

多重滚动碰撞式调谐质量阻尼器及其减振性能研究

李书进¹, 范沛然¹, 孔 凡², 张远进³, 王雷冲⁴

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 武汉理工大学安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070;
4. 中山市武汉理工大学先进工程技术研究院, 广东 中山 528403)

摘要: 在以往滚动碰撞式调谐质量阻尼器(PTRMD)的研究基础上,提出了一种能分散布设在空腔楼板预制腔体内的多重滚动碰撞式调谐质量阻尼装置(MPTRMD)。该方式隐藏了控制装置,不额外占用建筑的使用空间,不影响结构的布置和使用功能,且布置灵活,可根据优化情况在结构平面和高度方向上按需设置。同时,该装置将振子质量分散到多个阻尼器,使其在不影响减振性能的情况下做到控制装置小型化,从而对有大附加质量需求的质量阻尼器在技术上提供了可能。推导了设有该装置的受控系统动力学方程,并对其减振性能进行了研究。结果表明,所提多重滚动碰撞式调谐质量阻尼装置在不同布置方式下均能有效减小结构的动力响应,具有很强的耗能能力。对于阻尼器拆分数量的分析表明,将PTRMD的振子拆分后,在开始个数不多时阻尼器的控制效果快速提升,但随着数量进一步增多,达到一定程度后,其提升能力趋缓并出现下降趋势,存有一个最优区间。

关键词: 振动控制; 滚动碰撞式调谐质量阻尼器; 多重调谐质量阻尼器; 减振性能; 空腔楼板结构

中图分类号: TB535; TU973.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)03-0796-08

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.03.022

引 言

随着现代工业技术的发展,装配式建筑在中国得到全面推广,空腔楼板因既能减轻构件重量又能体现装配化建造方式,在工程中得到广泛应用^[1-3]。利用该楼板内的空腔,提出了一种可置入其内的滚动式调谐质量阻尼器减振装置(TRMD)^[4],随后为解决腔体空间尺寸有限,TRMD振子行程受限而影响减振效果的问题,又引入碰撞耗能减振思想,提出了一种基于空腔楼板的滚动碰撞式调谐质量阻尼器装置(PTRMD),并对其工作机理和减振性能进行了理论和试验研究^[5-6]。相较于TRMD,PTRMD在滚球振子的移动路径上增加黏弹性限位装置,利用碰撞耗能特性拓宽了阻尼器的有效工作频率范围,同时限制了振子的最大行程,节省阻尼器尺寸使其更加适应腔体空间,应用前景广阔。

由于空腔楼板中的空心腔体一般分布于整个楼板平面,将所提阻尼器进行扩展,形成多重PTRMD(multiple pounding tuned rotary mass damper, MP-TRMD)分置于楼板中的预制腔体内成为必然。该

方式一是隐藏了控制装置,使其不影响结构的布置和使用功能,且布置灵活,可以根据减振优化情况在结构平面和高度方向按需设置,符合提出该构想的初衷;二是为保证减振效果,调谐质量阻尼器往往需要足够大的附加质量,对传统TMD而言,过大的振子质量所占用的空间会与建筑布置及功能产生矛盾,有时会以牺牲减振效果为代价来达到两者的平衡,多重PTRMD能将振子质量分解到多个阻尼器中,对于有大附加质量需求的TMD在技术上提供了可能。

有关多重调谐质量阻尼器(MTMD),已有一些学者从其装置本身、减振机理及应用等方面展开过研究。Abe等^[7]分别采用动力放大系数法和摄动法对设置有MTMD减振装置的结构受简谐激励下的振动控制进行了研究,给出减振机理和参数的摄动解。李春祥等^[8]对结构MTMD地震反应控制的最优参数取值进行了探讨,导出了结构动力放大系统的计算公式,并给出了MTMD的最优参数。涂文戈等^[9]对MTMD在建筑结构多模态减振控制方面进行了研究,结果表明,MTMD多模态控制对结构的相对位移和绝对加速度均有较好的控制效果,且

