

套索式黏滞阻尼器位移放大系数 合理取值和布置优化

郭罗灿¹,李文斌²,陈永祁³,赵大海¹,马良喆³,张帆²,郑久建¹

(1. 燕山大学 建筑工程与力学学院,河北 秦皇岛 006004; 2. 深圳市华阳国际工程设计股份有限公司,深圳 518000;
3. 北京奇太振控科技发展有限公司,北京 100037)

摘要:针对刚度较大、层间位移较小的超高层剪力墙结构,黏滞阻尼器采用套索布置在避难层中,其放大系数的取值和布置方式仍存在不足。套索连接是位移放大装置,通过放大阻尼器轴向行程来提高阻尼器的耗能能力。从几何分析的角度出发,对反向套索连接阻尼器的结构减振率和布置优化进行探讨;推导了反向套索连接阻尼器轴线最大位移的解析式,对比不同布置高度、不同放大系数的套索连接下结构的动力响应。当布置框架跨度过大时,通过设置悬挑桁架的反向套索连接,对比设置前后结构的动力响应。研究表明:套索系统效率与布置框架的高度、跨度有关,按角度确定的理论放大系数与结构减振率并不成正比。与原方案布置相比,优化布置后的结构减振率更高。优化方案在实际工程中均得到验证,即合理选取套索放大系数和布置方式能更大化地提高结构的附加阻尼比。

关键词:超高层结构;黏滞阻尼器;放大系数;套索式安装;附加阻尼比

中图分类号:TU352.1

文献标识码:A

Reasonable value and layout optimization of displacement amplification coefficient for toggle-brace-dampers system

GUO Luocan¹, LI Wenbin², CHEN Yongqi³, ZHAO Dahai¹, MA Liangzhe³, ZHANG Fan², ZHENG Jiujian¹

(1. College of Construction Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 006004, China; 2. Huayang International Engineering Design Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 3. Beijing Qitai Shock Control and Scientific Development Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: For super high-rise shear wall structures with large stiffness and small inter-story displacements, the viscous dampers are arranged in the refuge floors using toggle-brace-dampers, and there are still deficiencies in the value of the amplification coefficient and the arrangement. The toggle-brace-damper is a displacement amplification device, which improves the energy dissipation capacity of the damper by amplifying the axial travel of the damper. From the perspective of geometric analysis, the structural of the reverse toggle-brace-damper vibration mitigation efficiency and arrangement optimization are explored; The analytical equation for the maximum displacement of the damper axis of the reversed device is derived, and the dynamic response of the structure under the device with different arrangement heights and different amplification factors is compared. When the arranged frame span is too large, the dynamic response of the structure before and after the setup is compared by setting up the device of the overhanging truss. The results show that the efficiency of the toggle-brace-dampers system is related to the height and span of the arranged frame, and the theoretical amplification coefficient determined according to the angle is not proportional to the vibration mitigation efficiency of the structure. The structural vibration mitigation efficiency is higher after the optimized arrangement than the original arrangement. The optimized scheme has been verified in

收稿日期:2023-07-20; 修回日期:2023-10-27

基金项目:河北省重点研发计划项目(21375401D)

作者简介:郭罗灿(1998—),男,硕士研究生,主要从事高层建筑被动控制研究。E-mail:1198169101@qq.com

通讯作者:郑久建(1970—),男,副教授,博士,主要从事工程抗震研究。E-mail:zhengjiujian@126.com

actual projects, i.e., a reasonable selection of the amplification factor and arrangement can improve the additional damping ratio of the structure to a greater extent.

Key words: super high-rise structure; viscous dampers; amplification factor; toggle-brace-system; additional damping ratio

0 引言

通常,结构控制方式包括主动控制、被动控制、半主动控制和混合控制^[1]。结构安装阻尼器耗能是被动控制的重要方式之一。目前,调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)、调谐液体阻尼器(tuned liquid damper, TLD)和液体黏滞阻尼器(fluid viscous damper, FVD)常被用于抑制超高层结构风致振动或地震响应。由于建筑隔墙与主体结构连接方式等因素,造成超高层结构自振实测周期与理论周期差异较大,故采用TMD抑制超高层结构风致振动和地震响应存在不足。与TMD相比,直接安装黏滞阻尼器在结构避难层中,降低了结构对频率的敏感度,且工作期间的维护以及地震后的恢复都较便捷^[2]。

剪力墙结构刚度较大,黏滞阻尼器通过位移放大装置布置,能够有效解决层间变形较小的问题。HWANG等^[3]针对层间相对位移较小、刚度较大的混凝土结构,采用肘节式放大装置布置黏滞阻尼器,分析结构的耗能,表明黏滞阻尼器对结构减振起到较好的作用。CONSTANTINO等^[4]通过振动台试验,分析肘节式放大装置的效率。试验结果表明,对于层间相对位移较小的刚性结构,肘节式放大装置能有效提高结构的附加阻尼比。HUANG^[5]考虑支撑杆的弹性变形,改进了套索连接装置的数学模型,并对某39层办公楼进行数值计算,结果表明支撑杆的刚度对于套索连接放大效率较为敏感。

国内外对于该装置的试验研究较多。HWANG等^[6]通过振动台试验,对比了套索、对角安装阻尼器和无控下3层钢结构模型的地震响应,结果表明销轴连接中存在的间隙会降低结构的附加阻尼比。ZHANG等^[7]通过试验对比了不同肘节式放大装置的控制效果,试验结果表明上部支撑肘节式放大系数和理论分析结果基本一致,且放大系数随荷载变化而发生变化,并强调安装过程中避免发生平面外过大偏心。虽然也有学者对该放大装置进行优化^[8-9],但是套索放大装置还存在以下不足:放大系数的不合理取值;布置跨度过长时,支撑杆弹性变形对系统影响较大。

