m}$  为已知的量测振型,  $\hat{\phi}_{i,\mu}$  为待估计的未量测振型。

将式(9)代入初始有限元模型的特征方程,并将质量和刚度矩阵依照量测和未量测自由度按列向量分组,即

$$([\hat{K}_{a,m} \hat{K}_{a,\mu}] - \hat{\omega}_i^2 [M_{a,m} M_{a,\mu}]) \begin{Bmatrix} \hat{\phi}_{i,m} \\ \hat{\phi}_{i,\mu} \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \quad (10)$$

其中:  $K_{a,m}$ 、 $K_{a,u}$  分别为量测和未量测自由度的子刚度矩阵;  $M_{a,m}$ 、 $M_{a,u}$  分别为量测和未量测自由度的子质量矩阵。

式(10)为一典型病态方程,可采用伪逆技术<sup>[17]</sup>近似求解,未量测振型可表达为

$$\hat{\phi}_{i,u} = - (K_{u,i}^T K_{u,i})^{-1} K_{u,i}^T K_{m,i} \hat{\phi}_{i,m} \quad (11)$$

其中  $K_{m,i}$  和  $K_{u,i}$  分别为量测和未量测自由度的动态刚度矩阵,可按式(12)和式(13)进行表达。

$$K_{u,i} = K_{a,u} - \hat{\omega}_i^2 M_{a,u} \quad (12)$$

$$K_{m,i} = K_{a,m} - \hat{\omega}_i^2 M_{a,m} \quad (13)$$

需要说明的是,上述模型修正仅针对主体结构,待修正模态参数亦与主体结构相对应。然而,实际监测数据仅包含整体结构的模态参数信息,受附加阻尼器对结构的阻尼和刚度影响,主体结构的模态参数仍需进一步确定。

借鉴文献[10]中的研究,忽略阻尼器构件对振型的影响,取整体结构的振型为主体结构的振型,仅考虑阻尼器设备对频率和阻尼比的影响。基于经典的模态应变能概念,以下将解析估计油阻尼器设备附加给整体结构的有效阻尼比和有效频率,进而确定主体结构的相应模态参数。

### 3 附加有效阻尼比和有效频率估计

考虑油阻尼器及其附属支撑的整体动力学行为,取经典的 Maxwell 模型模拟油阻尼器支撑系统,其运动控制方程为

$$\frac{\dot{f}_d}{\hat{k}_d} + \frac{\dot{f}_d}{\hat{c}_d} = \dot{x}_d \quad (14)$$

其中  $x_d$  和  $f_d$  分别为油阻尼器支撑系统两端的相对位移和阻尼力,  $\hat{c}_d$  和  $\hat{k}_d$  分别为阻尼和刚度参数的识别值。

#### 3.1 附加有效阻尼比

假设油阻尼器支撑系统受简谐激励作用,基于应变能概念<sup>[8,18-19]</sup>,将油阻尼器支撑系统附加给结构的第  $i$  阶模态有效阻尼比定义为

$$\zeta_{eq,i} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{D,i}}{E_{S,i}} \quad (15)$$

其中  $E_{S,i}$  和  $E_{D,i}$  分别为在第  $i$  阶振型下计算的结构周期最大应变能和油阻尼器周期最大耗能。 $E_{S,i}$  可由式(16)计算获得。

$$E_{S,i} = \frac{1}{2} x_i^T K_s x_i = \frac{1}{2} x_{0,i}^2 \hat{\phi}_i^T K_s \hat{\phi}_i = \frac{1}{2} x_{0,i}^2 \hat{\omega}_{S,i}^2 \quad (16)$$

其中:  $K_s$  为整体结构总刚度,包括主体结构刚度和阻尼器支持系统附加刚度;  $\hat{\omega}_{S,i}$  为整体结构的频率识别

值;  $x_i$  为在第  $i$  阶振型下计算的结构最大位移响应,  $x_i = x_{0,i} \hat{\phi}_i$ ;  $x_{0,i}$  为未知的位移放大因子。

