

含分布式单向单颗粒阻尼器的减震结构体系 有限元模拟及性能分析

王宝顺, 何浩祥, 闫维明, 兰炳稷

(北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 针对目前颗粒阻尼器减震结构在有限元模拟中难以准确实现及其减震性能评价方法不全面的不足, 以减振效率高的并联式单向单颗粒阻尼器(PSSPD)为研究对象, 在剖析其减振机理及颗粒运动状态的基础上, 构建 PSSPD 在通用有限元中的复合模拟单元, 明确该单元中各参数的合理取值, 并确认 PSSPD 有限元模型具有良好的精度。在分析 PSSPD 中颗粒质量、颗粒运动间距及其减震效果之间关系的基础上, 确定颗粒质量按振型分布及颗粒运动间距按层间位移反比分布的最优布置方案; 提出 PSSPD 减震结构体系离散减震控制效果的评价方法; 通过算例分析表明颗粒最优布置方案以及动态附加等效阻尼比评价 PSSPD 离散减震效果的合理性和可行性。

关键词: 结构振动控制; 颗粒阻尼器; 有限元模拟; 布置方案; 减震性能评价

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)06-1418-15

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.06.014

1 概述

颗粒阻尼减振是将颗粒材料按某一填充率放入结构内部或特定的空腔容器中, 当受控结构振动时颗粒与颗粒及腔体之间将不断地发生碰撞和摩擦, 通过动量交换及消耗系统的振动能量来减轻结构振动^[1-3]。由于传统颗粒的直径过大, 若将如图 1(a)所示的单颗粒阻尼器直接应用于土木工程结构^[4], 难以满足工程需求。尽管如图 1(b)所示的多颗粒阻尼器满足工程需求^[5], 但是在振动工程中颗粒的堆积效应会限制颗粒运动, 导致颗粒与受控结构之间动量交换效率及减振效果偏低。有鉴于此, 闫维明等^[6]提出了如图 1(c)所示的并联式单向单颗粒阻尼器(Parallel Single-dimensional Single Particle Damper, PSSPD), 能够分布式布置在结构中, 具有机理

明确、减振频带宽、减振效率更高且适合应用于建筑结构减振等优点。

近年来, 有关颗粒阻尼器的研究主要针对阻尼器的减振机理、减振性能与减震效果, 减振对象基本是单自由度结构。例如在理论分析方面, Masri 等^[7-8]推导了附加单颗粒阻尼器的受控结构在周期激励下稳态振动时的解析解。王宝顺等^[9-10]在 Masri 所建力学模型的基础上, 考虑了颗粒与受控结构之间摩擦的影响, 并对其性能进行对比研究, 结果表明考虑摩擦效应之后其减振效果有所降低。在试验研究方面, 闫维明等^[11]做了一系列多颗粒阻尼器减振机理与性能的试验研究, 明晰了其减振性能以及各因素对性能的影响规律。鉴于分析多颗粒阻尼器中颗粒之间相互作用的复杂性, 因而学者研究出了一些数值模拟方法, 如多相流体理论^[12]及离散单元法^[13]等。Saeki^[14]以在水平激励下的单自由度结构为研究对象, 采用离散单元法研究了相关参数对多颗粒阻尼器性能的影响, 并进行了试验验证。在颗粒阻尼器有限元模拟方面, 程杨^[15]通过使用离散元软件 EDEM 模拟分析了颗粒阻尼器自身参数对阻尼比的影响并进行了优化。黄韵文^[16]通过 ANSYS LS-DYNA 实现对单层颗粒阻尼器性能的模拟, 但计算效率低, 且当颗粒个数较多时, 计算结果不收敛, 该方法已无法胜任; 而颗粒阻尼器对多自由度结

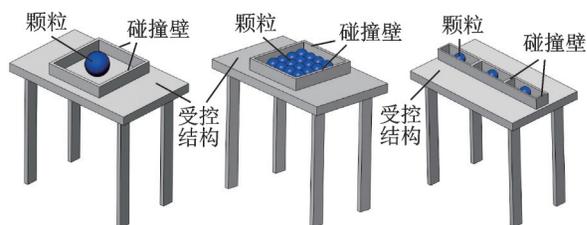


图 1 颗粒阻尼器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of particle damper

收稿日期: 2021-01-19; 修订日期: 2021-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978021, 51878017); 国家重点研发计划(2017YFC1500604, 2017YFC1500603)。

构进行减振控制时,将有限元(FEM)与离散单元法(DEM)相结合应用于多自由度结构的减振控制设计是一种行之有效的途径。例如Xia等^[17]基于FEM和DEM耦合算法,利用颗粒阻尼对车辆的旋转制动鼓控制其噪声和振动,实现了颗粒阻尼器的设计与计算。夏兆旺等^[18]针对带颗粒阻尼器的旋转平板叶片结构提出基于FEM和DEM的耦合仿真算法,证明了所提出的耦合仿真算法在很宽的频带范围内都是可行的。Rong等^[19]也采用FEM和DEM的耦合算法研究调谐型颗粒阻尼器对输电塔的减震效果,其中输电塔采用ABAQUS软件进行有限元分析,基于Python语言模拟阻尼器的性能。但是FEM与DEM耦合对使用者的理论水平要求较高,并且建模难度大、建模环境复杂,很难获得宏观规律,目前只能适用于简单结构,因此不适用于颗粒阻尼器在实际土木工程应用中的推广。

目前关于附加颗粒阻尼器的多层结构的减振机理和性能研究较少,也不够深入。Li等^[20]将一种缓冲型碰撞阻尼器设置于三自由度结构体系中,通过自由振动和强迫振动试验评价了该型阻尼器的碰撞和阻尼特性。鲁正等^[21]将颗粒阻尼器设置于多自由度结构体系中进行结构动力响应的振动台试验研究,结果表明颗粒阻尼器对多自由度结构的第一振型控制效果较好,但是对高阶振型的控制作用无法保证。该现象主要是由于将颗粒阻尼器集中布置在结构顶层造成的,并没有充分发挥颗粒阻尼器分布式布置的优势。关于颗粒阻尼器布置方案的研究,王瑾等^[22]通过对附加颗粒阻尼器的多层钢筋混凝土框架结构的振动台试验研究阻尼器布置位置对其减震效果的影响,结果表明该阻尼器宜布置于结构位移响应较大的位置,然而该结论是基于试验和工程经验得到的,缺乏坚实的理论依据,尚需进一步验证。

纵观现有颗粒阻尼器研究成果,国内外学者已对其减振机理、性能和效果开展了富有成效的理论分析、数值模拟和试验研究。然而仍存在诸多不足,主要体现在颗粒阻尼器的数值模拟一般需要利用专用离散元软件或自主编程才能实现,建模难度大且计算效率低;虽然颗粒阻尼器对多层结构具有良好的减震效果,但是缺乏阻尼器布置方案的理论研究,导致并未实现颗粒阻尼器分布式减震的优势,且现有阻尼器减震效果评价方法无法细致而全面地表征其离散控制效果。上述不足导致设计人员、施工人员与业主无法有效掌握颗粒阻尼器的设计方法及准确评价其减震性能,严重阻碍了颗粒阻尼器的实际工程应用和推广。究其实质,颗粒阻尼器与受控结构之间的碰撞现象与桥梁及隔振结构的碰撞类似,已有学者对桥梁碰撞效应^[23]及隔振结构的碰撞现

象^[24]进行了有限元模拟,这为颗粒阻尼器在通用有限元软件中的性能模拟提供了技术支持。

鉴于此,本文以PSSPD为研究对象,通过对其减振机理及颗粒运动状态的分析,构建PSSPD在通用有限元分析中的复合模拟单元,并讨论该单元中各参数取值,之后验证了有限元模型的精度及合理性。进一步在PSSPD的颗粒质量、颗粒运动间距与其减震效果之间关系理论分析的基础上确定最优颗粒布置方案,并提出PSSPD减震结构的离散减震效果的评价方法。最后通过算例分析验证了最优颗粒布置方案以及动态附加等效阻尼比评价PSSPD离散减震效果的合理性和可行性。

2 PSSPD模拟单元及有限元建模

PSSPD力学模型如图2所示,图中 m 、 k 及 c 分别为受控结构质量、刚度与阻尼系数; m_p 为颗粒质量; d 为颗粒运动间距。PSSPD中颗粒运动间距与阻尼器腔体尺寸均可在实际工程中实现,更加适用于建筑结构的振动控制。由于PSSPD中不存在颗粒间的相互作用,只有颗粒与结构之间的碰撞,这样的优势在于颗粒与受控结构之间的相互作用可以通过现有通用有限元软件模拟,下文将从PSSPD的减振机理及颗粒运动状态着手,逐步分析在通用有限元软件中模拟颗粒运动间距、碰撞效应、摩擦效应及颗粒质量所需的单元及参数设置方法。

2.1 颗粒运动间距

颗粒与结构之间存在间距,当受控结构在振动时的位移超过预留间距时,颗粒与受控结构就会发生碰撞。对于该间距可以采用有限元软件中的缝(Gap)单元来模拟,如图3(a)所示,图中 k_p 为碰撞刚度, δ_0 为碰撞间距。Gap单元的力学模型为:

$$F_p = \begin{cases} \text{sgn}(\delta)k_p(|\delta| - \delta_0), & |\delta| > \delta_0 \\ 0, & |\delta| \leq \delta_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 F_p 为碰撞力, δ 为颗粒与受控结构的相对运动位移, $\text{sgn}(\delta) = \begin{cases} 1, & \delta > \delta_0 \\ -1, & \delta < -\delta_0 \end{cases}$

