

Rubber Isolation Bearing Element Secondary Development Based on ABAQUS

Hui Wang, Mingsheng Fang, Zuoyu Sun

College of Civil Engineering of Guangzhou University, Guangzhou
Email: 601063037@qq.com, fangms89@163.com, sunzuoyu@163.com

Received: May 26th, 2014; revised: Jun. 20th, 2014; accepted: Jun. 28th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Rubber isolation technology is an effective means to mitigate the dynamic responses of a building under seismic excitations, now it has been applied widely in engineering, from those lower stiff buildings to some complicated structures, such as large scale irregular stadium, bridges, and even high rise buildings recently. Such trends lead to higher requirements for dynamics response analysis, especially for those larger scale structure, the arisen key problem is how to simulate the nonlinear hysteresis property of the rubber bearing, and incorporate the programs in the finite element analysis. Based on the secondary development platform of ABAQUS, we program for the rubber bearing element, in which, the Bouc-Wen model is employed to describe the hysteresis behavior in lateral, while the strength-differences of vertical stiffness are treated as well. An irregular building is simulated to investigate the effects of base isolation by using the developed program.

Keywords

Rubber Isolation, Non-Linear Hysteresis, ABAQUS, Secondary Development, Simulation

基于ABAQUS的橡胶垫隔震支座单元二次开发

王 晖, 方明胜, 孙作玉

广州大学土木工程学院, 广州
Email: 601063037@qq.com, fangms89@163.com, sunzuoyu@163.com

收稿日期: 2014年5月26日; 修回日期: 2014年6月20日; 录用日期: 2014年6月28日

摘要

橡胶垫隔震技术是减轻建筑结构在地面地震动激励下动力响应的有效措施,得到了日益广泛的工程应用。隔震的结构也由普通的低矮建筑拓展到一些复杂结构,如一些不规则的建筑场馆、桥梁,目前在高层建筑中也得到了应用。这对结构的动力响应分析提出了越来越高的要求,特别是对大型复杂结构,如何模拟橡胶垫的非线性特性,并结合到结构的有限元分析中,已成为影响橡胶垫隔震技术推广应用的一个关键问题。本文基于ABAQUS的二次开发平台,采用Bouc-Wen模型描述其水平恢复力的滞回特性,同时考虑竖向刚度的拉压异性,对橡胶垫隔震支座单元进行了二次开发,其中Bouc-Wen的参数可以根据需要进行合理的调节和设置,基于所开发的软件,对一个不规则结构进行了仿真分析,探索了隔震的影响效果。

关键词

橡胶垫隔震,非线性滞回特性, ABAQUS, 二次开发, 仿真分析

1. 引言

随着隔震技术的广泛应用,针对隔震结构的非线性分析和设计显示出了日益重要的科学意义和工程应用价值。采用隔震技术,可以使得结构在地震激励时其上部处于弹性状态,主要的变形和能耗都集中在隔震层处,因此对这类结构的非线性分析,其关键在于能否正确模拟隔震支座的力学特性并将其结合进大型有限元的动力分析软件中。对此,国内外学者进行了广泛的研究,发现隔震支座的水平恢复力表现为典型的非线性滞回特性[1]-[5],并且不同种类的隔震支座的滞回特性还有所差异,同时其竖向力学性能具有表现为拉压异性的特点[2]。对于水平恢复力特性的描述,可以采用简单的分段线性模型,其不足是模型存在拐点,使得在数值分析和有限元分析时处理相当复杂,且容易造成结果失真,另外一种方案则是采用复杂的微分方程模型,如Bouc-Wen模型采用光滑的曲线处理了滞回曲线的拐点,可以较好的模拟隔震支座的滞回特性,因而得到了广泛的应用。目前常用的大型结构分析有限元软件,如ETABS、SAP2000和MIDAS均采用Bouc-Wen模型来描述隔震支座的力学特性。Bouc-Wen模型包含较多的参数,其中有些参数对恢复力的滞回特性的影响很大,因此根据实际的隔震支座的力学性能,选择并设定合理的参数是很有必要的。但是使用在ETABS和SAP2000时,只能调节橡胶隔震垫参数,无法调节Bouc-Wen模型的滞回参数;在MIDAS软件中,可以调节参数 α 、 K 、 F_y 、 β 和 γ ,却无法调节参数A和n。而且其竖向力学性能均为线弹性,无法模拟隔震支座的拉压异性问题。在现有的有限元软件中,ABAQUS的非线性求解功能性能卓越,但它目前还没有直接可用的隔震支座单元,其自带的JOINTC连接单元由3个平动弹簧构成,可以模拟两个节点之间的相互作用,但JOINTC连接单元只能模拟叠层橡胶支座,因为其方向只能定义成线弹性或弹塑性,无法模拟非线性滞回耗能的力学行为。BUSHING单元能够同时定义6个方向塑性行为和阻尼特性,但6个分量之间相关性太高,给应用带来诸多不便。因此要想利用ABAQUS的强大的非线性求解功能进行隔震结构的分析,必须开发一种基于Bouc-Wen模型的隔震支座单元,并且能进行滞回参数调节。

