

双向地震作用下拉索支撑惯容系统 及其在钢结构中的应用

康建飞¹, 薛松涛^{1,2}, 谢丽宇¹

(1. 同济大学 结构防灾减灾工程系, 上海 200092; 2. 日本东北工业大学 建筑系, 宫城仙台 982-8577)

摘要: 近年来, 惯容系统作为一种高效被动减震系统被广泛关注, 其中拉索支撑惯容系统得益于跨层便利, 经济优势显著。为研究双向地震作用下拉索支撑惯容系统的减震性能, 提出了一种拉索支撑惯容系统的双向减震设计方法并给出了实用设计流程。采用杠杆机制模拟拉索支撑的转向特性, 基于各元件的拓扑组合模拟惯容系统, 在 OpenSees 中实现了拉索支撑惯容系统的有限元模型的建立。利用场地实测地震动数据对安装有跨层型拉索支撑惯容系统的一栋实际钢结构的双向减震性能进行了评估。有限元计算结果表明, 所建立的拉索支撑惯容系统有限元模型可以很好地表达其位移传递效率及惯容元件特性; 依据等效参数进行设计的拉索支撑惯容系统具有良好的双向减震性能及显著的阻尼增效性能, 可用于实际拉索支撑惯容系统的钢结构设计。

关键词: 拉索支撑惯容系统; 钢结构; 双向地震动; OpenSees; 减震性能
中图分类号: TU352 TU391.04 **文献标志码:** A

Cable-bracing inerter system and its application in steel structure subjected to bi-directional ground motions

KANG Jianfei¹, XUE Songtao^{1,2}, XIE Liyu¹

(1. Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan)

Abstract: Recently, the inerter systems have received widespread attention from scholars as an efficient passive damping system. Among the inerter systems, the cable-bracing inerter system (CBIS) benefits from cross-layer convenience and has significant economic advantages. In order to investigate the damping performance of the CBIS under the action of bi-directional ground motions, a bidirectional vibration control method for the CBIS and a practical design process were proposed. The lever mechanism was used to simulate the steering characteristics of the cable-bracing system, and the topological combination of the elements was used to simulate the inerter system. The finite element model of CBIS was implemented in OpenSees. The performance of the cross-layer installed CBIS used in a real-world steel structure was evaluated in both directions using ground motion data measured at the site. The finite element calculation results show that the developed finite element model of the CBIS can well represent the efficiency of displacement transfer and characteristics of inerter. The effective bi-directional damping performance and the significant damping efficiency of the CBIS designed based on equivalent parameters are verified, providing a basis for further practical use of the CBIS.

Keywords: cable-bracing inerter system; steel structure; bi-directional ground motion; OpenSees; damping performance

基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项(2021YFE0112200), 上海市自然科学基金面上项目(20ZR1461800)。

作者简介: 康建飞, 出生于1994年, 男, 工学硕士, 主要从事工程结构抗震研究。email: kangjianfei@tongji.edu.cn

通信作者: 谢丽宇, 出生于1978年, 男, 工学博士, 副教授, 主要从事结构减隔震与结构健康监测研究。email: liyuxie@tongji.edu.cn

收稿日期: 2021年10月

0 引言

在我国大规模城镇化进程的背景下,对于结构振动控制的需求日益增加。建筑功能多样性、形式复杂化引起了结构振动控制难度的增加。结构减振控制系统可保证结构在地震、强风等外部激励下的安全性和舒适性^[1-3]。其中,被动控制技术由于其稳定性极好被广泛关注。概括而言,被动控制技术就是通过通过在结构中增设阻尼耗能装置、弹簧、附加质量等基本力学元件,从而改变外部激励能量输入或耗散路径,以实现减小主体结构振动的目的。

近年来,得益于一种被称为惯容的双端质量元件的提出,振动控制技术的发展被进一步推进^[4-6]。回顾其发展历程,早期,Kawamata^[7]提出了一种利用管道流速差异产生较高惯性力的液体泵,被认为是土木工程中惯容元件的开端,但当时并未将其作为新型元件进行系统研究。1999年,Arakaki等^[8-9]利用滚珠丝杠机制开发了一种旋转阻尼装置,可以将直线运动转化为高速旋转,对黏滞阻尼器的耗能能力进行放大。之后,Ikago等^[10]将调谐弹簧与利用滚珠丝杠放大机制的黏滞质量阻尼器相结合,提出了调谐黏滞阻尼系统,开始利用惯性质量元件的质量放大特性,并将其作为惯容系统(将惯容元件与其他力学元件进行拓扑组合并应用于振动控制的系统)展开研究,明确使用了惯容系统的质量放大与阻尼增效机制。随后,Zhang等^[11]发现并证明了惯容系统的阻尼增强方程,从理论上将阻尼增效效果与振动控制效果联系起来。

考虑结构体系特征,刘良坤等^[12]将旋转惯容阻尼器安置于伸臂结构体系的伸臂外端与外柱之间,利用惯容装置负刚度效应有效缓解了伸臂结构体系减振系统的阻尼出力及安装空间受限问题。王钦华等^[13]将多重调谐质量惯容阻尼器安装于连体结构的连廊位置,实现了连体超高层建筑的风振控制,阐明了多重调谐质量惯容阻尼器的轻量化所具有的经济、占空间小的优势。针对一般剪切型多自由度结构,薛松涛等^[14]提出了一种拉索支撑惯容系统,阐明了其跨层安装的高效性及经济性。

上述研究表明:惯容系统相较于传统减震装置,在不同结构体系中均展现了减震优势。然而,目前的研究均使用平面简化结构进行分析,且仅考虑单向地震动的影响,与实际结构的三维特性和双向地震动输入特性不符。因此,本文中提出一种跨层拉索支撑惯容系统的双向减震优化设计方法并给出工程实用的设计流程,以较少的惯容系统实现多层结构响应的同步控制。通过在OpenSees^[15]中实现拉索

