

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.08.016

设置椭圆形轨道负刚度装置的隔震结构抗震性能研究

黄 潇¹, 曹 伟¹, 胡志祥²

(1. 安徽建筑大学 土木水利学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要:文章设计了一种新型椭圆形轨道负刚度装置,该装置由椭圆形曲面轨道、预压弹簧和滑轮组成。首先,推导了该装置的力-位移关系表达式,分析了预压弹簧刚度、初始预压缩量、椭圆形轨道长短半轴比值等参数对椭圆形轨道负刚度装置力-位移关系的影响;然后,将该负刚度装置应用到基础隔震结构中,对分别设置椭圆形轨道负刚度装置和不设负刚度装置的基础隔震结构的频域响应特性进行分析和对比;最后,对实际地震动作用下5层隔震结构的地震响应进行分析。结果表明,采用新型椭圆形曲面轨道负刚度装置,结构各层层间位移和绝对加速度响应均有一定程度的降低,进一步验证了该装置的有效性。

关键词:隔震结构;椭圆形轨道;负刚度装置;频域响应特性;地震响应

中图分类号:TU352.1

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)08-1113-09

Seismic performance of base-isolated structure based on negative stiffness device with elliptical curved track

HUANG Xiao¹, CAO Wei¹, HU Zhixiang²

(1. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A novel elliptical negative stiffness device (ENSD) has been developed, comprising an elliptical curved track, preloaded springs and pulleys. Firstly, the force-displacement relationship of the ENSD was derived. Parametric studies were conducted to analyze the effects of preloaded spring stiffness, initial compression, and the aspect ratio of the elliptical track on the force-displacement characteristics of the ENSD. Then, the ENSD was applied to the base-isolated structure, and the frequency-domain response characteristics of the base-isolated structure with and without the ENSD were analyzed and compared, respectively. Finally, the seismic responses of a five-story base-isolated structure under actual earthquakes were analyzed. It was found that, by using the new negative stiffness device with elliptical curved track, the inter-story displacement and absolute acceleration of the structure at all stories were reduced to a certain extent, which further verified the effectiveness of the device.

Key words: base-isolated structure; elliptical curved track; negative stiffness device; frequency-domain response characteristic; seismic response

基础隔震技术通过在建筑结构底部与基础面之间设置某种隔震装置,形成柔性连接,从而延长结构体系的自振周期^[1]。在地震作用下,隔震结构的隔震层可能会发生较大位移,引起隔震装置破坏、与周围限位墙或相邻结构发生碰撞等危害。

将负刚度装置应用到隔震结构中可以改善隔震结构的抗震性能,目前其组合隔震性能广受关注。负刚度通常采用预压缩弹簧、预弯梁、磁性材料以及复合结构等方式实现^[2],负刚度元件还可与阻尼元件组合成阻尼负刚度装置,以调节隔震结构

收稿日期:2024-04-25;修回日期:2025-09-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178283);安徽省高校省级自然科学基金资助项目(2024AH050262)

作者简介:黄 潇(1987—),女,湖北潜江人,博士,安徽建筑大学高级工程师,硕士生导师,通信作者,E-mail:huangxiao@ahjzu.edu.cn.

动力特性。

文献[3]将负刚度装置引入到隔震结构中,研究表明该装置能增加结构自振周期、增大阻尼比;文献[4]通过偏心滚轮的运动结合预压弹簧伸缩变形实现负刚度特性,并与摩擦滑移隔震支座并联形成复合隔震装置,通过与普通摩擦滑移支座对比证明了装置的有效性;文献[5]研究了一种新型轨道式负刚度装置,改善以往负刚度装置构造复杂、有残余变形等缺点;文献[6]设计了一种双人字形负刚度装置,可以避免非弹性偏移和永久变形;文献[7]设计了一种基于负刚度理论的被动隔振装置并进行了试验,结果表明,设计的隔振装置能隔离超低频振动;文献[8]将磁流变阻尼器与预压弹簧装置并联形成一种可调节阻尼力的竖向隔震装置,提出了该装置控制策略及其实施方法,结果表明,该隔震系统可有效降低结构地震响应;文献[9]提出一种可变负刚度装置,通过表观弱化实现建筑结构抗震保护;文献[10]提出一种新的被动伪负刚度装置,作为现有建筑物抗震保护的补充装置,通过试验验证了该装置在抑制长周期结构峰值加速度响应方面具有优势;文献[11]基于正负刚度并联原理,设计一种由矩形弹簧和碟形弹簧相互并联的低频被动隔振系统,通过试验证明所设计的正负刚度并联隔振系统具有良好的隔振性能;文献[12]提出一种新开发的基于旋转的机械自适应被动装置,数值模拟结果证明其具有提供地震保护的潜力;文献[13]将负刚度装置引入到超长联大跨隔震连续梁桥中组成新型减、隔震系统,可以有效地减小超长联大跨隔震连续梁桥的支座位移;文献[14]对设置负刚度装置的基础隔震系统进行动力学分析,结果表明,其对不同强度的地震都有较好的控制效果;文献[15]对基础隔震液体储罐的地震响应采用阻尼负刚度装置进行控制,结果表明,液体储罐隔震支座和晃动响应可同时减小;文献[16]在基础隔震结构的隔震层设置负刚度装置,分析了不同频谱特性的地震动作用下设置负刚度装置的隔震结构地震响应差异,对负刚度装置的实际应用具有一定的指导意义;文献[17]设计一种基于形状记忆合金的新型负刚度装置,通过反向摩擦曲面产生负刚度效应,在保持优异复位能力的同时,可降低结构的地震响应;文献[18]通过振动台试验表明,在建筑结构底层安装负刚度装置并结合粘滞阻尼器,不仅可降低基底剪力和最大加速度,还能将大变形限制在底层内,使整个结构的损伤最小化。