$E_{D,i}$  可解析表达<sup>[8]</sup>为

$$E_{D,i} = \sum_j E_{D,i}^j = \sum_j \frac{\pi \hat{\omega}_{S,i} \hat{k}_{d,j}^2}{\hat{k}_{d,j}^2 + \hat{\omega}_{S,i}^2 \hat{c}_{d,j}^2} \hat{c}_{d,j} x_{di}^2 \quad (17)$$

其中  $x_{di}$  为第  $j$  个油阻尼器支撑系统在第  $i$  阶振型下计算的最大位移响应,假设楼板为刚性,其将等同于所在楼层的最大层间位移响应。

为简化表达,引入位移坐标进行转化,即  $x_{di} = T_d x_i$ ,其中  $T_d$  为转化矩阵,式(14)可进一步改写为

$$E_{D,i} = \sum_j \pi \hat{\omega}_{S,i} \hat{c}_{d,j} x_{di}^2 = \pi \hat{\omega}_{S,i} \hat{\phi}_j^T \hat{C}_{D,i} \hat{\phi}_j x_{0,i}^2 \quad (18)$$

其中,

$$\hat{c}_{d,j} = \frac{\hat{k}_{d,j}^2}{\hat{k}_{d,j}^2 + \hat{\omega}_{S,i}^2 \hat{c}_{d,j}^2} \hat{c}_{d,j} \quad (19)$$

$$\hat{C}_{D,i} = T_d^T \text{diag}\{\hat{c}_{d,1}, \dots, \hat{c}_{d,n}\} T_d \quad (20)$$

$$T_d = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ -1 & 1 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中  $\hat{C}_{D,i}$  可视为油阻尼器支撑系统在第  $i$  阶振型下附加给结构的等效阻尼矩阵,具有频率相关特性,其元素随频率增大而逐步减小。

将式(16)和式(18)代入式(15),附加有效阻尼比可简化表达为

$$\zeta_{eq,i} = \frac{\hat{\phi}_i^T \hat{C}_{D,i} \hat{\phi}_i}{2 \hat{\omega}_{S,i}} \quad (22)$$

相应地,主体结构的第  $i$  阶阻尼比可按式(23)估计:

$$\hat{\zeta}_i = \zeta_{S,i} - \zeta_{eq,i} \quad (23)$$

#### 3.2 附加有效频率

与有效阻尼比定义统一,文中采用应变能比估计附加有效频率。定义油阻尼器支撑系统的应变能与结构总应变能之比,即

$$\eta_{eq,i} = \frac{E_{B,i}}{E_{S,i}} \quad (24)$$

其中  $E_{B,i}$  为油阻尼器支撑系统在第  $i$  阶振型下计算的周期最大应变能,计算式为

$$E_{B,i} = \sum_j E_{B,i}^j = \frac{1}{2} \sum_j \hat{k}_{d,j} x_{di}^2 = \frac{1}{2} x_{0,i}^2 \hat{\phi}_i^T \hat{K}_{D,i} \hat{\phi}_i \quad (25)$$

其中,

$$\hat{k}_{d,j} = \frac{\hat{\omega}_i^2 \hat{c}_{d,j}^2}{\hat{k}_{d,j}^2 + \hat{\omega}_i^2 \hat{c}_{d,j}^2} \hat{k}_{d,j} \quad (26)$$

$$\hat{K}_{D,i} = T_d^T \text{diag}\{\hat{k}_{d,1}, \dots, \hat{k}_{d,n}\} T_d \quad (27)$$

其中  $\hat{K}_{D,i}$  可视为油阻尼器支撑系统在第  $i$  阶振型下附加给结构的等效刚度矩阵,具有频率相关特性,其元

素随频率增大而趋于常量,即阻尼器刚度参数。

将式(16)和式(25)代入式(24), $\eta_{eq,i}$ 可进一步简化为

$$\eta_{eq,i} = \frac{\hat{\phi}_i^T \hat{K}_{D,i} \hat{\phi}_i}{\hat{\omega}_{S,i}^2} \quad (28)$$

