

刘德稳,招继炳,盛冬发,等. 基于 Rayleigh 阻尼模型的层间隔震结构上下部选择[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2022, 37(1):27-34. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.005

LIU D W,ZHAO J B,SHENG D F, et al. Research Model Selection of Mid-story Isolated Structure Based on Rayleigh Damping[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(1):27-34. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.005

基于 Rayleigh 阻尼模型的层间隔震结构上下部选择

刘德稳^{1,2*}, 招继炳¹, 盛冬发¹, 周旺旺¹, Kaiming Bi³

(1.西南林业大学 土木工程学院,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. College of Civil Engineering, Curtin University, Perth, Western Australia, Australia)

摘要:建立了层间隔震结构的多质点系简化模型及结构动力方程,采用 Newmark 时程分析法,利用 MTALAB 对层间隔震结构上下部结构采用 Rayleigh 阻尼模型时的不同参数取值方法进行研究.结果表明:采用不同振型阻尼比时,层间变形差异较小,但加速度响应特别是下部结构的加速度响应差异较大,取振型阻尼比 ξ 数值为 1% 时计算偏于安全;采用不同振型频率时,第 2 阶和第 3 阶 2 种情况的层间变形和加速度响应差别较小,取第 3 阶的情况下地震响应要大于取第 2 阶的情况,在实际工程中按第 3 阶取值时计算偏于安全;采用刚度相关型和 Rayleigh 型 2 种情况的层间变形和加速度响应差别较小,采用质量相关型加速度地震响应较大,在实际工程中采用质量相关型计算时偏于安全.

关键词:层间隔震;多质点模型;Rayleigh 阻尼;参数分析

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)03-0027-08

Research Model Selection of Mid-story Isolated Structure Based on Rayleigh Damping

LIU Dewen^{1,2}, ZHAO Jibing¹, SHENG Dongfa¹, ZHOU Wangwang¹, Kaiming Bi³

(1. College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650000, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Resistance and Absorption Engineering & Structure Safety of Ministry of Education, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;

3. College of Civil Engineering, Curtin University, Perth, Western Australia, Australia)

Abstract: Multi-particles simplified model of inter-story isolated structure is constructed so as to analyze the taking values methods for different parameters when upper-lower structure of inter-story isolated structure adopts the Rayleigh damping mode. Result shows that when different model-damping ratios are utilized, the inter-story deformations differ slightly, but the acceleration responses are quite different, especially in the lower structure. When model-damping ratio is set as 1%, the calculation will be simply safe; if the structures are adopted with the 2nd order and the 3rd order, the differences of inter-story deformations and acceleration responses are small. The seismic response generated from the 3rd order is larger than the 2nd order, which means if the value is taken based on the 3rd order in practical engineering, the calculation would be safer; and if stiffness-related model and

收稿日期:2018-03-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52168072;51808467);云南省“万人计划”高层次人才支持项目资助(2020)

*通信作者,E-mail: civil_liudewen@ sina.com

Rayleigh model are used respectively, the inter-story deformations and acceleration responses show small difference. However, when quality-related model is used, the seismic responses of accelerations are more violent. That is to say, in practical engineering, it is safer when the quality-related model is used to calculate the seismic responses of inter-story isolated structure.

Keywords: inter-isolated structure; multi-particles model; Rayleigh damping; parameters analysis

层间隔震结构是一种在基础隔震结构基础上发展而来的复杂结构体系,其隔震层设在结构上部某层,这种新颖的结构形式已经逐步在实际工程中得到应用,如美国旧金山 185Berry Street 采用层间隔震技术进行了加层加固、14 层的日本饭田桥第一建筑在第 9 层设置了隔震层、25 层的日本汐留住友建设在 12 层设置隔震层^[1-2].

