

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210301002

RC 减震结构中震设计简化分析研究*

马振霄¹, 温文露¹, 管庆松¹, 潘文², 陈华霆³

(1. 震安科技股份有限公司, 云南昆明 650217; 2. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南昆明 650233;
3. 广州大学减震控制与结构安全国家重点实验室(培育), 广东广州 510405)

摘要: 为探究中震设计与现行小震设计在性能指标上的差异, 首先分析了整体中震设计与小震设计在概念上的区别, 对比了这两种理念下结构构件的内力放大情况, 进而从宏观上把握不同设计方法对结构整体和构件层面的影响; 其次基于加速度设计反应谱和位移设计反应谱推导了中震作用下单自由度简化体系总等效阻尼的表达式, 理论分析了中震等效阻尼与结构层间位移、设防烈度、结构周期及“周期比”的关系, 并进行了简单的证明; 给出不同设防烈度下该简化体系的中震总等效阻尼比和刚度的速查表格, 便于快速评估多层规则结构的中震阻尼和刚度需求; 最后结合黏滞阻尼器(1-FVD)、摩擦阻尼器(2-FD)和软钢阻尼器(3-MYD)三个算例对本文提出的中震阻尼和刚度需求评估方法予以展示总结。结果表明, 现行小震设计或可满足中震设计的性能要求, 其中一、二级一般框架结构的柱构件基本满足中震不屈, 一级底层柱满足中震弹性, 一级剪力墙构件加强区剪力满足中震不屈; 值得注意的是, 对低设防烈度、长周期结构, 中震附加阻尼比会出现负值和局部震荡现象; 通过同时调整附加阻尼和结构刚度进行中震设计的策略相对合理可行; 项目前期评估时可通过插值速查表格的方法初步确定附加阻尼比, 进而指导减震方案。中震设计的理论分析和工程应用尚显不足, “强柱弱梁”“强剪弱弯”等基本设计原则的满足性问题有待进一步研究。

关键词: 反应谱; 内力调整; 中震弹性设计; 中震不屈设计; 减震

中图分类号: TU318 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1304-10

Simplified Analysis and Study on Moderate Earthquake Design of RC Energy Dissipation Structure

MA Zhenxiao¹, WEN Wenlu¹, GUAN Qingsong¹, PAN Wen², CHEN Huating³

(1. QuakeSafe Technologies Co., Ltd., Kunming 650217, China; 2. School of Construction Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650233, China; 3. State Key Lab for Seismic Reduction Control & Structural Safety (Cultivation), Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: To explore the difference in performance indexes between the medium earthquake design and the current small earthquake design, the conceptual differences between the overall moderate earthquake design and the small earthquake design are analyzed, and the internal force amplification of the structural components under the two concepts is compared firstly. Then, the influence of different design methods on the whole structure and the components is grasped from a macro perspective. Secondly, based on the acceleration design response spectrum and displacement design response spectrum, the expression of the total equivalent damping of the simplified single degree of freedom system

* 收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-08-23

基金项目: 云南省科技厅重点研发计划项目(202003AC100001)、国家自然科学基金委员会青年项目(51808154)资助

作者简介: 马振霄(1993—), 男, 助理工程师, 硕士。主要从事结构减隔震研究。E-mail: mazx@ynzajz.com

under the action of the moderate earthquake is derived, and the relationship between the equivalent damping of the moderate earthquake and inter-layer displacement, intensity of fortification, structure period and ‘period ratio’ is theoretically analyzed, thereafter a simple proof is carried out. The quick reference table cases under different fortification intensities are given to facilitate the rapid evaluation of the damping and stiffness requirements of the regular multi-layer structure. Finally, three examples based on fluid viscous damper (1-FVD), friction damper (2-FD) and mild steel damper (3-MYD) are utilized to demonstrate and summarize the moderate earthquake damping and stiffness demand assessment methods proposed in this paper. The results show that the current small earthquake design may meet the performance requirements of the moderate earthquake design. The column members of the first- and second-level general frame structures can basically meet the requirements of moderate earthquake design, the first-level floor column meets the moderate earthquake elasticity, and the shear force of the reinforced area of the first-level shear wall member can meet the performance requirements of the moderate earthquake design. It’s worth noting that negative values and local oscillations of damping ratio will occur under the action of a moderate earthquake for low fortification intensity and long-periodic structure. By adjusting the additional damping and structural stiffness at the same time, the strategy of moderate earthquake design is relatively reasonable and feasible. The additional damping ratio can be initially determined by interpolating the reference table during the pre-project evaluation phase, thus guiding seismic energy dissipation scheme design. The theoretical analysis and engineering application of moderate earthquake design are still insufficient, and the problem of satisfying the basic design principles such as ‘strong column and weak beam’, ‘strong shear and weak bending’ needs to be further studied.

Keywords: response spectrum; internal force adjustment; elastic design under moderate earthquake; non-yielding design under moderate earthquake; energy dissipation

引 言

随着复杂、超限结构的增多,国内逐渐提出性能化设计,即对整体结构或关键部位、构件补充中震验算的思想^[1-3]。美国 ASCE 7-10^[4]、新西兰 AS 1170.4—2007^[5]和欧洲 EN 1998-1 EC8^[6]等均较早采用相当于我国中震水平的地震力进行抗震设计。另外,减隔震技术的积累和发展也为结构性能化设计提供了更多选择和安全储备^[7-23]。

小震作用下,结构构件应处于弹性状态,荷载分项系数和材料分项系数均按规范取值。设计时,分别计算重力和地震作用下构件的内力标准值,与其他作用下构件内力标准值组合后,基于“强柱弱梁、强剪弱弯”等基本原则调整构件的组合内力设计值。目前,中震设计方法多用于复杂、超限结构的复核算,针对普通结构的应用尚不普遍。