鲁棒性更好,表现优于TMD。本文将对所提的多重PTRMD展开研究,内容包括动力分析模型的建立、减振性能分析以及阻尼器拆分数影响等,为该阻尼器的应用提供理论基础。

1 MPTRMD及其控制方程的建立

1.1 MPTRMD装置

工程中常见的混凝土空腔楼板是一种先在板内放置空心内模再浇筑混凝土使其内部充满空腔的结构形式,如图1所示。它具有材料省、重量轻,以及装配化程度高等优点。利用其内部空间提出的滚动碰撞式调谐质量阻尼器(PTRMD)如图2所示。PTRMD由弧形轨道、黏弹性限位装置及轨道中的球形振子组成,工作时如振子滚动幅度不大,与限位装置无接触时即为TRMD;当振子滚动幅度大到与限位装置发生撞击时,碰撞耗能发挥作用。这里将振子运行轨道做成弧形能使质量块的初始平衡位置固定,解决了传统碰撞质量阻尼器(PTMD)中质量块的随遇平衡问题^[10-12]。将所提PTRMD装置在不同楼层的板内空腔(如图1所示)中按需分散设置就构成多重滚动碰撞式调谐质量阻尼(MPTRMD)装置。



图1 空腔楼板

Fig. 1 Hollow-ribbed floor

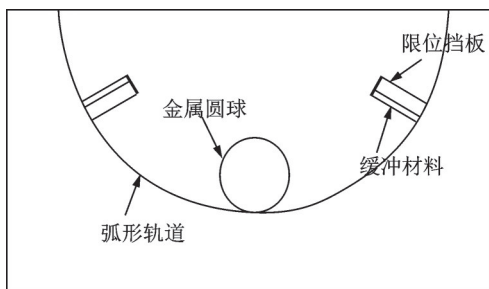


图2 PTRMD装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of PTRMD device

1.2 MPTRMD动力方程的建立

由于PTRMD在工作中需要将振子的滚动频率调至结构控制频率附近,参数设置时将使同一楼层

中各阻尼器的性能保持一致,具有相同参数和动力特性。设有MPTRMD的理想剪切型多层受控结构计算简图如图3所示,图中, M 和 m 分别为楼层质量和阻尼器振子质量; k 和 c 分别为结构层间刚度与阻尼。 n 层主结构中假定有 m 层的空腔楼板内安置了任意多个相同的PTRMD阻尼器。在水平载荷作用下受控结构的运动由两部分组成:一是受控结构与轨道沿载荷作用方向的平动;二是阻尼器中振子沿轨道产生的转角位移,如图4所示。受控结构与轨道的平动自由度共有 n 个,同一楼层的任意个相同PTRMD考虑具有相同的运动,则振子的转动自由度共有 m 个,这样受控结构共有 $n+m$ 个自由度。

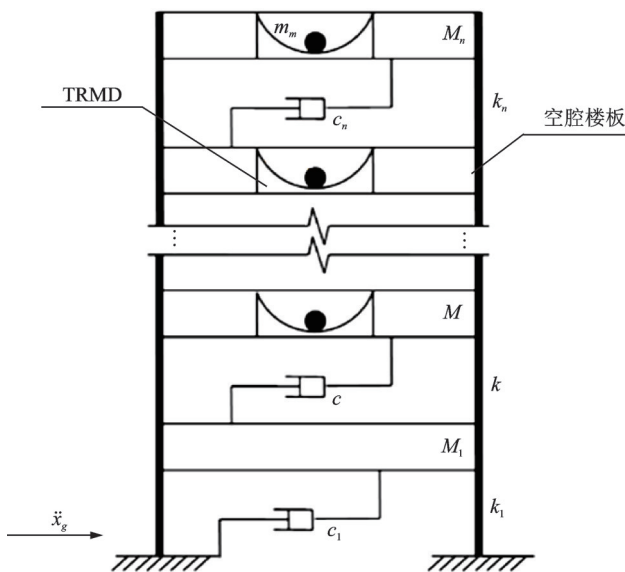


图3 多层受控结构计算简图

Fig. 3 Calculation diagram of multi-layer controlled structure

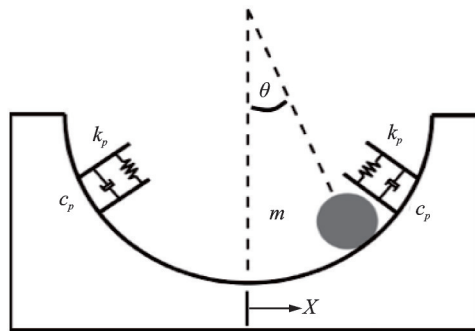


图4 PTRMD动力模型

Fig. 4 Kinetic model of PTRMD

下面采用Lagrange变分原理推导该受控结构的运动方程:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i^{nc}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n+m \quad (1)$$

