

# 考虑黏滞阻尼器间隙对高层建筑的抗震影响分析

管春露<sup>1</sup> 王若愚<sup>1</sup> 虞永军<sup>1</sup> 吴军<sup>2</sup> 徐志伟<sup>2</sup>

1. 江苏省公共工程建设中心有限公司 南京 210019; 2. 江苏南通六建建设集团有限公司 南通 226500

DOI:10.32629/ems.v8i6.20512

**[摘要]** 合理控制阻尼器间隙是保证其减震性能的关键。针对高层建筑中黏滞阻尼器存在初始间隙的实际问题, 本文研究了间隙效应对结构地震响应及耗能性能的影响。基于 SAUSAGE 软件建立了考虑间隙特性的高层剪力墙结构数值模型, 采用 Maxwell 单元模拟黏滞阻尼器, 并结合 Hook 与 Gap 单元的并联方式模拟间隙效应。通过对某高层建筑钢筋混凝土框架剪力墙结构在不同间隙条件下进行时程分析, 分析了结构地震作用下的层间位移、楼层剪力及阻尼器附加阻尼比变化规律。结果表明, 黏滞阻尼器间隙对结构的动力特性和耗能效率具有显著影响。随着间隙的增大, 阻尼器在地震初期阶段无法及时进入工作状态, 阻尼器的耗能能力和对结构的附加阻尼比显著降低。实际工程中, 应严格控制阻尼器制造与安装精度, 减小装配间隙, 保障建筑的抗震性能。

**[关键词]** 黏滞阻尼器; 间隙效应; 高层建筑; 耗能性能; 地震响应

## 1. 引言

在高层建筑抗震设计中, 黏滞阻尼器因其能够有效耗散地震能量、降低结构地震反应而被广泛应用<sup>[1]</sup>。然而, 在实际工程中, 黏滞阻尼器往往存在初始间隙(或称工作间隙)。阻尼器产品自身及安装连接误差都会导致阻尼器的产生间隙效应。其中, 阻尼器自身引起的间隙效应主要是由于产品内部构造差异导致(黏滞介质未充满油缸、黏滞介质材料本身具有一定的可压缩性等); 安装误差引起的间隙效应主要是由于连接件中有松动现象、连接不牢固、强度不足等导致无法达到预定功能<sup>[2][3]</sup>。然而, 这种间隙的存在在地震初期阶段会导致阻尼器无法及时参与耗能, 使结构在间隙闭合之前仅依靠主体构件自身承受地震作用, 造成结构初期响应增大。对于高层建筑而言, 由于结构柔性较大、振动周期较长, 间隙效应可能导致楼层间位移增加、层间剪力不均、甚至产生局部屈服延迟等不利现象, 从而削弱黏滞阻尼器的减震效率, 影响整体抗震性能。因此, 研究黏滞阻尼器间隙特性及其对高层建筑地震响应的影响, 对于优化阻尼器设计参数和提升建筑抗震安全具有重要的工程意义。本文以江苏商贸高层项目, 研究黏滞阻尼器间隙对高层建筑的抗震影响。

## 2. 间隙在 SAUSAGE 软件中的模拟方法

根据 SAUSAGE 中非线性连接单元属性, 为考虑间隙对黏滞阻尼器性能的影响, 本文采用 Maxwell 单元模拟黏滞阻尼器, 并用 Hook 单元与 Gap (单元并联来联合模拟间隙效应。基于黏滞阻尼器基本力学性能试验得到的原始力一位移数据, 绘制阻尼器的阻尼力一位移滞回曲线。由滞回曲线可知, 间隙仅在阻尼器受力方向发生改变时发挥作用: 当两结点的相对位移在初始间隙  $\delta$  范围内时, 质点运动不会激活并联的弹性单元, 阻尼器不能为结构提供附加刚度, 可视为处于暂时“失效”或非接触状态; 当相对位移超过  $\delta$  时, 相应方向的弹性刚度被激活并开始贡献内力。为了反映受拉、受压工况的不对称性, 受压过程采用 Gap 单元建模, 而受拉过程采用 Hook 单元建模。该并联建模方法能够直接再现由间隙引起

的死区、滞回非线性以及受拉/受压不对称的力学特征, 从而为工程分析与数值仿真提供现实且简单的单元级描述<sup>[4][5]</sup>。力学分析模型如图 1 所示。

