

某既有房屋消能减震加固设计与分析

Reinforcing Design and Analysis of Energy Dissipation for an Existing Building

王景荣¹ 陈泗瑶² 潘银¹

Jingrong Wang¹ Siyao Chen² Yin Pan¹

1. 深圳市房屋安全和工程质量检测鉴定中心 中国·广东 深圳 518000

2. 中机国际工程设计研究院有限责任公司 中国·湖南 长沙 410000

1. Shenzhen Building Safety and Construction Quality Testing and Appraisal Center, Shenzhen, Guangdong, 518000, China

2. China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410000, China

摘要: 中国汕头市某房屋因建设年代久远或未进行抗震设计, 结构抗震承载力及变形能力不满足规范要求。为满足该房屋在后续使用年限内抗震性能要求, 拟采用粘滞阻尼器对其进行减震加固分析。首先利用 YJK 及 Midas Gen 建立有限元模型对其进行小震作用反应谱分析, 确定消能减震设计方案; 进一步对该结构进行小震时程分析、大震弹塑性时程分析验证减震效果。计算分析表明, 在设置粘滞阻尼器后, 结构层间位移角、基底剪力、顶点位移、顶点速度、顶点加速度等指标明显下降, 结构抗震性能显著提高, 论证了既有房屋粘滞阻尼器消能减震的有效性。

Abstract: Due to long construction time or lack of seismic design, the structural seismic bearing capacity and deformation capacity of a building in Shantou can not meet the requirements of the code. In order to make the building meet the seismic performance requirements in the subsequent service life, it is proposed to use viscous dampers to carry out seismic reduction and reinforcement analysis. First of all, YJK and Midas Gen was used to establish the finite element model for the response spectrum analysis of small earthquake effect, and the design scheme of energy dissipation and seismic reduction was determined; furthermore, time history analysis of small earthquakes and elastoplastic time history analysis of large earthquakes were carried out to verify the seismic reduction effect. The calculation and analysis showed that the story drift, base shear force, vertex displacement, vertex velocity, vertex acceleration and other indexes of the structure were obviously reduced, and the seismic performance of the structure was significantly improved after setting viscous dampers, which demonstrates the effectiveness of energy dissipation and seismic reduction with viscous dampers for existing buildings.

关键词: 粘滞阻尼器; 消能减震; 反应谱分析; 时程分析

Keywords: viscous damper; energy dissipation; response spectrum analysis; time history analysis

DOI: 10.12346/etr.v4i12.7457

1 引言

目前很多既有房屋抗震承载能力及变形能力不满足规范要求, 对该类房屋进行抗震加固处理, 具有相当重要的意义。目前, 主要采用传统的抗震加固法和新型的减震控制法。传统的抗震加固方法通过提高结构自身承载能力、变形能力达到抵抗地震作用的目的。该方法加固改造周期长, 施工工序复杂, 对人们生产、生活影响较大。新型的减震技术通过在特定部位设置消能设备, 改变结构动力特性, 从而减小结构地震响应。该

方法安全、经济、适用、施工周期短, 对人们生产、生活影响较小。为此, 论文利用增设粘滞阻尼器对既有房屋进行消能减震, 对比减震前后既有房屋的地震响应, 得出结论。

2 工程概况

2.1 工程基本情况

某建筑物位于广东省汕头市某镇, 为地上 4 层框架结构办公楼, 于 2008 年 8 月建造, 总建筑面积约 1564m², 建设

【作者简介】王景荣 (1989-), 男, 中国湖南沅江人, 硕士, 工程师, 从事建筑结构工程质量检测鉴定研究。

相关单位不详, 图纸资料缺失。

检测结果表明, 该房屋 1 层层高 3.4m, 二层~四层层高 3.25m, 原结构标准层结构平面如图 1 所示。

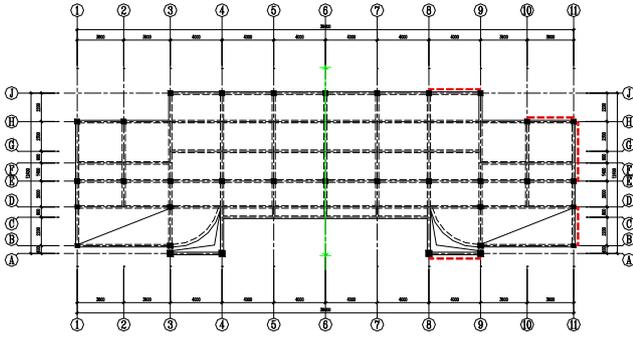


图 1 标准层结构平面图

2.2 结构计算参数

该房屋抗震设防类别为丙类, 抗震设防烈度为 8 度 (0.2g), 设计地震分组为第一组, 场地类别为 II 类, 根据《抗规》^[1], 框架抗震等级为二级。该房屋混凝土强度、构件截面尺寸、楼面荷载等均按实测结果取值。

