DOI:10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2007.03.035
第19卷 第3期 甘肃科学学报 Vol.19 No.3
2007年9月 Journal of Gansu Sciences Sep.2007

非比例阻尼隔震结构平扭耦联地震反应分析

李 慧[1]，沈金生[1]，杜永峰[1]，卢海涛[2]
(1.兰州理工大学 防震减灾研究所，甘肃 兰州 730050；2.甘肃省城乡建设规划设计院，甘肃 兰州 730000)

摘 要： 根据非比例阻尼隔震结构的动力特性，提出了非比例阻尼隔震结构平扭耦联振动的运动方程.分析了地震作用下，非比例阻尼隔震结构平扭耦联振动反应，并讨论了隔震层和上部结构的偏心及质量偏心对结构动力响应的影响.

关键词： 基础隔震；非比例阻尼；扭转震动
中图分类号： TU352.1+2 **文献标识码：** A **文章编号：** 1004-0366(2007)03-0120-03

Analysis of Torsional Vibration in Non-Proportionally Damped Isolation Structures

LI Hui[1], SHEN Jin-sheng[1], DU Yong-feng[1], LU Hai-tao[2]
(1.*Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou* 730050, *China*; 2.*Institute of Urban and Rural Construction and Planning of Gansu Province, Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: According to the dynamic features of isolation structures, the motion equation of torsional vibration in non-proportionally damped isolation structures is presented. The torsional vibration in these structures is analyzed, and the influences of the eccentricity of the system and super-structure on dynamic response are also discussed.

Key words: isolation structure; non-proportional damping; torsional vibration

在对建筑结构地震响应研究时，为了简便，通常忽略质量中心和刚度中心不重合的刚度偏心影响，然而刚度偏心引起的结构平动和扭转的耦联振动将导致部分角柱和边柱的内力及变形超过其允许范围，使整个结构局部产生应力集中而破坏[1~4].结构设置隔震装置后，不但可以明显减小平动时的地震响应，还能有效地降低扭转效应[5,6].同时，隔震层与上部结构的阻尼特性截然不同，因此整个隔震建筑组成一个典型的非比例阻尼体系，这使得结构的动力响应分析具有相当的难度，国内外学者也将其作为一个特殊的课题加以研究[7~9].以下根据隔震结构的动力特性，提出非比例阻尼隔震结构平扭耦联振动的运动方程，并对隔震层和上部结构的偏心对整个隔震结构的动力反应进行了分析研究.

1 结构平扭耦联运动方程

1.1 基本假定[4~6]

(1) 只考虑由建筑物的偏心引起的扭转振动，忽略地震动的扭转分量；(2) 楼面是刚性的，整个建筑可简化为层间剪切模型；(3) 忽略结构中各个构件自身的扭转刚度.

1.2 运动方程的建立

以单轴偏心为研究对象，地震沿 x 方向作用，偏心沿 y 方向.以各层的质量中心为坐标原点.结构的运动方程为

$$\begin{bmatrix}[m] & 0\\ 0 & [J]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}x\\ \theta\end{Bmatrix}+[C]\begin{Bmatrix}x\\ \theta\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}[K_{xx}] & [K_{x\theta}]\\ [K_{\theta x}] & [K_{\theta\theta}]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}x\\ \theta\end{Bmatrix}=-\begin{bmatrix}[m] & 0\\ 0 & [J]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\delta\\ 0\end{Bmatrix}u_g,$$

其中 $[m]=\begin{bmatrix}m_1 & & \\ & \ddots & \\ & & m_n\end{bmatrix}$ 为质量矩阵，$[J]=\begin{bmatrix}J_1 & & \\ & \ddots & \\ & & J_n\end{bmatrix}$ 为回转惯量矩阵，$[K_{xx}]$，$[K_{x\theta}]=[K_{\theta x}]^T$，$[K_{\theta\theta}]$分别是平动刚度、平扭耦联刚度、扭转

收稿日期：2006-10-16
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50548016)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

刚度矩阵,均是三对角元素矩阵.平动刚度矩阵三对角元素:

