

基于负刚度碟簧装置的竖向隔震支座力学性能研究

庄鹏^{1,2,3}, 张鸿昌¹

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 大型多功能振动台实验室, 北京 100044;
3. 北京建筑大学 工程结构与新材料北京高等学校工程研究中心, 北京 100044)

摘要: 在竖向隔震中, 为同时满足高静态刚度和低动态刚度的需求, 提出一种基于预压碟簧的负刚度装置(disc spring negative stiffness device, DSNSD), 利用其与已有的预压弹簧装置(prepressed spring device, PSD)集成为拥有高静低动刚度的竖向隔震支座(PSD-DSNSD 隔震支座)。首先对 DSNSD 的构造与工作原理进行详述, 建立相应的力学模型, 再通过 Python 进行数值模拟, 考察上述碟簧装置的力学性能, 最后利用 Abaqus 建立 PSD-DSNSD 竖向隔震支座的有限元模型进行模拟。结果表明: 加入 DSNSD 后竖向隔震支座的隔震刚度显著降低, 验证了将 DSNSD 用于竖向隔震增效的可行性。说明 DSNSD 在启动后可提供负刚度, 从而有效减小整体装置的竖向刚度。

关键词: 竖向隔震; 碟簧负刚度装置; 预压弹簧装置; 力学性能; 数值模拟

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)04-0140-07

Mechanical Behaviors of Vertical Isolation Bearings Incorporating Disc Spring Negative Stiffness Devices

ZHUANG Peng^{1,2,3}, ZHANG Hongchang¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Multi-Functional Shaking Tables Laboratory, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

3. Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Structural Engineering and New Materials,
Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Three-dimensional (3D) isolation is one of the current research hotspots for the control of strong seismic behavior of structures. However, the contradiction between high static stiffness for load carrying and low dynamic stiffness for vertical isolation is a long-term unsolved issue in the development of 3D seismic isolation. Accordingly, a disc spring negative stiffness device (DSNSD) is proposed, which is combined with the previously developed prepressed spring device (PSD) to form a vertical isolation bearing with high-static-low-dynamic stiffness. The configuration and working principle of the DSNSD are described in detail, and the corresponding mechanical model is established. Python-based numerical simulations are conducted to investigate the mechanical properties of the DSNSD. A PSD-DSNSD vertical isolation bearing is modeled using ABAQUS to validate the feasibility of using DSNSD to improve vertical isolation effects. The results show that the DSNSD provide the anticipated negative stiffness in vertical isolation after activation, which is used to effectively reduce the vertical stiffness of the entire isolation device.

Keywords: vertical isolation; disc spring negative stiffness device; prepressed spring device; mechanical behavior; numerical simulation

隔震技术经过多年的发展, 在各类工程中得到广泛应用, 其中隔震支座成为最有效的实现途径

收稿日期: 2024-04-17

修稿日期: 2024-05-21

基金项目: 北京建筑大学大型多功能振动台阵列实验室开放研究专项基金(2022MFSTL12); 北京市自然科学基金资助项目(8182016)

作者简介: 庄鹏(1976—), 男, 博士, 副教授, 硕导, 主要从事大跨空间结构减隔震研究工作。E-mail: zhuangpeng@bucea.edu.cn

通讯作者: 张鸿昌(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为大跨空间结构减隔震。E-mail: zhanghongchang2021@163.com

之一。橡胶隔震支座^[1]和摩擦摆隔震支座^[2]是常用的隔震装置。在此基础上,科研人员研制了很多改进型水平隔震装置,如 SMA-橡胶复合隔震支座^[3]、抗拔型 FPB^[4]、自适应隔震支座^[5]。地震包含水平和竖向地震分量,竖向地震对结构的影响不可忽视。已有的隔震支座大多仅在水平方向有效,在竖向近似为刚体,因而无法发挥竖向隔震作用。因此,竖向隔震支座的研究受到广泛关注^[6-8]。

有效的竖向隔震支座不但需要具备充足的静态承载力,还需拥有适当的竖向柔性以确保竖向隔震效果。陈兆涛等^[9]提出了一种基于组合液压油缸的竖向隔震支座,其可提供承载和隔震所需的多阶段刚度。但是,该液压装置能否长期负载有待进一步评价。近年来,负刚度装置的发展为工程结构隔震增效提供了新途径。纪晗等^[10]采用负刚度装置改善水平隔震效果。杨巧荣等^[11]提出了一种用于控制强震下隔震层变形的附带阻尼水平向负刚度装置。何文福等^[12]设计了含有负刚度装置的倾斜橡胶支座。刘涛等^[5]基于负刚度理论提出了一种自适应刚度隔震装置。目前,利用负刚度装置调整隔震装置动态刚度的研究主要集中于结构水平隔震,其对结构竖向隔震系统的增效研究甚为少见。