负刚度技术研究取得了显著进展,但是传统负刚度装置的预压弹簧为垂直于地面放置,预压弹簧向上的推力作用可能会影响隔震结构的稳定性,因此其设计构型和性能仍有待进一步优化。本文设计了一种椭圆形轨道负刚度装置(elliptical negative stiffness device, ENSD),预压弹簧平行于地面对称布置,对其力-位移关系表达式进行推导和参数化分析,并传统负刚度装置(traditional negative stiffness device, TNSD)进行对比。然后将新型负刚度装置应用到 5 层隔震结构中,对不加负刚度和附加 ENSD 的隔震结构频域响应和实际地震响应进行分析和对比,验证该装置的有效性。

1 负刚度装置及其力学模型对比

1.1 TNSD 及其力学模型

传统负刚度装置是对弹簧进行预压缩,当结构发生一定的水平位移时,由于弹簧的预压力,弹簧产生与位移同向的水平分力,具有负刚度特性^[19]。但是若水平位移过大,弹簧则由压缩状态变为拉伸状态,弹簧将会产生与水平位移相反的水平分力,此时产生正刚度特性。TNSD 的力学原理^[16]如图 1 所示。

图 1 中: K_T 为弹簧刚度; l_{T0} 为弹簧的自由长度; l_T 为施加预压力后弹簧初始状态的长度; l_{T1} 为弹簧的初始预压缩量。

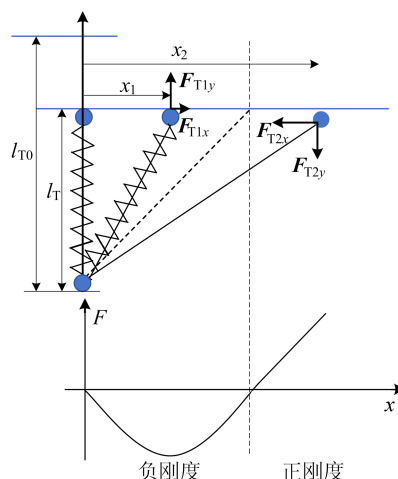


图 1 预压弹簧力学原理图

当发生水平位移 x 时,弹簧作用力的水平分力为:

$$F_{Tx} = K_T(\sqrt{x^2 + l_T^2} - l_{T0}) \frac{x}{\sqrt{x^2 + l_T^2}} =$$

$$K_T \left(1 - \frac{l_{T0}}{\sqrt{x^2 + l_T^2}} \right) x \quad (1)$$

将上式进行泰勒三次项展开,得到:

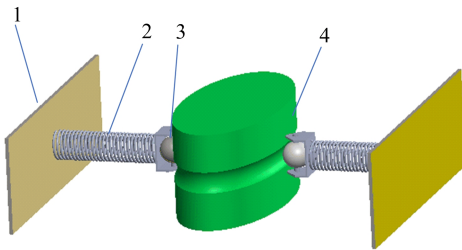
$$\tilde{F}_{Tx} = K_T \left(-\frac{l_{T0}}{l_T} + 1 \right) x + \frac{K_T l_{T0}}{2l_T^3} x^3 \quad (2)$$

当位移很小时,可忽略高次幂,则水平力为:

$$\tilde{F}_{Tx1} = K_T \left(-\frac{l_{T0}}{l_T} + 1 \right) x = -\frac{K_T l_{T1}}{l_T} x \quad (3)$$

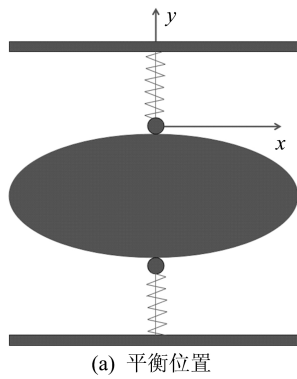
1.2 ENSD 及其力学模型

ENSD 装置由椭圆形轨道、滑轮、预压弹簧和两侧固定座组成,如图 2 所示。椭圆形轨道与上部结构连接,两侧固定座分别与基础固接。ENSD 装置的平面示意图如图 3 所示。

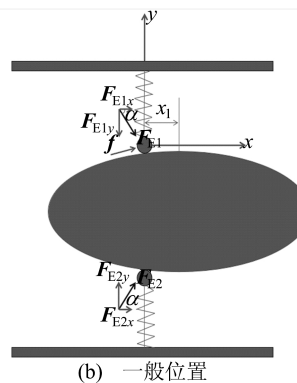


1.固定座 2.预压弹簧 3.滑轮 4.椭圆形轨道

图 2 ENSD 装置三维示意图



(a) 平衡位置



(b) 一般位置

图 3 ENSD 装置平面示意图

当椭圆形轨道随上部结构整体向左或向右移动时,忽略滑轮与轨道的摩擦力,预压弹簧产生与

位移方向一致的水平分力,从而产生负刚度特性。

设预压弹簧的刚度为 K_E ,弹簧的自由长度为 l_{E0} ,施加预压力后的弹簧长度为 l_E (平衡位置),则弹簧的初始预压缩量 $l_{E1} = l_{E0} - l_E$ 。椭圆形轨道由椭圆方程 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ 给出,其中 a 和 b 分别为长半轴和短半轴。取椭圆轨道上半部分进行分析,当发生向右的水平位移 x 时,弹簧伸长量为 $b - \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2} x^2}$,此时弹簧的作用力为:

$$F_s = K_E \left(l_{E1} - b + \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2} x^2} \right) \quad (4)$$

