

基于多模态能量平衡法的层间隔震结构性能评估研究

刘德稳^{1,2}, 刘长春³, 张亚飞¹, 房思彤¹

(1. 西南林业大学博士后流动站, 云南 昆明 650000; 2. 广州大学教育部工程抗震减震与结构安全重点实验室, 广东 广州 510405; 3. 中铁二十四局集团有限公司, 上海 200071)

摘要 目的 建立一种能够对层间隔震结构进行抗震性能评估的实用方法. 方法 通过建立层间隔震结构的简化动力方程, 根据多模态能量平衡方法给出层间隔震建筑抗震性能评估方法的评估流程, 并通过实际工程案例验证评估方法的精确度及可靠性. 结果 基于多模态能量平衡法的层间隔震抗震性能评估方法预测结果与弹塑性时程分析法计算结果平均值接近, 误差为0~15%, 在可接受范围内. 结论 笔者提出的层间隔震抗震性能评估方法可以考虑高阶振型的影响, 流程清晰、精度可靠且计算简单, 适用于层间隔震结构的抗震性能评估.

关键词 层间隔震结构; 多模态; 能量平衡; 抗震性能评估

中图分类号 TU35

文献标志码 A

Evaluation of Seismic Performance for Mid-story Isolation Based on MMEB

LIU Dewen^{1,2}, LIU Changchun³, ZHANG Yafei¹, FANG Sitong¹

(1. Postdoctoral Research Station, Southwest Forestry University, Kunming, China, 650000; 2. Key Laboratory of Earthquake Resistance and Absorption Engineering & Structure Safety of Ministry of Education, Guangzhou University, Guangzhou, China, 510405; 3. China Railway 24th Bureau Group Co. Ltd., Shanghai, China, 200071)

Abstract: The aim is to establish a simplified evaluation method for seismic performance of mid-story isolation structures. The simplified system of a mid-story isolation structure is established, and the high-order vibration mode energy ratio associated with model-related parameters is examined. Based on the multi-modal energy balance principle (MMEB), a simplified evaluation method for seismic performance of mid-story isolation structures is proposed. Using examples demonstrate the validity of the method and the calculation accuracy. The results show that the predicted displacement distribution of each layer are equivalent to those calculated by elastoplastic time-history analysis. The calculation method proposed can take into account the influence of high-order mode, and

收稿日期: 2018-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808467); 云南省博士后基金项目(2018); 云南省农业基础基金项目(2017FG001-097); 西南林业大学教育科学研究重点项目(ZD201702)

作者简介: 刘德稳(1983—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构减震控制等方面研究.

it has the advantages of good seismic performance analysis and analysis accuracy.

Key words: mid-story isolated structure; energy equation; multi-modal; performance evaluation

隔震结构一般分为基础隔震结构和层间隔震结构. 基础隔震结构因在地震时的良好表现而被得到认可和广泛应用. 不同于基础隔震结构, 层间隔震结构是指在建筑物中间某层添加隔震装置, 其动力特性较复杂, 与基础隔震结构完全不同, 近年来逐渐成为各国学者研究热点. 美国旧金山 Berry Street^[1]、日本汐留住友建设大楼^[2]、台湾大学土木楼、北京通惠家园等均采用了层间隔震技术, 世界最高的层间隔震建筑已经超过 100 m. 不少学者对层间隔震结构进行了卓有成效的研究^[3-9]. 随着层间隔震技术的不断应用, 其地震下的安全性能愈发凸显, 尤其在一些强震带上, 对此类既有建筑进行抗震性能评估具有重要意义.

相比于基础隔震结构的第 1 模态占主导因素, 层间隔震结构的高阶振型会参与一部分振动贡献^[10-11], 即出现多模态效应, 尤其是层间隔震高层建筑结构, 多模态效应更加明显. 在普通结构多模态抗震研究方面, 许多学者做了研究. P. Fajfar^[12] 提出了非线性算法(N2 法, N 表示 Nonlinear, 2 表示多自由度系统 MDOF 和单自由度系统 EDOF 两个模型); A. K. Chopra^[13-14] 提出了结构多模态推覆分析法(简称 MPA); E. Hernandez-Montes^[15] 基于能量平衡原理提出了修正的 MPA 法. 以上学者对普通建筑结构提出了一些考虑多模态效应的抗震评估方法, 但尚未有学者专门针对层间隔震结构提出抗震评估方法. 因此, 笔者基于多模态能量平衡原理提出一种适用于层间隔震结构的抗震评估方法, 并验证方法的精确度和可靠性.

