

文章编号: 1000-4750(2015)03-0134-06

高层框架-剪力墙隔震结构地震响应研究

刘彦辉¹, 谭平¹, 周福霖¹, 杜永峰², 闫维明³

(1. 广州大学减震控制与结构安全国家重点实验室(培育), 广州 510405; 2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 兰州 730050;
3. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘 要: 针对高层框架-剪力墙基础隔震结构, 考虑框架与剪力墙之间的相互作用, 建立了高层框架-剪力墙基础隔震结构的动力分析模型, 剪力墙为分布参数体系, 框架结构为集中参数体系, 通过边界条件把隔震支座及框架-剪力墙结构中框架部分对剪力墙的影响引入到分布参数体系, 推导出高层框架-剪力墙基础隔震结构的频率方程及振型正交条件, 进一步应用Hamilton原理, 推导出隔震层隔震装置作用在各振型上的等效阻尼比, 从而实现该体系运动方程的解耦, 然后通过振型叠加法求解结构的地震响应。通过对一栋10层框架-剪力墙基础隔震结构进行动力特性及地震响应仿真分析, 结果显示, 建立的动力分析模型能较好的反映结构的动力特性, 提出的高层框架-剪力墙隔震结构动力求解新方法能方便的求解结构的动力响应, 与有限元数值积分法基本一致, 可以反映地震作用下框架与剪力墙相互作用的经历。

关键词: 高层框架-剪力墙结构; 隔震结构; 动力模型; 地震响应; 相互作用

中图分类号: TU311.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.10.0905

STUDY OF SEISMIC RESPONSE IN ISOLATED HIGH-RISE FRAME-SHEAR WALL STRUCTURES DURING EARTHQUAKES

LIU Yan-hui¹, TAN Ping¹, ZHOU Fu-lin¹, DU Yong-feng², YAN Wei-ming³

(1. State Key Laboratory for Seismic Reduction /Control & Structural Safety (Cultivation), Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;
2. Northwest Center for Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou 730050, China;
3. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A dynamic model for isolated high-rise frame-shear wall buildings was presented based on the consideration of interaction of frame and shear wall, in which the shear wall is a system with distributed mass and the frame is a system with lumped mass and spring. According to established dynamic model, the effects of isolated devices and the frame structure on the shear wall structure were introduced into a distributed parameter system using boundary conditions, and frequency equation and mode orthogonal conditions were deduced. Then, according to the Hamilton Principle, the equivalent damping ratio in every mode produced by the damping of laminated rubber bearings was derived, and the seismic response of isolated high-rise frame-shear wall buildings can be obtained by the mode superposition method. Finally, a ten-story isolated frame-shear wall building was chosen to analyze dynamic characteristics and seismic response to validate the correctness of the dynamic model and method of solving for seismic response. Simulation results show that the established dynamic model can

收稿日期: 2013-10-02; 修改日期: 2014-05-27

基金项目: 广州市珠江科技新星项目(2014J2200058); 国家自然科学基金项目(51478131, 51408142); “十二五”科技支撑计划项目(2012BAJ07B02); 国家留学基金委公派博士后项目(201208440216)

通讯作者: 谭平(1973—), 男, 湖南常德人, 研究员, 博士, 博导, 主要从事消能与结构减震控制方面的研究(E-mail: tanping2000@hotmail.com)。

作者简介: 刘彦辉(1980—), 男, 河南扶沟人, 副研究员, 博士后, 硕导, 主要从事结构振动控制的研究(E-mail: liuyanhui2012@163.com);

周福霖(1939—), 男, 广东潮阳人, 教授, 博士, 博导, 中国工程院院士, 主要从事隔震与消能减震研究(E-mail: zhoufl@cae.cn);

杜永峰(1962—), 男, 甘肃正宁人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构工程与工程抗震研究(E-mail: dooyf@lut.cn);

闫维明(1960—), 男, 黑龙江兰西人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构抗震与防灾研究(E-mail: yanwm@bjut.edu.cn)。

reflect the dynamic performance of isolated structure well and seismic response of isolated high-rise frame-shear wall buildings can be solved conveniently by the method in this paper, the results of which are basically consistent with those from finite element methods. At the same time, the method deduced can obtain the interaction process of frame structures and shear-wall structures in isolated high-rise frame-shear wall buildings.