$(k_{i,i})_{xx}=k_i+k_{i+1}$, $(k_{i+1,i})_{xx}=-k_{i+1}$,

$(k_{i,i+1})_{xx}=-k_{i+1}$,

平扭耦联刚度三对角元素:

$(k_{i,i})_{x\theta}=k_ie_i+k_{i+1}(e_{i+1}-e_{i+1})$,

$(k_{i+1,i})_{x\theta}=-k_{i+1}(e_{i+1}-e_{i+1})$, $(k_{i,i+1})_{x\theta}=-k_{i+1}e_{i+1}$,

扭转刚度矩阵三对角元素:

$(k_{i,i})_{\theta\theta}=k_{\theta i}+k_{\theta i+1}+k_{i+1}e_{i+1}(e_{i+1}-2e_{i+1})$,

$(k_{i+1,i})_{\theta\theta}=k_{\theta i+1}+k_{i+1}e_{i+1}e_{i+1}$,

$(k_{i,i+1})_{\theta\theta}=-k_{\theta i+1}+k_{i+1}e_{i+1}e_{i+1}$,

其中 $k_{\theta i}=R_i+k_ie_i^2$.

k_i 为第 i 层的剪切刚度;$k_{\theta i}$为第 i 层绕质心的扭转刚度;R_i 为第 i 层绕刚心的扭转刚度;e_i 为第 i 层偏心距;e_i 为第 i 层质心相对于第 $i-1$ 层质心的坐标.

$r_i=\sqrt{R_i/k_i}$为回转半径;$e_i'=e_i/r_i$ 为偏心比;$r_i\theta/x_i$ 为扭转半径比,是判定结构整体扭转的重要指标.

1.3　阻尼矩阵的处理

采用分区瑞利阻尼模型,阻尼矩阵可分解为

$[C]=[C_0]+[C_r]$,　$[C_0]=\alpha_s[M]+\beta_s[K]$,

$(C_{1,1})_r=C_{brx}=\alpha_{bx}m_1+\beta_{bx}(k_{1,1})_{xx}$,

$(C_{n+1,n+1})_r=C_{br\theta}=\alpha_{b\theta}J_1+\beta_{b\theta}(k_{1,1})_{\theta\theta}$,

$[C]$的其他元素为 0,n 为结构层数.$[C_0]$代表经典瑞利阻尼矩阵,$[C_r]$非比例阻尼的余项阻尼矩阵.α_s、β_s 为上部结构瑞利阻尼比利系数,α_{bx}、β_{bx}为隔震层平动瑞利阻尼比利系数,$\alpha_{b\theta}$、$\beta_{b\theta}$为隔震层扭转瑞利阻尼比利系数.

$$\begin{Bmatrix}\alpha_s\\ \beta_s\end{Bmatrix}=\frac{2\xi_s}{\omega_1+\omega_2}\begin{Bmatrix}\omega_1\omega_2\\ 1\end{Bmatrix},\quad \begin{Bmatrix}\alpha_{bx}\\ \beta_{bx}\end{Bmatrix}=\frac{2\xi_{bx}}{\omega_1+\omega_2}\begin{Bmatrix}\omega_1\omega_2\\ 1\end{Bmatrix},$$

$$\begin{Bmatrix}\alpha_{b\theta}\\ \beta_{b\theta}\end{Bmatrix}=\frac{2\xi_{b\theta}}{\omega_1+\omega_2}\begin{Bmatrix}\omega_1\omega_2\\ 1\end{Bmatrix},$$

ξ_s是上部结构的阻尼比,ξ_{bx},$\xi_{b\theta}$分别是隔震层平动和扭转阻尼比:$\xi_{bx}=\dfrac{\sum k_{bj}\xi_j}{\sum k_{bj}}$, $\xi_{b\theta}=\dfrac{\sum k_{bj}(x_j^2+y_j^2)\xi_j}{\sum k_{bj}y_i^2}$,

2　算例分析

以一栋上部结构为 2 层的隔震建筑为例来研究上部结构、隔震层的刚度偏心和质量偏心对整个建筑的影响.结构参数见表 1.