本文基于ABAQUS软件的用户单元子程序接口,采用Bouc-Wen模型作为水平恢复力模型,并考虑竖向刚度的拉压异性,开发了基于Bouc-Wen模型的隔震支座单元UEL子程序,相关的模型参数可以根据实际需要进行设置和调节的。应用所开发的程序,通过对一栋不规则结构进行了地震响应动力分析,研究了相关参数对隔震效果的影响。

2. Bouc-Wen 模型

1967 年 Bouc 首先提出了一种光滑迟滞模型[6]，随后针对结构动力滞回性能的研究，Wen[7]通过对 Bouc 提出的模型进行归纳总结，采用光滑的曲线处理了滞回曲线的拐点，使得该模型得到了完善和发展，在当前工程领域中被广泛使用[8]-[12]，可以较好地模拟铅芯隔震橡胶支座的水平恢复力特性。根据 Wen 提出的微分滞回模型，结合铅芯橡胶支座的力学特点，其力学模型可由线性弹簧和滞回弹簧组合表示如图 1 所示，数学表达式如下：

$$F = \alpha K_1 u + (1 - \alpha) Q_d z \quad (1)$$

式中： F 为隔震支座水平恢复力； u 为水平剪切位移； K_1 为屈服前刚度； α 为屈服后刚度与初始刚度的比值； Q_d 为屈服荷载； z 为无量纲滞回变量，该变量的范围满足 $|z| \leq 1$ 。满足如下微分方程：

$$\dot{z} D_y = A \dot{u} - \beta |\dot{u}| |z|^{n-1} z - \gamma \dot{u} |z|^n \quad (2)$$

式中， D_y 为屈服位移，满足 $Q_d = K_1 D_y$ ， \dot{u} 为隔震支座的水平剪切位移的速度， n 为控制滞回曲线弹性阶段与塑性阶段过渡平滑的特性参数， A 、 β 、 γ 描述滞回曲线的形状参数，通过合理地调整 Bouc-Wen 模型的有关参数，可以较好地模拟铅芯隔震橡胶支座的力学性能。

3. 隔震支座单元

3.1. 隔震支座单元力学模型

采用线弹性模型模拟竖向的拉压刚度异性，如图 2 所示。单元的竖向力 - 位移关系式为：

$$f_v = k d_v \quad (3)$$

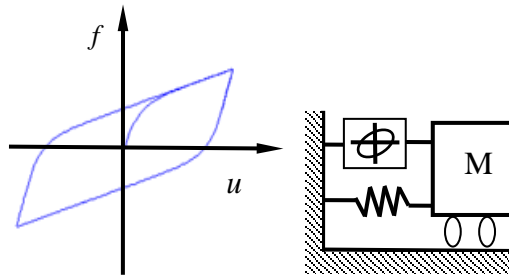


Figure 1. The hysteretic curve and sketch maps of Bouc-Wen model

图 1. Bouc-Wen 模型滞回曲线和示意图

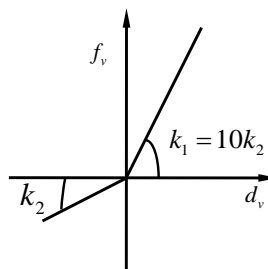


Figure 2. Vertical mechanical properties of rubber isolation bearing

图 2. 隔震垫的竖向力学性能

$$k = \begin{cases} k_1 & (\text{当 } d_v \geq 0 \text{ 时}) \\ k_2 & (\text{当 } d_v < 0 \text{ 时}) \end{cases} \quad (4)$$