小林正人等^[3]利用以振型扫描的方法分析层间隔震体系的模态连成作用;Shirayama 等^[4]以一幢 12 层的钢筋混凝土框架结构为对象,研究隔震装置的塑性性态与隔震效果的关系;Teramoto 和 Ohmiya 等^[5]用等效剪切型集中质量模型,分析一座 10 层型钢混凝土房屋在人工地震波作用下的弹性和弹塑性动力反应;Villaverde R 等^[6]将屋顶隔震系统安装在一个地上 13 层、地下 2 层的钢筋混凝土结构上,并给出了实施细节和计算结果;片山贵裕等^[7]对 1966 年修建的一幢政府大楼用中间层隔震方法进行了抗震加固改造;Ryan 等^[9]比较了不同隔震层位置及隔震层参数时层间隔震的隔震效率.Wang 等^[10-11]对层间隔震结构三质点简化模型、下部结构模态贡献等问题进行了研究;祁皓等^[12-13]初步探讨了层间隔震的工作原理及考虑参数优化的层间隔震试验研究;周福霖、谭平、金建敏等^[14-16]进行了层间隔震减震机理、随机振动响应、近断层地震响应控制及附加阻尼器结构振动台试验系统研究.

在阻尼理论问题中应用最多的是 Rayleigh 的研究成果,他认为阻尼结构的阻尼矩阵与质量和刚度矩阵的线性组合成比例,这种阻尼理论被称为 Rayleigh 阻尼或比例阻尼理论.

Rayleigh 阻尼矩阵 C 表达式为

$$C = a_0 M + a_1 K. \quad (1)$$

式中: M, K 为质量矩阵和刚度矩阵; a_0, a_1 为质量比例系数和刚度比例系数,表达为

$$a_0 = \frac{2\xi\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j}; \quad (2)$$

$$a_1 = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j}. \quad (3)$$

式中: ω_i, ω_j 为系统的第 i 和第 j 阶振型圆频率; ξ 为振型阻尼比.当 $a_0 = 0$ 时, Rayleigh 阻尼变换为刚度相关性阻尼矩阵,当 $a_1 = 0$ 时则为质量相关性阻尼矩阵.不满足 Rayleigh 阻尼假定的一般线性振动系统则称为非比例阻尼或非经典阻尼系统.

层间隔震结构的隔震层是集中阻尼,而上部结构和下部结构是分布阻尼,两者阻尼相差悬殊,共同组成了非比例阻尼形式.非比例阻尼系统在地震作用下的响应最直接的方法是直接积分法,但在处理上部结构和下部结构阻尼矩阵时如果采用 Rayleigh 阻尼,则需要面临以下问题:(1)选择何种阻尼形式?选择 Rayleigh 阻尼时选用刚度相关性还是质量相关性?(2)基于哪几阶振型选取 ω_i, ω_j ? (3)振型阻尼比 ξ 如何取值?

上、下部结构的阻尼矩阵 $[C_i], [C_d]$ 的确定对结构地震响应有直接影响,基于此,本文对层间隔震结构的阻尼模型的取值方法进行分析.

1 层间隔震结构多质点模型

多质点模型也称糖葫芦串模型,是将结构体系简化为层间剪切模型,采用弹簧连接层与层形成多个质点串联形式.这种模型可以表征结构的动力特性和宏观地震响应,由于其概念明确、简单适用而被许多学者采用,有些情况下其计算的精度能与真实三维结构媲美.弹簧振子的模型参数决定了结构的动力特性,可以考虑水平、竖向及弯曲变形特性,但因为橡胶隔震支座隔震装置的竖向刚度远远大于其水平刚度,所

以,在进行动力分析时,可以近似认为隔震结构只作平动,而忽略其竖向变形引起的摆动效应.本文建立的多质点模型简化示意图如图1所示,用楼层的等效剪切刚度作为竖杆的层刚度,并将全部恒荷载和活荷载按一定比例组合后集中于各层楼盖处作为一个质点,从而形成层间剪切模型.本文的基本假定:

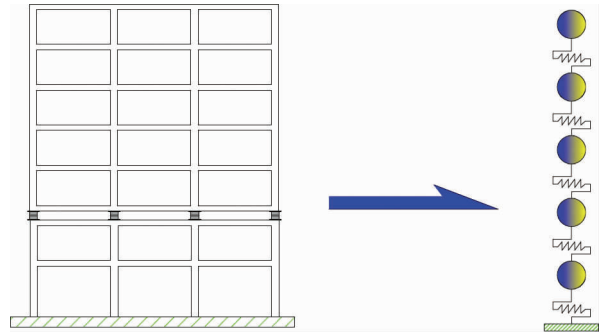


图1 层间隔震多质点计算模型

- 1) 楼盖在其自身平面内刚度为无穷大,不考虑楼板的平面弯曲变形;
- 2) 结构中水平杆件的刚度为无穷大,不产生竖向剪弯变形;
- 3) 不考虑结构的偏心影响及扭转影响;
- 4) 在振动过程中上下部结构均处于弹性阶段;
- 5) 不考虑竖向地震动及扭转地震动分量.