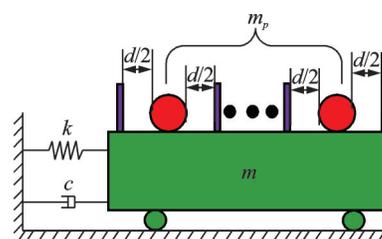


图2 PSSPD力学模型

Fig. 2 Mechanical model of PSSPD

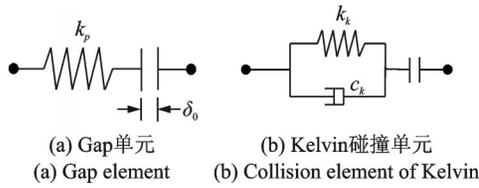


图 3 有限元模拟单元

Fig. 3 Finite simulation element

2.2 碰撞效应

在颗粒与受控结构发生碰撞的过程中,虽然 Gap 单元中可以设置碰撞刚度,但两者之间的碰撞过程实际为非完全弹性碰撞过程,该碰撞过程中应考虑法向碰撞刚度和接触阻尼,而 Gap 单元无法考虑接触阻尼的影响。文[10]的研究结果表明 Hertz-damper 模型可以较准确地模拟颗粒与阻尼器腔体之间的碰撞过程。但是 Hertz-damper 模型中弹性力项及黏性力项与相对侵入位移之间均为非线性关系,且恢复系数与碰撞前的相对速度相关。而在现有的有限元分析软件中仍然无法精准实现 Hertz-damper 模型的模拟,且模拟过程复杂、繁琐,不易被设计人员接受。因此颗粒与受控结构之间的碰撞过程可以通过如图 3(b)所示的 Kevin 模型进行表征。其中 Kevin 模型的接触弹性力为:

$$F_c = \begin{cases} \text{sgn}(\delta) k_h (|\delta| - \delta_0), & |\delta| > \delta_0 \\ 0, & |\delta| \leq \delta_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 F_c 为接触弹性力, $k_h = \frac{4\sqrt{r}}{3\pi(\lambda_1 + \lambda_2)}$ 为 Kevin 模型碰撞刚度,其中 r 为颗粒半径, $\lambda_i = \frac{1-\nu_i}{\pi E_i}$, ν 与 E 分别为阻尼器材料的泊松比与弹性模量。

Kevin 模型中接触阻尼力为:

$$F_{ck} = \begin{cases} c_k \dot{\delta}, & |\delta| > \delta_0 \\ 0, & |\delta| \leq \delta_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 F_{ck} 为接触阻尼力, $\dot{\delta}$ 为颗粒与受控结构在碰撞时的相对运动速度, c_k 为阻尼系数,计算公式如下:

$$c_k = 2\xi_p \sqrt{k_k \frac{mm_p}{m + m_p}} \quad (4)$$

式中 ξ_p 为与碰撞恢复系数 e 相关的阻尼比,其计算公式为:

$$\xi_p = \frac{-\ln e}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}} \quad (5)$$

在通用有限元软件中,针对碰撞单元的 Kevin 模型,可以在两碰撞物体之间同时设置弹簧单元和黏滞阻尼单元,单元的端点与节点完全相同,弹簧单元与黏滞阻尼单元在几何空间上形成并联状态,即成为 Kevin

模型。例如在 SAP2000 中可以用 Link 单元中的 Linear 单元模拟碰撞刚度,用 Damper 单元模拟碰撞阻尼。在该模拟过程中有两方面需要特别注意:如用 Linear 单元模拟碰撞刚度,则 Gap 单元的作用就只是模拟颗粒的运动间距,为了消除 Gap 单元中刚度对模拟结果的影响,取 $k_p = \eta k_h$,其中 η 不小于 100;此外, Damper 单元中的刚度应设置与 Gap 单元中刚度类似,也取 ηk_h 。

2.3 摩擦效应

在颗粒与受控结构未碰撞时,颗粒受到的摩擦力包含静摩擦力、滑动摩擦力及滚动摩擦力,而当颗粒在起振之后,颗粒受到的摩擦力主要为滚动摩擦力。在现有通用有限元软件中关于摩擦力的模拟有直接模拟与间接模拟两种方法。直接模拟法如 SAP2000 中的 Friction isolation 单元,也可以通过摩擦阻尼器对其进行间接模拟。已有研究表明颗粒与受控结构之间的摩擦效应会降低阻尼器减震效果,但是影响较小,因此在实际工程中应该使用光滑材料,尽量减小两者之间的摩擦力,甚至消除。故在有限元模拟中可以不考虑摩擦效应的影响,这样也可以极大地方便设计人员操作。

2.4 颗粒质量

在实际工程中,颗粒的形状为球体,阻尼器的腔体为钢板,因此颗粒与受控结构之间是点与面的碰撞。若消除了颗粒与受控结构之间摩擦效应的影响,则 PSSPD 中的多颗粒可以用一个质点进行模拟,便于建立有限元模型。在实际工程中用多颗粒是因为颗粒太大会影响建筑的使用空间。

综上所述,本文最终建立的 PSSPD 在通用有限元中的复合模拟单元如图 4 所示。该单元的特点在于现有通用有限元软件均可以实现,为实现颗粒阻尼器的分布式布置及实际工程应用推广提供了必要的技术支持。但是 PSSPD 减震结构体系有限元模拟的精度如何仍需进一步研究,因此下文将通过 PSSPD 的数值分析方法对有限元模拟的精度进行对比和验证。

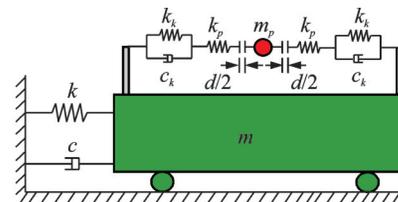


图 4 PSSPD 复合模拟单元

Fig. 4 Combined simulation element of PSSPD

3 减震结构体系有限元模拟验证

在前文基础上,再结合 PSSPD 减震结构系统性

能的数值分析可对其有限元模型的精度进行验证。文[6]在剖析 PSSPD 减振机理且全面考虑颗粒受力状态的基础上建立了 PSSPD 性能数值分析流程,文中将不再赘述。直接利用 PSSPD 数值模拟方法与其有限元模拟结果进行比较,从简谐激励与地震动激励两个方面分别检验有限元模型的合理性与精度。

3.1 简谐激励

可以从共振和非共振简谐激励两个角度对 PSSPD 减震结构体系有限元模型的精度进行验证,利用 SAP2000 建立的单层单跨钢结构及其详细尺寸如图 5 所示,受控结构参数为: $m=27385.3 \text{ kg}$, $k=28088 \text{ kN/m}$ 、阻尼比 $\xi=0.02$ 及第一周期 $T_1=0.196 \text{ s}$ 。颗粒为实心钢珠,两种工况的相关参数选取如表 1 所示。表 1 中 $\mu=m_p/m$, r 为颗粒半径, n_p 为颗粒个数, p_0 为简谐激励幅值, $g_1=\omega/\omega_n$,其中 ω 为

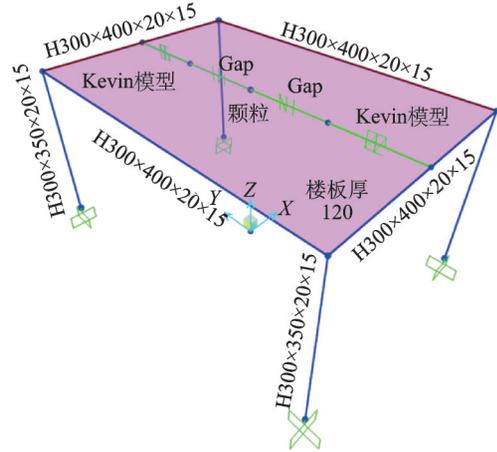


图 5 受控结构有限元模型(单位:mm)

Fig. 5 Finite element model of controlled structure (Unit:mm)

简谐激励频率, $\omega_n=\sqrt{k/m}$ 。此外,表 1 中简谐激励下颗粒运动间距是根据文[6]方法计算获得的颗粒最优运动间距。

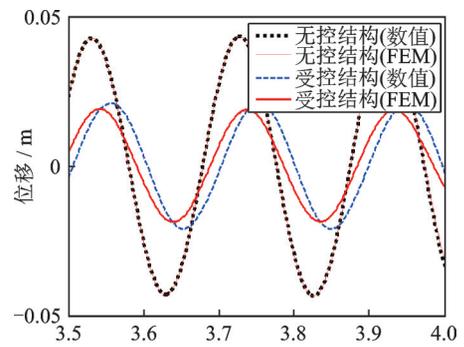
表 1 工况信息

Tab. 1 Case information

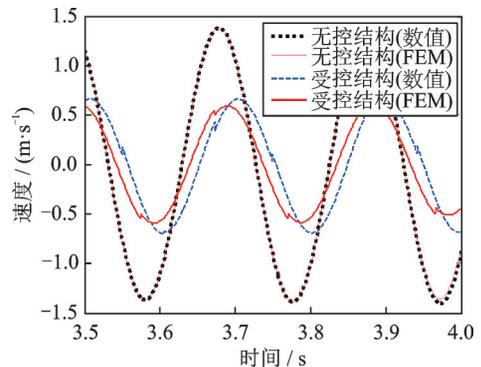
Case	μ	r/mm	n_p	e	g_1	p_0/g	d/mm	E/GPa	ν	位移误差/%	速度误差/%
I	0.05	94	50	0.5	1.0	0.2	40	195	0.3	8.87	10.66
II	0.05	94	50	0.5	0.9	0.2	16			-6.73	9.80

