

基于附加刚度和阻尼的结构抗震性能提升设计

丘涛¹ 刘春宇^{2*} 邓荣¹ 郝霖霏¹

1 广州大学工程抗震研究中心 2 方舟国际设计有限公司

DOI:10.12238/btr.v8i1.4604

[摘要] 以中低层钢筋混凝土框架结构为研究对象,提出一种通过附加刚度和阻尼来提升竖向不规则结构变形均匀性及抗震性能的方法。考虑高阶模态影响,在目标需求下给出了结构所需附加刚度和阻尼的直接计算方法。构建5组结构模型,考虑变形和地震强度需求验证了所提方法的有效性。研究结果表明,在I类和II类地震动作用下,附加刚度和阻尼可以明显改善结构变形均匀性和抗震性能。此外,该方法无需进行复杂的迭代计算。这为普通结构的抗震设计提供了有效的技术指导。

[关键词] 附加刚度和阻尼; 抗震性能; 竖向不规则; 高阶模态; 变形均匀性

中图分类号: TU973+.31 文献标识码: A

Design for Enhancing Seismic Performance of Structures Based on Additional Stiffness and Damping

Tao Qiu¹ Chunyu Liu^{2*} Rong Deng¹ Linfei Hao¹

1 Earthquake Engineering Research & Test Center of Guangzhou University

2 Ark International Design Co., Ltd.

[Abstract] A method is proposed to improve the deformation uniformity and seismic performance of vertically irregular structures by adding stiffness and damping, taking mid to low rise reinforced concrete frame structures as the research object. Considering the influence of higher-order modes, a direct calculation method for the required additional stiffness and damping of the structure is provided under the target requirements. The effectiveness of the proposed method was validated by constructing 5 sets of structural models and considering deformation and seismic intensity requirements. The research results indicate that additional stiffness and damping can significantly improve the uniformity of structural deformation and seismic performance under Class I and Class II earthquake motions. In addition, this method does not require complex iterative calculations. This provides effective technical guidance for seismic design of ordinary structures.

[Key words] additional stiffness and damping; seismic performance; vertical irregularity; higher-order mode; deformation uniformity

引言

消能减震技术作为一种简单有效的被动控制技术,被广泛应用于实际工程,以提高结构的抗震性能^[1-3]。通过在主体结构中安装耗能装置,为结构提供附加刚度或阻尼,耗散部分地震输入能量,从而保证结构的安全^[4-5]。

各国学者利用不同类型阻尼器提升结构抗震性能方面进行了大量研究。何文福等^[6]通过在装配整体式框架结构中安装黏滞阻尼器来提升结构的整体抗震性能。结果表明黏滞阻尼器减震结构可以延缓梁端塑性铰的开展。缪志伟等^[7]提出了一种基于黏滞流体阻尼器的抗震性能提升设计方法,以满足实际工程的不同设计需求。Zhang等^[8]提出均匀阻尼比的概念,通过最大化金属阻尼器的耗能效率来实现结构抗震性能的提升。Fateme

等^[9]利用金属阻尼器来实现不同楼层间的变形均匀性和延性要求,并提出了一种基于能量的设计方法。蔡正等^[10]在高层连体结构中附设屈曲约束支撑与黏滞阻尼悬臂桁架增强结构整体抗震性能。在不同地震强度下,两种不同类型的阻尼器可以发挥各自的优势,降低结构构件受力水平和塑性程度。

此外,针对结构的不规则性和不对称性,Lavan等提出了一种基于附加黏滞阻尼器的数值优化设计方法^[11-12]。Landi等研究了不规则钢筋混凝土结构中黏滞阻尼器的阻尼系数分布问题^[13]。现有的各种附加被动阻尼器的抗震性能提升方法,通常无法直接准确的得到实际设计需求,并且缺乏简单合理的性能评价标准。