对于实际消能减震结构,采用式(25)计算的应变能比值一般较小,主体结构频率可近似估计为

$$\hat{\omega}_i = \sqrt{(1 - \eta_{eq,i}) \hat{\omega}_{S,i}^2} \quad (29)$$

相应地,第*i*阶附加有效频率为

$$\omega_{eq,i} = \hat{\omega}_{S,i} - \hat{\omega}_i \quad (30)$$

需要说明的是,式(22)、(28)和式(30)的附加有效阻尼比和有效频率解析表达与经典的单自由度阻尼比和频率定义相类似,具有明确的物理意义。

## 4 建议方法有效性验证

实际结构的频率和阻尼比参数仅能从结构动力响应数据中估计获得,其估计精度仅能通过结构动力分析得以验证。以该结构楼层和油阻尼器的地震响应为分析对象,采用建议方法估计油阻尼器设备附加给结构的有效阻尼比、有效频率以及主体结构的模态参数,并通过对比修正模型的预测响应与实际监测数据,验证上述模态参数估计的准确性,进而说明建议方法的有效性。

### 4.1 有限元模拟

基于结构设计图纸及日本钢结构设计规范<sup>[20]</sup>,利用SAP2000结构分析软件建立了结构初始有限元模型,如图5所示。为简化结构有限元建模,忽略楼梯间及电梯间,内隔墙及外墙装饰亦不考虑。梁、柱及阻尼器支撑采用框架单元模拟,混凝土预制楼板采用壳单元模拟,模拟单元的几何尺寸参数取设计值,材料参数取设计值。假设楼板为刚性<sup>[21]</sup>,不考虑结构竖向变形,仅考虑模型长边方向的平动运动。简化后的有限元模型准确保留了原有模型的主要低阶模态信息,且自由度个数较少、计算高效。主体框架模型的质量矩阵(单位为t)和刚度矩阵(单位为MN/mm)为

$$\mathbf{M}_a = \text{diag}\{446, 348, 337, 334, 328, 324, 311\}$$

$$\mathbf{K}_a = \begin{bmatrix} 1.07 & -1.08 & 0.29 & -0.05 & 0.01 & 0.00 & 0.00 \\ -1.08 & 1.89 & -1.16 & 0.31 & -0.05 & 0.01 & 0.00 \\ 0.29 & -1.16 & 1.73 & -1.10 & 0.29 & -0.05 & 0.01 \\ -0.05 & 0.31 & -1.10 & 1.65 & -1.05 & 0.27 & -0.04 \\ 0.01 & -0.05 & 0.30 & -1.05 & 1.57 & -0.96 & 0.20 \\ 0.00 & 0.01 & 0.01 & 0.27 & -0.96 & 1.36 & -0.62 \\ 0.00 & 0.00 & 0.001 & -0.04 & 0.20 & -0.62 & 0.45 \end{bmatrix}$$

考察该初始有限元模型的预测误差。取结构第1层实测地震加速度(图3c)为模型激励。假定主体

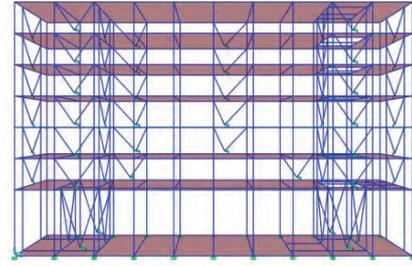


图5 初始有限元模型

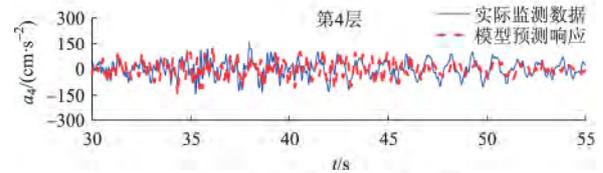
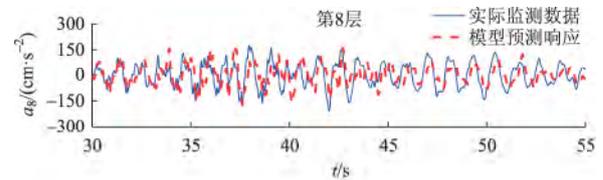
Fig. 5 Initial finite element model