支撑惯容系统的有限元模拟,以某一实际钢结构为例,建立三维有限元模型,对所提设计方法进行验证,利用场地实测双向地震动对跨层拉索支撑惯容系统的实际减震性能进行评估,以研究跨层型拉索支撑惯容系统的阻尼增效效果。

1 拉索支撑惯容系统

1.1 系统组成

拉索支撑惯容系统的主要组成部分为惯容系统及拉索支撑体系。其中惯容系统又包含惯容器,阻尼耗能元件及调谐弹簧,见图1。

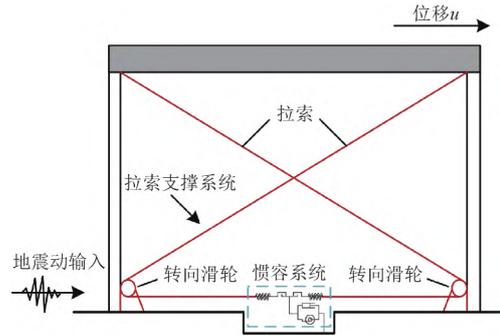


图1 拉索支撑惯容系统
Fig.1 Cable-bracing inerter system

利用拉索支撑的特殊性(仅提供轴向约束,不提供转动约束和平面外约束)可以简化连接节点的构造,避免多维地震下的多向地震应力集中。在自平衡惯容器中优先采用拉索支撑惯容系统的惯容元件。如图2所示,两个转动惯量相等的飞轮安装于路程相同但螺纹相反的丝杠之上构成了自平衡惯容器。在丝杠沿轴向平动时,左右飞轮转动产生的惯量可以对丝杠产生相互抵消的扭矩和相互叠加的轴向控制力,即:

$$T_i = \frac{J_F 2\pi}{L_d} \ddot{x}_d - \frac{J_F 2\pi}{L_d} \ddot{x}_d = 0 \quad (1)$$

$$P_i = \frac{J_F (2\pi)^2}{L_d^2} \ddot{x}_d + \frac{J_F (2\pi)^2}{L_d^2} \ddot{x}_d = \frac{8J_F \pi^2}{L_d^2} \ddot{x}_d \quad (2)$$

其中: T_i 和 P_i 分别为惯容的扭矩和轴向力; J_F 为飞轮惯性矩; L_d 为丝杠的导程; \ddot{x}_d 为丝杠水平运动加速度。

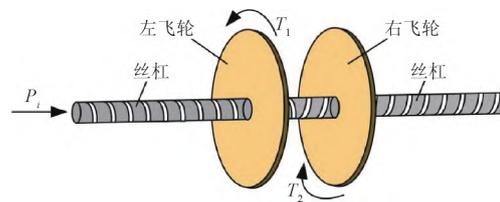


图2 自平衡惯容器
Fig.2 Self-balanced inerter

丝杠轴向力与轴向相对加速度的比值通常被定义为惯容的表现质量 m_{in} 。根据式(1)、(2)可知,通过调整丝杠导程,惯容的表现质量 m_{in} 可以被显著放大。阻尼耗能元件具有多样性,可以使用黏滞液体阻尼,同样可以使用构造更为简单的电涡流阻尼^[16]。

1.2 有限元模拟

1.2.1 模型建立

惯容元件的相对加速度相关性,不同于传统的位移相关及速度相关的元件,文中使用拓展性较强的开源软件 OpenSees 进行建模分析。拉索支撑惯容系统的有限元建模的核心在于拉索支撑及惯容器的实现。惯容单元目前在 OpenSees V 3.3.0 中已经实现,其调用语法如图3所示。

```
element inerter $eleTag $iNode $jNode -dir $dir -inertance $inertance
e.g. element inerter 1 1 2 -dir 1 -inertance 10
```

图3 惯容单元的调用语法

Fig. 3 Command to construct an inerter element

在 OpenSees 中建立利用滑轮接触定义的拉索转向器较为复杂,因此,通过如图4所示的杠杆对拉索滑轮支座进行模拟,以简化建模流程并减小计算成本。图中,简化模型参数源于本文第3节所用的钢结构模型(宽度为4800 mm,高度为3080 mm)。假定滑轮支座半径为200 mm,各杠杆节点坐标依据拉索滑轮的相切的特性求出。

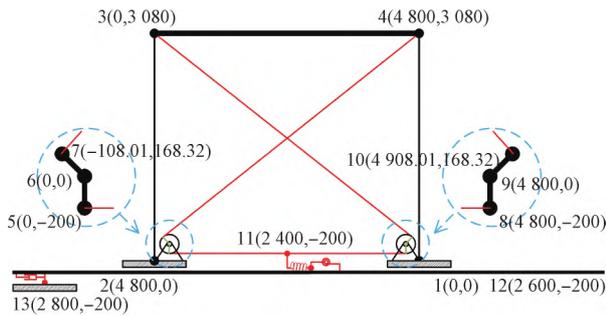


图4 拉索支撑惯容系统的有限元实现

Fig. 4 Modeling cable-bracing inerter system in OpenSees

为方便将拉索支撑惯容系统扩展到多自由度结构中,使用等效自由度命令(equalDOF),将代表滑轮转动中心的6号及9号节点分别与代表楼层底部滑轮安装位置的1号及2号节点进行平动耦合,以表达滑轮支座固定于惯容系统安装层的物理约束。利用零长度单元命令(zeroLength)连接1号、6号节点及2号、9号节点,并在其转动自由度上赋予极小的转动刚度(在算例中使用的转动刚度均为 10^{-20} kN/rad),以实现滑轮支座的转动特性,同时具有极小转动刚度的零长度单元将能保证 OpenSees 运算的收敛性。