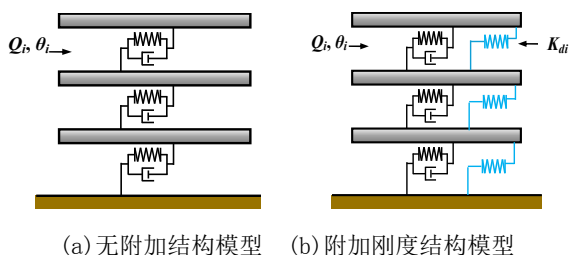
本文基于附加刚度和阻尼提出一种针对中低层竖向不规则

框架结构的抗震性能提升方法。在特定的层间剪力分布模式下，构建多组不规则结构。通过附加刚度和阻尼改善结构的层间变形，并与无阻尼器的结构进行对比，评估其整体抗震性能。

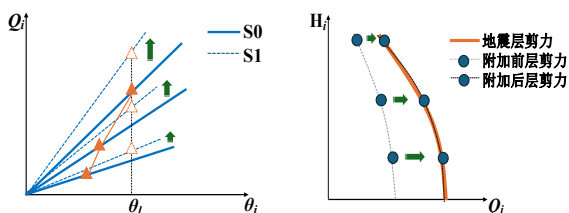
1 参数设计和性能变化评估

1.1 单独附加层刚度对结构抗震性能的影响

在地震作用下，结构的层剪力和层变形通常是不均匀的。特别对于竖向刚度分布不规则的结构，显著的变形不均匀性对结构抗震性能不利。如图1所示，通过额外附加刚度，使层剪力与层地震剪力分布趋于一致，可改善层变形分布的均匀性。更均匀的层变形意味着结构具有更大的变形能力，附加刚度同时也将提升结构的承载能力。假设结构各层同时达到目标位移角 θ_1 的情况下，第 i 层需要附加的层刚度 k_{di} 可由式 (1) 确定。



(a) 无附加结构模型 (b) 附加刚度结构模型



(c) 附加刚度前后层剪力-位移关系 (d) 附加刚度前后层剪力分布和目标地震层剪力分布

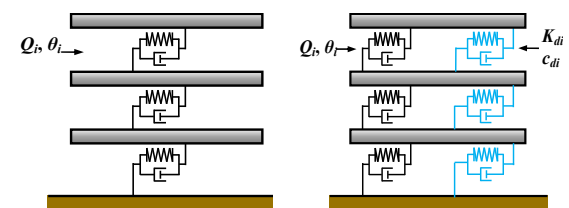
图1 附加刚度对抗震性能的影响

$$k_{di} = \begin{cases} \frac{Q_{i,l,s1} - Q_{i,l,s0}}{h_i \theta_1} & Q_{i,l,s1} > Q_{i,l,s0} \\ 0 & Q_{i,l,s1} < Q_{i,l,s0} \end{cases} \quad (1)$$

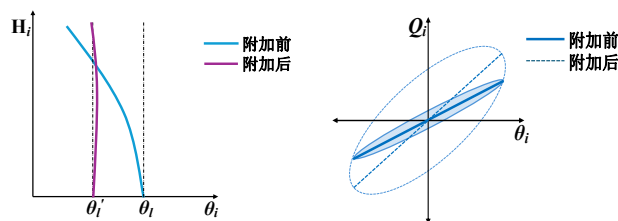
式中 $Q_{i,l,s0}$ 和 $Q_{i,l,s1}$ 分别为原结构 S_0 和附加刚度结构 S_1 第 i 层的层间位移角达到 θ_1 时的层剪力； h_i 为第 i 层层高。

1.2 附加层刚度和阻尼对结构抗震性能的影响

如图2所示，同时附加额外的刚度和阻尼在增加结构承载能力和变形能力的同时，还能使结构产生更大的能量耗散 (2(d))，降低结构的地震响应，提升结构的安全性^[5]。



