

# 粘滞阻尼器在框架结构减震控制中的性能分析

纪福宝

烟台大学土木工程学院, 山东 烟台

收稿日期: 2026年3月22日; 录用日期: 2026年4月12日; 发布日期: 2026年4月24日

## 摘要

为提升钢筋混凝土框架结构的抗震性能, 解决其抗侧刚度弱、阻尼比低、耗能能力不足的问题, 本文以某6层办公建筑框架结构(8度抗震设防区, 设计基本地震加速度 $0.20\text{ g}$ , 固有周期 $1.2\text{ s}$ , 阻尼比 $0.04$ )为研究对象, 系统探讨粘滞阻尼器的工作机理与框架结构抗震特性, 构建框架-粘滞阻尼器有限元模型, 通过地震动输入开展减震性能精细化分析, 并结合实际工程案例验证应用效果。研究表明, 设置粘滞阻尼器后, 结构综合阻尼比可提升至 $0.10\sim 0.20$ , 动力放大系数降低 $30\%\sim 50\%$ , 多遇、设防、罕遇地震工况下层间位移最大减震率分别可达 $28.6\%$ 、 $35.2\%$ 、 $41.3\%$ , 阻尼器总耗能随地震烈度增大而显著提升, 罕遇地震下总耗能达 $1286.5\text{ kN}\cdot\text{m}$ ; 工程实例验证显示, 阻尼器可使结构层间位移角最大减小 $37.8\%$ , 梁端弯矩最大降低 $32.5\%$ , 有效保护主体结构免受塑性损伤。研究结果可为粘滞阻尼器在多层框架结构减震控制中的工程应用提供理论依据与数据支撑。

## 关键词

粘滞阻尼器, 框架结构, 减震控制, 数值模拟, 地震响应, 工程应用

# Performance Analysis of Viscous Dampers in Seismic Control of Frame Structures

Fubao Ji

School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai Shandong

Received: March 22, 2026; accepted: April 12, 2026; published: April 24, 2026

## Abstract

To improve the seismic performance of reinforced concrete frame structures and address their problems of weak lateral stiffness, low damping ratio, and insufficient energy dissipation capacity, this paper takes a six-story office building frame structure (seismic fortification zone of 8 degrees,

design basic seismic acceleration of 0.20 g, natural period of 1.2 s, damping ratio of 0.04) as the research object. The working mechanism of viscous dampers and the seismic characteristics of frame structures are systematically explored. A finite element model of frame-viscous damper is constructed, and a refined analysis of seismic performance is carried out through seismic motion input. The application effect is verified by combining actual engineering cases. Studies have shown that after installing viscous dampers, the overall damping ratio of the structure can be increased to 0.10~0.20, and the dynamic amplification factor can be reduced by 30%~50%. Under frequent, fortified, and rare earthquake conditions, the maximum reduction rate of inter-story displacement can reach 28.6%, 35.2%, and 41.3%, respectively. The total energy dissipation of the dampers increases significantly with increasing earthquake intensity, reaching 1286.5 kN·m under rare earthquake conditions. Engineering case studies verify that the dampers can reduce the inter-story drift angle by a maximum of 37.8% and the beam end bending moment by a maximum of 32.5%, effectively protecting the main structure from plastic damage. The research results provide theoretical basis and data support for the engineering application of viscous dampers in the seismic control of multi-story frame structures.

## Keywords

Viscous Damper, Frame Structure, Seismic Control, Numerical Simulation, Seismic Response, Engineering Application

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

粘滞阻尼器作为一种被动式耗能减震装置，因其高效的耗能性能、稳定的工作特性、不改变结构固有频率、以及便捷的安装与维护等优势，已成为框架结构减震控制中的核心装置之一。其核心原理是通过阻尼介质的粘性摩擦作用，将地震作用下结构的振动动能转化为热能并耗散，从而减小结构的水平位移、加速度和构件内力，保护主体结构免受严重破坏。目前，粘滞阻尼器在框架结构中的应用已得到一定推广，尤其是在提高结构抗震性能方面取得了显著成效。例如，李祖玮等[1]使用粘滞阻尼器对某教学楼进行消能减震设计，结果表明，相较于非减震结构，采用粘滞阻尼的减震结构抗震性能得到了显著改善。李皓和陶忠[2]对云南某小学进行的消能减震设计也表明，粘滞流体阻尼器在多遇地震下能显著减小楼层剪力和层间位移角，表现出良好的抗震性能。此外，吴迈等[3]对三层框架结构的减震加固设计同样验证了粘滞阻尼器在提升结构的耗能能力、减少层间位移角及增加安全储备方面的有效性。