为了合理化采用套索连接布置阻尼器,本文主要针对反向套索连接放大系数取值和布置方式进行探讨。基于套索连接几何关系,推导反向套索连接阻尼器轴向最大位移的解析式,讨论了套索位移放大系数和结构减振率的关系,对放大系数的取值进行优化;同时考虑过大布置跨度时,支撑杆弹性变形对放大作用的不利影响,提出优化布置方式。

1 套索连接放大系数的取值分析

1.1 基于套索放大系数公式的优化

对于刚度较大的钢筋混凝土框架-剪力墙结构,布置在变形较小的柱间会使阻尼器耗能效率降低。而采用套索式布置的阻尼器,能提高其耗能能力。其中反向套索式放大系数的解析式由CONSTANTINO等^[4]推导,套索连接示意图如图1所示,传力图如图2所示。

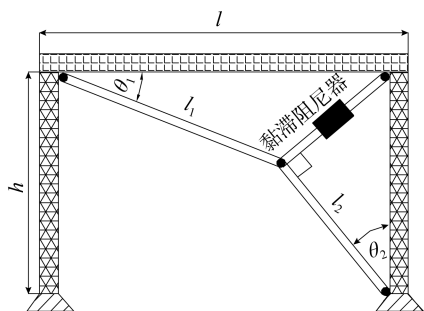


图1 反向套索示意图

Fig. 1 Reverse toggle configuration

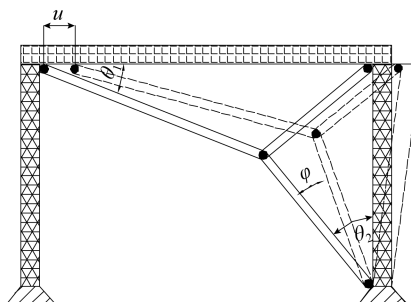


图2 框架变形传力图

Fig. 2 Framework deformation diagram

阻尼器轴线相对位移由式(1)求解:

$$u_D = f \cdot u \quad (1)$$

式中: u_D 为沿阻尼器轴线的相对位移; u 为框架的相对变形; f 为位移放大系数。

同理,沿阻尼器轴向方向的阻尼力 F_D 与作用在框架外力 F 的关系为

$$F = f \cdot F_D \quad (2)$$

忽略支撑杆的弹性变形,阻尼器轴线方向的相对位移由式(3)求解:

$$u_D = \pm [\alpha \cdot l_2 \cdot \tan \theta_2 - \{ [\alpha \cdot l_2 \sin(\theta_2 \pm \varphi) + u]^2 + [h - \alpha \cdot l_2 \cdot \cos(\theta_2 \pm \varphi)]^2 \}^{1/2}] \quad (3)$$

式中: h 为框架高度; l 为框架跨度; l_1 、 l_2 分别为上支撑杆和下支撑杆的长度; θ_1 、 θ_2 分别为上支撑杆与 l 的夹角、下支撑杆和柱子的夹角; α 为阻尼器与支撑杆 l_2 连接点到柱节点的长度和 l_2 的比值,当3个节点相交于一点时, $\alpha = 1$,如图2所示; φ 为框架发生变形时支撑杆转动的角度。

其中:

$$l_1^2 = h^2 + l_2^2 + (l-u)^2 - 2h \cdot l_2 \cdot \cos(\theta_2 \pm \varphi) - 2 \cdot (l-u) \cdot l_2 \cdot \sin(\theta_2 \pm \varphi) \quad (4)$$

由图1可引入 h 、 l 与角度的关系式为

$$l_1 \sin \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 = h \quad (5)$$

$$l_1 \cos \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 = l$$

联立方程组,可得 l_1 :

$$l_1 = \frac{h + l - l_2 (\sin \theta_2 + \cos \theta_2)}{\sin \theta_1 + \cos \theta_1} \quad (6)$$

引入变量 $u_{d_{\max}}$, $u_{d_{\max}}$ 表示阻尼器轴线方向最大位移,由不等式 $\sqrt{a^2 + b^2} \leq (a+b)$,则式(3)可改写为

$$u_D \leq u_{d_{\max}} = \alpha l_2 (\tan \theta_2 - \sin(\theta_2 \pm \varphi) + \cos(\theta_2 \pm \varphi)) - u - h \quad (7)$$

由式(5)~式(7)可得 $u_{d_{\max}}$ 与 h 、 l 的复杂非线性关系。由于 φ 相对较小,通过简化计算,仅保留 h 的二次项、线性项和 l 的线性项,简化后的 $u_{d_{\max}}$ 阻尼器轴线方向最大位移解析式为

$$u_{d_{\max}} = Ah^2 + Bh + Cl + Dl + Eu \quad (8)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 、 E 由 θ_1 、 θ_2 确定,表达式分别为

$$A = \alpha (\tan \theta_2 - \sin \theta_2 + \cos \theta_2) (-2 \sin \theta_1 \cos \theta_1) \quad (9)$$

$$B = \frac{\alpha (\tan \theta_2 - \sin \theta_2 + \cos \theta_2)}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2} \quad (10)$$

$$C = \frac{\alpha (\tan \theta_2 - \sin \theta_2 + \cos \theta_2)}{\sin \theta_2 + \cos \theta_2} \quad (11)$$

$$D = \frac{\alpha (\tan \theta_2 - \sin \theta_2 + \cos \theta_2)}{2 \sin \theta_2} \quad (12)$$

$$E = \frac{\alpha (\tan \theta_2 - \sin \theta_2 + \cos \theta_2)}{2 \sin \theta_2} + 1 \quad (13)$$