假定图4所示的单自由度结构的质量为20 t,自振频率 $\omega_0 = 11.63$ rad/s,结构自身阻尼比 $\zeta = 0.02$ 。设定节点3、4的质量均为10 t。采用两个铁木辛柯梁(ElasticTimoshenkoBeam)作为节点1、3及节点2、4的连接元件,剪切刚度设定为13500 kN/m。节点3、4的连接元件采用刚性连接(rigidLink)以体现楼板刚度无穷的假定。基于文献[11]中得到的阻尼增效分析结果,惯容系统的参数选定如下:惯质比 $\mu = 0.0242$,刚度比 $\kappa = 0.0254$,阻尼比 $\xi = 0.0022$ 。考虑到拉索的传递效率 $\beta = 0.707$,节点11和节点13之间的惯容系统由具有表现质量为0.684 t的惯容单元、弹性刚度为96.935 kN/m的双节点连接单元,及阻尼系数为1.445 kN/(m·s)的黏性阻尼单元组成。因此,依据图4所示结构简化获得的安装有拉索支撑惯容系统的单质点模型的运动方程为:

$$\begin{cases} \ddot{u} + 2\zeta\omega_0\dot{u} + \omega_0^2u + \kappa\omega_0^2(u - u_e) = -\ddot{u}_g \\ \mu\ddot{u}_e + 2\xi\omega_0\dot{u}_e + \kappa\omega_0^2(u_e - u) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: u 和 u_g 分别为单自由度结构位移和地面运动位移; u_e 为等效惯容位移,其可以通过拉索传递效率和惯容实际位移 u_{in} 进行表达 $u_e = u_{in}/\beta$ 。

由此,拉索支撑惯容系统在 OpenSees 中的有限元模型建立完成。

1.2.2 模型验证

为了验证上述拉索支撑惯容系统有限元模型的准确性,通过施加不同频率的简谐地面运动,可得图4所示的配备有拉索支撑惯容系统单自由度的位移响应,其位移传递函数曲线如图5所示,其中 α 为地面运动频率与结构自振频率的比值。

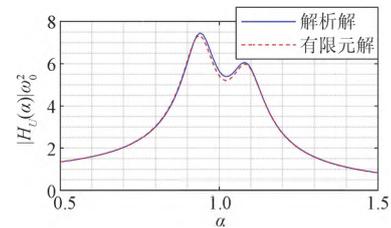


图5 拉索支撑惯容系统的位移传递函数

Fig. 5 Displacement transfer function of CBIS

此外,图5中还给出了依据式(3)导出的位移传递函数的解析解,其表达式为

$$H_u(\alpha) = \frac{(\kappa - \alpha^2\mu + 2\xi\alpha i) / \omega_0^2}{-[(1 - \alpha^2)(\kappa - \mu\alpha^2) - \mu\kappa\alpha^2] - 2(1 + \kappa - \alpha^2)\xi\alpha i + 2\alpha\xi(\alpha^2\mu i - \kappa i + 2\alpha\xi)} \quad (4)$$

通过有限元解与解析解对比可知,所建立的有限元模型能够准确反映拉索支撑惯容系统的减震效果。此外,在共振频率内,有限元模型与精确解之间

存在微小的偏差,这是由于位移响应较大时,运动过程中拉索角度存在一定的改变。

从图6所示共振工况时有限元模型中惯容元件的位移-出力(x_d-P)关系及加速度-出力(\ddot{x}_d-P)关系中可以看出,惯容器的加速度正相关性也能够被准确反映。

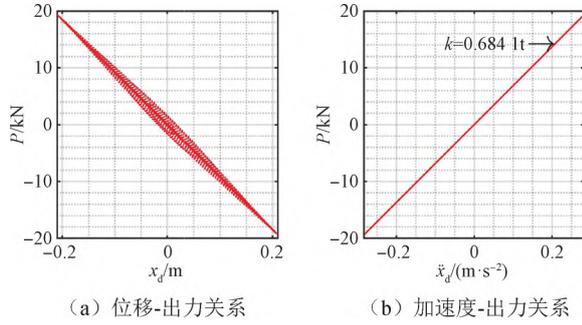


图6 惯容元件的本构关系
Fig.6 Constitutive relationship of inerter

2 拉索支撑惯容系统的优化设计

针对双向地震动作用下的结构进行减震设计时,需要将拉索支撑惯容系统合理布置于结构的两个主振方向。同时,为充分利用拉索支撑惯容系统易于跨层的特性,需要确定其最优安装与锚固楼层,并进一步采用优化算法确定最优设计参数。

2.1 安装与锚固楼层的确定

拉索支撑惯容系统主要通过调谐机制进行吸能减震。其利用效率可以通过等效单自由度的惯质比 μ 进行量化^[17],其表达式为

$$\mu(\mathbf{r}_c) = \frac{m_d}{\frac{1}{\mathbf{r}_c^T \boldsymbol{\varphi}} \{ \boldsymbol{\varphi} \}^T \mathbf{M}_p \{ \boldsymbol{\varphi} \} \frac{1}{\boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{r}_c}} \quad (5)$$

其中: m_d 为惯容的表观质量; \mathbf{M}_p 为受控结构主体的质量矩阵; $\{ \boldsymbol{\varphi} \}$ 为受控结构的模态向量,得益于惯容系统的目标模态控制效果,该受控模态在初步设计时可利用原始结构模态来近似表达^[17-19]; \mathbf{r}_c 为拉索支撑惯容系统的安装位置向量,表示方法如下:

$$\mathbf{r}_c = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & -\beta & 0 & \cdots & \beta & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$i_d \qquad \qquad \qquad j_d$