本文首先从构件内力调整层面分析了小震设计和整体中震设计的差异;然后考虑减震技术的有

利影响,基于加速度设计反应谱和位移设计反应谱,推导了中震作用下单自由度简化体系层间位移与等效附加阻尼、抗侧刚度的关系;最后给出了中震设计时结构所需总等效阻尼比和抗侧刚度的参考表格。项目前期评估时,可通过插值本文参考表格的方法初步确定附加阻尼比,进而指导减震方案。

1 中震设计

1.1 中震设计概念

通常所说的中震设计一般有两种思路:中震弹性或中震不屈(服)。设防烈度下的地震动参数输入,不进行“强柱弱梁、强剪弱弯”调整,见表1。

地震作用是影响结构设计的重要因素。我国建筑工程类规范采用水平地震影响系数来表征地震作用,其水平地震影响系数最大值 α_{\max} 由式(1)定义:

$$\alpha_{\max} = (A_{\max}/g) \times \beta_{\max} \quad (1)$$

表1 小、中震设计参数

Table 1 Design parameters for small and medium earthquake

设计参数	小震弹性	中震弹性	中震不屈
水平地震影响系数最大值	小震烈度	设防烈度	设防烈度
内力调整系数	按抗震等级调整	1.0	1.0
承载力抗震调整系数	按抗规 ^[1] 5.4.2条取值	按抗规 ^[1] 5.4.2条取值	1.0
荷载分项系数	按抗规 ^[1] 5.4.1条取值	按抗规 ^[1] 5.4.1条取值	1.0
材料强度取值	设计值	设计值	标准值

式中, A_{\max} 为地面加速度最大值; g 为重力加速度; β_{\max} 为动力放大系数, 基本沿用 2.25。

表 2 给出小、中震的水平地震影响系数最大值 α_{\max} 对比情况。结合表 1~2 可以看出: 中震弹性设计的内力设计值由于不考虑内力调整, 保留荷载分项系数、材料分项系数和承载力抗震调整系数(材料分项系数和承载力抗震调整系数属于结构构件的抗力), 其值较小震弹性组合内力设计值放大了约 2.86 倍; 中震不屈服设计同样不考虑内力调整, 但材料强度采用标准值(混凝土约取为设计值的 1.4 倍), 且不考虑荷载分项系数(约取 1.3)和承载力抗震调整系数(γ_{RE} 约取不同构件和受力状态的中值 0.8), 其值较小震弹性设计的组合内力设计值放大约 2.86/1.4/1.3/0.8=1.96 倍。

表2 小、中震水平地震影响系数最大值

Table 2 The maximum value of the horizontal earthquake influence coefficient under small and medium earthquakes

地震设防烈度	6	7	7.5	8	8.5	9
小震	0.04	0.08	0.12	0.16	0.24	0.32
中震	0.12	0.23	0.34	0.45	0.68	0.90
中震放大倍数	3.00	2.88	2.83	2.81	2.83	2.81

1.2 小、中震设计内力放大情况

表 3 给出一般框架柱和剪力墙在小震下的内力调整情况。柱构件需要先进行“强柱弱梁”调整, “强剪弱弯”调整时采用的弯矩是经过“强柱弱梁”放大的, 设计剪力相当于要经过两次放大。

表3 框架柱和剪力墙构件内力调整系数和荷载分项系数

Table 3 Internal force adjustment coefficients and partial load factors of frame columns and shear wall members

构件	调整项目	二级		一级	
		弯矩	剪力	弯矩	剪力
框架柱	强柱 非底层	1.5	—	1.7	—
	弱梁 底层	1.5	—	1.7	—
	强剪弱弯	—	1.3	—	1.5
	荷载分项系数	1.3			
剪力墙	非加强区	1.0	1.0	1.2	1.2
	加强区	1.0	1.4	1.0	1.6
	荷载分项系数	1.3			

注: 本表仅给出一般框架柱和剪力墙构件的内力调整系数, 不考虑角柱放大等其他特殊情况

表 4 给出一、二级一般框架柱和剪力墙分别在小、中震设计时的内力放大情况。从表 4 可以看出, 中震弹性设计显然高于中震不屈的性能要求; 一、二级框架结构的一般框架柱构件基本满足中震不屈的性能要求; 一级底层柱剪力满足中震弹性性能要求; 一级加强区剪力墙构件的剪力满足中震不屈性能要求。

表4 一般框架柱和剪力墙构件内力放大情况

Table 4 Internal force amplification of general frame columns and shear wall components

构件	调整项目	二级		一级		中震不屈	中震弹性
		弯矩	剪力	弯矩	剪力		
框架柱	非底层	1.95	2.54	2.21	3.32	1.96	2.86
	底层	1.95	2.54	2.21	3.32		
剪力墙	非加强区	1.30	1.30	1.56	1.56		
	加强区	1.30	1.82	1.30	2.08		

2 基于设计反应谱的位移分析

随着减隔震技术和减隔震设计方法的发展, 附加阻尼、附加抗侧刚度逐渐成为调整结构的有效途径之一。我国对不同结构类型的小震最不利层间位移角有明确规定, 对中震层间位移角的取值却鲜有论及。本节研究附加阻尼、附加抗侧刚度同时增大结构抗侧刚度时, 以层间位移(角)为代表的结构整体指标在中震作用下的表现。

中震作用下结构一般会进入非弹性状态, 但非弹性变形或结构体系的损伤控制在可修复范围^[1]。

参考韩小雷等^[20-22]的研究成果,此时可近似符合弹性假设,即结构位移大小与地震动的加速度峰值成正比,满足式(2):

$$\frac{F_{小}}{F_{中}} = \frac{\alpha_{小}}{\alpha_{中}} = \frac{H[\theta_{e小}]}{H[\theta_{e中}]} = \frac{[\theta_{e小}]}{[\theta_{e中}]} \quad (2)$$