利用碟形弹簧提出一种负刚度装置(disc spring negative stiffness device, DSNSD),并将其与已有的预压弹簧装置(pre-pressed spring device, PSD)^[13]并联,构成用于协调静力承载和竖向隔震的复合隔震支座(PSD-DSNSD 隔震支座)。文中对 DSNSD 的构造、控制机理以及与 PSD 的协同工作机制进行介绍,并根据弹簧设计理论,建立负刚度装置的力学模型,利用 Abaqus 软件,建立 PSD-DSNSD 隔震支座有限元模型,并验证加入 DSNSD 后减小竖向隔震刚度的有效性。

1 PSD-DSNSD 的构造和工作原理

1.1 PSD 的构造与工作原理

PSD 是一种近年提出的正刚度竖向隔震装置,其主要部件与组装过程如图 1 所示^[13]。图 2 所示为 PSD 在竖向荷载作用下的工作原理。由图 2 可见,当竖向荷载未抵消预压力时,PSD 中的弹簧未被进一步压缩,此时,外部竖向荷载通过连接轴、顶板传递至底部套筒,在上述荷载传递路径中的钢制部件所提供的抗压刚度可视为 PSD 的初始刚度,其远高于弹簧自身的刚度,其用于竖向隔震;当竖向荷载超过已施加的预压力时,PSD 的竖向刚度体现为弹

簧自身的刚度;随着外荷载的持续增加,PSD 的弹簧被逐步压平,相应的竖向刚度为弹簧各环的接触后呈现的硬化刚度。综上,PSD 可提供三阶段刚度,且三者再加卸载阶段相同。PSD 的工作原理示意图如图 3 所示。图 3 中的折线(OABC)为 PSD 的加载路径,其中,OA、AB 和 BC 分别对应于阶段 I、阶段 II 和阶段 III,上述三个线段的斜率依次为初始刚度(K_i)、隔震刚度(K_p)和硬化刚度(K_r)。在三个阶段中,阶段 II 是 PSD 发挥竖向隔震功能的阶段,在这一阶段,根据转折点坐标和静力平衡位置坐标(图 3 中 S 点的坐标),可得到 PSD 在正向和负向的位移能力分别为 L_1 和 L_2 。PSD 的上述力学性能已得到了往复加载试验和有限元模拟结果的验证^[14]。需要说明的是,通过合理设计,通过 PSD 中的预压力抵消大部分上部结构施加的重力荷载,在此基础上,PSD 仅需付出较小的挠度即可达到静力平衡状态。

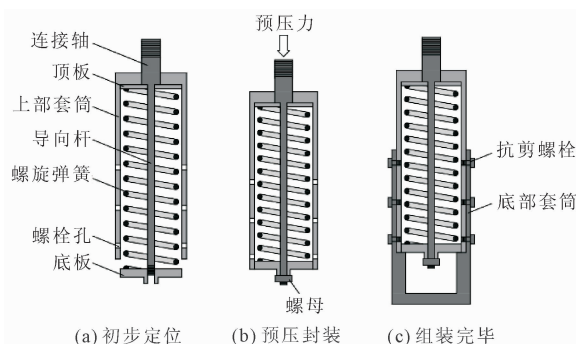


图 1 PSD 组装示意图

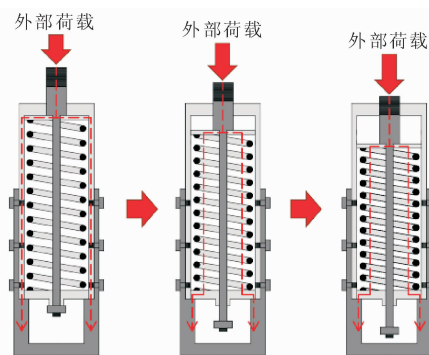


图 2 PSD 工作原理示意图

1.2 DSNSD 的构造与工作原理

DSNSD 由碟簧组、导向轴、套筒、底座、耳板及螺栓螺母组成,将上述部件初步定位后,施加预压闭合连接板与套筒顶板,对准二者的螺孔,通过螺栓固定顶板与套筒。相关构造示意图如图 4 所示。以 2 个平置的 DSNSD 为例,说明其工作原理,相应的示意图如图 5 所示。卸除螺栓后,此时水平向碟簧组