Key words: high-rise frame-shear wall building; isolated structure; dynamic model; seismic response solution; interaction

隔震技术因其构造简单,性能稳定,造价相对低廉,已成为国内外结构工程和防灾工程领域热点研究方向,成为应用于高烈度区建筑进行结构减震控制最为常用的减震技术之一。随着对隔震技术研究的深入,隔震技术已经逐渐应用到实际高层建筑中,目前日本已将隔震技术应用于 177.4m 的高层建筑隔震。Jain S K 和 Thakkar S K^[1]研究了高层基础隔震建筑上部结构刚度对隔震技术减震效果的影响,提出了通过提高上部结构刚度提高减震效果的策略; Izuru Takewaki 等^[2]基于地震输入结构能量根据时域和频域的方法研究了高层隔震结构的地震响应; Kondo Akihiro 等^[3-4]研究了风荷载作用下高层隔震结构的动力响应,评估了风荷载作用下高层隔震结构的减震效果。Calugaru V 等^[5]研究了 20 层剪力墙结构在近断层地震作用下的响应。Becker 等^[6]以美国规范为标准研究了高层隔震结构在日本的设计方法。在国内,周福霖等^[7]进行了高层建筑基础隔震体系试验及其应用研究,并最早在一栋 13 层的高层建筑中尝试应用隔震技术。李宏男、祁皓等^[8-9]通过数值的方法研究了基础隔震结构高宽比限值,给出了基础隔震结构的最大高宽比。刘伟庆、程华群等^[10]研究了大高宽比结构基础隔震时避免隔震支座受拉的上部结构布置原则及隔震层优化设计方法。叶列平等^[11]研究了高层建筑的隔震原理与技术,从延长结构周期原理与隔震层滤波原理两方面分析了高层建筑隔震的减震效果。商吴江、祁皓^[12]根据《建筑抗震设计规范》对高层隔震结构设计方法进行了研究。刘文光、刘阳和杨巧荣等^[13]进行了高层隔震结构单质点模型的地震响应单纯质点法研究,提出了可以快速计算高层隔震结构地震响应的单纯质点法。潘东辉等^[14]基于悬臂梁模型研究了隔着高层结构的地震响应。本文作者^[15]针对高层剪力墙复隔震结构,研制了双向抗拔滑动装置,并建立高层剪力墙复隔震结构动力分析模型,推导了其地震响应的求解方法。

本文针对高层框架-剪力墙基础隔震结构,考虑

惯性力的分布特征,考虑框架与剪力墙之间的相互作用,建立了高层框架-剪力墙基础隔震结构的动力分析模型,通过边界条件把隔震支座及框架-剪力墙中框架部分对剪力墙的影响引入到分布参数体系,基于 Hamilton 原理,得到隔震支座非比例阻尼对分布参数体系的影响,推导出了高层框架-剪力墙基础隔震结构的地震响应求解方程。结果显示,建立的动力分析模型能较好的反映结构的动力特性,求解方法具有较高的计算精度,且计算工作量小,同时,可以获得地震作用下高层框架-剪力墙隔震结构框架部分与剪力墙部分相互作用的过程。

1 动力模型的建立及基本假定

建立高层框架-剪力墙基础隔震结构体系动力响应分析模型时把剪力墙结构看作分布参数体系,结构体系中框架部分和隔震支座对结构的作用作为子结构附加到分布参数体系,在地震作用下,每层框架结构产生的惯性力通过离散点传递到剪力墙分布参数体系上,每层楼板的惯性力由剪力墙和框架共同承担,分布参数体系剪力墙产生的惯性力由剪力墙承担,根据参考文献[16]的基本假定,可得到高层框架-剪力墙基础隔震结构动力模型如图 1 所示,中 K 、 C 分别为隔震层的水平刚度和阻尼系数,其他符号的含义同参考文献[16]中图 1。