由式(8)可知,当 θ_1 、 θ_2 、 u 确定时, A 、 B 、 C 、 D 、 E 为定值,则阻尼器轴线方向最大位移 $u_{d_{\max}}$ 取决于变量 h 、 l 。文献[4]提及 θ_1 、 θ_2 之和为 90° 时阻尼器放大效果最佳。为了探讨框架高度 h 、跨度 l 和阻尼器轴线方向最大位移 $u_{d_{\max}}$ 的变化规律,故给定 $\alpha = 1$ 、 $\theta_1 = 40^\circ$ 、 $\theta_2 = 50^\circ$ 、 $u = 0.000413$ m,分析阻尼器最大位移随框架跨度、高度的变化规律,如图3和图4所示。

由图3可知,当框架高度一定时,阻尼器布置跨度越小,其轴向最大行程越小,甚至出现负值;由图4可知,当框架跨度一定时,阻尼器轴线最大位移和框架高度关系曲线为“凸”。阻尼器最大位移随着框架高度的增大而增大,随后达到极大值。由于理论位移放大系数取决于阻尼器轴线位移和框架的相对变形,故套索系统理论放大系数与系统效率并不成正比,而是越接近阻尼器最大位移曲线时,放大效果越佳。

给定布置框架的跨度 $l = 4$ m,以及 $\theta_2 = 50^\circ$ 、 $u = 0.000413$ m,分析 $u_{d_{\max}}$ 、 f_{\max} 随 h 和 θ_1 的变化规律,如图5和图6所示。由分析结果可知,阻尼器最大位移和位移最大放大系数随 h 和 θ_1 的增大而减小,甚至会出现负值。这表明黏滞阻尼器套索布置在结构框架中, h 和 θ_1 对系统的放大效率较敏感。

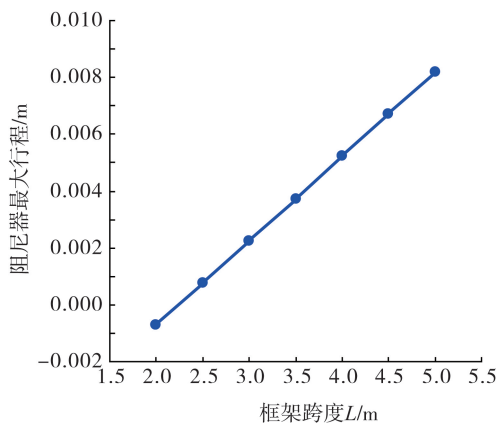


图3 阻尼器最大位移和框架长度的变化

Fig. 3 Variation of the maximum displacement of damper and the length of frame

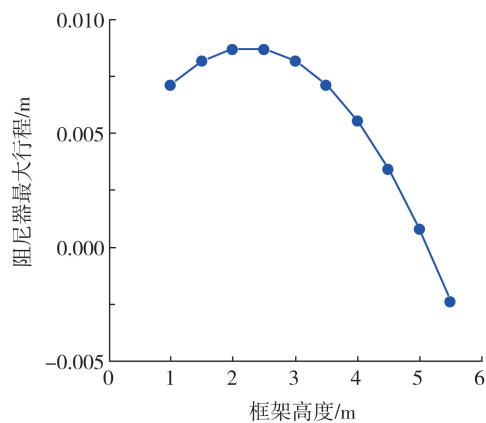
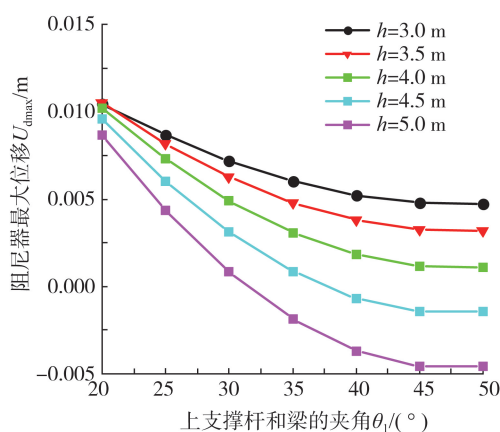
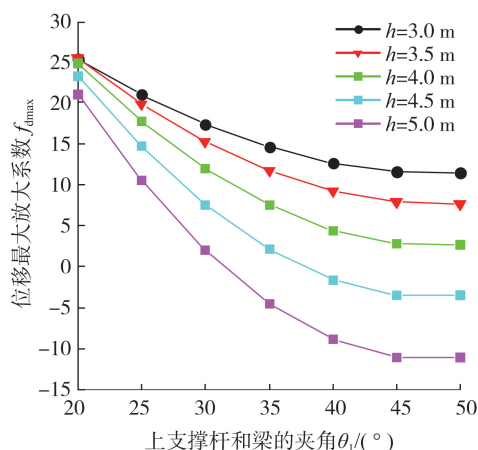


图4 阻尼器最大位移和框架高度的变化

Fig. 4 Variation of the maximum displacement of damper and the height of frame

图5 阻尼器最大位移随 h 和 θ_1 的变化Fig. 5 Variation of the maximum displacement of damper with h and θ_1 图6 位移最大放大系数随 h 和 θ_1 的变化Fig. 6 Variation of displacement maximum amplification factors with h and θ_1

