

阻尼器支撑形式对平台连体式结构减震性能影响研究

马殿磨, 李慧峰*, 蒋忠国, 桑健航, 陆 芳

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年7月7日; 录用日期: 2025年7月27日; 发布日期: 2025年8月11日

摘 要

为研究阻尼器支撑形式对平台连体结构减震性能的影响, 本文以某高层平台连体式结构作为研究对象, 设置了单斜撑、V字撑和倒“V”字撑三种不同的阻尼器支撑形式。基于YJK软件建立模型, 利用ETABS有限元软件进行模型校核, 针对多遇地震和罕遇地震进行了动力时程分析。通过对比无控结构和有控结构在地震作用下的减震率、附加阻尼比、能量图和滞回曲线, 结果显示: 设置阻尼器的有控结构地震响应显著减小, 且布置在平台处的阻尼器有效提升了减震效果, 保证了主体结构的安全性。总体而言, 有控结构的减震率与抗震性能均显著优于无控结构, 其中布置倒“V”字撑形式的有控结构减震效果最优。

关键词

平台连体式结构, 耗能减震, 时程分析, 减震率, 附加阻尼比

Study on the Effect of Damper Support Form on the Damping Performance of Platform Connected Structure

Dianmo Ma, Huifeng Li*, Zhongguo Jiang, Jianhang Sang, Fang Lu

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: Jul. 7th, 2025; accepted: Jul. 27th, 2025; published: Aug. 11th, 2025

Abstract

In order to study the effect of damper bracing form on the energy dissipation and seismic damping

*通讯作者。

文章引用: 马殿磨, 李慧峰, 蒋忠国, 桑健航, 陆芳. 阻尼器支撑形式对平台连体式结构减震性能影响研究[J]. 土木工程, 2025, 14(8): 1850-1864. DOI: 10.12677/hjce.2025.148201

of platform connected structure, this paper takes a high-rise platform connected structure as the research object, and three different damper bracing forms, namely, single diagonal bracing, V bracing and inverted “V” bracing, are set up. The model was established based on YJK software, and the ETABS finite element software was used for model calibration, and the dynamic time course analysis was carried out for the multiple-occurrence and rare-occurrence earthquakes. By comparing the damping rates, additional damping ratios, energy diagrams and hysteresis curves of the uncontrolled structure and the controlled structure under seismic action, the results show that the seismic response of the controlled structure with dampers is significantly reduced, and the dampers arranged at the platform effectively improve the damping effect and ensure the safety of the main structure. Overall, the damping rate and seismic performance of the controlled structure are significantly better than that of the uncontrolled structure, and the seismic damping effect of the controlled structure with inverted “V” bracing is the best.

Keywords

Platform Connected Structure, Energy Dissipation Damping, Time-Course Analysis, Damping Rate, Additional Damping Ratio

Copyright © 2025 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

耗能减震技术在中国建筑行业的不断发展和应用,周云等[1]总结了我国消能减震技术研究和应用成果,指出了耗能减震技术存在的关键问题及重点研究的方向。耗能减震技术在建筑结构的加固分析与设计中被广泛使用,如医院、学校等采用消能减震技术提高结构的抗震性能[2]-[5]。在高烈度地区同样采用布置粘滞阻尼器的方式提高结构的抗震性能[6][7]。同时,联合消能减震技术也被广泛应用,如防屈曲支撑(BRB)和粘滞阻尼器(VFD)的联合使用,使得结构的减震效果显著提高[8]-[10]。一些学者对耗能减震技术不断深入研究,兰香等[11]通过试验测试与数值模拟结果进行对比分析,得到更优的附加阻尼比计算方法。张敏等[12]对设置非线性黏滞阻尼器及传统抗震的 RC 框架结构进行巨震作用下非线性动力时程分析及抗倒塌易损性分析。研究表明,在巨震作用下阻尼器增强结构的耗能能力,且抗倒塌性能良好。

在双塔高位连体结构中,阻尼器的布置形式对结构的减震效果也有影响,武宗良等[13]通过对行架式连体结构布置阻尼器,分析得到 V 字撑减震效果最好。本文基于此对某框架剪力墙钢筋混凝土高层平台连体式结构在平台处布置粘滞阻尼器,设置了单斜撑、V 字撑和倒“V”字撑等三种支撑形式,研究阻尼器的支撑形式对高层平台连体式结构减震性能的影响,为钢筋混凝土平台连体式结构提供一定的参考。

2. 工程概况

本工程位于昆明市区某高层钢筋混凝土框架剪力墙结构,YJK 结构模型图如图 1 所示。该建筑为办公建筑,建筑主体长 54.9 m,宽 40.2 m,结构地上 18 层,地下 1 层,结构高度 64.5 m,建筑层高 3.6 m,结构中部每层设置一个 15 m × 33.6 m 的大平台连接左右两侧办公区,YJK 结构平面图如图 2 所示。

该工程抗震设防烈度为 8 度(0.2 g),设计地震分组为第二组,场地类别为 II 类场地,场地特征周期为 0.40 s;地面粗糙程度为 B 类,基本风压为 0.30 kN/m²。采用 YJK 软件进行结构设计,利用 ETABS 仿真软件进行模型校核及有限元分析,其中框架剪力墙结构各层截面信息如表 1 所示。