在选择的受控结构及颗粒参数下,通过式(1)~(5)计算获得 PSSPD 减震结构体系有限元模型中各单元中参数的取值分别为:Linear 单元中 $k_h=5.87 \times 10^7 \text{ kN/m}$, Damper 单元中刚度为 $100k_h$, $c_k=3772817.8 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ 及速度指数为 1, Gap 单元中 $k_p=100k_h$ 及 $\delta_0=d/2$ 。最终建立 PSSPD 减震结构体系有限元模型如图 5 所示。两种工况下无控结构、受控结构数值分析结果及 SAP2000 有限元模拟结果(FEM)如图 6 和 7 所示。无控结构的数值分析结果与有限元模拟结果基本重合,分别计算受控结构数值分析与有限元模拟的位移峰值及速度峰值的相对误差如表 1 所示,其结果显示具有较高的精度。在 Case I 工况下,有限元模型中 Linear 单元(F_c)及 Damper 单元(F_{ck})的受力情况分别如图 8(a)和(b)所示,结果表明 PSSPD 的减振机理主要为动量交换,这与文[6]的研究结论一致。为了进一步说明 PSSPD 有限元模型的合理性和准确性,对其与数值分析模型在碰撞过程中的碰撞力进行对比,其结果如图 8(c)所示,其中在有限元模型中,碰撞力 $F_p=F_c+F_{ck}$,而在数值分析模型中,虽然不能直接获得碰撞过程中的碰撞力,但是可以间接通过碰撞时受控结构的加速度值并利用牛顿第二定律获得。分析图 8(c)可知两种方法计算的碰撞力数值之间尽管

存在小幅误差,但是两种方法中颗粒与受控结构发生碰撞的时间基本一致,这也说明了本文有限元模拟的合理性和准确性。在数值分析模型与有限元模



(a) Displacement



(b) Velocity

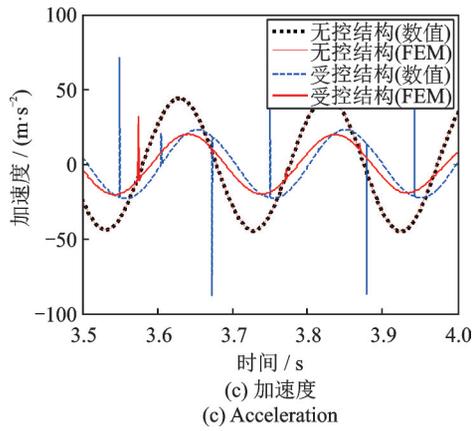
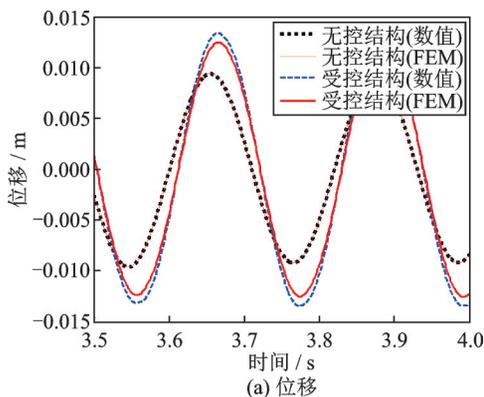
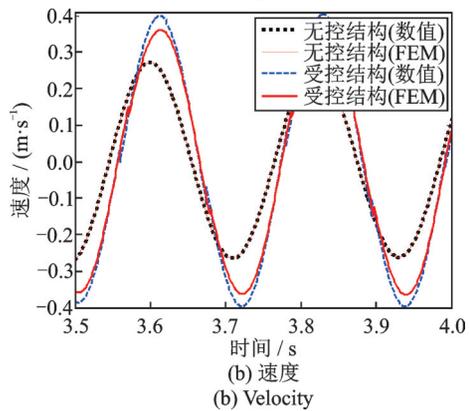


图6 Case I 时程结果对比

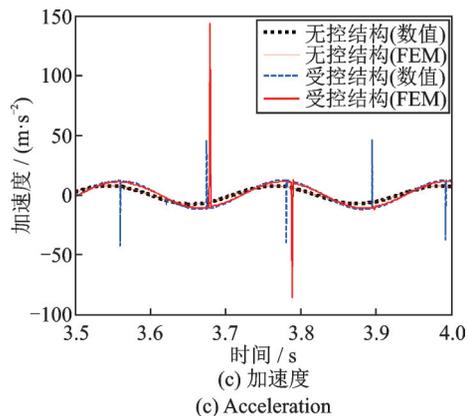
Fig. 6 Comparison time history results of Case I



(a) Displacement



(b) Velocity

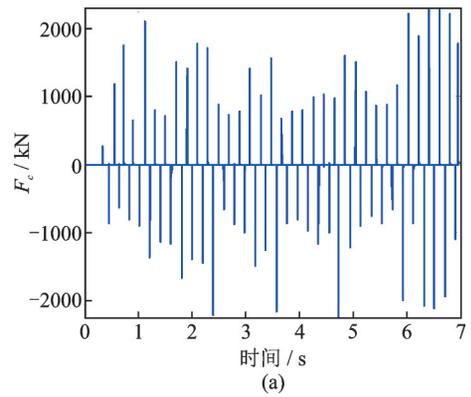


(c) Acceleration

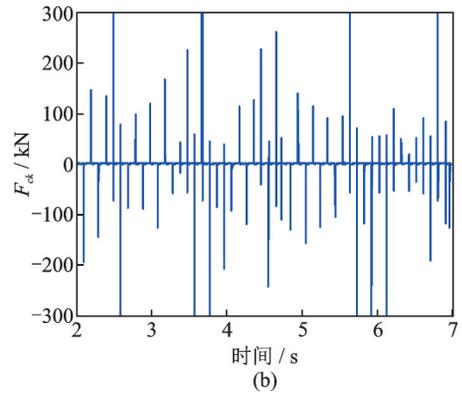
图7 Case II 时程结果对比

Fig. 7 Comparison time history results of Case II

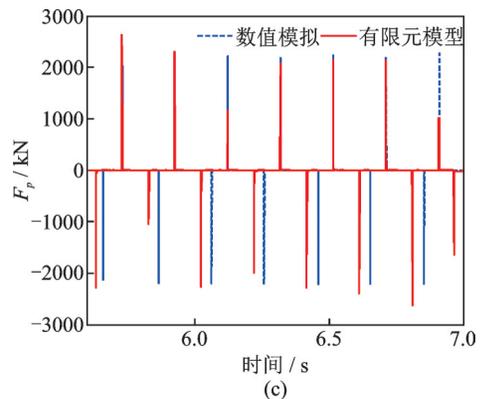
型中存在误差的主要原因是受控结构在数值分析中是一个集中的质量点,而有限元模拟中受控结构虽



(a)



(b)



(c)

图8 Case I 工况下碰撞单元受力对比

Fig. 8 Force comparison of collision elements of Case I

然是单层结构,但其是分布式多质点体系,因此在结构与颗粒发生碰撞的过程中碰撞效应存在差别。另外,在数值模拟中是通过恢复系数表征碰撞过程,而在有限元模拟中是通过接触单元表征碰撞过程,两种方法之间的差异也会造成结果有一定的偏差。

3.2 地震动激励

为了进一步验证 PSSPD 减震结构体系有限元模拟的精度和合理性,仍以图 5 有限元模型及表 1 中颗粒为例,选取表 2 所示的地震动,其中表 2 中地震动激励下颗粒运动间距是根据文[6]计算获得的颗粒最优运动间距。分析时将地震动加速度峰值均调整至 0.25g。

S1 波下无控结构、受控结构数值分析时程结果及 SAP2000 有限元模拟时程结果如图 9 所示,本文构建的 PSSPD 减震结构体系有限元模型能够较好

表 2 地震动信息

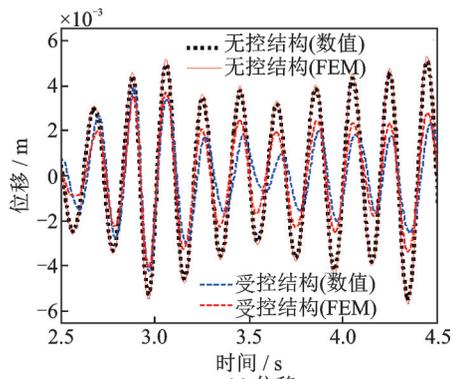
Tab. 2 Ground motion information

地震动	测站	编号	发生时间	震级	峰值加 速度/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	持时/s	d / mm
San Fernando	LA-Holly- wood Stor FF	S1	1971	6.6	191.03	79.44	10.2
Cape- Mendocino	Cpm-Cape Mendocino	S2	1992	7.0	146.83	59.98	19.2
Northern Calif-05	Ferndale City Hall	S3	1960	5.6	106.63	92.97	7.4

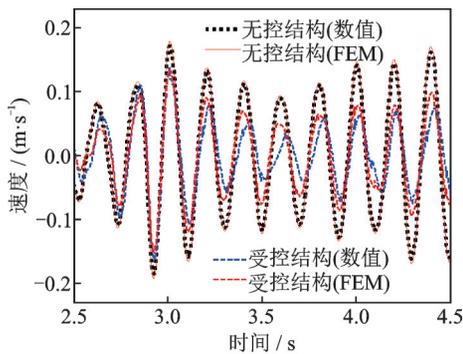
表 3 减震率结果对比

Tab. 3 Comparison of damping rate

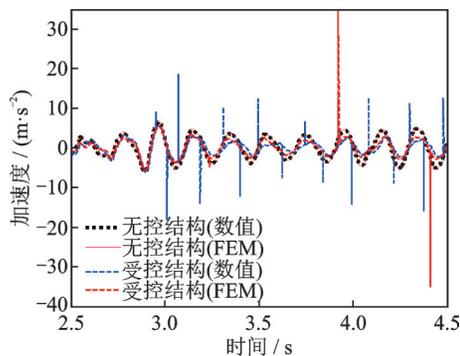
地震 动编 号	分析类型	位移		速度	
		峰值/ %	均方根/ %	峰值/ %	均方根/ %
S1	数值分析	22.50	38.29	12.60	39.21
	有限元模拟	21.98	38.25	21.67	38.58
S2	数值分析	37.99	41.60	44.86	43.42
	有限元模拟	36.33	38.10	41.01	39.08
S3	数值分析	10.72	24.11	21.25	30.82
	有限元模拟	6.45	22.80	11.46	28.81



