

[文章编号] 1002-8412(2012)01-0047-06

考虑二阶效应串联隔震体系的塑性变形分析

杜永峰^{1,2}, 吴忠铁¹, 杨静成¹, 李 慧¹ (1. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

[提 要] 随着基础隔震技术研究的不断深入及其在我国汶川大地震中表现出的良好的减震效果,使得隔震技术在我国地震区灾后重建工程和邻近地区的新建工程中大面积开展应用。然而,实际的工程中,有关隔震结构体系仍有不少特殊的力学问题有待解决,特别是橡胶隔震支座与地下室悬臂柱组成的串联体系的塑性变形和稳定性问题,一直是工程界关注的焦点。针对这一问题,本文对不同轴力作用下串联体系塑性变形能力问题进行了研究。在考虑弯剪二阶效应下对串联隔震体系变形特性进行了理论推导,同时应用有限元分析软件 ANSYS 对给定的串联隔震体系在 8 种荷载工况下进行了模拟分析。结果表明,弯剪二阶效应对串联隔震体系的内力影响是明显的,随着轴力的增加,串联隔震体系塑性变形能力下降。

[关键词] 基础隔震; 串联隔震体系; 二阶效应; 塑性变形

[中图分类号] TU352.1 [文献标识码] A

Analysis of Plastic Deformation of Serial Isolation System Considering the Second-order Effect

Du Yong-feng^{1,2}, Wu Zhong-tie¹, Yang Jing-cheng¹, Li Hui¹ (1. Institute of Earthquake Protection And Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology Lanzhou 730050, China; 2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: With the development of the based isolation technology and its good performance during the Wenchuan earthquake, it is applied widely in the new building in the earthquake zones. However, there are some special mechanism problems on the serial isolation system in practical engineering are unsolved. Specially plastic deformation and stability of the serial isolation system, which is component of isolated rubber bearing and reinforced concrete column, are always focused by the engineer field. For this problem, the plastic deformation of the serial isolation system under the different axial force is studied. And deformation formulation of serial isolation system is derived considering the second effective of the bending and shear, meantime the given serial isolation system are analyzed by ANASYS finite element software under the 8 axial force cases. The results indicate that the second-order effect of the bending and shear is obvious for internal force of the serial isolation system and the plastic deformation reduces with the increasing of the axial force.

Keywords: base isolation; serial isolation system; second-order effect; plastic deformation

E-mail: dooyf @ lut . cn

1 引言

近年来,随着地震的频繁发生,隔震技术作为一种有效的、经济的抗震手段得到了广泛的推广和应用。隔震结构中将橡胶支座设置于地下室钢筋混凝土柱的顶部,这种由一端固定柱与叠层钢板橡胶支座组成的串联系统称为隔震串联体系。

国外对于叠层橡胶隔支座稳定性的研究相对较早,研究工作主要围绕叠层橡胶支座本身的性能展开。Haringx^[1]于 40 年代建立了隔震装置在小变形状态下的基本模型。在此基础上,Koh 和 Kelly^[2]提出了一种线性形式的非线性模型,探讨了橡胶支座轴向载荷对水平刚度的影响。Stanton 和 Roeder^[3]等人对叠层橡胶隔震支座的稳定性进行了试验研究和数值分析,并考虑了支座轴向压缩变形对稳定性的影响。Iizuka^[4]将 Koh-Kelly 模型的线性弹簧置换

[收稿日期] 2011-01-26

[基金项目] 国家自然科学基金(50778087,50978130)

为一种有限变形和非线性弹簧,建立了一种宏观力学模型,预测橡胶支座的大变形力学行为,并作了试验对比。

在国内,文献[6]给出了一端固定一端可沿水平方向自由滑动的叠层钢板橡胶支座的水平刚度和临界力计算公式。周锡元等^[5]最早对叠层橡胶隔震支座的稳定性进行了理论分析,用等效均质柱模型对比了临界荷载及水平刚度的不同公式,并基于 Haringx 和 Gent 的近似理论,给出了串联系统中橡胶支座和 RC 柱各自的水平刚度与临界力计算公式,以及整个串联系统的水平刚度计算公式^[6]。李慧等^[7]探讨了叠层橡胶支座与柱串联体系动力失稳特性,对叠层橡胶支座与地下室柱串联体系动力稳定性进行了研究。杜永峰等人^[8]对于叠层橡胶支座与 RC 柱串联隔震体系的随机屈曲进行了探讨,对串联体系的屈曲特性进行了定量分析,分别建立了分析串联隔震体系频率成份和最大层间剪力、最大隔震层位移随机响应的非线性滞变模型,分析了单柱串联体系的屈曲荷载及两种失效准则,提出了体现 II 型失稳特性主要影响因素的屈曲临界荷载均值表达式,并探讨性地分析了双向水平地震作用下串联隔震体系的振动控制问题^[10]。然而对于串联隔震体系的塑性变形问题研究较少,需要做进一步的分析研究。