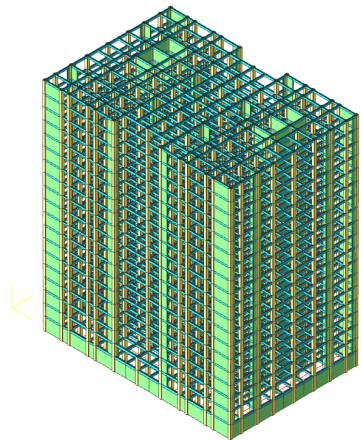


Figure 1. YJK structural model diagram
图 1. YJK 结构模型图

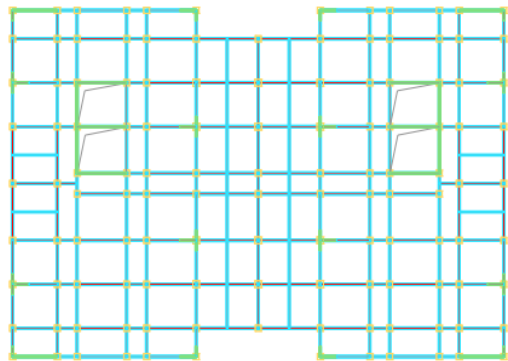


Figure 2. YJK structural plan
图 2. YJK 结构平面图

Table 1. Cross-section information of each floor
表 1. 各层截面信息

楼层	梁(mm)	柱(mm)	主筋	箍筋	墙(mm)	材料等级
地下一层-1	300 × 600, 250 × 600 250 × 500, 250 × 400				250	C45
2~14	250 × 600, 200 × 600 200 × 500, 200 × 400	800 × 800 700 × 700	HRB400	HPB300	200	C40
15~18	200 × 600, 200 × 500 200 × 400					C35

3. 结构模型的建立

3.1. 模型校核

为确保有限元结构模型的正确性，采用 YJK 软件对平台连体式结构进行振型分解反应谱分析，运用 ETABS 有限元分析软件进行模型校核，ETABS 结构模型图如图 3 所示，平面图如图 4 所示。通过差值计算的方法，利用 YJK 和 ETABS 软件建立的无控模型，通过对其周期、质量以及基底剪力进行对比，

进行校核模型的正确性。结构的计算结果详见表 2，从表中能够看出，运用 YJK 和 ETABS 这两种软件得出的计算结果大体上是一致的，各项指标的相对误差均在 5%以内，振型方向保持一致，整体结构符合规范要求，所构建的模型基本无误。本文将基于 ETABS 有限元软件研究分析平台连体式结构在阻尼器不同支撑形式下对整体结构耗能减震性能的影响。

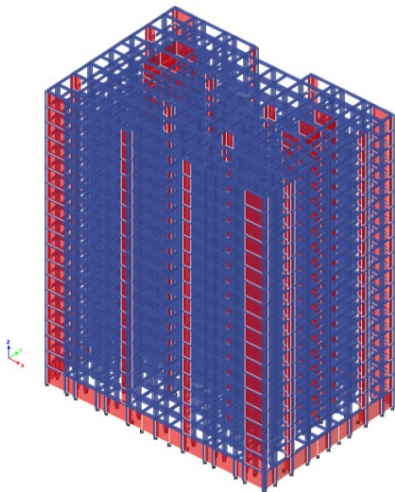


Figure 3. ETABS structural model diagram
图 3. ETABS 结构模型图

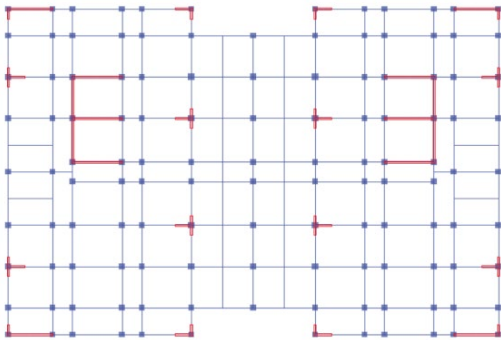


Figure 4. ETABS structural plan
图 4. ETABS 结构平面图

Table 2. Model comparison
表 2. 模型对比

分析软件		YJK	ETABS	误差(%)
质量(t)	恒载	54113.39	54113.54	0
	活载	4129.27	4129.29	0
周期(s)	T ₁	1.894	1.853	2.15
	T ₂	1.787	1.750	2.09
	T ₃	1.487	1.450	2.46
基底剪力(kN)	X 向	24357.41	24778.18	1.73
	Y 向	26211.04	26657.11	1.70

3.2. 阻尼器的布置

本工程结构设置平台，平台处属于相对较薄弱部分，同时平台两侧为办公室，考虑到结构的薄弱处以及设置阻尼器对建筑结构使用功能的影响。故在 X 方向选择在平台处设置阻尼器，既考虑了薄弱处又减小对结构使用功能的影响，且方便后期维修、替换；同样， Y 方向选择在结构相对薄弱处布置阻尼器。根据王鑫等[14]以三种布置方案布置阻尼器，结果表明分散隔层布置减震效果最好。故本文选用单斜撑、 V 字撑和倒“ V ”字撑等三种不同支撑形式分散隔层布置，对比分析出最优的支撑形式方案。在 ETABS 软件中布置阻尼器三种支撑形式如图 5 所示。

