

王卢萍,周佩,王海峰,等.基于多层框架结构的楼层阻尼比修正的仿真研究[J].地震工程学报,2024,46(1):156-162.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220316001

WANG Luping,ZHOU Pei,WANG Haifeng,et al.Simulation research on story damping ratio modification based on a multi-story frame structure [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46 (1): 156-162. DOI: 10. 20000/j. 1000-0844. 20220316001

基于多层框架结构的楼层阻尼比修正的仿真研究

王卢萍¹,周佩¹,王海峰¹,王玉山^{1,2}

(1. 石河子大学水利建筑工程学院,新疆石河子832000;

2. 新疆兵团高烈度寒区建筑抗震节能技术工程实验室,新疆石河子832000)

摘要:附加有效阻尼比的确定是消能减震结构设计的关键。为探究布置消能器楼层数的不同对结构设计安全性的影响,以新疆地区某多层钢筋混凝土框架结构为研究对象,采用非线性时程分析方法和等效结构模型的振型分解反应谱分析方法,基于各楼层剪力计算结果,引入楼层阻尼比修正系数 k_{mn} ,对等效结构模型的附加有效阻尼比进行迭代修正。结果表明:采用小震时程分析阻尼比的等效结构模型,其楼层阻尼比修正系数随着阻尼器布置楼层数的逐渐增加呈现出先增后减的趋势,当阻尼器布置层数为楼层总数的3/5时折减率最低;采用中震时程分析阻尼比的等效结构模型,当阻尼器布置楼层数不少于2/5时,可满足设防要求;对于多层框架结构,考虑综合成本,黏滞阻尼器的布置楼层数可不采用满布的形式。

关键词:附加有效阻尼比;时程分析;振型分解反应谱法;楼层剪力;楼层阻尼修正

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)01-0156-08

DOI:10.20000/j.1000-0844.20220316001

Simulation research on story damping ratio modification based on a multistory frame structure

WANG Luping¹, ZHOU Pei¹, WANG Haifeng¹, WANG Yushan^{1,2}

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China;

2. Xinjiang Production & Construction Groups Engineering Laboratory for Seismic and Energy-Saving Building in High Earthquake Intensity and Cold Zone, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: Determining an additional effective damping ratio is key to designing energy dissipation structures. To explore the influence of the number of floors with dampers on the safety of structure design, this study used a multistory reinforced concrete frame structure in Xinjiang as the research object. Nonlinear time-history analysis and mode decomposition response spectrum analysis of the equivalent structure model were performed. Based on shear force calculation results for each floor, the story damping ratio modification factor was introduced to promote iterative correction of additional effective damping ratio of equivalent structure model. The results show that

收稿日期: 2022-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(51468058);兵团科技创新人才计划项目(2022CB008);石河子大学创新发展专项(CXFZ202102)

第一作者简介: 王卢萍(1997—),女,硕士研究生,主要从事结构消能减震研究。E-mail: wlp20210309@163.com。

通信作者: 王海峰(1980—),男,正高级工程师,硕士生导师,主要从事工程结构研究。E-mail: 382667033@qq.com。

the story damping ratio modification factor of the equivalent structure model first increases and then decreases with an increasing number of floors with dampers when using the time-history analysis under small earthquakes. Moreover, the reduction rate is the lowest when the number of floors with dampers is three-fifths of the total number of floors. However, an equivalent structure model where no less than two-fifths of the floors have dampers can meet fortification requirements when using the time-history analysis under intermediate earthquakes. Considering the comprehensive cost, the viscous dampers do not need to cover all floors.

Keywords: additional effective damping ratio; time-history analysis; mode decomposition response spectrum method; story shear force; story damping modification

0 引言

消能减震结构指在结构的某些部位设置消能器耗散掉输入结构的能量,从而降低主体结构的地震响应,因其具有更高的抗震性能和优越的经济性而被大力推广。自 2021 年 9 月 1 日起国家开始施行《建设工程抗震管理条例》^[1],表明国家正在加快推进全面普及隔震减震技术的进程。消能减震结构分析方法是在对消能减震结构模型进行时程分析的基础上,通过计算得到消能器附加给结构的等效刚度和等效阻尼^[2],然后建立等效模型进行结构分析。对等效结构模型进行振型分解反应谱法分析可以快速地计算结构在不同地震作用下的峰值响应,方便后续依据内力包络值对构件进行配筋设计和验算。因此,确定消能器给结构附加的有效阻尼比是进行安全结构设计的关键。