的预压力相互平衡, 竖直方向上无作用力; 当上部结构带动 DSNSD 向下倾斜, 两耳板轴心间距变大, 碟簧组伸长, 外部套筒与碟簧导向杆上的平板分离, 碟簧组的预压力产生竖直向下的分力; 当上部结构带动 DSNSD 回到水平位置, 碟簧组恢复至初始长度, 整个装置的状态与初始位置一致。同理可知, 上部结构向上运动时 DSNSD 能够提供类似的负刚度特性。值得说明的是, 整个运动过程中, 碟簧组始终保持被压缩状态。

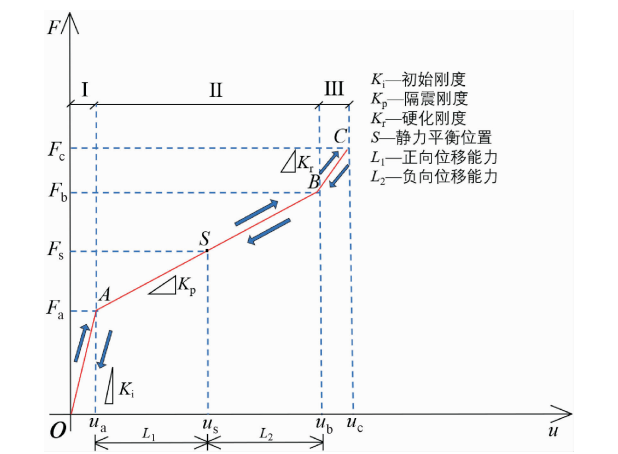


图 3 PSD 的工作原理示意图

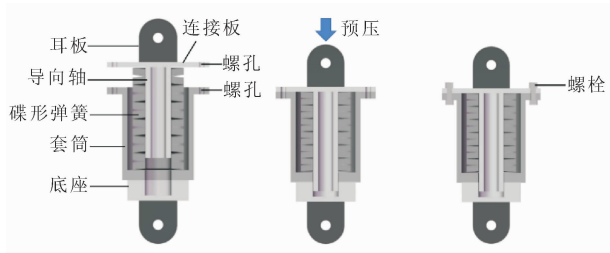


图 4 DSNSD 构造示意图

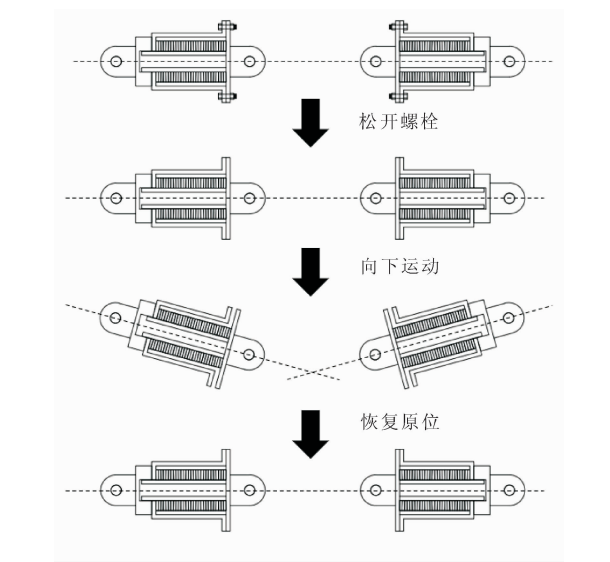


图 5 DSNSD 工作原理

1.3 DSNSD 与 PSD 的协同工作原理

根据前文所述可知, PSD 利用其预压力支承上部结构自重, 但是, 该装置仍然依靠同一刚度 (K_p) 发挥静力承载和竖向隔震的双重功能, 尚不具备高静低动刚度。若一味降低 PSD 中的弹簧刚度虽然有助于增加竖向柔性, 但不利于竖向承载, 同时, 单纯增加 PSD 自身的刚度则可能出现弹簧过长导致的稳定问题。鉴于此, 将具备正刚度的 PSD 与动态下呈现负刚度状态的 DSNSD 复合, 为竖向隔震支座赋予高静低动刚度, 从而改善其综合性能。