式中, $F_{小}$ 和 $F_{中}$ 分别为小震和中震作用力; $\alpha_{小}$ 和 $\alpha_{中}$ 分别为小震和中震作用下的地震影响系数; H 为结构层高; $[\theta_{e小}]$ 和 $[\theta_{e中}]$ 分别为小震和中震作用下结构弹性层间位移角。为表述方便,将中震层间位移与小震层间位移的比值定义为位移比。

2.1 仅附加阻尼的情形

减震设计时通常采用黏滞阻尼器等装置来增大结构的阻尼。针对此类情形,可根据式(2)和设计反应谱所采用的地震影响系数、阻尼调整系数表达式反推出结构的总等效阻尼比。图1给出抗规^[1]用地震影响系数曲线。

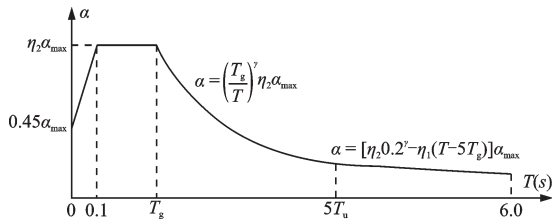


图1 抗规^[1]用地震影响系数曲线

Fig.1 Earthquake influence coefficient curve used in GB 50011—2010^[1]

当结构基本周期在 $[0.1, 5T_g]$ 时,由式(1)有:

$$\frac{\alpha_{小}}{\alpha_{中}} = \frac{[\theta_{e小}]}{[\theta_{e中}]} \quad (3)$$

带入设计反应谱函数经变换有(仅附加阻尼时结构周期不变,基于位移设计反应谱和加速度设计反应谱的推导结果相同;仅考虑结构周期在 $5T_g$ 以内的情形):

$$\eta_{2中} = \begin{cases} \frac{[\theta_{e中}]\eta_{2小}\alpha_{max小}}{[\theta_{e小}]\alpha_{max中}}, & T \in [0.1, T_g] \\ \frac{[\theta_{e中}]\eta_{2小}\alpha_{max小}}{[\theta_{e小}]\alpha_{max中}} \cdot \left(\frac{T_g}{T}\right)^{\gamma_{小}-\gamma_{中}}, & T \in (T_g, 5T_g] \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\eta_{2小}$ 和 $\eta_{2中}$ 分别为小、中震的阻尼调整系数; $\alpha_{max小}$ 和 $\alpha_{max中}$ 分别为小、中震的最大地震影响系数; T_g 和 T 分别为特征周期和结构周期。

阻尼调整系数 η_2 和曲线下降段的衰减指数 γ 分别按式(5)和式(6)确定:

$$\eta_2 = 1 + \frac{0.05 - \zeta}{0.08 + 1.6\zeta} \quad (5)$$

式中, ζ 为原结构阻尼比,钢筋混凝土结构统一取 0.05。

$$\gamma = 0.9 + \frac{0.05 - \zeta}{0.3 + 6\zeta} \quad (6)$$

对式(5)做一转换,可得:

$$\zeta_{中} = \frac{0.13 - 0.08\eta_{2中}}{1.6\eta_{2中} - 0.6} \quad (7)$$

式中, $\zeta_{中}$ 为中震作用下的结构所需总等效阻尼比,联立式(4)、(6)、(7)即可求解 $\zeta_{中}$ 。

基于简单自由度体系和中震近弹性假定,图2给出选取不同中震层间位移角限值时,按式(3)~(7)计算钢筋混凝土框架结构在中震作用下所需的总等效阻尼比。图2横坐标为中震作用下不同层间位移角(上、下限值分别取为 2.86/550 和 1/400,其中 1/550 为框架结构小震层间位移角限值; 1/400 为文献[23]隔震层以上框架结构中震层间位移角限值)与 1/550 的比值。可以看出:(1)地震力放大倍数越高,中震阻尼比需求越小;(2)对仅附加阻尼的情形,中震层间位移角限值取到 1/250 时相对容易实现;(3)结构周期 $T \in [0.1, T_g]$ 在加速度敏感平台段相比 $T \in (T_g, 5T_g]$ 在速度敏感下降段更容易实现预期的中震层间位移角需求;同一层间位移角比值下结构周期越大,阻尼比需求越高(亦即结构越柔,其自身阻尼比越小,这与现代高层、超高层结构实测和试验阻尼比结果规律相符)。

另外,当层间位移角过高或者小震层间位移角富裕度不足(低设防烈度下, $T > 3T_g$) 时,结构总等效阻尼比会出现负值和局部震荡现象,如图2(c)所示。实际上, $T > 3T_g$ 时已属高柔结构的范畴,该基于单自由度体系的推论的适用性可能已受限。

下文从另一个角度,即假定中震层间位移角限值和阻尼比需求反推小震层间位移角,来进一步分析当满足特定中震设计需求时,基于现行小震设计的层间位移角富裕度问题。

图3给出选取不同小震层间位移角,中震层间位移角限值 1/400 时的阻尼需求情况。可以看出:(1)对仅附加阻尼的情形,小震层间位移角取 1/950 时,中震 1/400 的层间位移角才相对容易实现;(2)设防烈度较高时,中震层间位移角的限制或者