1 层间隔震结构简化模型的建立

1.1 层间隔震结构简化模型动力方程建立
为了考虑高阶振型的影响, 文献[16 -

17] 提出了隔震结构的等效 3 自由度简化分析模型分析方法. 笔者建立层间隔震结构等效 3 自由度简化模型如图 1 所示, 该模型为规则层间隔震结构, 不考虑竖向地震、结构偏心扭转、结构 - 土相互作用效应 (SSI) 等复杂因素影响, 楼板为刚片模型, 不考虑弯曲变形.

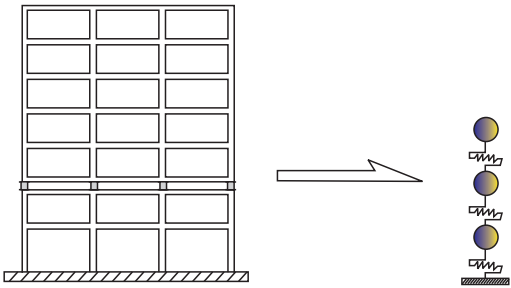


图 1 层间隔震结构 3 自由度简化计算模型

Fig. 1 Simplified 3-DOF model

建立模型结构动力方程如下:

$$\begin{bmatrix} m_d & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_d \\ \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b + c_d & -c_b & 0 \\ -c_b & c_b + c_s & -c_s \\ 0 & -c_s & c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{x}_b \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b + k_d & -k_b & 0 \\ -k_b & k_b + k_s & -k_s \\ 0 & -k_s & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_b \\ x_s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_d & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{U}_g. \tag{1}$$

相应的向量式为

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = M\ddot{U}_g. \tag{2}$$

式中: k_s 、 k_b 、 k_d 分别为隔震层上部体系、隔震层、隔震层下部体系的抗侧刚度; m_s 、 m_b 、 m_d 分别为隔震层上部体系、隔震层、隔震层下部体系的质量; c_s 、 c_b 、 c_d 分别为隔震层上部体

系、隔震层、隔震层下部体系的阻尼系数; x_s 、 x_b 、 x_d 分别为隔震层上部体系、隔震层、隔震层下部体系的位移; u_g 为地震作用。

C 为系统的阻尼矩阵(非经典阻尼矩阵),该非经典矩阵采用克拉夫子结构分块矩阵,包含普通结构的阻尼矩阵 C_0 和隔震层阻尼矩阵 C_b 两部分,组合公式如下:

$$C = C_0 + C_b. \tag{3}$$

$$C_0 = \alpha_s M + \beta_s K. \tag{4}$$

$$C_b = (\alpha_b - \alpha_s) m_b + (\beta_b - \beta_s) k_b. \tag{5}$$

其中:

$$\begin{Bmatrix} \alpha_s \\ \beta_s \end{Bmatrix} = \frac{2\xi_s}{\omega_1 + \omega_2} \begin{Bmatrix} \omega_1 \omega_2 \\ 1 \end{Bmatrix},$$

$$\begin{Bmatrix} \alpha_b \\ \beta_b \end{Bmatrix} = \frac{2\xi_b}{\omega_1 + \omega_2} \begin{Bmatrix} \omega_1 \omega_2 \\ 1 \end{Bmatrix}. \tag{6}$$

式中: ξ_s 、 ξ_b 分别为隔震层上下部体系、隔震层的阻尼比; ω_1 、 ω_2 为振型频率。

由弹塑性多自由度结构体系的模态分解理论确定各阶振型能量^[16-17],对物理坐标进行变换,令:

$$U = \sum_{i=1}^3 \phi_i q_i. \tag{7}$$

对层间隔震结构的3自由度简化模型进行结构模态的分解,可得到层间隔震结构第*j*阶模态等效单自由度体系的动力方程:

$$\ddot{q}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = -\Gamma_j \ddot{x}_g. \tag{8}$$

其中振型参与系数为 $\Gamma_j = \frac{\phi_j^T m \mathbf{1}}{\phi_j^T m \phi_j}$.

