DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.130

开放科学(资源服务)标识码 OSID:

无预紧力变摩擦惯容器的抗震性能数值模拟研究

刘伟[1a,1b,1c],马玉宏[1a,1b,1c],赵桂峰[1d],孔思华[1a,1b,1c],杨振宇[1a,1b,1c],陈家川[2],杨恒[1a,1b,1c]

(1.广州大学 a.工程抗震研究中心;b.广东省地震工程与应用技术重点实验室;c.工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室;d.土木与交通工程学院,广州 510006;2.湘中幼儿师范高等专科学校,湖南 邵阳 422000)

摘　要:在极罕遇地震作用下,结构水平位移急剧增大,对阻尼装置的能量耗散能力与可调阻尼性能提出了更高要求。传统摩擦阻尼器通常依赖预紧螺栓施加恒定预紧力,其摩擦力难以随地震强度自适应变化,限制了其在强震中的应用。为克服这一局限,提出了一种无预紧力变摩擦惯容器(Non-preload Variable Friction Inerter,NVFI),理论分析与拟静力试验已证实该装置具备无需预紧力、阻尼力自适应调节的优越特性。基于ABAQUS平台开发NVFI的用户单元,并构建VUEL-NVFI数值模型,通过与MATLAB数值解在简谐和地震荷载下的对比,验证所开发单元在模拟其特有的"蝴蝶形"滞回特性时具有高精度与稳定性;将该VUEL单元应用于10层钢筋混凝土框架三维模型,系统分析其在多级地震下的减震机理。结果表明:NVFI的阻尼力与耗能能力随地震动强度增强而自适应提升;在极罕遇的地震作用下,该体系仍能有效控制层间位移,最大减震率达56.05%,显著提升了结构的抗震性能;开发的VUEL单元为NVFI的工程化分析提供了可靠工具,其自适应减震机理在极罕遇地震作用下的结构抗倒塌设计中具有显著的实用价值和应用前景。

关键词:变摩擦惯容器;无预紧力;惯容效应;二次开发;抗震性能

中图分类号:TU352.1　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-12

Numerical simulation on the seismic performance of a non-preload variable friction inerter

LIU Wei[1a,1b,1c], *MA Yuhong*[1a,1b,1c], *ZHAO Guifeng*[1d], *KONG Sihua*[1a,1b,1c], *YANG Zhenyu*[1a,1b,1c], *CHEN Jiachuan*[2], *YANG Heng*[1a,1b,1c]

(1a. Earthquake Engineering Research & Test Center; 1b. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology; 1c. Key Laboratory of Earthquake Resistance, Earthquake Mitigation and Structural Safety, Ministry of Education; 1d. School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou 510006, Guangzhou University, P. R. China; 2. Xiangzhong Normal College For Preschool Education, Shaoyang 422000, Hunan, P. R. China)

收稿日期:2025-10-12

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3801201);国家自然科学基金(52378499、52478502、52308488);广东省自然科学基金(2024A1515012788)

作者简介:刘伟(1992-),男,博士生,主要从事工程结构减震控制研究,E-mail:liuwei@e.gzhu.edu.cn。

赵桂峰(通信作者),男,副教授,E-mail:zgfzth@gzhu.edu.cn。

Received: 2025-10-12

Foundation items: National Key Research and Development Program (No. 2022YFC3801201); National Natural Science Foundation of China (No. 52378499, 52478502, 52308488); Natural Science Foundation of Guangdong (No. 2024A1515012788)

Author brief: LIU Wei (1992-), PhD student, main research interest: seismic vibration control of engineering structures, E-mail: liuwei@e.gzhu.edu.cn.

ZHAO Guifeng (corresponding author), associate professor, E-mail: zgfzth@gzhu.edu.cn.

Abstract: The escalating horizontal displacements induced by extremely rare seismic events impose stringent demands on the energy dissipation capacity and adaptive performance of damping devices. Conventional friction dampers, however, typically rely on a constant preload applied via high-strength bolts. This mechanism inherently lacks adaptability, as the friction force cannot modulate with seismic intensity, thereby limiting the damper's efficacy during severe ground motions. To address this limitation, a Non-preload Variable Friction Inerter (NVFI) was previously proposed. Theoretical analysis and quasi-static experiments have confirmed its superior characteristics: it obviates the need for preload and facilitates adaptive damping force modulation. This study develops a robust numerical model for the NVFI by implementing a user-defined element (VUEL-NVFI) within the ABAQUS/Explicit platform. The fidelity and stability of the VUEL are rigorously validated against MATLAB numerical solutions under both harmonic and seismic loading, accurately capturing the device's characteristic "butterfly shape" hysteretic behavior. The validated VUEL is subsequently integrated into a high-fidelity, three-dimensional model of a 10-story reinforced concrete frame to systematically investigate its seismic mitigation mechanisms under multi-level earthquake intensities. Analyses demonstrate that the NVFI's damping force and energy dissipation capacity adaptively scale with increasing ground motion intensity. Critically, under extremely rare earthquake scenarios, the NVFI-equipped structure effectively controls inter-story drift, achieving a maximum reduction rate of 56.05% and significantly enhancing overall seismic performance. The VUEL element developed herein provides a reliable computational tool for the engineering analysis of NVFI systems. The device's adaptive mitigation mechanism demonstrates significant application potential for the collapse-prevention design of structures subjected to extreme seismic events.

Keywords: variable friction inerter; non-preload; inertial effect; secondary development; seismic performance

传统摩擦阻尼器因结构简单、可靠性高,在土木工程中得到广泛应用,特别是在建筑与桥梁领域[1-4]。然而,传统摩擦阻尼器的性能受限于恒定的预紧力。这种机制导致其缺乏自适应性,在强震作用下可能出现能量耗散不足,在中等地震强度下则可能引起过大的加速度响应[5]。此外,预紧力在循环载荷和摩擦磨损作用下的退化进一步加剧了上述问题,显著降低了传统阻尼器的长期可靠性[6]。

近年来,减震技术的研究主要集中在开发半主动与被动阻尼器,以应对上述挑战。半主动系统,如压电控制阻尼器[7]和磁流变装置[8-10],通过外部控制算法实时调节摩擦力,具备较强的适应能力。然而,该类系统依赖外部电源并需配备复杂的控制机制,因此,在可靠性与维护性方面存在一定局限性[11-12]。相比之下,包括多级摩擦阻尼器[12-14]及自复位机制[15-17]在内的被动控制装置,虽通过多级滑移实现性能调节,但仍受限于对预紧力的依赖,从而导致长期性能退化[18-19]。例如,D'Antimo等[6]研究表明,在长时间循环加载作用下,螺栓摩擦连接的预紧力可出现15%~20%的衰减,显著降低其阻尼效率。此外,近断层地震和极罕遇地震的频发性与破坏性不断引起工程界关注,对结构体系的减震设防能力提出了更为严苛的要求。雷虎军等[20]研究表明,近断层脉冲型地震的速度脉冲能显著放大结构的位移与加速度响应。宋维举等[21]研究表明,传统框架结构在此类地震作用下极易发生连续破坏甚至整体倒塌,其安全冗余严重不足。然而,部分新型耗能装置在应对极罕遇地震的大能量输入时,其耗能效率仍显不足[22]。因此,亟须发展具有高能量耗散能力和适应性强的新型减震装置,以提升结构在极端地震下的整体韧性与抗倒塌能力。