2.3 原结构承载力、变形计算结果

验算结果表明^[1,2]: ①在不考虑地震时, 该房屋框架柱、梁承载能力满足规范要求; ②在考虑地震作用时, 该房屋部分框架柱、框架梁抗震承载能力不满足规范要求; ③在地震作用下, 该房屋 X 向、Y 向最大层间位移角分别为 1/511、1/490, 不满足规范限值 1/550 的要求。建议对抗震承载力不满足规范要求的柱、梁进行加固处理, 采取加固措施使结构变形能力满足规范要求。

2.4 加固方法选择

设置粘滞阻尼器不影响主体结构正常使用状态下的刚度、周期, 但在地震作用时能提供动刚度和附加阻尼, 能有效降低地震作用下结构基底剪力、位移、速度、加速度等响应。因此, 该房屋拟通过设置粘滞阻尼器进行消能减震加固处理。

3 消能减震设计

3.1 粘滞阻尼减震的基本原理

结构减震的原理可通过单质点体系振动分析来阐述。其运动方程为^[3,4]:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f(t) \quad (1)$$

式中, m 、 k 和 c 为结构的质量、刚度和阻尼系数; u 为质点相对于地面的水平位移; $f(t)$ 为外力; ω 为自振频率,

$$\omega^2 = \frac{k}{m}; \quad \xi = \text{阻尼比}, \quad \xi = \frac{c}{c_e}, c_e = 2m\omega.$$

当 $f(t) = f_0 \sin \theta t$ 时, 方程的稳态解为:

$$u(t) = \frac{f_0}{k} \cdot \beta \cdot \sin(\theta t - \phi) \quad (2)$$

式中, $\frac{f_0}{k}$ 为外力幅值 f_0 作用下的静位移; $\phi = \arctan \frac{2\omega\theta}{\omega^2 - \theta^2}$; β 为动力放大系数, 其表达式为:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\theta^2}{\omega^2})^2 + 4\xi^2 \frac{\theta^2}{\omega^2}}} \quad (3)$$

从式 (3) 可看出, 动力放大系数 β 是决定结构体系振动反应的关键。将上式对 $\lambda = \frac{\theta}{\omega}$ 求导, 求得动力系数最大值 β_m 和相应的频率比 λ_p 。对于阻尼比 $\xi < \frac{1}{\sqrt{2}}$ 的体系有:

$$\lambda_p = \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (4)$$

$$\beta_m = \frac{1}{2\xi\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (5)$$

动力放大系数 β 随阻尼比 ξ 和频率比 $\frac{\theta}{\omega}$ 的变化见图 2。

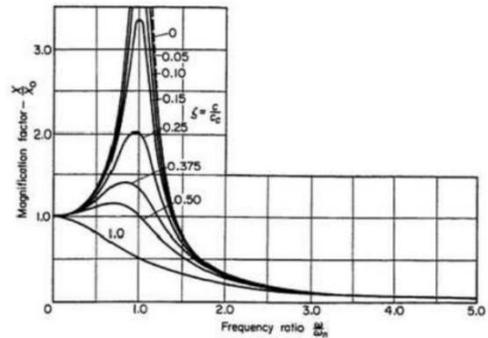


图 2 动力放大系数随阻尼比和频率比的变化

从图 2 中可看出:

①当 $\frac{\theta}{\omega} \leq 1.5$ 时, 如果阻尼比 ξ 较大, 则 $\beta < 1$, 振动衰减; 如果阻尼比 ξ 较小, 则 $\beta > 1$, 振动放大。另外阻尼比 $\xi > 0.3$ 时, 减震效果明显降低。

②在共振频率附近, 增大阻尼比减震效果明显; 在远离共振频率处, 增大阻尼比减震效果减弱。在相同阻尼比的情况下, 体系的固有频率远离干扰频率时动力放大系数 β 将明显减少。