令 $q_j = \Gamma_j D_j$,代入式(8)得:

$$\ddot{D}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{D}_j + \omega_j^2 D_j = -\ddot{x}_g. \tag{9}$$

对式(1)进行振型分解,左边乘以 ϕ^T 得:

$$\phi^T M \phi \ddot{q}_j + \phi^T C \phi \dot{q}_j + \phi^T K \phi q_j = -\phi^T M \phi I \ddot{x}_g. \tag{10}$$

式(10)两端同时对 \dot{q}_j^T 积分得:

$$\int_0^t \dot{q}_j^T \phi^T M \phi \ddot{q}_j dt + \int_0^t \dot{q}_j^T \phi^T C \phi \dot{q}_j dt + \int_0^t \dot{q}_j^T \phi^T K \phi q_j dt = -\int_0^t \dot{q}_j^T \phi^T M \phi I \ddot{x}_g dt. \tag{11}$$

简化得:

$$\sum_{i=1}^3 \Gamma_i^2 \int_0^t (\dot{D}_j \ddot{D}_j + 2\xi_j \dot{\omega}_j D_j^2 + \omega_j^2 \dot{D}_j D_j) dt = \sum_{i=1}^3 \Gamma_i^2 \int_0^t \dot{D}_j \ddot{x}_g dt. \tag{12}$$

1.2 层间隔震结构高阶模态能量比例

为表明层间隔震结构高阶振型参与比例,令层间隔震结构高阶模态能量的比例参数如式(13)所示:

$$\Psi = \frac{\Gamma_3^2 \int_0^t \dot{D}_3 \ddot{x}_g dt}{\sum_{i=1}^3 \Gamma_i^2 \int_0^t \dot{D}_j \ddot{x}_g dt}. \tag{13}$$

为研究相关参数对高阶模态能量比例的影响,定义隔震层上部结构与隔震层下部结构的质量比为

$$\mu = (m_s + m_b) / m_d. \tag{14}$$

同时定义隔震层周期与隔震层下部结构自振周期比为

$$\beta = T_b / T_d. \tag{15}$$

根据层间隔震结构实际工程情况,质量比取值在[0.3,8],周期比取值在[2,8]较为合适.层间隔震结构高阶模态的能量比例随着质量比、周期比变化见图2.由图可知,质量比对层间隔震结构高阶模态能量比例影响较大,随着质量比的增加,高阶模态能量比例逐渐减少;周期比对高阶模态能量比例影响较小.

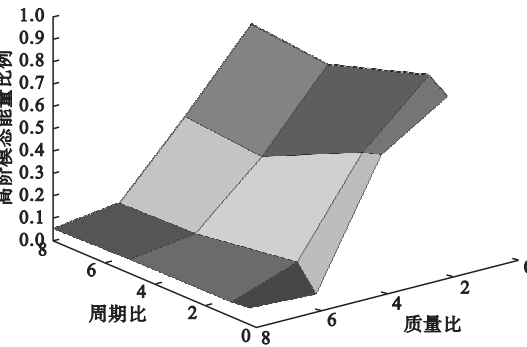


图2 质量比及周期比对高阶模态能量比例的影响
Fig.2 Influence of mass ratio and cycle ratio on high-order modal energy ratio

2 层间隔震结构多模态能量平衡法原理及推导

2.1 层间隔震结构的能量平衡原理

当发生地震时,地震以能量的方式输入到结构中,并由结构完全承担和吸收,地震能量转化为其他能量,主要包括结构弹性能(可恢复)、结构动能、结构阻尼能和结构塑性应变能.对于非线性单自由度体系,动力方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + f = -m\ddot{x}_g. \quad (16)$$

式中: m 为系统的质量; c 为系统的阻尼; f 为系统恢复力; \ddot{x}_g 为地震输入绝对加速度; \ddot{x} 和 \dot{x} 为系统相对加速度和相对速度.