表 1　非比例阻尼隔震结构的参数

层号	质量/kg	转动惯量 /kg·m^{-2}	水平刚度 /N·m^{-1}	扭转刚度 /N·m^{-1}
隔震层	742 700	7.313 7e+007	2.646 0e+07	3.583 4e+9
1	788 500	7.764 8e+007	4.119 7e+08	5.712 0e+10
2	788 500	7.764 8e+007	4.119 7e+08	5.712 0e+10

结构的阻尼比:上部结构 ξ_s 为 0.05,隔震层的水平阻尼比 ξ_{bx}为 0.15,扭转阻尼比 $\xi_{b\theta}$为 0.15.采用时程分析法,选用 EL-Centro(NS,1940) 地震波,加速度峰值调幅至 3.924 m/s^2,相当于 8 度区大震情况下的地面加速度.

2.1　刚度偏心对隔震建筑地震响应的影响

上部结构的偏心率 e_s 分别取 0.1、0.3、0.5.随隔震层偏心率 e_b 变化隔震建筑的地震响应计算结果如图 1 所示.

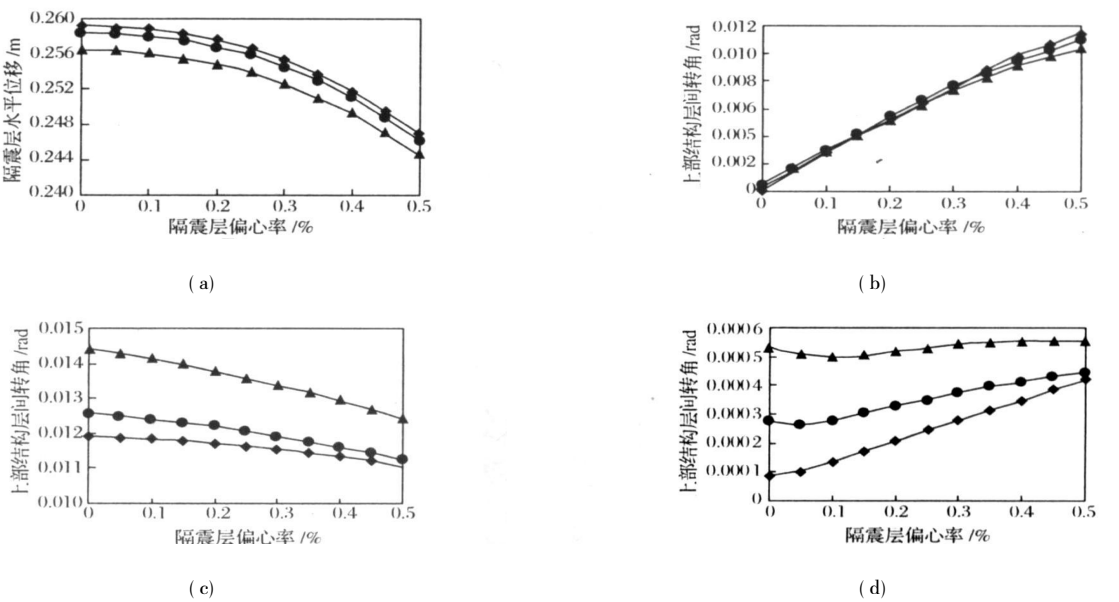

图 1　地震响应随偏心变化曲线

◆ $e_s=0.1$　● $e_s=0.3$　▲ $e_s=0.5$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由图(1a)可知,随隔震层偏心率和上部结构偏心率的增大,隔震层的水平位移减小,但两者引起的隔震层的水平位移变化并不显著.

由图(1b)可知,随着隔震层偏心率的增大,隔震层的扭转显著增大;上部结构的偏心率的变化对隔震层的扭转影响不明显.

由图(1c)可知,随隔震层偏心率的增大,上部结构层间水平位移减小,但并不显著;随上部结构的偏心率的增大,上部结构层间水平位移增加.

由图(1d)可知,随隔震层偏心率和上部结构的偏心率的增大,上部结构层间转角显著增大.