2 动力方程的建立

为讨论阻尼矩阵的模型取值方法,将层间隔震结构的隔震层、上下部结构分别建立阻尼矩阵,这3部分的受力明显不同,上部结构类似于基础隔震体系的上部结构,而下部结构除受地震作用外还受到上部结构和隔震层惯性力的作用,因此,应分别建立运动方程.以图1为研究对象来建立动力方程,假设 $\{u_s\}$, $\{u_d\}$ 为上部结构相对于隔震层的位移、下部结构相对于地面的位移, u_b 为隔震层的水平变形.

上部结构的运动方程:

$$[M_s] \{\ddot{u}_s\} + [C_s] \{\dot{u}_s\} + [K_s] \{u_s\} = - [M_s] \{I\} \{\ddot{u}_b + \{R\} [\{\ddot{u}_s\} + \{I_1\} \ddot{u}_g]\}. \quad (4)$$

中间隔震层的运动方程:

$$m_b \ddot{u}_b + c_b \dot{u}_b + k_b u_b = - \{I\}^T [M_s] \{I\} [\ddot{u}_b + \{R\} (\{\ddot{u}_d\} + \{I_1\} \ddot{u}_g)] + \{\ddot{u}_s\} - m_b \{R\} (\{\ddot{u}_s\} + \{I_1\} \ddot{u}_g). \quad (5)$$

下部结构的运动方程:

$$[M_d] \{\ddot{u}_d\} + [C_d] \{\dot{u}_d\} + [K_d] \{u_d\} = - [M_d] \{I_1\} u_g - \{R\}^T \{(\{I\}^T [M_s] \{I\} + m_b) [\ddot{u}_b + \{R\} (\{\ddot{u}_d\} + \{I_1\} \ddot{u}_g)] + \{I\}^T [M_s] \{\ddot{u}_s\}\}. \quad (6)$$

式中: $[M_s]$, $[M_d]$ 为上、下部结构的质量矩阵; $[K_s]$, $[K_d]$ 为上、下部结构的刚度矩阵; $[C_s]$, $[C_d]$ 为上、下部结构的阻尼矩阵; m_b, k_b, c_b 分别为隔震层的质量、刚度及阻尼系数. $\{R\} = \{0 \ 0 \ \dots \ 1\}$.

将式(2)~式(4)表达成向量式为

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = M\ddot{U}_g. \quad (7)$$

式中:

$$M = \begin{bmatrix} [M_d] + \{R\}^T (\{I\}^T [M_s] \{I\}) \{R\} & \{R\}^T (\{I\}^T [M_s] \{I\} + m_b) & \{R\}^T \{I\}^T [M_s] \\ \{I\}^T [M_s] \{I\} \{R\} + m_b \{R\} & \{I\}^T [M_s] \{I\} + m_b & \{I\}^T [M_s] \\ [M_s] \{I\} \{R\} & [M_s] \{I\} & [M_s] \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} [C_s] & & \\ & c_b & \\ & & [C_d] \end{bmatrix};$$

$$K = \begin{bmatrix} [K_s] & & \\ & k_b & \\ & & [K_d] \end{bmatrix}.$$

位移、速度及加速度矩阵分别为

$$U = \begin{bmatrix} \{u_s\} \\ u_b \\ \{u_d\} \end{bmatrix}, \dot{U} = \begin{bmatrix} \dot{\{u_s\}} \\ \dot{u}_b \\ \dot{\{u_d\}} \end{bmatrix}, \ddot{U} = \begin{bmatrix} \ddot{\{u_s\}} \\ \ddot{u}_b \\ \ddot{\{u_d\}} \end{bmatrix}.$$

3 动力参数选取

3.1 计算模型参数

某层间隔震结构共 10 层,其中隔震层布置在 5 层顶.模型结构参数见表 1.