式中 T 为受控结构体系动能; V 为受控结构体系势能,包括弹性势能与重力势能; q_i 为第 i 广义坐标;

Q_i^{nc} 为对应于广义坐标 q_i 的非保守力。

1.2.1 无碰撞阶段

当 $\theta \leq |\theta_m|$ 时, 这里 θ_m 为振子与限位装置发生碰撞时的角度, PTRMD 的表现与 TRMD 相同, 此时受控体系的动能 T 有主体结构的动能、阻尼器振子平动和绕自身球心转动的动能, 即:

$$T = \left\{ \frac{1}{2} M_j \dot{x}_j^2 + \Gamma \left[\frac{1}{2} N_j m_j (\dot{x}_j + \rho_j \dot{\theta}_j \cos \theta_j)^2 + \frac{1}{2} N_j m_j (\rho_j \dot{\theta}_j \sin \theta_j)^2 + \frac{1}{2} N_j J_j \omega_j^2 \right] \right\};$$

$$j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中 M_j 为第 j 层结构质量; x_j 与 $\dot{x}_j$ 分别为主结构第 j 层楼板相对地面的位移与速度; m_j 为阻尼器振子质量; Γ 为位置函数, 当第 j 层装有 PTRMD 时 $\Gamma = 1$, 否则 $\Gamma = 0$; θ_j 和 $\dot{\theta}_j$ 分别为第 j 层 PTRMD 各小球绕滑道圆心的滚动角位移和角速度; N_j 为第 j 层放置 PTRMD 的个数; $\rho_j = R_j - r_j$ 为滑道半径 R_j 与小球半径 r_j 之差; $J_j = (2/5) m_j r_j^2$ 为小球转动惯量; ω_j 为小球自转角速度。

如考虑 θ_j 为小量时, 式(2)可简化为:

$$T = \left\{ \frac{1}{2} M_j \dot{x}_j^2 + \Gamma \left[\frac{1}{2} N_j m_j (\dot{x}_j^2 + 2 \dot{x}_j \rho_j \dot{\theta}_j + \rho_j^2 \dot{\theta}_j^2) + \frac{1}{5} N_j m_j \rho_j^2 \dot{\theta}_j^2 \right] \right\}; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

结构的势能包括主结构弹性势能和 PTRMD 振子的重力势能, 即

$$V = \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{1}{2} k_j (x_j - x_{j-1})^2 + \Gamma \left[N_j m_j g \rho_j (1 - \cos \theta_j) \right] \right\};$$

$$j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中 k_j 为主结构层刚度; g 为重力加速度。

同样考虑 θ_j 为小量时, 式(4)可简化为:

$$V = \left[\frac{1}{2} k_j (x_j - x_{j-1})^2 + \Gamma \left(\frac{1}{2} N_j m_j g \rho_j \theta_j^2 \right) \right];$$

$$j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

非保守力 Q_j^{nc} ($j = 1, 2, \dots, n$) 可由虚功原理得到, 非保守力所做虚功包括外力做功、结构阻尼力虚功和阻尼器小球滚动摩擦力做功:

$$\delta W = \left\{ \left[F_j - (\dot{x}_j - \dot{x}_{j-1}) c_j + (\dot{x}_{j+1} - \dot{x}_j) c_{j+1} \right] \delta x_j - \Gamma \left(f_j \frac{\delta s_j}{r_j} \right) \right\} \quad (6)$$