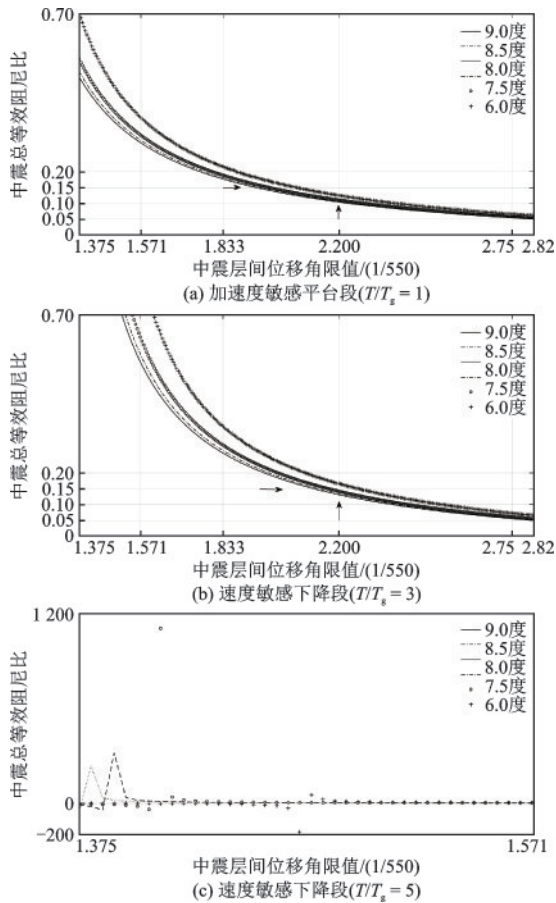


图2 不同设防烈度下中震层间位移角限值不同时阻尼需求
Fig.2 Damping demand when the limit of inter-story drift of the moderate earthquakes under different seismic fortification intensities is different

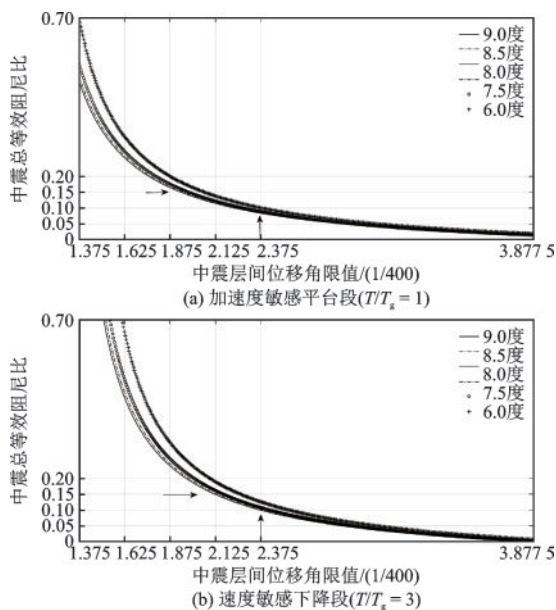


图3 不同设防烈度下小震层间位移角限值不同时阻尼需求
Fig.3 Damping demand when the limit of inter-story drift of the small earthquakes under different seismic fortification intensities is different

说小震层间位移角的富裕度可适度放宽。

2.2 附加阻尼同时增大结构抗侧刚度的情形

本节研究附加阻尼同时增强结构抗侧刚度的情形。增强抗侧刚度后结构周期缩短,基于加速度设计反应谱的地震力增大(设计反应谱下降段时),然后又通过附加阻尼降低,会高估结构附加阻尼的需求。为避免上述问题,依式(8)将加速度设计反应谱转化成位移设计反应谱进行分析:

$$D = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 A \quad (8)$$

式中, A 和 D 分别为加速度谱值和位移谱值。

式(3)可表示为:

$$\frac{\alpha_{\text{小}}}{\alpha_{\text{中}}} \cdot \left(\frac{T_{\text{小}}}{T_{\text{中}}}\right)^2 = \frac{[\theta_{e\text{小}}]}{[\theta_{e\text{中}}]} \quad (9)$$

同理,基于弹性假设可得到基于位移设计反应谱的阻尼调整系数:

$$\eta_{2\text{中}} = \begin{cases} a \cdot b^2, & T_{\text{中}} \in [0.1, T_g] \\ a \cdot b^2 \cdot c^{\gamma_{\text{小}}}, & T_{\text{中}} \in [0.1, T_g] \text{ 且 } T_{\text{小}} \in (T_g, 5T_g] \\ a \cdot b^2 \cdot c^{\gamma_{\text{小}}} \cdot d^{-\gamma_{\text{中}}}, & T_{\text{中}} \in (T_g, 5T_g] \end{cases}$$

$$a = \frac{[\theta_{e\text{中}}] \eta_{2\text{小}} \alpha_{\text{max小}}}{[\theta_{e\text{小}}] \alpha_{\text{max中}}}, b = \frac{T_{\text{小}}}{T_{\text{中}}}, c = \frac{T_g}{T_{\text{小}}}, d = \frac{T_g}{T_{\text{中}}} \quad (10)$$

式中, $T_{\text{小}}$ 和 $T_{\text{中}}$ 分别为附加刚度前后结构的周期; $\gamma_{\text{小}}$ 和 $\gamma_{\text{中}}$ 分别为小震和中震曲线下降段的衰减指数。

联立式(10)、式(7)即可迭代求解中震下结构阻尼比。刚度变化后,阻尼表达式更为复杂:在加速度敏感段,中震总等效阻尼比与刚度调整前后结构周期之间的比值(为表述方便将调整后结构周期和调整前结构周期的比值称为“周期比” $T_{\text{中}}/T_{\text{小}}$,即 $1/b$,用以表征附加刚度增强的程度)有关;在速度敏感段,还与特征周期和调整前、后结构周期的比值(c, d)相关。

图4给出设防烈度8度中震总等效阻尼比随 $T_{\text{中}}/T_{\text{小}}$ 、中震层间位移角限值与1/550比值的变化情况。从图4可以看出:(1) $T_{\text{中}}/T_{\text{小}}$ 越小,所需附加阻尼越小,即结构抗侧刚度越大,越容易实现中震性能需求;(2)跟2.1节类似,结构周期落在速度敏感段时对阻尼需求更高。