惯性放大技术因无需附加质量即可实现更优的振动控制而受到广泛关注,并被应用于调谐惯性质量阻尼器(Tuned Mass Damper Inerter,TMDI)及负刚度惯容器等系统[23-26]。这种系统通过将线性位移转换为旋转惯性,有效提升了阻尼器的能量耗散能力与频率适应性[27]。Jiang等[28]通过对比分析发现,TMDI的增强效应主要源于其"表观质量"提供的巨大惯性力,这证实了惯容器在减少传统TMD质量需求方面的显著优势。例如,Sugimura等[29]提出了一种调谐黏滞质量阻尼器(Tuned Viscous Mass Damper,TVMD),利用惯性质量放大机制,将实际质量为560 kg的装置等效放大至5400 t,从而显著增强了振动控制效果。惯容器特有的质量放大特性促进了多种减震器的发展,推动了包括调谐惯容阻尼器(Tuned Inerter Damper)[30]与调谐质量-惯容阻尼器(Tuned Mass Damper Inerter)[31-32]等多种增强型阻尼系统的创新。王鑫等[33]设计了一种颗粒阻尼惯容器,通过颗粒阻尼与惯容单元耦合实现多频带高效耗能。Xia等[34]提出了一种多层磁场旋

转电涡流惯性阻尼器(MMF-RECID)，利用滚珠丝杠实现了表观质量与电涡流阻尼力的倍增效应。这些研究充分表明惯容器在多级地震响应控制中具有广阔的应用前景。然而，上述惯容系统，如调谐黏滞质量阻尼器(TVMD)或调谐惯容阻尼器(TID)，其核心耗能机制通常是线性或非线性黏滞阻尼，阻尼力主要与速度相关，其参数通常针对特定频率进行调谐。如何将自适应摩擦调节机制与惯容减震器有效结合，仍是当前亟须解决的问题。

针对上述问题，笔者前期提出了一种无预紧力变摩擦惯容器(Non-Preload Variable Friction Inerter，NVFI)，主要集中在装置层面：包括提出了NVFI的概念与力学模型[35-36]，通过拟静力试验验证了该力学模型和“蝴蝶形”滞回特性的准确性[37]，并通过简化的单自由度(SDOF)体系数值模拟[35-38]，初步证实了其减震潜力。然而，前期的研究尚无法完全揭示NVFI在复杂多自由度(MDOF)结构体系中的实际工作性能、与结构高阶振形的相互作用以及在极限状态下的抗震性能。

为解决上述问题并推动NVFI技术的工程化应用，基于ABAQUS软件平台对NVFI进行二次开发，创建用户自定义单元(VUEL-NVFI)，并验证其数值实现的正确性与精度；将该数值模型应用于完整的三维框架结构，系统地研究其在设防、罕遇及极罕遇等多级地震作用下的减震性能与工作机理，以验证其在提升结构韧性和抗倒塌能力方面的实际效能。

1　NVFI的工作机理与力学模型

1.1　NVFI的工作原理

无预紧力变摩擦惯容器(NVFI)是在前期研究中提出的一种新型被动消能装置。主要由圆环形钢板、滚珠丝杠副、弹簧及摩擦片等关键部件构成，其结构如图1所示。其核心工作原理为：当外部荷载(如地震作用)驱动装置两端产生相对位移时，滚珠丝杠会将轴向平动转化为旋转运动，进而压缩弹簧。在此过程中，弹簧的恢复力实时调节摩擦片所受的正压力，从而实现摩擦力的动态自适应变化。同时，滚珠丝杠机构的传动效应不仅放大了摩擦力，也产生了显著的惯性放大效应，极大地增强了装置的能量耗散能力。通过变摩擦力、弹簧恢复力与惯容效应的协同作用，NVFI能够高效地将结构的振动能量高效转化为摩擦耗能。图2为其在往复荷载下的工作流程示意图。

1.2　NVFI的力学模型

根据文献[35]推导，NVFI的阻尼力可表示为

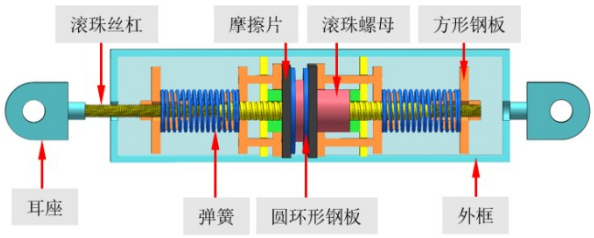


图1　NVFI示意图

Fig.1　NVFI diagram

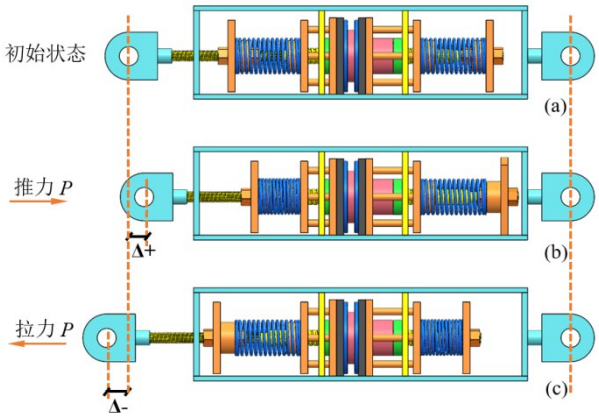


图2　NVFI的工作原理示意图

Fig.2　Schematic diagram of NVFI working principle

$$P = F_{\mathrm{d}}\,\mathrm{sgn}(\dot{x}) + m_{\mathrm{d}}\ddot{x} + k_{\mathrm{d}}x \tag{1a}$$

$$\alpha_{\mathrm{n}} = \frac{4}{3}\pi\frac{1}{\eta L_{\mathrm{d}}}\frac{r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2}{r_1 + r_2} \tag{1b}$$

$$m_{\mathrm{d}} = \alpha_{\mathrm{d}} \cdot m = \frac{2\pi^2\left(r_1^2 + r_2^2\right)}{\eta L_{\mathrm{d}}^2}m \tag{1c}$$

式中：F_{d}为随位移变化的放大摩擦力；m_{d}为惯性质量；α_{n}为摩擦力放大系数；k_{d}为弹簧刚度；μ为摩擦系数；η为传递效率；L_{d}为丝杠导程；m为圆环形钢板质量；r_1和r_2分别为圆环形钢板的内、外半径。x为水平位移；$\dot{x}$为速度；为$\ddot{x}$为加速度。$\mathrm{sgn}(\dot{x})$为符号函数，当$\dot{x}<=0$时，$\mathrm{sgn}(\dot{x})=-1$；当$\dot{x}>0$时，$\mathrm{sgn}(\dot{x})=1$；当$\dot{x}=0$，丝杠处于静止状态。

NVFI简化力学模型如图3所示。该装置的阻尼力可视为3个核心力学元件并联的并联。1)摩擦单元：此单元提供核心耗能机制，其摩擦力F_{d}由摩擦系数μ和正压力决定。根据其工作原理，正压力由弹簧压缩产生，而弹簧压缩量与装置轴向位移x相关。其中，α_{n}为滚珠丝杠传动几何关系的摩擦力放大系数。因此，摩擦力F_{d}表达为$F_{\mathrm{d}}=\mu\alpha_{\mathrm{n}}\cdot k_{\mathrm{d}}|x|$。2)弹簧单元：该单元代表装置中弹簧的线性弹性恢复力，表示为$k_{\mathrm{d}}x$。3)惯容单元：此项代表滚珠丝杠机构产生的惯性效应，通过将圆环形钢板质量m(半径r_1、r_2)的旋转惯量转化为等效的轴向平动惯性质量m_{d}，实现了表观质量放大效应，其表达式为$m_{\mathrm{d}}\ddot{x}$。