对于非线性单自由度体系,对其动力方程进行 $[0, t]$ 区间内的积分,可得到非线性单自由度体系的能量方程为

$$E_k + E_d + E_h = E. \quad (17)$$

式中: E_k 、 E_d 、 E_h 、 E 分别为动能、阻尼能、塑性能 and 总能量.当地震结束时,可恢复的弹性能和动能完全转化为阻尼能和结构的塑性应变能,则能量方程可以改写为

$$E_d + E_h = E. \quad (18)$$

文献[18]指出一次地震输入到系统中的总能量与系统质量、固有周期有关,可忽略滞回特性对总输入能量的影响:

$$E = \int_{x_0}^{x_i} m\ddot{x}_g dx = \int_0^t m\ddot{x}_g \dot{x} dt = \frac{1}{2} m V_E^2. \quad (19)$$

式中: m 为单自由度体系的等效质量; \ddot{x}_g 为地震波加速度; \dot{x} 为单自由度体系相对速度; V_E 为单自由度体系等效能量速度.

对于隔震结构,隔震层所承担的总能量包含铅芯部分的滞回耗能和隔震层弹性变形能,后者表示为

$$E_{er} = \frac{1}{2} k_{be} S_d^2. \quad (20)$$

式中: k_{be} 为隔震层的屈服后刚度; S_d 为隔震层的最大变形.

隔震铅芯橡胶支座单元可以用弹簧单元(线弹性)和阻尼单元(理想弹塑性)组合来

模拟.文献[18]中铅芯橡胶支座阻尼器累积滞回耗能计算见式(21),以此能够使最大响应预测的结果包络大量的地震响应值.

$$E_{pl} = 8Q_y S_d. \quad (21)$$

式中: Q_y 为隔震层的屈服强度.

2.2 层间隔震结构多模态能量平衡方法

设 x 为系统相对位移, \ddot{x}_g 为地震动加速度,那么多自由度体系在地震作用下的动力方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + F = -M\ddot{x}_g \quad (22)$$

式中: M 为系统质量矩阵; C 为系统阻尼矩阵; F 为系统恢复力矩阵.

进行结构的多模态分解,可得到结构第 j 阶模态等效单自由度体系的结构动力方程为

$$M_j^* \ddot{x}_j + C_j^* \dot{x}_j + F_j^* = -\Gamma_j M_j^* \ddot{x}_g. \quad (23)$$

振型参与系数为

$$\Gamma_j = \frac{\Phi_j^T M \mathbf{I}}{\Phi_j^T M \Phi_j} \quad (24)$$

对动力方程(23)在 $[0, t]$ 区间内积分,可得到系统第 j 阶等效弹塑性单自由度体系的相对能量方程为

$$K_{k,j}^* + E_{d,j}^* + E_{h,j}^* = \Gamma_j E_{I,j}^*. \quad (25)$$

式中: $K_{k,j}^*$ 、 $E_{d,j}^*$ 、 $E_{h,j}^*$ 、 $\Gamma_j E_{I,j}^*$ 分别代表系统第 j 阶模态下等效弹塑性单自由度体系的动能、阻尼能、滞回耗能及总输入能.

3 层间隔震结构抗震性能评估流程

根据多模态能量平衡方法计算层间隔震结构的地震响应具体流程如下:

(1)对层间隔震结构进行结构模态分析,得到下列参数:结构周期 T 、结构等效质量 M_j^* 、归一化的结构振型向量 Φ_j 、结构振型参与系数 Γ_j 等.

(2)建立地震作用下等效单自由度体系的输入等效速度谱.

(3)对层间隔震结构进行多模态 Push-over 推覆分析,得到每一阶模态对应的等效单自由度体系恢复力模型参数.