③若结构的阻尼比 $\xi > \frac{1}{\sqrt{2}}$, 则无论 $\frac{\theta}{\omega}$ 的值如何变化, 动力放大系数 β 都小于 1。

由于普通钢筋混凝土结构的阻尼比仅约为 0.05。因此, 地震发生时, 结构振动一般处于放大效应, 消能减震就是通过增大阻尼来减小结构的反应。

3.2 粘滞阻尼减震的恢复力模型

目前, 国内外研究人员提出的恢复力模型主要有线性模型、Max-well 模型、分数导数模型、Kelvin 模型等。论文中将粘滞阻尼器的分析计算模型简化为 Maxwell 模型表述^[3-5]:

$$F_d(t) = C_\alpha \left| \dot{u} \right|^\alpha \text{sgn}(\dot{u}) \quad (6)$$

式中： F_D 为阻尼器阻尼力； α 速率指数； C_α 为对应于不同速率指数 α 值的零频率时的阻尼系数； (\dot{u}_D) 为阻尼器两端的相对速度。

3.3 阻尼器的选择和布置

该房屋拟采用粘滞阻尼器对主体结构进行消能减震。阻尼器系数 $C_\alpha = 600kN \cdot s / m$ ，速度指数 $\alpha = 0.2$ ，刚度系数 $K = 600000kN / m$ 。根据《建筑消能减震技术规程》^[5] 消能部件的布置原则，1~4 层每层设置 10 个阻尼器，共安装 40 个阻尼器。

4 消能减震加固后抗震性能分析

4.1 分析方法

采用 YJK、Midas Gen 进行对比分析，对比整体指标计算结果；对消能减震前后结构进行反应谱分析，对比层间位移、基底剪力；对消能减震前后结构进行小震弹性时程分析，对比层间位移角、顶点位移、速度、加速度、基底剪力等；对消能减震后结构进行大震弹塑性时程分析，计算层间位移角。

4.2 不同软件对比分析

对消能减震结构采用 YJK 和 Midas Gen 软件进行对比分析，考虑偶然偏心的影响，周期折减系数取为 0.6。在计算整体指标时采用刚性楼板假定，混凝土结构阻尼比取 0.05。两种软件小震反应谱分析结果见表 1。

表 1 YJK 与 Midas Gen 小震主要计算结果对比

整体指标		YJK	Midas Gen	(Midas-YJK)/YJK
质量	1.0 恒 +0.5 活	1788.248	1788.262	0.00%
周期	1 阶	0.7875	0.7847	0.36%
	2 阶	0.7548	0.7516	0.42%
	3 阶	0.7158	0.7133	0.35%
周期比	T_i/T_1	0.9089	0.9090	-0.01%

注：篇幅限制，仅给出质量、周期指标。

通过对比可以发现：两款软件采用的计算方法有所不同，但各项指标结果差异在工程精度范围内是比较吻合的，证明了两款软件建立的模型是正确、合理的。

4.3 减震前后结构反应谱对比分析

对原结构、减震后结构进行小震反应谱分析，减震前后结构 X 向、Y 向各层层间位移角及基底剪力见表 2。

从表 2 中可以看出，消能减震后结构 X 向、Y 向最大层间位移角分别为 1/831、1/885，相对原结构最大层间位移角减小了 39%、37%，满足《抗规》规定框架结构限

值 1/550 要求；消能减震后 X 向、Y 向基底剪力分别减小 35%、41%。

表 2 消能减震前后结构层间位移角及基底剪力对比表

整体指标	X 向	原结构		消能减震后结构		减小百分比	
		Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向
层间位移角	4 层	1/1068	1/913	1/1846	1/1507	42%	39%
	3 层	1/584	1/560	1/983	1/919	41%	39%
	2 层	1/511	1/490	1/831	1/885	39%	37%
	1 层	1/778	1/764	1/1256	1/1171	38%	35%
基底剪力 (kN)		1528.3	1673.1	994.0	993.4	35%	41%

承载力验算结果表明，该房屋消能减震后，框架柱、梁抗震承载力基本满足规范要求。

4.4 小震动力弹性时程对比分析

利用减震前后 YJK 有限元模型，根据《抗规》要求选取 2 条天然波 Coyote Lake_NO_147 和 Coalinga-05_NO_408、1 条人工模拟地震波进行小震弹性时程对比分析。