(a) 无附加结构模型 (b) 附加刚度和阻尼结构模型



(c) 附加刚度和阻尼前后层变形 (d) 附加刚度前后层滞回曲线

图2 附加刚度和阻尼对抗震性能的影响

通过合理的设置阻尼分布，尽可能充分地发挥各楼层阻尼器的耗能能力。如式 (2) 所示，在附加刚度及阻尼的结构 S_1 的目标等效阻尼比 $\xi_{e,s1}$ 已知的情况下，根据等效阻尼比与总的附加阻尼耗能和结构应变能的关系^[14]，考虑各楼层等效阻尼比均匀分布且与 S_1 整体的等效阻尼比相等^[8]，可以利用式 (2) 和 (3) 确定各层的阻尼系数 c_{di} 。

$$\sum_i c_{di} \beta_i v_i d_i = 2 \xi_{e,s1} \sum_i d_i^2 (k_{i,s0} + k_{di}) \quad (2)$$

$$c_{di} = c_d \beta_i \quad (3)$$

式中 v_i 、 d_i 和 β_i 分别为减震结构第 i 层的速度，层位移和阻尼分配系数； $k_{i,s0}$ 为结构 S_0 第 i 层的层刚度。

1.3 变形均匀性与抗震性能变化率

为了评估附加刚度和阻尼后减震结构 S_1 的层间变形均匀性和抗震性能^[15]，定义变形均匀系数变化率 k_u 和抗震性能变化率 k_s ，如式 (4) - (6) 和式 (7) 所示。

$$k_u = \gamma_{s1} / \gamma_{s0} \quad (4)$$

$$\gamma_{s0} = \frac{\sum_i (m_i d_{i,n,s0}^2)}{\sum_i (m_i d_{i,n,s0})} \quad (5)$$

$$\gamma_{s1} = \frac{\sum_i (m_i d_{i,l,s1}^2)}{\sum_i (m_i d_{i,l,s1})} \quad (6)$$

$$k_s = PGA_{l,s1} / PGA_{n,s0} \quad (7)$$

式中 m_i 为第 i 层的质量； $d_{i,n,s0}$ 和 $d_{i,l,s0}$ 分别为原结构 S_0 和减震结构 S_1 达到目标性能极限状态时的各层层位移； γ_{s0} 和 γ_{s1} 分别为 S_0 和 S_1 的层间变形均匀系数； $PGA_{l,s0}$ 和 $PGA_{n,s1}$ 分别为 S_0 和 S_1 达到目标性能极限时的需求地震强度。

k_u 值越大，表明结构的层间变形分布越均匀。同时 k_s 的增加表示结构整体抗震性能也得到提升。通过时程分析可分别获得 S_0 和 S_1 达到相同性能极限时的层间变形均匀系数和需求地震强度，从而定量地评估附加刚度和阻尼对结构的影响，验证所提方法的有效性。

2 地震层剪力和层阻尼系数分布

2.1 结构模型和地震激励

假设在地震作用下，结构的层间地震剪力按照式 (8) 的系数 A_i 分布^[16]。考虑5层常规钢筋混凝土结构，地震下层间变形主要由剪切变形控制。结构恢复力模型采用线性模型模拟。首先设

定一个标准结构模型 (SSS), 假设各层质量均为1000t, 层高三.0m, 各层的屈服承载力 $Q_{i,y}$ 的分布与式(8)中的 A_i 分布一致, 则 $Q_{i,y}$ 可由式(9)-(10)确定。