由于预压弹簧的作用力,滑轮对椭圆形轨道产生垂直于接触面的压力,假设该作用力与水平方向的夹角为 α ,则滑轮对椭圆形轨道的作用力为 $F_s \sin \alpha$,再将该力进行分解,得到沿 x 方向的水平分力为 $F_s \sin \alpha \cos \alpha$ 。其中,夹角 α 为椭圆形轨道的切角,则:

$$\tan \alpha = \left(\sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2} x^2} \right)' = -\frac{\frac{b^2}{a^2} x}{\sqrt{(a^2 b + abx)(a^2 b - abx)}} \quad (5)$$

由于轨道是对称的,则由一对预压弹簧产生的作用于椭圆形轨道沿 x 方向的水平分力为:

$$\begin{aligned} F_{Ex} &= 2F_s \sin \alpha \cos \alpha = 2F_s \frac{\tan \alpha}{1 + \tan^2 \alpha} = \\ &= 2K_E \left(l_{E1} - b + \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2} x^2} \right) \frac{\tan \alpha}{1 + \tan^2 \alpha} = \\ &= 2K_E \left(l_{E1} - b + \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2} x^2} \right) \times \\ &\quad \left(\frac{b^4 x^2}{(a^2 b + abx)(a^2 b - abx)} \right)^{-1} \times \\ &\quad \left(-\frac{b^2 x}{\sqrt{(a^2 b + abx)(a^2 b - abx)}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

将水平力 F_{Ex} 进行泰勒三次项展开,得到:

$$\tilde{F}_{Ex} = -\frac{2K_E b l_{E1}}{a^2} x - \frac{2K_E b^2}{a^2} \left[\left(\frac{1}{2a^2 b} - \frac{b}{a^4} \right) l_{E1} - \frac{1}{2a^2} \right] x^3 \quad (7)$$

将 $\tilde{F}_{Ex}$ 对 x 进行求导,得到 ENSD 装置提供的负刚度 K_{ENSD} 为:

$$K_{ENSD} = -2K_E l_{E1} \frac{b}{a^2} + \frac{6K_E b^2}{a^2} \left[l_{E1} \left(\frac{b}{a^4} - \frac{1}{2a^2 b} \right) + \frac{1}{2a^2} \right] x^2 \quad (8)$$

当水平位移 x 很小时,可以忽略高次幂,则 ENSD 装置提供的线性负刚度为:

$$\tilde{K}_{\text{ENSD}} = -2K_E l_{E1} \frac{b}{a^2} \quad (9)$$

TNSD 和 ENSD 装置的力-位移关系曲线如图 4 所示。其中: K_T 和 K_E 均取 720 kN/m; l_T 、 l_{T1} 、 l_{T0} 分别为 0.7、0.3、1.0 m; l_E 、 l_{E1} 、 l_{E0} 同样为 0.7、0.3、1.0 m; a 、 b 分别为 0.6、0.2 m。从图 4 可以看出, ENSD 装置相比于 TNSD 装置能提供负刚度的范围更宽。

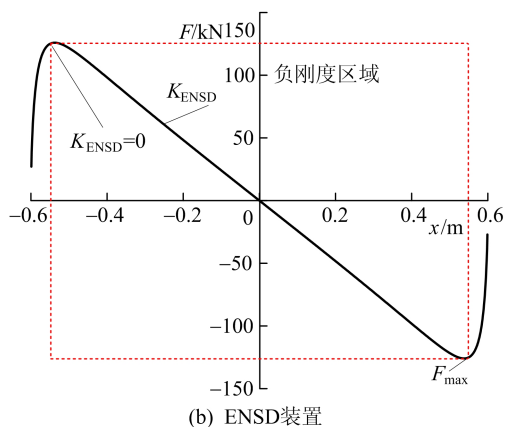
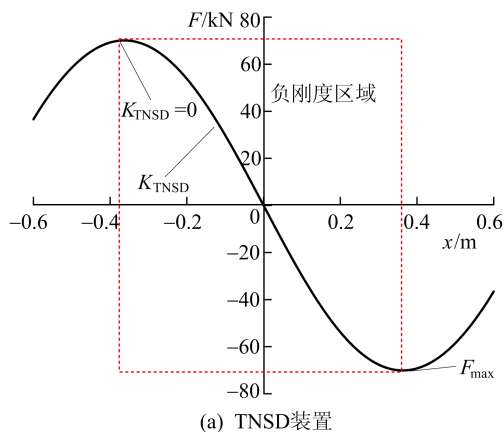


图 4 负刚度装置的力-位移关系

2 参数化分析

根据 1.2 节对 ENSD 装置力-位移关系以及负刚度 K_{ENSD} 表达式的推导, 可知预压弹簧的刚度 K_E 、弹簧初始预压缩量 l_{E1} 、椭圆轨道长、短半轴 a 和 b 均对负刚度 K_{ENSD} 有一定的影响。下文将进行参数化分析, 研究负刚度 K_{ENSD} 随上述参数的变化规律。

2.1 预压弹簧刚度

采用控制变量法, 取 l_{E1} 为 0.3 m, a 、 b 分别为 0.6、0.2 m, 得到预压弹簧刚度 K_E 的变化对负刚度 K_{ENSD} 的影响如图 5 所示。由图 5 可知, ENSD 装置的负刚度与预压弹簧刚度 K_E 之间存在显著