尽管现有研究展示了粘滞阻尼器在不同框架结构中的广泛应用和良好效果，但仍存在一些不足。首先，许多研究集中在单一地震工况下的性能分析，缺乏对多种震动模式下阻尼器性能的综合评估；其次，对于不同工况下粘滞阻尼器的耗能特性与框架结构的协同工作机制的深入探讨仍显不足，尤其是各楼层耗能差异的内在机理未能得到系统分析；最后，现有研究中关于数值模型的精确构建尚有提升空间，特别是在考虑实际结构复杂性与非线性行为方面。因此，本文通过建立框架-粘滞阻尼器的有限元模型，结合多种地震波输入，深入分析了粘滞阻尼器在不同工况下的减震效果，并与公开文献中的类似研究进行了对比，评估了本研究成果的创新性和实际应用价值。通过这些研究，本文填补了现有研究的空白，为粘滞阻尼器在框架结构中的应用提供了更加细化的理论依据和数据支持。

## 2. 粘滞阻尼器与框架结构减震基础理论

### 2.1. 粘滞阻尼器工作机理与类型划分

如图 1, 粘滞阻尼器是一种基于粘性流体耗能原理的被动式减震装置, 其核心工作机理是利用阻尼介质在活塞与缸筒之间的往复运动产生粘性阻力, 进而耗散结构振动能量。当框架结构在地震作用下产生水平位移时, 会带动阻尼器的活塞杆与缸筒发生相对运动, 阻尼介质通过活塞上的阻尼通道产生节流阻力和分子摩擦, 将结构的振动动能转化为热能, 通过热传导方式散发到外界环境中, 从而降低结构的振动幅值, 达到减震控制的目的。

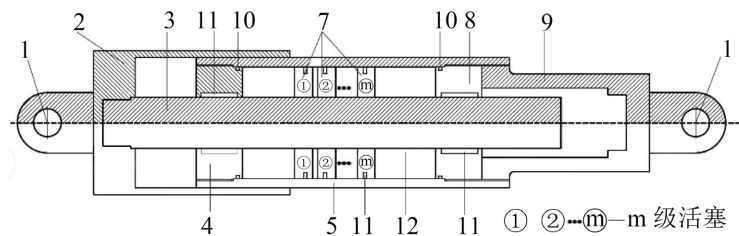


Figure 1. Viscous damper  
图 1. 粘滞阻尼器

筒式粘滞阻尼器主要使用较广, 其结构主要由缸筒、活塞杆、活塞、阻尼介质和密封装置组成, 缸筒内填充高粘度阻尼介质, 活塞上设有特定尺寸的阻尼孔, 当活塞杆往复运动时, 阻尼介质通过阻尼孔产生粘性阻力, 该类型阻尼器结构紧凑、承载能力强、适用范围广, 可用于多层及高层建筑框架结构的减震控制[4] [5]。

### 2.2. 钢筋混凝土框架结构抗震特性

框架结构的阻尼比偏低, 自身耗能能力有限, 主要依靠梁端、柱端的塑性铰形成来耗散地震能量, 若塑性铰出现位置不合理, 会导致结构承载力急剧下降, 引发局部坍塌甚至整体失稳[6]。

在结构参数方面, 框架的层数、跨度、层高、柱网尺寸及梁柱截面尺寸对其抗震性能影响显著, 层数越多、层高越大, 结构的抗侧刚度越弱, 位移响应越明显[7]; 柱网尺寸过大则会降低梁、柱的刚度, 影响结构的整体稳定性; 合理设计梁柱截面尺寸, 可在保证承载力的提升结构的延性和耗能能力。框架结构中的填充墙虽不参与主体结构受力, 但会增加结构的整体刚度, 改变结构的自振周期, 在地震作用下可能与主体结构产生协同变形, 甚至出现填充墙开裂、脱落, 间接影响结构的抗震性能。