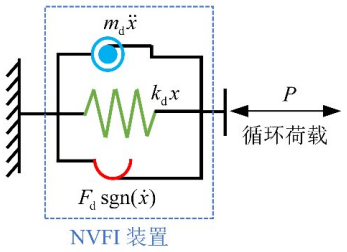


图 3 NVFI装置的简化力学模型

Fig. 3 Simplified mechanical model of the NVFI device

NVFI独特的“蝴蝶形”滞回特性如图4所示,其摩擦力的大小F_d与位移$|x|$成正比。当装置在第一象限($x>0,\dot{x}>0$)加载时,$P_f=F_d\mathrm{sgn}(\dot{x})=\mu\alpha_n k_d\cdot x$线性增加;当装置在第四象限($x>0,\dot{x}<0$)卸载时,速度反向,$\mathrm{sgn}(\dot{x})$变为-1,$P_f=F_d\mathrm{sgn}(\dot{x})=-\mu\alpha_n k_d\cdot x$瞬间跳变为负值。这种与位移成正比的变摩擦力在力-位移坐标系中,加载与卸载路径关于原点对称,从而形成典型的“蝴蝶形”滞回曲线,体现了其自适应耗能的力学特性。

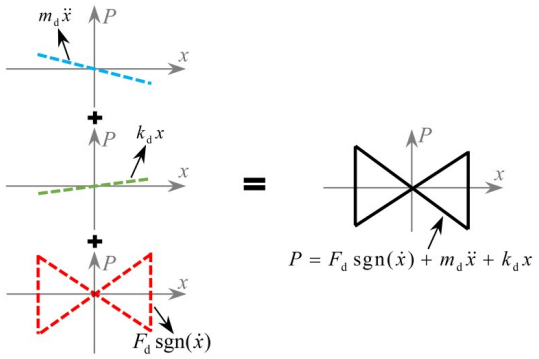


图 4 NVFI的恢复力模型

Fig. 4 Restoring force model of NVFI

NVFI的核心机制在于:在外部荷载(相对位移x)作用下,滚珠丝杠机构将轴向平动转换为旋转运动。这一旋转运动同时产生了两种效应。惯容效应($m_d\ddot{x}$):滚珠丝杠的旋转驱动圆环形钢板(质量m)发生转动,由于转动惯量的存在,该旋转运动在轴向产生了远超m的等效平动惯性质量m_d(见式1-c),即“表观质量放大”效应;变摩擦效应:在同一旋转运动发生时,丝杠机构通过转动(见图2)压缩弹簧k_d,弹簧恢复力作为正压力施加于摩擦片,因此产生的摩擦力与位移的绝对值成正比。综上所述,NVFI的“表观质量放大”和“自适应变摩擦”并非两个独立部件的叠加,而是同一滚珠丝杠机构产生两种效果的体现,两者在机械原理上实现了高度耦合。

1.3 试验验证

为验证前述力学模型的准确性,依据文献[35],对NVFI开展了拟静力加载试验,如图5所示。其中,圆环形钢板材质为不锈钢,摩擦片为非石棉摩擦材料,其摩擦系数$\mu=0.35$。图6对比了不同加载幅值下试验与理论的力-位移滞回曲线。试验结果呈现出稳定的“蝴蝶形”滞回特性,且与理论模型计算值吻合良好。具体而言,在20、40、60 mm加载幅值下,实测峰值阻尼力与理论值的相对误差分别为7.57%、1.20%、6.75%,均在可接受的范围内。

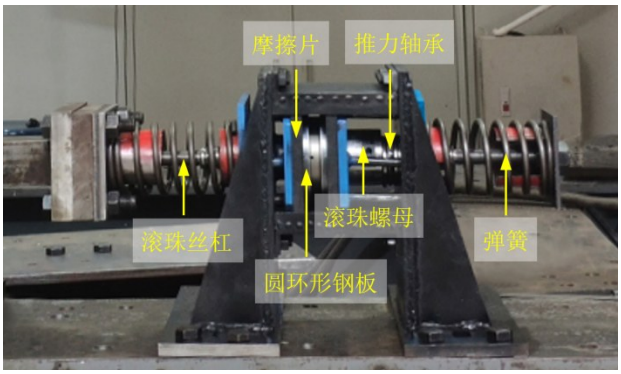


图 5 NVFI试验实物图

Fig. 5 Physical diagram of the NVFI test

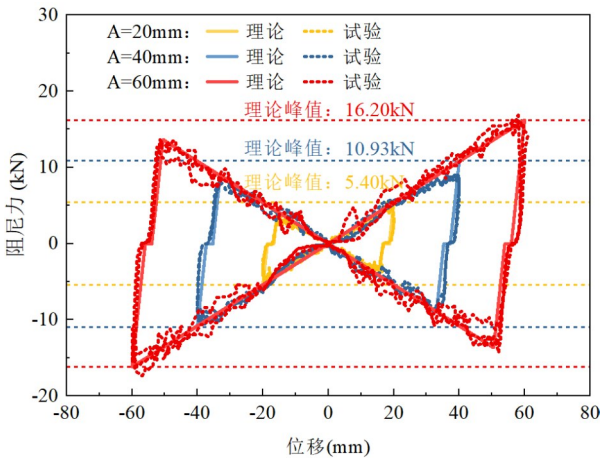


图 6 NVFI的力-位移滞回曲线

Fig. 6 Force-displacement hysteresis of the NVFI specimen

试验结果充分证实,所建立的力学模型能够准确反映NVFI的非线性滞回特性与变摩擦耗能规律,为后续数值模拟提供了可靠的理论基础。

2 基于ABAQUS的NVFI数值实现

2.1 VUEL用户单元的开发

2.1.1 坐标转换与单元定义

由于NVFI装置的模型耦合了多种复杂力学行为,通用的有限元分析软件中缺乏能直接模拟该行为的内置单元。因此,基于ABAQUS/Explicit显式动力分析模块的用户单元接口,采用FORTRAN语言开发了NVFI专用的用户自定义单元(VUEL)。为了将NVFI单元有效地集成到ABAQUS分析中,

将其简化为如图7所示的两节点空间直杆单元。该单元两端直接连接结构节点，每个节点包含3个平动自由度。

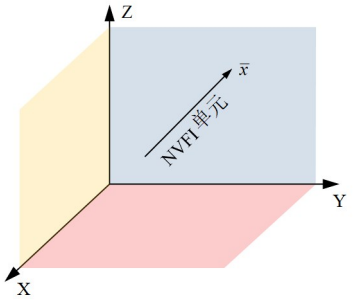


图7　NVFI空间直杆件单元

Fig. 7　NVFI Spatial Straight Bar Element

ABAQUS主程序传递给用户子程序的是节点在整体坐标系(XYZ)下的位移与速度信息，而NVFI的恢复力公式是基于沿单元轴向的局部坐标系定义的。因此，必须在子程序内部进行坐标转换，以实现局部量与整体量的正确映射。。