的关联性, 随着弹簧刚度 K_E 的增加, ENSD 装置所能提供的负刚度 K_{ENSD} 也随之增大。

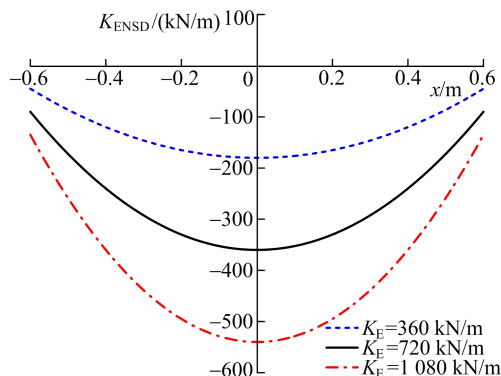


图 5 弹簧刚度 K_E 对负刚度的影响

2.2 弹簧预压缩量

当 K_E 为 720 kN/m, a 、 b 分别为 0.6、0.2 m 时, 弹簧预压缩量 l_{E1} 的变化对负刚度 K_{ENSD} 的影响如图 6 所示。由图 6 可知, 随着弹簧预压缩量 l_{E1} 的增加, ENSD 装置的负刚度显著增大, 且其作用范围也更加扩展, 这一变化凸显了弹簧预压缩量在调节负刚度装置性能中的关键作用。

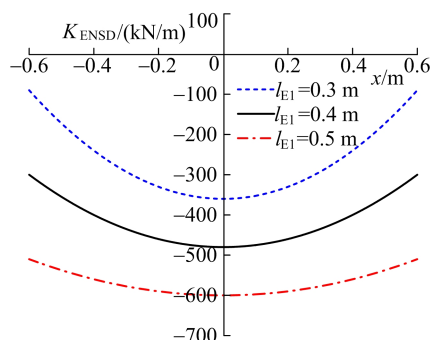


图 6 弹簧预压缩量对负刚度的影响

2.3 椭圆形轨道的长短半轴比值

椭圆形轨道的长短半轴比值也是设计中的一个关键参数。取 l_{E1} 为 0.3 m, K_E 为 720 kN/m, a 为 0.6 m, 短长半轴比值 b/a 分别为 1/3、1/2、2/3 时, 负刚度的变化如图 7 所示。

由图 7 可知: 当水平位移较小时, 短长半轴比值越大, 负刚度也越大; 当水平位移较大时, 随着短长半轴比值的增加, 负刚度值反而越小。当短长半轴比值过小时, 负刚度随位移的增加呈现递增的特性, 这种变化可能导致在位移较大时负刚度效果的过度强化。相反, 若比值设定得过大, 虽然可能在某段位移范围内维持较高的负刚度值, 但其作用范围却会相应缩小, 在位移较大时会出

现显著的正刚度效应,可能增加结构在地震作用下的破坏风险。

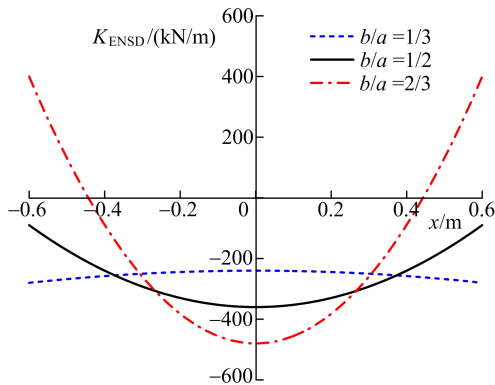


图 7 椭圆形轨道短长轴比值对负刚度的影响

根据 2.1~2.3 节的参数化分析,可在设计时根据具体的隔震需求,选择具体的参数。根据具体的隔震需求对 ENSD 装置参数进行确定的流程图如图 8 所示。

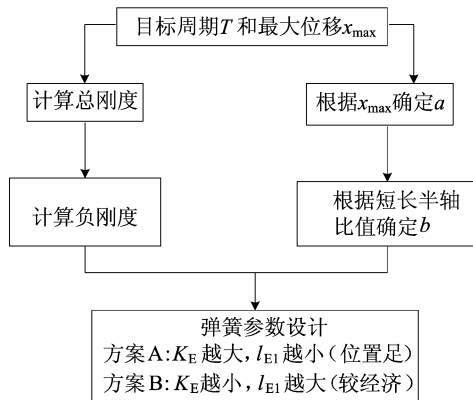


图 8 ENSD 装置参数设计流程图

首先,根据目标周期 T 确定系统总刚度 $K_{\text{total}} = 4\pi^2 m / T^2$,其中 m 为隔震结构总质量。

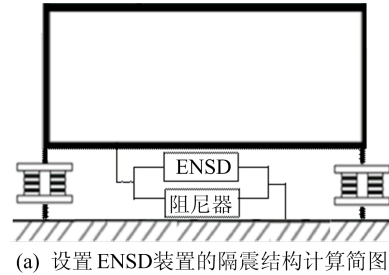
然后,通过系统总刚度减去隔震支座刚度得到所需要的负刚度,即 $\tilde{K}_{\text{ENSD}} = K_{\text{total}} - K_0$;再按照隔震支座最大位移 x_{max} ,选择椭圆形轨道长半轴 a ,理论上 $a \geq x_{\text{max}}$,考虑装置实际经济性选取 a 略大于 x_{max} 即可;通过 2.3 节中 b/a 比值的影响,若想获得较宽的负刚度作用范围, b/a 比值可取得相对小一些,以此来确定短半轴 b ,从而确定轨道形状。

最后,根据 $\tilde{K}_{\text{ENSD}} = -2K_E l_{E1} b / a^2$,考虑压缩量和弹簧刚度对负刚度的影响关系,结合实际安装条件,安装空间足够的情况下,弹簧刚度时,取得稍大,初始预压缩量可小一些;考虑经济性时,

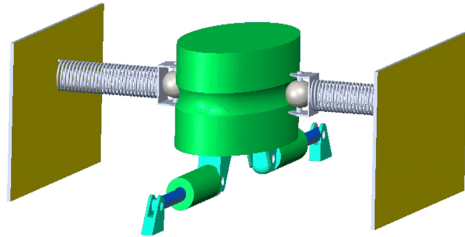
弹簧刚度可取得小一些,初始预压缩量大一些。

3 频响函数

设置 ENSD 装置的单自由度隔震结构计算简图如图 9a 所示。在实际中,ENSD 装置与粘滞阻尼器并联使用可以进一步提高隔震结构抗震性能,该粘滞阻尼器作为独立元件与 ENSD 装置并联安装,一端与椭圆形轨道下方固接,另一端与基础固接,如图 9b 所示。