其中: i_d, j_d 分别表示惯容系统的安装位置和拉索支撑的锚固位置; β 表示拉索支撑的位移传递效率,对于简单拉索支撑,可以通过建筑的宽度 B 和拉索支撑惯容系统的跨越高度 H_d 进行计算,即

$$\beta = \frac{B^2}{B^2 + H_d^2} \quad (7)$$

因此,为最大化拉索支撑惯容系统的利用效率,

其安装与锚固楼层可依据式(5)计算所得等效惯质比 μ 最大化的原则进行确定。

2.2 设计参数的确定

为了方便各类寻优算法的使用,简化设计流程,文中在初步的优化设计中仍采用基于多质点的简化模型进行随机响应分析。由于惯容系统的出力影响其自身造价的同时也与安装节点的造价息息相关^[17],因此,在降低双向地震作用下结构响应的同时,寻求惯容出力的最小化将有利于提升拉索支撑惯容系统的经济性能。将拉索支撑惯容系统的表观质量 m_d 、阻尼参数 c_d 及调谐频率 ω_d 作为关键参数,其优化设计如下式所示:

$$\begin{aligned} & \text{find } \mathbf{y} = \{ m_d, c_d, \omega_d \} \\ & \text{to minimize } J_c(\mathbf{y}) \\ & \text{subject to } \gamma \leq \gamma_{\text{target}} \quad \omega_d = \begin{cases} \omega_{x1} / \sqrt{1 - \mu_1} & (X \text{ 向}) \\ \omega_{y1} / \sqrt{1 - \mu_2} & (Y \text{ 向}) \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

其中 ω_{x1} 和 ω_{y1} 分别为结构的横向(X 向)及纵向(Y 向)的基本振动频率; μ_1 和 μ_2 分别为其对应的有效惯质比,可依据式(5)进行计算;优化目标 J_c 是以金井清随机激励为输入计算获得的惯容系统出力均方值;优化约束的等式条件是为了保证惯容系统的调谐性能^[17-19];不等式条件由代表结构减震效果的位移响应均方比 γ 进行表达,即

$$\gamma = \frac{\theta_{\max}}{\theta_{0, \max}} \quad (9)$$

其中 $\theta_{\max}, \theta_{0, \max}$ 分别为以Kanai-Tajimi随机激励为输入计算获得的受控及无控结构的层间位移角均方响应最大值。

通过寻优算法对式(8)所表达的优化问题进行求解即可确定拉索支撑惯容系统的设计参数(表观质量 m_d 、阻尼参数 c_d 及调谐频率 ω_d)。

2.3 设计流程

综合上述优化设计方法,将双向地震作用下拉索支撑惯容系统的实用设计流程总结如下:

- 1) 根据现有建筑信息建立无控结构的有限元模型并进行模态分析以获取以 X 向及 Y 向为主的振动模态对应的圆频率 ω_{x1} 和 ω_{y1} 。
- 2) 依据抗震设计规范^[20],获取结构的 X 向及 Y 向的等效抗侧刚度,建立多质点的简化模型。求解无控结构随机激励下的层间位移角均方响应最大值,初步设定目标位移响应均方比 γ_{target} 。
- 3) 根据结构平面特征,考虑双向地震动的影响,确定拉索支撑惯容系统在结构中的平面布置。根据模态分析结果,代入式(5)计算 X 向及 Y 向的等效单自由度的惯质比 μ 以确定拉索支撑惯容系统竖向安装位置。

4) 将 X 向圆频率 ω_{x1} 、 Y 向圆频率 ω_{y1} 及目标位移响应均方比 γ_{target} 代入优化设计式(8)中,并通过数值优化算法求解 X 向及 Y 向拉索支撑惯容系统的总体设计参数。

5) 根据总体设计参数分配得到各惯容系统参数,进一步基于有限元模型进行抗震性能验算,如不满足验算要求,则返回第2)步重新设定目标响应均方比,直至符合要求。

3 钢结构应用示例

3.1 工程概况

研究对象为日本仙台市某大学的一栋8层钢结构行政楼^[21],如图7所示。东西向(X 向)总长48 m,南北向(Y 向)总长9.6 m,总高度为30.8 m。该楼的一层和二层层高均为4 m,共同构成了结构高度达到8 m的大空间,3楼及以上各层的结构高度均为3.8 m。



图7 日本仙台市某大学的钢结构建筑^[21]

Fig. 7 Steel structure of a university in Sendai, Japan^[21]

原结构最初按照日本校园建筑抗震设计规范设计,之后又增设了油阻尼器,以提升自身的抗震性能。如图8所示,为分析拉索支撑惯容系统的减震效率,根据结构设计图纸,在OpenSees中建立了原框架结构的有限元模型。钢材使用非线性材料Steel02

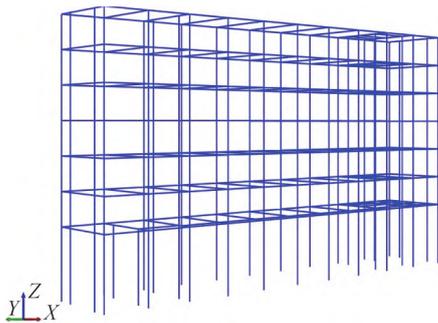


图8 钢结构有限元模型

Fig. 8 Finite element model of steel structure

进行模拟。梁柱单元采用 NonlinearBeamColumn 单元进行模拟。考虑刚性楼板假定,使用 rigidDiaphragm 将各层节点位移与相应的主节点相耦合。楼面质量通过混凝土楼板自重及其承担的恒载与活载转换获得。