表 1 层间隔震结构模型参数

楼层	质量/t	刚度/(kN/mm)
10	1 244.6	3 920.0
9	1 244.6	3 920.0
8	1 244.6	3 920.0
7	1 244.6	3 920.0
6	1 244.6	3 920.0
隔震层	66.6	74.2
5	1 244.6	3 920.0
4	1 244.6	3 920.0
3	1 244.6	3 920.0
2	1 244.6	3 920.0
1	1 244.6	3 920.0

上、下部结构的阻尼矩阵 $[C_s]$ 、 $[C_d]$ 表达式为

$$[C_s] = a_{0s}[M_s] + a_{1s}[K_s]; \quad (8)$$

$$[C_d] = a_{0d}[M_d] + a_{1d}[K_d]. \quad (9)$$

式中: a_{0s}, a_{1s} 为上部结构的质量比例系数和刚度比例系数; a_{0d}, a_{1d} 为下部结构的质量比例系数和刚度比例系数.当 $a_{0s} = 0$ 时, Rayleigh 阻尼变换为刚度相关性阻尼矩阵,当 $a_{1s} = 0$ 时则为质量相关型阻尼矩阵.为简化分析,取上下部结构振型阻尼比数值相同.

3.2 地震波选取

本文选取的地震波包含 4 条使用较广泛的天然地震波,分别是 El Centro NS 地震波(1940 Imperial Valley 地震)、Hachinohe EW 地震波(1968 Tokachi-oki 地震)、Taft NS 地震波(1952 Kern County 地震)和 Tianjin EW 地震波(1974 唐山地震).地震波的基本信息见表 2.

表 2 地震波信息表

序号	记录名称	方向	持时/s	记录间隔/%	峰值加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	峰值速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	El Centro, 1940	ELCN180A(NS)	53	0.02	341.695	-33.0
		ELCN270A(EW)			210.142	-35.2
		ELCNVTA			-206.347	16.78
2	Taft, 1952	TFTN21EA(NS)	54	0.02	1 527.000	132.8
		TFTS69EA(EW)			1 759.000	171.3
		TFTVERTA			1 029.000	73.1
3	天津波, 1976	TJWEA	19	0.01	104.180	20.0
		TJSNA			145.805	26.6
		TJVTA			73.140	4.4
4	Hachinohe, 1995	Hax	65	0.01	229.000	36.2
		Hay			179.800	41.2
		Haz			112.700	17.5

4 上、下部子结构 Rayleigh 阻尼影响评价

分别建立质量相关型、刚度相关型阻尼模型和 Rayleigh 阻尼模型 3 种分析工况进行计算,阻尼比 ξ 取 1%, 2%, 3%, 4% 及 5% 等 5 种情况. 计算采用 Newmark 时程分析法计算. 均按 8 度罕遇地震进行计算.

4.1 不同振型阻尼比时层间隔震地震响应比较

图 2~图 5 为不同振型阻尼比时层间隔震结构在 El Centro NS 地震波、Hachinohe 地震波、Taft 地震波和 Tianjin 地震波等 4 条地震波作用下各层层间位移和加速度响应比较. 由图 2~图 5 知: 在 4 条地震波作用下, 采用不同振型阻尼比时层间变形差异较小, 结构最大层间位移为 0.015 m, 隔震层最大位移为 0.220 m, 均满足规范要求. 但加速度响应差别特别是下部结构的加速度响应差异较大, 出现差异的楼层和数值大小也与地震波特性相关, El Centro NS 地震波下振型阻尼比 ξ 数值为 5% 的数值与取 1% 时的最大差别可达 23.9% 以上, Hachinohe 地震波下差别则为 28.13%, 取振型阻尼比 ξ 数值为 1% 时计算偏于安全.

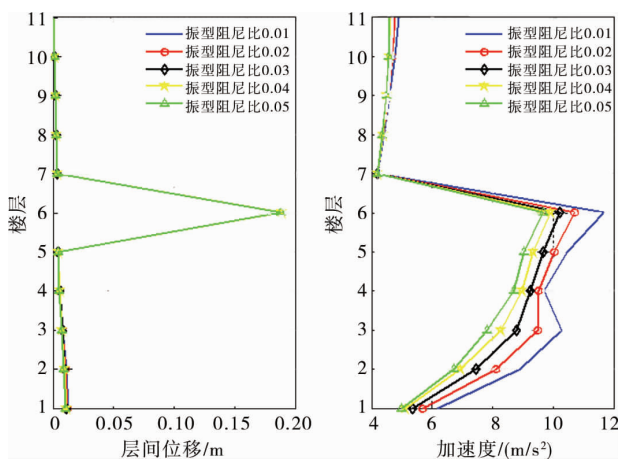


图 2 不同振型阻尼比时层间隔震地震响应比较 (El Centro NS)