图5为 $T_{\text{中}}/T_{\text{小}}$ 为0.85,不同设防烈度下实现中震层间位移角限值的总等效阻尼比。比较图5与图

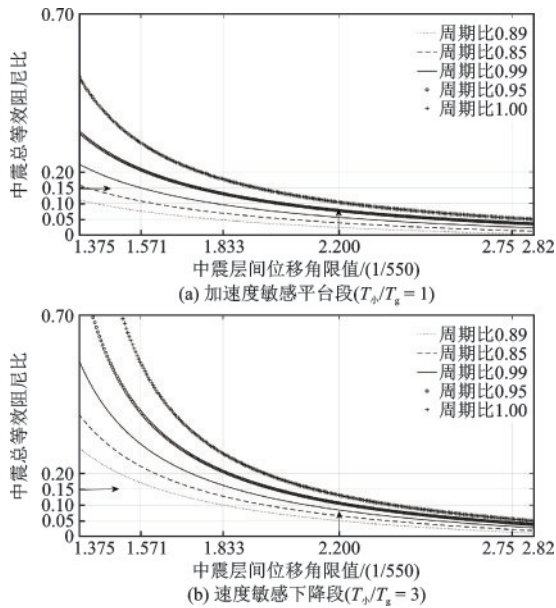


图4 设防烈度8度下中震层间位移角限值不同时阻尼需求
Fig.4 Damping demand when the limit of the displacement angle of the moderate earthquakes is different under the seismic fortification intensity of 8 degree

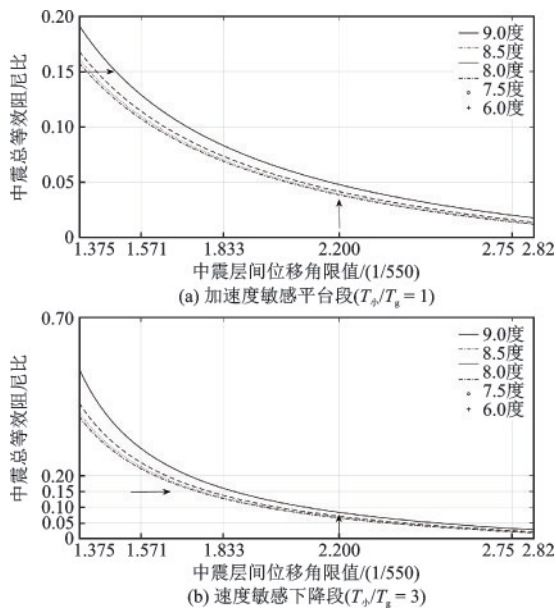


图5 中震总等效阻尼比与抗震设防烈度的关系
($T_d/T_{d0} = 0.85$)

Fig.5 The relationship between the total equivalent damping ratio of the moderate earthquake and the seismic fortification intensity ($T_d/T_{d0} = 0.85$)

2可以发现:(1)加强结构抗侧刚度,同一设防烈度下对阻尼的需求明显减小;(2)仅附加阻尼比时中震层间位移角取1/250才相对容易实现,加强结构抗侧刚度后可放松至1/300,如果小震层间位移角有一定的富余(小于1/550),可取到1/350。

图6给出 T_d/T_{d0} 为0.85,设防烈度分别为6度和8度时,中震设计总等效阻尼比随小震设计结构周期的变化情况。同一设防烈度、 T_d/T_{d0} 和位移比条件下, T_{d0}/T_g 越小,中震下附加阻尼比要求越低,即是在小震设计结构周期落在反应谱平台段时,结构响应对阻尼比更为敏感,是符合实际情况的。

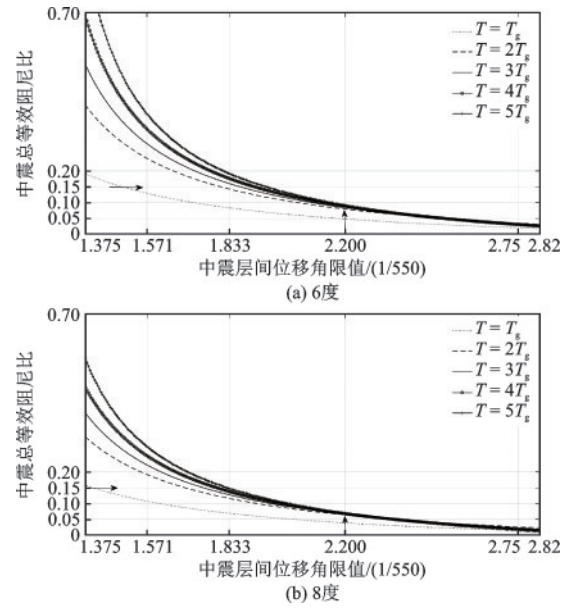


图6 中震总等效阻尼比与结构周期的关系($T_d/T_{d0} = 0.85$)
Fig.6 The relationship between the total equivalent damping ratio of the moderate earthquake and the structure period ($T_d/T_{d0} = 0.85$)

2.3 整体中震设计阻尼和刚度需求分析

考虑附加阻尼同时增大结构抗侧刚度的情形,表5首先给出小、中震层间位移比对照关系;表6~9分别给出6、7、7.5(8.5)和8(9)度设防时钢筋混凝土结构按中震设计时所需的总等效阻尼比。图7给出预估中震等效阻尼比流程。

因理论推导过程采用无量纲变量,计算得位移比后根据其分布特点于[1.375, 1.571)、[1.571, 1.833]分别插值即可;位移比大于1.833或小于1.375时,需按式(10)、式(7)具体求解。