单元轴向方向$\bar{x}$在整体坐标系XYZ中的方向余弦为C_x、C_y、C_z。则单元两端节点的整体坐标位移向量$\boldsymbol{u}$与单元局部坐标下的轴向相对位移$\Delta\bar{u}$的转换关系可通过转换矩阵T实现。

$$T=\left[-C_x,-C_y,-C_z,C_x,C_y,C_z\right] \tag{2}$$

由此，单元的轴向相对位移$\Delta\bar{u}$、相对速度$\Delta\dot{\bar{u}}$和相对加速度$\Delta\ddot{\bar{u}}$可由式(3)求得。

$$\boldsymbol{\Delta\bar{u}}=T\boldsymbol{u} \tag{3a}$$

$$\boldsymbol{\Delta\dot{\bar{u}}}=T\boldsymbol{\dot{u}} \tag{3b}$$

$$\boldsymbol{\Delta\ddot{\bar{u}}}=T\boldsymbol{\ddot{u}} \tag{3c}$$

在子程序中计算出单元轴向内力后，再通过转置矩阵T^{T}将其转换回整体坐标系下的节点力，返回给ABAQUS主程序。

2.1.2　单元的数值实现策略与流程

NVFI恢复力公式$P=F_{\mathrm{d}}\,\mathrm{sgn}(\dot{x})+k_{\mathrm{d}}x+m_{\mathrm{d}}\ddot{x}$是一个耦合了惯性力、阻尼力和恢复力的复杂模型。若在VUEL子程序中直接实现该完整公式，将面临理论错误和计算不稳定的双重困境。该子程序的核心策略在于基于ABAQUS/Explicit求解框架的惯性-内力解耦。ABAQUS/Explicit求解器的核心动力学方程为$M\ddot{U}=F_{\mathrm{ext}}-F_{\mathrm{int}}$。该框架严格区分了由单元质量贡献的惯性力(体现在全局质量矩阵M中)和由单元变形贡献的内力(体现在全局内力向量F_{int}中)。解耦策略正是利用了这一框架，将式(1)的恢复力拆分为两个物理部分。

1)惯性力项($m_{\mathrm{d}}\ddot{x}$)的处理：$m_{\mathrm{d}}\ddot{x}$项在物理上是纯粹的惯性力，因此，将式(1c)定义的等效惯性质量m_{d}作为单元的物理质量。在VUEL子程序中，通过定义单元质量矩阵AMASS，该质量m_{d}会被ABAQUS主程序自动分配至两端节点，并直接融入全局质量矩阵M中。因此，惯性效应便由全局动力学方程$M\ddot{U}$的求解器直接、精确地处理。

2)非惯性力项($F_{\mathrm{d}}\,\mathrm{sgn}(\dot{x})+k_{\mathrm{d}}x$)的计算：$F_{\mathrm{d}}\,\mathrm{sgn}(\dot{x})+k_{\mathrm{d}}x$项是与单元相对速度$\dot{x}$和相对位移$x$相关的内力(即阻尼力与弹簧力)。在VUEL子程序内部，仅计算这部分内力F_{int}。根据式(1)，在子程序中计算当前时刻的$F_{\mathrm{d}}\,\mathrm{sgn}(\dot{x})+k_{\mathrm{d}}x$，并将其作为单元内力$p$(即$F_{\mathrm{int}}$)返回给主程序。

3)速度反向(sgn($\dot{x}$))的处理：针对sgn($\dot{x}$)在速度反向时的不连续性问题，在ABAQUS/Explicit的VUEL实现中，并未采用平滑函数处理。由于显式积分的时间增量步Δt极小，VUEL子程序在每个增量步开始时，均从主程序获取当前时刻的单元相对速度$\Delta\dot{\bar{u}}$。子程序通过直接判断$\Delta\dot{\bar{u}}$的正负号来确定sgn($\dot{x}$)的值(+1或-1)，并据此计算内力p。

这种解耦策略极大地简化了子程序的编写，并能稳定高效地在ABAQUS/Explicit的计算框架下运行。整个计算流程如图8所示，具体步骤如下：

步骤1：ABAQUS主程序根据上一增量步的内、外力差值，显式求解当前时刻的加速度、速度和位移，并将节点运动信息传递给VUEL子程序。

步骤2：VUEL子程序读取单元质量信息(m_{d})生成质量矩阵AMASS，并根据传入的相对位移和速度计算单元内力p(仅含变摩擦力和弹簧力)。

步骤3：子程序将AMASS和p返回给主程序。

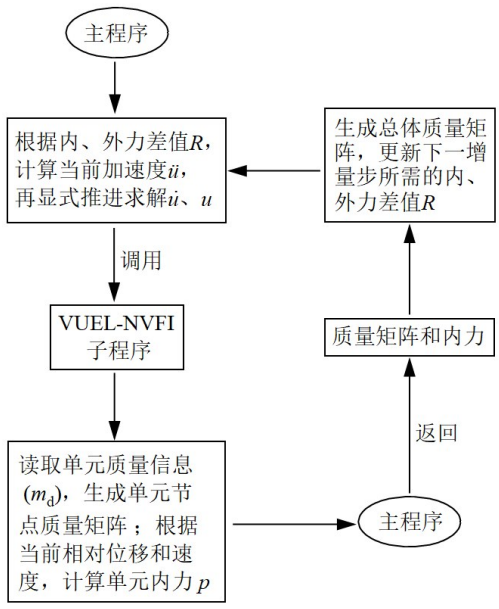


图8　VUEL编写流程

Fig. 8　VUEL Writing Process

步骤4:主程序汇总所有单元信息,更新系统的内、外力差值,为下一增量步的计算作准备。

2.2 VUEL-NVFI单元的数值验证

为系统性地检验VUEL-NVFI用户单元的数值精度与稳定性,构建了从简谐荷载到地震荷载的对比验证流程。所有验证均采用独立的MATLAB数值程序计算结果作为基准,并与ABAQUS中的VUEL-NVFI单元模拟结果进行对比分析。

2.2.1 简谐荷载作用下的验证

为验证VUEL单元模拟对NVFI核心非线性滞回特性的基本复现精度,对单元施加幅值为60 mm、频率为0.003 Hz的简谐荷载。数值模拟与试验实测滞回曲线的对比结果如图9所示。对比分析表明,ABAQUS和MATLAB计算的峰值力与试验实测值的误差分别为6.10%和4.57%,其单圈耗能误差分别为7.38%和8.61%。该结果证实,所开发的VUEL-NVFI单元能够精确复现NVFI装置实际的非线性力学特性与耗能行为。

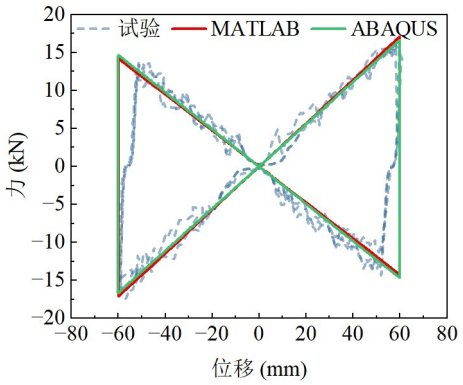


图9 简谐荷载作用下数值与试验的滞回曲线对比

Fig. 9 Comparison of numerical and experimental hysteretic curves under harmonic loading