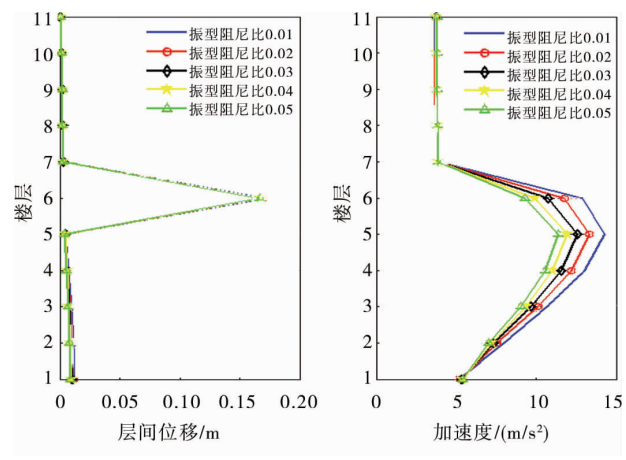


图 3 不同振型阻尼比时层间隔震地震响应比较 (Hachinohe)

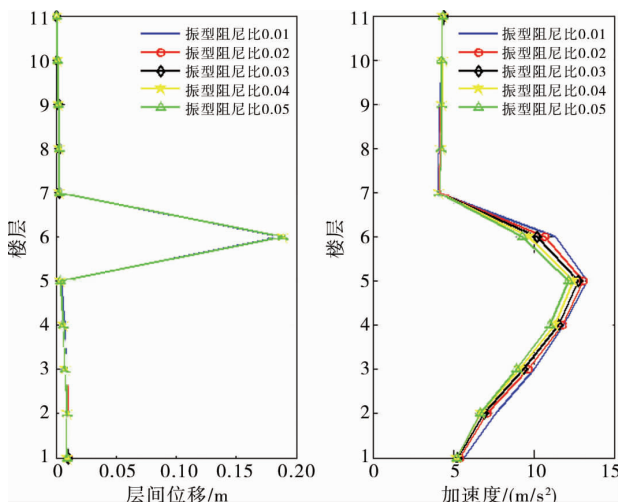


图 4 不同振型阻尼比时层间隔震地震响应比较 (Taft)

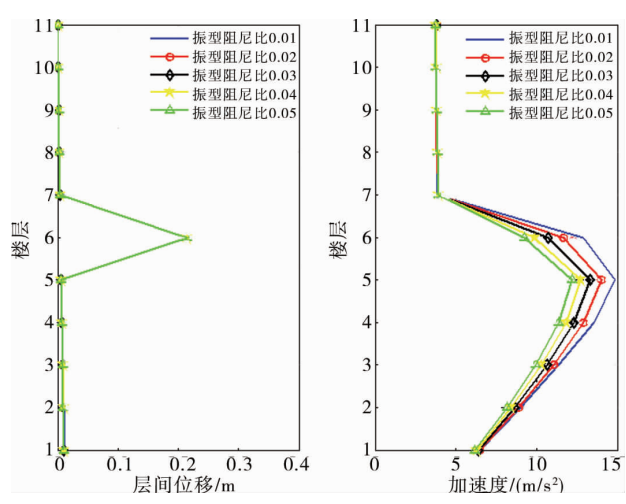


图 5 不同振型阻尼比时层间隔震地震响应比较 (Tianjin)

4.2 不同振型频率时层间隔震地震响应比较

图 6~图 9 为采用不同振型频率时层间隔震结构在 4 条地震波作用下各层层间位移和加速度响应比较. 其中, 计算频率分别取第 2 阶和第 3 阶 2 种情况进行比较分析. 由图 6~图 9 知: 在 4 条地震波作用下, 采用第 2 阶和第 3 阶 2 种情况的层间变形和加速度响应差别较小, 结构最大层间位移为 0.013 m, 隔震层最大位移为 0.210 m, 均满足规范要求. 其中取第 3 阶的情况下地震响应要大于取第 2 阶的情况, 说明在实际工程中按第 3 阶取值时计算偏于安全.