本文主要针对叠层橡胶支座-钢筋砼柱串联体系在弯矩、剪力、轴力作用下考虑弯剪二阶效应时串联体系塑性变形能力问题,推导了串联体系弯剪二阶效应变形关系,并通过 ANSYS 分析模拟,对比结果得出轴力和变形之间的关系。

2 理论分析

地震作用下,串联隔震体系受竖向轴力和水平剪力作用,体系如图 1,图 2 所示。串联隔震体系总的变形为 $Y = Y_M + Y_Q$,其中 Y_M 表示串联隔震体系的弯曲变形, Y_Q 表示串联隔震体系的剪切变形。

分析时假定下端固定,上端沿三个线位移方向可以滑动但不能转动(见图 1)。不考虑偶然偏心,但考虑弯曲和剪切变形的二阶效应。

弯矩作用时,考虑二阶效应的变形方程:

$$EIY'' = M_0 - VX - PY \quad (1)$$

方程(1)的解:

$$Y_M = C_1 \sin \beta X + C_2 \cos \beta X - \frac{V}{P} X + \frac{M_0}{P} \quad (2)$$

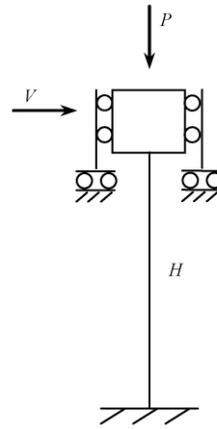


图 1 基本模型
Fig. 1 Base model

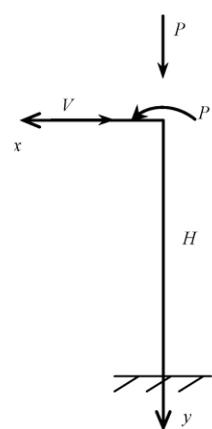


图 2 简化模型
Fig. 2 Simplified modal

令

$$\beta = \sqrt{P/EI} \quad (3)$$

剪力作用下产生的变形为:

$$\gamma_0 = \frac{dY_0}{dX} = \frac{\mu V}{AG} \quad (4)$$

考虑竖向轴力作用的二阶效应,将其等效成水平剪力产生的变形:

$$dY_p = \frac{\mu p dY_0}{AG dX} \quad (5)$$

总的剪切变形:

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_p = \frac{dY_0}{dX} + \frac{dY_p}{dX} = \frac{1}{dX} (dY_0 + dY_p) \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{dY_0}{dX} \left(1 + \frac{\mu P}{AG} \right) = \frac{1}{1 - (P/AG)} \frac{dY_0}{dX} = \frac{1}{1 - (\mu P/AG)} \frac{\mu V}{AG}$$

考虑二阶效应的剪切变形方程:

$$Y_Q = \frac{\mu V}{(AG - \mu P)} X + C_3 \quad (7)$$

由边界条件: $X = 0, Y_Q = 0$, 得到 $C_3 = 0$

串联隔震体系总的变形方程:

$$Y = C_1 \sin \beta X + C_2 \cos \beta X - \frac{V}{P} X + \frac{M_0}{P} + \frac{\mu V}{(AG - \mu P)} X \quad (8)$$

由边界条件:

$$X = 0, Y = 0, Y' = 0; X = H, Y = f, Y' = 0$$

得:

$$C_1 = -\frac{1}{\beta} \left(\frac{V}{P} - \frac{\mu V}{AG - \mu P} \right), C_2 = -\frac{M_0}{P}$$

$$M_0 = \frac{P \left(\frac{V}{P} - \frac{\mu V}{AG - \mu P} \right) (\cos \beta H + 1)}{\beta \sin \beta H}$$