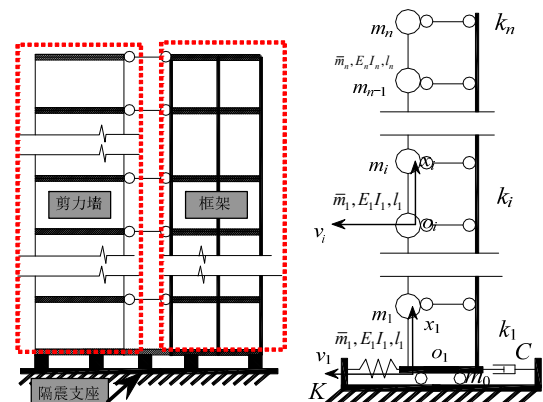


图 1 高层框架-剪力墙隔震结构动力模型

Fig.1 Dynamic model of high-rise frame shear-wall

2 动力响应求解

建立第 i 层剪力墙的局部坐标系为 x_i, o_i, v_i 与整体坐标系为 xov , 如图 1 所示。剪力墙的振动的形状表达式 $\phi_i(x)$ 为文献[15]中式(1), 四个常数 A_{in} 决定剪力墙振动的形状和振幅, 通过每层剪力墙考虑框架部分影响的边界条件求解。

在 $x_i = 0$ 处, 考虑隔震支座及第一层框架部分对分布参数体系的作用, 以及楼层集中惯性力的作用, 可得到该处的边界条件为:

$$-K\phi_i(0) = E_1 I_1 \phi_i''(0) - \omega^2 \phi_i(0) m_0 - k_1 (\phi_i(l_1) - \phi_i(0)) \quad (1)$$

$$E_1 I_1 \phi_i'(0) Y(t) = 0 \quad (2)$$

在 $x_i = l_i$ 处, 考虑第 i 层及第 $i+1$ 层框架部分对分布参数体系的作用, 以及该楼层集中惯性力的作用, 可得到该处的边界条件为:

$$E_i I_i \phi_i''(l_i) + \omega^2 \phi_i(l_i) m_i - k_i (\phi_i(l_i) - \phi_i(0)) =$$

$$E_{(i+1)} I_{(i+1)} \phi_{(i+1)}''(0) - k_{(i+1)} (\phi_{(i+1)}(l_{(i+1)}) - \phi_{(i+1)}(0)) \quad (3)$$

$$\phi_i(l_i) = \phi_{(i+1)}(0) \quad (4)$$

在 $x_n = l_n$ 处的边界条件同参考文献[16]中式(5)和式(6)。

将形状函数表达式和它的导数代入边界条件可得到高层框架-剪力墙基础隔震结构的特征方程:

$$\begin{bmatrix} D_{11} & 0 & \dots & 0 \\ D_{21} & D_{22} & \dots & 0 \\ 0 & D_{31} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & D_{(i+1)1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \int_0^{l_i} \phi_{im}(x_i) \frac{E_r I_r \phi_{ir}''''(x_i)}{\omega_r^2} dx + \phi_{1m}(0) \frac{E_1 I_1 \phi_{1r}''''(0) + K \phi_{1r}(0) - k_1 (\phi_{1r}(l_1, t) - \phi_{1r}(0, t))}{\omega_r^2} + \\ & \sum_{i=1}^{n-1} \phi_{im}(l_i) \frac{k_i (\phi_{ir}(l_i, t) - \phi_{ir}(0, t)) - k_{(i+1)} (\phi_{(i+1)r}(l_{(i+1)}, t) - \phi_{(i+1)r}(0, t))}{\omega_r^2} - \phi_{nm}(l_n) \frac{E_n I_n \phi_{nr}''''(l_n)}{\omega_r^2} + \\ & \phi_{nm}(l_n) \frac{k_i (\phi_{nr}(l_n, t) - \phi_{nr}(0, t))}{\omega_r^2} + \sum_{i=1}^{n-1} \phi_{im}(l_i) \times \frac{E_{(i+1)} I_{(i+1)} \phi_{(i+1)r}''''(0) - E_i I_i \phi_{ir}''''(l_i)}{\omega_r^2} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

地震作用下, 隔震层集中参数有阻尼影响的运动方程为:

$$m_0 \frac{\partial^2 v_1(0, t)}{\partial t^2} + c_i(l_i) \frac{\partial v_1(l_i, t)}{\partial t} + K v_1(0, t) +$$

$$\begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_{(i+1)2} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & D_{n1} & D_{n2} \\ 0 & \dots & 0 & D_{(n+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