结构的前3阶阻尼比均为0.02,其余高阶阻尼比取0.1。油阻尼器支撑系统模型参数取值如表1所示,其中,结构第1层油阻尼器模型记为油阻尼器I,其余楼层油阻尼器记为油阻尼器II。图6给出了结构强震阶段( $t$ 为30~55s)初始有限元模型预测的楼

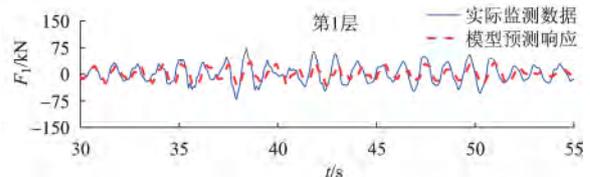
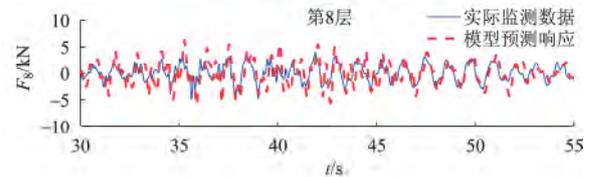
表1 油阻尼器模型参数

Table 1 Model parameters of oil dampers

阻尼器	$\hat{c}_d / (N \cdot s \cdot mm^{-1})$	$\hat{k}_d / (N \cdot mm^{-1})$
油阻尼器 I	695.93	4 257.10
油阻尼器 II	746.35	3 154.10



(a) 楼层加速度时程响应



(b) 油阻尼器力时程响应

图6 初始有限元模型预测的响应和实际监测数据

Fig. 6 Predicted responses by initial FE model and measured responses

层加速度及油阻尼器阻尼力时程响应。对比实际监

测数据,初始有限元模型存在较大预测误差,显然,利用初始有限元模型的模态参数估计油阻尼器对结构阻尼和刚度贡献是不可靠的,有必要修正初始有限元模型。

#### 4.2 有效阻尼比和有效频率估计及验证

表2给出了基于楼层加速度数据识别的整体结构前3阶主导模态参数,包括频率、阻尼比及不完整振型,识别算法为经典的误差最小化方法。

首先,针对振型的不完整问题,采用2.2节中的方法获取扩阶振型,图7给出了初始有限元模型的计算振型(初始振型)与扩阶振型的对比,由计算结果可知,第2阶振型相近,但第1阶和第3阶扩阶振型明显不同于初始振型,体现了初始有限元模型的误差。

表2 整体结构模态参数识别值

Table 2 Identified modal parameters of building

阶次	$\hat{\omega}_{s,j}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\hat{\zeta}_{s,j}$	$\hat{\phi}_{i,2}$	$\hat{\phi}_{i,6}$
第1阶	5.608 5	0.031 3	0.014 7	0.025 4
第2阶	18.132 2	0.061 3	-0.026 6	0.016 5
第3阶	34.118 3	0.093 9	0.012 6	-0.003 3

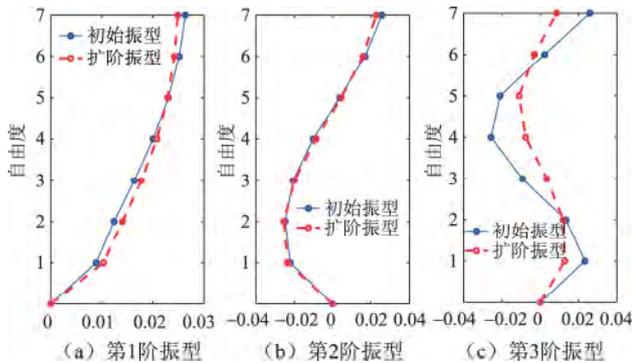


图7 初始振型和扩阶振型对比

Fig. 7 Initial and expended modal shapes

其次,利用式(22)和式(30)分别计算油阻尼器支撑系统附加给结构的有效阻尼比和有效频率,如表3所示。表4给出了采用式(23)和式(29)计算的主体结构的前3阶频率和阻尼比。表3和表4计算结果表明,附加有效频率相对较小;附加有效阻尼比随模态阶次升高迅速减弱,该衰减趋势与文献[8]研究结果相似。油阻尼器支撑系统显著提高了该结构的第1阶阻尼比,其他附加高阶阻尼比贡献可忽略。