通过结构模型的模态分析可以获得其基本动力特性。表1中列出了结构的周期及圆频率特性,前3阶周期均在1 s左右。图9中给出了结构的前3阶模态振型。1阶模态振型以 Y 向振动为主,2阶模态振型以 X 向振动为主,3阶模态振型则以扭转成分为主。

表1 结构的基本信息
Table 1 Details of structure

参数	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶
周期/s	1.166	1.090	1.050	0.393	0.373
圆频率/(rad·s ⁻¹)	5.389	5.766	5.986	15.991	16.824

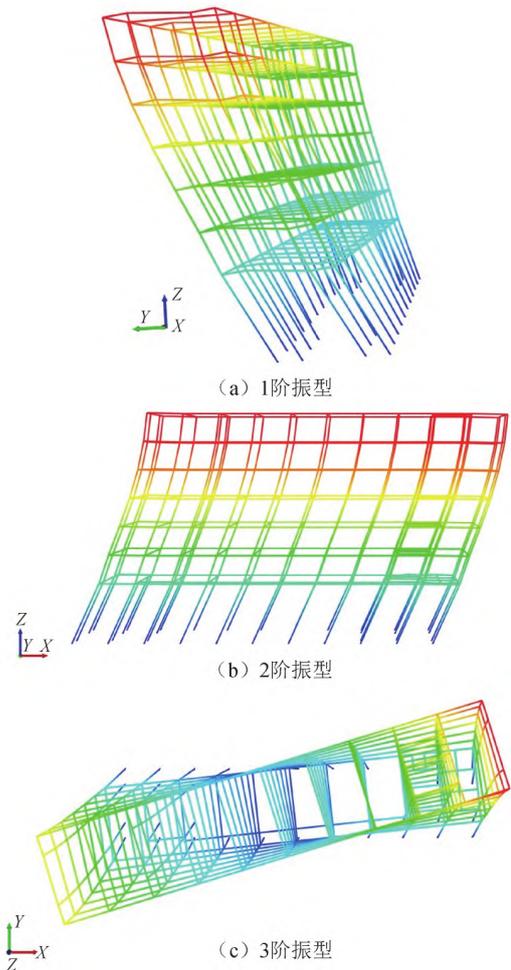


图9 结构前3阶振型

Fig. 9 The first three modes of structure

3.2 结构减震设计

3.2.1 多质点的简化模型参数确定

依据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[20], X 向与 Y 向的等效抗侧刚度定义为层间剪力与层间

位移之间的比值,即

$$k_i = \frac{F_{s,i}}{\delta_i} \quad (10)$$

其中 $F_{s,i}$ 为结构的层间剪力, δ_i 为结构的层间位移。

由此,用于初步优化设计的结构信息汇总于表 2 中。

表 2 用于优化设计的结构等效参数

楼层	楼层质量/kg	$k_i / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	
		X 向	Y 向
3 层	439 675.80	155 441.57	143 327.78
4 层	341 837.00	393 625.88	334 476.13
5 层	329 122.40	308 033.51	276 191.21
6 层	325 982.40	275 713.75	244 125.72
7 层	319 381.40	268 593.38	218 483.72
8 层	316 817.40	255 232.26	184 945.44
屋顶	306 084.00	230 414.75	136 351.24

3.2.2 拉索支撑惯容系统的优化设计

考虑到双向地震动的影响,需要在结构的 X 向和 Y 向分别安装拉索支撑惯容系统。为保持对称性,拉索支撑惯容系统的布置遵循对称原则。针对 X 向减震,考虑到 X 向具有较大的结构宽度(48 m),可以获得较小的拉索安装角度,共安装 2 个拉索支撑惯容系统,对称布置于①、④轴线位置。针对 Y 向减震,考虑到 Y 向结构宽度较小(9.6 m),同时避免由于减震系统的安装造成结构扭转加剧,共安装 4 个拉索支撑惯容系统,布置于 A、C、I、K 轴线位置,如图 10 所示。

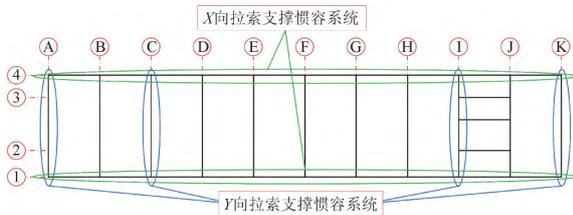


图 10 拉索支撑惯容系统的平面布置

Fig. 10 Plane layout of cable-bracing inerter systems

依据表 2 中的质量和刚度信息及实际结构的几何信息可以计算拉索支撑惯容系统不同竖向安装位置对应的惯质比。为了便于表达,采用式(11)将该惯质比进行归一化以消除惯容表观质量的具体数值影响,并示于图 11 中。

$$\tilde{\mu} = \frac{m_d}{\{\varphi\}^T M_p \{\varphi\}} \quad (11)$$

对于 X 向,惯容系统安装于底层,拉索锚固于顶层(第 8 层)时,归一化有效惯质比最大,为 0.708。对于 Y 向,惯容系统安装于底层,拉索锚固于 6 层时,归一化有效惯质比最大,为 0.103。因此,①、④轴线