式(5)中: $D_{11} = [D_{11}^1 \quad D_{11}^2]$;

$$D_{11}^1 = \begin{bmatrix} \frac{E_1 I_1 a_1^3 + K_1 \sin(L_1 a_1) \omega^2 m_0 + K_1 (\cos(L_1 a_1) - 1)}{K} & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$D_{11}^2 = \begin{bmatrix} \frac{-E_1 I_1 a_1^3 + K_1 \sinh(L_1 a_1) \omega^2 m_0 + K_1 (\cosh(L_1 a_1) - 1)}{K} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

其他符号意义同参考文献[16]。根据式(5)可获得结构的自振频率和振型。

高层框架-剪力墙基础隔震结构振型第一正交条件同参考文献[16]式(8)。对于高层框架-剪力墙基础隔震体系, 隔震层集中参数的自由振动方程为:

$$m_0 \frac{\partial^2 v_1(0, t)}{\partial t^2} + K v_1(0, t) + E_1 I_1 \frac{\partial^3 v_1(0, t)}{\partial x^3} - k_1 (v_1(l_1, t) - v_1(0, t)) = 0 \quad (6)$$

借鉴文献[15]和文献[16]的推导方法, 可得到高层框架-剪力墙结构体系第二正交条件为:

$$E_1 I_1 \frac{\partial^3 v_1(0, t)}{\partial x^3} + c_{si}(l_i) I_i \frac{\partial v_i(0, t)}{\partial t} - k_i (v_1(l_i, t) - v_1(0, t)) - c_{ki} \times$$

$$\left(\frac{\partial v_i(l_i, t)}{\partial t} - \frac{\partial v_i(0, t)}{\partial t} \right) + C \frac{\partial v_1(0, t)}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

其他层有阻尼影响的运动方程同参考文献[16]。通过振型正交条件和有阻尼影响的运动方程, 可得到:

$$M_m \ddot{Y}_m(t) + (a_0 M_m + a_1 \omega_m^2 M_m) \dot{Y}_m(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \dot{Y}_j(t) \phi_{2m}(0) C \phi_{1j}(0) + \omega_m^2 Y_m(t) = P_m(t) \quad (9)$$

式(9)中符号含义同参考文献[15]。其中 $(a_0 M_m + a_1 \omega_m^2 M_m)$ 为高层框架-剪力墙基础隔震结构第 m 振型比例阻尼部分, $\sum_{j=1}^{\infty} \dot{Y}_j(t) \phi_{2m}(0) C \phi_{1j}(0)$ 为隔震支

座阻尼对结构第 m 振型的影响, 为了分析隔震支座阻尼对第 m 振型的影响, 可以假定非隔震结构的阻尼为零, 在第 m 振型上应用 Hamilton 原理:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc} dt = 0 \quad (10)$$

式中, T 、 V 和 W_{nc} 分别为体系的动能、弹性势能和阻尼耗散的能量。将体系的动能、弹性势能和阻尼耗散的能量带入式(10)可得到:

$$\begin{aligned} & \int_{t_1}^{t_2} \delta \dot{Y}_m(t) P_m(t) dt - \\ & \int_{t_1}^{t_2} \delta \left[\int_{Y_m(0)}^{Y_m(t)} [\phi_m(0)]^2 C \dot{Y}_m(t) dY_m(t) \right] dt - \\ & \int_{t_1}^{t_2} \dot{Y}_m(t) \delta \dot{Y}_m(t) M_m dt + \\ & \int_{t_1}^{t_2} Y_m(t) \delta Y_m(t) \omega_m^2 M_m dt = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中符号意义同式(9), 由式(11)可得到:

$$M_m \ddot{Y}_m(t) + C[\phi_m(0)]^2 \dot{Y}_m(t) + \omega_m^2 Y_m(t) = P_m(t) \quad (12)$$

比较式(12)与式(9)可知:

$$\sum_{j=1}^{\infty} \dot{Y}_j(t) \phi_{2m}(0) C \phi_{1j}(0) = C[\phi_m(0)]^2 \quad (13)$$

将式(13)代入式(9)可得到标准单自由度体系方程的形式:

$$\ddot{Y}_m(t) + 2(\xi_m + \xi'_m) \omega_m \dot{Y}_m(t) + \omega_m^2 Y_m(t) = \frac{P_m(t)}{M_m} \quad (14)$$