(a) 设置 ENSD 装置的隔震结构计算简图



(b) ENSD 与粘滞阻尼器并联三维图

图 9 设置 ENSD 装置的隔震结构计算简图及三维图

地震作用下设置带阻尼 ENSD 装置的单自由度隔震结构运动方程^[20]为:

$$m_0 \ddot{x} + c_0 \dot{x} + k_0 x + \tilde{K}_{\text{ENSD}} x + c_d \dot{x} = -m_0 \ddot{u}_g \quad (10)$$

其中: m_0 为隔震结构质量; c_0 和 k_0 分别为隔震支座总的阻尼系数和刚度系数; c_d 为与负刚度装置并联的粘滞阻尼器的阻尼系数; $\ddot{u}_g$ 为地震激励; x 、 $\dot{x}$ 和 $\ddot{x}$ 分别为隔震结构相对于地面的位移、速度和加速度。

令 $\mu_{\text{ng}} = \tilde{K}_{\text{ENSD}} / k_0 = -2K_E b l_{E1} / (k_0 a^2)$, $\omega_0 = \sqrt{k_0 / m_0}$, $\xi_0 = c_0 / 2m_0 \omega_0$, $\xi_d = c_d / 2m_0 \omega_0$, $\theta_d = \xi_d / \xi_0$, 则方程简化为:

$$\ddot{x} + 2(1 + \theta_d) \omega_0 \xi_0 \dot{x} + (1 + \mu_{\text{ng}}) \omega_0^2 x = -\ddot{u}_g \quad (11)$$

设作用在支座处的谐波激励 $\ddot{u}_g = U e^{i\omega t}$, 系统的稳态解为 $x = X e^{i\omega t}$, 代入方程(11)可得:

$$[-\omega^2 + i2(1 + \theta_d) \omega_0 \xi_0 \omega + \omega_0^2 + \omega_0^2 \mu_{\text{ng}}] X = -U \quad (12)$$

为描述方便,将不加负刚度、附加 ENSD 装

置、附加带阻尼 ENSD 装置的隔震结构分别命名为隔震结构 A、B、C。

$\beta = \omega/\omega_0$, 可以得到隔震结构 C 位移频响函数和加速度频响函数分别为:

$$H_{dC}(i\omega) = X/U = \frac{1}{\omega_0^2(-\beta^2 + i2(1+\theta_d)\xi_0\beta + 1 + \mu_{ng})},$$

$$H_{aC}(i\omega) = \frac{i2(1+\theta_d)\xi_0\beta + 1 + \mu_{ng}}{-\beta^2 + i2(1+\theta_d)\xi_0\beta + 1 + \mu_{ng}} \quad (13)$$

对于隔震结构 A, $\mu_{ng} = 0, \theta_d = 0$, 其位移频响函数和加速度频响函数分别为:

$$H_{dA}(i\omega) = -\frac{1}{\omega_0^2(-\beta^2 + i2\xi_0\beta + 1)},$$

$$H_{aA}(i\omega) = \frac{i2\xi_0\beta + 1}{-\beta^2 + i2\xi_0\beta + 1} \quad (14)$$

对于隔震结构 B, $\theta_d = 0$, 其位移频响函数和加速度频响函数分别为:

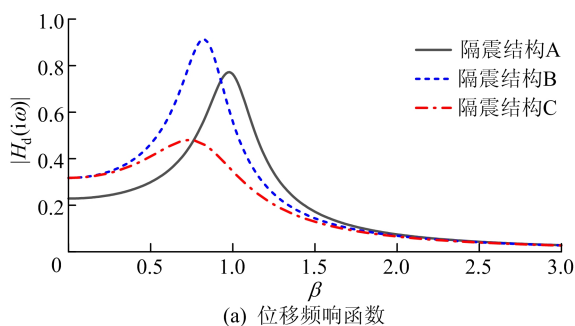
$$H_{dB}(i\omega) = -\frac{1}{\omega_0^2(-\beta^2 + i2\xi_0\beta + 1 + \mu_{ng})},$$

$$H_{aB}(i\omega) = \frac{i2\xi_0\beta + 1 + \mu_{ng}}{-\beta^2 + i2\xi_0\beta + 1 + \mu_{ng}} \quad (15)$$

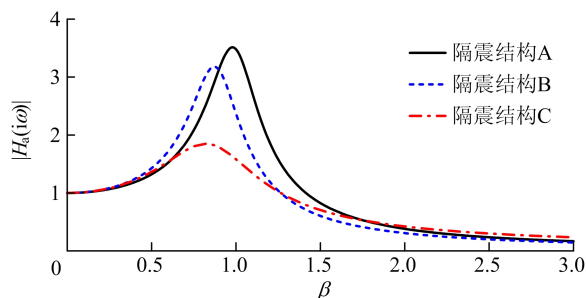
考虑隔震结构自振频率 ω_0 为 2.09 rad/s, 阻尼比 ξ_0 为 0.15, $\theta_d = 1, a = 0.6$ m, $b = 0.2$ m, l_{E1} 为 0.3 m, K_E 为 $0.4k_0$ 时, 隔震结构 A、B、C 的位移频响函数以及加速度频响函数曲线如图 10 所示。

从图 10 可以看出: 设置 ENSD 装置的隔震结构 B 和隔震结构 C 与无负刚度的隔震结构 A 相比, 频响曲线共振峰位置左移, 结构谐振频率降低; 设置 ENSD 装置可以降低高频激励下的隔震结构位移和加速度, 但是低频激励下加速度和位移响应会增加。