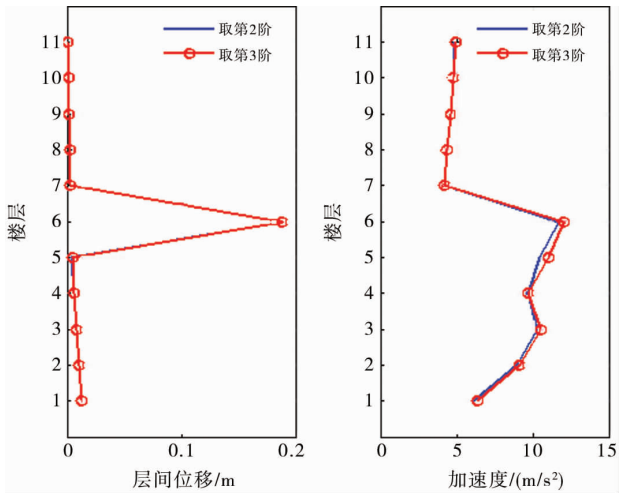


图6 不同振型频率时层间隔震地震响应比较(El Centro NS)

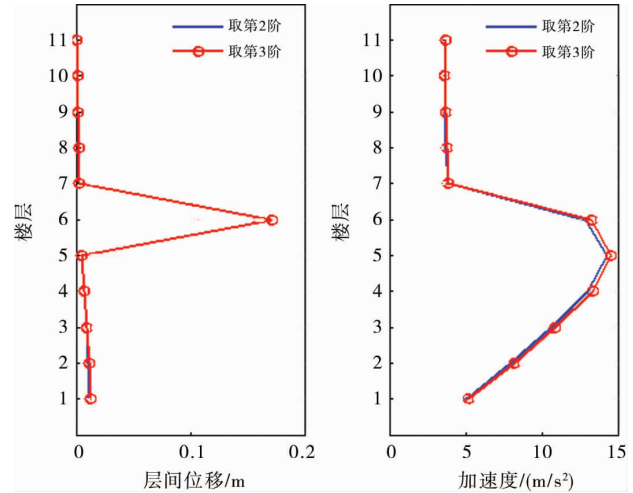


图7 不同振型频率时层间隔震地震响应比较(Hachinohe)

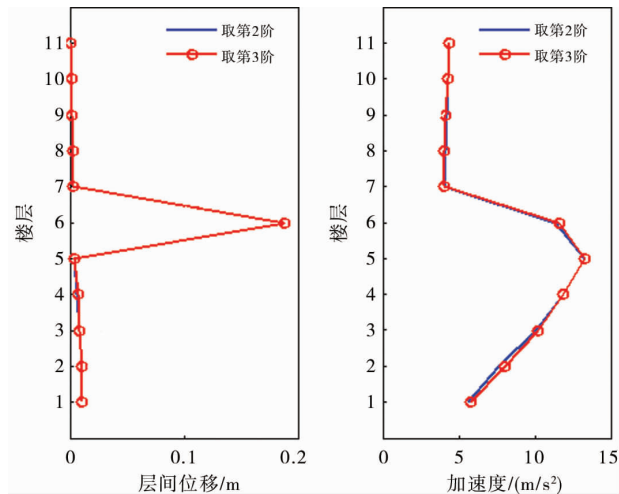


图8 不同振型频率时层间隔震地震响应比较(Taft)

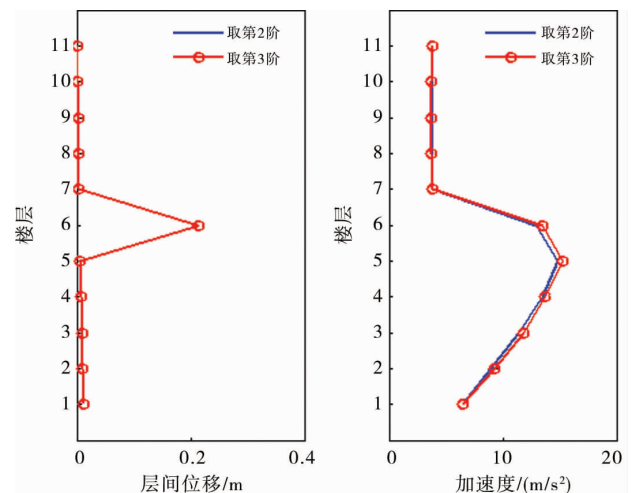


图9 不同振型频率时层间隔震地震响应比较(Tianjin)