考虑二阶效应串联隔震体系总的变形方程变为:

$$Y = \Psi_1 \sin \beta X + \Psi_2 \cos \beta X - \Psi_3 + \Psi_4 X \quad (9)$$

其中

$$\Psi_1 = -\frac{1}{\beta} \left(\frac{V}{P} - \frac{\mu V}{AG - \mu P} \right)$$

$$\Psi_2 = \frac{\left(\frac{V}{P} - \frac{\mu V}{AG - \mu P} \right) (\cos \beta H + 1)}{\beta \sin \beta H}$$

$$\Psi_3 = \frac{\left(\frac{V}{P} - \frac{\mu V}{AG - \mu P} \right) (\cos \beta H + 1)}{\beta \sin \beta H}$$

$$\Psi_4 = \frac{\mu V}{(AG - \mu P)} - \frac{V}{P}$$

由内力和变形之间的关系,可以得到串联隔震体系的剪力和弯矩关于 X 变化的方程式:

$$EIY'' = -M_x = M_0 - VX - PY \quad (10)$$

$$M_x = \Psi_1 \frac{\cos(\beta X - \beta H) + \cos(\beta X)}{\beta \sin(\beta H)} + \frac{\mu VP}{AG - \mu P} X \quad (11)$$

$$Q_x = \Psi_1 \frac{\cos(\beta X - \beta H) + \cos(\beta X)}{H \beta \sin(\beta H)} + \frac{\mu VP}{(AG - \mu P) H} X \quad (12)$$

根据所得串联体系考虑二阶效应的变形方程,可知在构件一定的情况下,轴力对于构件内力和变形都有影响。通过 ANSYS 模拟的结果进行比较分析,进而验证结论的正确性。

3 有限元模拟

3.1 建立模型

串联隔震体系是由叠层橡胶支座和钢筋混凝土柱串联而成,是二者共同作用的体系。由于叠层橡胶支座具有大变形的特性,橡胶材料是超弹性材料,研究其力学行为必须考虑几何非线性和材料非线性的影响;低碳钢材是很好的弹塑性材料;混凝土具有良好的抗压性能,但其抗拉性能是抗压性能的十分之一。考虑到这些特点,建立模型时钢板采用 SOLID45 单元,采用双线性模型,弹性模量 200GPa,泊松比为 0.3,屈服时弹性模量为 20GPa,屈服强度为 315MPa;橡胶采用 SOLID185 单元,橡胶的应力

-应变本构关系可由橡胶的试验数据(如单轴拉压试验、双轴拉压试验和剪切试验数据)并通过 Mooney-Rivlin 常数定义材料应变能密度而加以拟合确定(橡胶硬度为邵氏 50 度,采用二常数 Mooney-Rivlin 模型,其中 2 个常数分别为: $C_1 = 0.49\text{MPa}$, $C_2 = 0.245\text{MPa}$);混凝土采用 SOLID65 单元,C30 混凝土整体式配筋,配筋率 2.5%。该模型不但可以模拟混凝土材料特有的开裂、压碎等力学现象,而且预先定义好了混凝土的破坏准则。具体参数设置如下:混凝土的开口裂缝剪应力场地系数 0.45、闭合裂缝剪应力传递系数 0.9、轴心抗拉强度 3 以及轴心抗压强度 -1(在计算过程中不考虑混凝土的受挤压破坏)^[11]。构件基本模型如图 3 所示。

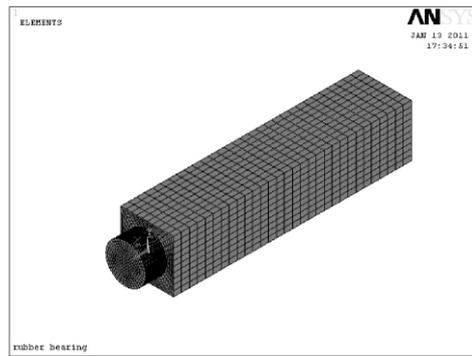


图 3 分析模型

Fig. 3 Analysis modal

3.2 模拟工况

根据以上建模方法建立不同的几何模型,串联体系模型的基本数据如表 1 所示。在上述模型上进行两方面的模拟:

表 1 分析模型

Table 1 Modal of analys

型号	D (mm)	h (mm)	T_s (mm)	N_s (层)
M300 - 1	300	162.5	2.5	17
T_r (mm)	N_r (层)	B (mm)	H (mm)	L (mm)
5	18	400	400	1800