式中 k_1 为压缩刚度， k_2 为拉伸刚度。 d_v 为压缩变形。

采用 Bouc-Wen 模型模拟水平恢复力特性，如图 3 所示。单元水平力 - 位移关系式为：

$$f = k_y d + (k_e - k_y) e \quad (5)$$

其中： k_e 为初始线性刚度； k_y 为屈服后刚度； d 为水平总变形； d_y 为屈服变形。

e 为水平弹性变形，并处于 $\pm d_y$ 的范围内，它通过对下面微分方程在每个时间步长进行数值积分计算出来：

$$\dot{e} = \begin{cases} \left[A - (\gamma + \beta) \left| \frac{e}{d_y} \right|^n \right] \dot{d} & (\text{当 } \dot{d}e \geq 0 \text{ 时}) \\ \left[A - (\gamma - \beta) \left| \frac{e}{d_y} \right|^n \right] \dot{d} & (\text{当 } \dot{d}e < 0 \text{ 时}) \end{cases} \quad (6)$$

对每个时间步长可以进行下列有限微分近似：

$$\dot{d} = \frac{d_t - d_{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\dot{e} = \frac{e_t - e_{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (8)$$

3.2. 隔震支座子程序开发

隔震垫单元包含 2 个节点，如图 4 所示，第一个和第二个节点(a 和 b)各有 3 个平动自由度，如图 5 所示。对于轴向变形，其属性只能是线性的，两个剪切变形有耦合，均可定义线性和非线性行为。对于两节点三自由度隔震支座而言，其在 ABAQUS 软件中的力 - 位移关系表示如下：

$$F = (K_p - K_e)U + K_e U^e \quad (9)$$

式中 U 为总变形矢量， U^e 为弹性变形矢量， F 为节点力矢量，如式 10 所示。单元刚度矩阵 K 为 6×6 阶，由线性刚度矩阵 K_e 和非线性刚度矩阵 K_p 两部分组成。其中 K_e 和 K_p 均为 6×6 阶的对称矩阵，具体形式如下：

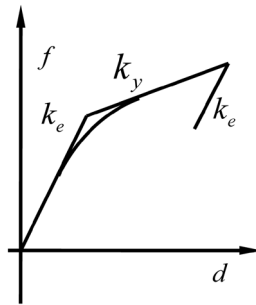


Figure 3. Horizontal mechanical properties of rubber isolation bearing
图 3. 隔震垫的水平力学性能

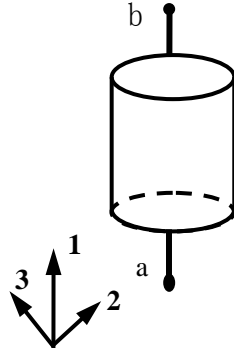


Figure 4. Sketch of a rubber isolation bearing

图 4. 隔震垫单元示意图

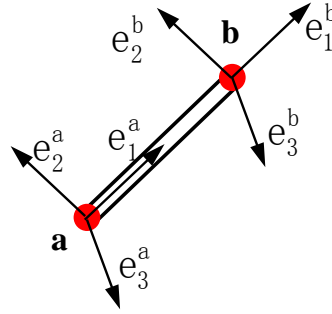


Figure 5. DOF of a rubber isolation bearing

图 5. 隔震垫单元自由度

$$F = [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_1 \quad f_2 \quad f_3]^T \quad (10)$$

$$[k_0] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$K_e = [k_0] \times [k_1^e \quad k_2^e \quad k_3^e \quad k_1^e \quad k_2^e \quad k_3^e]^T \quad (12)$$

$$K_p = [k_0] \times [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_1 \quad k_2 \quad k_3]^T \quad (13)$$

$$U = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_1 \quad u_2 \quad u_3]^T \quad (14)$$

$$U^e = [u_1^e \quad u_2^e \quad u_3^e \quad u_1^e \quad u_2^e \quad u_3^e]^T \quad (15)$$

对于轴向变形，由于只考虑线性，因此所以它们的弹性变形和总变形相等，因此该方向的节点力与节点位移关系如下：

$$f_1 = \eta k_1 (u_1 - u_4) \quad (16)$$

$$f_4 = -\eta k_1 (u_1 - u_4) \quad (17)$$

由于考虑了支座的拉压异性，在支座受压时， $\eta=1$ ，受拉时， $\eta=1/10$ 。

3.3. UEL 单元开发原理与流程

ABAQUS 主程序在增量步开始时将节点有关参数和状态变量等值传入 UEL 子程序中，UEL 根据传入参数更新状态变量并将其传入主程序。在每一个分析步中，UEL 的作用是向主程序提供作用于节点上的“力” F^N (依赖于节点的自由度 u^N)。若自由度为旋转，那么对应的 F^N 为力矩；若自由度为位移，那么相关的 F^N 为节点力。其中 F^N 为残留量，其表达式为： $F^N = F_{ext}^N - F_{int}^N$ ，其中 F_{ext}^N 是节点 N 处的外力(由施加的外部荷载产生)， F_{int}^N 是节点 N 出的内力(由内部的应力产生)。在非线性单元中， F^N 往往依赖自由度增量 Δu^N 和内部状态变量 H^α ， H^α 必须在单元子程序中不断更新。