4.3 不同阻尼模型时层间隔震地震响应比较

图10~图13为不同阻尼模型时层间隔震结构在4条地震波作用下各层层间位移和加速度响应比较.由图10~图13知:在4条地震波作用下,采用刚度相关型和 Rayleigh型2种情况的层间变形和加速度响应差别较小,结构最大层间位移为0.012 m,隔震层最大位移为0.190 m,均满足规范要求.其中质量相关型情况下加速度地震响应要大于其他2种情况,说明在实际工程中采用质量相关型时计算偏于安全.

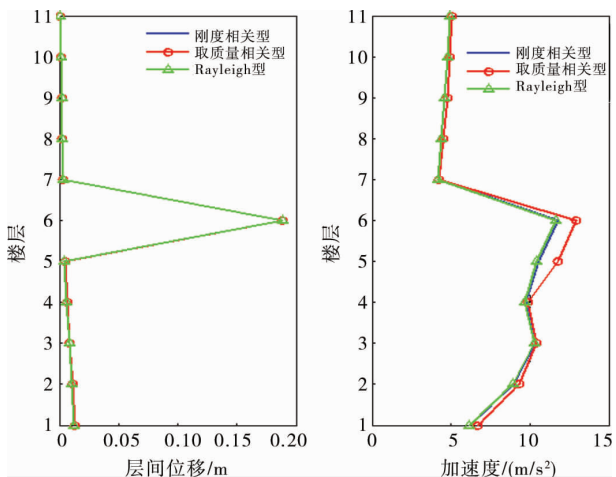


图10 不同阻尼模型时层间隔震地震响应比较(El Centro NS)

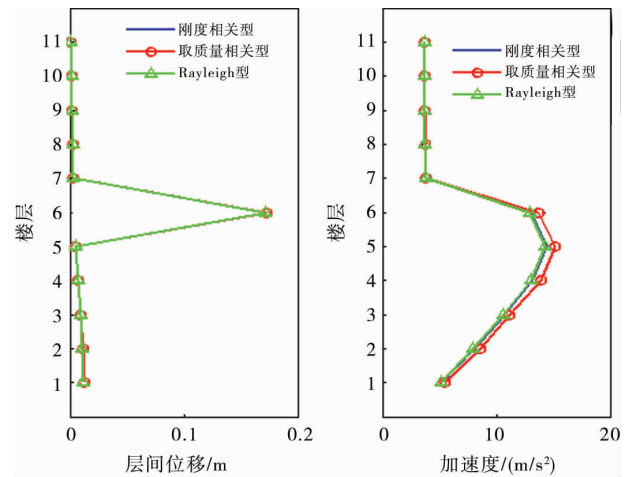


图11 不同阻尼模型时层间隔震地震响应比较(Hachinohe)

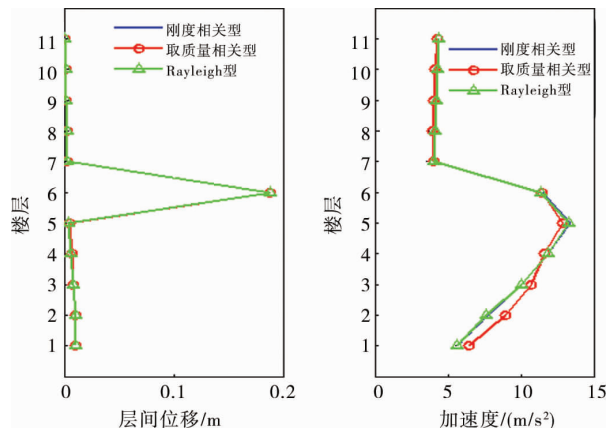


图 12 不同阻尼模型时层间隔震地震响应比较(Taft)