2.2.2 地震作用下NVFI单元的验证

为了验证VUEL单元在动力荷载下的计算稳定性,建立了一个包含NVFI的单自由度(SDOF)验证模型,并选取典型的Erzincan近断层脉冲型地震波(PGA=0.4g)作为输入激励。SDOF体系的质量m=50 660 kg,刚度K=2 000 kN/m,阻尼比为0.05,结构基频为1.0 Hz,采用双线性弹塑性模型,屈服剪力为24 kN,对应屈服位移D_y=12 mm[39]。计算简图如图10所示,该模型中,结构由质量(MASS单元)、线性弹簧(SPRINGA单元)和线性阻尼器(DASHPOTA单元)并联组成。VUEL-NVFI单元被定义为一个两节点单元,其两端节点(节点1和节点2)分别与地面(固定端)和结构质量(自由端)相连。通过ABAQUS的节点自由度耦合机制,VUEL计算出的惯性力项($m_d\ddot{x}$)与内力项(F_d, $k_d x$)直接叠加作用于主结构,实现了装置与结构的动力耦合。

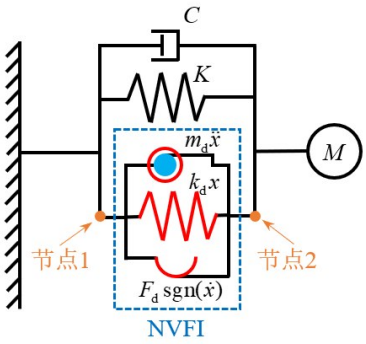


图10 SDOF体系计算模型示意图

Fig. 10 SDOF System Calculation Model

图11对比了两种方法计算的结构动力响应时程。结果显示,ABAQUS计算的加速度、速度和位移时程与MATLAB的计算结果几乎完全重合,准确地捕捉了体系在地震作用下的全过程响应。图12给出了无控SDOF与SDOF-NVFI在地震作用下的基底剪力-顶点侧移的滞回曲线。附加NVFI后,结构基底剪力和顶点侧移均显著减小,表明结构的地震响应得到有效控制,大部分输入能量被NVFI装置耗散。此外,图13为Erzincan近断层脉冲型地震作用下NVFI滞回曲线对比。结果表明,两种方法计算的滞回耗能形态与数值高度一致,峰值误差仅为1.7%,总耗能误差仅为7.95%。

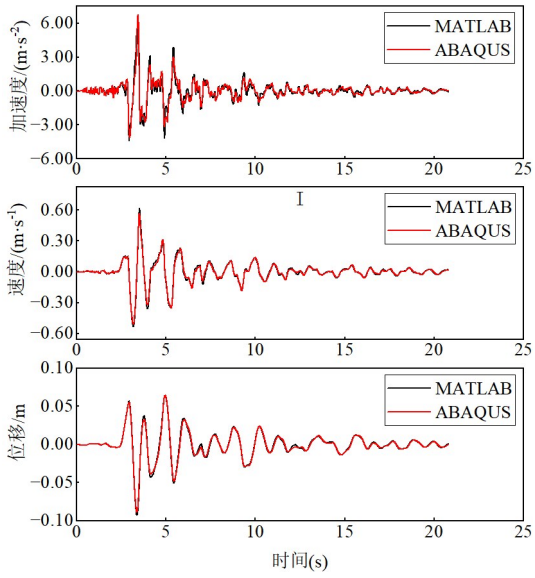
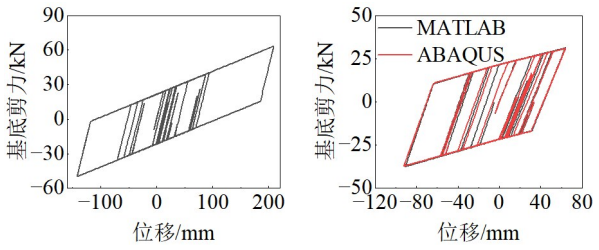


图11 结构反应时程曲线对比

Fig. 11 Comparison of structural time history curves

综上所述,从简谐荷载到地震荷载的系统性验证表明,开发的VUEL-NVFI用户单元具备高精度与高稳定性,可作为后续在复杂三维结构中开展抗震性能分析的可靠数值工具。



(a) SDOF　　(b) SDOF-NVFI

图 12　基底剪力-顶点侧移滞回曲线

Fig. 12　Base shear-top displacement hysteresis loops

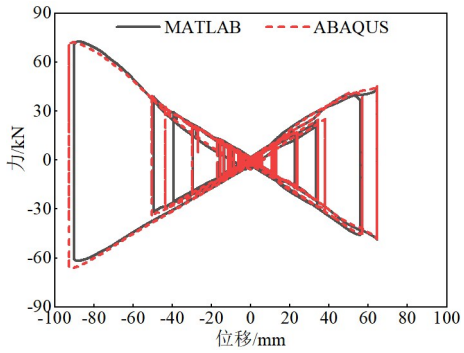


图 13　NVFI滞回曲线对比

Fig. 13　Comparison of NVFI hysteresis curves

3　NVFI减震体系的抗震性能分析

为了系统地评估VUEL-NVFI单元在复杂三维结构中的应用效果，并验证NVFI装置的实际减震性能，以10层钢筋混凝土框架结构为例，开展多级地震作用下的弹塑性时程分析。

3.1　工程概况

以一座10层普通钢筋混凝土框架结构为算例，抗震设防烈度为8度(0.2g)，设计地震分组为第二组，场地类别为Ⅱ类，特征周期T_g=0.4 s，层高均为3.9 m。梁柱和楼板的混凝土强度等级分别为C35和C30，受力钢筋采用HRB400。基于ABAQUS建立结构的三维有限元模型如图14所示，混凝土采用混凝土损伤塑性模型，钢筋采用双线性弹塑性本构。在网格划分上，混凝土梁、柱构件均采用C3D8R，钢筋采用T3D2，并通过Embedded Region约束全长嵌入混凝土实体单元中。NVFI装置通过VUEL用户单元进行模拟，在模型中被定义为两节点空间直杆单元(见图7)。为避免局部应力集中，VUEL单元两端通过参考点与上下层梁柱节点相连，支撑构件采用B31梁单元。

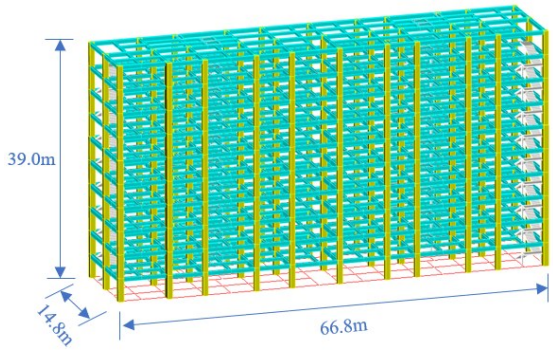


图 14　10层钢筋混凝土框架结构三维模型

Fig. 14　Three-dimensional model of 10-story reinforced concrete frame structure

3.2　地震波的选取

为了分析NVFI在近断层脉冲型极罕遇地震作用下的减震性能，选取3条典型近断层地震记录进行分析。所选地震波的特征参数如表1所示，其中场地剪切波速Vs30范围为260～510 m/s，断层距小于20 km，均属于典型的近断层强脉冲型地震动。

表 1　地震波记录参数

Table 1　Seismic wave record parameters

地震名称	地震波台站	断层距/km	Vs30/(m/s)	(PGV/PGA)/s
Duzce_Turkey	Duzce	0.0	281.86	0.16
Northridge-01	Rinaldi Receiving Sta	0.0	282.25	0.20
Chi-Chi	TCU107	15.99	409	0.31

3.3　NVFI减震装置设计与布置

为对该结构进行有效的减震控制，采用基于能量设计的方法来确定NVFI装置的参数与数量[40]。首先，将多自由度结构等效为单自由度体系，并利用经验公式估算其在设防地震下的总输入能E_I。然后，根据单个NVFI装置的能量耗散能力E_{NVFI}，计算所需的装置总数量。其设计目标是确保所配置的NVFI装置总耗能E_s足以耗散预期的地震输入能E_q(见表3)，具体流程如图15所示。