(4)对每一阶模态对应的等效单自由度体系采用能量平衡方法,确定每一阶模态对应的响应位移。

(5)将每一阶模态对应的响应位移进行组合,可以得到层间隔震结构各层地震响应;并根据各层地震响应评估结构的抗震性能。

4 实例分析

4.1 层间隔震结构模型的建立

根据多模态能量平衡方法,对某实际工程进行抗震性能评估,并与该结构在弹塑性时程分析的结果进行对比验证。该层间隔震结构所在地抗震设防烈度为 8 度(0.3 g),结构类型选用钢筋混凝土框架结构,设计地震分组为第二组,共七层,第 1 层层高为 4.2 m,其他层高均为 3.0 m(见图 3),平面、立面均为规则结构,场地类别为 I 类。框架梁截面为 300 mm×550 mm,框架柱截面为 600 mm×600 mm。楼面恒荷载和活荷载分别为 3 kN/m² 和 2.5 kN/m²,屋面恒荷载和活荷载分别为 3.5 kN/m² 和 2 kN/m²,梁柱混凝土强度等级为 C35,纵向钢筋型号为 HRB400,箍筋型号为 HPB300。隔震层设置在第 2 层和第 3 层之间,隔震层高度为 2.6 m。结构配筋参数见表 1。

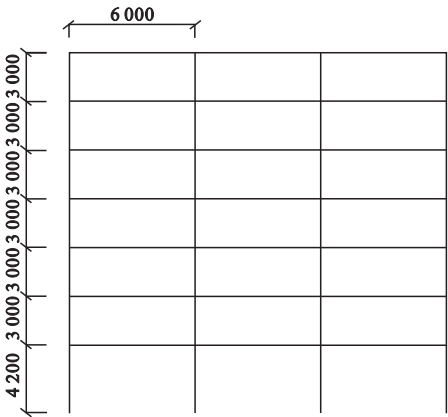


图 3 层间隔震结构示意图

Fig. 3 Structure diagram

表 1 梁柱配筋参数

Table 1 Reinforcements information mm ²			
楼层	梁顶配筋面积	梁底配筋面积	柱配筋面积
7	802	577	1 594
6	1 301	719	1 594
5	1 802	879	1 594
4	2 301	1 151	1 594
3	2 704	1 351	1 594
隔震层	2 298	1 166	1 594
2	4 797	4 165	1 594
1	6 650	5 698	1 594

结构取前三阶振型来分析。结构第 1、2、3 阶振型的模态参数见表 2,各阶振型的模态示意图见图 4。由表 2 可以看出,结构第 2 振型、第 3 振型均有一定比例的参与,如果仅考虑第 1 振型的参与将会给计算结果带来误差。

表 2 层间隔震结构模态参数

Table 2 Modal parameters

周期/s			振型参与系数			模态质量/kg		
T_1	T_2	T_3	Γ_1	Γ_2	Γ_3	M_1^*	M_2^*	M_3^*
2.8	0.5	0.4	1	-0.159	0.066	4.49×10^5	4.46×10^6	2.67×10^5

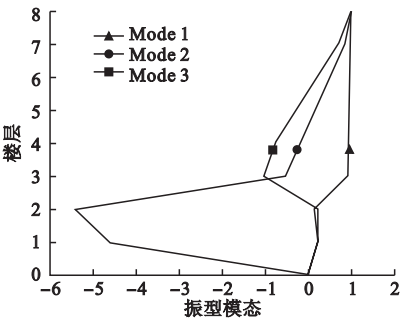


图 4 各阶振型模态示意图

Fig. 4 Diagram of various modes

4.2 层间隔震结构多模态能量平衡法

选用 7 条地震波,包含 5 条天然波和 2 条人工波,分别为 EI Centro NS、EI Centro EW、Kobe、Taft、Northbridge、人工波 1、人工波 2。由弹性时程分析方法得到每一条地震波的输入能等效速度谱如图 5 所示,其中横坐标为周期,纵坐标为等效速度,根据结构模态参数可以得到总输入能。