1.2 实际工程案例

随着建筑行业的不断发展,应用于高层建筑的黏滞阻尼器既需抗风又能抗震,这对阻尼器的设计、制造和产品的检测都提出了较高的要求^[10]。本文案例采用 ETABS 建立模型,根据 JCJ 297—2013《建筑消能减震技术规程》^[11],速度型黏滞阻尼器宜采用 Maxwell 模型。黏滞阻尼器在国内外实际超高层建筑应用较广泛^[12],其中国内首个使用套索布置黏滞阻尼器的案例是天津国贸金融中心^[13],故本文所采用的案例均为超高层建筑。

1.2.1 工程概况

1) 建筑 1 为位于深圳的某钢筋混凝土剪力墙超高层住宅,建筑总高度 199.75 m,地下 3 层,地上 60 层,其中避难层高度为 4.2 m,分别位于建筑模型的第 19 层,第 35 层,第 51 层。10 a 一遇风荷载作用下结构的顶层角点加速度超过了 JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》^[14]中 0.15 m/s^2 的限值,拟在该结构每层避难层套索方式安装 7 套黏滞阻尼器,阻尼器参数为 $1600 \text{ kN}/(\text{m/s})^{0.3}$,速度指数 α 为 0.3。

2) 建筑 2 为位于深圳的某剪力墙超高层住宅,建筑高度 245.65 m,地上 77 层,地下 4 层;拟在 3 个避难层套索式安装黏滞阻尼器,共 21 套,阻尼器参数为 $C=1600 \text{ kN}/(\text{m/s})^{0.3}$, $\alpha=0.3$ 。

1.2.2 结构减振优化对比

风时程数据通过风洞试验获得,采用时程积分法,计算结构风荷载作用下的动力响应。加速度是衡量结构舒适度要求的重要指标,采用 2.5 倍均方根计算角点加速度的结果如表 1、表 2 所示。

由表 1、表 2 可知,通过对比阻尼器不同布置方式的结构风致加速度,结果表明建筑 1 和建筑 2 较优布置方案分别是:套索 1.5 倍(放大系数为 1.5 倍)和 3.0 倍。建筑 1 和建筑 2 的主要区别是:建筑 2 阻尼器布置框架的跨度较大,理论分析对应的较优放大系数更大,理论和模型计算相对应。故套索放大系数的取值与结构减振率并非成正比,而是越接近最大放大系数曲线时,减振效果越明显。

表 1 建筑 1 在 10 a 一遇风荷载下的角点加速度对比

Table 1 Comparison of angular acceleration of the No.1 building under a 10-year wind load

角点及平均值	加速度/(m/s ²)										
	无控	对角	减振率/%	人字型	减振率/%	1.5 倍套索	减振率/%	2.0 倍套索	减振率/%	3.0 倍套索	减振率/%
角点 1	0.22	0.19	12.16	0.18	20.26	0.15	31.74	0.18	20.65	0.20	9.93
角点 2	0.23	0.20	13.17	0.18	21.31	0.15	33.16	0.18	22.40	0.20	11.33
角点 3	0.23	0.19	13.78	0.18	22.02	0.15	33.77	0.17	23.09	0.20	11.97
角点 4	0.22	0.19	14.35	0.17	22.83	0.15	34.00	0.17	23.24	0.20	12.52
平均值	0.22	0.19	13.37	0.18	21.60	0.15	33.17	0.17	22.35	0.20	11.44

表 2 建筑 2 在 10 a 一遇风荷载下的角点加速度对比

Table 2 Comparison of angular acceleration of the No.2 building under a 10-year wind load

角点及平均值	加速度/(m/s ²)										
	无控	对角	减振率/%	人字型	减振率/%	2.0 倍套索	减振率/%	3.0 倍套索	减振率/%	4.0 倍套索	减振率/%
角点 1	0.18	0.17	7.85	0.16	11.02	0.14	24.28	0.12	30.80	0.13	28.76
角点 2	0.15	0.14	6.40	0.13	9.01	0.12	21.22	0.11	27.70	0.11	25.28
角点 3	0.18	0.16	7.72	0.16	10.83	0.13	24.01	0.12	30.50	0.13	28.47
平均值	0.17	0.16	7.38	0.15	10.36	0.13	23.29	0.12	29.79	0.12	27.64

多遇地震作用下,阻尼器不同布置方式的结构层间位移角减振变化规律与上述一致,建筑 1、建筑 2 分别采用套索 1.5 倍、3.0 倍布置阻尼器时结构减振最优,其中建筑 1 层间位移角最大减振率为 6%,建筑 2 层间位移角最大减振率为 8%。结果显示,结构在地震和风荷载作用下的阻尼器的减振优化参数一致。

1.3 不同方案下结构的减振对比

为了分析不同布置高度和跨度对套索系统效率的影响,表 3 为阻尼器不同布置方案对比,方案 1 是阻尼器分别按对角、人字型 and 不同放大系数套索方式布置;方案 2 是套索放大系数一定,改变避难层高度。考虑文章的篇幅,后续主要对建筑 1 进行分析。