根据上述流程，计算得到了算例所需的NVFI数量与规格，具体参数详见表2、表3。装置的最终平面布置方案如图16、图17所示，遵循了“分散、均匀、对称”的原则。

根据计算结果，NVFI装置分别沿X、Y两个主轴方向布置，1～7层和8～10层平面布置如图16和图17所示。

为评估NVFI消能体系在不同地震强度下的减震效果，以层间位移角作为核心性能评价指标。依据《建筑抗震设计规范》[41]，定义从“基本完好”到“倒塌”的4个性能水准，其对应的层间位移角限值如表

表 2 NVFI参数

Table 2 Parameters of NVFI

装置规格	弹簧刚度/(kN/m)	圆环内径/m	圆环外径/m	丝杠螺距/m	圆环质量/kg	F_d/kN	E_{NVFI}/(kN·m)
NVFI1	2 000	0.4	0.6	0.02	20	1 000	79.88
NVFI2	1 000	0.4	0.6	0.02	20	500	40.47

表 3 NVFI装置耗能及数量

Table 3 Energy consumption and quantity of NVFI devices

方向	E_I/(kN·m)	E_q/(kN·m)	n_{NVFI1}	n_{NVFI2}	E_s/(kN·m)
X	5 491.82	5 491.82	60	20	5 602.20
Y	4 757.39	4 757.39	48	26	4 886.46

注:E_q为NVFI装置需要耗散的地震能量,E_s为NVFI实际耗能,n_{NVFI1}和n_{NVFI2}分别为两种规格装置所需数量。

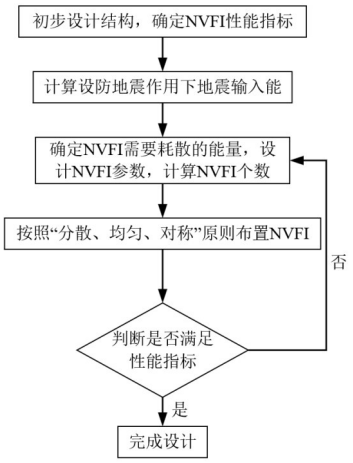


图 15 能量设计方法流程图

Fig.15 Flow chart of energy design method

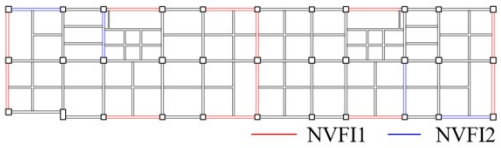


图 16 结构1~7层NVFI平面布置图

Fig 16 Layout plan of NVFI on floors 1-7 of the structure

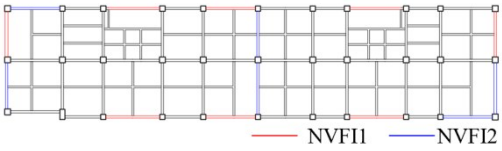


图 17 8~10层NVFI平面布置图

Fig.17 Layout plan of NVFI on floors 8-10 of the structure

4所示。

表 4 结构性能指标

Table 4 Structural performance index

性能水准	层间位移角
基本完好	1/550
中等破坏	1/183
严重破坏	1/137
倒塌	1/50

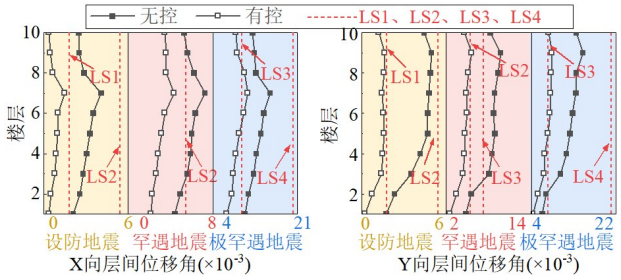
3.4 各级地震作用下NVFI的减震性能

为评估NVFI消能体系在不同地震强度下的减震效果,并验证其是否满足“不倒塌”性能目标,对罕遇与极罕遇地震作用下结构的弹塑性响应进行分析。以层间位移角作为性能评价指标,定义4个性能水准:LS1(弹性)、LS2(中等损伤)、LS3(严重损伤)和LS4(倒塌)。地震峰值加速度(PGA)分别取0.4g(罕遇)和0.64g(极罕遇地震)。

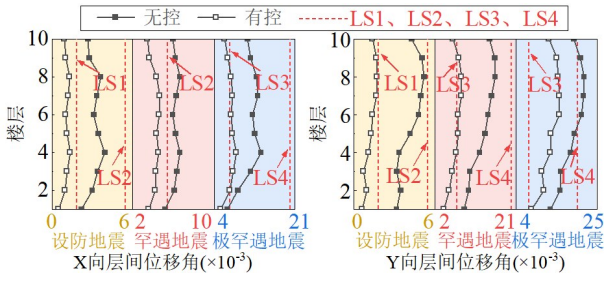
3.4.1 层间位移角

图18为NVFI消能减震结构在设防地震、罕遇地震和极罕遇地震作用下,X、Y方向各层的最大层间位移角。

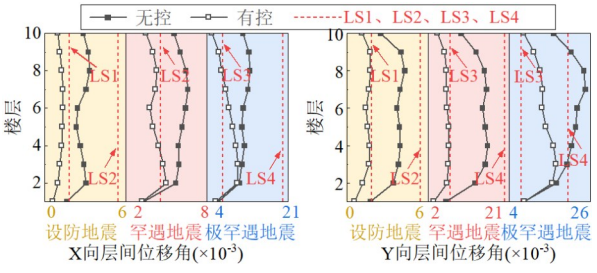
由图18可见,在各级地震作用下,NVFI装置均对层间位移角实现了显著的控制效果。具体而言,



(a) Duzce_Turkey地震波



(b) Northridge-01地震波



(c) Chi-Chi地震波

图 18 不同等级地震作用下最大层间位移角

Fig.18 Maximum inter-story displacement angle under different levels of earthquake

与无控结构相比，在设防、罕遇及极罕遇地震作用下，X 向的最大减震率分别达到了 71.29%、53.16% 和 49.21%；Y 向则分别达到了 73.86%、57.95% 和 52.94%。即使在极罕遇地震下，减震率依然保持在 45% 以上，证实了 NVFI 装置在抑制结构层间变形方面的有效性与鲁棒性。

基于性能水准的评估结果表明：在设防地震下，减震后结构整体处于弹性阶段（LS1）；在罕遇地震下，结构虽出现局部塑性，但仍处于可修复状态（低于 LS3 限值）；在极罕遇地震作用下，结构未发生整体失稳，最大层间位移角远小于倒塌限值（LS4）。因此，采用 NVFI 的减震体系在从设防到极罕遇地震的全部工况中，均实现了预设的抗震性能目标。