不同地震波作用下，消能减震前后层间位移角对比见图 3。从图 3 中可以看出，设置阻尼器后结构各层层间位移均减小，最大层间位移角小于规范限值 1/550。

小震时程作用下，结构消能减震前后顶点时程曲线对比见图 4~ 图 6（因篇幅限值，仅给出 Coyote Lake 波作用下的结构响应）。通过对比发现，消能减震结构顶点峰值位移、峰值速度和峰值加速度明显比原结构的降低许多，其中顶点位移减小最明显。在 Coyote Lake 波作用下，原结构 X 向顶点位移最大值为 20.2mm；消能减震后结构的 X 方顶点位移最大值为 4.7mm，减少了 76%。

小震时程作用下，消能减震前后结构基底剪力见表 3。从表 3 中可以看出，消能减震后结构在 3 条地震波作用下 X 向、Y 向基底剪力平均值相比原结构减小 21%、29%。

以人工波 X 向小震时程下阻尼器工作状态为例，典型阻尼器的滞回曲线见图 7。从图 7 中可以看出，粘滞阻尼器在小震工况作用下，工作状态良好，滞回曲线饱满，能有效消耗输入的地震能。

通过以上对比发现，采用消能减震后结构的层间位移角、顶点位移、顶点速度、顶点加速度、基底剪力等指标均减小，说明阻尼器的消能作用使主体结构抗震性能提高。

4.5 大震动力弹塑性时程分析

根据《抗规》^[1] 要求，选取 2 条天然波、1 条人工波对该房屋进行大震动力弹塑性时程分析。计算结果表明，三条地震波作用下，X 向、Y 向最大层间位移角包络值为 1/204、1/208，均满足《抗规》限值 1/50 要求。