1.3.1 方案 1 减振效果分析

1) 层间位移角

层间位移角能反映结构在风荷载和地震作用下结构的动力响应,图 7 仅对比了 10 a 一遇风荷载作用下结构层间位移角。

表 3 方案对比

Table 3 Comparison of schemes

方案对比	连接方式	避难层高度/m	放大系数 f
方案 1	对角	4.2	$\cos \theta$
	人字型	4.2	1.0
	反向套索	4.2	1.5
		4.2	2.0
		4.2	3.0
方案 2	反向套索	4.2	1.5
		4.5	1.5
		4.8	1.5

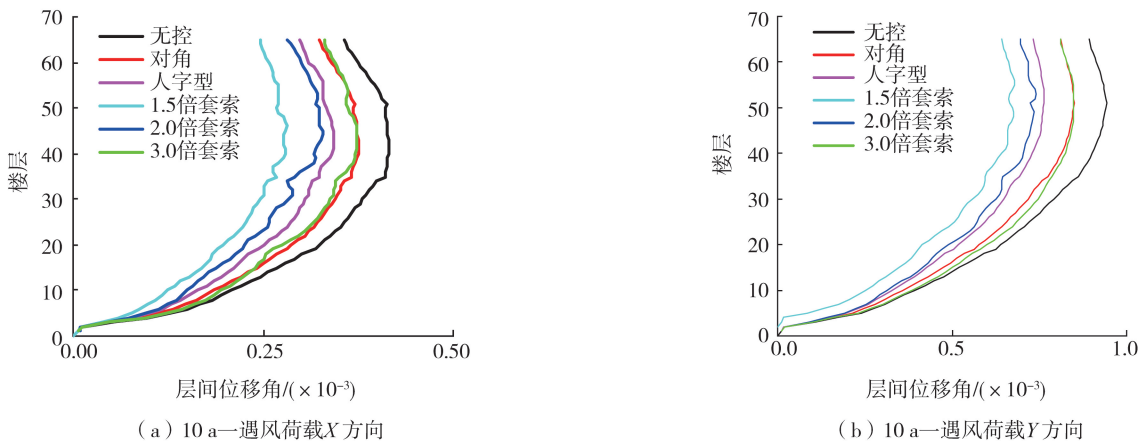


图 7 方案 1 作用下结构楼层响应对比图

Fig. 7 Comparison of structural floor response under scheme 1

由图7可知,阻尼器采用1.5倍放大系数套索布置时,结构减振率最佳,减振效果依次为2.0倍放大系数套索连接、人字型连接、对角连接和3.0倍放大系数套索连接。与无控相比,当阻尼器采用1.5倍放大系数布置时,10 a一遇风荷载作用下结构X、Y方向层间位移角平均减振率分别为34.64%、26.96%。而中震作用下结构X、Y方向层间位移角平均减振率分别为4.0%、4.8%;大震作用下结构X、Y方向层间位移角平均减振率分别为2.5%、3.3%。由此可知,当支撑刚度一定时,套索连接放大系数与结构减振率不成正比。随着阻尼器放大率增大,系统支撑的刚度相对阻尼器的缺失刚度在逐渐降低,造成其弹性变形增大,阻尼器的放大率被高估。

2) 附加阻尼比计算

附加阻尼比反映阻尼器的耗能能力。不同减振方式对应不同附加阻尼比计算方法^[15],速度型阻尼器的附加阻尼比可以通过结构响应、能量法^[16]、功率法^[17]、规范法和基于楼层剪力^[18]等方法计算。在ETABS使用非线性时程分析时,可以直接提取结构的模态阻尼耗能和阻尼器耗能,能量法计算公式为

$$\xi_d = \frac{E_d}{E_0} \cdot \xi_0 \quad (14)$$

式中: E_d 为阻尼器阻尼耗能; E_0 为模态耗能; ξ_0 为模态阻尼比,此处 $\xi_0=0.02$ 。

10 a一遇风荷载作用下结构附加阻尼比如表4所示。由分析结果可知,当10 a一遇风荷载作用下,阻尼器采用1.5倍套索布置时,对应的结构附加阻尼比最大,高达1.97%,而过大的套索放大倍数对应的附加阻尼比反而较小,这说明套索放大系数的取值与布置跨度有关。

表4 10 a一遇风荷载作用下结构附加阻尼比

Table 4 Additional damping ratio of the structure under 10 years of wind load

减振结构耗能	黏滞阻尼器不同布置方式				
	对角连接	人字型连接	1.5倍套索连接	2倍套索连接	3倍套索连接
阻尼器耗能/(kN·m)	17324	14499	10412	13957	18293
模态耗能/(kN·m)	3822	6596	10249	6829	2669
附加阻尼比计算/%	0.44	0.91	1.97	0.98	0.29

1.3.2 方案2减振效果分析

通过上述分析,阻尼器采用1.5倍套索布置时,结构减振效果最优。方案2为阻尼器布置在不同高度避难层时,分析外荷载作用下结构的动力响应。

1) 角点合加速度

选取结构模型顶层的4个角点作为控制点,角点加速度计算结果如表5所示,此处忽略了改变层高而带来控制点标高的差异。

表5 方案2角点合加速度对比

Table 5 Comparison of angle-combined acceleration under scheme 2

角点及平均值	加速度/(m/s ²)						
	无控	H=4.2 m	减振率/%	H=4.5 m	减振率/%	H=4.8 m	减振率/%
角点1	0.22	0.15	31.7	0.19	12.3	0.20	11.1
角点2	0.23	0.15	33.2	0.20	13.5	0.20	12.5
角点3	0.23	0.15	33.8	0.19	14.2	0.20	13.2
角点4	0.22	0.15	34.0	0.19	15.3	0.19	13.8
平均值	0.22	0.15	33.17	0.19	13.83	0.20	12.66