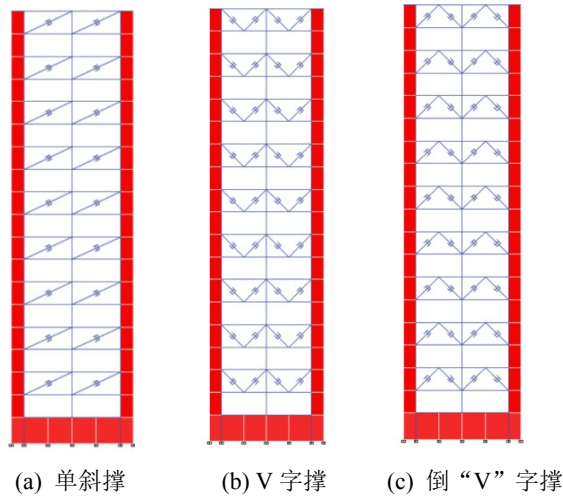


Figure 5. Different support forms
图 5. 不同支撑形式

4. 动力时程分析

4.1. 多遇地震作用下弹性时程分析

4.1.1. 地震波的选取

根据《GB 50011-2010》[15]要求，采用时程分析法进行分析时，实际地震记录和人工拟合时程曲线的选择要依据建筑的场地类别与设计分组而定。其中，实际地震记录的数量应不少于总数的 $2/3$ 。多组时程曲线的平均地震影响系数曲线反应谱，在统计意义上要和振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线保持一致。并且，在进行弹性时程分析的时候，每条时程曲线算出的基底剪力不得小于振型分解反应谱法计算结果的 65% ，多条时程曲线计算得出的基底剪力平均值不得小于振型分解反应谱法计算结果的 80% 。在实际的工程应用里，计算结果不宜过大，单次地震波输入时程计算不应超过反应谱计算的 135% ，其平均值不应超过 120% 。故本工程根据该结构场地特征周期和抗震设防烈度，Chi-Chi_Taiwan-06_NO_3531，TG(0.40)(T1)，Kocaeli，Turkey_NO_1177，Tg(0.40)(T2)、Niigata_Japan_NO_6454，TG(0.40)(T3)，Tabas，Iran_NO_143，Tg(T4)、TH4TG040，Tg(0.40)(T5)、ArtWave-RH4TG040，Tg(R1)，ArtWave-RH3TG040，Tg(R2)等 5 条天然波和 2 条人工波，地震波加速度峰值按照 70 cm/s^2 进行调幅，规范谱与反应谱对比图如图 6 所示。地震动施加方向为水平双向(X 、 Y 两方向)施加，7 条地震波作用于无控结构的反应谱与规范谱基底剪力对比结果如表 3 所示。所选地震波的结果表明，均符合上述规范要求，能够用于多遇地震作用下的弹性时程分析。

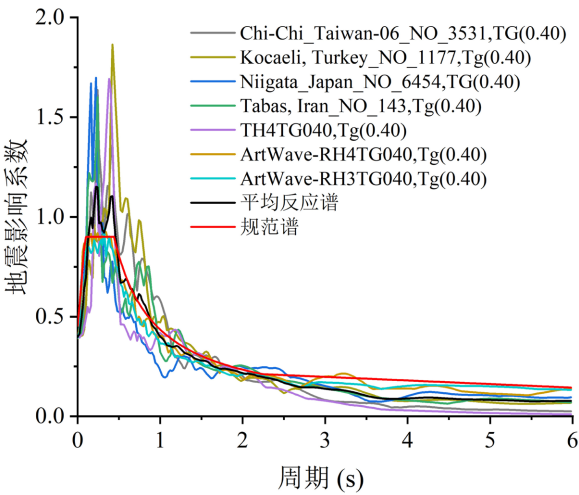


Figure 6. Comparison of normative and reaction spectra
图 6. 规范谱与反应谱对比图

Table 3. Comparison of basal shear between reaction and normative spectra
表 3. 反应谱与规范谱基底剪力对比

时程工况	反应谱	T1	T2	T3	T4	T5	R1	R2	平均值	
剪力(kN)	X 向	24778.18	23185.75	22688.08	21259.02	23159.17	18300.78	18667.69	24446.73	21672.46
	Y 向	26657.11	27043.07	26028.67	19256.44	27204.73	21489.23	20712.58	25489.71	23889.20
比例(%)	X 向	100	100	94	92	86	93	74	75	94
	Y 向	100	100	101	98	72	102	81	78	92

4.1.2. 弹性时程分析减震率对比分析

在多遇地震作用下，建立无控结构和布置三种不同支撑形式的有控结构进行有限元分析。粘滞阻尼器在 ETABS 有限元软件中采用 Damper-Exponential 单元进行模拟，使用非线性振型法(FNA 法)进行弹性时程分析。根据无控结构和有控结构分析，得到 X、Y 方向的层间位移角对比、楼层剪力对比，如图 7~10 所示。

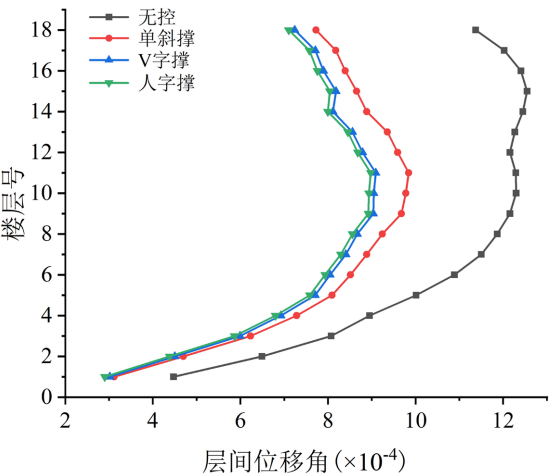


Figure 7. X-direction interlayer displacement angle under multiple earthquakes
图 7. 多遇地震作用下 X 方向层间位移角