设置带阻尼 ENSD 装置的隔震结构不仅位移和加速度频响函数峰值大幅度降低, 而且会在更宽的频段范围内降低隔震结构的位移和加速度响应。



(a) 位移频响函数



(b) 加速度频响函数

图 10 位移和加速度频响函数曲线

4 地震响应分析

为验证装置效果, 从 PEER 官网上选取 3 条地震波, 参数见表 1 所列。

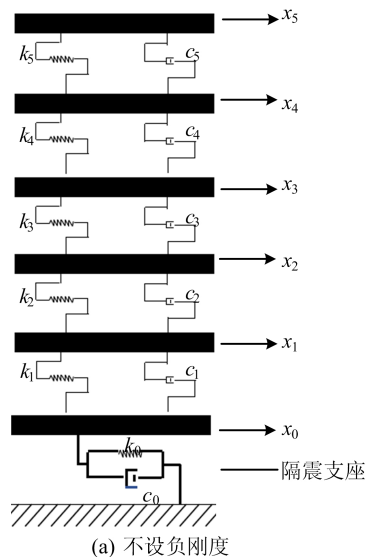
后续进行地震响应分析时, 将地震波统一调幅至峰值地面加速度 (peak ground acceleration, PGA) 为 0.4g。

表 1 地震波记录参数

地震动名称	年份	站点	PGA/g	持时/s
Imperial Valley	1940	El Centro	0.349	53.48
Corinth Greece	1981	Corinth	0.237	41.32
Kobe_Japan	1995	KJMA	0.832	149.98

选取文献[21]设计的 5 层框架结构进行数值模拟, 分为不设负刚度基础隔震结构和设置带阻尼 ENSD 装置的基础隔震结构, 隔震结构装置布置如图 11 所示。

结构各层的质量、刚度和阻尼系数见表 2 所列。ENSD 装置参数 $a = 0.6$ m, $b = 0.2$ m, $l_{E1} = 0.3$ m, K_E 为 $0.4k_0$ 。根据文献[6, 22]的研究, 取粘滞阻尼器附加阻尼比为 20%。



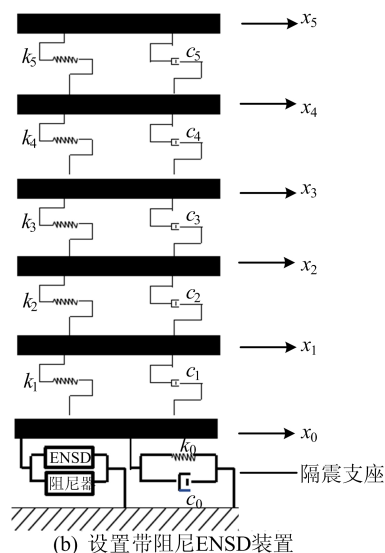


图 11 5 层隔震结构装置布置图

3 条地震波作用下不设负刚度装置、设置带

阻尼 ENSD 装置的隔震结构隔震层位移和顶层绝对加速度响应时程曲线如图 12 所示。

表 2 5 层框架结构参数

楼层	质量/kg	刚度/(kN/m)	阻尼/(kN·s/m)
隔震层	6 800	231.5	7.45
1	5 897	33 732.0	67.00
2	5 897	29 093.0	58.00
3	5 897	28 621.0	57.00
4	5 897	24 954.0	50.00
5	5 897	19 059.0	38.00

从位移响应的角度来看,设置带阻尼 ENSD 装置的隔震结构较未加负刚度的隔震结构,隔震层位移响应得到了很大程度的降低,这表明设置带阻尼负刚度装置在减小隔震结构隔震层位移方面展现出良好的性能。

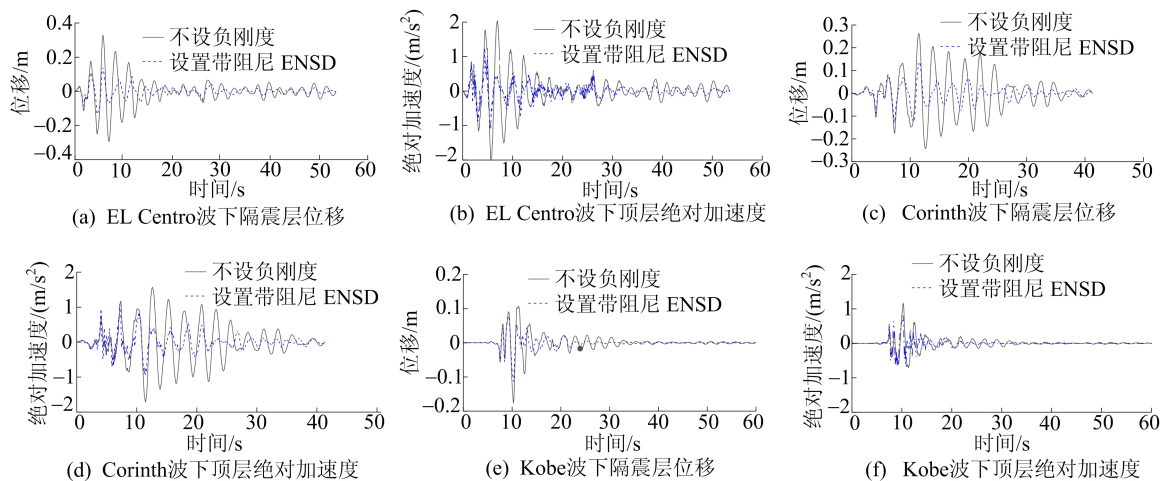


图 12 隔震层位移和顶层绝对加速度时程曲线

分析绝对加速度响应时程图可知,设置带阻尼 ENSD 装置的隔震结构顶层绝对加速度响应也有较大程度的降低。可以看出,设置带阻尼 ENSD 装置能实现隔震层位移以及上部结构加速度响应的同时降低,这对于提升建筑结构的隔震舒适性和安全性具有重要意义。