由表5可知,给定套索连接放大系数,较小的避难层高度对应的结构角点合加速度控制效果越好。4.2 m避难层高度对应的结构角点加速度由0.22 m/s²控制到0.15 m/s²,减振率为33.17%。由图4可知,当框架布置跨度不变时,框架高度增加到某个值出现阻尼器轴向最大位移极值点,极值点右侧表示阻尼器轴向最大位移随框架的高度增加而减小,上述计算结果与其变化规律相符合。

2) 层间位移角

层间位移角是外荷载作用下结构响应的重要指标之一。图8对比了10 a一遇风荷载,不同避难层高度对应结构的层间位移角。由图8可知,当黏滞阻尼器布置在不同避难层高度时,风荷载作用下结构层间位移

角均有所控制,减振率由高到低依次为 $H=4.2\text{ m}$ 、 $H=4.5\text{ m}$ 、 $H=4.8\text{ m}$ 。而中震作用下,结构层间位移角减振率由高到低依次为 $H=4.2\text{ m}$ 、 $H=4.8\text{ m}$ 、 $H=4.5\text{ m}$;而大震作用下避难层高度取值 4.8 m 时,对应的结构 Y 方向的层间位移角平均减振率最高,为 3.8% 。较风荷载而言,罕遇地震作用是高频荷载激励,这说明套索系统的效率和激励荷载频率有关。

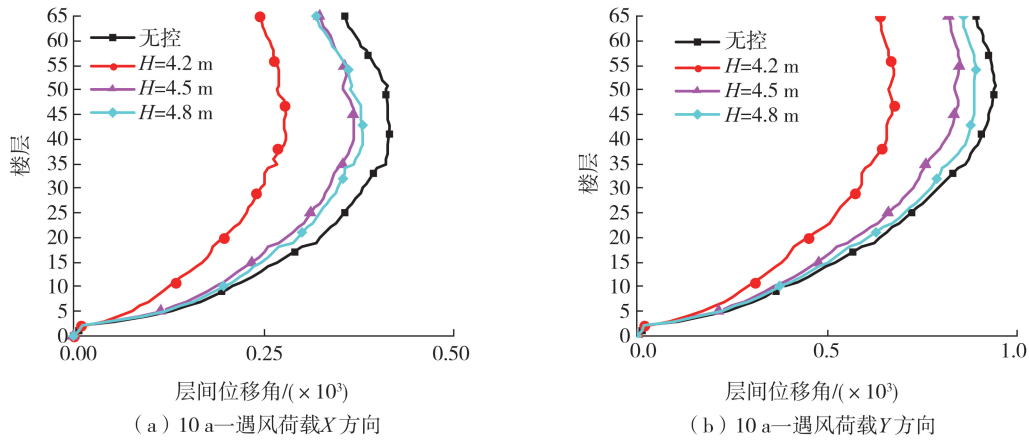


图 8 方案 2 作用下结构楼层响应对比

Fig. 8 Comparison of structural floor response under scheme 2

3) 附加阻尼比计算

采用能量法计算结构 10 a 一遇风荷载作用下的附加阻尼器比,结果表明,10 a 一遇风荷载作用,避难层高度为 4.2 m 时,结构的附加阻尼比最大,说明此时阻尼器耗能能力最佳。

2 套索连接布置优化

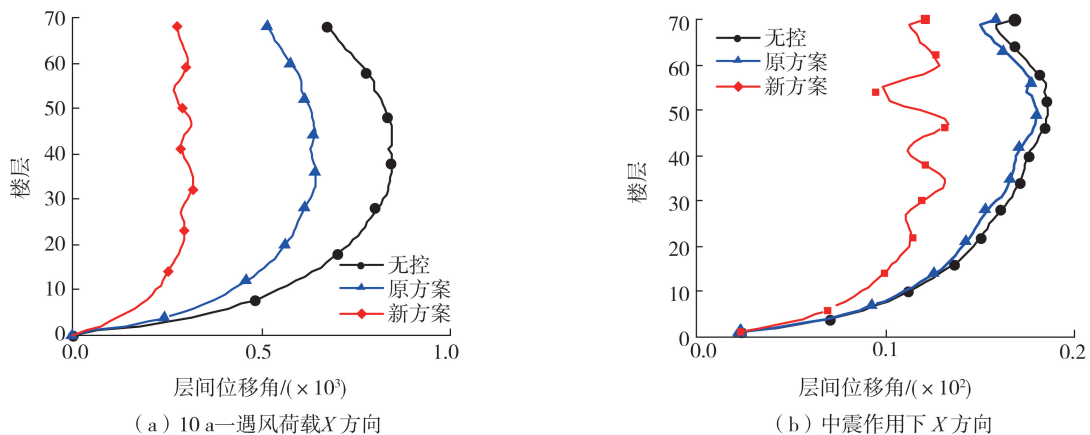
2.1 设置悬挑支撑的套索布置

由上述分析可知,当阻尼器采用大跨度套索布置时,阻尼器支撑杆的弹性变形不可忽略。而公式推导过程中,忽略了支撑杆的弹性变形,那么实际套索系统的效率偏低。很多学者对阻尼器的布置进行了优化^[19-21],其中周云等^[22]提出了耗能减震层高层结构体系,将“消能器+支撑”取代了传统的肘节式支撑。该布置方式主要是通过设置悬挑桁架来减少支撑杆的长度,从而减少支撑杆弹性变形对套索系统的影响。