$$A_i = w_i + 2w_i T_1 (\sqrt{1/w_i} - w_i) / (1 + 3T_1) \quad (8)$$

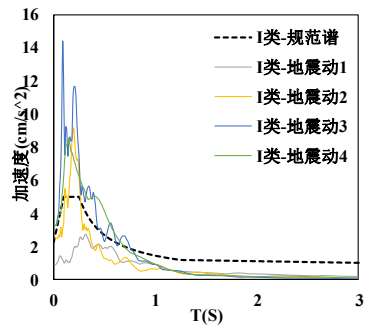
$$Q_i = C_i A_i Q_{1,y} \quad (9)$$

$$Q_i = Q_{i+1} - Q_i \quad (10)$$

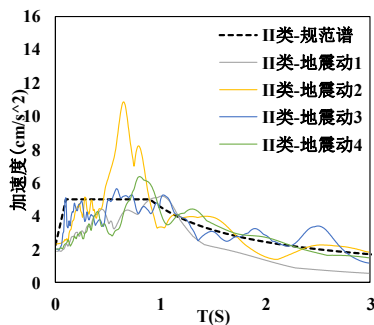
式中 w_i 为结构 i 层以上重量占总重量之比, C_i 为第 i 层层剪力系数; $Q_{1,y}$ 为基底剪力, 考虑为结构总重力的0.2倍^[17]; Q_i 为第 i 层地震层剪力; T_1 为结构基本周期, 根据迭代计算确定。

假设性能极限状态所对应的目标层间位移角为1/250, 通过屈服承载力和位移角可求出SSS模型各层的屈服刚度。在此基础上, 考虑结构的竖向不规则性对层屈服承载力和层位移角进行不同程度的调整, 构建了四个上部或下部楼层刚度削弱的非标准模型 (USS、UUS、LSS、LLS), 具体信息见表1。

由于地震动的频谱特性会影响结构变形分布, 选择了两类地震动进行对比分析。I类地震动的选取考虑了7度罕遇地震, 场地类别II, 地震分组第一组的设计响应谱, 反映短周期成分主导的地震动。II类地震动的选取考虑了7度罕遇地震, 场地类别IV, 地震分组第二组的设计响应谱, 反映长周期成分主导的地震动。每类地震动各选取4条地震波, 8条地震波均选自FEMA-440^[17], 具体信息见表2。图3绘制了I、II类地震动的加速度响应谱和相应的设计响应谱, 其中每条地震动响应谱在SSS模型一阶固有周期处进行了归一化处理。



(a) I类地震动加速度谱



(b) II类地震动加速度谱

图3 地震动加速度谱

表1 多质点模型参数

楼层	标准模型 (SSS)		USS		UUS		LSS		LLS	
	层剪力	层变形	层剪力	层变形	层剪力	层变形	层剪力	层变形	层剪力	层变形
5	3485.8	0.004	0.855	1	0.876	1	1.009	1	1.025	1.5
4	5723.9	0.004	0.891	1	0.906	1.125	0.969	1	0.979	1.375
3	7512.7	0.004	0.928	1	0.938	1.25	0.929	1	0.936	1.25
2	8928.3	0.004	0.964	1	0.97	1.375	0.89	1	0.893	1.125
1	10000	0.004	1	1	1	1.5	0.85	1	0.85	1

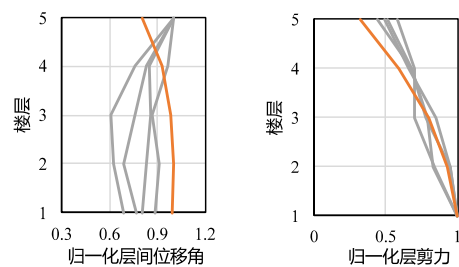
注: 层剪力单位为kN, 层变形单位为m。假设标准模型层剪力和层变形为1, 其余模型均在标准模型基础上进行折减; U和L型分别表示上和下部层刚度削弱。

表2 地震信息

地震种类	编号	时间	名称	震级 (Ms)	台站	PGA (cm/s ²)
I类	1	1999	Kocaeli, Turkey	7.8	BOL2	755.9
	2	1994	Mt Wilson, CIT Seismic Station	6.8	San Gabriel	228.5
	3	1987	Whittier Narrows	6.1	Downey, County Maintenance	193.2
	4	1994	Northridge	6.8	Los Angeles, N. Westmoreland	393.3
II类	1	1989	Loma Prieta	7.1	Los Gatos	704
	2	1989	Loma Prieta	7.1	Foster City	277.6
	3	1992	Landers	7.5	Palm Springs, Airport	87.2
	4	1989	Loma Prieta	7.1	San Francisco, Pacific Heights	60.2