(1) M300 橡胶支座的二阶效应分析中,荷载工况取轴力为 17MPa,大于丙类建筑 15MPa 的要求,对 M300 橡胶支座进行 ANSYS 分析。

(2) 轴向荷载对串联隔震结构的影响,即分析其它条件相同的情况下,不同的轴向荷载作用对于串联体系变形能力的影响。压力分别取 0、3、6、8、

10、12、15、17(单位为 MPa) ,作用在 M300 - 1 模型顶部 ,用 ANSYS 对这 8 种情况进行模拟 ,并对结果进行分析。

3.3 结果分析

3.3.1 橡胶支座的二阶效应

对 17MPa 轴向荷载作用下的单个橡胶支座进行 ANSYS 分析 ,由计算分析输出最后的等效应力图、竖向应力图和竖向变形图 ,分别见图 4、图 5 和图 6 所示。

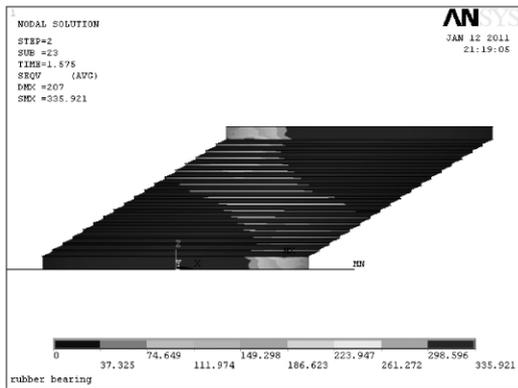


图 4 叠层橡胶支座等效应力

Fig.4 Equivalent stress of the laminated rubber bearing

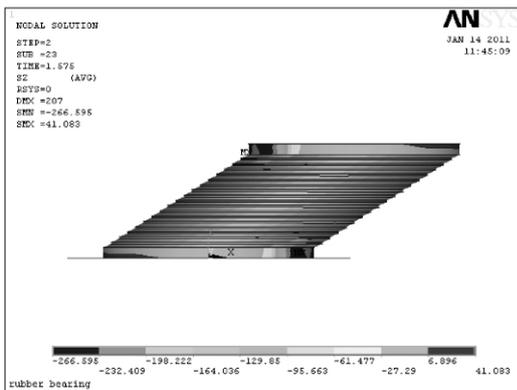


图 5 叠层橡胶支座竖向应力

Fig.5 Vertical stress of the laminated rubber bearing

由图 4 可知 ,叠层橡胶支座的等效应力主要集中在支座左上角和右下角 ,根据 von miss 准则这两处应先屈服 ,而右上角和左下角处等效应力最小 ,应力分布成对称形式。

图 5 所示的竖向应力分布情况表明: 竖向荷载主要由上下重叠部位即等效承压面承担 ,支座左上角和右下角处轴向应力较大 ,图中支座左上角下 2 层位置和右下角向上 2 层位置处出现竖向的拉应

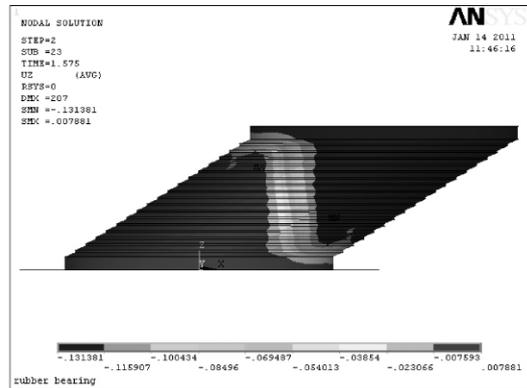
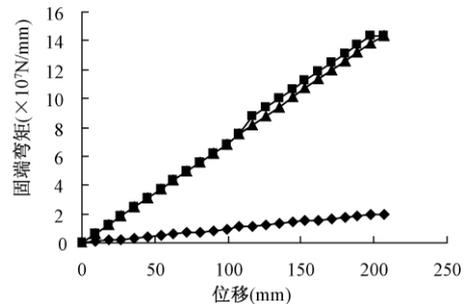


图 6 叠层橡胶支座竖向变形

Fig.6 Vertical displacement of the laminated rubber bearing



◆ 不考虑二阶效应 ■ 考虑二阶效应数值模拟
▲ 考虑二阶效应理论计算

图 7 叠层橡胶支座固端弯矩变形

Fig.7 The curve of bearing bending of the fixed end of the laminated rubber

力 ,而支座的左下角和右上角出现竖向的拉应力。

从图 6 所示的竖向变形变化云图可以看出 ,以有效承压面对角线为分界线 ,上表面及右上角的竖向向下变形较大 ,而下表面和左下角部分变形较小 ,这表明上下表面没有出现转动。根据分析结果提出固端弯矩 ,固端弯矩变化如图 7 所示 ,图 7 中曲线变化表现出非常明显的二阶效应 ,同时说明考虑二阶效应的理论值和数值模拟值较为接近 ,在计算过程中应加以考虑。