式(14)中 ξ_m 为第 m 振型非隔震结构的阻尼比, 其值为:

$$\xi_m = \frac{a_0}{2\omega_m} + \frac{a_1 \omega_n}{2} \quad (15)$$

ξ'_m 为隔震支座阻尼在第 m 振型上的等效阻尼比, 其值为:

$$\xi'_m = \frac{C[\phi_m(0)]^2}{2\omega_n M_m} \quad (16)$$

求解出标准单自由度体系动力响应之后, 通过振型叠加法可得到整个体系的动力响应。

3 数值仿真

为了验证本文建立的高层框架-剪力墙基础隔震结构动力模型的准确性及推导求解地震响应方法的正确性, 本节使用参考文献[16]中10层框架-剪力墙结构为例进行横向分析, 只是在原工程的底部增加一层隔震层, 隔震层的质量为609.1T, 隔震层的水平刚度为85.517×10⁶N/m, 小震下隔震层阻尼系数为8.0×10⁶N·m/s, 大震下隔震层阻尼系数为5.9×10⁶N·m/s, 结构的其它参数、抗震设防烈度、场地类别及设计地震分组同参考文献[16], 采用EI Centro地震波作为外部激励对算例结构的x向进行地震响应分析, 地震波峰值加速度小震取70cm/s², 大震取400cm/s²。隔震支座性能指标见表1, 小震采用50%水平变形的隔震支座参数, 大震采用250%水平变形的隔震支座参数。隔震垫的布置如图2。有限元模型采用Sap2000有限元软件分析, 积分方法为非线性时程积分法。如那件非线性积分方法分析。

表 1 铅芯橡胶隔震垫性能
Table 1 Performance of Lead Rubber bearings

型号	设计面压/ MPa	水平刚度/(kN/m)		阻尼系数/(N·m/s)	
		$\gamma=50\%$	$\gamma=250\%$	$\gamma=50\%$	$\gamma=250\%$
GZY500V4	15	2443	2043	234100	184100
GZY700V4	15	3512	3112	334100	236100
GZY800V4	15	4812	4112	422300	326300

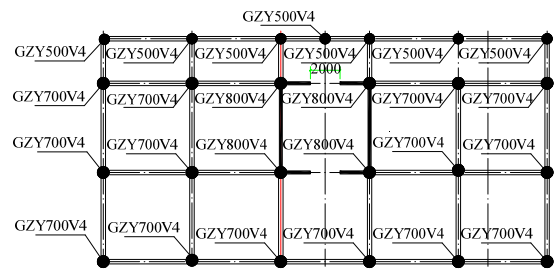


图2 隔震支座布置图

Fig.2 Arrangement of lead rubber bearings

用本文建立的动力分析模型和有限元分析模型所得的固有频率见表2, 从表2可以看出本文建立的动力分析模型的第一频率与有限元分析模型得到的第一频率基本一致, 第二阶频率误差较大主要是由于模型简化时采用D值法计算的框架水平刚

度，以及连梁简化为铰接所引起。同时从表2可以看出隔震后结构的自振频率增加到原来非隔震结构的2倍，自振周期由隔震前的1.1364s增加到隔震后的2.2603s，周期显著增加，这样可以避开地震波的卓越周期，减小结构的地震响应。

取结构的前三阶振型叠加求解结构的地震响应。图3和图4分别为小震时本文模型及算法与有限元法计算的隔震层位移和加速度响应，可以看出本文模型及算法与有限元法计算的结果基本一致，计算误差主要是由于计算的结构框架部分的水平刚度与有限元法计算的不一致，本文采用的是D值法计算的框架的水平刚度。但计算误差在计算的范围之内，满足工程应用的要求，因此，本文算法可以用来求解框架剪力墙隔震结构的地震响应。

表 2 结构的自振频率

Table 2 Natural frequency of structure

振型		1	2	3
隔震结构	本文模型	0.4424	1.4340	4.4627
	有限元模型	0.4278	1.5958	4.5868
	误差/(%)	3.42	10.14	2.71
抗震结构	有限元模型	0.857	3.203	7.850