项目前期评估时可结合小、中震层间位移角的对照表5,根据不同设防烈度和结构调整程度,插值表6~9初步计算中震设计用附加阻尼比(详见下文第3节);然后布置阻尼器方案,并通过时程分析方法复核阻尼比。

从表6~9可以看出:(1)随设防烈度增大,阻尼比需求降低;(2)随 T_d/T_{d0} (附加刚度效果)、 T_{d0}/T_g 的降低,阻尼比需求降低;(3)一定 T_d/T_{d0} 和位移

表5 小、中震层间位移比对照表

Table 5 Comparison table of inter-story drift between small and moderate earthquakes

$1/[\theta_{e小}]$	$1/[\theta_{e中}]$		
	400	350	300
550	1.375	1.571	1.833
560	1.400	1.600	1.867
570	1.425	1.629	1.900
580	1.450	1.657	1.933
590	1.475	1.686	1.967
600	1.500	1.714	2.000
610	1.525	1.743	2.033
620	1.550	1.771	2.067
630	—	1.800	2.100
640	—	1.829	2.133

注:本表仅为示意,实际位移比按设计的小、中震模型的层间位移计算即可

比条件下,中震下的阻尼比需求具有可实现性(表中加粗部分均小于15%,即附加阻尼比在10%以内;斜体部分表示不附加阻尼即可满足)。

限于篇幅,仅给出常见位移比1.375、1.571和

表6 6度设防中震设计总等效阻尼比

Table 6 Total equivalent damping ratio for moderate earthquake design with a seismic fortification intensity of 6

单位:%

$T_{中}/T_{小}$	位移比	$T_{小}/T_g=1.0$			$T_{小}/T_g=1.1$			$T_{小}/T_g=1.2$		
		1.375	1.571	1.833	1.375	1.571	1.833	1.375	1.571	1.833
0.7		6.2	4.0	2.2	7.9	5.3	3.1	9.9	6.8	4.1
0.75		9.2	6.3	3.8	11.8	8.1	5.0	14.7	10.1	6.4
0.8		13.3	9.1	5.8	17.1	11.6	7.4	21.9	14.6	9.3
0.85		19.1	12.9	8.3	25.2	16.6	10.5	31.4	20.0	12.6
0.9		27.7	18.1	11.4	38.3	23.7	14.6	41.5	25.1	15.3
0.95		42.0	25.5	15.6	53.4	30.6	18.2	56.8	31.8	18.7
1		70.0	37.1	21.4	76.2	39.0	22.1	82.8	40.9	22.8

表7 7度设防中震设计总等效阻尼比

Table 7 Total equivalent damping ratio for moderate earthquake design with a seismic fortification intensity of 7

单位:%

$T_{中}/T_{小}$	位移比	$T_{小}/T_g=1.0$			$T_{小}/T_g=1.1$			$T_{小}/T_g=1.2$		
		1.375	1.571	1.833	1.375	1.571	1.833	1.375	1.571	1.833
0.7		5.4	3.5	1.7	7.0	4.6	2.6	8.8	5.9	3.6
0.75		8.2	5.5	3.2	10.4	7.1	4.4	13.0	8.9	5.6
0.8		11.8	8.1	5.0	15.1	10.3	6.6	19.1	12.9	8.3
0.85		16.8	11.4	7.3	21.9	14.6	9.3	27.0	17.6	11.1
0.9		24.0	15.9	10.1	32.4	20.6	12.9	34.8	21.8	13.5
0.95		35.3	22.2	13.8	43.8	26.3	16.0	46.1	27.2	16.4
1		55.5	31.5	18.7	59.5	32.9	19.3	63.7	34.3	19.8

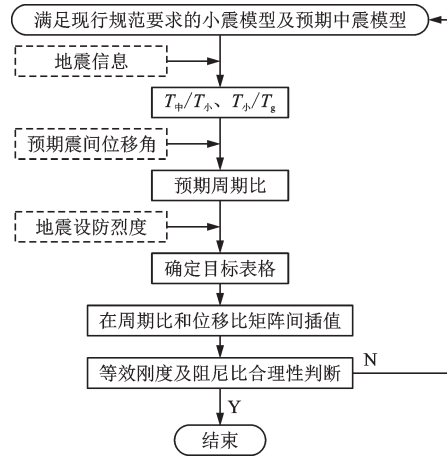


图7 中震等效阻尼比预估流程

Fig.7 Moderate earthquake equivalent damping ratio estimate process

1.833, $T_{小}/T_g \leq 1.2$ ($T_{小}/T_g$ 小于1,及结构周期处于平台段时,取为1即可)下的理论结果,其他从略。实际上以上位移比和 $T_{小}/T_g$ 的范围已囊括了大部分可近似于单质点体系的结构。本文给出的中震阻尼预估方法对多层规则结构具有一定的适用性和参考价值。

表8 7.5度设防中震设计总等效阻尼比

Table 8 Total equivalent damping ratio for moderate earthquake design with a seismic fortification intensity of 7.5

单位: %

$T_{\text{中}}/T_{\text{小}}$	位移比	$T_{\text{小}}/T_{\text{g}}=1.0$			$T_{\text{小}}/T_{\text{g}}=1.1$			$T_{\text{小}}/T_{\text{g}}=1.2$		
		1.375	1.571	1.833	1.375	1.571	1.833	1.375	1.571	1.833
0.7		5.2	3.3	1.6	6.7	4.4	2.5	8.4	5.7	3.4
0.75		7.8	5.2	3.1	10.0	6.8	4.2	12.5	8.6	5.4
0.8		11.3	7.7	4.8	14.5	9.9	6.3	18.3	12.4	7.9
0.85		16.1	10.9	7.0	20.9	14.0	9.0	25.6	16.8	10.7
0.9		22.9	15.2	9.7	30.7	19.7	12.4	32.9	20.8	13.0
0.95		33.4	21.2	13.2	41.1	25.0	15.3	43.2	25.8	15.7
1		51.7	29.9	17.9	55.1	31.2	18.4	58.8	32.4	18.9