3.3.2 轴向荷载对串联体系的影响

图 8 ~ 10 分别为 0MPa、8MPa 和 17MPa 轴向荷载作用下串联体系屈服时的等效应力云图和变形图 8 种情况数值模拟后荷载与变形的规律如 11 所示 ,结果分析说明:

(1) 轴向荷载作用下叠层橡胶支座的应力集中现象出现在左上角和右下角 ,应力大小不对称 ,最大

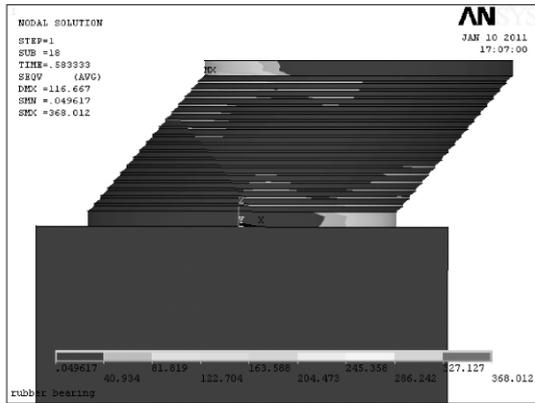


图 8 0MPa 时等效应力

Fig. 8 Equivalent stress without the press

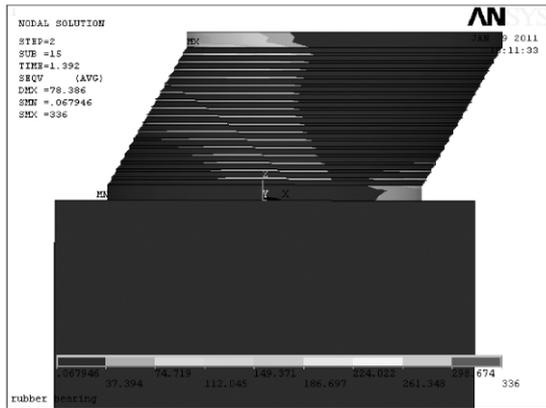


图 9 8MPa 时等效应力

Fig. 9 Equivalent stress with the 8MPa press

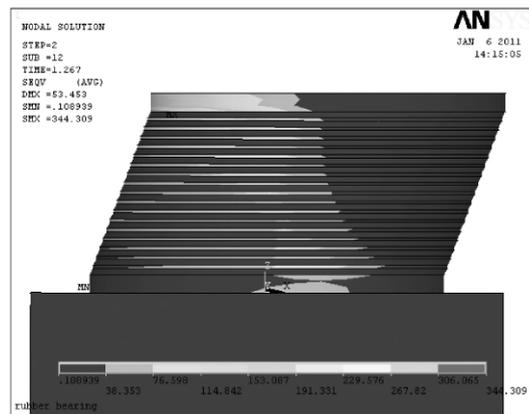


图 10 17MPa 时等效应力

Fig. 10 Equivalent stress with the 17MPa press

值出现在橡胶支座的左上角,而右下角应力相对较小。

(2) 串联体系的变形主要集中在橡胶支座上,

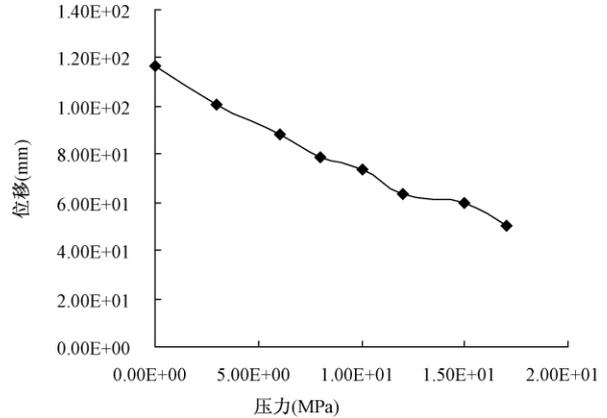


图 11 压力与位移关系曲线

Fig. 11 The related curve of the displacement and the press

而钢筋混凝土柱变形很小。

(3) 8 种工况作用下荷载与变形的规律如图 11 所示,变形随着轴向荷载的增加逐渐的下降,且变形能力逐渐降低。

(4) 17MPa 下单个叠层橡胶支座以及串联体系 ANSYS 分析结果表明,在相同的轴力作用下单个橡胶支座变形达到 200mm 时构件局部进入屈服,而串联体系达到 54mm 时局部进入屈服,显然单个支座的变形能力比串联体系的变形能力更强。