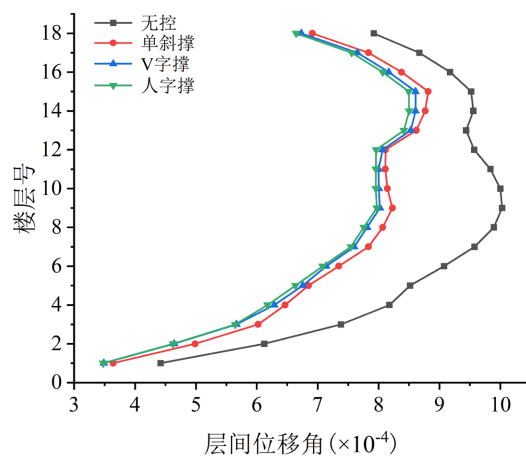


Figure 8. Y-direction interlayer displacement angle under multiple earthquakes

图 8. 多遇地震作用下 Y 方向层间位移角

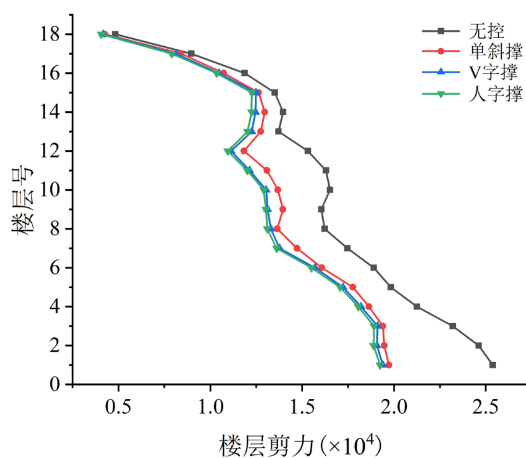


Figure 9. X-direction floor shear under multiple earthquakes

图 9. 多遇地震作用下 X 方向楼层剪力

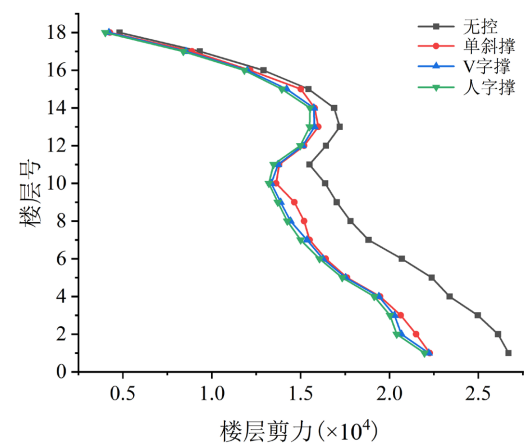


Figure 10. Y-direction floor shear under multiple earthquakes

图 10. 多遇地震作用下 Y 方向楼层剪力

对多遇地震作用下进行无控结构和有控结构的减震率(层间位移角、楼层剪力的降低率)进行对比分析。由图 7、图 8 对比分析得到: X 方向无控结构、单斜撑、 V 字撑和倒“ V ”字撑最大层间位移角分别为 1/797、1/1016、1/1100、1/1111; 单斜撑、 V 字撑和倒“ V ”字撑在 X 方向层间位移角降低率分别为 18%~32%、22%~36%、24%~38%。 Y 方向无控结构、单斜撑、 V 字撑和倒“ V ”字撑最大层间位移角分别为 1/997、1/1134、1/1161、1/1173; 单斜撑、 V 字撑和倒“ V ”字撑在 Y 方向层间位移角降低率分别为 7%~20%、9%~24%、11%~26%。通过层间位移角降低率对比分析, 得到倒“ V ”字撑布置粘滞阻尼器层间位移角降幅最大, 减震效果最好。

通过图 9、图 10 对比分析得到: 单斜撑、 V 字撑和倒“ V ”字撑在 X 方向楼层剪力降低率分别为 6%~22%、8%~27%、9%~28%; 单斜撑、 V 字撑和倒“ V ”字撑在 Y 方向楼层剪力降低率分别为 2%~21%、6%~22%、8%~26%。通过楼层剪力降低率对比分析, 得到倒“ V ”字撑布置粘滞阻尼器楼层剪力降低最多, 减震效果最好。

综上无控结构和三种不同支撑形式的有控结构对比分析, 结果表明三种阻尼器支撑形式均达到良好的减震效果, 其中单斜撑减震率低于 V 字撑和倒“ V ”字撑, 而 V 字撑和倒“ V ”字撑减震效果略为接近, 但整体来说倒“ V ”字撑减震率最高, 减震效果最优。

4.1.3. 附加阻尼比对比分析

Table 4. Additional damping ratio

表 4. 附加阻尼比

支撑方式	单斜撑		V 字撑		倒“ V ”字撑	
	X 向(%)	Y 向(%)	X 向(%)	Y 向(%)	X 向(%)	Y 向(%)
T1	4.78	3.46	6.1	3.89	6.33	4.12
T2	4.39	3.04	5.74	3.62	5.94	3.79
T3	5.21	3.95	6.67	4.18	6.97	4.52
T4	4.60	3.53	5.96	3.75	6.20	4.04
T5	4.36	3.30	5.66	3.77	5.86	3.95
R1	5.08	3.81	6.31	4.10	6.58	4.36
R2	4.62	3.42	6.14	4.00	6.36	4.25
平均值	4.66	3.45	6.05	3.87	6.28	4.11

能量法计算附加阻尼比是一种基于结构动力响应能量分析的方法。通过这种分析方法, 可以计算出结构在特定动力作用下的附加阻尼比, 耗能部件附加给结构的有效阻尼比按下列公式(1)计算[16]:

$$\zeta_d = \sum_{j=1}^n W_{cj} / 4\pi W_s \quad (1)$$

式中: ζ_d 为耗能减震结构的附加有效阻尼比; W_{cj} 为第 j 个耗能部件在结构预期层间位移 Δ_{uj} 下往复循环一周所消耗的能量($\text{kN}\cdot\text{m}$); W_s 为耗能减震结构在水平地震作用下的总应变能($\text{kN}\cdot\text{m}$)。

在多遇地震作用下三种支撑方式提供的附加阻尼比如表 4 所示。通过对比分析得出单斜撑在 X 、 Y 方向提供的附加阻尼比平均值分别为 4.66%、3.45%; V 字撑在 X 、 Y 方向提供的附加阻尼比平均值分别为 6.05%、3.87%; 倒“ V ”字撑在 X 、 Y 方向提供的附加阻尼比平均值分别为 6.28%、4.11%。结果表明, 倒“ V ”字撑在多遇地震作用下提供的附加阻尼比最大, V 字撑其次, 单斜撑提供的附加阻尼比最小, 倒

“V”字撑的减震效果最好。

4.2. 罕遇地震作用下弹塑性时程分析

4.2.1. 地震波的选取

根据《抗规》[15]要求,在罕遇地震作用下,场地特征周期应增加 0.05 s,本工程实际选取 TH3TG045, Tg(0.45)、Northridge-01_NO_1015, Tg(0.45)、ArtWave-RH2TG045, Tg(0.45)等 2 条天然波和 1 条人工波。规范谱与反应谱对比图如图 11 所示。