式中 c_j 为结构层间阻尼系数; F_j 为作用于结构的

外力; δx_j 与 δs_j 分别为 x_j 与 $s_j = R_j \theta_j$ 的虚位移; f_j 为由轨道提供的滚动摩擦力矩, 可由下式求得:

$$f_j = \frac{\dot{\theta}_j}{|\dot{\theta}_j|} \mu_j S_j = \frac{\dot{\theta}_j}{|\dot{\theta}_j|} \mu_j N_j m_j (g \cos \dot{\theta}_j + \rho_j \dot{\theta}_j^2) \quad (7)$$

式中 S_j 为弧形轨道给小球的向心支持力; μ_j 为滚球振子与弧形轨道接触面的滚动摩擦因数。

结合式(6)与(7), 并做适当简化有:

$$\delta W = \left\{ \left[F_j - (\dot{x}_j - \dot{x}_{j-1}) c_j + (\dot{x}_{j+1} - \dot{x}_j) c_{j+1} \right] \delta x_j - \Gamma \left(\frac{\dot{\theta}_j}{|\dot{\theta}_j|} \mu_j N_j m_j g \frac{\rho_j}{r_j} \delta \theta_j \right) \right\} \quad (8)$$

因此 $n+m$ 个自由度的广义力可表示为:

$$\begin{cases} Q_i^{nc} = F_i + \dot{x}_{i-1} c_i - \dot{x}_i (c_i + c_{i+1}) + \dot{x}_{i+1} c_{i+1}; \\ i = 1, 2, \dots, n \\ Q_i^{nc} = - \frac{\dot{\theta}_i}{|\dot{\theta}_i|} \mu_i N_i m_i g \frac{\rho_i}{r_i}; \\ i = n+1, n+2, \dots, n+m \end{cases} \quad (9)$$

结合式(3), (5)及(9), 并根据拉格朗日定理, 可得到受控体系在 PTRMD 无碰撞时的运动微分方程:

$$(M_i + \Gamma N_i m_i) \ddot{x}_i + \Gamma N_i m_i \rho_i \ddot{\theta}_i + (k_i + k_{i+1}) x_i - k_i x_{i-1} - k_{i+1} x_{i+1} + \dot{x}_i (c_i + c_{i+1}) - \dot{x}_{i-1} c_i - \dot{x}_{i+1} c_{i+1} = F_i; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$\ddot{\theta}_i + \frac{5}{7 \rho_i} \ddot{x}_i + \frac{5 g \theta_i}{7 \rho_i} = - \frac{5 \mu_i g}{7 \rho_i r_i} \frac{\dot{\theta}_i}{|\dot{\theta}_i|}; \quad i = n+1, n+2, \dots, n+m \quad (11)$$

整理得:

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + K q = F \quad (12)$$

式中

$$q = [x_1, x_2, \dots, x_n, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]^T \quad (13)$$

$q, \dot{q}$ 和 $\ddot{q}$ 分别为 $n+m$ 维广义位移、速度和加速度; M, C, K 分别为受控体系 $(n+m) \times (n+m)$ 维质量、阻尼、刚度矩阵; F 为 $n+m$ 维外力列向量。

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 \\ M_3 & M_4 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} F_n \\ F_m \end{bmatrix} \quad (14)$$

子矩阵 K_1, C_1 为主结构的刚度、阻尼矩阵, 其他分别为:

$$M_1 = \begin{bmatrix} M_1 & & \\ & M_2 & \\ & & \dots \\ & & & M_n \end{bmatrix} + \text{dia}(HN_i m_i), \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad M_2 = \begin{bmatrix} N_1 m_1 \rho_1 & \dots & \\ & \dots & \\ & & N_m m_m \rho_m \end{bmatrix}_{n \times m};$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} \frac{5}{7\rho_1} \\ \vdots \\ \frac{5}{7\rho_m} \end{bmatrix}_{m \times n}; \quad M_4 = \mathbf{I}_{m \times m}; \quad K_2 = \frac{5g}{7} \begin{bmatrix} 1/\rho_1 & & \\ & 1/\rho_2 & \\ & & \dots \\ & & & 1/\rho_n \end{bmatrix};$$

$$F_n = [F_1 \ F_2 \ \dots \ F_n]^T; \quad F_m = \begin{bmatrix} -\frac{5\mu_1 g}{7\rho_1 r_1} \frac{\dot{\theta}_1}{|\dot{\theta}_1|} - \frac{5\mu_2 g}{7\rho_2 r_2} \frac{\dot{\theta}_2}{|\dot{\theta}_2|} \dots - \frac{5\mu_m g}{7\rho_m r_m} \frac{\dot{\theta}_m}{|\dot{\theta}_m|} \end{bmatrix}^T$$