(5) 单个叠层橡胶支座和串联体系相同屈服的部位在支座的左上角,单个橡胶支座右下角先于串联柱顶进入屈服阶段。

4 结论

本文通过对叠层橡胶支座-钢筋混凝土柱串联隔震体系在弯矩、剪力、轴力作用下考虑弯剪二阶效应时串联体系变形能力问题的探讨,推导了串联体系弯剪二阶效应变形方程,说明二阶效应对单个支座和串联体系的变形有较大影响。并应用 ANSYS 软件对不同轴力值作用下的串联体系进行了模拟,通过分析得出以下结论:

(1) 二阶效应对隔震支座的变形和屈曲影响很大,计算分析时应给予考虑。

(2) 在弯矩、剪力、轴力作用下,单个支座和串联体系的屈服应力主要集中在橡胶支座的对角线上,最大压应力出现在橡胶支座的左上端,最大拉应力出现在右下端。

(3) 串联隔震体系的变形能力随着轴力的增大而下降。

(4) 随着橡胶支座位移增大,地下室钢筋混凝土柱端产生转角,从而使隔震橡胶支座下部受拉。

参考文献(References):

- [1] Haringx J A. "On Highly Compressible Helical Springs and Rubber Rods and Their Application for Vibration-free Mountings(I)". Philips Res. Rep., 1948, 3, 401 ~ 449
- [2] Koh C G and Kelly J M. "Effects of Axial Load on Elastomeric Bearings". UCB/EERC-86/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1986
- [3] Stanton J F, Scroggins G, Taylor A W and Roeder C W. Stability of Laminated Elastomeric Bearings [J]. J. Engrg. Mech., ASCE, 1990, 116(6): 1351 ~ 1371
- [4] Masao Iizuka. A Macroscopic Model for Predicting Large-deformation Behaviors of Laminated Rubber Bearing [J]. Engineering Structures, 2000, 22: 323 ~ 334
- [5] 日本建筑学会,刘文光译. 隔震结构设计[M]. 北京:地震出版社, 2006
Architecture Institute of Japan (Liu Wen-guang translation). Isolated Structure Design [M]. Beijing: Seismic Press, 2006 (in Chinese)
- [6] 周锡元,韩淼,等. 叠层钢板橡胶垫的稳定性分析与强度验算[J]. 建筑科学, 1997; (6): 13 ~ 19
Zhou Xi-yuan, Han Miao, et al. Stability Analysis and Strength Checking of Laminated Rubber Bearing [J]. Building Science, 1997, (6): 13 ~ 19 (in Chinese)
- [7] 周锡元,韩淼. 橡胶支座与R/C柱串联隔震系统水平刚度系数[J]. 振动工程学报, 1999, 12(2): 159 ~ 165
Zhou Xi-yuan, Han Miao. Horizontal Rigidity Coefficient of the Serial System of Rubber Bearing with Column, Journal of Vibration Engineering, 1999, 12(2): 159 ~ 165 (in Chinese)
- [8] 李慧,姚云龙,杜永峰. 叠层橡胶支座与柱串联系动力失稳特性探讨[J]. 世界地震工程, 2005, 21(1): 18 ~ 21
Li Hui, Yao Yun-long, Du Yong-feng. Rubber Bearing Tandem Column System with the Characteristics of Dynamic Instability [J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(1): 18 ~ 23 (in Chinese)
- [9] 杜永峰,李慧. 叠层橡胶垫与RC柱串联隔震体系的随机屈曲分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30, 16 ~ 21
Du Yong-feng, Li Hui. Study on Random Buckling of the Rubber Bearing Tandem Column System [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30: 16 ~ 21 (in Chinese)
- [10] 杜永峰,林治丹. 双向水平地震作用下串联隔震体系的振动控制[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(4): 32 ~ 37
Du Yong-feng, Lin Zhi-dan. Vibration Control for Serially Connected Isolated Structures Subject to Two-directional Horizontal Earthquake [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(4): 32 ~ 37
- [11] 杜永峰,杨静成,等. 串联隔震体系静力性能有限元分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(4): 26 ~ 31
Du Yong-feng, Yang Jing-cheng. Finite-element Analyze Performance of Series Seismic Isolation System [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(4): 26 ~ 31

[作者简介] 杜永峰(1962~),男,博士,教授、博导,主要从事结构工程及防灾减灾等方面研究