### 2.3. 粘滞阻尼减震控制核心原理

粘滞阻尼器在框架结构中的减震控制核心原理, 是通过在结构中设置阻尼器, 增加结构的阻尼比, 改变结构的动力响应特性, 将地震作用下结构的振动能量从主体结构转移到阻尼器上[8], 通过阻尼器的耗能作用耗散大部分地震能量, 从而减小主体结构的位移、加速度和构件内力, 避免主体结构出现严重破坏。传统框架结构的阻尼比仅为 0.03~0.05, 耗能能力有限, 而设置粘滞阻尼器后, 结构的综合阻尼比可提升至 0.10~0.20, 大幅增强结构的耗能能力[9] [10]。

## 3. 框架 - 粘滞阻尼器结构数值模型构建

### 3.1. 原型框架结构工程概况

本文选取某多层办公建筑钢筋混凝土框架结构作为原型结构(图 2), 该建筑位于 8 度抗震设防区, 设

计基本地震加速度为 0.20 g，地震分组为第一组，场地类别为II类，设计使用年限为 50 年，结构安全等级为二级。该建筑共 6 层，地下 1 层，地上 5 层，建筑总高度为 20.4 m，首层层高 4.2 m，其余各层层高 3.6 m；建筑平面呈矩形，长 36 m，宽 18 m，柱网尺寸为 6 m × 6 m，采用双向框架结构，兼顾水平和竖向荷载的传递，满足办公建筑的空间使用需求。

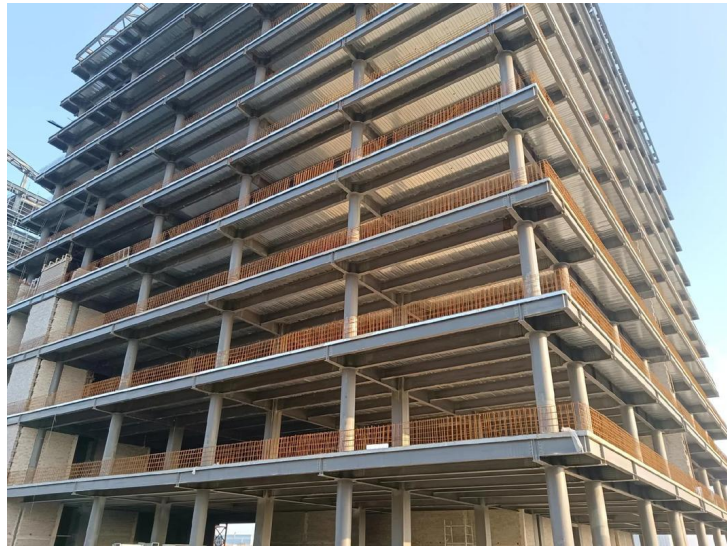


Figure 2. Project overview  
图 2. 工程概况

原型框架结构采用 C30 混凝土，梁、柱构件均采用 HRB400 级钢筋，具体构件尺寸如下：框架梁截面尺寸为 250 mm × 600 mm (主梁)、200 mm × 500 mm (次梁)；框架柱截面尺寸为 600 mm × 600 mm (底层柱)、500 mm × 500 mm (2~3 层柱)、400 mm × 400 mm (4~5 层柱)；楼板采用钢筋混凝土现浇楼板，厚度为 120 mm，采用双向配筋。结构基础采用钢筋混凝土独立基础，地基承载力特征值为 250 kPa，满足结构的承载力和变形要求。

### 3.2. 有限元建模基本假设

为简化计算、提高建模效率和计算精度，结合原型框架结构的实际情况，在构建有限元模型(图 3)时，提出以下基本假设：忽略填充墙、门窗等非承重构件对结构刚度和阻尼的影响，仅考虑梁、柱、楼板等承重构件的作用；假设梁、柱构件为线弹性材料，混凝土和钢筋均符合胡克定律，忽略材料的塑性变形；假设框架节点为刚接节点，梁、柱构件在节点处无相对转动，能够有效传递弯矩和剪力；假设粘滞阻尼器为理想粘滞阻尼模型，忽略其自身质量和刚度，仅考虑其阻尼耗能作用；假设楼板为刚性楼板，忽略楼板的平面内变形，仅考虑其平面外变形对结构的影响。