2.2 方案对比

深圳深业世纪山谷花园主体结构高度为 240.45 m ,为超高层剪力墙结构体系。结构减振原方案为在第 27、41、54 层 3 个避难层中套索布置黏滞阻尼器,其中每层 13 套,共 39 套,阻尼器参数: $C=4\,000\text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.4}$ 、 $\alpha=0.4$ ^[23]。新方案采用优化的反向套索连接,设置悬挑桁架长度为框架跨度的一半,2 个方案均采用 2.5 倍放大系数。

对比风振舒适度的计算结果,新方案布置下结构角点加速度减振率比原方案高,增长最高达 22% ,故对于大跨度布置框架,布置优化后的方案抗风效果更佳。当风荷载和中震作用时,不同布置方案对应的结构层间位移角对比如图 9 所示。



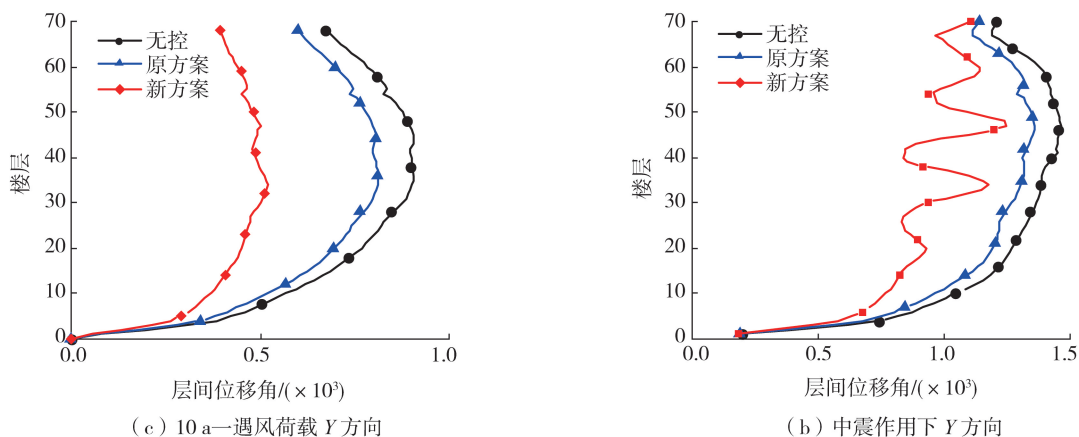


图9 不同布置方案下结构层间位移角对比

Fig. 9 Comparison of displacement angles between structural layers under different arrangement schemes

由图9可知,与传统反向套索相比,采用新方案布置阻尼器时结构层间位移角减振效果更显著。10 a 一遇风荷载作用下,新方案布置的结构 X 方向层间位移角平均减振率由 23.37% 增加到 61.59%;中震作用下,新方案布置的结构 X 方向层间位移角平均减振率由 3.46% 增加 28.16%。系统支撑杆件的增加,会带来钢用量的增加,故需要同时考虑减振率和经济性。总而言之,对于大跨度的减振布置,优化后的结构减振效果比原方案更显著。

3 结论

本文以反向套索系统为研究对象,对放大系数取值以及大跨度框架布置进行优化分析,并在实际工程案例中得到验证。

1) 套索系统理论放大系数与结构减振率并非成正比,越接近阻尼器最大位移曲线时系统效率越高;随着套索系统放大率增大,其支撑杆的刚度相对阻尼器的缺失刚度在逐渐降低,造成其弹性变形增大,阻尼器的效率就会高估,以及高频外荷载激励对系统效率影响较大。

2) 对于阻尼器大跨度布置框架,优化布置后的结构加速度、层间位移角比原方案控制效果更显著。套索布置跨度变小,支撑杆弹性变形对套索系统的影响减少,从而提高减振效果,但也会因此增加钢材的用量。

上述对套索连接放大系数分析过程中,并没有考虑支撑杆的弹性变形,避难层高度越高,支撑杆的长度越长,支撑杆的弹性变形对系统效率影响越大,因此实际阻尼器最大位移比理论值偏小;本文在公式推导过程中进行了简化计算,分析阻尼器轴向最大位移(位移最大放大系数)随变量的变化规律,并不能得到实际计算结果。当选用套索连接布置时,应考虑套索系统的效率与支撑杆的弹性变形的影响,故合理选取放大系数和布置方式能更大化提高结构的附加阻尼比。

参考文献:

- [1] SOONG T T, SPENCER B F, Jr. Supplemental energy dissipation: State-of-the-art and state-of-the-practice[J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(3): 243-259.
- [2] 陈永祁, 曹铁柱, 马良喆. 液体黏滞阻尼器在超高层结构上的抗震抗风效果和经济分析[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(3): 58-66.
CHEN Yongqi, CAO Tiezhu, MA Liangzhe. The function and economic effectiveness of fluid viscous dampers for reduction of seismic and wind vibrations of high-rise buildings[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(3): 58-66. (in Chinese)
- [3] HWANG J S, TSAI C H, WANG S J, et al. Experimental study of RC building structures with supplemental viscous dampers and lightly reinforced walls[J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(13): 1816-1824.
- [4] CONSTANTINOU M C, TSOPELAS P, HAMMEL W, et al. Toggle-brace-damper seismic energy dissipation systems[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(2): 105-112.
- [5] HUANG H C. Efficiency of the motion amplification device with viscous dampers and its application in high-rise buildings[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 8(4): 521-536.
- [6] HWANG J S, HUANG Y N, HUNG Y H. Analytical and experimental study of toggle-brace-damper systems[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(7): 1035-1043.