为验证附加有效阻尼比和有效频率的估计精度,利用主体结构频率、阻尼比和扩阶振型,采用2.1节方法修正主体结构的质量、刚度和阻尼矩阵,并利用修正模型预测结构楼层和油阻尼器的地震响应,

表3 附加有效阻尼比和有效频率

Table 3 Equivalent damping ratios and equivalent frequencies provided by oil dampers

阶次	$\omega_{eq,j}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\zeta_{eq,j}$
第1阶	0.106 1	0.018 6
第2阶	0.405 1	0.006 4
第3阶	0.141 8	0.000 6

表4 主体结构阻尼比和频率

Table 4 Damping ratios and frequencies of main structure

阶次	$\hat{\omega}_i/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\hat{\zeta}_i$
第1阶	5.502 4	0.012 8
第2阶	17.727 1	0.054 9
第3阶	33.976 4	0.093 3

其中,高阶阻尼比和油阻尼模型参数取值与初始有限元模型保持一致。取预测响应的标准均方差  $e_N$  衡量模型预测精度,定义为

$$e_N = 1 - \frac{\|\hat{Q} - Q\|}{\|\hat{Q} - \text{mean}(\hat{Q})\|} \quad (31)$$

其中: $\hat{Q}$ 为实测数据, $Q$ 为预测响应; $\|\cdot\|$ 代表向量的2范数。标准均方根误差的取值范围为 $(-\infty, 1]$ ,取值越接近1,预测响应与实测数据拟合度越高,代表模型预测精度越高。

图8和图9分别给出了修正模型预测的强震阶段楼层加速度和油阻尼器阻尼力时程响应,其中,阻尼修正模型忽略了附加有效频率贡献,即结构主体频率等同于整体结构频率;阻尼和刚度修正模型则考虑附加有效阻尼和有效频率的贡献。与图6对比可知,阻尼和刚度修正模型的响应可精确拟合实际监测数据,表明了建议方法估计的主体结构的模态参数、附加有效阻尼比和有效频率是可靠且准确的,同时,亦说明了建议振型扩阶技术及模型修正方法的准确性。

表5和表6分别给出了初始有限元模型(初始模型)和修正模型预测的结构强震阶段楼层加速度和油阻尼器阻尼力的标准均方差。在预测精度方面,修正模型均显著优于初始有限元模型,其中,阻尼和刚度修正模型较阻尼修正模型预测精度更高,说明了附加有效频率估计的准确性,亦表明了为精确预测结构地震响应,油阻尼器支撑系统的附加刚度贡献不可忽略。

综上所述,计算结果验证了建议方法对阻尼器附加有效阻尼比和有效频率估计的准确性。建议方法仅利用整体结构识别的模态参数,计算简单高效,解析推导易理解,便于在实际工程中应用。此外,需要说明的是,建议方法仅针对线性Maxwell模型,对于非线性Maxwell模型需进一步研究。

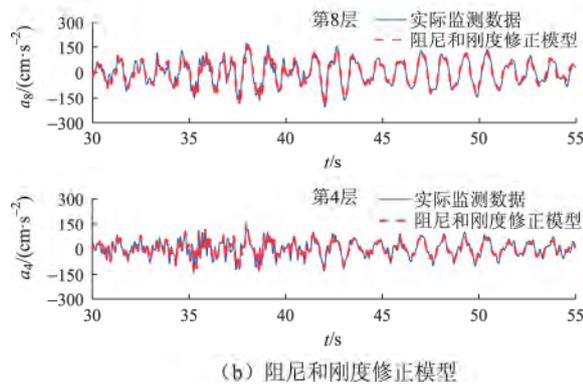
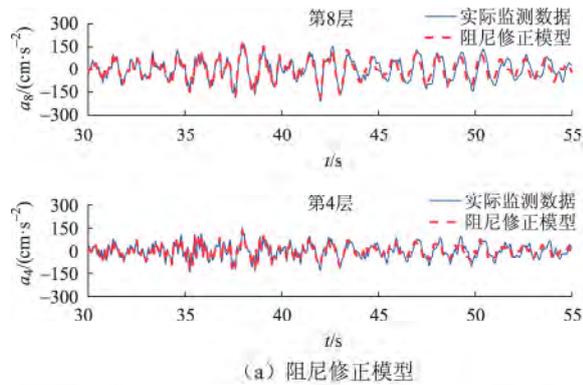