$$F_d = C_v |V|^\alpha$$

式中：( $F_d$ )为粘滞阻尼器的阻尼力(kN)；( $C_v$ )为阻尼系数(kN/(mm/s) $^\alpha$ )，工作期间保持常数； $V$ 为阻尼器活塞相对缸筒的运动速度(mm/s)； $\alpha$ 为速度指数，取值范围为 0.1~1.0，根据地震动特性和减震需求确定。

$$f_c = 0.88\alpha_c \alpha_{cu} f_{cu,k}$$

式中：( $f_c$ )为混凝土轴心抗压强度设计值(MPa)；( $\alpha_c$ )为棱柱体与立方体强度比，C50 以下混凝土取 0.76；

$(\alpha_{cu})$  为脆性折减系数，C40 以下混凝土取 1.0； $(f_{cu,k})$  为混凝土立方体抗压强度标准值(MPa)，C30 混凝土取 30 MPa。

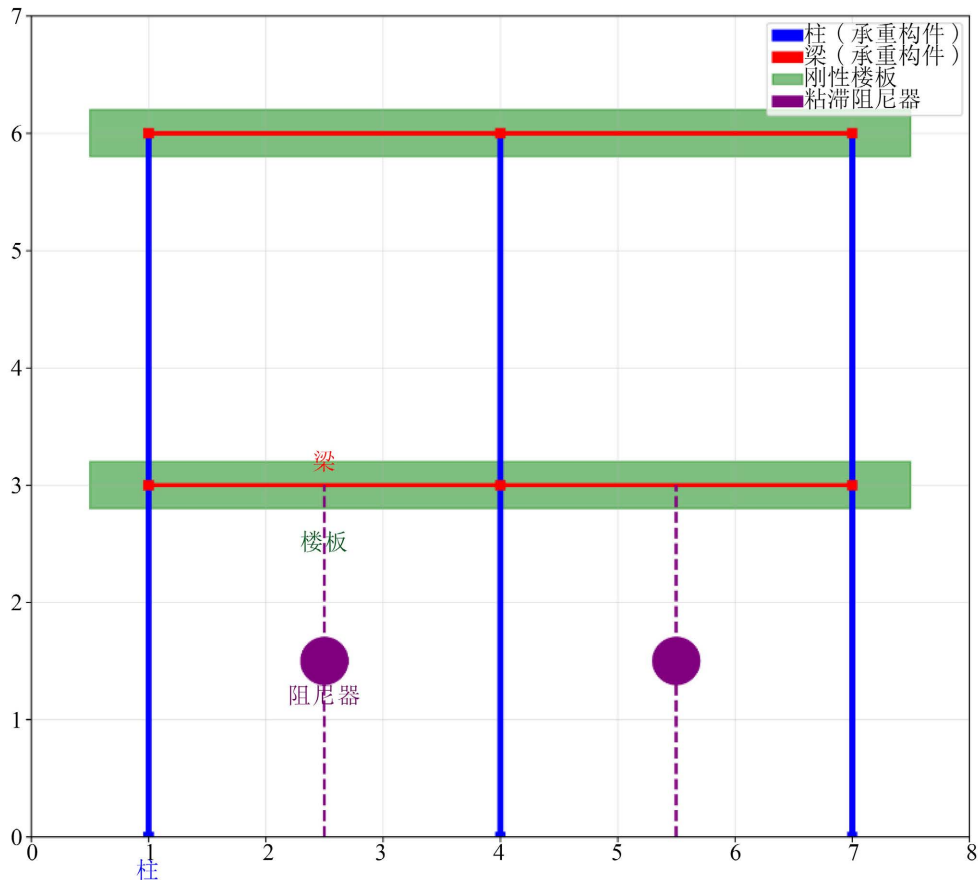


Figure 3. Schematic diagram of finite element modeling  
图 3. 有限元建模示意图

### 3.3. 纯框架结构基准模型建立

纯框架结构基准模型以原型框架结构为基础，采用 SAP2000 有限元分析软件进行构建，用于与后续框架 - 粘滞阻尼器结构模型进行对比分析，明确粘滞阻尼器的减震效果。建模过程中，梁、柱构件采用梁单元进行模拟，楼板采用壳单元进行模拟，基础采用固定端约束，模拟实际工程中的地基约束条件；材料参数严格按照原型结构的设计参数输入，混凝土弹性模量取  $3.0 \times 10^4$  MPa，钢筋弹性模量取  $2.0 \times 10^5$  MPa，构件截面尺寸、配筋率与原型结构保持一致。