在工程结构中, 将多个同规格 DSNSD 水平布置在由 PSD 和黏滞阻尼器组成的竖向隔震装置中, 其构造示意图如图 6 所示。需要说明的是, 在静力平衡状态下将 DSNSD 通过相关部件 (中轴、连接板) 与 PSD 连接, 因此, DSNSD 不影响 PSD 的静力承载性能, 仅在动力状态下提供沿竖向的负刚度, 用于部分抵消 PSD 提供的正刚度。可见, 将 PSD 和 DSNSD 集成后, 由 PSD 发挥静力承载功能, 相应呈现较高的静态刚度, DSNSD 可在动态下发挥增效性能, 同时以黏滞阻尼器实施竖向耗能控制, 避免出现增设负刚度元件导致的过大的竖向支座位移。集成 PSD 和 DSNSD 后, 以静力平衡位置作为隔震阶段的起始位置的恢复力-位移曲线示意图如图 7 所示。可见, DSNSD 参与工作后, 整体装置在动力状态下的竖向刚度下降, 具有提升竖向隔震效果的潜力。另外, 上述示意图仅用于体现 DSNSD 在降低竖向隔震支座动态刚度时发挥的功效, 未纳入碟簧之间的摩擦形成的滞回耗能。

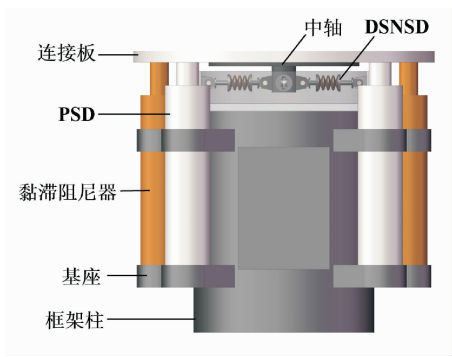


图 6 竖向隔震支座示意图

2 DSNSD 的力学性能

2.1 力学模型

依据碟形弹簧规范^[15], 单个无支承面碟簧的荷载与变形关系为:

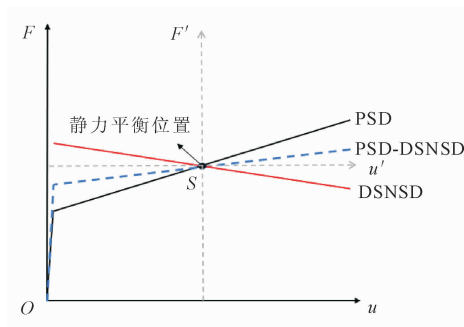


图 7 PSD-DSNSD 的恢复力-位移关系示意图

$$f_s = \frac{4E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t^4}{K_1 D^2} \cdot \frac{\delta}{t} \cdot \left[\left(\frac{h_0}{t} - \frac{\delta}{t} \right) \left(\frac{h_0}{t} - \frac{\delta}{2t} \right) + 1 \right] \quad (1)$$

式中: f_s 为荷载; E 为弹性模量; μ 为泊松比; t 为碟形弹簧厚度; D 为碟形弹簧外径; h_0 为碟形弹簧压平时变形量; δ 为单个碟簧的变形量; K_1 和 C 为中间变量, 表达式如下:

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\left[\frac{C-1}{C} \right]^2}{\left(\frac{C+1}{C-1} \right) - \frac{2}{\ln C}} \quad (2)$$

$$C = \frac{D}{d} \quad (3)$$

式中: d 为碟形弹簧内径。

当碟簧组由多个相向同规格的碟形弹簧对合组合时, 碟簧组的合力^[17] 为:

$$F_s = f_s \quad (4)$$

$$\delta_1 = i \cdot \delta \quad (5)$$

式中: F_s 为碟簧组的合力; δ_1 为对合碟簧组的变形量; i 为对合数量。

当碟簧组由多个同方向、同规格的碟形弹簧叠合组合时, 碟簧组的合力^[15] 为:

$$F_s = n \cdot f_s \quad (6)$$

$$\delta_2 = \delta \quad (7)$$

式中: n 为叠合数量; δ_2 为叠合碟簧组的变形量。

当碟簧组为 i 个碟形弹簧对合、 m 个碟形弹簧叠合的复合组合时, 碟簧组的合力^[17] 为:

$$F_s = m \cdot f_s \quad (8)$$

$$\delta_3 = i \cdot \delta \quad (9)$$

式中: δ_3 为复合碟簧组的变形量。

2.2 理论分析

在进行力学分析时, 如图 6 所示的中轴与上部连接板可视为一体。假设两个碟簧组的自由长度均为 l_0 , 在安装前, 将每个碟簧组从 l_0 压缩至 l_1 , 之后将二者端部相连并水平布置, 如图 8 所示。当碟簧组