在所选取的 3 条地震波作用下,隔震结构各层最大层间位移和绝对加速度沿楼层分布图如图 13 所示。由图 13a 可知,设置带阻尼 ENSD 装置的隔震结构相较于传统隔震结构,各楼层峰值层间位移显著降低。由图 13b 可知,设置带阻尼 ENSD 装置的隔震结构各楼层加速度响应均大幅降低。

不设负刚度隔震结构与设置带阻尼 ENSD

装置的隔震结构在 3 条地震波激励下隔震层和顶层的地震响应层间位移和绝对加速度峰值见表 3 所列。

采用偏差率 R 来量化设置带阻尼 ENSD 装置的减震效果,计算公式为:

$$R = (R_N - R_E) / R_N \quad (16)$$

其中, R_N 和 R_E 分别为不设负刚度与设置带阻尼 ENSD 装置的隔震结构地震响应峰值。 R 为正值表明有减震效果。

不同地震波作用下各楼层层间位移和绝对加速度偏差率如图 14 所示。

从图 14 可以看出,设置带阻尼 ENSD 装置的隔震结构,其所有楼层的地震响应均得到了显著降低。

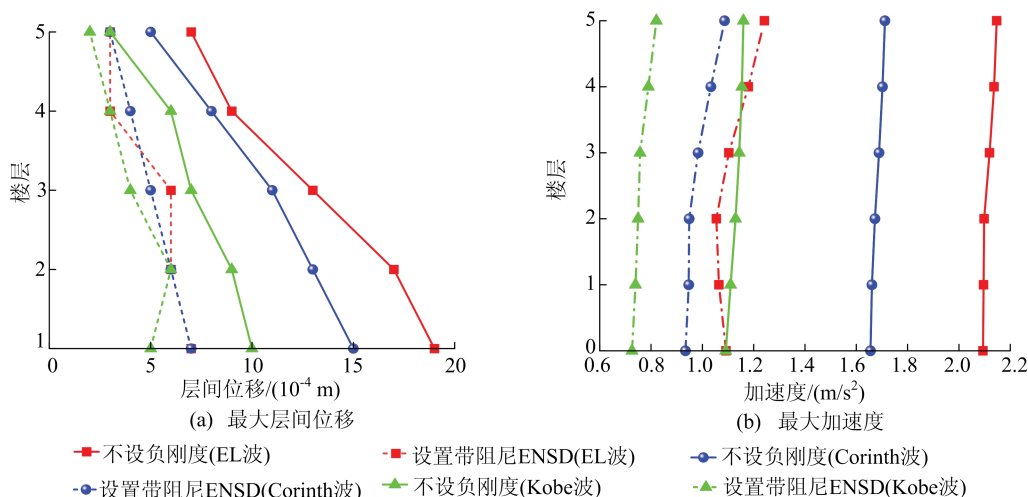


图 13 不同地震波作用下最大层间位移和绝对加速度沿楼层分布

表 3 地震响应结果

楼层	系统	EL Centro 波		Corinth 波		Kobe 波	
		层间位移 峰值/m	绝对加速度 峰值/(m/s ²)	层间位移 峰值/m	绝对加速度 峰值/(m/s ²)	层间位移 峰值/m	绝对加速度 峰值/(m/s ²)
隔震层	不设刚度	0.327 6	2.094 0	0.262 1	1.655 3	0.175 7	1.091 2
隔震层	设置 ENSD	0.139 4	1.092 2	0.136 9	0.934 3	0.113 3	0.725 8
顶层	不设负刚度	0.000 7	2.147 2	0.000 5	1.711 4	0.000 3	1.160 0
顶层	设置 ENSD	0.000 3	1.249 9	0.000 3	1.086 8	0.000 2	0.820 6

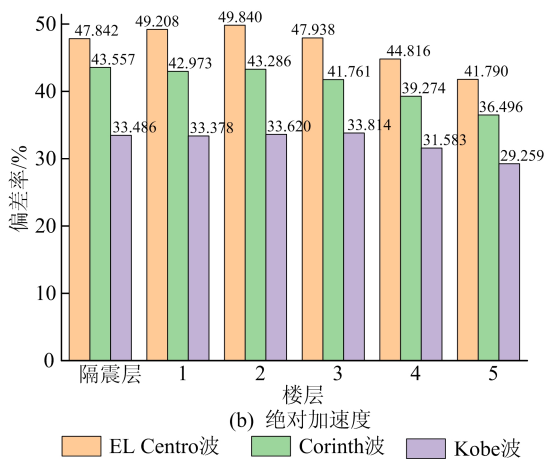
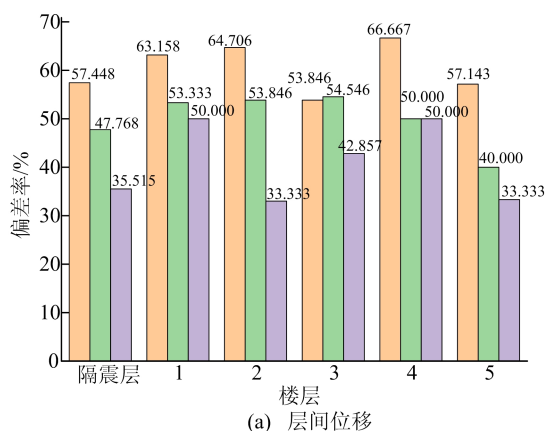