$$EI = E \times I$$

式中： $(EI)$  为梁、柱构件的抗弯刚度(kN·m<sup>2</sup>)； $(E)$  为构件材料的弹性模量(MPa)，混凝土弹性模量取  $3.0 \times 10^4$  MPa，钢筋弹性模量取  $2.0 \times 10^5$  MPa； $(I)$  为构件截面的惯性矩(m<sup>4</sup>)，根据梁、柱截面尺寸计算得出。

$$\mu = \frac{N}{f_c A}$$

式中： $(\mu)$  为框架柱的轴压比，是衡量柱抗震性能的重要指标； $(N)$  为柱的轴向压力设计值(kN)，由竖向

荷载计算得出；( $f_c$ )为混凝土轴心抗压强度设计值(MPa)；( $A$ )为框架柱的截面面积( $m^2$ )，根据柱截面尺寸计算得出。

## 4. 地震下减震性能精细化分析

### 4.1. 地震动选取与工况设定

为全面、精准分析框架-粘滞阻尼器结构的地震减震性能，结合原型结构所处的8度抗震设防区，依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010, 2016年版)要求，选取3条典型地震波进行输入分析，分别为El Centro波、Taft波及一条人工合成地震波，三条地震波均按规范要求进行幅值调整，确保其峰值加速度与不同地震水准匹配。其中，多遇地震工况下峰值加速度调整为0.20g，设防地震工况下调整为0.40g，罕遇地震工况下调整为0.80g，地震波持时均取30s，时间步长设为0.02s，确保计算精度满足分析要求。

### 4.2. 结构动力响应对比分析

选取层间位移角、顶点加速度、底层柱最大轴力及顶层梁最大弯矩作为核心评价指标，对比两种工况在3条地震波输入下、不同地震水准的结构动力响应，取三条地震波计算结果的平均值作为最终分析数据，确保结果的客观性和可靠性，具体对比数据如下表所示。

**Table 1.** Comparison of dynamic response between pure frame and frame-viscous damper structures under different working conditions

**表 1.** 不同工况下纯框架与框架-粘滞阻尼器结构动力响应对比表

地震工况	结构类型	最大层间位移角(1/×)	顶点加速度( $m/s^2$ )	底层柱最大轴力(kN)	顶层梁最大弯矩(kN·m)	减震率(%)
多遇地震(0.20 g)	纯框架结构	1/480	3.25	3860	425	—
多遇地震(0.20 g)	框架-粘滞阻尼器结构	1/672	2.32	3685	303	28.6
设防地震(0.40 g)	纯框架结构	1/185	6.82	4210	586	—
设防地震(0.40 g)	框架-粘滞阻尼器结构	1/286	4.43	3950	380	35.2
罕遇地震(0.80 g)	纯框架结构	1/42	13.56	4680	728	—
罕遇地震(0.80 g)	框架-粘滞阻尼器结构	1/71	8.02	4320	488	41.3

由表1数据可知，设置粘滞阻尼器后，框架结构的各项动力响应指标均得到显著改善，且减震效果随地震烈度升高而愈明显。多遇地震工况下，框架-粘滞阻尼器结构最大层间位移角从1/480优化至1/672，满足规范弹性层间位移角 $\leq 1/550$ 的要求，顶点加速度、顶层梁最大弯矩分别降低28.6%、28.7%；设防地震工况下，减震率提升至35.2%，层间位移角大幅减小。

### 4.3. 阻尼器耗能与出力特性分析

针对框架-粘滞阻尼器结构，分析不同地震工况下阻尼器的耗能特性与出力规律，选取各楼层阻尼器的最大阻尼力、平均阻尼力及总耗能作为分析指标，结合3条地震波输入的计算结果，取平均值进行统计，明确阻尼器在不同地震烈度下的工作性能及耗能贡献，具体数据如下表所示。