端部在竖向运动时(由图 8 中的 O 点竖向运动至 A 点), 弹簧组整个过程始终处于压缩状态。例如, 当上部结构向下移动位移 u 到 A 点时, 碟簧组长度变为 $\sqrt{l_1^2 + u^2}$ 。在水平方向上, 由于装置的对称性, 两个碟簧组的水平分力相互平衡, 两个碟簧组在竖直方向的合力为:

$$F_D = -a \cdot F_s \cdot \frac{u}{\sqrt{l_1^2 + u^2}} \quad (10)$$

$$q = l_0 - \sqrt{l_1^2 + u^2} \quad (11)$$

式中: F_D 为 DSNSD 提供的竖向力; a 为碟簧组数量; u 为竖向位移; q 为预压碟簧组释放的变形量。

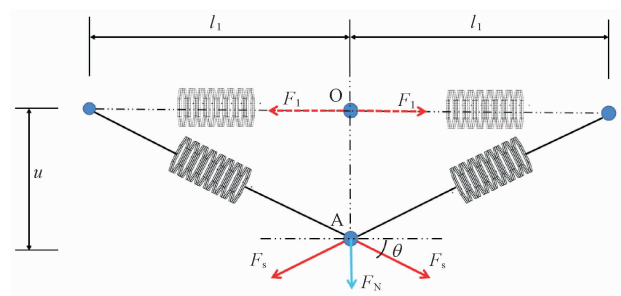


图 8 简化分析示意图

基于图 8 所示的计算简图, 利用 Python 编制电算程序。每个 DSNSD 均含有 16 片对合的碟簧, 弹簧材料为 60Si2MnA (屈服强度为 1 375 MPa, 弹性模量为 2.06×10^5 MPa, 泊松比为 0.3)。根据碟形弹簧设计方法^[15], 考虑摩擦影响后的碟簧组轴力可表达为:

$$N_f = F_s \frac{n}{1 \pm c_f} \quad (12)$$

式中: N_f 为考虑摩擦后碟簧组的合力; c_f 为碟簧承载边缘处的摩擦系数。

选取 A 系列碟簧, 单个碟簧的主要几何参数为外径 (D)、内径 (d)、厚度 (t)、自由高度 (H_0)、压平高度 (h_0), 其取值见表 1。对含有上述碟簧的 DSNSD 预压 26.4 mm ($0.75h_0$), 碟簧边缘处的摩擦系数取 0.04^[15]。继而, 对水平布置的两个 DSNSD 施加幅值为 50 mm 的竖向往复位移。由此得到 DSNSD 的恢复力-位移曲线如图 9 所示, 可以看出在 ± 30 mm 范围内, DSNSD 可提供具有负刚度状态的恢复力-位移关系曲线。