根据上述原理，UEL 子程序主要流程图如下图 6 所示。

3.4. UEL 单元相关参数列表

在调用 UEL 子程序时，必须根据实际工程设计输入橡胶隔震垫的有关参数。在本单元中，一共需要 10 个隔震垫单元参数，物理含义如表 1 所示；并定义了一个 8 维的状态变量矩阵，其物理含义如表 2 所示。对于 Bouc-Wen 模型的有关参数，直接在代码中设定。

4. 算例分析

4.1. 结构概况

为了验证开发单元的滞回特性和隔震效果有效性，本文选用一栋 9 层不规则混凝土框架结构进行数

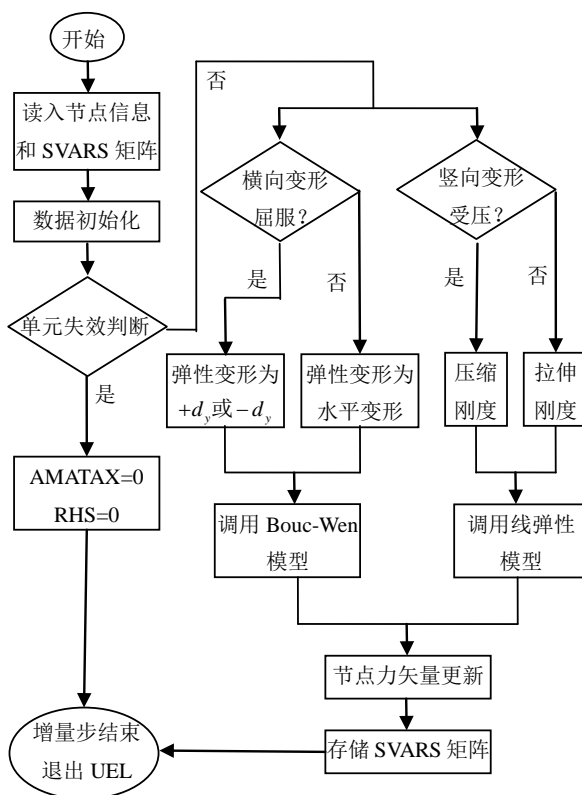


Figure 6. Flow chart of UEL

图 6. UEL 流程图

值仿真分析。结构的参数如下：层高为 3.3 m，主梁截面 300×550 mm，次梁截面 250×500 mm，塔楼柱截面 600×600 mm，柱截面 500×500 mm，板厚 120 mm，混凝土强度 C30。平面尺寸为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。结构立面图 7 所示。

工况条件：设计地震分组第一组，II 类场地，场地特征周期 0.35 s，抗震设防烈度为 8 度，设计基本加速度值为 0.3 g，场地距发震断裂层距离大于 10 km。

Table 1. Input parameters of rubber bearing

表 1. 橡胶隔震垫输入参数

UEL 参数值	变量含义	单位
PROPS(1)	K_y^c (竖向抗压刚度)	kN/m
PROPS(2)	K_x^c (方向 1 初始刚度)	kN/m
PROPS(3)	K_x^p (方向 1 屈服后刚度)	kN/m
PROPS(4)	F_y^1 (方向 1 屈服力)	kN
PROPS(5)	K_z^c (方向 2 初始刚度)	kN/m
PROPS(6)	K_z^p (方向 2 屈服后刚度)	kN/m
PROPS(7)	F_y^2 (方向 2 屈服力)	kN
PROPS(8)	水平方向 1 等效刚度	kN/m
PROPS(9)	水平方向 2 等效刚度	kN/m
PROPS(10)	m (隔震垫质量)	kg

Table 2. List of the state vector parameter

表 2. 状态向量参数列表

SVARs	变量含义
SVARS(1)-SVARS(3)	节点 1 的 3 个自由度方向的残余力
SVARS(4)-SVARS(6)	节点 2 的 3 个自由度方向的残余力
SVARS(7)	剪切方向 1 弹性变形
SVARS(8)	剪切方向 2 弹性变形