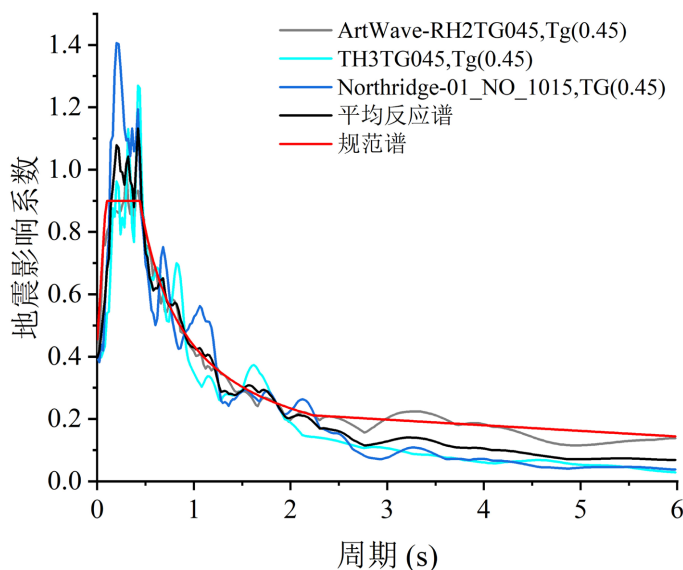


Figure 11. Comparison of normative and reaction spectra

图 11. 规范谱与反应谱对比

4.2.2. 弹塑性时程分析减震率对比分析

在罕遇地震作用下,在 ETABS 软件中使用非线性直接积分法进行弹塑性时程分析。通过对无控结构和有控结构进行分析,得到 X 、 Y 方向的层间位移角、楼层剪力对比图,如图 12~15 所示。

通过图 12、图 13 对比分析得到: X 方向无控结构、单斜撑、V 字撑和倒“V”字撑最大层间位移角分别为 1/537、1/548、1/555、1/557; Y 方向无控结构、单斜撑、V 字撑和倒“V”字撑最大层间位移角分别为 1/646、1/653、1/655、1/661;两个方向均满足《抗规》[15]中 1/100 的要求。单斜撑、V 字撑和倒“V”字撑在 X 方向层间位移角降低率分别为 1.2%~3.1%、1.9%~5.2%、2.2%~5.4%;单斜撑、V 字撑和倒“V”字撑在 Y 方向层间位移角降低率分别为 0.3%~3.7%、0.7%~4.3%、1.3%~5.7%。通过层间位移角降低率对比分析得到倒“V”字撑布置粘滞阻尼器整体减震效果最好。

通过图 14、图 15 对比分析得到:单斜撑、V 字撑和倒“V”字撑在 X 方向楼层剪力降低率分别为 1.7%~6.5%、2.7%~9.3%、2.8%~10.5%;单斜撑、V 字撑和倒“V”字撑在 Y 方向楼层剪力降低率分别为 1.7%~6.3%、2.7%~8.9%、2.7%~10.0%。通过楼层剪力降低率对比分析得到倒“V”字撑布置粘滞阻尼器楼层剪力降低率最大,减震效果最好。

综上无控模型和三种不同支撑形式的有控结构对比分析,在罕遇地震作用下三种支撑形式均达到一定的减震效果,其中单斜撑减震率略低于 V 字撑和倒“V”字撑,而 V 字撑和倒“V”字撑减震效果基本接近,但整体来说倒“V”字撑减震效果最好。