表 1 碟形弹簧规格

单位: mm

外径 D	内径 d	厚度 t	自由高度 H_0	压平高度 h_0
100	51	6	8.2	2.2

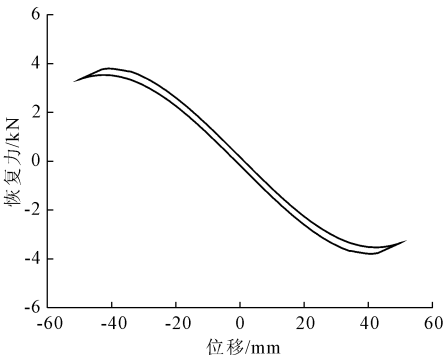


图9 DSNSD 的模拟恢复力-位移曲线

3 DSNSD 的有限元模拟

参考邢估慧等^[16]的研究,利用 Abaqus 进行 DSNSD 的有限元建模和分析。进行有限元模拟时,对图 4 所示的 DSNSD 进行适当简化。此时,单个 DSNSD 含有带有挡板的导向杆、可穿过导向杆的带孔盖板以及碟簧组。由 4 个同规格的 DSNSD 构成组合 DSNSD,每个 DSNSD 采用表 1 所示的碟形弹簧,将 3 个碟簧叠合形成单个叠合碟簧,再对合 4 个叠合碟簧,从而形成复合碟簧组。导向杆直径和长度分别为 50 mm 和 200 mm,盖板与挡板尺寸相同,二者的内径和外径分别为 50 mm 和 120 mm。碟形弹簧材料为 60Si2MnA 钢材(屈服强度为 1 375 MPa),其它部件材料为 Q355B 钢材(屈服强度为 345 MPa),两种钢材的弹性模量和泊松比分别为 206 GPa 和 0.3。通过设定接触面来模拟碟簧之间的相互作用,在切向和法向分别使用罚函数和硬接触。同时,设置了碟簧与盖板以及碟簧与导向杆的接触作用。将碟簧的内径和外径耦合至碟簧的几何中心处,以确保复合碟簧在轴向均匀地传递荷载。采用 S4R 单元建立上述组合 DSNSD 的有限元模型,如图 10 所示。单个 DSNSD 网格划分如图 11 所示。

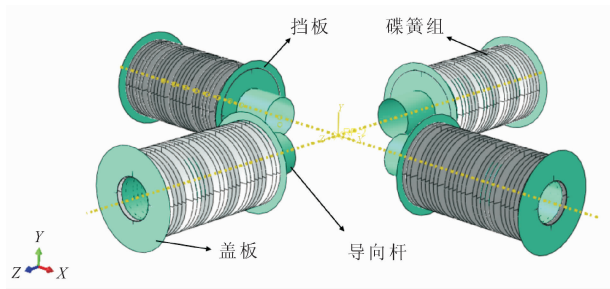


图 10 组合 DSNSD 有限元模型

分析过程包括三个步骤,在步骤 1 对碟簧组施

加 12 mm 的预压,在步骤 2 进行荷载的传递,在步骤 3 开展竖向往复加载(位移幅值分别为 5 mm、10 mm、20 mm 和 30 mm)。在不同位移幅值下,组合 DSNSD 的竖向恢复力-位移曲线如图 12 所示。可以看出,组合 DSNSD 可提供带有负刚度的滞回曲线,负刚度值在运动过程中较为稳定,但曲线形状并非完全对称,对应于上述位移幅值的负刚度分别为 1 488.67 N/mm、1 470.42 N/mm、1 497.2 N/mm、1 571.53 N/mm。结合 DSNSD 的力学模型,在 Python 平台对上述组合 DSNSD 进行理论分析。有限元模拟结果与理论分析结果的对比如图 13 所示。可以看出,二者竖向恢复力-位移曲线吻合良好,说明基于所建立的有限元模拟方法可用于组合 DSNSD 的性能预测。