(a) Displacement



(b) Velocity



(c) Acceleration

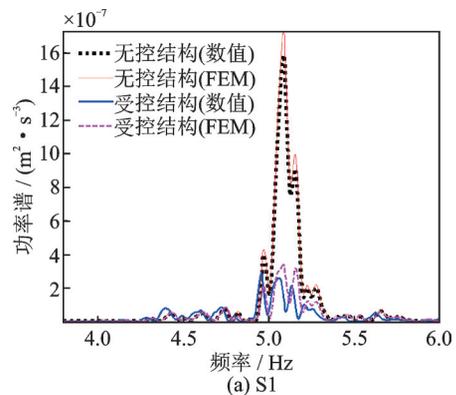
图 9 S1 波时程结果对比

Fig. 9 Comparison time history results of S1

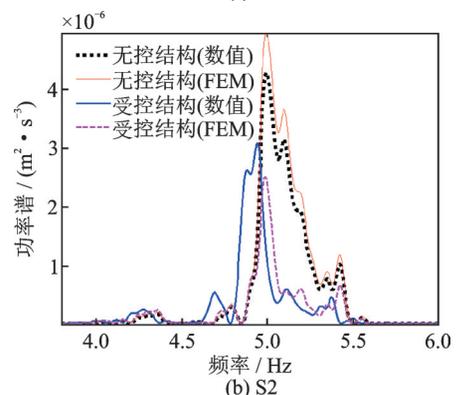
地模拟结构与颗粒之间的碰撞效应,数值分析结果和有限元模拟结果位移波形吻合、峰值接近,且两者在结构与颗粒发生碰撞的次数与时刻也比较接近,其他波的结果均与之类似。进一步计算三条地震动下的减震效果如表 3 所示。对比分析可得有限元模

拟的减震效果比数值分析的减震效果略低,这是因为受控结构在数值分析中是一个质量点,而有限元模拟中受控结构是分布质量体系,与颗粒发生碰撞时,分布质量体系参与碰撞的质量主要是楼板的质量,导致碰撞过程中动量交换的效率较低。考虑到实际工程结构的质量也为分布式,因此通过有限元模拟得到的减震效果更加接近实际减震控制效果。

上述研究从时域角度对比分析了 PSSPD 减震结构体系数值分析结果与有限元模拟结果的差异,为了深入剖析两者之间的差异及 PSSPD 的减振机理,对数值分析与有限元模拟中无控结构的位移、受控结构的位移进行功率谱分析,结果如图 10 所示。图 10 表明 PSSPD 在整个频域上均有良好的减震效果,基本不会改变结构基频,且数值分析结果与有限元模拟结果曲线的吻合度较高。在 S2 波下,各单元



(a) S1



(b) S2

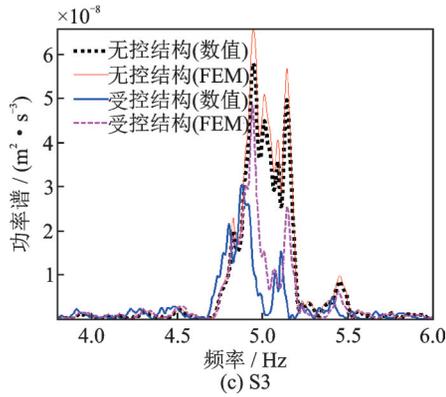


图10 地震动下位移功率谱

Fig. 10 Displacement power spectrum under ground motion

的受力情况分别如图11(a)和(b)所示,并对数值分析模型与有限元模型在碰撞过程中的碰撞力进行对比,其结果如图11(c)所示。以上结果均表明本文提出的PSSPD减震结构体系有限元模拟方法可行

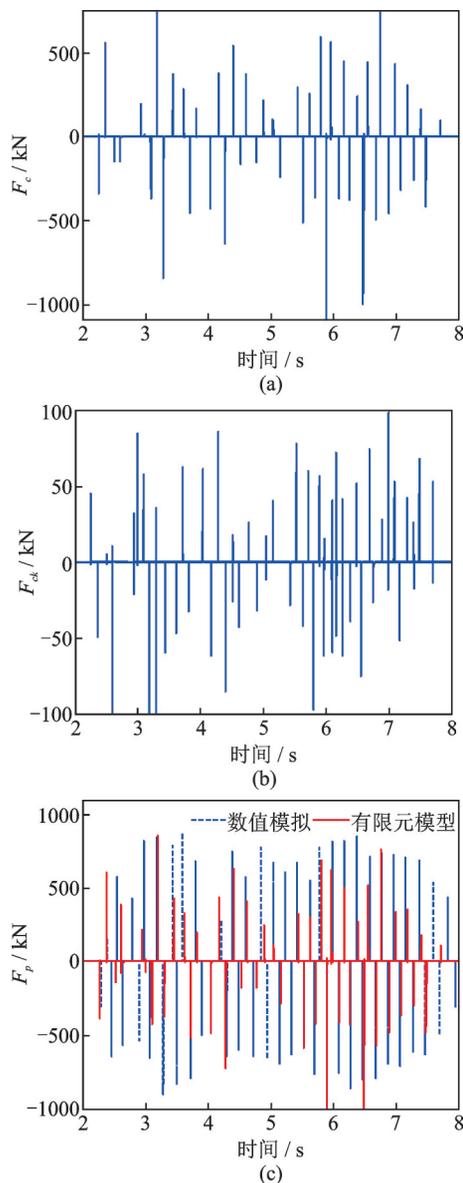


图11 S2波下碰撞单元受力对比

Fig. 11 Force comparison of collision elements of S2

且准确,可应用于简谐激励和地震激励下的结构动力分析。下文将继续讨论如何对PSSPD减震结构的减震性能进行设计。

4 PSSPD多自由度减震结构设计

PSSPD在单层结构中的布置位置确定,而颗粒的最优运动间距也可根据文[6]中的研究结果获得。对于多层结构而言,由于其多振型的影响导致结构每层的动力响应存在差别,故不同结构层对PSSPD减震性能的需求也不尽相同。这主要体现在PSSPD中颗粒质量在每层的分布以及相应的颗粒运动间距设置上。此外,由于PSSPD为加速度(力)相关型阻尼器,其减震效果不依赖于结构的振型,其优化布置方法需结合力学特性综合分析。下文将探究如何对PSSPD中颗粒质量进行优化分布并计算相应的颗粒运动间距。

4.1 颗粒质量分布

PSSPD对受控结构的减振机理实质是通过两者的碰撞进行能量的交换,至于具有负效应的摩擦力影响可以通过工程技术手段消除。参考文[6],可得颗粒与受控结构碰撞前后结构能量变化 ΔE 为:

$$\Delta E = \frac{1}{2} m \dot{x}_b^2 - \frac{1}{2} m \dot{x}_a^2 = \frac{m}{2\Delta^2} (\sigma_2^2 - \sigma_1^2) \cdot$$

$$\left[\omega (c_2 f_3 + c_1 f_4) \cos \tau - f_5 \sin \tau \right]^2 \quad (6)$$

式中 \dot{x}_b 为受控结构碰撞前速度, \dot{x}_a 为受控结构碰撞后速度, ω 为激励频率, $\sigma_1 = \frac{\pi}{2\omega} \frac{1+e}{1-e+2\mu}$, $\sigma_2 =$

$\frac{\pi}{2\omega} \frac{1+e}{1-e-2\mu}$, 其中 μ 为颗粒相对结构的附加质量比。

Δ , c_1 , c_2 , f_3 , f_4 , f_5 , τ 参数中不含有颗粒质量项,具体计取值及计算方法可参考文[6]。为了更加清晰地呈现颗粒质量对碰撞前后受控结构能量的影响,本文将式(6)变换为:

$$\Delta E_1 = \frac{8\Delta E \Delta^2 \omega^2}{m\pi^2(1+e)^2 \left[\omega (c_2 f_3 + c_1 f_4) \cos \tau - f_5 \sin \tau \right]^2} = \frac{1}{(1-e-2\mu)^2} - \frac{1}{(1-e+2\mu)^2} \quad (7)$$

由上式获得颗粒质量比对碰撞前后受控结构能量变化的影响曲线,并对两者的关系曲线进行线性拟合,如图12所示,可认为两者为正相关线性关系。多层结构在动力荷载作用下,变形越大的楼层对PSSPD的减震需求也大,即要求颗粒转移该楼层的能量也越多。因此在多层结构中,颗粒的质量可以

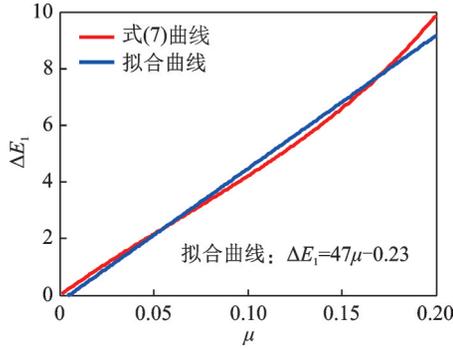


图12 颗粒质量比对受控结构能量变化的影响

Fig. 12 Effect of μ on energy change of controlled structure

按照动力荷载下楼层动力响应的分布进行比例分配。关于多层结构在动力荷载作用下楼层动力响应的分布可以通过振型来表征,而在不同的动力荷载下,楼层位移存在差异。为了使颗粒质量在多层结构中的分布结论具有普遍性和通用性,振型可以通过结构模态分析选取第一阶模态结果。假设颗粒的附加质量比为 μ ,即 $\mu_i = m_p/M$,其中 M 为多层结构的质量;多层结构的振型为 $z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_n]$,则结构每层可优化布置的颗粒质量为:

$$m_{z_{pi}} = m_p z_i / \sum_{i=1}^n z_i \quad (8)$$

式中 i 表示多层结构的第 i 层。

为了进一步说明多层结构中颗粒质量按振型分配方式(标记为“A”)的合理性及优越性,在下文算例分析中增加了两种质量分布对比设置。对于层间刚度均匀的多层结构,在颗粒质量按振型分配的布置中,楼层颗粒质量从上到下依次减少。因此,其中一种对比设置是多层结构中颗粒质量在每层中均布方式(标记为“B”),即 $m_{api} = m_p/n$ 。另一种对比设置方式为楼层颗粒质量从上到下依次增加,可以依据多层结构第一阶模态分析结果获得层间位移的比例分配(标记为“C”),设多层结构的层间位移角为 $D_r = [D_{r1} \ D_{r2} \ \dots \ D_{rn}]$,则分布方式C中结构每层布置的颗粒质量按下式计算:

$$m_{dpi} = m_p D_{ri} / \sum_{i=1}^n D_{ri} \quad (9)$$

4.2 颗粒运动间距

若要使PSSPD的减振效果达到最优,两个关键因素分别为颗粒质量与颗粒运动间距。上文通过颗粒质量对受控结构碰撞前后能量变化的影响呈现线性关系获得了颗粒质量在多层结构中的分布形式。同样,可以通过分析颗粒运动间距与颗粒质量之间的关系来指导多层结构中楼层颗粒运动间距的计算。若不计颗粒与受控结构之间摩擦效应的影响,由文[6]可知PSSPD在简谐激励下颗粒的最优运动