从已有研究可知,常用的附加有效阻尼比计算方法有规范法、能量比法、响应衰减法、减震系数法和平均减震系数法等^[3-5]。丁永君等^[6]采用这五种计算方法对黏滞阻尼结构进行研究,通过对比非线性时程分析结果与线性时程分析的楼层响应,验证了各种方法的精确性。周云等^[7]认为消能部件附加给结构的阻尼是时变阻尼,附加有效阻尼比也应为时变参数,从而提出了基于应变能法的附加有效阻尼比时变法。巫振弘等^[8]总结了规范法和减震系数法存在的计算困难等问题,并根据单自由度体系阻尼比 ξ 与振幅 s 的关系,结合结构目标变形计算消能器附加有效阻尼比。韩宇娴等^[9]从地震输入能量的角度揭示了阻尼比对结构的影响机理,说明把附加有效阻尼比转成结构固有阻尼比会影响结构能量,造成能量偏差,进一步导致等效结构构件内力与原结构构件实际内力存在差异。国外学者 Hwang 等^[10]通过对沿建筑物高度分布阻尼系数的不同方法进行对比,提出了只将黏滞阻尼器的阻尼系数分配到有

效楼层的方法。

综上,附加有效阻尼比的计算结果与实际附加给结构的阻尼比往往并不相等,计算过程也较为繁琐,这给后续采用振型分解反应谱法进行结构构件截面设计和承载力验算带来了不准确性。现有的研究大多是对计算方法的改进,缺少对实际工程中附加有效阻尼比应用的探索。新疆住建厅发布的《建筑消能减震应用技术规程(XJJ 075—2016)》^[11]中规定,“当建筑结构被认定为消能减震结构时,布置消能部件的楼层数不宜少于地上总楼层数(局部出屋面数不计入)的 2/3”,而在实际工程应用中往往受功能限制,导致黏滞阻尼器布置的楼层数不满足该要求,若仅仅依据时程分析的结果建立附加阻尼比的等效结构模型,会存在未布置阻尼器楼层的地震剪力被低估的问题,使结构具有安全隐患。针对这种情况,本研究共设置五种工况,探究了黏滞阻尼器布置楼层数对时程分析结果和振型分解反应谱法结果的影响,根据楼层内力复核结果,对等效结构模型的附加有效阻尼比进行修正,得到楼层阻尼比修正系数随黏滞阻尼器布置楼层数增加的变化情况。

1 消能减震结构分析方法

1.1 快速非线性时程分析

时程分析法根据选定的地震波和结构恢复力特性曲线,通过逐步积分的方法对结构动力方程进行直接积分,从而获得结构在地震过程中任一时刻的位移、速度和加速度。传统的时程分析法有计算量大、对时间步长非常敏感、技术复杂等局限性。美国学者 Wilson 提出了一种适用于消能减震结构的新的非线性分析方法——Fast Nonlinear Analysis Method(快速非线性时程分析法),简称 FNA 方法^[12],附加了消能部件的消能减震结构运动方程为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) + \mathbf{R}(t)_{\text{NL}} = \mathbf{R}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{R}(t)$ 分别表示消能减震结构体系的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和外部荷载矩阵; 与时间相关的向量 $\ddot{\mathbf{X}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{X}}(t)$ 、 $\mathbf{X}(t)$ 分别表示结构的加速度、速度和位移; $\mathbf{R}(t)_{\text{NL}}$ 表示非线性单元力总和的整体节点力向量, 通过在每个时间点上的迭代计算出来。考虑非线性单元的刚度贡献, 在非线性单元的位置添加有效弹性单元, 在式(1) 两边加上有效力 $K_e \mathbf{X}(t)$, K_e 是任意值的有效刚度。精确的平衡方程可写为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}(t) + (\mathbf{K} + \mathbf{K}_e)\mathbf{X}(t) = \mathbf{R}(t) - \mathbf{R}(t)_{\text{NL}} + \mathbf{K}_e \mathbf{X}(t) \quad (2)$$

可以将式(2) 变换为模态坐标的形式, 利用模态分析结果进行快速的时程分析。目前 ETABS 中的时程计算方法便是以模态为基础的 FNA 法。

1.2 振型分解反应谱法

振型分解反应谱法是将设计反应谱在结构关键周期处的峰值响应作为外加荷载加载到结构上, 获得结构的最大内力和变形^[13]。运动方程如下:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) = \mathbf{R}(t) \quad (3)$$

未布置消能器时, 阻尼矩阵 $\mathbf{C}$ 是正交矩阵; 布置消能器后, 附加的阻尼矩阵有非正交项, 使得阻尼矩阵不再满足正交条件。但研究发现, 消能器的合理设置可以使附加阻尼矩阵的元素集中在主对角线附近, 采用强行解耦的方法, 可忽略掉非正交项。根据振型分解原理将坐标进行转换, 坐标转换表达式见式(4), 将式(4) 代入式(3), 可得解耦的 n 个单自由度运动方程列于式(5):

$$\mathbf{X}(t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i \gamma_i y_i(t) \quad (4)$$

$$\ddot{y}_i(t) + 2\xi_i \bar{\omega}_i \dot{y}_i(t) + \bar{\omega}_i^2 y_i(t) = -\ddot{X}_0(t) \quad (5)$$