图 11 单个 DSNSD 的网格划分

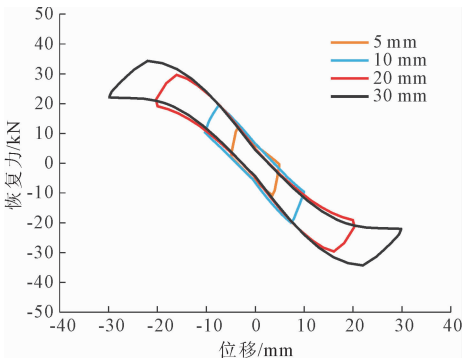


图 12 不同位移赋值下组合 DSNSD 的模拟结果

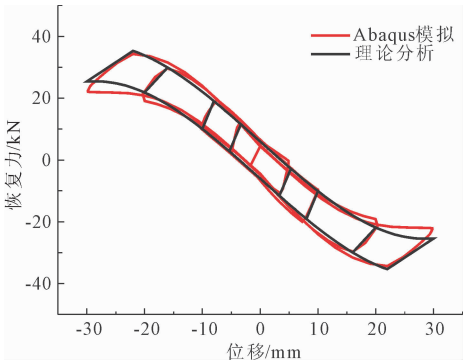


图 13 有限元模拟结果与理论分析结果的对比

4 含有 DSNSD 的竖向隔震支座有限元模拟

在 DSNSD 有限元模拟的基础上,进一步通过数值模拟考察将其用于降低竖向隔震装置动态刚度的可行性。对 4 个并联 PSD 已开展了往复加载试验研究^[14],假设将用于该试验的试件与图 10 所示的 DSNSD 并联,形成含有负刚度元件的竖向隔震支座。为提高计算效率,采用 1 个 PSD 与 1 个 DSNSD 并联的 1/4 简化有限元模型进行模拟,如图 14 所示。PSD 中的螺旋弹簧采用 60Si2MnA 钢材制作,弹簧中径、簧杆直径和自由长度分别为 200 mm、51 mm 和 571 mm。单个 PSD 的预压力分别为 0 kN、10 kN、20 kN、30 kN 以及 40 kN。在每种预压工况下,基于 Abaqus 模拟 PSD 的恢复力-位移曲线^[14],进而,模拟 PSD-DSNSD 的恢复力-位移曲线。全部工况下的模拟结果如图 15 所示。五种工况下,DSNSD 的隔震刚度分别为 3 351. 14 kN/mm、3 337. 82 N/mm、3 414. 63. 49 N/mm、3 273. 03 N/mm 以及 3 321. 53 N/mm。相较于 PSD 的刚度分别减少了 31. 47%、30. 57%、31. 03%、30. 25%、32. 51%。可见,加入 DSNSD 后的竖向隔震支座刚度明显减小,同时可提供摩擦耗能。

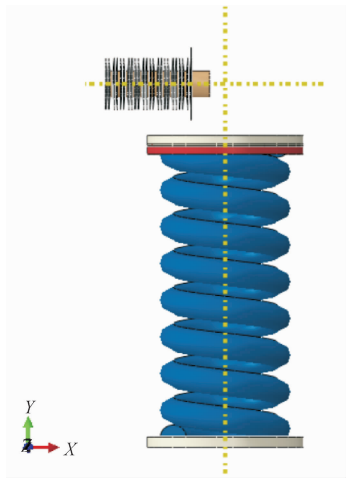


图 14 PSD-DSNSD 的简化有限元模型

5 结 论

- (1) 基于已有的 PSD,提出了在其中引入 DSNSD 实现高静低动刚度的竖向隔震策略。建立了 DSNSD 的力学模型,为后续研究奠定了理论基础。
- (2) 在 Abaqus 环境下,提出了 DSNSD 有限元模拟方法,通过算例检验了该模拟方法的可行性。

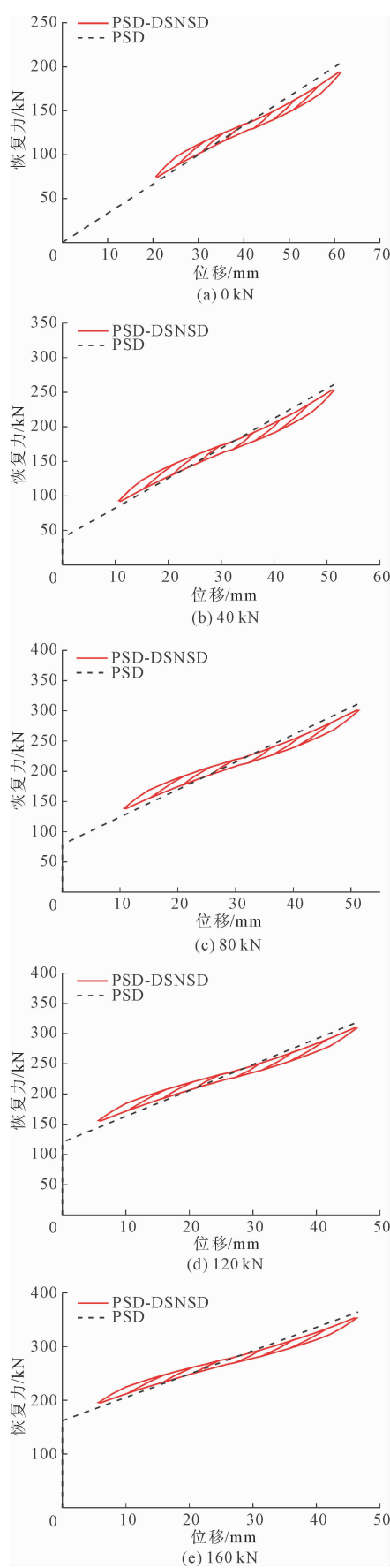


图 15 PSD-DSNSD 和 PSD 的模拟结果对比

(3) 分别开展了 PSD-DSNSD 和 PSD 的有限元模拟,数值结果显示,加入 DSNSD 后隔震支座的竖向刚度降低了 30.25%~32.51%,可见该负刚度装置发挥了预先设定的作用。