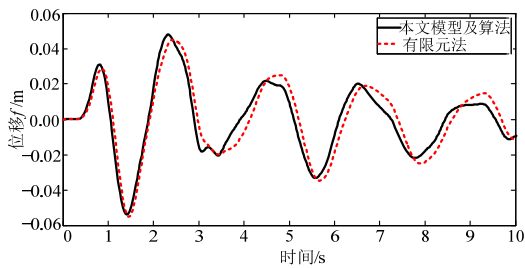


图3 小震下隔震层位移时程

Fig.3 Displacement at isolated layer under EL-Centro

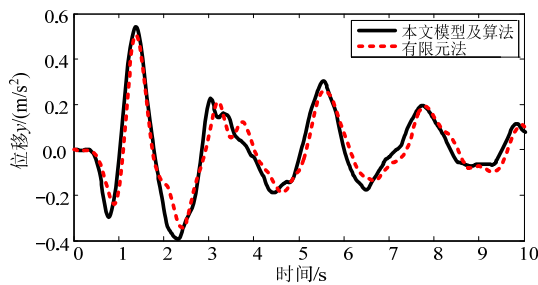
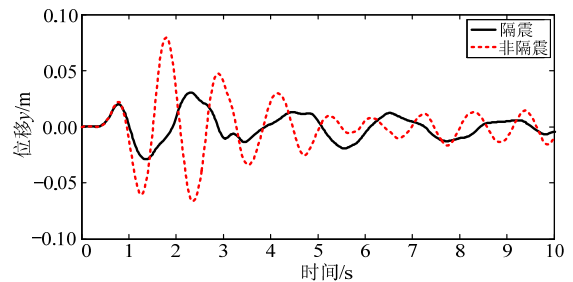


图4 小震下顶层加速度时程

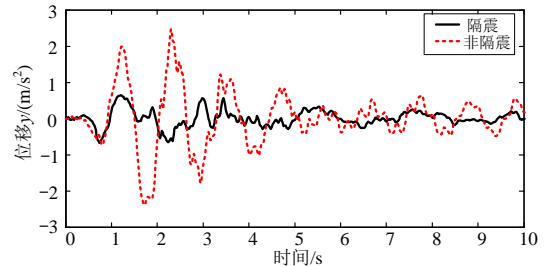
Fig.4 Acceleration of roof under EL-Centro

图5、图6为EL-Centro波作用下本文动力模型及地震响应求解方法得到的隔震结构与非隔震结构顶层相对位移响应和顶部隔震层绝对加速度时程曲线。从图5(a)可以看出，隔震前后整个结构

的最大侧移明显减小，隔震前结构的最大侧移为0.0794m，结构弹性平均层间位移角为1/538，大于抗震设计规范规定的1/800，不满足抗震规范要求，隔震后结构的最大侧移为0.0306m，减小为非隔震结构的38.59%，结构弹性平均层间位移角为1/1397，满足抗震规范的要求。从图5(b)可以看出隔震后结构顶层的加速度响应有较大的减小，隔震结构减震效果显著。图6为本文动力模型及地震响应求解方法大震下隔震层位移时程曲线，隔震层最大位移为0.1581m，考虑扭转后隔震支座最大水平位移为0.1818m，小于抗震规范规定的隔震支座水平位移限值0.275m。图7为小震时顶层连梁的轴力时程，根据计算的每层的位移和剪力墙在每层处位移关于位置x的三次导数，同时考虑惯性力由质量的分布情况决定，确定每层处惯性力在框架和剪力墙的分布情况，从而可以计算出连梁的轴力。