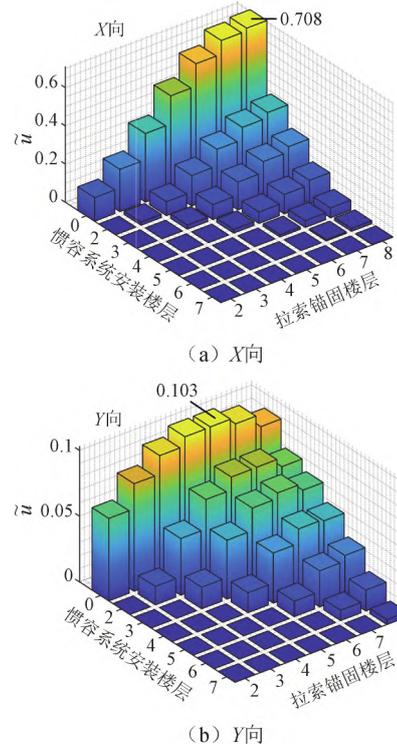


图 11 拉索支撑惯容系统竖向安装位置效率的量化

Fig. 11 Efficiency quantification of vertical installation position of cable-bracing inerter systems

的拉索支撑惯容系统采用安装于底部、锚固于第 8 层的形式。A、C、I、K 轴线处的拉索支撑惯容系统采用安装于底部、锚固于第 6 层的形式,如图 12 所示。

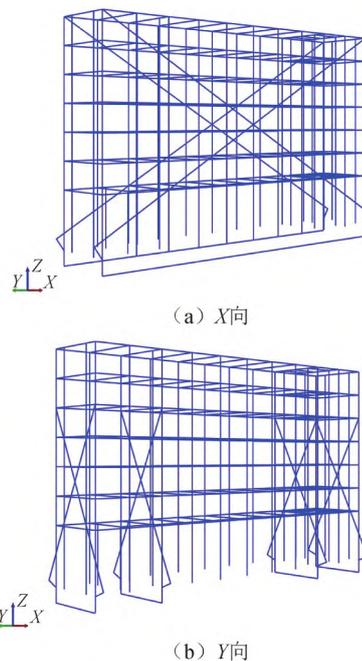


图 12 受控系统的有限元模型

Fig. 12 Finite element model of controlled system

依据结构模型的模态分析结果可知,以 X 向及 Y 向为主的振动模态对应的圆频率分别为 5.766 rad/s 和 5.389 rad/s ,代入式(8)所示的优化设计公式并通过数值优化算法可以获得 X 向及 Y 向的惯容系统的最优总体设计参数(总表观质量、总阻尼系数及总调谐弹簧刚度),如表3所示。依据式(5)计算可知, X 向最优总表观质量及 Y 向最优总表观质量对应的惯质比 μ_1 和 μ_2 分别为 0.105 和 0.096 。

表3 拉索支撑惯容系统的设计参数
Table 3 Designed parameters of CBISs

方向	m_d/t	$c_d/(kN \cdot m^{-1} \cdot s)$	$\omega_d/(rad \cdot s^{-1})$
X 向	194.032	622.291	6.096
Y 向	1 229.167	3 879.894	5.667

3.3 双向地震动作用下的减震效果验证

为了验证所设计的拉索支撑惯容系统的减震效果,针对原结构及受控结构分别进行时程分析。由于场地实测地震动记录能够更好地反映建筑场地及地震动特性,时程分析所选用的激励为原结构底层安装的双向加速度传感器所记录及附近基站的实测地震动。地震实测数据基本信息如表4所示。以最具代表性的2011年3月11日采集到的Record-4波为例,加速度时程曲线如图13所示,受控结构(安装双向拉索支撑惯容系统)和原结构的 X 向及 Y 向各层的层间位移角响应均方值 θ ,如图14所示。表5中给出了结构的均方根减震比及峰值减震比。

表4 实测地震动信息
Table 4 Information of recorded ground motion

地震波	测量日期	加速度峰值/($m \cdot s^{-2}$)	
		X 向	Y 向
Record-1	2003-05-26	0.996 2	1.298 5
Record-2	2005-08-16	1.102 3	1.191 1
Record-3	2011-03-09	0.315 8	0.258 9
Record-4	2011-03-11	4.081 4	4.711 0
Record-5	2011-04-07	1.781 0	1.894 6

表5 拉索支撑惯容系统的减震性能
Table 5 Damping performance of CBISs

地震波	均方根减震比		峰值减震比	
	X 向	Y 向	X 向	Y 向
Record-1	0.405 0	0.394 1	0.538 4	0.700 3
Record-2	0.467 9	0.423 7	0.558 6	0.528 7
Record-3	0.421 0	0.277 2	0.631 6	0.315 2
Record-4	0.414 4	0.390 3	0.462 7	0.456 4
Record-5	0.605 2	0.495 4	0.753 9	0.572 8
均值	0.462 7	0.396 1	0.589 0	0.514 7

从层间位移角的受控及无控结构响应的均方值可以看出,通过安装拉索支撑惯容系统,结构层间位移角均方值显著降低, X 向的均方值减震比为 0.4144 。

Y 向的均方值减震比为 0.3903 ,均小于目标减震比限值 0.5 ,表明设计方法的有效性。图15中给出了在Record-4的激励下,结构顶层的位移响应包络。其中 U_x 、 U_y 分别代表结构 X 向位移和 Y 向位移,响应依据动力时程绘制,各方向的最大位移构成了位