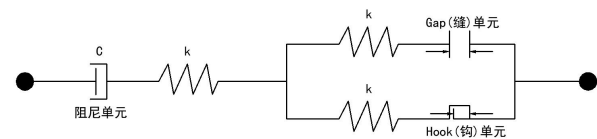


图 1 考虑间隙黏滞阻尼器模型图

## 3. 高层剪力墙结构黏滞阻尼器算例

某学院新校区建设项目的集体宿舍楼为 17 层钢筋混凝土框架剪力墙结构, 如图 2 所示; 地震设防烈度为 7 度 0.1g, 场地类别 III 类, 地震分组为 II 组, 首层层高 5m, 二层及以上层高 3.65m, 在结构三至十四层每层布置八套, 总共布置 96 套墙式黏滞阻尼器。

本算例考虑阻尼器间隙在高层建筑中黏滞阻尼器耗能效率影响, 该算例选取一条地震波对结构进行时程分析, 阻尼器按照上述布置数量在 SAUSAGE 软件中进行建模分析。

本模型考虑在 X 轴、Y 轴两个方向输入地震波, 并分析该方向在设防地震作用下层间位移、层剪力、阻尼器附加阻尼比变化, 运用前文介绍的间隙模拟方法分析考虑不同间隙前后对黏滞阻尼器的耗能影响<sup>[6]</sup>。

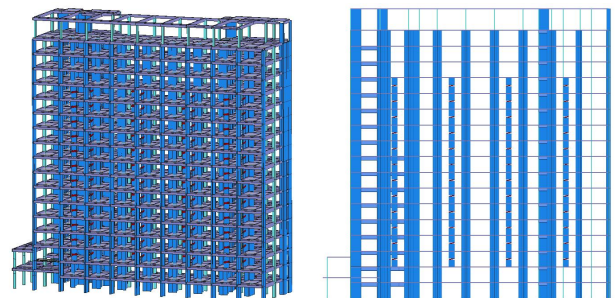


图 2 结构模型三维图、立面图

(1) 结构设防地震下考虑间隙的位移响应结果  
对设防地震作用下黏滞阻尼器不考虑间隙影响以及考

考虑黏滞阻尼器不同间隙影响两种情况进行分析，得到结构层间位移角的反应见表 1、表 2。

表 1 设防地震下 X 向考虑黏滞阻尼器不同间隙结构层间位移反应对比

楼层	无间隙		1mm 间隙		2mm 间隙		3mm 间隙	
	层间位移(mm)	位移角 (°)	层间位移 (mm)	位移角 (°)	层间位移 (mm)	位移角 (°)	层间位移 (mm)	位移角 (°)
17	4.32	1/845	4.38	1/834	4.80	1/760	4.82	1/757
16	4.65	1/785	4.68	1/779	4.92	1/742	4.91	1/744
15	4.96	1/737	4.99	1/731	5.14	1/710	5.11	1/715
14	5.33	1/684	5.39	1/677	5.49	1/665	5.52	1/661
13	5.73	1/638	5.80	1/630	5.90	1/619	5.94	1/614
12	6.04	1/605	6.13	1/596	6.23	1/586	6.27	1/582
11	6.21	1/588	6.32	1/577	6.44	1/567	6.46	1/565
10	6.20	1/588	6.31	1/578	6.48	1/564	6.53	1/559
9	6.14	1/595	6.26	1/583	6.51	1/561	6.71	1/544
8	6.20	1/589	6.48	1/563	6.69	1/546	7.02	1/520
7	6.34	1/576	6.69	1/545	6.92	1/527	7.27	1/502
6	6.36	1/574	6.78	1/538	7.03	1/519	7.36	1/496
5	6.18	1/590	6.57	1/556	6.88	1/531	7.20	1/507
4	5.87	1/622	6.31	1/578	6.56	1/556	6.81	1/536
3	5.17	1/706	5.60	1/652	5.83	1/626	6.06	1/602
2	4.49	1/812	4.89	1/747	5.14	1/710	5.37	1/680
1	2.77	1/1319	3.06	1/1195	3.27	1/1118	3.42	1/1069