(a) 结构顶层相对位移响应



(b) 结构顶层绝对加速度响应

图5 EL-Centro波作用下顶层响应

Fig.5 Response of roof under EL-Centro

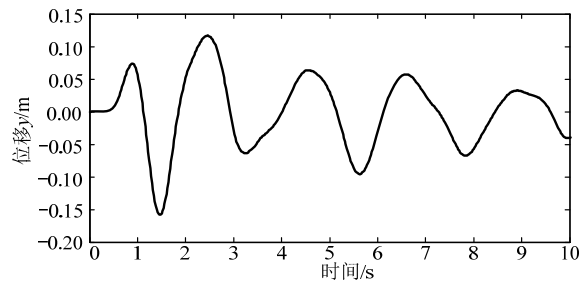


图6 大震下隔震层位移时程

Fig.6 Displacement at isolated layer under major earthquake of EL-Centro

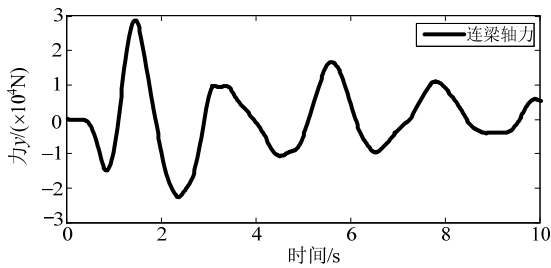


图7 顶层连梁轴力时程

Fig.7 Axial force in connected beam at the roof of structure

4 结论

(1) 考虑框架与剪力墙之间的相互作用, 建立的高层框架-剪力墙基础隔震结构的动力分析模型, 能较好的反映高层框架-剪力墙隔震结构的动力特性。同时, 针对建立的动态分析模型, 通过连续分布参数为主, 离散参数通过边界条件引入到分布参数体系的方法, 推导的针对高层框架-剪力墙隔震结构的动力响应求解方法能方便快速的求解该结构的地震响应, 计算结果与有限元直接积分法基本一致。

(2) 通过 Hamilton 原理, 针对高层框架-剪力墙隔震结构非比例阻尼体系, 推导出的等效振型阻尼, 能方便的对这类体系进行解耦, 仿真结果表明, 推导的等效振型阻尼计算的结果与有限元数值积分法基本一致。

(3) 由于本文建立的模型及地震响应算法, 考虑的框架与剪力墙的相互作用, 可以方便的计算地震作用在框架部分和剪力墙部分的分布情况, 反映其相互作用的经历, 获得连梁的动态内力。优于现有的悬臂梁模型及层剪切模型及其地震求解方法。

参考文献:

[1] Jain S K, Thakkar S K. Effect of superstructure stiffening in base isolated tall buildings [J]. Journal of the Institution of Engineers (India), 2004, 85(8): 141-148.

[2] Izuru Takewaki, Kohei Fujita. Earthquake input energy to tall and base-isolated buildings in time and frequency dual domains [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2009, 18(6): 589-606.

[3] Kondo Akihiro, Takenaka Yasuo, Suzuki Masayasu, et al. Study on wind-induced response of tall base-isolated buildings with time-history response analysis: Part 3: Evaluation of wind force time-history of 3-direction with change of wind direction [J]. Summaries of Technical Papers of the Annual Meeting of the Architectural Institute of Japan. Structures II, Structural dynamics Nuclear Power Plants, 2011(7): 613-614.

[4] Kondo Akihiro, Takenaka Yasuo, Suzuki Masayasu, et al. Study on wind-induced response of tall base-isolated buildings with time-history response analysis: Part 4: Response analysis results under a wind force time-history of 3-direction [J]. Summaries of Technical Papers of the Annual Meeting of the Architectural Institute of Japan. Structures II, Structural Dynamics Nuclear Power Plants, 2011(7): 615-616.

[5] Calugaru V, Panagiotou M. Seismic response of 20-story base-isolated and fixed-base reinforced concrete structural wall buildings at a near-fault site [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 2014, 43(6): 927-948.

[6] Becker T C, Yamamoto S, Hamaguchi H, Higashino M, Nakashima M. Application of isolation to high-rise buildings: A Japanese design case study through a US design code lens [J]. Earthquake Spectra 2014, doi: 10.1193/052813EQS136M.

[7] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997: 38.
Zhou Fulin. Seismic control in engineering structures [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1997: 38. (in Chinese)

[8] 李宏男, 王苏岩, 贾俊辉. 采用基础摩擦隔震房屋高宽比限值的研究[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(3): 73-76.
Li Hongnan, Wang Suyan, Jia Junhui. A study on limit of ratio of height to width for sliding-type base isolation masonry building [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997, 17(3): 73-76. (in Chinese)

[9] 祁皓, 范宏伟. 基于结构设计的基础隔震结构高宽比限值的研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(4): 13-20.
Qi Ai, Fan Hongwei. A structural design study on the limit of height-width ratio of base-isolated structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(4): 13-20. (in Chinese)

[10] 程华群, 刘伟庆, 王曙光. 高层隔震建筑设计中隔震支座受拉问题分析[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(4): 161-166.
Cheng Huaqun, Liu Weiqing, Wang Shuguang. Analysis of the tension of rubber bearings in the design of isolated high-rise buildings [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(4): 161-166. (in Chinese)