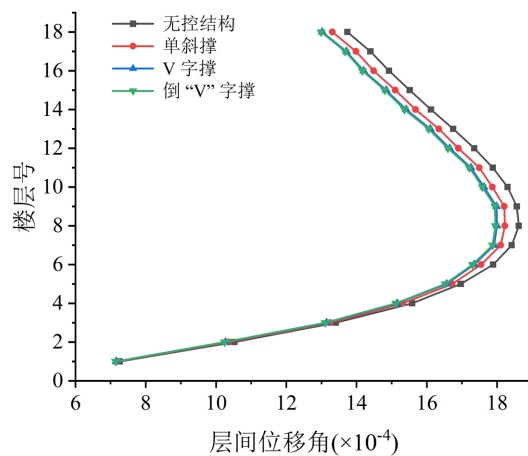


Figure 12. *X*-direction interlayer displacement angle under rare earthquakes

图 12. 罕遇地震作用下 *X* 方向层间位移角

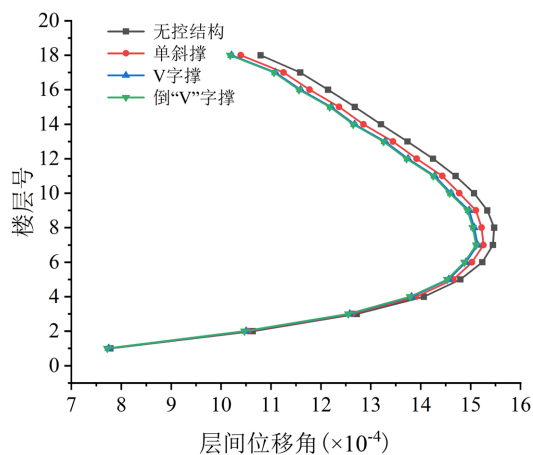


Figure 13. *Y*-direction interlayer displacement angle under rare earthquakes

图 13. 罕遇地震作用下 *Y* 方向层间位移角

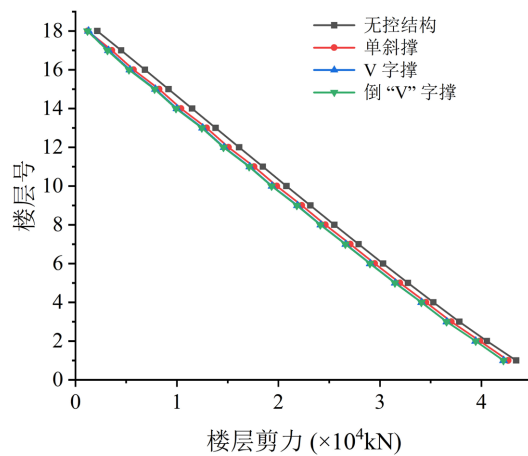


Figure 14. *X*-direction floor shear under rare earthquakes

图 14. 罕遇地震作用下 *X* 方向楼层剪力

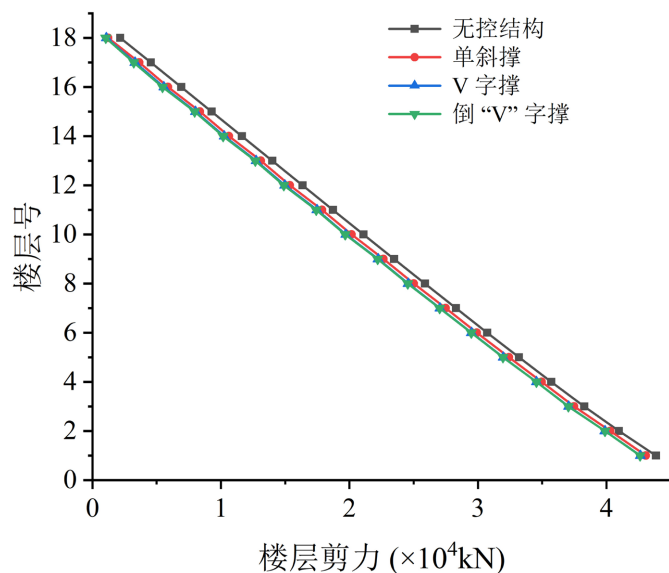
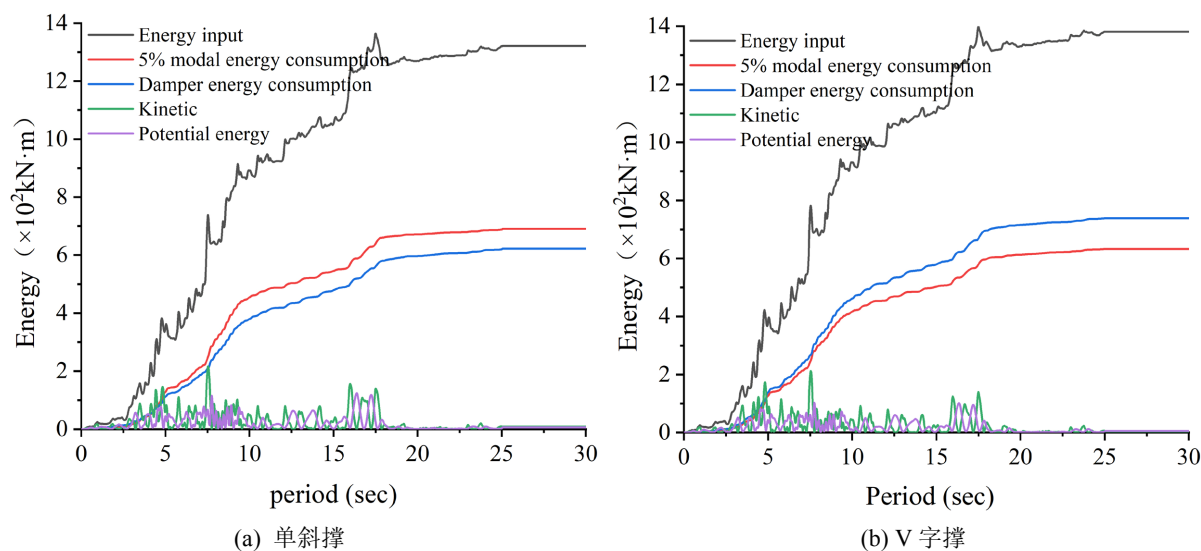


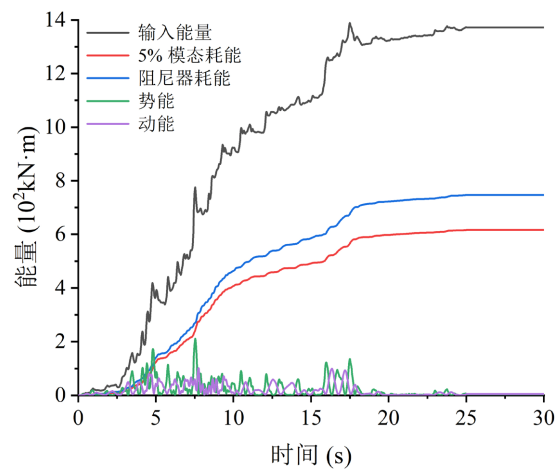
Figure 15. Y-direction floor shear under rare earthquakes
图 15. 罕遇地震作用下 Y 方向楼层剪力