表 2 设防地震下 Y 向考虑黏滞阻尼器不同间隙结构层间位移反应对比

楼层	无间隙		1mm 间隙		2mm 间隙		3mm 间隙	
	层间位移 (mm)	位移角 (°)	层间位移 (mm)	位移角 (°)	层间位移 (mm)	位移角 (°)	层间位移 (mm)	位移角 (°)
17	6.31	1/579	6.47	1/564	6.72	1/543	6.79	1/300
16	6.38	1/572	6.53	1/559	6.78	1/538	6.85	1/538
15	6.45	1/566	6.59	1/554	6.85	1/533	6.93	1/533
14	6.51	1/560	6.66	1/548	6.93	1/527	7.00	1/527
13	6.52	1/560	6.66	1/548	6.94	1/526	7.02	1/521
12	6.40	1/570	6.54	1/558	6.84	1/533	7.00	1/520
11	6.28	1/581	6.57	1/556	6.83	1/534	7.05	1/521
10	6.22	1/587	6.52	1/560	6.76	1/540	6.98	1/518
9	6.12	1/596	6.44	1/567	6.66	1/548	6.90	1/523
8	5.99	1/610	6.28	1/582	6.51	1/561	6.75	1/529
7	5.78	1/631	6.06	1/603	6.34	1/576	6.53	1/541
6	5.48	1/666	5.81	1/628	6.20	1/589	6.30	1/559
5	5.05	1/723	5.40	1/675	5.81	1/629	5.90	1/579
4	4.47	1/817	4.78	1/763	5.16	1/707	5.24	1/618
3	3.61	1/1011	3.85	1/947	4.16	1/877	4.22	1/697
2	3.08	1/1185	3.28	1/1111	3.47	1/1052	3.66	1/865
1	1.74	1/2096	1.83	1/1990	1.97	1/1853	2.04	1/997

从上表分析发现，随着间隙的增大，结构层间位移及层间位移角均呈上升趋势。以 X 向响应为例，最大层间位移由无间隙时的 6.36mm 增加至 3mm 间隙时的 7.36mm，增长约 15.7%；Y 向最大层间位移由 6.52mm 增加至 7.02mm，增长约

7.7%。  
可见，当阻尼器存在初始间隙时，在小震及中震阶段内阻尼器难以及时进入工作状态，阻尼器实际耗能效果变差，层间变形增大。间隙越大，结构滞后响应越明显，耗能效率

相应降低。此外,从各层位移角分布趋势来看,间隙的影响随楼层高度增加而逐渐增大,中上部层间位移角变化最为明显,表明黏滞阻尼器在高层建筑中对控制上部柔性段的效果受间隙显著影响。

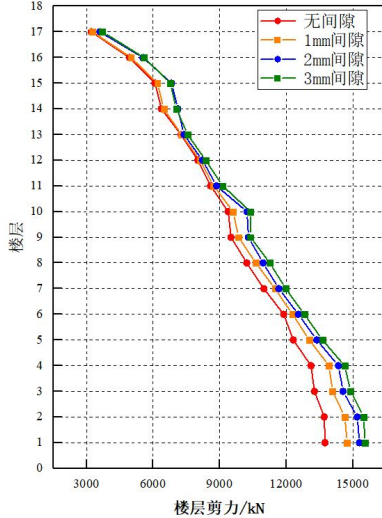


图 3 X 向楼层剪力对比

分析显示,随着阻尼器间隙的增大,结构各层地震剪力呈明显上升趋势。如,在 X 方向,首层楼层剪力由无间隙时的 13749kN 增加至 3mm 间隙时的 15544kN,增幅约为 13.1%;在 Y 方向,首层楼层剪力由无间隙时的 14370kN 增加至 3mm 间隙时的 14986kN,增幅约为 4.3%。这表明,间隙的存在削弱了黏滞阻尼器在初始阶段对结构的约束作用,使结构惯性力难以及时被阻尼器吸收,导致整体地震剪力增大。随着间

(2) 结构设防地震下考虑间隙的楼层剪力响应结果  
对设防地震作用下黏滞阻尼器不考虑间隙影响以及考虑黏滞阻尼器不同间隙影响两种情况进行分析,得到结构楼层地震剪力反应见图 3、图 4。