间距为:

$$d_{op} = \frac{2p_0 \omega f_2}{k_1 f_1 \sqrt{(1-g_1^2)^2 + 4\zeta^2 g_1^2}} \quad (10)$$

式中 k_1 为受控结构刚度, ζ 为受控结构的阻尼比, $f_1 = \sigma_2 \omega_n [\beta(1+h_2) + h_1 \zeta] + \sigma_1 (h_2 \theta_1 - h_1 \theta_2 + \theta_1)$, $f_2 = h_1 (\sigma_2 - \sigma_1) + \sigma_1 \sigma_2 [(\beta \omega_n + \theta_1)(1+h_2) + h_1 (\zeta \omega_n - \theta_2)]$ 。上述参数中只有 f_1 中的 σ_1 及 f_2 中的 σ_2 与颗粒的质量相关,其他参数的具体表达形式参见文[6]。在式(10)中颗粒质量比对颗粒最优运动间距的影响曲线如图13所示。对两者的关系曲线进行线性拟合,发现两者的关系也基本呈现线性负相关。因此,颗粒的最优运动间距与层间位移线性负相关。

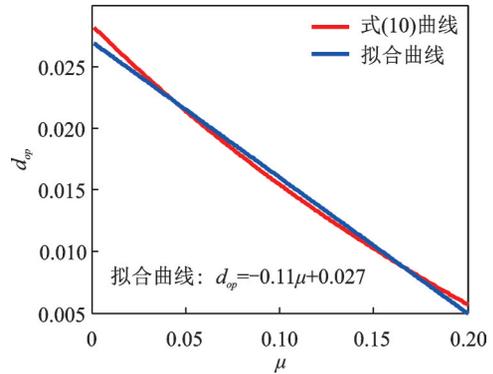


图13 颗粒质量比对颗粒最优运动间距的影响

Fig. 13 Effect of particle mass ratio on optimal particle motion distance

此外,颗粒的运动间距实质取决于多层结构的层间动力响应。首先需要确定所有楼层中最大的颗粒最优运动间距,可以将多自由度结构按第一阶振型等效为单自由度结构,然后利用文[6]中PSSPD在地震动中的优化分析计算出颗粒最优运动间距 d_{opm} ,即为所有楼层中最大的颗粒最优运动间距。然后依据颗粒最优运动间距与层间位移呈负线性相关,计算多层结构中楼层颗粒的运动间距为:

$$d_{opi} = d_{opm} \min(D_{ri}) / D_r \quad (11)$$

同样,为了进一步说明多层结构中楼层颗粒运动间距(标记为“a”)的合理性及优越性,在下文算例分析中增加了另外三种颗粒间距与之比较:第一种为每层颗粒的运动间距均为 d_{opm} (标记为“b”);第二种为每层颗粒的运动间距按层间位移的比例分配(标记为“c”),如下式所示:

$$d_{dpci} = d_{opm} D_{ri} / \max(D_{ri}) \quad (12)$$

第三种颗粒运动间距是获得多层结构每层的质量、刚度以及颗粒质量,利用层间相对加速度以及文[6]的成果求得每层的颗粒运动间距(标记为“d”)。

上文中对 PSSPD 在多层结构中颗粒质量分布与楼层颗粒运动间距进行了分析讨论,确定了最优 PSSPD 减震结构减震性能设计方法,然而在如表 4 所示的 3 种颗粒质量分布及 4 种颗粒运动间距的布置方案中(共 12 种),最优布置方案 A+a 的合理性及可行性仍需验证,并且如何对 PSSPD 减震结构的减震性能进行合理和准确评价也需要进一步研究。

表 4 PSSPD 布置方案

Tab. 4 Layout scheme of PSSPD

质量分布	颗粒间距			
	层间位移反比分配(a)	均匀(b)	层间位移正比分配(c)	文[6]计算(d)
振型分配(A)	A+a	A+b	A+c	A+d
均匀分配(B)	B+a	B+b	B+c	B+d
层间位移分配(C)	C+a	C+b	C+c	C+d

5 PSSPD 减震结构的性能评价

从能量角度分析 PSSPD 减振机理,其实质就是通过碰撞对受控结构能量的耗散与转移。因此,传统阻尼器(位移型阻尼器、速度型阻尼器及调谐型阻尼器)在结构振动的时程上是能够连续工作的,而 PSSPD 是对受控结构进行时域离散控制。如图 2 所示的 PSSPD 力学模型在水平地震作用下受控结构的振动方程如下:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + f_p(\delta, \dot{\delta}) = -m\ddot{x}_g \quad (13)$$

式中 x, \dot{x} 和 \ddot{x} 分别为结构相对于地面的位移、速度和加速度; \ddot{x}_g 为地面加速度, $f_p(\delta, \dot{\delta})$ 为颗粒与结构的碰撞力。

在地震荷载下, PSSPD 的减震效果可以用位移、速度、加速度及层间剪力等指标进行间接评价,但颗粒与受控结构在每次碰撞时转移的能量各不相同,因此其减震效果具有时变与离散的特性。对于减震结构而言,附加阻尼比是评价其减震性能最直接及全面的指标。因此本文对文[25]的研究进行改进和拓展,提出适合表征地震动下 PSSPD 离散控制效果的动态附加等效阻尼比计算方法。在 PSSPD 中颗粒与受控结构发生碰撞的过程中, t_{j-1} 时刻两者开始接触, t_j 时刻两者发生碰撞, t_{j+1} 时刻两者碰撞结束,即颗粒与受控结构的每一次碰撞经历了 3 个时间步长。为了计算获得动态附加等效阻尼比,需要在时程结果中选取各局部时间段进行计算,将式(13)在地震动持时范围 $[t_{j-1}, t_{j+1}]$ 内进行积分:

$$m \int_{t_{j-1}}^{t_{j+1}} \ddot{x} dt + c \int_{t_{j-1}}^{t_{j+1}} \dot{x} dt + \int_{t_{j-1}}^{t_{j+1}} kx dt + \int_{t_{j-1}}^{t_{j+1}} f_p dt = -m \int_{t_{j-1}}^{t_{j+1}} \ddot{x}_g dt \quad (14)$$

将上式写为能量的形式,可得:

$$E_k(j\Delta T) + E_c(j\Delta T) + E_e(j\Delta T) + E_p(j\Delta T) = E_m(j\Delta T) \quad (15)$$

式中 E_k 为结构动能; E_c 为结构固有阻尼耗能; E_e 为结构弹性应变能; E_p 为 PSSPD 转移能量; E_m 为地震输入能量; $\Delta T = t_{j+1} - t_{j-1}$, j 表示第 j 次碰撞。可获得 PSSPD 附加在结构上的动态附加等效阻尼比为:

$$\zeta(j\Delta T) = \zeta_0 \frac{E_p(j\Delta T)}{E_c(j\Delta T)} \quad (16)$$

式中 ζ_0 为结构的固有阻尼比。

在 PSSPD 颗粒转移能量 E_p 的计算过程中,就是在 $[t_{j-1}, t_{j+1}]$ 内对每层颗粒与受控结构碰撞后受控结构能量的变化值进行求和,具体的计算公式如下式所示:

$$E_p(j\Delta T) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i (\dot{x}_{i-}^2 - \dot{x}_{i+}^2) \quad (17)$$

式中 \dot{x}_{i-} 及 \dot{x}_{i+} 分别表示第 i 层结构在与颗粒碰撞前和碰撞后的速度。

为了确保 PSSPD 在土木工程结构的减震控制中具有良好的减震效果,各重要参数的取值应满足下列条件:

(1) 颗粒宜选用钢材,且应做防腐处理,恢复系数宜在 0.4~0.8 之间。

(2) 颗粒质量比的取值范围在 0.5%~5% 之间,颗粒直径宜在 20~60 mm 之间。

(3) 颗粒最优间距在实际工程中的误差应控制在 $\pm 15\%$ 以内。

(4) 颗粒滑槽的直线度、平整度及光滑度应满足 PSSPD 的正常工作要求,且 PSSPD 与主结构之间应固结连接,保证阻尼器腔体与结构共同运动。

(5) 颗粒应布置在结构质心位置,对控制结构扭转的情况,宜偏心布置,可以减轻主结构的扭转效应。具体可以选择楼板、墙体、梁和楼梯等位置。

因此,总结提出 PSSPD 在多自由度结构中的设计流程如图 14 所示。

上文中已经验证了 PSSPD 减震结构体系有限元模拟具有良好的精度并确定了颗粒的最优布置方案,也提出了评价地震动下 PSSPD 离散减震效果的方法与性能设计流程,下文将结合具体算例进一步验证最优布置方案的合理性及对 PSSPD 减震结构的减震性能进行评价。