表9 8度设防中震设计总等效阻尼比

Table 9 Total equivalent damping ratio for moderate earthquake design with a seismic fortification intensity of 8

单位: %

$T_{\text{中}}/T_{\text{小}}$	位移比	$T_{\text{小}}/T_{\text{g}}=1.0$			$T_{\text{小}}/T_{\text{g}}=1.1$			$T_{\text{小}}/T_{\text{g}}=1.2$		
		1.375	1.571	1.833	1.375	1.571	1.833	1.375	1.571	1.833
0.7		5.0	3.2	1.5	6.6	4.3	2.4	8.2	5.6	3.3
0.75		7.6	5.1	3.0	9.8	6.7	4.1	12.2	8.4	5.3
0.8		11.1	7.6	4.7	14.2	9.7	6.1	17.9	12.1	7.8
0.85		15.7	10.7	6.8	20.4	13.7	8.8	25.0	16.5	10.5
0.9		22.3	14.9	9.5	29.9	19.3	12.2	32.0	20.3	12.7
0.95		32.5	20.7	13.0	39.9	24.4	15.0	41.8	25.2	15.3
1		49.9	29.1	17.5	53.1	30.3	18.0	56.5	31.5	18.5

3 算例示析与理论证明

3.1 算例示析

分别以采用了黏滞阻尼器(1-FVD)、摩擦阻尼器(2-FD)和软钢阻尼器(3-MYD)的工程案例的简化单质点体系进行分析说明。算例其他工况信息见表10。

以表10中的1-FVD为例进行说明,可计算得: $T_{\text{中}}/T_{\text{小}}=0.81$, $T_{\text{小}}/T_{\text{g}}=0.449/0.45=1$ 。预期中震层间位移角为1/400时,可计算得位移比

表10 算例工况信息

Table 10 Working condition information of the calculation examples

算例编号	设防烈度	$[\theta_{\text{e小}}]$	$T_{\text{小}}$	T_{g}	预期 $T_{\text{中}}$
1-FVD	8(0.3g)	1/564	0.449	0.45	0.365
2-FD	8(0.2g)	1/642	0.561	0.65	0.458
3-MYD	8(0.2g)	1/737	0.653	0.65	0.573

$[\theta_{\text{e中}}]/[\theta_{\text{e小}}]=(1/400)/(1/564)=1.41$,因此可根据以上数据分别插值表8位移比在[1.375,1.571]、 $T_{\text{中}}/T_{\text{小}}$ 在(0.8,0.85)的数据,计算总等效阻尼比11.52%,附加阻尼比6.52%。

其他算例结果见表11,其中算例3-MYD得位移比大于1.833,总等效阻尼比可通过联立求解式(10)和式(7)得到。

表11 算例结果统计

Table 11 Results statistics of the calculation examples

算例编号	$T_{\text{中}}/T_{\text{小}}$	$T_{\text{小}}/T_{\text{g}}$	$[\theta_{\text{e中}}]/[\theta_{\text{e小}}]$	$\zeta_{\text{中}}/\%$
1-FVD	0.81	1	1.410	11.520
2-FD	0.82	1	1.605	8.412
3-MYD	0.88	1	1.842	8.229

3.2 理论证明

最后补充说明验证本文推导过程正确性的思路,以算例3-MYD为例:分别计算原小震模型(X)、调整刚度中震模型(Y)、调整刚度和阻尼中震模型

(Z)的简化单自由度体系的水平地震影响系数;小、中震的水平地震影响系数分别为0.16、0.45;中震阻尼比为8.229%的过程数据详见表12,其中刚度影响系数为 α_X/α_Y 、阻尼影响系数为 α_X/α_Z 。

表12 补充验证过程数据

Table 12 Supplementary verification data

模型编号	α	刚度影响系数	阻尼影响系数
X	0.004 842 009		
Y	0.003 741 196	1.294 241 049	1.180 010 279
Z	0.003 170 477		

理论上该例中震的作用力相对于小震放大0.45/0.16,且通过阻尼耗散、刚度硬抗和结构变形分担,即:

$$(0.45 \div 0.16) / (1.294 241 049 \times 1.180 010 279) = 1.841 584 = [\theta_{e中}] / [\theta_{e小}] \text{得证。}$$

4 结论与展望

(1) 中震弹性设计显然高于中震不屈的性能要求;一、二级框架结构的一般框架柱构件基本满足中震不屈的性能要求;一级底层柱剪力满足中震弹性性能要求;一级加强区剪力墙构件的剪力满足中震不屈性能要求。

(2) 推导了中震作用下单自由度体系基于建筑工程加速度设计反应谱和位移设计反应谱的总等效阻尼比估算公式。

(3) 通过同时调整附加阻尼和结构刚度进行中震设计的策略相对更加可行。本文定性分析了单自由度体系中震阻尼需求与结构层间位移、设防烈度、结构周期及 $T_中/T_小$ 的关系。值得注意的是,对低设防烈度区长周期结构,中震附加阻尼比会出现负值和局部震荡现象。

(4) 最后给出了不同设防烈度下该简化体系中震设计总等效阻尼比的参考表格。项目前期评估时可通过插值方法初步确定附加阻尼比,进而指导减震方案。

中震设计的理论分析和工程应用尚显不足。本文仅从构件内力放大情况、中震阻尼需求与结构层间位移、设防烈度、结构周期及 $T_中/T_小$ 的关系角度进行了探讨。已有研究指出^[15-19],整体中震不屈和中震弹性设计可能导致造价增加较多。另外,附