参考文献:

- [1] 赵 灿,康 钊,江 洋,等.北京化工大学高精尖创新中心隔震设计[J]. 建筑结构,2018,48(20):43-48.
- [2] 束伟农,朱忠义,祁 跃,等.北京新机场航站楼结构设计研究[J]. 建筑结构,2016,46(17):1-7.
- [3] 薛素铎,周 乾.SMA-橡胶复合支座在空间网壳结构中的隔震研究[J]. 北京工业大学学报,2004,30(2):176-179.
- [4] 王秀丽,彭和平,李晓东.设置抗拔型三重摩擦摆隔震支座框架结构地震响应分析[J]. 防灾减灾工程学报,2014,34(2):129-135.
- [5] 刘 涛,张 强,刘文光,等.新型自适应变刚度隔震装置的力学模型和地震响应分析[J]. 振动与冲击,2021,40(7):53-61,74.
- [6] 赵亚敏,苏经宇,周锡元,等.碟形弹簧竖向隔震结构振动台试验及数值模拟研究[J]. 建筑结构学报,2008,29(6):99-106.
- [7] 庄 鹏,薛素铎.基于 SMA-橡胶支座和碟形弹簧的球面网壳结构多维隔震[J]. 建筑科学,2012,28(1):16-21.
- [8] 薛素铎,常海林,李雄彦,等.抗拔型三维隔震支座位学性能研究[J]. 建筑结构,2022,52(5):81-87.
- [9] 陈兆涛,丁 阳,石运东,等.大跨空间结构竖向变刚度三维隔震装置及其隔震性能研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(10):35-42.
- [10] 纪 晗,熊世树,袁 涌,等.基于负刚度原理的结构减震效果理论分析[J]. 振动与冲击,2010,29(3):91-94,206.
- [11] 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.
- [12] 何文福,柳梦宇,许 浩,等.高静低动刚度型三维隔震系统的力学性能和地震响应研究[J]. 土木工程学报,2020,53(9):41-51.
- [13] Zhuang Peng, Wei Luyao, Wang Wei, et al. Feasibility evaluation of pre-pressed spring devices for vertical isolation of single-layer spherical lattice shell structures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022,158:107308.
- [14] Zhuang Peng, Zhao Wenxuan, Yang T Y. Seismic protection of a single-layer spherical lattice shell structure using a separated three-dimensional isolation system [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023,172:108026.
- [15] 碟形弹簧:GB/T 1972—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [16] 邢佑慧,黄 河,张家云,等.碟形弹簧力学性能研究[J]. 振动与冲击,2015,34(22):167-172.

(上接第 126 页)

- [8] 赵慧子,梁正召,刘祥鑫.三点弯曲试验条件下的岩石声发射演化特征[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(2):6-12.
- [9] 张玉良,吴必胜,赵高峰.基于声发射监测的岩石热损伤实时演化研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2945-2958.
- [10] 范 杰,朱 星,胡桔维,等.基于 3D-DIC 的砂岩裂纹扩展及损伤监测试验研究[J]. 岩土力学,2022,43(4):1009-1019.
- [11] 吴秋红,夏宇浩,赵延林,等.基于 DIC 及 CPG 技术的热冷循环后花岗岩 I 型断裂特性研究[J/OL]. 煤炭学报:1-18[2024-05-24]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0974>.
- [12] Todd T P. Effect of cracks on elastic properties of low porosity rocks[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1973.
- [13] Browning J, Meredith P, Gudmundsson A. Cooling-dominated cracking in thermally stressed volcanic rocks [J]. Geophysical Research Letters, 2016,43(16):8417-8425.
- [14] Griffiths L, Lengliné O, Heap M J, et al. Thermal cracking in westerly granite monitored using direct wave velocity, coda wave interferometry, and acoustic emissions [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018,123(3):2246-2261.
- [15] Daoud A, Browning J, Meredith P G, et al. Microstructural controls on thermal crack damage and the presence of a temperature-memory effect during cyclic thermal stressing of rocks [J]. Geophysical Research Letters, 2020,47(19):e2020GL088693.
- [16] Glover P W J, Baud P, Darot M, et al. α/β phase transition in quartz monitored using acoustic emissions [J]. Geophysical Journal International, 1995,120(3):775-782.
- [17] 邵保平,吴阳春,王 帅,等.青海共和盆地花岗岩高温热损伤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(1):69-83.