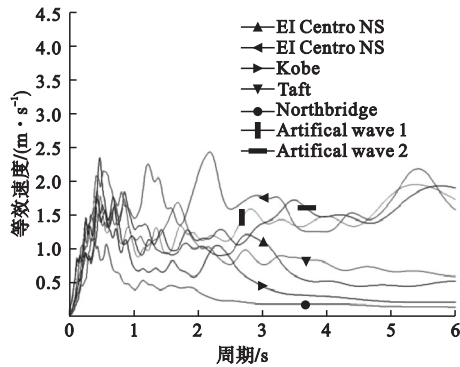


图5 总输入能量等效速度谱

Fig. 5 Spectrum of total input energy equivalent velocity

按结构第1、2、3阶振型 pushover 分析得到的结构能力曲线如图6所示。根据每一阶模态 pushover 分析得到的结构能力曲线拟合得到等效单自由度体系的恢复力模型,然后确定每一阶振型对应的屈服力、屈服位移、屈服后刚度等重要参数,然后由各条地震波对应的总能量和能量平衡关系计算出响应位移。其中第1阶模态为隔震模态,可按隔震结构的能量平衡来确定响应位移;第2、3阶模态可按普通钢筋混凝土框架结构的能量平衡确定响应位移。普通钢筋混凝土框架结构的响应位移可写为

$$x_m = [\frac{1}{2}M(\frac{T}{2\pi}\alpha g)^2 - \frac{1}{2}M(\frac{T f_y}{2\pi M})^2]/f_y + x_y. \quad (26)$$

式中: T 为结构初始周期; g 为重力加速度; α 为地震影响系数; x_y 为结构屈服位移; f_y 为结构屈服力。

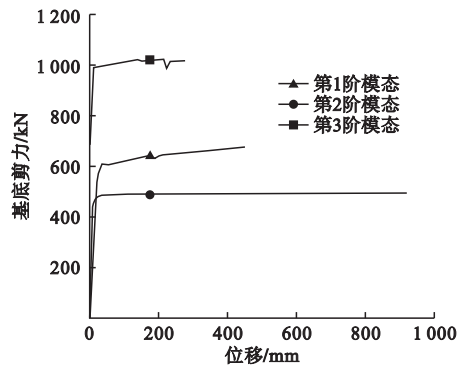


图6 层间隔震结构的能力曲线图

Fig. 6 The pushover capacity curves

将每一阶模态对应的响应位移进行组合,组合后的响应位移表达式为

$$x = \sum_{n=1}^N \Phi_n \Gamma_n D_n X_{mass,n}. \quad (27)$$

式中: $X_{mass,n}$ 为振型质量参与系数。

4.3 弹塑性时程分析法验证

为验证理论的可靠性和精确性,通过非线性有限元(FEM)软件 SeismoStruct 对层间隔震结构进行动力弹塑性分析,分析结果与基于模态平衡的评估方法结果进行比较。模型采用七层框架结构,隔震层设置在2层顶部,其中结构截面选用纤维模型,确保计算更加精确,结构单元采用梁柱单元(非线性),混凝土本构选用非线性 con_cc 模型,钢筋本构选用 stl_mp 模型,隔震支座选用由 lin_sym 线性弹簧和 bl_kin 双线性恢复力模型组合而成的恢复力模型。在进行时程分析时,阻尼采用瑞雷阻尼,阻尼比取5%,考虑结构的重力二阶 $P-\Delta$ 效应。

图7为层间隔震框架结构在七条地震波作用下的时程分析结果与多模态能量平衡法计算结果的比较。由图7可知,多模态能量平衡法计算结果与弹塑性时程计算结果平均值比较接近,差别为0~15%,在可接受范围内。