式中: φ_i 、 γ_i 、 $y_i(t)$ 分别表示结构体系的第 i 阶振型、振型参与系数和振型的位移响应; ξ_i 、 $\bar{\omega}_i$ 分别为第 i 阶振型阻尼比和圆频率。从式(5) 可以看出, 振型分解反应谱法的计算结果与输入阻尼比的大小有关。

2 基于楼层剪力修正附加有效阻尼比

等效结构模型采用了时程分析法计算得到的附加有效阻尼比, 该等效模型计算的楼层剪力结果则直接影响后续的配筋设计。因此, 为保证结构设计的安全性, 可通过迭代修正附加有效阻尼比的方式, 使等效结构模型的楼层剪力 F_{di} 大于或等于消能减

震结构模型楼层剪力 F_{xi} 。

对附加有效阻尼比进行修正的原理是: 提取消能减震结构模型时程分析的结果, 将计算的附加有效阻尼比与主体结构阻尼比之和附加到未布置阻尼器的原结构中, 建立等效结构模型。然后对比消能减震结构模型的楼层剪力 F_{xi} 和等效结构模型的楼层剪力 F_{di} , 若 F_{di} 小于 F_{xi} , 则对附加有效阻尼比进行迭代修正, 直至 F_{di} 大于或等于 F_{xi} 。此时, 对附加有效阻尼比起修正作用的值 k_{mn} 即为楼层阻尼比修正系数。修正公式如下:

$$\xi = \xi_0 + k_{mn} \xi_a \quad (6)$$

式中: ξ 为等效结构的最终等效阻尼比; ξ_0 为混凝土结构的固有阻尼比, 一般取 5%; ξ_a 为消能减震结构的附加有效阻尼比; k_{mn} 为 n 层模型布置 m 层阻尼器的楼层阻尼比修正系数。附加有效阻尼比的计算采用《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》^[14] (以下简称《抗规》) 中的方法, 见式(7):

$$\xi_a = \frac{\sum_j W_{cj}}{4\pi W_s} \quad (7)$$

式中: W_{cj} 为第 j 个消能器在结构预期层间位移 Δu_j 下往复循环一周所消耗的能量; $\sum_j W_{cj}$ 为结构上所有消能器耗散能量之和; W_s 为消能减震结构在水平地震作用下的总应变能。

基于楼层剪力迭代修正附加有效阻尼比的步骤如下:

- (1) 建立消能减震结构模型, 确定减震目标;
- (2) 优化阻尼器参数与布置位置, 进行非线性时程分析;
- (3) 提取时程分析结果, 计算附加有效阻尼比;
- (4) 建立等效结构模型, 并进行振型分解反应谱法分析;
- (5) 依据修正公式 $\xi = \xi_a + k_{mn} \xi_a$, 修正等效结构的附加有效阻尼比, 初始 k_{mn} 值取为 0;
- (6) 提取振型分解反应谱法楼层剪力结果, 与时程分析结果对比;
- (7) 判断 F_{di} 是否大于或等于 F_{xi} , 若 F_{di} 小于 F_{xi} , 则返回步骤(5), 对 k_{mn} 重新取值, 直至满足条件, 迭代结束。