3.4.2　基底剪力

为评估 NVFI 对结构整体受力性能的影响，对设防地震、罕遇地震和极罕遇地震作用下结构 X、Y 方向的基底剪力响应进行了对比分析，结果如图 19 所示。

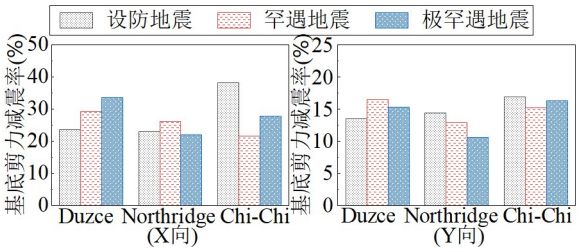


图 19　多级地震作用下基底剪力减震率

Fig.19　The reduction rate of base shear force under multi-level seismic

在各级地震作用下，NVFI 装置均能有效降低结构的基底剪力。具体而言，在设防地震作用下，X 向与 Y 向的最大减震率分别为 38.31% 和 16.87%；在罕遇地震作用下，减震率分别为 29.31% 和 16.53%；在极罕遇地震作用下，减震率则维持在 33.68% 和 16.35%。这些结果表明，NVFI 装置提供的附加阻尼能够有效减小结构的整体地震响应。

3.4.3　顶层加速度

为全面评价 NVFI 体系的减震性能，除层间位移角和基底剪力外，进一步对楼层加速度响应进行分析。图 20 为在设防、罕遇和极罕遇 3 级地震作用下，NVFI 有控结构相较于无控结构的顶层加速度减震率。

图 20 表明，在各级地震作用下，NVFI 装置均表现出稳定的加速度控制效果。具体而言，在 X 方向，3 条地震波作用下的顶层加速度减震率分布在 25%～40% 之间；在 Y 方向，减震率分布在 20%～30% 之间。虽然减震率随地震强度的增大略有下降，但即使在极罕遇地震下，减震率仍普遍接近 30%，控制效果显著。这对于保护建筑内部的非结构部件具有重要的工程价值。

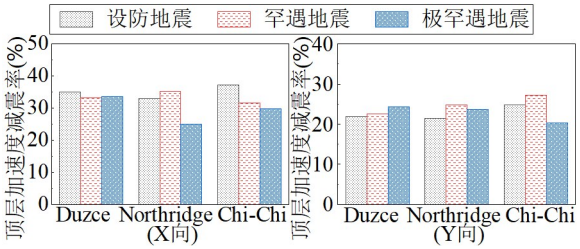
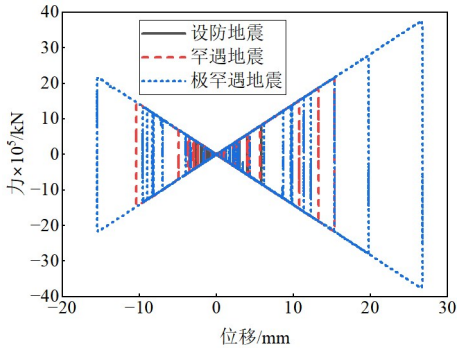


图 20　多级地震作用下顶层加速度减震率

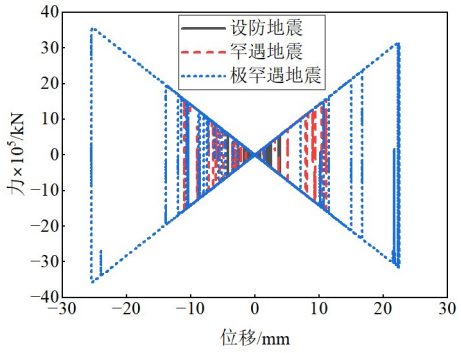
Fig.20　The reduction rate of top floor acceleration under multi-level seismic

3.5　各级地震下的 NVFI 滞回曲线对比

为揭示 NVFI 在不同地震强度下的能量耗散规律，图 21 对比了装置在设防、罕遇及极罕遇地震作用下的力-位移滞回曲线。



（a）X 方向



（b）Y 方向

图 21　Chi-Chi 地震作用下 NVFI 滞回曲线

Fig.21　Hysteresis curve of NVFI under Chi-Chi earthquake

在各级地震激励下，NVFI 的滞回曲线均呈现出与理论模型高度吻合的典型“蝴蝶形”特征。随着地震动强度的增大，装置的滞回环面积逐渐增加。这证实了 NVFI 具备独特的自适应耗能机制：其阻尼力与能量耗散能力随结构响应幅值的增大而同步增强。这种显著的幅值相关性，使其能够在强震条件下提供更大的阻尼，从而保持稳定高效的

非线性耗能性能,验证了其作为一种高性能被动控制装置的可靠性与适应性。

4 结论

针对新型无预紧力变摩擦惯容器(NVFI),开发了其在ABAQUS平台中的VUEL用户自定义单元,通过三维框架结构的弹塑性时程分析,系统验证了该装置在多级地震(尤其是极罕遇地震)下的减震性能。主要结论如下:

1)数值实现方面:基于NVFI复杂的非线性力学模型,利用二次开发技术构建了适用于ABAQUS/Explicit的VUEL用户单元。通过与MATLAB数值解的系统性对比验证,证实了该单元在模拟NVFI复杂力学行为时具有高精度与高稳定性,为该装置的工程化分析提供了可靠的数值工具。

2)性能特征方面:NVFI无需施加预紧力,其恢复力兼具摩擦放大与惯容放大双重效应。揭示并证实了NVFI优越的自适应变摩擦特性,其阻尼力与耗能能力随地震强度的增大而显著提升,从而能够在不同水准的地震作用下,适应地满足结构的阻尼需求。

3)减震效能方面:配置NVFI的三维框架结构体系,在从设防到极罕遇的各级地震作用下均表现出卓越的减震效果,有效控制了结构的层间位移和基底剪力。尤其是在极罕遇的地震作用下,该体系仍能将结构响应控制在安全阈值内,显著降低了倒塌风险并提升了结构的抗震韧性,展现出巨大的工程应用前景。

4)局限性与展望:开发的VUEL单元基于ABAQUS/Explicit显式积分算法,暂不适用于Standard/Implicit隐式静力分析。滚珠丝杠和摩擦片在长期往复(如风振或脉动)荷载作用下的磨损机理与耐久性问题,尚需在未来的工作中开展进一步的试验研究。

数据可用性声明:使用的VUEL子程序代码,在合理的请求下可联系作者提供。

参考文献

[1] YANG C T, XIE L L, LI A Q, et al. Experimental study of rotational friction damper for seismic response control: Friction material comparison and configuration optimization [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03825.

[2] 赵桂峰, 马玉宏, 陈嘉佳, 等. 基于ABAQUS的凸轮式响应放大黏滞阻尼器消能体系抗震性能分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(10): 196-204.
ZHAO G F, MA Y H, CHEN J J, et al. Seismic performance analysis of the energy dissipation system of a cam-type response amplification device with viscous damper based on ABAQUS [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(10): 196-204. (in Chinese)

[3] 赵桂峰, 刘泽明, 陈嘉佳, 等. 凸轮式响应放大摩擦阻尼器基于性态目标的能量设计方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(30): 13048-13055.
ZHAO G F, LIU Z M, CHEN J J, et al. Energy design method of cam response amplification device with friction damper based on performance target [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(30): 13048-13055. (in Chinese)

[4] 孔思华, 赵桂峰, 陈浩宇, 等. 3层环簧阻尼器恢复力模型与试验研究[J/OL]. 工程科学与技术, 2025: 1-13. (2025-05-20). https://kns. cnki. net/kcms/detail/detail. aspx? dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=SCLH2025041800R.
KONG S H, ZHAO G F, CHEN H Y, et al. Restoring force model and experimental study of three-layer ring spring damper [J/OL]. Advanced Engineering Sciences, 2025: 1-13. (2025-05-20). https://kns. cnki. net/kcms/detail/detail. aspx? dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=SCLH2025041800R.