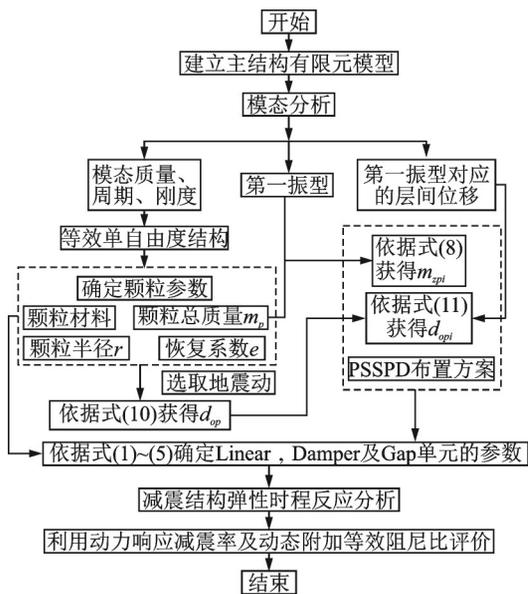


图 14 PSSPD 减震结构设计流程

Fig. 14 Design process of damping structure with PSSPD

6 算例分析

为了验证 PSSPD 在多层结构中最优布置方案的合理性与最优性及其在地震动下对多层结构的减震效果,以一典型钢框架结构为例进行分析。该结构共 9 层,层高均为 4 m,跨度均为 6 m,其中钢梁的横截面为 H 形,其型号为 W36×135;钢柱的横截面也为 H 字形,其型号为 W14×665;楼板厚度为 120 mm,上述构件钢材均为 Q345。建立该结构的有限元模拟如图 15 所示,各材料的属性直接使用 SAP2000 软件中的默认本构。该结构 8 度抗震设防,场地类别为 II 类,抗震等级为一级。设计地震分组为第二组,设计基本地震加速度值为 0.20g。

首先对该钢框架结构进行模态分析,可获得其

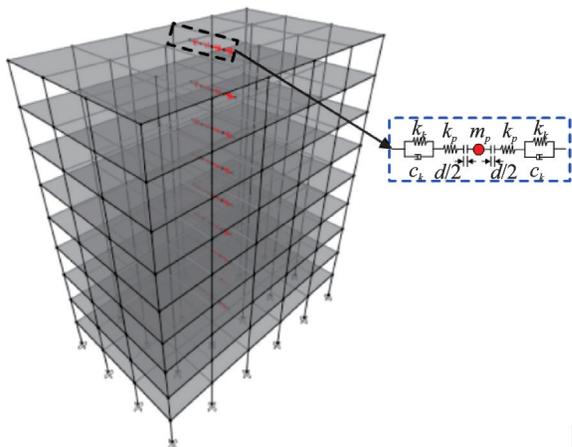


图 15 9 层钢框架结构有限元模型

Fig. 15 Finite element model of 9-storey steel structure

模态质量为 $M=5.19 \times 10^6$ kg,第一阶模态沿短轴方向振动,周期为 $T=1.098$ s,第一阶模态所对应的刚度 $K=1.70 \times 10^5$ kN/m,结构的振型阻尼比为 0.02;楼层质量 $m_i=5.77 \times 10^5$ kg,通过试算层间刚度使其结果与第一阶周期相同,可获得层间刚度 $k_i=1.75 \times 10^4$ kN/m。通过分析获得第一阶振型及相应的层间位移角的分布情况如图 16 所示,图中两者结果均进行了归一化处理。

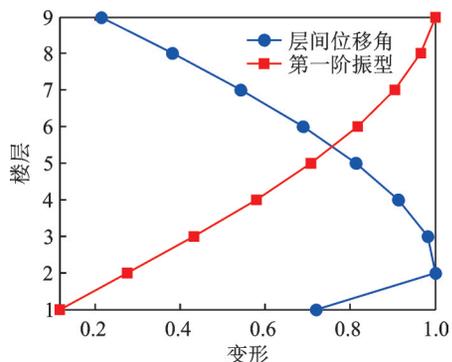


图 16 无控结构变形

Fig. 16 Deformation of uncontrolled structure

在上述获得无控结构动力特性之后,选取 2 条实际地震波及 1 条人工波进行 PSSPD 最优布置方案的验证,其中 2 条实际地震波可以选取表 2 中的 S1 波和 S2 波,人工波按照二类场地生成即可,并标记为“RG”。分析时将所有地震动加速度峰值均调整至 0.25g。颗粒的信息如表 1 所示,按本文第 4 节 PSSPD 减震结构减震性能设计可获得不同 PSSPD 布置方案下颗粒质量分布与楼层颗粒运动间距,如表 5 和 6 所示。

最终在 SAP2000 中建立相应的 PSSPD 减震结构体系有限元模型如图 15 所示。对每条地震波及每种布置方案下 PSSPD 的减震效果进行分析,并以地震动下受控结构楼层位移及速度的平均减震率来评价其减震效果,其中各布置方案下楼层位移(速度)峰值及均方根平均减震率如图 17~19 所示。

图 17~19 对不同的 PSSPD 布置方案进行了减震效果对比,结果表明当楼层颗粒运动间距按 a 设置时在不同的颗粒质量分布下均取得最优减震效果。进一步对楼层颗粒运动间距按 a 设置下的三种颗粒质量分布进行对比,如图 20 所示。结果表明 PSSPD 在颗粒布置方案 A+a 下确实取得最优减震效果,证明了前文中颗粒质量分布与楼层颗粒运动间距取值理论分析的正确性和合理性。该方案下 PSSPD 对受控结构每层楼均有良好的减震效果,并且其对所有楼层的最高减震率与最低减震率相差在 4% 以内,证明了分布式 PSSPD 减震性能的优良性

表5 PSSPD布置方案信息

Tab.5 Layout scheme information of PSSPD

楼层	颗粒质量分布 形式及取值/(10 ³ kg)			颗粒运动间距形式及取值/mm								
	A	B	C	S1			S2			RG		
				a	b	c	a	b	c	a	b	c
1	0.51	2.89	2.99	18	59	42	19	65	47	45	149	108
2	1.23	2.89	4.15	13	59	59	14	65	65	32	149	149
3	1.93	2.89	4.08	13	59	58	14	65	64	33	149	147
4	2.59	2.89	3.79	14	59	54	15	65	59	35	149	137
5	3.17	2.89	3.37	16	59	48	17	65	53	39	149	122
6	3.66	2.89	2.86	18	59	41	20	65	45	47	149	103
7	4.05	2.89	2.25	23	59	32	26	65	35	59	149	81
8	4.32	2.89	1.58	33	59	22	37	65	25	84	149	57
9	4.48	2.89	0.89	59	59	13	65	65	14	149	149	32

表6 文[6]计算颗粒运动间距(d)/mm

Tab.6 Calculation of particle movement distance in reference [6] (d)/mm

楼层	S1			S2			RG		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	74	66	70	68	55	62	71	85	83
2	98	97	82	94	81	70	110	124	112
3	94	96	92	89	85	80	116	115	104
4	87	88	87	72	54	73	112	108	95
5	79	79	70	75	64	65	92	91	96
6	67	71	71	61	58	58	75	75	76
7	47	49	59	40	48	46	57	68	70
8	33	36	41	30	33	34	40	44	45
9	20	22	25	15	17	34	22	27	19

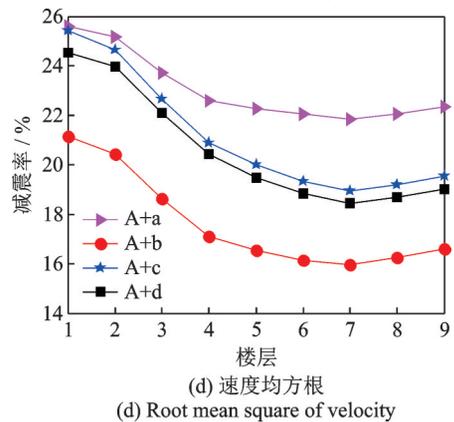
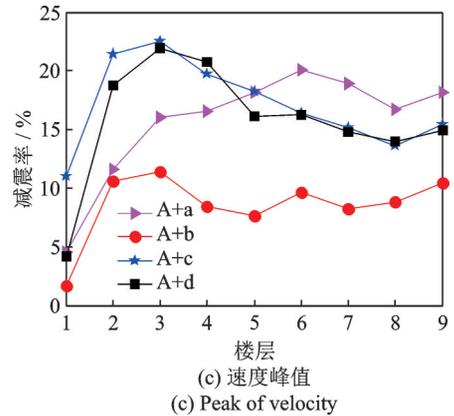
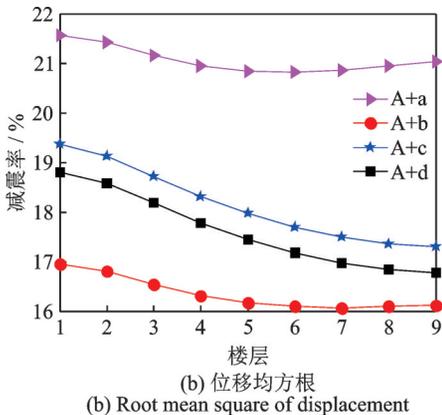
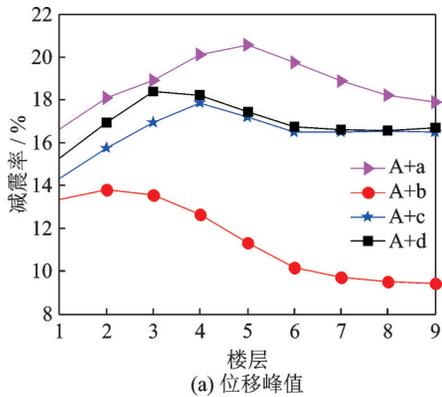
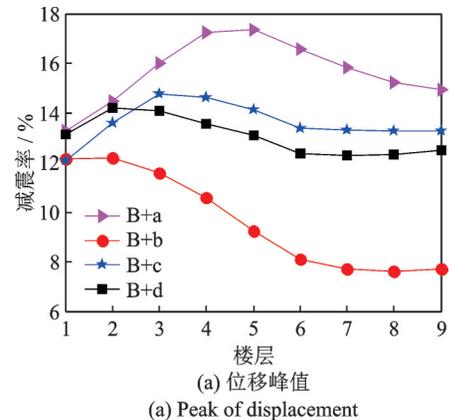
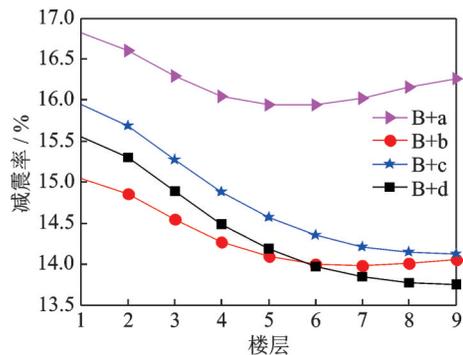
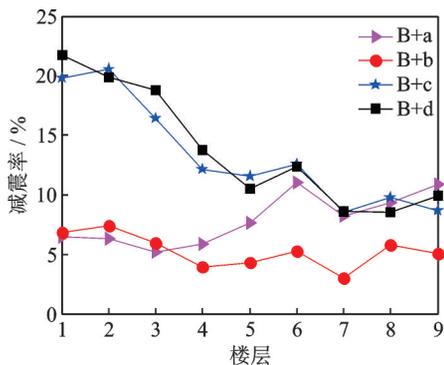