- [7] ZHANG R, HE H, WENG D, et al. Theoretical analysis and experimental research on toggle-brace-damper system considering different installation modes[J]. *Scientia Iranica*, 2012, 19(6): 1379–1390.
- [8] 兰炳稷, 何浩祥, 王宝顺. 局部肘节消能装置的减振机制分析及其优化控制[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(7): 32–43.
LAN Bingji, HE Haoxiang, WANG Baoshun. Optimization control and analysis on vibration control mechanism of local toggle energy dissipation device[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(7): 32–43. (in Chinese)
- [9] FENG H, ZHOU F Y, GE H B, et al. Energy dissipation enhancement through multi-toggle brace damper systems for mitigating dynamic responses of structures[J]. *Structures*, 2021, 33: 2487–2499.
- [10] 陈永祁, 马良喆. 液体黏滞阻尼器技术的最新发展动态[J]. *工程抗震与加固改造*, 2020, 42(1): 36–44, 105.
CHEN Yongqi, MA Liangzhe. Latest development of liquid viscous damping technology[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2020, 42(1): 36–44, 105. (in Chinese)
- [11] JGJ 297—2013 建筑消能减震技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
JGJ 297—2013 Technical specification for seismic energy dissipation of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [12] 郭罗灿, 陈永祁, 马良喆, 等. 黏滞阻尼器在不同高层结构体系的应用[J]. *建筑结构*, 2023, 53(增刊2): 846–854.
GUO Luocan, CHEN Yongqi, MA Liangzhe, et al. Application of viscous dampers in different high-rise structures[J]. *Building Structure*, 2023, 52(S2): 846–854. (in Chinese)
- [13] 彭程, 陈永祁. 天津国贸中心抗风设计[J]. *钢结构*, 2013, 28(7): 54–59.
PENG Cheng, CHEN Yongqi. Wind-resistance design of toggle-connected damper for Tianjin international trade center [J]. *Steel Structure*, 2013, 28(7): 54–59. (in Chinese)
- [14] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
JGJ 3—2010 Technical regulations for concrete structure of high-rise buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [15] 欧进萍, 张微敬. 高层建筑结构的风振阻尼控制分析与设计方法[J]. *建筑结构学报*, 2003, 24(6): 32–37, 86.
OU Jinping, ZHANG Weijing. Analysis and design method for wind induced vibration passive damping control of tall buildings[J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(6): 32–37, 86. (in Chinese)
- [16] 万怡秀, 陈永祁, 吴连杰, 等. 天津响螺湾超高层结构消能减震及风振控制实例分析[J]. *建筑结构*, 2013, 43(11): 24–29, 67.
WAN Yixiu, CHEN Yongqi, WU Lianjie, et al. Application analysis of energy dissipation and wind vibration control for the high-rise building of Xiangluowan in Tianjin[J]. *Building Structure*, 2013, 43(11): 24–29, 67. (in Chinese)
- [17] 周云, 商城豪. 基于功率的附加有效阻尼比计算方法研究[J]. *建筑结构*, 2019, 49(11): 109–114.
ZHOU Yun, SHANG Chenghao. Research on power calculation method of additional effective damping ratio[J]. *Building Structure*, 2019, 49(11): 109–114. (in Chinese)
- [18] 韩宇娴, 商城豪, 陈清祥, 等. 基于楼层剪力的等效阻尼比计算方法研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(1): 161–167.
HAN Yuxian, SHANG Chenghao, CHEN Qingxiang, et al. Research on calculation method of equivalent damping ratio based on story shear force[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(1): 161–167. (in Chinese)
- [19] 许伟志, 杜东升, 笠井和彦, 等. 黏滞阻尼器的优化布置及其在高层钢结构加固中的应用[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(8): 32–44.
XU Weizhi, DU Dongsheng, LI Jingheyan, et al. Optimization layout of viscous dampers and its application in retrofitting of a high-rise steel structure[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(8): 32–44. (in Chinese)
- [20] 邢丽丽, 周颖. 黏滞阻尼器型伸臂桁架的最优布置形式研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(1): 68–76.
XING Lili, ZHOU Ying. The study of optimal arrangement form of outrigger trusses with viscous dampers[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2016, 36(1): 68–76. (in Chinese)
- [21] 韩庆华, 郭凡夫, 刘铭劼, 等. 单层网壳竖向激励下多维减振阻尼器布置研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2023, 43(2): 69–80.
HAN Qinghua, GUO Fanfu, LIU Mingjie, et al. Study on the layout of multi-dimensional vibration control damper in single-layer latticed shells under vertical excitation[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2023, 43(2): 69–80. (in Chinese)
- [22] 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.
ZHOU Yun, SHANG Chenghao, ZHANG Chao. Progress in research and application of energy-dissipated technology[J]. *Building Structure*, 2019, 49(19): 33–48. (in Chinese)
- [23] 李文斌, 张琳, 张帆. 深圳某 240 m 超高层住宅风振舒适度控制及敏感性分析[J]. *建筑结构*, 2023, 53(22): 60–66.
LI Wenbin, ZHANG Lin, ZHANG Fan. Wind vibration comfort control and sensitivity analysis of a 240-meter super high-rise residential building in Shenzhen[J]. *Building Structure*, 2023, 53(22): 60–66. (in Chinese)