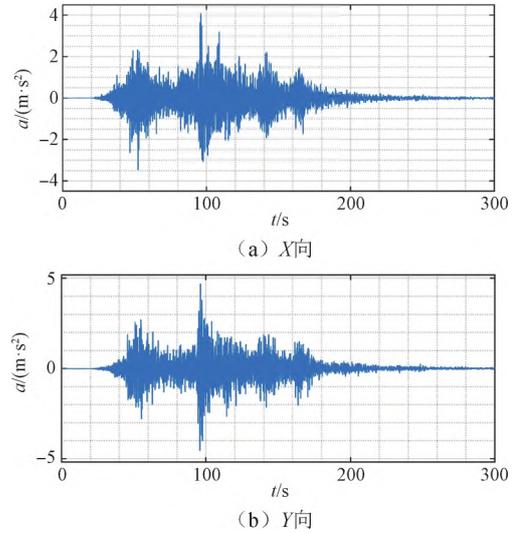


图13 Record-4波加速度时程曲线

Fig. 13 Acceleration time history curve of Record-4

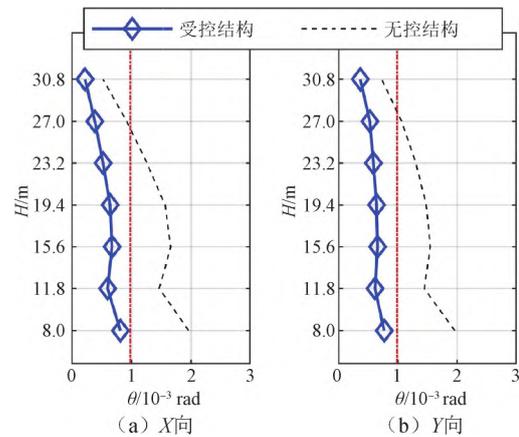


图14 Record-4波作用下受控及无控层间位移角响应

Fig. 14 Drift ratio response of controlled and uncontrolled structure under Record-4

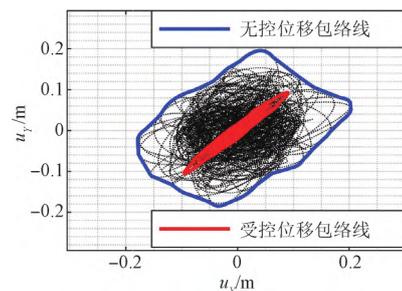


图15 Record-4波作用下的结构顶层双向位移响应

Fig. 15 Bidirectional displacement response of structure roof under Record-4

移包络线。结构位移响应峰值在拉索支撑惯容系统的控制下显著减小, X向和Y向的峰值层间位移角的减震比分别为0.5890和0.5147。

为了阐明惯容系统特有的阻尼增效机制,图16中给出了①轴及A轴的拉索支撑惯容系统的惯容系统位移及阻尼元件位移的时程曲线。从图中可以观察到,在双向地震作用下,所设计的拉索支撑惯容系统均可使得惯容、弹簧、阻尼协同工作,有效放大阻尼元件的行程。另外,当采用传统阻尼器针对目标建筑进行减震控制以达到与拉索支撑惯容系统的性能指标时,由于调谐机制的缺失,传统阻尼器的位移行程实质上与图16中所示的惯容系统整体位移相近,明显小于拉索支撑惯容系统阻尼元件的行程,这是拉索支撑惯容系统相较于传统阻尼器在机理层面的优势。

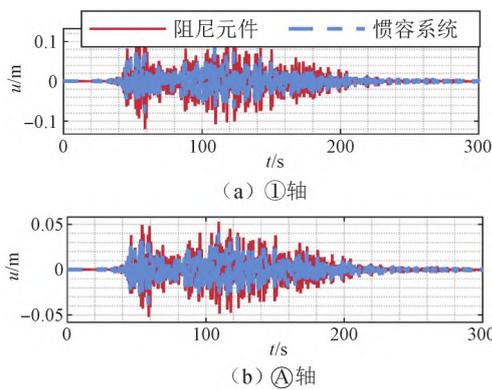


图16 拉索支撑惯容系统的位移响应
Fig. 16 Displacement responses of CBISs

进一步地,定义如下的阻尼增效系数 ψ 对惯容系统的阻尼增效进行量化^[12]:

$$\psi = \frac{\sigma_{\text{damper}}}{\sigma_{\text{system}}} \quad (12)$$

其中 σ_{damper} 和 σ_{system} 分别为阻尼元件和惯容系统的位移响应均方值。

表6中汇总了各拉索支撑惯容系统的阻尼增效系数。由表5、6可知,针对不同地震动的输入,拉索支撑惯容系统的减震效率不同,但其减震效果基本与阻尼增效系数成正相关,这是由于阻尼增效系数的增加有助于耗能元件的行程放大,从而耗能效果有所增加。各地震激励作用下,安装于①轴、④轴的拉索支撑惯容系统阻尼增效系数均值分别为1.614、1.625。A、C、I、K轴的拉索支撑惯容系统的阻尼增效系数均值分别为1.539、1.533、1.501、1.485。用于控制同一方向的拉索支撑惯容系统的阻尼增效系数仍略有差别,这是由于双向地震动作用下,结构的微小扭转所引起。

表6 各拉索支撑惯容系统的阻尼增效系数

Table 6 Damping enhancement factors of each CBIS

地震动记录	阻尼增效系数 ψ					
	X向			Y向		
	①轴	④轴	A轴	C轴	I轴	K轴
Record-1	1.559	1.568	1.498	1.493	1.463	1.448
Record-2	1.531	1.544	1.445	1.437	1.393	1.373
Record-3	1.742	1.750	1.671	1.668	1.647	1.636
Record-4	1.640	1.650	1.570	1.566	1.538	1.524
Record-5	1.599	1.611	1.511	1.504	1.464	1.445
均值	1.614	1.625	1.539	1.533	1.501	1.485

4 结论

1) 阐述了惯容系统在OpenSees中的建模方法,并通过杠杆机制模拟了拉索支撑的转向特性,实现了拉索支撑惯容系统的有限元模拟。位移传递函数及惯容元件本构关系的分析结果表明,所建立的有限元模型可以很好地反映拉索支撑惯容系统的各项特性,可用于后续惯容系统的研究及工程实践。