图 14 不同地震波下各楼层层间位移和绝对加速度偏差率

由表 3 可知:对于隔震层,EL Centro 波作用下层间位移峰值从 0.327 6 m 降至 0.139 4 m,降低 57.448%,绝对加速度峰值从 2.094 0 m/s² 降至 1.092 2 m/s²,降低 47.842%;类似地,在 Corinth 波和 Kobe 波作用下,层间位移峰值分别降低 47.768% 和 35.515%,绝对加速度峰值分别降低了 43.557% 和 33.486%。同时对上部结构的层间位移和绝对加速度响应控制效果也非常明显,各楼层层间位移峰值平均降幅达 55.120%,EL Centro 波作用下第 4 层层间位移峰值降幅最大,达到 66.667%;在绝对加速度峰值控制方面也有良好的效果,特别是在 EL Centro 波作用下,第 2 层绝对加速度峰值下降幅度达到 49.840%。因此,通过分析表明设置带阻尼 ENSD 装置对隔震结构的位移和加速度具有比较稳定的控制效果。

5 结 论

1) ENSD 的预压弹簧平行于地面对称布置,有效避免了传统负刚度装置中预压弹簧的竖向分力对隔震结构稳定性的影响。

2) 推导了新型椭圆形轨道负刚度装置的力-位移关系表达式,与传统负刚度装置相比,新装置

可以提供较宽范围的负刚度效应。

3) 该新型负刚度装置提供的负刚度主要受预压弹簧刚度、预压缩量、轨道短轴与长轴比值等参数的影响,应合理选择参数,避免出现正刚度或负刚度过大。

4) 推导了设置新型椭圆形轨道负刚度装置与不设负刚度装置的隔震结构位移和加速度频响函数,对比发现,在高频激励下设置负刚度装置会减小隔震结构的层间位移和加速度响应,但低频激励下会增大响应,设置带阻尼的新型椭圆形轨道负刚度装置不仅可以大幅降低位移和加速度频响函数峰值,而且在较宽的频段范围内隔震结构的位移和加速度响应也会降低。

5) 对实际地震作用下5层隔震结构地震响应进行了分析,设置带阻尼的新型椭圆形轨道负刚度装置对隔震层以及上部结构的层间位移峰值和绝对加速度峰值响应均有良好的控制效果,为提升隔震结构的安全性和抗震性能提供了有力支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 孙倩龙,何沛祥. 基于 Copula 函数的框支剪力墙基础隔震结构地震易损性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2025, 48(2): 267-273.
- [2] Li H, Li Y, Li J. Negative stiffness devices for vibration isolation applications: a review[J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(8): 1739-1755.
- [3] 纪晗,熊世树,袁涌. 基于负刚度原理的结构隔震效果分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 76-79.
- [4] 葛楠,陈海彬,王兴国,等. 并联负刚度装置体系隔震效果分析研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2023, 45(3): 83-90.
- [5] 孙彤,李宏男,赖志路,等. 采用轨道式负刚度装置的结构减震控制研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(3): 449-456.
- [6] Sarlis A A, Pasala D R, Constantinou M C, et al. Negative stiffness device for seismic protection of structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(7): 1124-1133.
- [7] 薛松领,常军. 负刚度隔振器的效果研究[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(3): 95-98.
- [8] 庄鹏,杨佳宁,张国伟. 利用负刚度磁流变阻尼器的单层球面网壳三维隔震研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(20): 172-182, 220.
- [9] Walsh K K, Boso E, Steinberg E P, et al. Variable negative stiffness device for seismic protection of building structures through apparent weakening[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2018, 144(9): 04018090.
- [10] Wang M, Sun F, Jin H. Performance evaluation of existing isolated buildings with supplemental passive pseudo-negative stiffness devices[J]. Engineering Structures, 2018, 177: 30-46.
- [11] 朱亮,周涛,吴乙万,等. 正负刚度并联隔振系统建模与性能分析[J]. 噪声与振动控制, 2022(5): 268-273.
- [12] Attary N, Symans M, Nagarajaiah S. Development of a rotation-based negative stiffness device for seismic protection of structures[J]. Journal of Vibration and Control, 2017, 23(5): 853-867.
- [13] 夏修身,陆兆文,钟亚伟,等. 基于负刚度装置的超长联大跨连续梁桥地震反应控制研究[J]. 地震工程学报, 2024, 46(1): 10-15.
- [14] Chen P, Wang B, Dai K, et al. Analytical and numerical investigations of base isolation system with negative stiffness devices[J]. Engineering Structures, 2022, 268: 114799.
- [15] Zhu H P, Tang Z A, Luo H. Feasibility analyses of negative-stiffness dampers for seismic performance enhancement of a base-isolated liquid storage tank[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 164: 107575.
- [16] 黄潇,刘方玲,胡志祥,等. 设置负刚度装置的基础隔震结构动力特性和地震响应研究[J]. 地震工程学报, 2024, 46(5): 1021-1031, 1083.
- [17] Shao C, Cao S. Test and development of SMA-based negative stiffness isolation device[J]. Advances in Structural Engineering, 2022, 25(12): 2483-2495.
- [18] Pasala D T R, Sarlis A A, Nagarajaiah S, et al. Negative stiffness device for seismic protection of MDOF yielding fixed base structures: experimental and analytical study[J]. Earthquake Spectra, 2025, 41(1): 682-703.
- [19] 杨巧荣,冉茂来,何文福,等. 隔震结构基于阻尼负刚度装置的地震响应研究[J]. 振动工程学报, 2018, 31(6): 920-929.
- [20] 刘晶波,杜修力. 结构动力学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005: 118-119.
- [21] Bani-Hani K A, Sheban M A. Semi-active neuro-control for base-isolation system using magnetorheological (MR) dampers[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(9): 1119-1144.
- [22] Sarlis A A, Pasala D T R, Constantinou M C, et al. Negative stiffness device for seismic protection of structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(7): 1124-1133.

(责任编辑 吴 亮)