图8 修正模型预测的加速度和实际监测数据  
Fig. 8 Predicted acceleration response by updated models and measured response

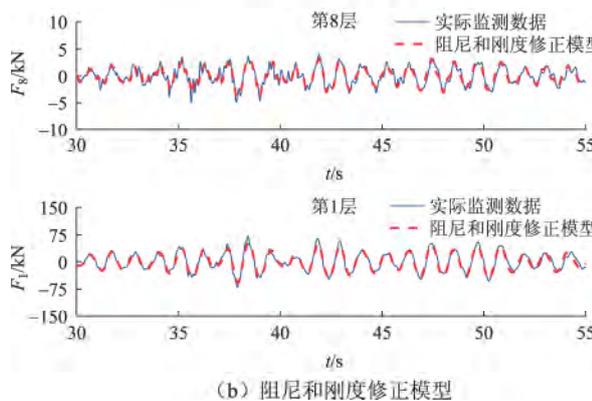
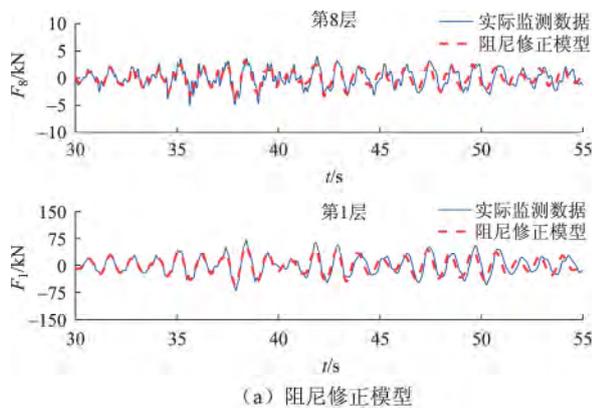


图9 修正模型预测的阻尼器力和实际监测数据  
Fig. 9 Predicted damper force by updated FE models and measured force

表5 模型预测加速度的标准均方差  
Table 5 Normalized root-mean-square errors of predicted acceleration by initial and updated models

模型	$e_{N_{a4}}/1\%$	$e_{N_{a8}}/1\%$
初始模型	-7.45	6.44
阻尼修正模型	55.19	55.24
阻尼和刚度修正模型	72.07	77.33

注:  $e_{N_{a4}}$  和  $e_{N_{a8}}$  分别为第1层和第8层加速度的标准均方差。

表6 模型预测阻尼器力的标准均方差  
Table 6 Normalized root-mean-square errors of predicted damper force by initial and updated models

模型	$e_{N_{F1}}/1\%$	$e_{N_{F8}}/1\%$
初始模型	23.37	-18.70
阻尼修正模型	41.04	33.35
阻尼和刚度修正模型	72.39	65.01