2.2 地震层剪力分布模式

假设SSS模型的响应位移分布符合结构一阶模态向量, 可以得到相应的层间位移角分布和层间剪力分布。考虑高阶模态对结构变形的影响, 对SSS模型进行时程分析, 取出最大层间位移角达到 θ 1时的各层层间位移角及层间剪力并归一化, 得到反映高阶模态影响的层间位移角及层间剪力分布。图4中橙线和灰线分别表示仅考虑一阶模态和进一步考虑高阶模态的层间位移角和层间剪力分布。



(a) 层间位移角 (b) 层间剪力

图4 I类地震动下SSS模型层间位移角和层剪力分布

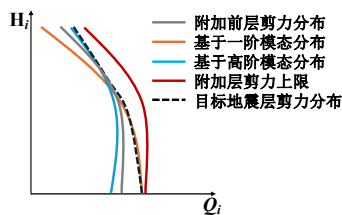


图5 目标地震层剪力分布

由图4可知高阶模态影响下结构的层间位移角和层剪力分布与仅考虑一阶模态时存在明显偏离。结构上部楼层的层剪力在高阶模态影响下偏大，由于上部楼层刚度在设计时因对高阶模态的影响考虑不足而偏小，导致上部楼层的层间位移角偏大。因此需要在设计附加刚度时对上部楼层充分考虑高阶模态的影响，适当放大上部楼层的地震层剪力。

同时考虑一阶振型和高阶振型的影响，可利用式(11)–(12)评价结构的层间地震剪力分布。其中 $u_{j,1,s0}$ 为结构一阶模态向量的归一化结果，可通过结构模态分析获得； $d_{j,1,s0}$ 为结构达到目标性能极限时第j层位移的归一化结果，可通过时程分析获得；c为附加刚度上限值参数。基于 $u_{j,1,s0}$ 和 $d_{j,1,s0}$ 获得的 α_i 分别反映了仅考虑一阶振型和进一步考虑高阶振型时的层间剪力分布。

$$\alpha_i = \begin{cases} \sum_{j=i}^N u_{j,1,s0} & (j = 1, 2, \dots, N) \\ \sum_{j=i}^N d_{j,1,s0} & (j = 1, 2, \dots, N) \end{cases} \quad (11)$$

$$Q_{i,l,s1} = (1+c)\alpha_i \min(Q_{i,l,s0}/\alpha_i) \quad (12)$$

图5中橙线和蓝线分别表示仅考虑一阶振型和进一步考虑高阶振型时的层间剪力分布。灰线代表未附加刚度前结构S0的层间剪力分布。红线代表附加刚度后各层间剪力可能达到的上限，可通过c值进行调节，橙线和蓝线均不超过红线。黑线是附加刚度后结构S1的层间剪力目标分布，本研究中取为橙线和蓝线的外包线。

2.3 层阻尼系数分布模式

黏弹性阻尼器在通过附加刚度改善结构变形均匀性的基础上，进一步通过附加阻尼来提高结构的耗能能力。如图6所示，在结构层间变形均匀分布的前提下，使各层阻尼比均匀分布，有利于充分发挥阻尼器的耗能作用。在结构各层阻尼比均匀分布的假设下，基于等效阻尼比的定义，根据各层应变能与结构总应变能的比例关系即可确定阻尼分配系数 β_i ，如式(13)所示。

$$\beta_i = (k_{i,s0} + k_{di})(h_i\theta_i)^2 / \sum_i (k_{i,s0} + k_{di})(h_i\theta_i)^2 \quad (13)$$

3 变形均匀性和抗震性能变化评估

分别考虑表1中的5种模型作为S0模型，进行模态分析和时程分析，将结果代入式(12)和(13)计算层间地震剪力 $Q_{i,1,s1}$ 和阻

尼分配系数 β_i ，代入式(1)和式(2)、(3)，即可获得模型各层的附加刚度 k_{di} 和阻尼 c_{di} 。在时程分析中，输入地震动分别考虑表2给出的两类8条地震动。