3 消能减震结构设计算例

3.1 结构概况

本文以新疆某五层钢筋混凝土框架结构为计算模型, 首层层高 4.3 m, 标准层层高 3.6 m, 总高度为

18.7 m,结构模型见图 1 所示。结构抗震设防烈度为 8 度(0.2g),场地特征周期为 0.35 s,场地类别为 II 类,设计地震分组为第 1 组。

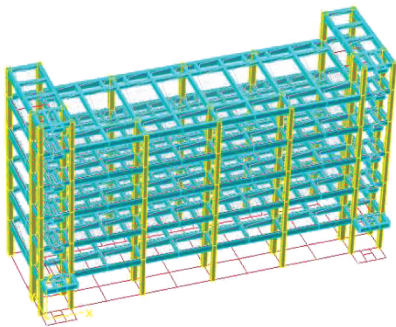


图 1 结构三维图

Fig.1 3D diagram of the structure

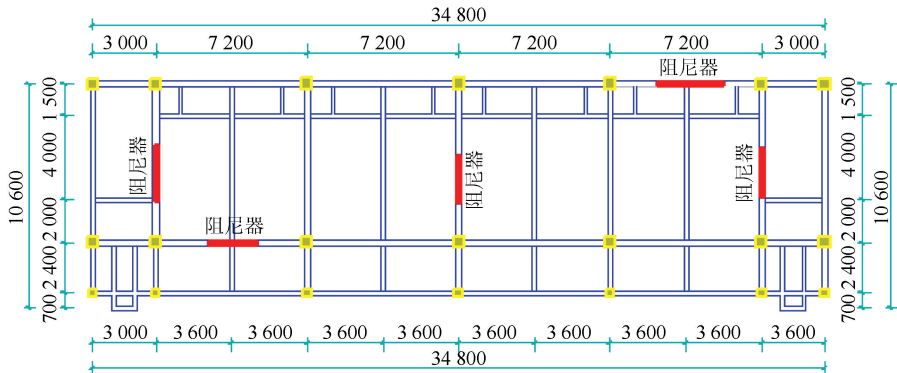


图 2 标准层阻尼器平面布置图(单位:mm)

Fig.2 Layout plan of dampers on the standard floors (Unit:mm)

构质量、各阶模态周期和基底剪力与 PKPM 计算结果进行对比,以验证模型的准确性。由表 1 可知,PKPM 模型与 ETABS 模型误差在 5% 以内,吻合良好。

表 1 ETABS 模型与 PKPM 模型分析结果对比

Table 1 Comparison between analysis results of ETABS model and PKPM model

模型参数	PKPM	ETABS	误差/%
质量/t	2 849	2 905	1.96
第 1 周期/s	1.022 2	1.025	2.45
第 2 周期/s	0.940 4	0.943	0.28
第 3 周期/s	0.845 9	0.847	0.13
X 向基底剪力/kN	1 677	1 659	1.07
Y 向基底剪力/kN	1 477	1 457	1.35

注:误差=100%×|PKPM 值-ETABS 值|/PKPM 值

3.3 地震波选取

地震波的选取关系到弹性时程分析结果的准确性,需根据建筑场地类别与设计地震分组来判断,从而选取与建筑物所在场地的特征周期 T_g 相近的地震波。本文借助 PKPM 软件“地震波自动筛选”功能,通过设置相应的限制条件选取了 2 条天然波

为探究布置消能部件楼层数的不同对消能减震结构设计安全性的影响,设置了 5 种工况,即分别在结构模型中 1 层布置、1~2 层布置、1~3 层布置、1~4 层布置和 1~5 层布置黏滞阻尼器。阻尼器的布置遵循“均匀、对称、分散”等原则,在 X 方向布置 2 个、Y 方向布置 3 个,每一层具体布置位置见图 2。黏滞阻尼器布置形式采用单斜撑式,阻尼指数 α 为 0.3,阻尼系数 C 为 $600 \text{ kN} \cdot (\text{s}/\text{m})^{0.3}$,最大行程为 50 mm。

3.2 模型建立

采用 PKPM 软件建立结构模型,将 PKPM 结构模型转换成 ETABS 结构模型并进行模态分析。模态分析是动力分析的基础,可通过模态分析来检查结构刚度和质量分布情况。将模态分析所得的结

(TR01、TR02)和 1 条人工波(RG01)。归一化的地震波时程见图 3(a)、(b)、(c),图 3(d)为地震波反应谱与规范反应谱曲线图。

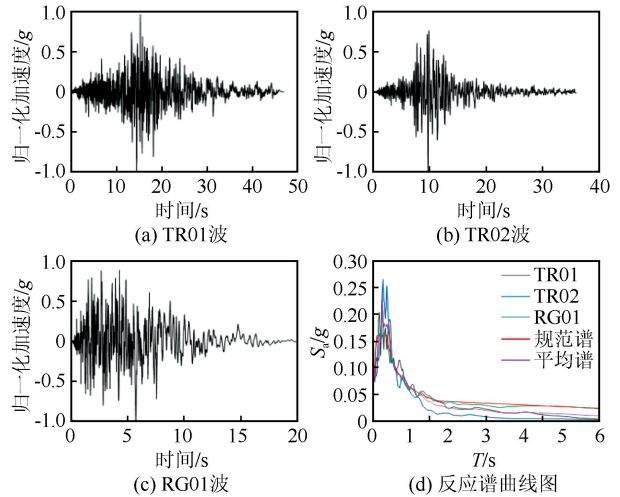


图 3 地震波加速度时程曲线和反应谱曲线

Fig.3 Acceleration time-history curves and response spectrum curves of seismic waves

8 度多遇地震作用下弹性时程分析法与振型分

解反应谱法得到的结构基底剪力如表 2 所列。由表 2 可知,每条地震波弹性时程分析得到的基底剪力均大于反应谱法计算结果的 65%且均小于 135%,

三条地震波弹性时程分析得到的基底剪力的平均值大于反应谱法计算结果的 80%且小于 120%,满足《抗规》5.1.2 条款要求。

表 2 时程分析与反应谱法基底剪力对比

Table 2 Comparison between base shear forces from time history analysis and response spectrum method