加阻尼通常通过一定的减震、隔震措施来保障,其附加效果很大程度上依赖于产品连接构造形式和现场施工水平,因此对中震层间位移角限值的选取,应充分结合工程经验,借鉴现行有关标准和技术资料的基础上综合评定。后续还将着重研究采用中震设计时“强柱弱梁”“强剪弱弯”等基本原则的满足性问题。

参考文献:

- [1] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国工业出版社,2016.
- [2] 徐培福,傅学怡,王翠坤,等.复杂高层建筑结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
Xu P F, Fu X Y, Wang C K, et al. Structural design of complex high-rise buildings [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [3] 建筑工程混凝土结构抗震性能设计规程:DBJ/T 15-151—2019[S].北京:中国城市出版社,2019.
- [4] Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE 7-10[S]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2011.
- [5] Structural design actions part 4: earthquake actions in Australia: AS 1170.4-2007 [S]. Sydney: Standards Australia GPO Box 476, 2007.
- [6] Design of structures for earthquake resistance, part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings: EN 1998-1 EC8[S]. London: European Committee for Standardization, 2003.
- [7] 汪大绥,包联进.我国超高层建筑结构发展与展望[J].建筑结构,2019,49(19):11-24.
Wang D S, Bao L J. Development and prosperity of structural design of super tall buildings in China [J]. Building Structure, 2019, 49(19): 11-24. (in Chinese)
- [8] Yao J T P. Concept of structure control[J]. Journal of the Structural Division, 1972, 98(7): 1567-1574.
- [9] 周福霖.工程结构减震控制[M].北京:地震出版社,1997.
Zhou F L. Vibration-reduction control of engineering structures[M]. Beijing: Seismological Press, 1997. (in Chinese)
- [10] 欧进萍.结构振动控制—主动、半主动和智能控制[M].北京:科学出版社,2003.
Ou J P. Structural vibration control—active, semi-active and intelligent control[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [11] 周云,徐赵东,赵鸿铁.粘弹性阻尼结构的性能、分析

- 方法及工程应用[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(3): 96-106.
- Zhou Y, Xu Z D, Zhao H T. Study on behavior, analytical methods and application of viscoelastic structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(3): 96-106. (in Chinese)
- [12] Miyazaki M, Arima F, Kidata Y, et al. Earthquake response control design of buildings using viscous damping walls [C] // Proceedings of first East Asia Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. New York: Pergamon Press, 1986: 1589-1921.
- [13] Nims D K, Richter P J, Bachman R E. The use of the energy dissipating restraint for seismic hazard mitigation [J]. Earthquake Spectra, 1993, 9(3): 467-489.
- [14] 吴波, 李惠, 林立岩, 等. 东北某政府大楼采用摩擦阻尼器进行抗震加固的研究[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(5): 28-36.
- Wu B, Li H, Lin L Y, et al. Strengthening the earthquake resistance of a building using friction dampers[J]. Journal of Building Structures, 1998, 19(5): 28-36. (in Chinese)
- [15] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [16] 苏毅, 徐丹, 李爱群, 等. 高烈度区某超限框架-剪力墙结构中震性能控制[J]. 建筑结构, 2017, 47(3): 68-72.
- Su Y, Xu D, Li A Q, et al. Performance control of an out-of-code frame-shear wall structure under fortification earthquake in high seismic intensity region [J]. Building Structure, 2017, 47(3): 68-72. (in Chinese)
- [17] 郑文, 涂津, 潘文. 浅谈复杂结构的中震设计[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(3): 7-13.
- Zheng W, Tu J, Pan W. Discussion on seismic design of complicated structure under seismic fortification intensity[J]. Seismic Engineering, Reinforcement, 2014, 36(3): 7-13. (in Chinese)
- [18] 周颖, 吕西林. 中震弹性设计与中震不屈服设计的理解及实施[J]. 结构工程师, 2008, 24(6): 1-4.
- Zhou Y, Lyu X L. Interpretation and implementation of elastic and non-yielding design under moderate earthquake[J]. Structural Engineer, 2008, 24(6): 1-4. (in Chinese)
- [19] 赵明, 于海博, 毛英杰, 等. 超限高层小震设计与中震设计的对比分析[J]. 建筑结构, 2010, 40(10): 19-21.
- Zhao M, Yu H B, Mao Y J, et al. Comparative analysis of seismic design between small and medium earthquake for super high-rise buildings[J]. Building Structure, 2010, 40(10): 19-21. (in Chinese)
- [20] 韩小雷, 张垒, 杨光. 地震作用下中美规范RC结构层间位移角限值的对比研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 31-37.
- Han X L, Zhang L, Yang G. Comparative study on story drift limits of RC structures under earthquakes between Chinese codes and American codes [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(1): 31-37. (in Chinese)
- [21] 韩小雷, 王雨, 张一璐, 等. RC剪力墙结构小震与中震设计对比及其抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(1): 9-15.
- Han X L, Wang Y, Zhang Y L, et al. Comparative study on seismic design under frequent earthquake and moderate earthquake and seismic performance of RC shear wall structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2021, 41(1): 9-15. (in Chinese)
- [22] 韩小雷, 黄狄昉, 季静, 等. 《建筑工程混凝土结构抗震性能设计规程》(DBJ/T 15-151—2019)基本思路及其工程应用[J]. 建筑结构, 2019, 49(17): 70-76.
- Han X L, Huang D F, Ji J, et al. Basic ideas and engineering application of specification for performance-based seismic design of reinforced concrete building structure (DBJ/T15-151—2019) [J]. Building Structure, 2019, 49(17): 70-76. (in Chinese)
- [23] 建筑隔震设计标准: GB/T 51408—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.

(本文责编: 池营营)