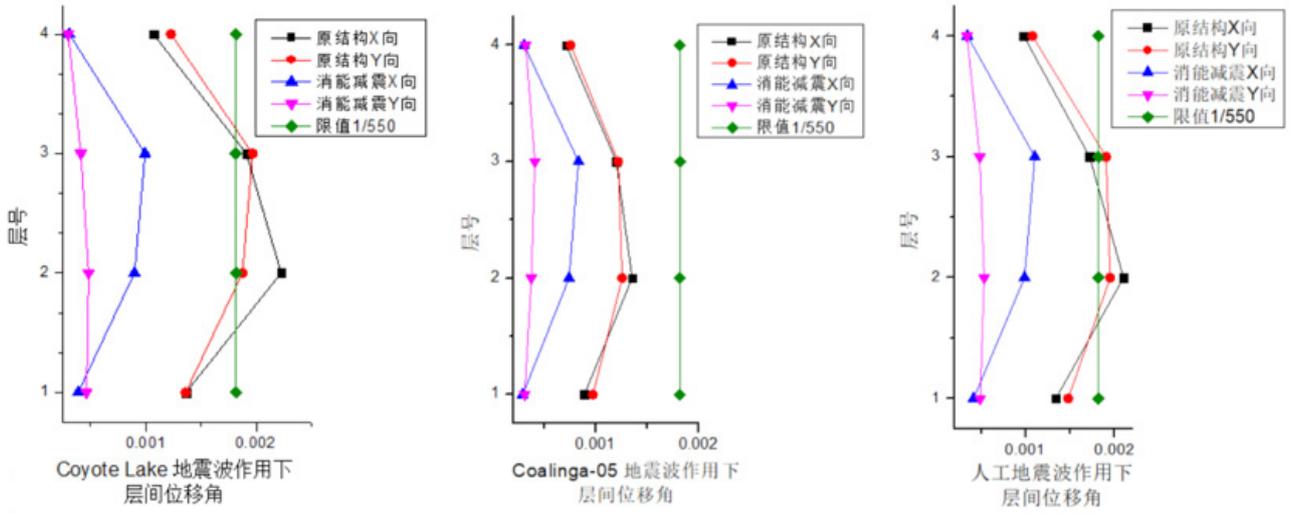


图3 消能减震前后各层层间位移角对比图

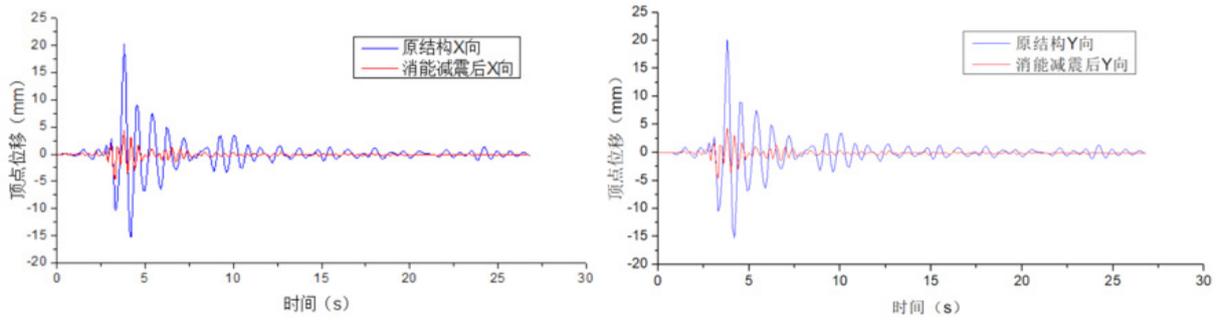


图4 Coyote Lake 作用下减震前后顶点位移时程对比

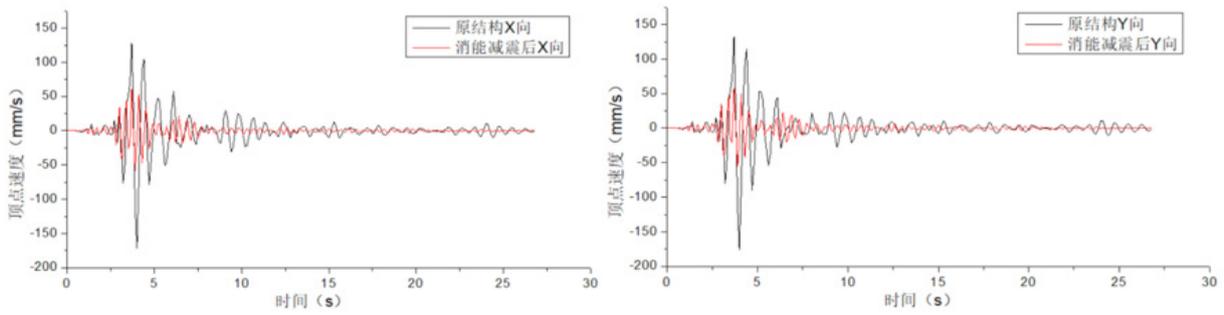


图5 Coyote Lake 作用下减震前后顶点速度时程对比

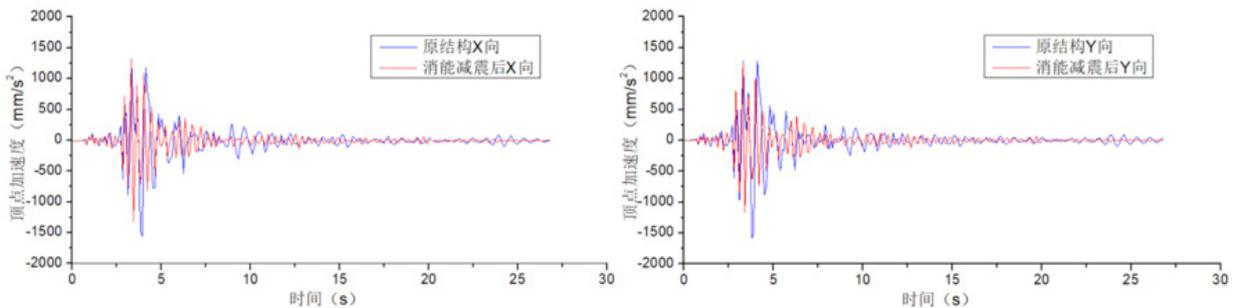


图6 Coyote Lake 作用下减震前后顶点加速度时程对比

表3 小震时程作用下消能减震前后结构基底剪力对比表

地震波	原结构基底剪力		消能减震后基底剪力		减小百分比	
	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向
天然波1	1600.8	1793.9	1254.7	1192.7	22%	34%
天然波2	1148.4	1190.8	1009.2	919.1	12%	23%
人工波	1679.9	1635.8	1232.6	1162.1	27%	29%
平均值	1476.4	1540.2	1165.5	1091.3	21%	29%