图17 颗粒质量振型分配(A)时的减震效果
Fig.17 Damping effect of particle mass distribution by vibration mode (A)

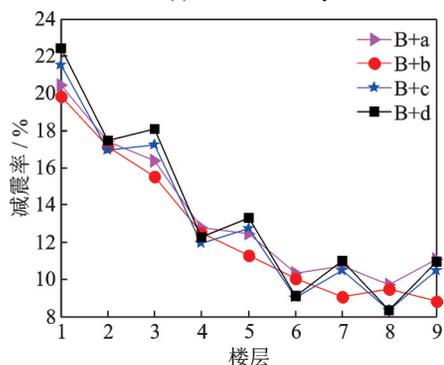




(b) 位移均方根
(b) Root mean square of displacement



(c) 速度峰值
(c) Peak of velocity



(d) 速度均方根
(d) Root mean square of velocity

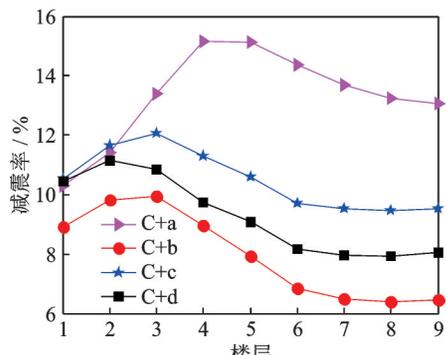
图 18 颗粒质量均匀分配(B)时的减震效果

Fig. 18 Damping effect of particle mass distribution by evenly distributing (B)

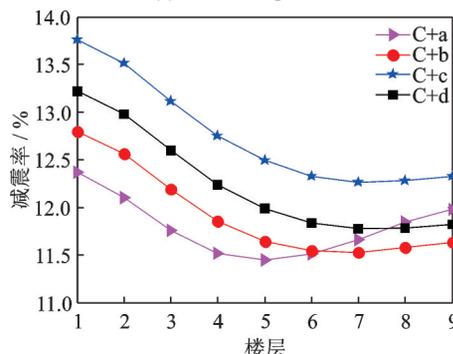
和鲁棒性,这是对各楼层的颗粒质量及颗粒运动间距优化的结果,也说明了颗粒质量与颗粒运动间距在楼层中的分布对 PSSPD 减震效果影响的重要性。

为了直观且全面地表征 PSSPD 对受控结构的减震效果,采用本文提出的计算地震动下 PSSPD 动态附加等效阻尼比的方法对其减震性能进行评价,当楼层颗粒运动间距按 a 设置时,三种颗粒质量分布下 PSSPD 在 S1 波作用时动态附加等效阻尼比的计算结果如图 21(a) 所示。结果表明 PSSPD 在碰撞瞬时能够提供较大的附加等效阻尼比,所以对受控结构的位移和速度具有良好的控制效果,其他地震波的结果与之类似。

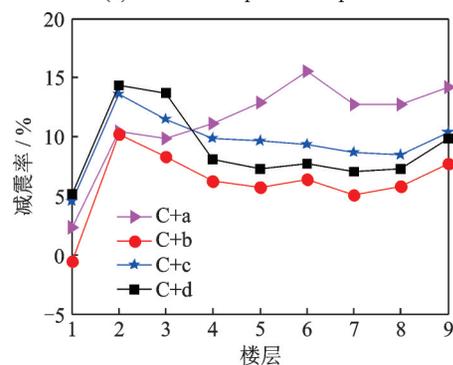
虽然图 21(a) 的结果能够细致全面地体现 PSSPD 的离散减震效果,但是三种布置方案减震效



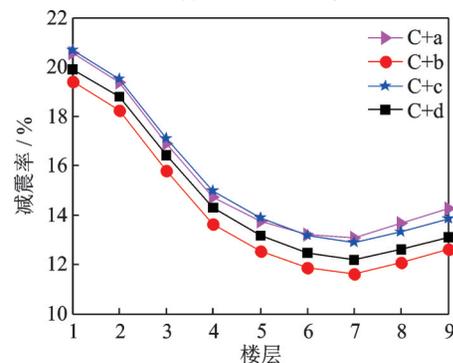
(a) 位移峰值
(a) Peak of displacement



(b) 位移均方根
(b) Root mean square of displacement



(c) 速度峰值
(c) Peak of velocity



(d) 速度均方根
(d) Root mean square of velocity

图 19 颗粒质量层间位移分配(C)时的减震效果

Fig. 19 Damping effect of particle mass distribution by interlayer displacement (C)

果的差异仍不够清晰。为了弥补该不足,可以选取一定时间段内的附加等效阻尼比求平均值,即用该时间段内的附加等效阻尼比之和除以颗粒与受控结构碰撞的次数可获得 PSSPD 平均动态附加等效阻

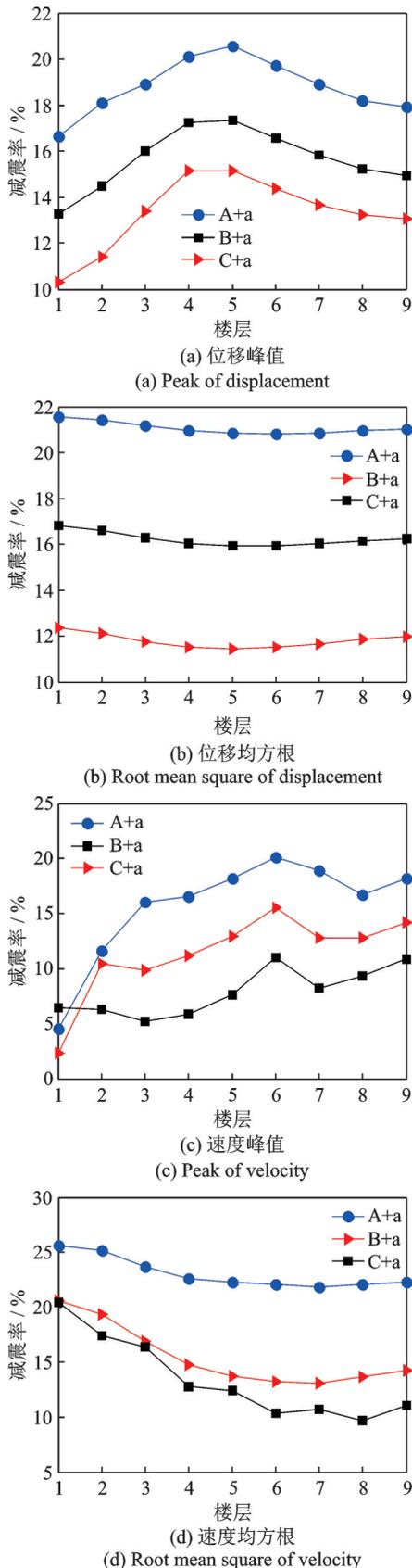


图20 PSSPD布置方案综合减震效果比较
Fig. 20 Comparison of comprehensive damping effect of PSSPD layout schemes

尼比。若取三条地震动的时间段均为0.6 s, S1波作用下PSSPD平均动态附加等效阻尼比如图21(b)所示。平均动态附加等效阻尼比能够体现出三种

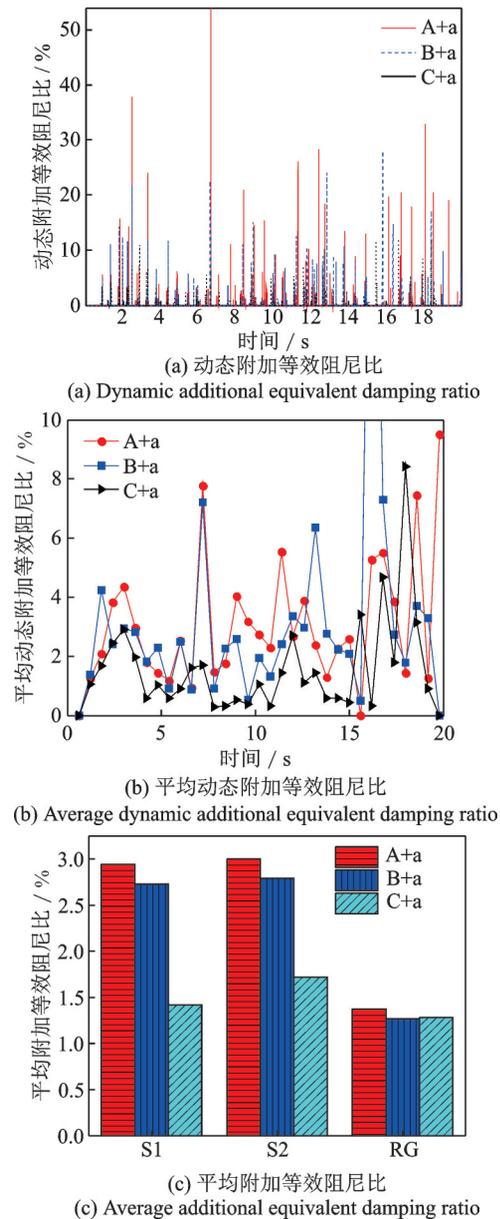


图21 PSSPD减震效果评价
Fig. 21 Evaluation of damping effect of PSSPD

PSSPD布置方案时变减震效果的差异,并且布置方案A+a有明显的减震优势。结合地震动的加速度时程曲线分析可知,在地震反应剧烈时,PSSPD的附加等效阻尼比较大,这是因为地震动越剧烈受控结构的动力响应就越大,颗粒与受控结构之间转移的能量也就越多。此外,也可通过动态附加等效阻尼比之和除以总碰撞次数获得在整个时间历程上PSSPD的平均减震效果,如图21(c)所示。该结果进一步凸显了PSSPD最优布置方案A+a的合理性和可行性。