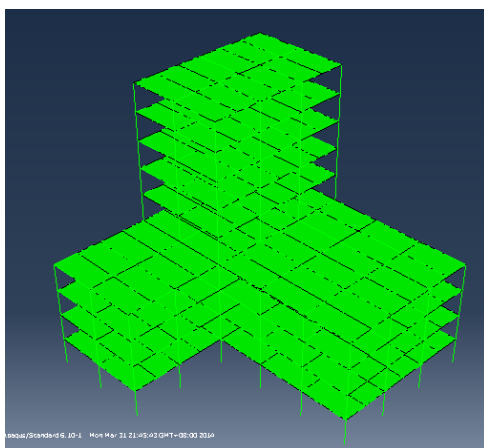


Figure 7. Elevation vertical plan of the structure

图 7. 结构立面图

选用 4 个 LRB-G4-400 和 26 个 LRB-G4-350 铅芯橡胶隔震支座。设计地震波选用 2 条现有地震波，分别为 El Centro 波和 TAFT 波，1 条人工地震波。最大加速峰值为：小震取 1.1 m/s^2 ；大震取 5.1 m/s^2 ；持续时间均为 20 s。

4.2. 结构自振特性

采用橡胶垫隔震，可以明显的改变结构的动力特性。隔震前后结构的前五阶振型分析结果如表 3 所示。隔震后，结构的前 3 阶周期为：2.22 s、2.13 s 和 1.69 s，分别为不隔震时的 2.6、3.09 和 3.45 倍。

4.3. 时程分析

4.3.1. 加速度响应

在多遇地震作用，可以求得隔震结构和非隔震结构各层加速峰值的包络曲线。

图 8 为常遇地震作用下，隔震方案和非隔震方案对应的 X 方向楼层加速度包络曲线。由图可知，隔震之后，结构各层加速度最大值几乎相同，说明结构基本处于弹性状态。而非隔震结构加速度随楼层的增加呈典型的放大现象。顶层加速度相对首次加速度，放大了将 4 倍左右。对比两种方案可知，隔震之后，各层的加速度峰值大大降低。Y 方向的加速度也有类似的规律。

4.3.2. 位移反应及层间位移角

图 9 为罕遇地震作用下，隔震方案和非隔震方案对应的结构层间位移峰值包络曲线。由图可知，隔震之后，上部结构的楼层层间位移几乎相等，结构呈现弹性状态。而非隔震结构，楼层最大层间位移变化很大，特别是在首层以及塔楼的首层，有明显的变化趋势。