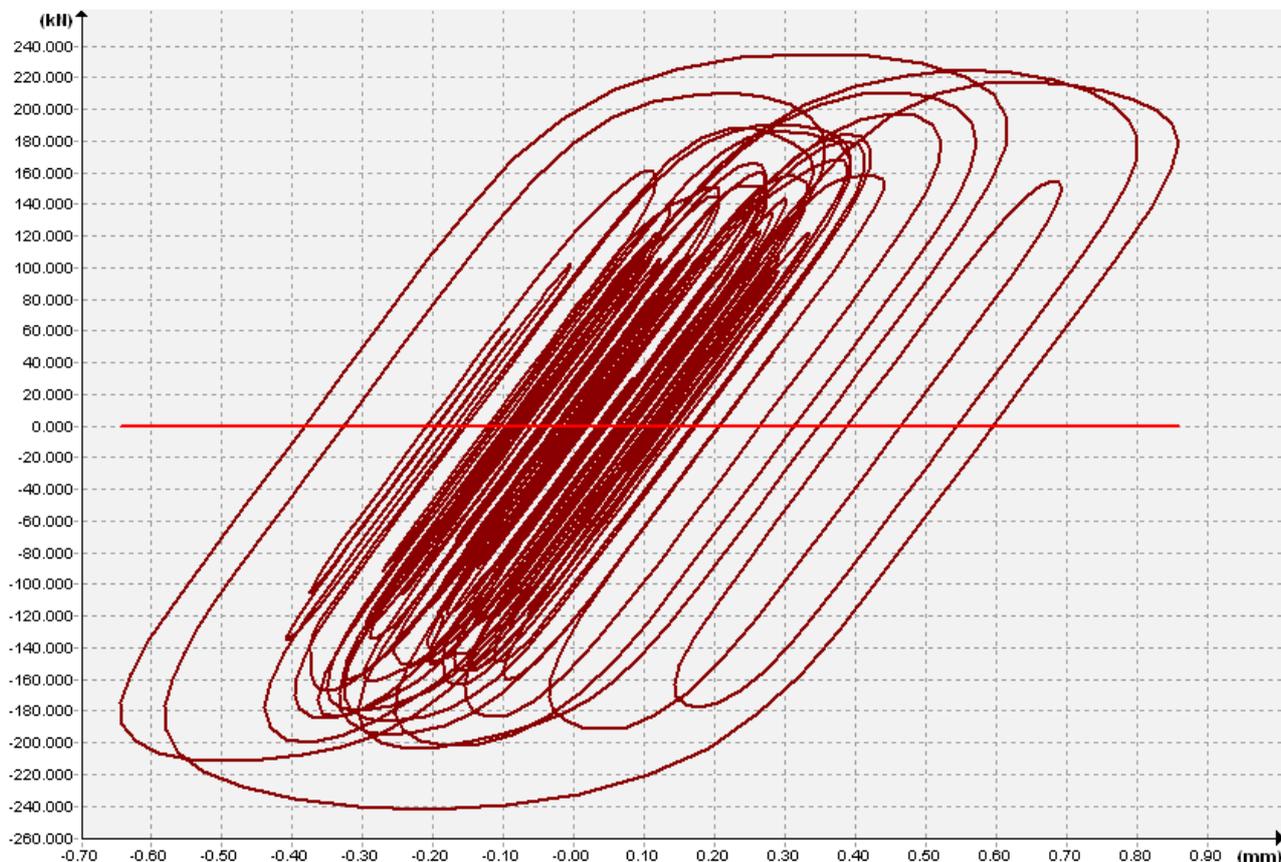


图7 人工波作用下典型阻尼器滞回曲线

5 结语

通过上述既有房屋设置粘滞阻尼器消能减震前后的工况分析结果,得出以下结论:

①通过合理设置粘滞阻尼器,可以有效降低既有房屋的地震响应,从而提高房屋的抗震性能,达到国家相关规范标准的要求。

②对于建设年代久远抗震设防水准较低甚至未进行抗震设计的既有建筑,采用设置粘滞阻尼器消能减震减小地震作

用下的内力和变形是一种较好的选择。

参考文献

- [1] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
- [2] GB50023—2009建筑抗震鉴定标准[S].
- [3] 周云.粘滞阻尼减震结构设计[M].武汉:武汉理工大学出版社,2006.
- [4] Ror R, Craig Jr.结构动力学[M].常岭,李振邦,译.北京:人民交通出版社,1996.
- [5] JGJ297—2013建筑消能减震技术规程[S].