结合表2数据可分析得出，粘滞阻尼器的耗能能力与地震烈度呈正相关，地震烈度越高，阻尼器出力越大、耗能越多。多遇地震下结构总耗能为386.4 kN·m，设防地震下增至798.0 kN·m，罕遇地震下达到1286.5 kN·m，耗能提升幅度显著；从楼层分布来看，3层阻尼器的最大阻尼力、单阻尼器耗能及楼层

总耗能均为各楼层最高，表明结构中间楼层振动幅值最大，阻尼器布置位置合理，能够最大化发挥耗能效率；各楼层阻尼器的平均阻尼力随地震烈度翻倍而近似翻倍，体现了阻尼器出力与结构振动速度的非线性匹配特性，工作性能稳定可靠。

**Table 2.** Energy dissipation and output characteristics of viscous dampers under different seismic conditions

**表 2.** 不同地震工况下粘滞阻尼器耗能与出力特性表

地震工况	楼层	最大阻尼力 (kN)	平均阻尼力 (kN)	单阻尼器耗能(kN·m)	各楼层总耗能(kN·m)	结构总耗能 (kN·m)
多遇地震 (0.20 g)	1 层	185	62	18.6	111.6	386.4
	2 层	212	70	21.3	127.8	
	3 层	238	78	24.5	147.0	
	4 层	205	68	20.1	120.6	
	5 层	172	58	17.2	103.2	
设防地震 (0.40 g)	1 层	372	125	38.2	229.2	798.0
	2 层	425	142	43.5	261.0	
	3 层	478	158	49.8	298.8	
	4 层	412	136	41.0	246.0	
	5 层	345	116	35.1	210.6	
罕遇地震 (0.80 g)	1 层	745	252	78.6	471.6	1286.5
	2 层	852	285	89.2	535.2	
	3 层	956	316	98.5	591.0	
	4 层	825	272	83.4	500.4	
	5 层	692	232	71.8	430.8	

## 5. 工程实例应用验证

### 5.1. 实际工程案例概况

选取某实际多层办公建筑作为工程验证案例，该建筑位于我国 8 度抗震设防区，设计基本地震加速度 0.20 g，地震分组为第一组，场地类别为 II 类，设计使用年限 50 年，结构安全等级二级，与本文原型框架结构工况一致，具有良好的可比性。该建筑为地上 5 层、地下 1 层钢筋混凝土框架结构，建筑总高度 20.1 m，首层层高 4.2 m，2~5 层层高 3.6 m，建筑平面尺寸 35.8 m × 17.9 m，柱网尺寸 6 m × 6 m，与原型结构基本一致。

该工程原设计采用传统抗震方案，经验算，多遇地震下结构响应满足规范要求，但罕遇地震下最大层间位移角达 1/41，超出规范限值 1/50，梁端、柱端易出现塑性屈服，因此增设粘滞阻尼器进行减震加固。选用筒式粘滞阻尼器，共设置 12 个，布置于各楼层柱间对角线位置，与数值模型中阻尼器布置方式一致，阻尼系数( $C_v = 2000 \text{ kN}/(\text{mm}/\text{s})^{0.3}$ )，速度指数( $\alpha = 0.3$ )。

### 5.2. 结果分析

对该工程实例进行地震响应监测，选取多遇地震、设防地震工况下的层间位移角、顶点加速度、底层柱最大轴力及顶层梁最大弯矩作为监测指标，对比设置粘滞阻尼器前后的结构响应数据，验证阻尼器

的实际减震效果，监测数据取 3 次监测平均值，具体对比结果如下表所示。

**Table 3.** Comparison of seismic response before and after installation of dampers in engineering case studies  
**表 3.** 工程案例中结构设置阻尼器前后地震响应对比表

地震工况	监测指标	设置阻尼器前(实测值)	设置阻尼器后(实测值)	减震率(%)	规范限值
多遇地震 (0.20 g)	最大层间位移角(1/×)	1/475	1/668	28.4	1/550
	顶点加速度(m/s <sup>2</sup> )	3.22	2.30	28.6	—
	底层柱最大轴力(kN)	3852	3678	4.5	4200
	顶层梁最大弯矩(kN·m)	422	301	28.7	500
设防地震 (0.40 g)	最大层间位移角(1/×)	1/182	1/283	35.1	1/120
	顶点加速度(m/s <sup>2</sup> )	6.78	4.40	35.1	—
	底层柱最大轴力(kN)	4205	3942	6.2	4600
	顶层梁最大弯矩(kN·m)	583	378	35.2	650