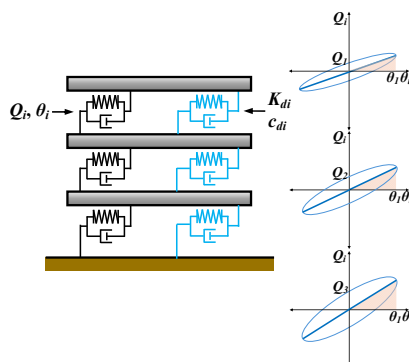


图6 考虑均匀阻尼比的阻尼系数分布

对附加刚度和阻尼前后的5种S0和S1模型分别输入设计时考虑的地震动进行增量动力分析，获得达到目标性能极限状态时的各层位移和需求地震强度。进一步利用式(4)–(6)和式(7)计算变形均匀系数变化率 k_u 和抗震性能变化率 k_s 。

3.1 变形均匀性

在同时附加刚度和阻尼前后，5种模型在目标性能极限状态下的层间位移角分布如图7和8所示。附加刚度和阻尼前后，所有模型在两类地震动下的变形均匀性均有所改善。当附加刚度上限值参数c取10%时，在部分模型中改善效果稍差。当c取30%和50%时，改善效果更为明显，且两种情况下差别不大。对于标准模型SSS和层刚度削弱不太明显的LSS、USS模型，附加刚度和阻尼后层间位移角分布基本达到均匀；对于层刚度削弱明显的LLS、UUS模型，附加刚度和阻尼后层间位移角分布也有明显改善。附加刚度和阻尼前后，在I类短周期地震动下，上部削弱的USS、UUS模型层间位移角分布均匀性相对较差，下部削弱的LSS、LLS模型均匀性相对较好。在II类长周期地震动下，则是上部削弱模型的均匀性相对较好。

图9对比了5种模型在两类地震动下，考虑c的不同取值，在仅附加刚度和同时附加刚度阻尼时的变形均匀系数变化率。总体而言，削弱较为严重的LLS、UUS模型的变形均匀性改善效果相对明显。I类地震动下变形均匀性的改善效果好于II类地震动。在I类地震动下，上部削弱模型USS、UUS的改善效果相对更明显。对于I类地震动下削弱较为严重的LLS、UUS模型，同时附加刚度和阻尼的改善效果好于仅附加刚度时的改善效果。

3.2 抗震性能变化率

图10对比了两类地震作用下，5种结构模型的抗震性能变化率。总体而言，随着c的增加，附加刚度和阻尼带来的结构抗震性能提升更加明显。I类地震动下的抗震性能提升要好于II类地震动。上部削弱明显的UUS模型的抗震性能提升最显著，而下部削弱明显的LLS模型的抗震性能提升最不明显。对于I类地震动下的上部削弱模型，相比仅附加刚度的情况，进一步附加阻尼能够更有效提升结构的抗震性能。

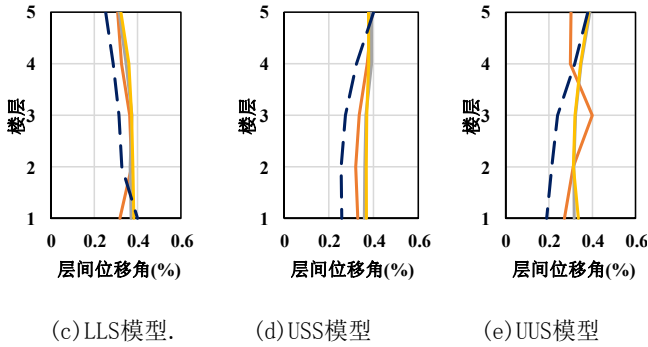
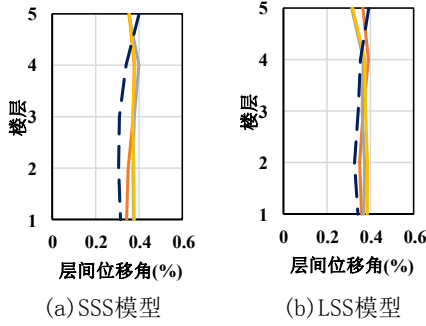