5. 能量图及滞回曲线对比分析

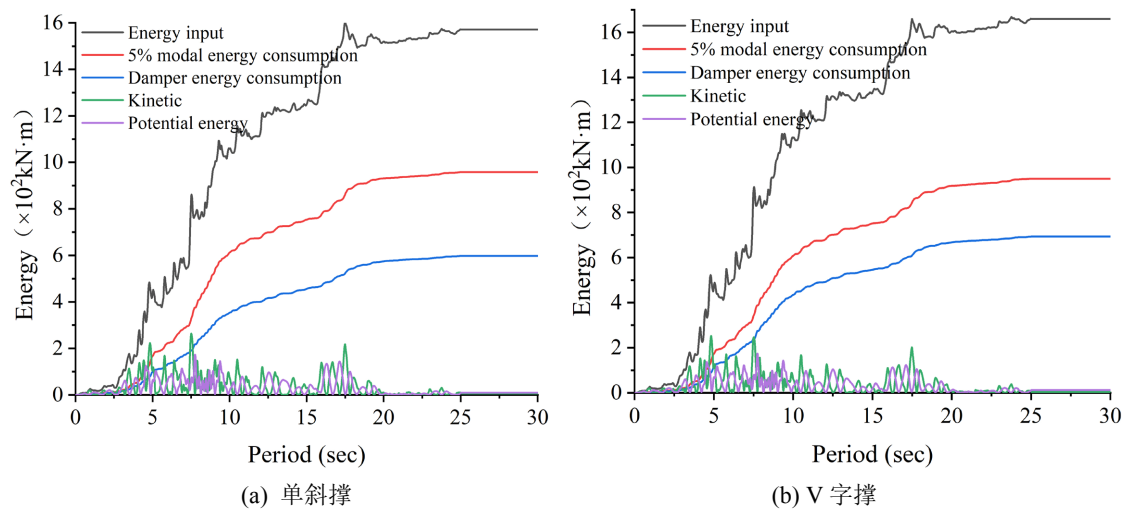
5.1. 能量图对比分析

以输入天然波 Kocaeli, Turkey_NO_1177, $T_g(0.40)$ 为例, 从 ETABS 软件中输出三种有控结构在多遇地震作用下 X、Y 方向的能量变化时程图, 如图 16、图 17 所示。通过图 16、图 17 可知随着地震作用持续时间的增加, 地震作用在结构上的能量越来越大, 黏滞阻尼器消耗了很大一部分能量, 起到了保护整体结构的作用, 同时也反映出粘滞阻尼器起到了良好的耗能作用。由图 16、图 17 对比分析出, 单斜撑、V 字撑和倒“V”字撑在多遇地震作用下的阻尼器耗能占比在 X 方向分别为 44.07%、50.69%、51.54%; 在 Y 方向阻尼器耗能占比分别为 35.12%、39.17%、40.33%。其中倒“V”字撑在 X、Y 两个方向阻尼器的耗能占比最大, 整体来说倒“V”字撑布置阻尼器的耗能率最高。



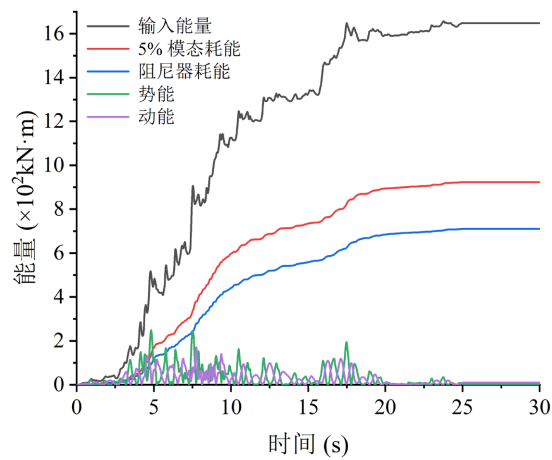


(c) 倒“V”字撑

Figure 16. X-direction energy map**图 16. X 方向能量图**

(a) 单斜撑

(b) V 字撑



(c) 倒“V”字撑

Figure 17. Y-direction energy map**图 17. Y 方向能量图**

5.2. 滞回曲线对比分析

为深入研究粘滞阻尼器支撑形式对平台连体式结构减震性能影响，在 X 方向取平台处同位置三种支撑形式阻尼器、 Y 方向也取同位置三种支撑形式阻尼器作为研究对象，对 X 、 Y 两方向同位置粘滞阻尼器的滞回耗能状况进行对比分析。多遇地震以输入天然波 Kocaeli, Turkey_NO_1177, $T_g(0.40)$ 为例，提取三种有控结构粘滞阻尼器在多遇地震作用下的滞回曲线图，如图 18 和图 19 所示。

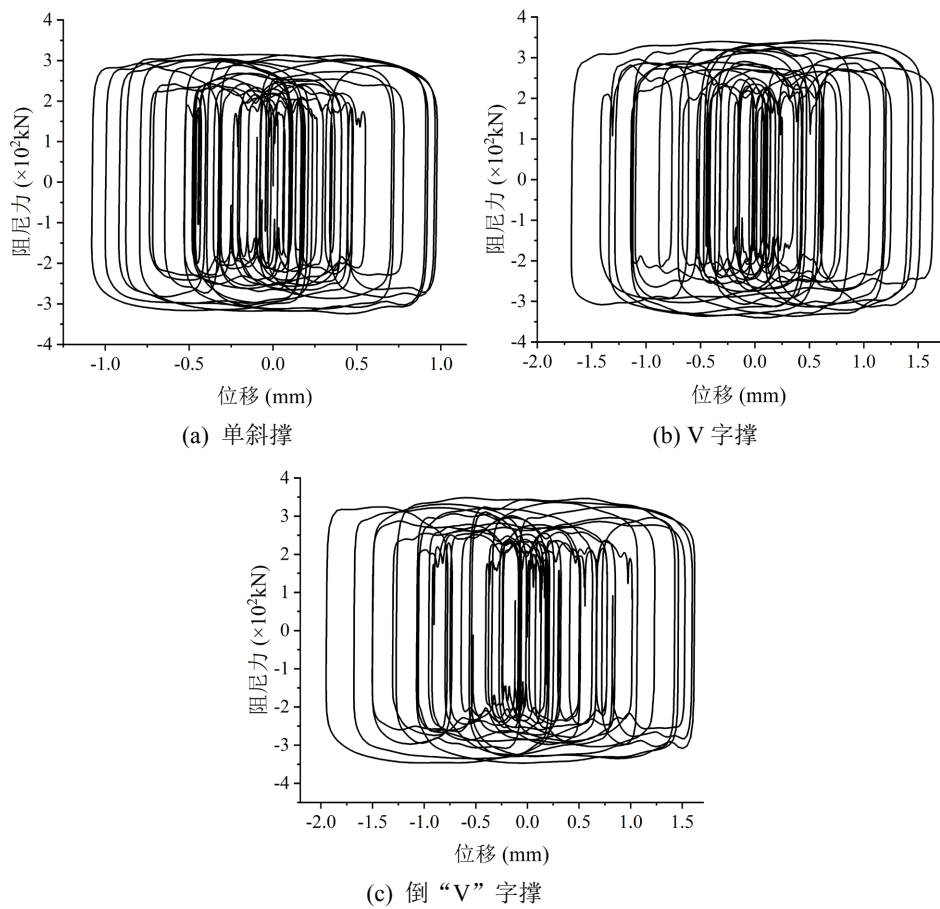
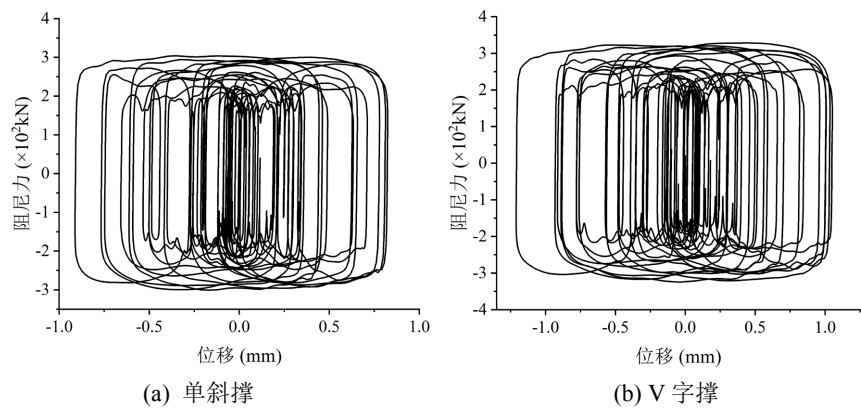