Table 3. Structural periods before and after isolation
表 3. 隔震前后结构周期

振型	非隔震	隔震
1	0.84	2.22
2	0.69	2.13
3	0.49	1.69

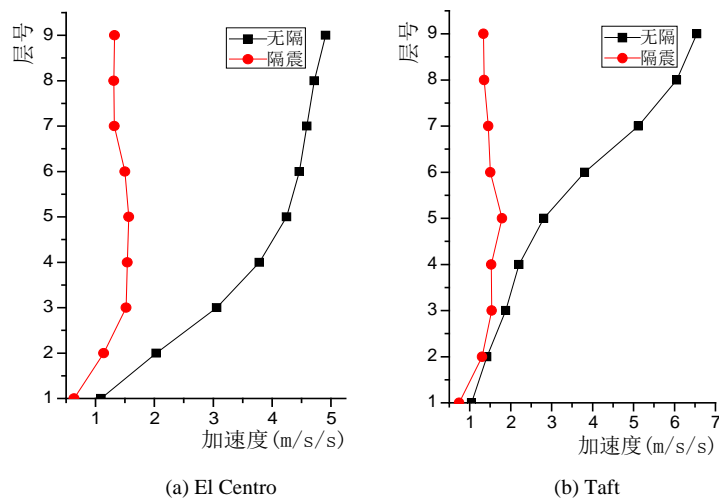


Figure 8. Acceleration envelopes under frequent earthquake

图 8. 常遇地震下加速度包络图

表 4 为罕遇地震作用下，结构的 X 方向最大层间位移角倒数。对比可知，隔震之后，结构上部的层间位移大幅下降，约为非隔震时的 1/10 左右。

表 5 为罕遇地震作用下，隔震支座的 X、Y 方向的最大相对位移。由表知，罕遇地震作用下，隔震层的位移满足规范要求。

4.3.3. 基底剪力

表 6 为罕遇地震作用下，隔震和非隔震方案对应的基底最大剪力。由表可知，隔震之后，结构的基底剪力下降至隔震前的 12.3%~17.8%。

4.3.4. 扭转响应

图 10 和图 11 分别是隔震与非隔震方案，在双向 El Centro 波和双向 Taft 波作用下结构的顶层扭转角

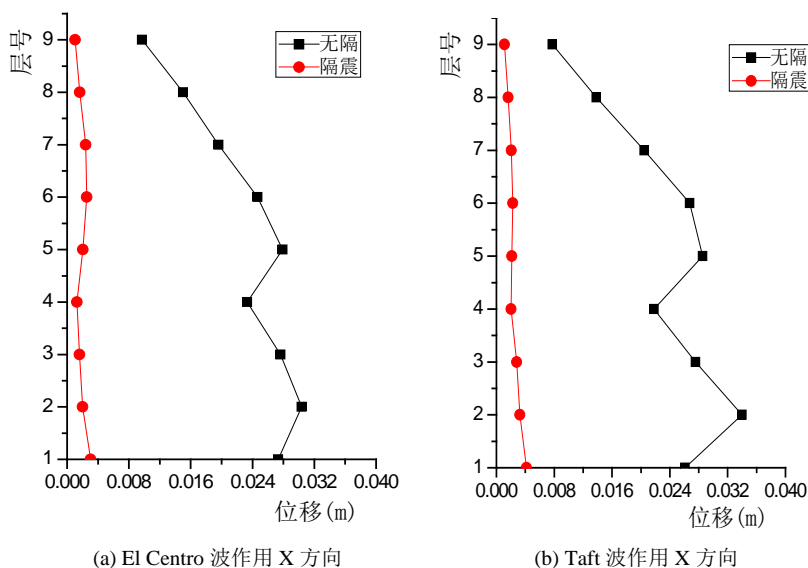


Figure 9. The largest inter story drifts under rare earthquake
图 9. 罕遇地震下结构最大层间位移

Table 4. Inter story drift ratios in X direction under rare earthquake (1/θ)
表 4. 罕遇地震下结构的 X 方向层间位移角(1/θ)

层号	El Centro 波		Taft 波		人造波	
	隔震	不隔	隔震	不隔	隔震	不隔震
9	960	253	1118	602	1105	504
8	609	149	860	383	685	306
7	414	114	645	308	515	245
6	392	94	572	283	449	201
5	493	93	518	254	461	182
4	796	116	768	245	816	181
3	621	110	557	201	1061	151
2	497	96	446	182	867	136
1	328	132	480	204	795	144

Table 5. The biggest displacement of rubber bearing under rare earthquake
表 5. 罕遇地震下隔震支座最大位移

工况	最大水平位移(mm)				最大容许位移
	El Centro 波	Taft 波	人工波	平均值	
X 方向	153.5	168.1	151.0	157.5	275
Y 方向	152.5	168.0	150.8	157.1	275

Table 6. The maximum base shear under rare earthquake (kN)
表 6. 罕遇地震下基底最大剪力(kN)

工况	El Centro 波		Taft 波		人工波		平均值	
	隔震	非隔	隔震	非隔	隔震	非隔	隔震	非隔
X	2792	23,400	3028	21,242	2069	19,703	2629	21,448
Y	2738	14,781	2898	18,195	2002	8861	2485	13,946

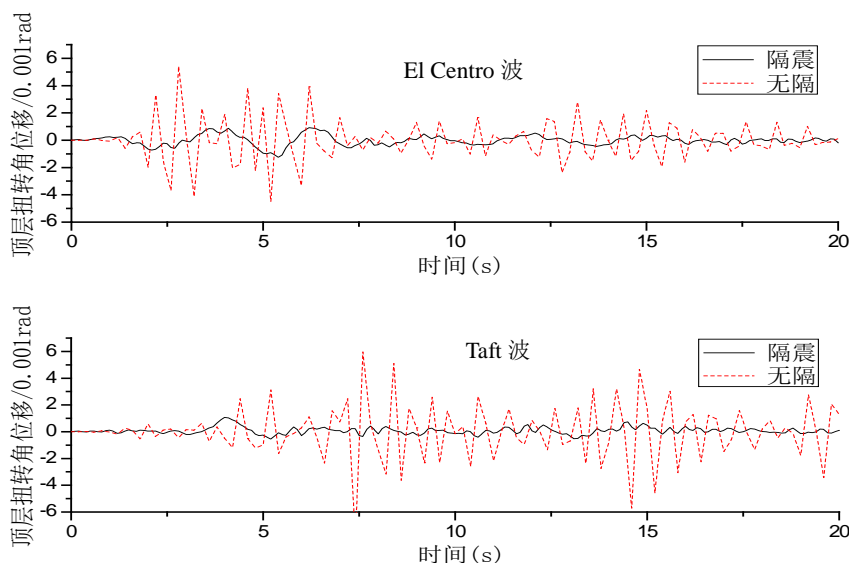


Figure 10. Torsional angular displacements of top floor under rare earthquake
图 10. 罕遇地震下顶层扭转角位移