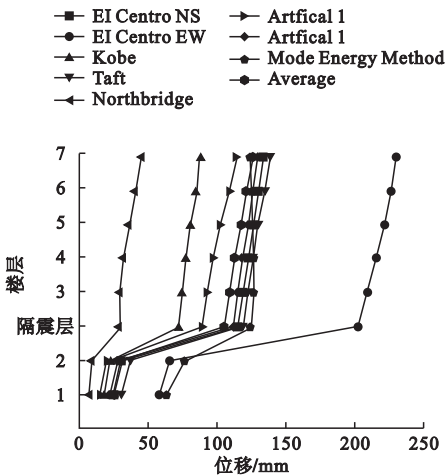


图7 两种方法结果比较

Fig. 7 Comparison of MMEB and time history analysis method

5 结 论

(1) 基于多模态能量方法可以考虑层间隔震结构的高阶振型能量参与比例。

(2) 与传统方法相比,基于多模态能量平衡法的层间隔震结构抗震性能评估方法考虑了高阶振型的影响,流程清晰、精度可靠且计算简单。

(3) 基于多模态能量方法不仅适用于隔震结构,也适用于普通结构。

参考文献

- [1] RYAN K L, EARL C L. Analysis and design of inter-story isolation systems with nonlinear devices[J]. Journal of earthquake engineering, 2010, 14(7): 1044 - 1062.
- [2] 中日联合考察团. 东日本大地震灾害考察报告[J]. 建筑结构, 2012, 42(4): 1 - 20. (Sino-Japanese Joint Miss. Inspection report of the disaster of the east Japan earthquake [J]. Building structure, 2012, 42(4): 1 - 20.)
- [3] VILLAVERDE R. Aseismic roof isolation system: feasibility study with 13-story building [J]. Journal of structural engineering, 2002, 128(2): 188 - 196.
- [4] 祁皓, 林云腾, 郑国琛. 层间隔震结构工作机理研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 239 - 243. (QI Ai, LIN Yunteng, ZHEN Guochen. Research on working mechanism of inter-story isolated structure [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2006, 26(4): 239 - 243.)
- [5] 祁皓, 郑国琛, 阎维明. 考虑参数优化的层间隔震结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(2): 8 - 16. (QI Ai, ZHEN Guochen, YAN Weiming. Experimental study about shaking table of inter-story isolated structure considered with parameter optimization [J]. Journal of building structures, 2009, 30(2): 8 - 16.)
- [6] 周福霖, 张颖, 谭平. 层间隔震体系的理论研究[J]. 土木工程学报, 2009(8): 1 - 8. (ZHOU Fulin, ZHANG Yin, TAN Ping. Theoretical research of inter-story seismic isolation system [J]. Journal of China civil engineering, 2009(8): 1 - 8.)
- [7] 谭平, 殷伟希, 张颖. 近场地震下层间隔震偏心结构的减震控制[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 281 - 286. (TAN Ping, YIN Weixi, ZHANG Ying. Seismic control about eccentric structure of lower seismic isolation in near-field earthquake [J]. Journal of vibration and shock, 2011, 30(11): 281 - 286.)
- [8] 金建敏, 谭平, 周福霖, 等. 下部减震层间隔震结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(6): 104 - 108. (JIN Jianmin, TAN Ping, ZHOU Fulin, et al. Experimental study about shaking table of underpart damping layer in inter-story isolated structure [J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31(6): 104 - 108.)
- [9] AHN H J, LIM S H, PARK C. An integrated design of quasi-zero stiffness mechanism [J]. Journal of mechanical science and technology, 2016, 30(3): 1071 - 1075.
- [10] WANG S J, CHANG K C, HWANG J S, et al. Simplified analysis of mid-story seismically isolated buildings [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2011, 40(2): 119 - 133.
- [11] WANG S J, HWANG J S, CHANG K C, et al. Analytical and experimental studies on mid-story isolated buildings with modal coupling effect [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2013, 42(2): 201 - 219.
- [12] FAJFAR P, GASPERSIC P. The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 1996, 25, 23 - 67.
- [13] CHOPRA A K, GOEL R K. A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2004, 33(8): 903 - 927.
- [14] CHOPRA A K, GOEL R K. Role of higher-mode pushover analyses in seismic analysis of buildings [J]. Earth spectra, 2005, 21(4): 10: 27 - 41.
- [15] HERNANDEZ-MONTES E, KWON O S, ASCHHEIM M A. An energy based formulation for first and multiple-mode nonlinear static (pushover) analyses [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2004, 31(1): 69 - 88.
- [16] 程光煜, 叶列平. 弹性多自由度系统地震输入能量的研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(4): 6 - 9. (CHENG Guangyu, YE Lieping. Research on inputting seismic energy of elastic multiple-degree-of-freedom system [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2006, 28(4): 6 - 9.)
- [17] 程光煜, 叶列平. 弹塑性 MDOF 系统地震输入能量研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(6): 29 - 35. (CHENG Guangyu, YE Lieping. Research on inputting seismic energy of elastic-plastic MDOF system [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2007, 29(6): 29 - 35.)
- [18] AKIYAMA H. Earthquake resistant limit-state design for buildings [M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1985. (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)