通过算例分析可知PSSPD在颗粒质量振型分布及楼层颗粒间距层间位移反比分配的组合方案下减震效果达到了最优,其减震率高达25%,具有良好的工程应用价值。在PSSPD减震结构的减震性能评价中,离散附加等效阻尼比能够细致且准确地

表征 PSSPD 的减震效果,而平均附加等效阻尼比能够显著体现不同 PSSPD 布置方案减震效果的差异。

7 结 论

为了弥补目前 PSSPD 减震结构在有限元模拟中的空白及其减震性能评价的不足,本文通过对其减振机理及颗粒运动状态的分析,构建了 PSSPD 在通用有限元中的复合模拟单元,确定了 PSSPD 在多层结构中的最优布置方案,并提出了减震结构的减震性能评价方法及设计流程,继而对 PSSPD 在多层结构中的布置方案及减震效果进行了深入研究。得到的主要结论为:

1) 通过深入剖析 PSSPD 的减振机理及颗粒的运动状态,用 Gap 单元、Linear 单元、Damper 单元和集中质量形成的复合单元对 PSSPD 的减振性能进行模拟,并与数值模拟结果进行对比分析,验证了复合单元模拟 PSSPD 减振性能的合理性、可行性及准确性。

2) 基于对颗粒质量、颗粒运动间距及 PSSPD 减震效果之间关系的理论分析,确定了颗粒质量按振型分布及颗粒运动间距按层间位移反比分布的最优布置方案,通过不同 PSSPD 布置方案减震效果的对比,证明了最优布置方案的合理性和可行性。

3) 通过对 PSSPD 减震结构碰撞过程及其能量变化的分析,提出了地震动下 PSSPD 离散控制效果的动态附加等效阻尼比计算方法,该方法能够全面而细致地评价 PSSPD 减震结构的减震性能。

4) PSSPD 减震结构有限元模拟的分析结果表明 PSSPD 能够有效减轻受控结构楼层的动力响应,且具有灵活布置、鲁棒性强和可更换等特点。

参考文献:

- [1] Fricke J R. Lodengraf damping: an advanced vibration damping technology [J]. SV Sound and Vibration, 2000, 34(7): 22-27.
- [2] Mao K, Wang M Y, Xu Z, et al. Simulation and characterization of particle damping in transient vibrations [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2004, 126(2): 202-211.
- [3] 闫维明,王宝顺,黄绪宏.颗粒阻尼器的研究进展及其在土木工程中的应用展望 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 1-10.
Yan Weiming, Wang Baoshun, Huang Xuhong. Research progress of particle damper and its application prospect in civil engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(5): 1-10.
- [4] Lieber P, Jenson D P. An acceleration damper: development, design and some application [J]. Transactions of the ASME, 1945, 67(7): 523-530.
- [5] Zhang K, Chen T, Wang X, et al. Rheology behavior and optimal damping effect of granular particles in a non-obstructive particle damper [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 364(5): 30-43.
- [6] 闫维明,王宝顺,何浩祥.并联式单向单颗粒阻尼器力学模型及优化分析 [J]. 工程力学, 2020, 37(7): 138-150.
Yan Weiming, Wang Baoshun, He Haoxiang. Mechanical model and optimal analysis of parallel single-dimensional single particle damper [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(7): 138-150.
- [7] Masri S F, Caughey T K. On the stability of the impact damper [J]. Journal of Applied Mechanics, 1966, 33(3): 586-592.
- [8] Masri S F. Analytical and experimental studies of multiple-unit impact dampers [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1969, 45(5): 1111-1117.
- [9] 王宝顺,闫维明,何浩祥,等.考虑摩擦效应的颗粒阻尼器力学模型研究及参数分析 [J]. 工程力学, 2019, 36(6): 109-118.
Wang Baoshun, Yan Weiming, He Haoxiang, et al. Mechanical model and parameter analysis of particle damper with considering friction effect [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 109-118.
- [10] 王宝顺,闫维明,何浩祥,等.基于能量法的颗粒阻尼器减振机理研究及参数分析 [J]. 振动工程学报, 2019, 32(3): 386-395.
Wang Baoshun, Yan Weiming, He Haoxiang, et al. Parameter analysis and research on the vibration damping mechanism of particle damper based on energy theory [J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(3): 386-395.
- [11] 闫维明,王瑾,许维炳.基于单自由度结构的颗粒阻尼减振机理试验研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(S1): 76-82.
Yan Weiming, Wang Jin, Xu Weibing. Experimental research on the control mechanism of particle damping based on a single degree of freedom structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(S1): 76-82.
- [12] Saeki M. Analytical study of multi-particle damping [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 281(3-5): 1133-1144.
- [13] Mao K, Wang M Y, Xu Z, et al. DEM simulation of particle damping [J]. Powder Technology, 2004, 142(2-3): 154-165.
- [14] Saeki M. Impact damping with granular materials in a horizontally vibrating system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 251(1): 153-161.

- [15] 程杨. 颗粒阻尼参数的试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
Cheng Yang. Experimental study on the parameters of particle damper [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- [16] 黄韵文. 颗粒阻尼器性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
Huang Yunwen. Research on performance of particle damper [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
- [17] Xia Zhaowang, Liu Xiandong, Shan Yingchun. Application of particle damping for vibration attenuation in brake drum [J]. International Journal of Vehicle Noise and Vibration, 2011, 7(2): 178-194.
- [18] 夏兆旺, 单颖春, 刘献栋. 基于悬臂梁的颗粒阻尼实验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 1737-1741.
Xia Zhaowang, Shan Yingchun, Liu Xiandong. Experimental research on particle damping of cantilever beam [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22 (10) : 1737-1741.
- [19] Rong K, Lu Z. An improved ESM-FEM method for seismic control of particle tuned mass damper in MDOF system[J]. Applied Acoustics, 2021, 172:1-15.
- [20] Li K, Darby A P. A buffered impact damper for multi-degree-of-freedom structural control [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37 (13): 1491-1510.
- [21] 鲁正, 张鼎昌, 吕西林. 采用颗粒调谐质量阻尼器的钢框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38 (4):10-17.
Lu Zheng, Zhang Dingchang, Lü Xilin. Shaking table test of steel frame structure with particle tuned mass damper [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38 (4):10-17.
- [22] 王瑾, 许维炳, 闫维明, 等. 颗粒阻尼器布置方案对其减震效果影响研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(14): 29-35.
Wang Jin, Xu Weibing, Yan Weiming, et al. Influences of the layout scheme of particle dampers on its vibration control effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(14): 29-35.
- [23] 李正英, 刘斌, 杨跃威. 强震作用下曲线连续梁桥碰撞响应分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(S1): 349-355.
Li Zhengying, Liu Bin, Yang Yuewei. Seismic pounding analysis of curved continuous girder bridge under strong earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1): 349-355.
- [24] Ismail Mohammed. Inner pounding control of the RNC isolator and its impact on seismic isolation efficiency under near-fault earthquakes [J]. Engineering Structures, 2015, 86: 99-121.
- [25] 翁大根, 李超, 胡岫岩, 等. 减震结构基于模态阻尼耗能的附加有效阻尼比计算[J]. 土木工程学报, 2016, 49 (S1):19-24.
Weng Dagen, Li Chao, Hu Xiuyan, et al. Calculation of additional effective damping ratio of structures based on modal damping energy dissipation [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(S1):19-24.

Finite element analysis and damping performance of structure system with distributed parallel single-dimensional single particle dampers

WANG Bao-shun, HE Hao-xiang, YAN Wei-ming, LAN Bing-ji

(Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult to accurately realize the structure with particle damper in finite element simulation and its evaluation method of seismic performance is not comprehensive, the parallel single-dimensional single particle damper (PSSPD) with high damping efficiency is taken as the research object. Based on intensive analysis of the damping mechanism and particle motion state of PSSPD, its combined simulation element in general finite element analysis is constructed, and the reasonable values of parameters in the element are defined. Then the finite element model of PSSPD is confirmed to have fine accuracy. Next, based on the analysis of the relationship among particle mass, particle motion distance and its damping effect, the optimal layout scheme of particle mass distribution according to vibration mode distribution and particle motion distance distribution according to inverse ratio of interlayer displacement is determined, and the evaluation method of discrete damping control effect of the damping structure system with PSSPD is proposed. An example is given to show the rationality and feasibility of the optimal layout scheme and dynamic additional damping ratio to evaluate the discrete damping effect of PSSPD.

Key words: structural vibration control; particle damper; finite element simulation; layout scheme; damping performance

作者简介: 王宝顺(1991—),男,博士研究生。电话:18701570226;E-mail: 18701570228@163.com。

通讯作者: 何浩祥(1978—),男,教授。E-mail: hhx7856@163.com。