其中, H 为位置向量, 为 n 维列向量, 设置有 PTRMD 的楼层对应元素数值为 1, 没设置的为 0; F_m 为振子与轨道的非线性滚动摩擦力项, 与速度相关, 既可放方程左边按阻尼项进行处理, 也可放方程 (12) 右边按外力项进行处理, 这里是按外力的方式进行处理。

1.2.2 碰撞阶段

当 $\theta \geq |\theta_m|$ 时, 振子将与限位装置发生碰撞, 建立方程时需考虑碰撞模型。最简单的碰撞模型是刚性碰撞模型, 即碰撞过程中碰撞体不产生任何变形, 由动量守恒和能量守恒定律控制, 碰撞力与位移之间是线性变化的, 方程简单, 但与本装置的差别较大。对本装置而言, 挡板采用的是耗能能力强的黏弹性材料, 属于非线性碰撞, 需采用非线性碰撞模型。这里采用 Hertz 非线性碰撞模型进行模拟^[13-14], 该模型将能量的损失过程细化, 认为能量的损失只发生在碰撞过程中变形为压缩的阶段, 恢复阶段不损失能量, 因此, 其碰撞力 P 分段表达式如下:

$$P = \begin{cases} k_p \delta^{\frac{3}{2}}(t) + c_p \dot{\delta}(t), & \dot{\delta}(t) > 0 \\ k_p \delta^{\frac{3}{2}}(t), & \dot{\delta}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中 k_p 为等效碰撞刚度, 可通过碰撞试验得到; $\delta(t) = \rho(\theta - \theta_m)$ 为碰撞时变形位移; c_p 为两碰撞体 (质量分别为 m_1 和 m_2) 与 $\delta(t)$ 相关的等效阻尼系数, 按下式计算:

$$c_p = 2\xi \sqrt{k_p \sqrt{\delta(t)} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad (16)$$

式中 ξ 为阻尼比, 可通过恢复系数 e 得到, 如下式:

$$\xi = \frac{9\sqrt{5}}{2} \frac{1 - e^2}{e[e(9\pi - 16) + 16]} \quad (17)$$

本阶段受控体系的动能与势能仍按式 (2), (4) 计算, 但非保守力所做的虚功需在式 (6) 的基础上增

加碰撞力所做虚功, 即:

$$\delta W = \sum_{j=1}^n \left\{ \left[F_j - (\dot{x}_j - \dot{x}_{j-1})c_j + (\dot{x}_{j+1} - \dot{x}_j)c_{j+1} \right] \delta x_j - \Gamma \left[P_j \delta(\theta_j, \dot{\theta}_j) + f_j \frac{\delta s_j}{r_j} \right] \right\}; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

此时 $n+m$ 个自由度的广义力可表示为:

$$\begin{cases} Q_i^{nc} = F_i + \dot{x}_{i-1}c_i - \dot{x}_i(c_i + c_{i+1}) + \dot{x}_{i+1}c_{i+1}; \\ i = 1, 2, \dots, n \\ Q_i^{nc} = -P_i - \frac{\dot{\theta}_i}{|\dot{\theta}_i|} \mu_i N_i m_i g \frac{\rho_i}{r_i}; \\ i = n+1, n+2, \dots, n+m \end{cases} \quad (19)$$