位移和扭转角加速度。由图可知，隔震之后结构的扭转反应显著降低。通过隔震可以有效地减轻结构的扭转破坏。

4.4. 滞回参数的影响

调节滞回参数，可以得到隔震层水平滞回曲线。

通过图 12(a)可知：当参数 $A=1, \beta=0, \gamma=0, n=2$ 时，模型表现为线弹性力学性能，此时可以用于模拟普通叠层橡胶隔震支座；通过对比图 12(b)和图 12(c)可知，当参数 $\beta+\gamma=1$ 时，滞回曲线的形状、幅值均没有太大变化；对比图 12(c)和图 12(d)可知，参数 A 对滞回耗能特性有较大的影响。

5. 小结

基于 ABAQUS 软件的二次开发平台，采用 Bouc-Wen 模型描述橡胶隔震支座的水平恢复力滞回特性，

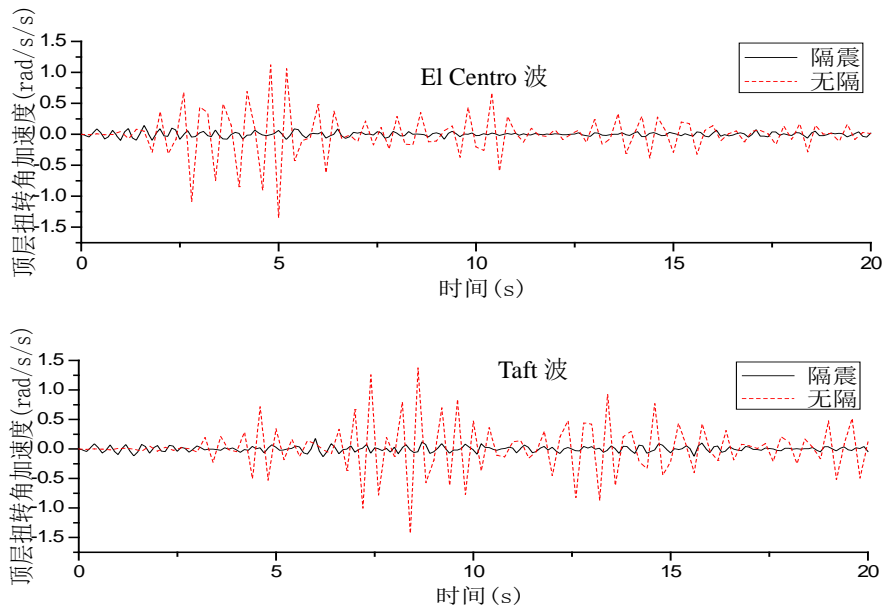


Figure 11. Torsional angular accelerations of top floor under rare earthquake
图 11. 罕遇地震下顶层扭转角加速度