模型参数		反应谱	TR01	TR02	RG01	时程平均
基底剪力/kN	X 向	1 677	1 333	1 737	1 467	1 512
	Y 向	1 477	1 424	1 027	1 339	1 263
比例/%	X 向	100	79.51	103.57	87.52	90.20
	Y 向	100	96.44	69.52	90.66	85.54

3.4 弹性时程分析结果

按照新疆《建筑消能减震应用技术规程(XJJ 075—2016)》6.4.1 条规定:振型分解反应谱法计算地震作用效应时,对采用黏滞消能器的主体结构的附加有效阻尼比宜选取设防烈度地震作用下计算得到的附加有效阻尼比。采用 ETABS 软件对模型进行多遇地震作用和设防烈度地震作用下的非线性时

程分析过程中,结构主体均处于弹性范围内,黏滞阻尼器采用非线性 Damper-Exponential 连接单元,分析方法采用快速非线性时程分析法(FNA 法)。提取时程分析得到的各楼层的水平剪力 F_u 、水平位移 u 、各阻尼器的阻尼力 F_d 和相对变形 Δu_d ,按照式(7)计算附加有效阻尼比,计算结果如表 3 和表 4 所列。

表 3 多遇地震作用下附加有效阻尼比计算结果

Table 3 Calculation results of additional effective damping ratio under frequent earthquake

工况	地震波	阻尼器耗能/(kN·mm)		固有阻尼耗能/(kN·mm)		附加阻尼比/%		最小包络值 /%
		X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向	
工况 1	天然波 1	4 067	5 169	7 797	8 357	4.15	4.92	4.15
	天然波 2	4 517	5 178	7 069	6 879	5.08	5.99	
	人工波	4 067	4 721	7 187	7 124	4.50	5.27	
工况 2	天然波 1	6 669	7 298	5 686	5 410	9.33	10.73	9.33
	天然波 2	6 125	6 024	4 286	3 727	11.37	12.86	
	人工波	5 939	6 221	4 687	4 354	10.08	11.37	
工况 3	天然波 1	8 227	9 639	4 276	4 224	15.31	18.16	15.31
	天然波 2	6 055	7 015	2 642	2 437	18.24	22.91	
	人工波	7 211	9 645	3 766	4 556	15.24	16.85	
工况 4	天然波 1	9 757	11 105	4 175	4 264	18.60	20.72	17.63
	天然波 2	6 280	7 731	2 121	2 124	23.56	28.96	
	人工波	9 110	11 728	4 112	4 823	17.63	19.35	
工况 5	天然波 1	10 138	11 176	4 168	4 144	19.36	21.46	18.00
	天然波 2	6 378	7 739	2 114	2 098	24.01	29.35	
	人工波	9 412	11 921	4 162	4 789	18.00	19.82	

3.5 消能减震结构与等效结构层间剪力对比

在 PKPM 中改变楼层阻尼比,得出不同阻尼比下使用振型分解反应谱法计算的结构地震响应结果。对应消能减震结构模型的五种工况,等效结构在多遇地震作用下的最终等效阻尼比分别为 9.15%、14.33%、20.31%、22.63%和 23.00%,在设防烈度地震作用下的最终等效阻尼比分别为 6.99%、9.10%、11.66%、13.99%和 14.53%。

提取多遇地震作用下的反应谱法分析结果,与时程分析结果相对比,当反应谱法得出的楼层剪力小于时程分析法时,按上面的步骤基于楼层剪力对

附加有效阻尼比进行迭代修正。修正后的附加有效阻尼比 ξ'_a 与消能减震结构的附加有效阻尼比 ξ_a 之间的关系可表示为:

$$\xi'_a = k_{mn} \xi_a$$

(8)

修正后,等效结构的最终等效阻尼比分别为 6.66%、9.39%、13.11%、14.17%和 14.00%,对应的楼层阻尼比修正系数 k_{mn} 从工况 1 到工况 5 分别取为 0.4、0.47、0.53、0.52 和 0.5。可见,采用小震时程分析的阻尼比时,等效结构模型的楼层阻尼比修正系数随着阻尼器布置楼层数的逐渐增加呈先增后减的趋势。定义附加有效阻尼比折减率 D_{mn} 为:

表 4 设防烈度地震作用下附加有效阻尼比计算结果

Table 4 Calculation results of additional effective damping ratio under fortification intensity earthquake								
工况	地震波	阻尼器耗能/(kN·mm)		固有阻尼耗能/(kN·mm)		附加阻尼比/%		最小包络值 /%
		X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向	
工况 1	天然波 1	19 248	27 899	76 949	97 541	1.99	2.28	1.99
	天然波 2	22 458	24 314	79 948	67 553	2.24	2.86	
	人工波	19 595	26 716	76 958	78 493	2.03	2.71	
工况 2	天然波 1	35 003	44 250	67 938	67 070	4.10	5.25	4.10
	天然波 2	35 194	39 999	56 930	49 514	4.92	6.43	
	人工波	34 086	38 738	58 674	49 876	4.62	6.18	
工况 3	天然波 1	48 591	57 558	58 084	52 775	6.66	8.68	6.66
	天然波 2	41 752	50 284	44 957	38 460	7.39	10.40	
	人工波	43 293	48 429	47 815	37 782	7.21	10.20	
工况 4	天然波 1	56 685	66 192	49 700	43 574	9.08	12.09	8.99
	天然波 2	42 356	54 934	34 979	32 528	9.64	13.44	
	人工波	49 019	49 956	43 371	35 041	8.99	11.34	
工况 5	天然波 1	59 975	70 816	50 055	41 861	9.53	13.46	9.53
	天然波 2	42 232	55 578	31 834	29 891	10.56	14.80	
	人工波	51 250	59 949	42 088	34 447	9.69	13.85	

$$D_{mn} = \frac{\xi_a - \xi_a'}{\xi_a} \times 100\%$$
 (9)

式中: D_{mn} 为 n 层模型布置 m 层阻尼器的附加有效阻尼比折减率。多遇地震作用下,消能减震结构工况 1 ~ 工况 5 的附加有效阻尼比折减率见图 4。

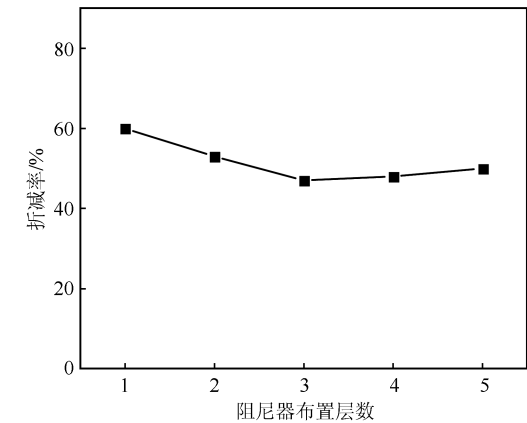


图 4 附加有效阻尼比折减率图

Fig.4 Reduction rate of additional effective damping ratio

由图 4 可知,随着布置阻尼器楼层数的增加,附加有效阻尼比折减率呈先减小后增大的趋势。布置阻尼器楼层数较低时折减率较大,布置层数超过总楼层数的 3/5 后,顶部的黏滞阻尼器不能充分发挥耗能作用,附加有效阻尼比折减率开始增大。可见,对于多层结构,黏滞阻尼器布置层数为总楼层数的 3/5 时,附加阻尼比折减率最为经济。

不同工况下消能减震结构与等效结构的层间剪力见图 5。图 5 中的曲线 a、b、c 分别表示多遇地震作用下的时程分析结果、反应谱结果和修正结果,曲线 d 表示取设防烈度地震作用下附加阻尼比的反应

谱结果。分析后可得出以下结论:

- (1) 按多遇地震作用下附加有效阻尼比计算的等效结构,从工况 1~工况 5,在 X 方向和 Y 方向均出现了层间剪力小于时程分析结果的情况。对附加有效阻尼比进行修正后,等效结构的层间剪力均大于时程分析结果,表明对多遇地震作用下附加有效阻尼比进行修正的方式可以使结构偏安全地设计。
- (2) 对多遇地震作用下的附加阻尼比进行修正后,工况 5 的顶层层间剪力较工况 4 有了一定程度的增大,表明在结构顶层设置黏滞阻尼器对结构整体耗能能力提升有限。综合工程造价等因素,对于多层框架结构,黏滞阻尼器的布置楼层数不宜采用满布的形式。

(3) 按照设防烈度地震作用下附加有效阻尼比计算的等效结构,在仅布置一层阻尼器时,存在层间剪力小于时程分析结果的情况,布置楼层数在总楼层数的 2/5 及以上时,层间剪力基本上大于时程分析结果。

4 结论

- (1) 附加有效阻尼比的确定是消能减震结构等效线性化分析模型的基础,其取值不仅会影响后续结构配筋设计和截面验算,甚至给结构设计带来安全隐患。
- (2) 多遇地震作用下,采用小震时程分析附加阻尼比的等效线性化结构模型的楼层阻尼比修正系