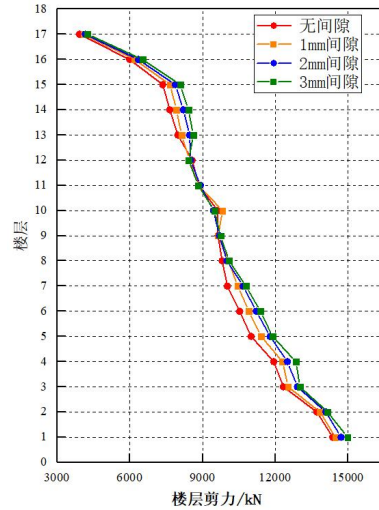


图 4 Y 向楼层剪力对比

隙的不断增大,这种削弱影响越来越大。

(3) 结构设防地震下考虑间隙的黏滞阻尼器附加阻尼比结果

对设防地震作用下黏滞阻尼器不考虑间隙影响以及考虑黏滞阻尼器不同间隙影响两种情况进行分析,得到阻尼器耗能反应如图 5~图 12。

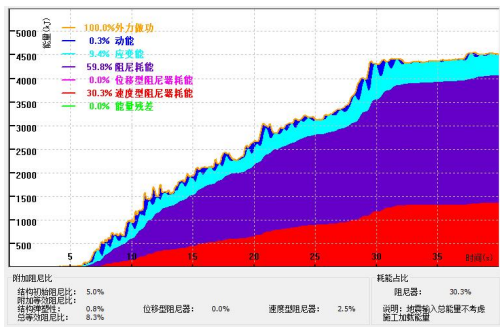


图 5 无间隙阻尼器 X 向耗能占比

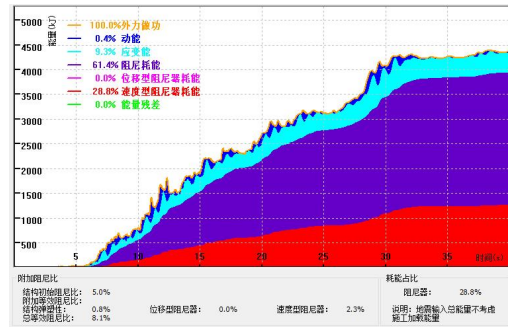


图 6 无间隙阻尼器 Y 向耗能占比

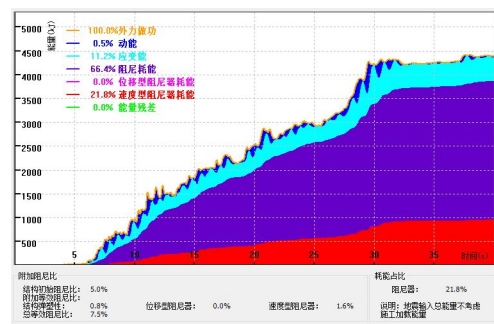


图 7 1mm 间隙阻尼器 X 向耗能占比

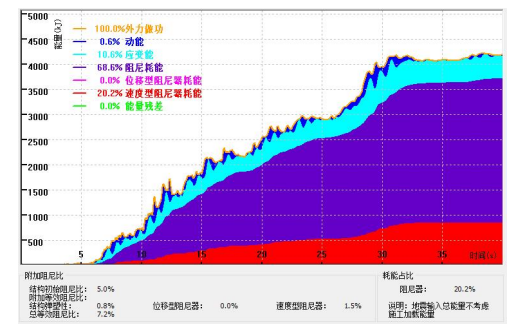


图 8 1mm 间隙阻尼器 Y 向耗能占比

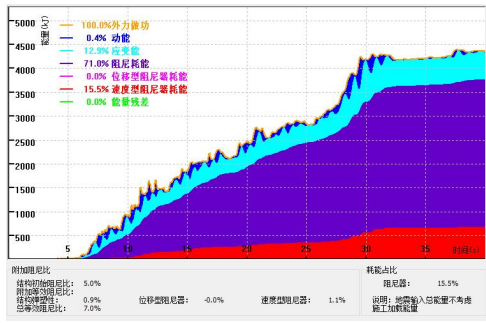


图 9 2mm 间隙阻尼器 X 向耗能占比

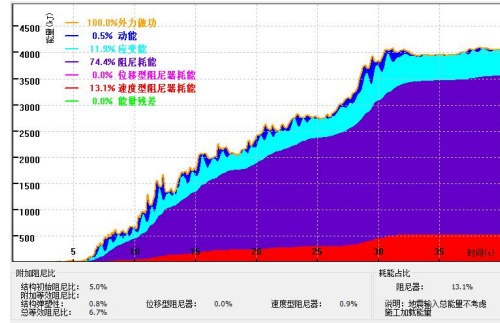


图 10 2mm 间隙阻尼器 Y 向耗能占比

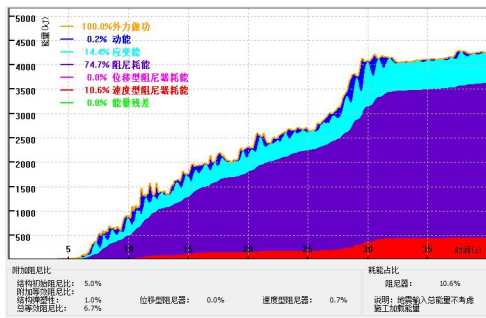


图 11 3mm 间隙阻尼器 X 向耗能占比

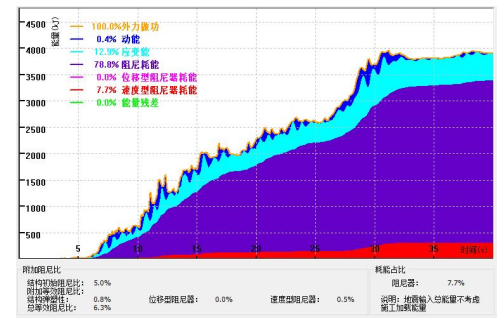


图 12 3mm 间隙阻尼器 Y 向耗能占比

分析发现,随着阻尼器间隙的增大,阻尼器的耗能占比和阻尼器对结构的附加阻尼比贡献越来越小。例如,在 X 方向,阻尼器对结构的附加阻尼比由无间隙时的 2.5% 降低至 3mm 间隙时的 0.7%,降幅约为 72%;在 Y 方向,阻尼器对结构的附加阻尼比由无间隙时的 2.3% 降低至 3mm 间隙时的 0.5%,降幅约为 78%。

这表明,阻尼器间隙越大,其在地震能量耗散中的参与度越低,结构更多的地震输入能量将由构件自身变形吸收,从而导致结构整体耗能效率下降。阻尼器间隙不仅削弱了其瞬时响应能力,也降低了结构整体阻尼水平<sup>[7][8]</sup>。