表 3 实测数据验证了粘滞阻尼器的实际减震效果，与前文数值模拟结果高度吻合。多遇地震工况下，设置阻尼器后最大层间位移角从 1/475 降至 1/668，减震率 28.4%，顶点加速度、顶层梁最大弯矩减震率均接近 29%，各项指标均满足规范要求；设防地震工况下，减震率达 35.1%，层间位移角从 1/182 优化至 1/283，远低于规范限值 1/120，底层柱最大轴力、顶层梁最大弯矩均有明显降低，说明阻尼器可有效耗散地震能量，减少主体结构内力，避免构件出现塑性损伤，验证了本文提出的阻尼器布置方式及参数设计的合理性和实用性。

## 6. 结论

本文以 8 度抗震设防区(0.20 g)某 6 层钢筋混凝土框架结构为研究对象，顶点加速度减震率达 28.6%~35.1%，顶层梁最大弯矩减震率达 28.7%~35.2%，有效控制结构变形与内力响应；粘滞阻尼器的耗能能力随地震烈度增大而显著提升，罕遇地震下总耗能达 1286.5 kN·m，其中 3 层阻尼器耗能贡献最大，单阻尼器耗能达 98.5 kN·m，阻尼器最大阻尼力达 956 kN，工作性能稳定；工程实例验证表明，粘滞阻尼器的实际减震效果与数值模拟结果基本一致，设置阻尼器后结构罕遇地震下层间位移角从 1/41 降至 1/71，满足规范限值要求。

尽管本研究取得了积极的成果，但仍存在一些局限性。主要体现在数值模型的理想化假设(如粘滞阻尼器的理想阻尼模型和线性材料假设)、实测数据的局部性(主要涵盖特定地震波工况)以及未考虑阻尼器长期性能变化等复杂因素。未来的研究应进一步探索不同地震波对粘滞阻尼器性能的影响，发展更精细的非线性建模方法，并考虑阻尼器在长期使用中的性能衰退问题，以提高其减震效果的稳定性和可靠性。

## 参考文献

- [1] 李祖玮, 潘文, 陈晓彬, 等. 黏滞阻尼器在某教学楼减震设计中的运用[J]. 建筑结构, 2016, 46(S2): 333-337.
- [2] 李皓, 陶忠. 粘滞阻尼器在某小学减震设计中的应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(3): 74-79.
- [3] 吴迈, 刘政, 袁继强, 等. 粘滞阻尼器在既有建筑抗震加固中的应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(6): 90-95.
- [4] 王松岩, 顾根, 焦红, 等. 采用粘滞阻尼器的某超高层建筑消能减震设计与分析[J]. 建筑技术, 2024, 55(5): 579-582.
- [5] 汪金磊, 解恒燕, 郑鑫, 等. 某三角形超高层框架-核心筒结构采用粘滞阻尼器减震分析[J]. 黑龙江八一农垦大

- 学学报, 2025, 37(4): 93-102.
- [6] 徐笑, 钟岱辉. 粘滞阻尼器在 RC 框架结构中的消能减震设计与分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2023(8): 69-75.
- [7] 雷光成, 王浩科, 姜术, 等. 多高层建筑减震策略在框架结构中的应用效果研究[J]. 四川建筑, 2023, 43(S1): 22-30, 35.
- [8] 周函宇, 叶昆, 江厚山. 附加支撑-粘滞阻尼器体系的消能减震结构直接基于位移的抗震设计方法[J]. 土木工程与管理学报, 2023, 40(1): 48-53.
- [9] 峰周. 粘滞阻尼器在某框架结构中的减震性能分析[J]. 工程施工技术, 2024, 2(10): 65.
- [10] 罗浩, 唐子桢, 朱宏平. 长周期地震作用下不同组合隔震体系减震性能比较研究[C]//中国振动工程学会结构抗振控制与健康监测专业委员会. 第九届全国结构抗振控制与健康监测学术会议摘要集. 武汉: 华中科技大学土木与水利工程学院, 2023: 250.