Figure 18. X -direction hysteresis curve
图 18. X 方向滞回曲线



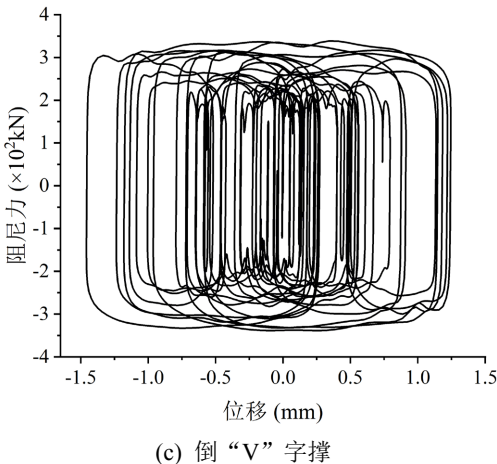


Figure 19. Y-direction hysteresis curve
图 19. Y 方向滞回曲线

从图 18 和图 19 能够看出，三种有控结构粘滞阻尼器的滞回曲线在 X 方向与 Y 方向都比较饱满，这意味着布置于平台位置以及薄弱部位的粘滞阻尼器在地震发生时能够发挥滞回耗能的作用。就粘滞阻尼器滞回曲线的面积而言，倒“V”字撑中的阻尼器滞回曲线面积要比另外两种支撑形式的阻尼器滞回曲线面积大。在多遇地震作用下，单斜撑、V 字撑和倒“V”字撑在 X 方向粘滞阻尼器的最大位移分别为 1.24 mm、1.46 mm 和 1.94 mm，最大阻尼力分别为 315 kN、338 kN、348 kN。在 Y 方向粘滞阻尼器最大位移分别为 0.91 mm、1.21 mm、1.63 mm，最大阻尼力分别为 303 kN、325 kN、342 kN。综上对比分析，说明采用倒“V”字撑布置时粘滞阻尼器位移和阻尼力都大于单斜撑和 V 字撑，滞回耗能效果最好。

6. 结论

- 1) 在平台连体结构的 X 方向(平台处)和 Y 方向(薄弱处)设置粘滞阻尼器后，整体结构的层间位移角与楼层剪力都大幅减小。多遇地震作用下，阻尼器的耗能作用得到充分发挥，减震效果十分明显；罕遇地震作用下，粘滞阻尼器也能够发挥部分耗能作用，达到一定的减震效果。
- 2) 对比多遇地震和罕遇地震作用下的动力时程分析，可以看出粘滞阻尼器在平台处的支撑形式对高层平台连体式结构减震效果不同。其中采用倒“V”字撑形式布置时，结构的减震率最高，阻尼器的耗能占比最高达 51.54%，平均附加阻尼比最高达 6.28%，滞回曲线最为饱满，减震效果最佳。
- 3) 通过对三种支撑形式的减震效果分析得知，当各支撑形式布置粘滞阻尼器均能达到耗能减震目标时，可以根据建筑结构的使用功能选择最合适的支撑形式，以减少粘滞阻尼器支撑形式对建筑结构立面使用功能的影响。

参考文献

- [1] 周云, 商城豪, 张超. 消能减震技术研究与应用进展[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 33-48.
- [2] 钱礼平, 王红松, 胡大柱, 等. 某医院病房大楼消能减震加固分析与设计[J]. 建筑结构, 2024, 54(11): 119-123, 30.
- [3] 唐熙, 王启文, 曹前, 等. 深圳某医院急诊综合楼消能减震结构设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 786-793.
- [4] 毛华. 采用消能减震结构进行降度设计的方法探讨[J]. 建筑结构, 2022, 52(8): 74-79.
- [5] 谢汪洋, 陈道政. 某门诊住院楼消能减震加固设计与抗震性能分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(3): 352-357, 363.
- [6] 陶冶, 白树杨, 周袁凯, 等. 某幼儿园消能减震分析与设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 825-830.

-
- [7] 王海, 张达生, 温四清. 乌鲁木齐某办公楼消能减震设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 921-925.
 - [8] 吴克川, 陈旭, 陶忠, 等. 联合消能减震结构设计方法与工程应用分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(4): 831-843.
 - [9] 张坚, 周正久, 周佳祺, 等. 组合消能减震技术在工程项目中的应用与研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(1): 71-77.
 - [10] 吴迈, 马士奇, 赵欣. 某高层型钢混凝土框架结构基于性能的消能减震加固方案研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(10): 68-74.
 - [11] 兰香, 张兴仙, 潘文, 等. 基于时程分析方法的黏滞阻尼减震结构附加阻尼比计算研究[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(2): 54-63.
 - [12] 张敏, 陈钰雪. 巨震作用下非线性黏滞阻尼耗能 RC 框架结构抗倒塌分析[J]. 应用力学学报, 2021, 38(6): 2291-2297.
 - [13] 武宗良, 孙建良, 王廷彦, 等. 耗能装置布置形式对连体结构减震性能的影响研究[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版): 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20231127.1348.002.html>, 2024-09-24.
 - [14] 王鑫, 李慧峰, 戴必辉, 等. 阻尼器布置方式对平台式连体不规则结构减震影响研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2024, 46(2): 24-32, 67.
 - [15] 黄世敏, 王亚勇, 丁洁民, 等. GB50011-2010 建筑抗震设计规范(2016 版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
 - [16] 周福霖, 周云, 吕西林, 等. JGJ297-2013 建筑消能减震技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.