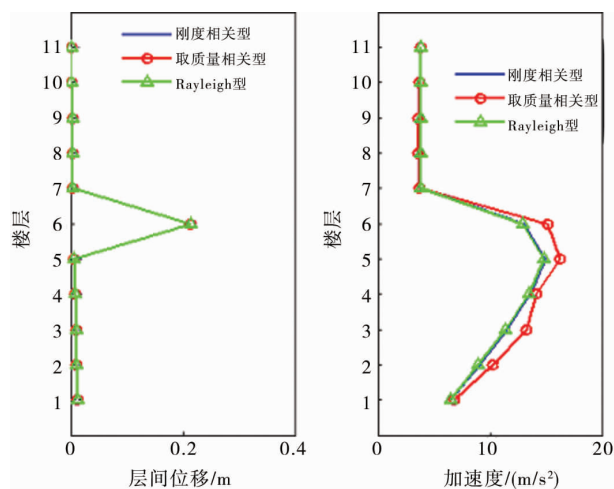


图 13 不同阻尼模型时层间隔震地震响应比较(Tianjin)

5 结论

1) 采用不同振型阻尼比时层间变形差异较小,但加速度响应特别是下部结构的加速度响应差异较大,取振型阻尼比 ξ 数值为 1% 时计算偏于安全。

2) 采用不同振型频率时,采用第 2 阶和第 3 阶 2 种情况的层间变形和加速度响应差别较小,其中取第 3 阶的情况下地震响应要大于取第 2 阶的情况,在实际工程中按第 3 阶取值时计算偏于安全。

3) 采用刚度相关型和 Rayleigh 型两种情况的层间变形和加速度响应差别较小,采用质量相关型的情况下加速度地震响应要大于其他 2 种情况,在实际工程中采用质量相关型时计算偏于安全。

参考文献:

- [1] Dutta A, Sumnicht J F, Mayes R L, et al. An innovative application of base isolation technology[C]//Proc. 18th Analysis and Computation Specialty Conference, ASCE Structures Congress. Canada: Vancouver, BC, 2008: 18-20.
- [2] Tasaka M, Mori N, Yamamoto H, et al. Applying seismic isolation to buildings in Japan-Retrofitting and middle-story isolation [C]//Structures Congress 2008@ s18th Analysis and Computation Specialty Conference. ASCE, 2008: 1-11.
- [3] 小林正人,井泽保一,洪忠喜.モード連成作用を考慮した中間層免震構造の各部地震応答予測[J].日本建筑学会技术报告集,2003,572:73-80.
- [4] Shirayama A, Yairnashita T, Ito S, et al. Design Proposal for Controlling Seismic Behaviors of Inter-story Isolation Building Structures[C]//13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, 2004: 1313.
- [5] Teramoto T, Ohmiya M, Ono M. Dynamic Response of Seismic Isolation Structures Isolated at the Intermediate Story[C]// JSSI

- 10th Annivers ARY Symposium. Yokohama. J apan, 2004.
- [6] Villaverde R. Aseismic Roof Isolation System: Feasibility Study with 13-Story building[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2002, 128(2): 188-196.
- [7] 片山贵裕.用中间层隔震加固法进行政府建筑抗震改造的设计[C]//第八届中日建筑结构技术交流会论文集.中国,北京,2008:673-70.
- [8] Matssagar V A, Jangid R S. Viscoelastic damper connected to adjacent structures involving seismic isolation[J]. *Journal Civil Eng Manage*, 2005, 11(4): 309-322.
- [9] 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.
- [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 midstory isolated buildings with modal coupling effect[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(2): 201-219.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Kelly J M. *Earthquake-resistant design with rubber*[M]. London: Springer-Verlag, 1993.
- [18] 周锡元,李中锡.规则型隔震桥梁结构的简化分析方法[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(3): 53-58.
- [19] Sueoka T, Torii S, Tsuneki Y. The application of response control design using middle-story isolation system to high-rise building[C]//13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004.
- [20] Veletsos A S, Ventura C E. Modal analysis of non-classically damped linear systems[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1986, 14(2): 217-243.
- [21] Hwang J S, Chang K C, Tsai M H. Composite damping ratio of seismically isolated regular bridges[J]. *Engineering Structures*, 1997, 19(1): 55-62.
- [22] 中华人民共和国原城乡建筑环境保护部.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 2010.