[11] 曲哲, 叶列平, 潘鹏. 高层建筑的隔震原理与技术[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(5): 58-63.
Qu Zhe, Ye Lieping, Pan Peng. Theory and techniques of seismic isolation in high-rise buildings [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 31(5): 58-63. (in Chinese)

(参考文献[12]-[16]转第224页)

- [8] Lin Y, Sodano H A. Concept and model of a piezoelectric structural fiber for multifunctional composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(7/8): 1911—1918.
- [9] Lin Y, Sodano H A. Electromechanical characterization of a active structural fiber lamina for multifunctional composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(11/12):1825—1830.
- [10] Xia Z H, Zhang Y F, Ellyin F. A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40(8): 1907—1721.
- [11] Odegard G M. Constitutive modeling of piezoelectric polymer composites [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(18): 5315—5330.
- [12] Pettermann H E, Suresh S. A comprehensive unit cell model: A study of coupled effects in piezoelectric 1-3 composites [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37(39): 5447—5464.
- [13] Berger H, Kari S, Gabbert U, Rodríguez-Ramos R, Bravo-Castillero J, Guinovart-Díaz R. Calculation of effective coefficients for piezoelectric fiber composites based on a general numerical homogenization technique [J]. *Composite Structures*, 2005, 71(3/4): 397—400.
- [14] Xu Y L, Du S S, Xiao J H, Zhao Q X. Evaluation of the effective elastic properties of long fiber reinforced composites with interphases [J]. *Computational Materials Science*, 2012, 61: 34—41.
- [15] Guinovart-Díaz R, Yan P, Rodríguez-Ramos R, López-Realpozo J C, Jiang C P, Bravo-Castillero J, Sabina F J. Effective properties of piezoelectric composites with parallelogram periodic cells [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2012, 53: 58—66.
- [16] Li Y, Zheng H, Long S G, Wu L L. Effects of the piezoelectric phase's geometric properties on effective coefficients of 1–3 piezoelectric composites [J]. *Computational Materials Science*, 2011, 50(7): 2135—2141.
- [17] Berger H, Kari S, Gabbert U, Rodríguez-Ramos R, Bravo-Castillero J, Guinovart-Díaz R. A comprehensive numerical homogenization technique for calculating effective coefficients of uniaxial piezoelectric fibre composites [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 412(1/2): 53—60.

(上接第 139 页)

- [12] 商昊江, 祁皓. 高层隔震结构设计方法研究[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(1): 107—114.
Shang Haojiang, Qi Ai. Research on the design method of high-rise isolated structure [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(1): 107—114. (in Chinese)
- [13] 刘文光, 刘阳, 杨巧荣, 等. 高层隔震结构单质点模型的地震响应单纯质点法研究[J]. *振动工程学报*, 2012, 25(6): 693—698.
Liu Wenguang, Liu Yang, Yang Qiaorong, et al. A study on pure mass model method for seismic response of single mass model of high-rise isolated structure [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2012, 25(6): 693—698. (in Chinese)
- [14] 潘东辉, 于国友, 张德强. 隔震高层结构的悬臂梁模型的地震反应研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(5): 115—121.
Pan Donghui, Yu Guoyou, Zhang Deqiang. Earthquake response analysis of cantilever-beam model of isolated high-rise structure [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(5): 115—121. (in Chinese)
- [15] 刘彦辉, 杜永峰, 谭平, 周福霖, 闫维明. 高层剪力墙复合基础隔震结构地震响应分析[J]. *工程力学*, 2011, 28(7): 143—150.
Liu Yanhui, Du Yongfeng, Tan Ping, Zhou Fulin, Yan Weiming. Seismic response analysis on composite base-isolated tall shear wall buildings [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(7): 143—150. (in Chinese)
- [16] 刘彦辉, 周福霖, 谭平, 杜永峰, 闫维明. 高层剪力墙结构动力模型建立及地震响应研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 2(8): 3187—3194.
Liu Yanhui, Zhou Fulin, Tan Ping, Du Yongfeng, Yan Weiming. Semi-analytical solution of earthquake effects for frame-shear wall structures [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 2(8): 3187—3194. (in Chinese)