#### 4. 结论

本文以高层建筑中黏滞阻尼器的减震性能为研究对象,针对阻尼器在实际工程中存在安装间隙的现象,建立了考虑间隙效应的数值分析模型。通过在 SAUSAGE 软件中进行时程分析,对不同间隙条件下结构的层间位移、楼层剪力及阻尼器耗能特性进行了对比研究,得出以下主要结论:

(1)黏滞阻尼器自身构造原因成的腔体介质压缩,漏油,油未灌满等因素以及在安装过程中阻尼器与销轴和结构间的安装连接误差都会造成黏滞阻尼器产生间隙效应。

(2)黏滞阻尼器间隙对结构动力特性及耗能效率具有显著影响。随着间隙的增大,阻尼器在地震初期阶段无法及时进入工作状态,层间位移和楼层剪力均明显增大,阻尼器能量耗散曲线随间隙增大出现明显滞后,间隙的存在削弱了阻尼器在地震全过程中的参与度和稳定性,显著降低了整体减震效果。

(3)合理控制阻尼器间隙是保证其减震性能的关键,在

实际工程中,应严格控制阻尼器制造与安装精度,尽量减小装配间隙,使阻尼器能够在地震初期迅速投入工作,从而充分发挥其能量耗散作用,提升高层建筑的整体抗震性能与安全可靠性。

#### [参考文献]

[1]黄晓明,李国强,赵建华.黏滞阻尼器在高层建筑抗震设计中的应用研究[J].建筑结构学报,2021,42(7):112-120.

[2]朱东飞.黏滞阻尼器失效分析及其对结构性能影响研究[D].广州大学,2016.

[3]张雷,吕正中,陈伟.黏滞阻尼器的能量耗散机理及其在建筑结构中的应用[J].震灾防御技术,2020,15(2):158-166.

[4]孙彦斌,张磊,刘世龙.含间隙黏滞阻尼器的滞回性能及建模方法研究[J].振动与冲击,2019,38(18):196-202.

[5]潘加宝,杨晓东,普静狄.基于数值模拟的黏滞阻尼器间隙模拟分析[J].中国水运,2019,1006-7973(2019)12-0059-02.

[6]李峰,郭成,刘洋.黏滞阻尼器间隙效应对框架结构地震响应的影响[J].工程力学,2022,39(4):145-153.

[7]杜微笑.考虑支撑刚度及连接间隙对非线性黏滞阻尼器减震效果影响研究[D].昆明理工大学,2017.

[8]苗苗,许伟志,王曙光,杜东升.采用不同黏滞液的间隙式黏滞阻尼器力学性能试验研究[J].建筑结构,2019,21.018.