数随着阻尼器布置楼层数的逐渐增加呈现出先增后减的趋势,当阻尼器布置层数为楼层总数的 3/5 时折减率最低,综合工程造价等因素,黏滞阻尼器的布置楼层数不宜采用满布的形式。

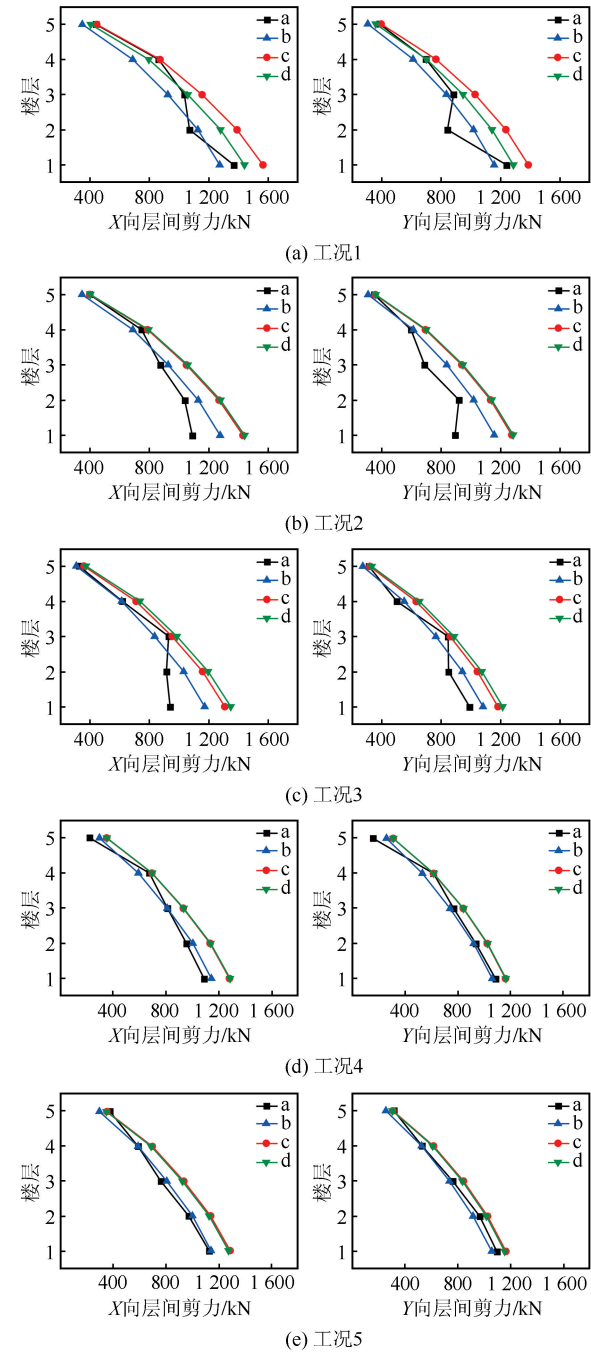


图 5 消能减震结构与等效结构层间剪力对比图
Fig.5 Comparison between floor shear forces of energy dissipation structure and equivalent structure

(3) 当消能减震结构阻尼器的布置楼层数受建筑功能影响而不符合新疆《建筑消能减震应用技术规范(XJJ 075—2016)》时,可以基于楼层阻尼修正系数对多遇地震作用下的附加有效阻尼比进行修

正。分析方法可为此类减震设计提供技术支撑。

参考文献(References)

[1] 中华人民共和国国务院.建设工程抗震管理条例[J].中华人民共和国国务院公报,2021(23):13-19.
The State Council of the People's Republic of China.Regulations on anti-seismic management of construction projects[J].Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2021(23):13-19.

[2] 商城豪.消能减震结构附加有效阻尼比计算方法研究[D].广州:广州大学,2017.
SHANG Chenghao.Study on calculation method of additional effective damping ratio of energy dissipation structure [D].Guangzhou:Guangzhou University,2017.

[3] 宋力勋.黏滞阻尼器等效阻尼比的计算公式研究[J].工程抗震与加固改造,2014,36(5):52-56.
SONG Lixun.Study on the formula of equivalent damping ratio of viscous damper[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2014,36(5):52-56.

[4] 王维凝,曹胜涛,肖川,等.黏滞阻尼器消能减震结构在多遇地震下附加阻尼比计算方法对比研究[J].建筑科学,2019,35(3):51-58.
WANG Weining,CAO Shengtao,XIAO Chuan,et al.Comparative study of additional damping ratio calculation method for energy dissipation structures with viscous dampers under frequent earthquake[J].Building Science,2019,35(3):51-58.