图7 I类地震作用时结构响应对比

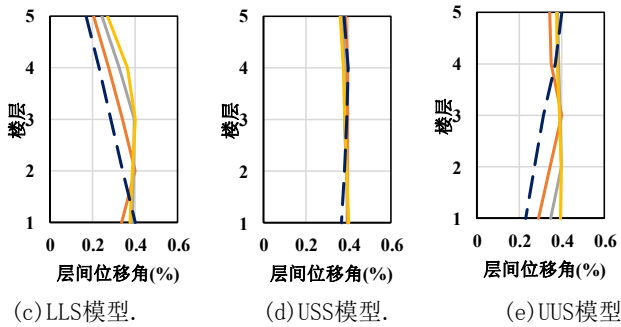
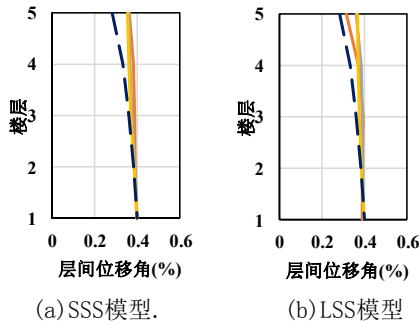


图8 II类地震作用时结构响应对比

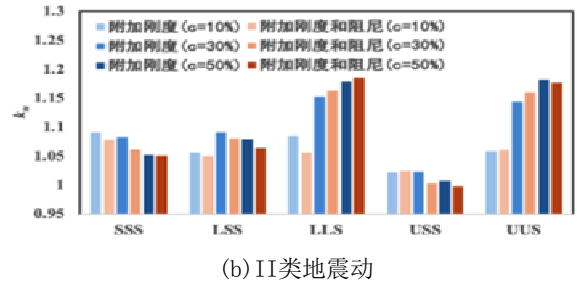
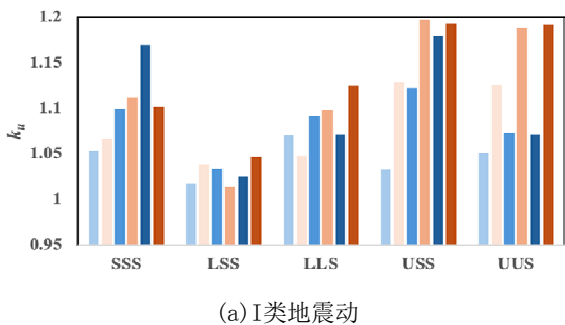


图9 变形均匀系数对比

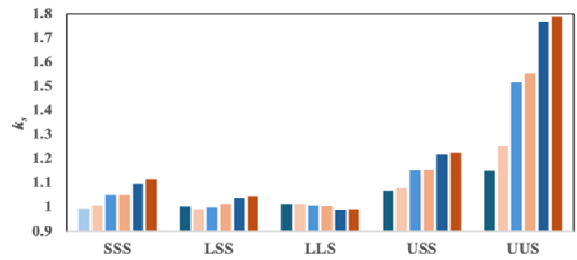
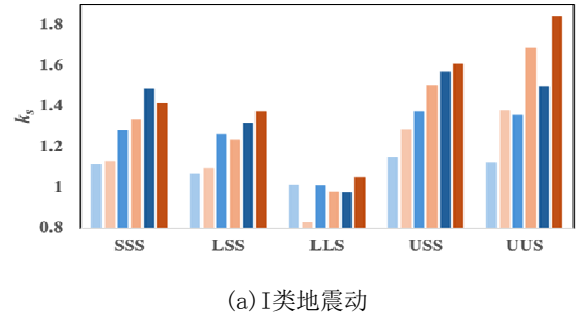


图10 抗震性能变化率对比

4 结论

本文提出了一种基于附加刚度和阻尼提升中低层钢筋混凝土框架结构整体抗震性能的实用方法。考虑高阶模态的影响,通过时程分析确定结构的层位移和层剪力分布。针对多种竖向不规则模型,选取两类不同的地震动验证所提方法的准确性有效性。主要结论总结如下:

(1) 利用所提方法可以直接确定结构实现目标需求时所需附加刚度和阻尼,无需进行复杂的迭代计算,并且精度较高。

(2) 对于受高阶模态影响较大的不同类型结构,通过方法仍然可以得到合理的参数估计。

(3) 在不同类型地震激励下,附加刚度和阻尼能够有效改善结构变形均匀性,使各层层间位移角基本相同。特别对上部削弱的结构改善效果最明显。

(4) 相比于单独附加刚度,额外的附加阻尼对上部削弱模型的抗震性能提升效果明显,整体抗震性能最多可提高约23.4%。

[参考文献]

[1]周福霖.工程结构减震控制[M].北京:地震出版社,2003.
[2]周云.粘弹性阻尼减震结构设计[M].武汉:武汉理工大学出版社,2006.

- [3]XuWZ,Wang Y,Guo HR, et al. Theoretical and experimental investigation on the seismic performance of a novel variable-damping viscous fluid damper[J].Journal of Building Engineering,2022,53:104537.
- [4]Lu Z,Wang ZX,Zhou Y,et al. Nonlinear dissipative devices in structural vibration control: A review[J]. Journal of Sound and Vibration,2018,423:18-49.
- [5]Hao LF,Liu MC, Li JX, et al. Multi-performance oriented seismic design of viscoelastic dampers for structural retrofitting[J].Journal of Building Engineering,2024,86:108657.
- [6]何文福,康嘉志,刘文燕,等.装配整体式黏滞阻尼器减震框架试验及参数分析研究[J].地震工程与工程振动,2023,43(02):103-112.
- [7]缪志伟,杨祎环,丛戎.基于黏滞阻尼器的RC框架抗震性能提升设计[J].东南大学学报(自然科学版),2023,53(2):210-217.
- [8]ZhangRF,WangC,PanC,et al.Simplified design of elastoplastic structures with metallic yielding dampers based on the concept of uniform damping ratio. Engineering Structures, 2016,176:734-745.
- [9]Aliakbari F.,Sadegh G.and Ali A.An energy based method for seismic design of frame structures equipped with metallic yielding dampers considering uniform inter-story drift concept[J].Engineering Structures,2020,205:110114.
- [10]蔡正,潘文,周强,等.基于混合消能减震技术非对称双塔连体结构抗震性能研究[J].振动与冲击,2024,43(06):288-300.
- [11]LavanO.andRobertL.Optimal design of supplemental viscous dampers for irregular shear-frames in the presence of yielding[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005,34(8):889-907.
- [12]Lavan O.and Oded A. Simultaneous topology and sizing optimization of viscous dampers in seismic retrofitting of 3D irregular frame structures[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2014,43(9):1325-1342.
- [13]Landi L.,Filippo C.,and Pier P.Effectiveness of different distributions of viscous damping coefficients for the seismic retrofit of regular and irregular RC frames[J]. Engineering Structures,2015,100:79-93.
- [14]王维凝,曹胜涛,肖川,等.黏滞阻尼器消能减震结构在遭遇地震下附加阻尼比计算方法对比研究[J].建筑科学,2019,35(03):51-58.
- [15]郝霖霏,前田匡树,谭平等.基于性能冗余率的震损混凝土结构残余抗震性能评价[J].建筑结构学报,2020,41(08):29-39.
- [16]Izumi N., Kashima K., Kusunoki K., et al. Outline of AIJ standard for lateral load-carrying capacity calculation of reinforced concrete structures (draft) [J]. Concrete Journal, 2016,54:1155-1161.
- [17]FEMA-440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures[R].Department of Homeland Security, Washington,DC,2005.

作者简介:

丘涛(1999--),男,汉族,广东韶关人,硕士研究生,研究方向:结构消能减震。

*通讯作者:

刘春宇(1989--),男,汉族,黑龙江省佳木斯市人,硕士,高级工程师,研究方向:主要从事建筑结构工程方面的设计。