2) 以实际钢结构为例,阐述了拉索支撑惯容系统的设计流程。分析结果表明,依据等效结构参数进行设计,可以保证拉索支撑惯容系统在建筑结构受双向地震动的耦合作用时仍然保持高效的减震性能。在场地实测双向地震动作用下,拉索支撑惯容系统的双向均方减震比均小于减震目标限值。

3) 通过阻尼增效系数阐明了拉索支撑惯容系统耗能效率高于传统阻尼装置的本质,在于放大减震系统中阻尼元件的位移行程,增加其从结构中吸收能量的效率。各惯容系统的阻尼增效系数均大于1.0,表明其耗能变形被有效放大,减震效率也相应提升。

4) 平面对称布置的拉索支撑惯容系统阻尼增效作用受结构扭转的影响,相互之间略有差异。为此,考虑结构平面不规则及地震扭转效应的惯容系统减震设计仍需进一步展开。

参考文献

- [1] SOONG T T, DARGUSH G F. Passive energy dissipation system in structural engineering [M]. Buffalo: State University of New York, 1997: 92-169.
- [2] 周福霖. 工程结构减震控制 [M]. 北京: 地震出版社, 1997: 159-206. (ZHOU Fulin. Structure vibration control [M]. Beijing: Seismological Press, 1997: 159-206. (in Chinese))
- [3] 李爱群. 工程结构减振控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 216-284. (LI Aiqun. Structure vibration control [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 216-284. (in Chinese))
- [4] 刘良坤, 谭平, 闫维明, 等. 具有调谐惯容阻尼器的

- 建筑结构减震设计[J]. 振动测试与诊断, 2018, 38(4): 751-757. (LIU Liangkun, TAN Ping, YAN Weiming, et al. The seismic mitigation design of tuned inerter damper for building structure [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(4): 751-757. (in Chinese))
- [5] 潘超,张瑞甫,王超等. 单自由度混联 II 型惯容减震体系的随机地震响应与参数设计[J]. 工程力学, 2019, 36(1): 129-137. (PAN Chao, ZHANG Ruifu, WANG Chao, et al. Stochastic seismic response and design of structural system with series-parallel-II inerter system [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 129-137. (in Chinese))
- [6] 张瑞甫,曹嫣如,潘超. 惯容减震(振)系统及其研究进展[J]. 工程力学, 2019, 36(10): 8-27. (ZHANG Ruifu, CAO Yanru, PAN Chao. Inerter system and its state-of-the-art [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10): 8-27. (in Chinese))
- [7] KAWAMATA S. Development of a vibration control system of structures by means of mass pumps [R]. Tokyo, Japan: Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 1973.
- [8] ARAKAKI T, KURODA H, ARIMA F, et al. Development of seismic devices applied to ball screw: part 1: basic performance test of RD-series [J]. Journal of Technology and Design, 1999, 5(8): 239-244.
- [9] ARAKAKI T, KURODA H, ARIMA F, et al. Development of seismic devices applied to ball screw: part 2: performance test and evaluation of rd-series [J]. Journal of Technology and Design, 1999, 5(9): 265-270.
- [10] IKAGO K, SAITO K, INOUE N. Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(3): 453-474.
- [11] ZHANG R F, ZHAO Z P, PAN C, et al. Damping enhancement principle of inerter system [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(5): e2523.
- [12] 刘良坤,潘兆东,谭平,等. 旋转惯容阻尼伸臂控制体系减震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(2): 37-45. (LIU Liangkun, PAN Zhaodong, TAN Ping, et al. Research on damping performance of damped outrigger control system with rotation inertia damper [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(2): 37-45. (in Chinese))
- [13] 王钦华,雷伟,祝志文,等. 单重和多重调谐质量惯容阻尼器控制连体超高层建筑风振响应比较研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(4): 25-34. (WANG Qinhu, LEI Wei, ZHU Zhiwen, et al. Comparison of mitigation effects on wind-induced response of connected super-high-rise buildings controlled by TMDI and MTMDI [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(4): 25-34. (in Chinese))
- [14] 薛松涛,康建飞,谢丽宇. 用于结构减震控制的拉索式惯容系统跨层布置优化研究[J]. 动力学与控制学报, 2020, 18(5): 72-78. (XUE Songtao, KANG Jianfei, XIE Liyu. Study on optimization of cross-layer cable-bracing inerter system for structural seismic response control [J]. Journal of Dynamics and Control, 2020, 18(5): 72-78. (in Chinese))
- [15] MCKENNA F, SCOTT M H, FENVES G L. Nonlinear finite-element analysis software architecture using object composition [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2010, 24(1): 95-107.
- [16] 班鑫磊,谢丽宇,薛松涛,等. 拉索式旋转电涡流阻尼器的理论模型及频域响应分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(5): 941-945. (BAN Xinlei, XIE Liyu, XUE Songtao, et al. Theoretical model and analysis of the frequency response of a rotational eddy current damper with cable bracing [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 941-945. (in Chinese))
- [17] XUE S T, KANG J F, XIE L Y, et al. Cross-layer installed cable-bracing inerter system for MDOF structure seismic response control [J]. Applied Sciences, 2020, 10(17): 5914.
- [18] ZHANG R F, ZHANG L Q, PAN C, et al. Targeted modal response control of structures using inerter systems based on master oscillator principle [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 206(15): 106636.
- [19] IKAGO K, SUGIMURA Y, SAITO K, et al. Modal response characteristics of a multiple-degree-of-freedom structure incorporated with tuned viscous mass dampers [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2012, 11(2): 375-382.
- [20] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 2016 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. 2016 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese))
- [21] XIE L Y, CAO M, FUNAKI N, et al. Performance study of an eight-story steel building equipped with oil dampers damaged during the 2011 great east Japan earthquake part 1: structural identification and damage reasoning [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2015, 14(1): 181-188.