注:  $e_{N_{F1}}$  和  $e_{N_{F8}}$  分别为第1层和第8层的阻尼器力的标准均方差。

## 5 结论

1) 结构初始有限元模型存在较大模型误差, 加速度和阻尼器力的预测值与实际监测数据差异明显, 利用初始有限元模型估计阻尼器的实际工作性能不可靠。

2) 建议方法准确估计了阻尼器的附加有效阻尼比和有效频率, 修正模型可精确预测结构的加速度和阻尼器力响应。

3) 油阻尼器对结构的低阶模态参数影响较大, 显著提高了结构的第1阶阻尼比, 且有效阻尼比估计值随模态阶次的升高呈快速衰减趋势。

4) 油阻尼器对结构刚度贡献有限, 附加有效频率估计值较小, 但结构地震响应对频率较敏感, 为精确预测结构响应, 附加频率不可忽略。

## 参考文献

- [1] SOONG T T, DARGUSH G F. Passive energy dissipation system in structural engineering [M]. Buffalo: State University of New York, 1997: 92-169.
- [2] 周福霖. 工程结构减震控制 [M]. 北京: 地震出版社, 1997: 159-206. (ZHOU Fulin. Structure vibration control [M]. Beijing: Seismological Press, 1997: 159-206. (in Chinese))
- [3] 李爱群. 工程结构减震控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 216-284. (LI Aiqun. Structure vibration control [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 216-284. (in Chinese))
- [4] JSSI. Report of response-controlled buildings [R]. Tokyo: Japan Society of Seismic Isolation (JSSI), 2012.
- [5] KASAI K, MITA A, KITAMUNRA H, et al. Performance of seismic protection technologies during

- the 2011 Tohoku-Oki earthquake [J]. *Earthquake Spectra*, 2013, 29(Suppl. 1): S265-S293.
- [6] XIE L, CAO M, FUNAKI N, et al. Performance study of an eight-story steel building equipped with oil dampers damaged during the 2011 Great East Japan earthquake: part 1: structural identification and damage reasoning [J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2015, 14(1): 181-189.
- [7] 杨朋超, 薛松涛, 谢丽宇. 地震作用下消能构件的动力可靠性分析 [J]. *土木工程学报*, 2016, 49(增刊 1): 119-123. (YANG Pengchao, XUE Songtao, XIE Liyu. Dynamic reliability analysis of passive energy dissipation devices subjected to seismic excitations [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(Suppl. 1): 119-123. (in Chinese))
- [8] JI X, HIKINO T, KASAI K, et al. Damping identification of a full-scale passively controlled five-story steel building structure [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2013, 42(2): 277-295.
- [9] FRISWEL M, MOTTERSHEAD J E. Finite element model updating in structural dynamics [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 1995: 126-155.
- [10] LEE S H, MIN K W, HWANG J S, et al. Evaluation of equivalent damping ratio of a structure with added dampers [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(3): 335-346.
- [11] OCCHIUZZI A. Additional viscous dampers for civil structures: analysis of design methods based on effective evaluation of modal damping ratios [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(5): 1093-1101.
- [12] 巫振弘, 薛彦涛, 王翠坤, 等. 多遇地震作用下消能减震结构附加阻尼比计算方法 [J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(12): 19-25. (WU Zhenhong, XUE Yantao, WANG Cuikun, et al. Research on additional damping ratio calculation methods under frequent earthquake [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(12): 19-25. (in Chinese))
- [13] 胡岫岩, 任晓崧, 翁大根, 等. 附加黏滞阻尼器结构附加等效阻尼比算法研究 [J]. *力学季刊*, 2013, 34(1): 114-124. (HU Xiuyan, REN Xiaosong, WENG Dagen, et al. Research on calculation of equivalent damping ratio of structure with viscous dampers [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2013, 34(1): 114-124. (in Chinese))
- [14] BARUCH M, BAR ITZHACK I Y. Optimal weighted orthogonalization of measured modes [J]. *AIAA Journal*, 1978, 16(4): 346-351.
- [15] BERMAN A, NAGY E J. Improvement of a large analytical model using test data [J]. *AIAA Journal*, 1983, 21(8): 1168-1173.
- [16] FUNAKI N, KANG J, ITOH Y. Vibration response of a three-storied full-scale test building passively controlled by liquid dampers sealed by viscoelastic material [C]// 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Washington DC, USA: North Carolina State University, 2001.
- [17] YUEN K V. Updating large models for mechanical systems using incomplete modal measurement [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 28: 297-308.
- [18] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [19] 建筑消能减震技术规程: JGJ 297—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (Technical specification for seismic energy dissipation of building: JGJ 297—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [20] 日本建筑学会. 钢构造设计标准: 许容应力度设计法 [S]. 东京: 日本建筑学会, 2005. (Architectural Institute of Japan. Design standard for steel building based on allowable stress concept [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2005. (in Japanese))
- [21] CHOPRA A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering [M]. Englewood Cliffs: Pearson/Prentice Hall, 2007: 755-863.