[5] 翁大根,李超,胡岫岩,等.减震结构基于模态阻尼耗能的附加有效阻尼比计算[J].土木工程学报,2016,49(增刊 1):19-24,31.
WENG Dagen,LI Chao,HU Xiuyan,et al.Calculation of additional effective damping ratio of damping structure based on modal damping energy consumption[J].China Civil Engineering Journal,2016,49(Suppl01):19-24,31.

[6] 丁永君,刘胜林,李进军.黏滞阻尼结构小震附加阻尼比计算方法的对比分析[J].工程抗震与加固改造,2017,39(1):78-83.
DING Yongjun,LIU Shenglin,LI Jinjun.Analysis of additional damping ratio calculation methods of nonlinear viscous damping structure under frequent earthquake[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2017,39(1):78-83.

[7] 周云,区彤,徐昕,等.基于应变能法的附加有效阻尼比时变计算方法研究[J].建筑结构,2019,49(11):103-108.
ZHOU Yun,OU Tong,XU Xin,et al.Research on time-varying calculation method of additional effective damping ratio based on strain energy method[J].Building Structure,2019,49(11):103-108.

[8] 巫振弘,薛彦涛,王翠坤,等.多遇地震作用下消能减震结构附加阻尼比计算方法[J].建筑结构学报,2013,34(12):19-25.
WU Zhenhong,XUE Yantao,WANG Cuikun,et al.Research on additional damping ratio calculation methods under frequent earthquake[J].Journal of Building Structures,2013,34(12):19-25.

[11] WANG X A, CONG D C, YANG Z D, et al. Iterative learning control with complex conjugate gradient optimization algorithm for multiaxial road durability test rig[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(7): 2349-2360.

[12] 李喧, 苏飞跃, 邱法维. 地震模拟振动台的数控软件研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990(3): 47-51.
LI Xuan, SU Feiyue, QIU Fawei. Research of digital control software for the 3 m×4 m shaking table[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1990 (3): 47-51.

[13] 丛大成, 何景峰, 韩俊伟, 等. 地震模拟试验台数字控制系统研究[C]// 2009 中国仪器仪表与测控技术大会文集. 哈尔滨: 中国仪器仪表学会, 2009: 487-491.
CONG Dacheng, HE Jingfeng, HAN Junwei, et al. Research on the digital control system of earthquake simulation test bench[C]// Proceedings of the 2009 China Instrument and Control Technology Conference. Harbin: China Instrument and Control Society, 2009: 487-491

[14] 栾强利, 陈宇, 陈章位, 等. NEBS GR-63-CORE 抗震试验及其控制策略研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(4): 19-24.
LUAN Qiangli, CHEN Yu, CHEN Zhangwei, et al. Aseismic tests of NEBS GR-63-CORE and its control strategy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(4): 19-24.

[15] 田磐. 地震模拟振动台的时域复现控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
TIAN Pan. Research on time domain recurrence control strategy of earthquake simulation shaking table[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[16] 刘永昌, 关淑贤, 任贵兴, 等. 地震模拟振动台波形再现定量判别法[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(1): 149-112.
LIU Yongchang, GUAN Shuxian, REN Guixing, et al. A quantitative method for wave reappearance on earthquake simulation shaking table[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(1): 149-112.

(本文编辑: 任 栋)

(上接第 162 页)

[9] 韩宇娴, 商城豪, 陈清祥, 等. 基于楼层剪力的等效阻尼比计算方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(1): 161-167.
HAN Yuxian, SHANG Chenghao, CHEN Qingxiang, et al. Research on calculation method of equivalent damping ratio based on story shear force[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(1): 161-167.

[10] HWANG J S, LIN W C, WU N J. Comparison of distribution methods for viscous damping coefficients to buildings[J/OL]. Structure and Infrastructure Engineering, 2010; 28-41 [2022-03-16]. <https://doi.org/10.1080/15732479.2010.513713>.

[11] 新疆维吾尔自治区工程建设标准编写组. 建筑消能减震应用技术规程: XJJ 075—2016[S]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区建设标准服务中心, 2016.
The Engineering Construction Standard Compilation Group of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Building energy dissipation damping application procedures: XJJ 075—2016[S]. Urumqi: Xinjiang Uygur Autonomous Region Construction Standard Service Center, 2016.

[12] 彭俊生, 罗永坤, 彭地. 结构动力学、抗震计算与 SAP2000 应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
PENG Junsheng, LUO Yongkun, PENG Di. Structural dynamics, seismic calculation and application of SAP2000[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007.

[13] 张志鹏. 速度相关型阻尼器在既有建筑中的抗震加固应用研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
ZHANG Zhipeng. Study on application of velocity-dependent dampers in seismic strengthening of existing buildings[D]. Qingdao: Qingdao Tehnology University, 2018.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

(本文编辑: 任 栋)