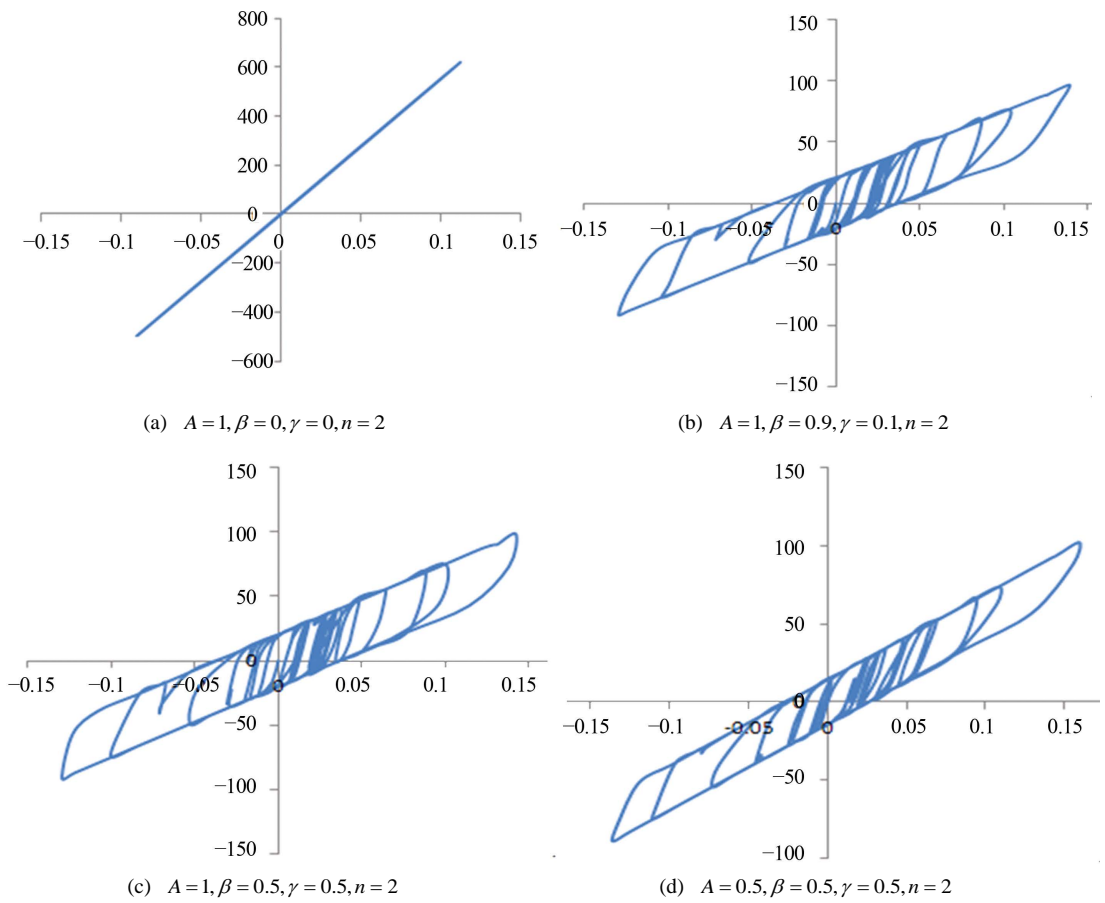


Figure 12. Horizontal restoring force curves of rubber bearing
图 12. 隔震垫水平恢复力滞回曲线

我们开发了橡胶隔震支座的用户单元子程序, 结合 ABAQUS 软件的非线性分析功能, 我们实现了对大型实际工程结构在地震作用下的非线性动力响应分析。通过对一个不规则结构的仿真算例, 探索了所开发模块的有效性, 并分析了一些参数对隔震效果的影响, 结果表明:

1) 所开发的模型可以较好地描述橡胶隔震支座的非线性滞回特性;

2) 通过合理地设置模型参数, 可以根据需要分析或设计橡胶隔震支座的非线性滞回特性, 并对实际工程结构进行地震动力响应分析;

对于不规则结构而言, 采用基础隔震还可以显著地减轻结构的扭转效应。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51178127), 国家973项目部分资助(2011CB013606)。

参考文献 (References)

- [1] 日本建筑学会, 著 (2006) 刘文光, 译. 隔震结构设计. 地震出版社, 北京.
- [2] 刘文光 (2003) 橡胶隔震支座力学性能及隔震结构的地震反应分析研究. 博士学位论文, 北京工业大学, 北京.
- [3] 唐家祥, 刘再华 (1993) 建筑结构基础隔震. 华中理工大学出版社, 武汉.
- [4] 周福霖 (1997) 工程结构减震控制. 地震出版社, 北京.
- [5] Skinner, R.I., Robinson, W.H. and Mcverry, G.H. (1996) An introduction to seismic isolation. *Geological Magazine*, **133**, 631-632.
- [6] Bouc, R. (1967) Forced vibration of mechanical systems with hysteresis. *Proceedings of Fourth Conference on Non-Linear Oscillation*, Prague, 5-9 September 1967.
- [7] Wen, Y.K. (1986) Stochastic response and damage analysis of inelastic structures. *Probabilistic Engineering Mechanics*, **1**, 49-57.
- [8] 徐赵东, 沈亚鹏 (2003) 磁流变阻尼器的计算模型及仿真分析. *建筑结构*, **1**, 68-70.
- [9] 杨广强, Spencer, B.F., Sain, M.K., 等 (2001) 足尺磁流变阻尼器的建模及动态特性. *地震工程与工程振动*, **4**, 8-23.
- [10] 关新春, 欧进萍 (2001) 磁流变耗能器的阻尼力模型及其参数确定. *振动与冲击*, **1**, 5-8.
- [11] 黄建文, 赵斌 (2000) 叠层橡胶支座基础隔震建筑的非线性时程分析. *西安科技学院学报*, **4**, 317-321.
- [12] 冷小磊, 李军强, 等 (2002) 地震激励下主次结构的非线性隔振与动力吸振分析. *西北工业大学学报*, **3**, 373-377.