[5] LU Y J, LV Q F, SUN T F, et al. Experimental and numerical studies on hysteretic behavior of a novel bending-friction coupled damper [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 183: 110385.

[6] D'ANTIMO M, LATOUR M, CAVALLARO G F, et al. Short- and long- term loss of preloading in slotted bolted connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 167: 105956.

[7] PARDO-VARELA J, DE LA LLERA J C. A Semi-active piezoelectric friction damper [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(3): 333-354.

[8] CHEN Y J, YANG X L, GENG X M, et al. Design and experimental study of a stepped magnetorheological damper with power generation [J]. Smart Materials and Structures, 2024, 33(8): 085044.

[9] ZHANG X C, HU Y W, ZHAO J, et al. Experimental study on seismic performance of CFRP bar reinforced concrete columns with magnetorheological damper [J]. Engineering Structures, 2024, 314: 118322.

[10] 张香成, 毋贵斌, 赵军. 磁流变阻尼器拟静力力学特性及力学模型[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(3): 46-53.
ZHANG X C, WU G B, ZHAO J. Quasi-static mechanical properties and mechanical model of MRD [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(3): 46-53. (in Chinese)

[11] LIU Y C, WANG Q, XING X D, et al. Development

and characterization of a magnetorheological damper with low-velocity sensitivity [J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2025, 32(23): 5818-5829.

[12] CHEN Y, YU W H, ZHANG M, et al. A novel energy dissipation damper for multi-level earthquakes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 192: 107214.

[13] GHORBANI H R, ROFOOEI F R. A novel double slip loads friction damper to control the seismic response of structures [J]. Engineering Structures, 2020, 225: 111273.

[14] FRIIS T, KATSANOS E I, SABERI M, et al. Two-level friction damping and its application for passive multi-functional vibration control of high-rise buildings [J]. Engineering Structures, 2021, 239: 112310.

[15] YANG Y, XUE J Y, LUO Z, et al. Manufacturing, testing and simulation of novel dual-stage energy-dissipation and self-centering friction damper [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 222: 108949.

[16] HUANG L J, ZHOU Z, HUANG X G, et al. Variable friction damped self-centering precast concrete beam – column connections with hidden corbels: Experimental investigation and theoretical analysis [J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110150.

[17] KONG S H, ZHAO G F, MA Y H, et al. A novel inerter-enhanced self-centering damper (ISCD) for improving seismic resilience of self-centering RC building frames [J]. Engineering Structures, 2025, 330: 119895.

[18] SHA H L, CHONG X, XIE L L, et al. Study on seismic performance of RC frame with UHPC cladding panels and two-level friction damping connections [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 95: 110118.

[19] QIU C X, BAI M Y, JIANG T Y. Seismic displacement response of SDOF systems with SMA slip friction dampers [J]. Smart Materials and Structures, 2024, 33 (1): 015030.

[20] 雷虎军，刘伟. 脉冲型近场地震作用下列车-简支梁桥的耦合振动[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(3): 44-53.
LEI H J, LIU W. Coupling vibration analysis of train-simply supported beam bridge under near-field earthquake with pulse [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(3): 44-53. (in Chinese)

[21] 宋维举，刘超，轩方方. 极罕遇地震下单跨框架结构倒塌破坏机理研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38(4): 106-110.
SONG W J, LIU C, XUAN F F. Study on collapse mechanism of single-span frame structure under extremely rare earthquake [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2024, 38(4): 106-110. (in Chinese)

[22] 鲁正，高士凯，周超杰，等. 极罕遇地震作用下颗粒惯容系统的减震机制及其减震效果[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(增刊2): 51-59.
LU Z, GAO S K, ZHOU C J, et al. Shock absorption mechanism and effect of particle inertial volume system under extremely rare earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(Sup 2): 51-59.

[23] MA R S, BI K M, HAO H. Inerter-based structural vibration control: A state-of-the-art review [J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112655.

[24] LIANG Q G, BAI X Y, YU D L, et al. Dynamic performance of structures with clutching inertia-damping system: Theoretical study [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2024, 53(3): 1345-1362.

[25] CHOWDHURY S, ADHIKARI S. Nonlinear stiffened inertial amplifier tuned mass friction dampers [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2025, 191: 109264.

[26] 唐家伟，张松涵，戴靠山，等. 风力机结构多重调谐质量阻尼器振动控制对比[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(3): 149-156.
TANG J W, ZHANG S H, DAI K S, et al. Comparative study on MTMD vibration control of wind turbine structures [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(3): 149-156. (in Chinese)

[27] PANDIT A, GHIASI R, MALEKJAFARIAN A. On the optimization of Tuned Mass Damper Inerter (TMDI) systems for buildings subjected to real ground motions using slime mould algorithm [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 179: 108557.

[28] JIANG S D, MA R S, BI K M, et al. On performance comparison of tuned mass dampers (TMD) enhanced with inerter and negative stiffness device [J]. Engineering Structures, 2025, 343: 121144.

[29] SUGIMURA Y, GOTO W, TANIZAWA H, et al. Response control effect of steel building structure using tuned viscous mass damper [C]//Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 24-28 September, 2012: 24-28..

[30] LAZAR I F, NEILD S A, WAGG D J. Vibration suppression of cables using tuned inerter dampers [J]. Engineering Structures, 2016, 122: 62-71.

[31] ZHANG Z L, CHEN B, HUA X G. Closed-form optimization of tuned mass-damper-inerter (TMDI) in flexible structures [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 72: 106554.

[32] MARIAN L, GIARALIS A. Optimal design of a novel tuned mass-damper-inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2014, 38: 156-164.

[33] 王鑫，王宪杰，郑飞云，等. 一种颗粒阻尼惯容减振器

的设计与性能分析[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(16): 6742-6751.
WANG X, WANG X J, ZHENG F Y, et al. Design and performance analysis of a particle damping inertial capacity shock damper [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(16): 6742-6751. (in Chinese)

[34] XIA W Q, LU L, WANG L, et al. Experimental and numerical study on a multilayer magnetic field rotary eddy current inertial damper [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 187: 108977.

[35] 陈家川. 近断层地震作用下无预紧力变摩擦惯容器的减震控制[D]. 广州: 广州大学, 2022.
CHEN J C. Seismic reduction control of non-preload variable friction inerter under near-fault earthquake [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022. (in Chinese) [自助确认并截取PDF原文英文标题]

[36] LIU W, MA Y H, ZHAO G F, et al. A non-preload variable friction inerter system for response reduction of structures subjected to harmonic and seismic ground excitations [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2026, 200: 109803.

[37] LIU W, KONG S H, ZHAO G F, et al. Design, manufacturing, and testing of a non-preload variable friction damper for seismic application of buildings [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2024, 2024 (1): 9573096.

[38] 赵桂峰, 刘伟, 马玉宏, 等. 极罕遇地震作用下无预紧力变摩擦惯容器消能体系抗震性能分析[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(4): 62-70.
ZHAO G F, LIU W, MA Y H, et al. Seismic performance analysis of energy dissipation building with non-preload variable friction inerter under extremely rare earthquake [J]. Advanced Engineering Sciences, 2025, 57(4): 62-70. (in Chinese)

[39] HATZIGEORGIOU G D, PNEVMATIKOS N G. Maximum damping forces for structures with viscous dampers under near-source earthquakes [J]. Engineering Structures, 2014, 68: 1-13.

[40] 赵斌华. 消能减震结构的设计方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
ZHAO B H. A study on the seismic design method for energy dissipation system [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese)

[41] 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)

(编辑 XXX)