2.2 质量偏心对隔震建筑整体扭转的影响

上部结构的偏心率取0.3,质量偏心距 e_z 分别为0、2 m、4 m,用结构顶层的扭转变形比来判别隔震建筑整体扭转的影响,计算结果如下图2所示.

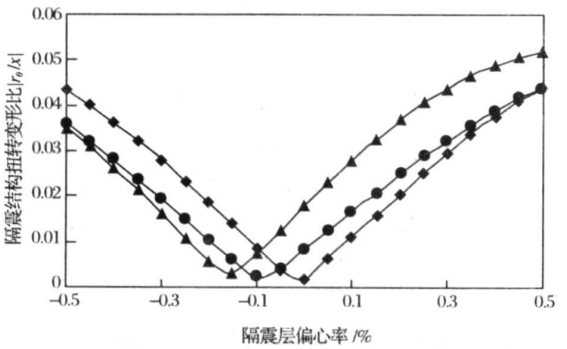

图2 地震反应随隔震层偏心和质量偏心变化曲线

◆ $e_z=0$ m ● $e_z=2$ m ▲ $e_z=4$ m

由图2可知,随隔震层偏心率的变化对建筑的整体扭转变形有显著影响,隔震层的刚心向上部结构的质量中心移动,能够抑制隔震建筑的整体扭转变形,减小质量偏心对结构的扭转影响.

3 结论

根据隔震结构的动力特性,建立了非比例阻尼隔震建筑平扭偶联的简化模型和运动方程,在此基础上,研究了隔震建筑的刚度偏心和质量偏心变化对隔震建筑地震响应的影响,结论如下:

(1) 随隔震层偏心率增大,隔震层的水平位移的变化不明显,而隔震层的转角增大显著.

(2) 随上部结构偏心率增大,隔震层的水平位移和转角的变化并不明显.

(3) 随隔震层偏心率增大,上部结构层间水平位移的变化不明显,而上部结构层间转角增大显著.

(4) 随上部结构偏心率增大,上部结构层间水平位移的增大,上部结构层间转角显著增大.

(5) 隔震层的刚心向上部结构的质量中心偏移,能够抑制隔震建筑的整体扭转变形,减小质量偏心对结构的扭转影响.

参考文献:

[1] Nagarajaiah S, Rein born A M, Constantionou M C. Nonlinear Dynamic Analysis 3-D Base Isolated Structures[J]. Journal of structural Engineering, ASCF 1991, 117: 2035-2054.

[2] 李杰,李国强.地震工程学导论[M].北京:地震工程出版社,1992.

[3] 日本土木学会编.地震反应分析及实例[M].北京:地震工程出版社,1983.

[4] 李宏男.结构多维抗震理论与设计方法[M].北京:科学出版社,1998.

[5] 李宏男,吴香香.偏心隔震结构扭转地震作用的简化计算公式[J].哈尔滨工业大学学报,2004,36(1):52-54.

[6] 向伟明,李向真.考虑扭转偶联隔震结构简化体系的地震时程反应分析及有关参数的影响[J].工程抗震与加固改造,2004,12:15-19.

[7] 杜永峰,杜小妮,赵国藩.用拉普拉斯变换方法求解非比例阻尼隔震结构[J].兰州大学学报(自然科学版),2000,36(11):40-45.

[8] Yongfeng Du, Hui Li, Billie F, *et al*. Effect of Non-proportional Damping on Seismic Isolation [J]. Journal of Structural Control, 2002, 9: 205-236.

[9] 杜永峰,赵国藩.隔震结构中非经典阻尼影响及最佳阻尼比分析[J].地震工程与工程振动,2000,20(3):100-107.

[10] 王常峰,陈兴冲.白沙河特大桥抗震性能研究[J].甘肃科学学报,2007,19(2):144-146.

作者简介:

李 慧,(1954-)女,陕西省人,1992年毕业于兰州理工大学结构工程专业,获硕士学位,现任兰州理工大学土木工程学院教授,博士生导师,主要从事教学及结构工程、防震减灾的研究.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net