式中 P_i 为第 i 层 PTRMD 振子的碰撞力。

结合式 (3), (5) 及 (19), 并根据拉格朗日定理可得到碰撞阶段的动力方程, 方程中受控体系前 n 个平动自由度同式 (10), 后 m 个小球滚动的运动方程按下式描述:

$$\ddot{\theta}_i + \frac{5}{7\rho_i} \ddot{x}_i + \frac{5g\theta_i}{7\rho_i} = -\frac{5P_i}{7N_i m_i \rho_i^2} - \frac{5\mu_i g}{7\rho_i r_i} \frac{\dot{\theta}_i}{|\dot{\theta}_i|}; \quad i = n+1, n+2, \dots, n+m \quad (20)$$

式 (10), (20) 可以整理成与式 (12) 同样的矩阵形式, 整理后的 M, C, K 不变, 与式 (14) 相同, 但描述振子所受外力的 F_m 子矩阵则变为:

$$F_m = \begin{bmatrix} -\frac{5P_1}{7N_1 m_1 \rho_1^2} - \frac{5\mu_1 g}{7\rho_1 r_1} \frac{\dot{\theta}_1}{|\dot{\theta}_1|} - \frac{5P_2}{7N_2 m_2 \rho_2^2} \\ -\frac{5\mu_2 g}{7\rho_2 r_2} \frac{\dot{\theta}_2}{|\dot{\theta}_2|} \dots - \frac{5P_m}{7N_m m_m \rho_m^2} - \frac{5\mu_m g}{7\rho_m r_m} \frac{\dot{\theta}_m}{|\dot{\theta}_m|} \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

与无碰撞阶段 F_m 不同的是, 在有碰撞阶段振子所受非保守力除振子与轨道的摩擦力项外, 还含有与限位装置碰撞产生的碰撞力项。

2 MPTRMD 的减振性能分析

这里以某实际高层钢框架结构的简化模型为例,对 MPTRMD 的减振性能进行探讨。该结构平面尺寸为 40 m×25.8 m,其中纵向有 5 跨,跨距均为 8 m;横向有 3 跨,跨距分别为 9.8、6.2 和 9.8 m,共 20 层,除首层层高为 3.6 m 外,其余各层层高均为 3.3 m,总层高为 66.3 m。框架柱采用焊接方钢管截面,框架梁采用工字钢梁。经计算,结构的前 4 阶自振频率分别为 0.53、1.51、2.49 和 3.39 Hz。

2.1 阻尼器布置方案

取结构总质量的 2%^[15],约 488.82 t 为调谐质量阻尼器振子的总质量。结合结构平面实际情况将该质量均分成 15000 个小型 PTRMD,每个阻尼器振子(小球)的质量为 32.59 kg,分 5 层密布于结构平面的空心腔体中,每层布置 3000 个。采用铁质振子,经计算小球半径约为 0.1 m。本算例采用两种布置策略进行探讨:

(1)集中式布置(MPTRMD):将阻尼器布置在结构顶部 5 层(如图 5 所示),控制结构的第一阶响应,实施时将所有阻尼器的滚动频率调至结构第一阶频率附近^[16-17],即 0.53 Hz。

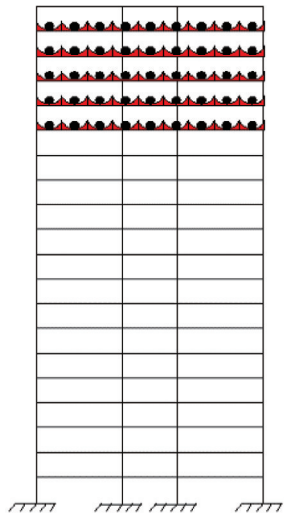


图 5 集中式布置
Fig. 5 Centralized setting (MPTRMD)

(2)分布式布置(DMPTRMD):该方式控制结构的前三阶响应。根据结构各振型参与系数及振型幅值情况将 5 层阻尼器中的 3 层布设在结构顶端,并将阻尼器的滚动频率调至结构第一阶频率附近,以控制结构第一阶响应;另 2 层分别布置在结构的第 8 和第 14 层,用来控制结构的第二和第三阶响应,阻尼器的滚动频率相应分别调至结构第二阶频率 1.51 Hz

和第三阶频率 2.49 Hz 附近,如图 6 所示。阻尼器碰撞角度 θ_m 取 0.4 rad;轨道摩擦因数 μ_f 取 0.0129。

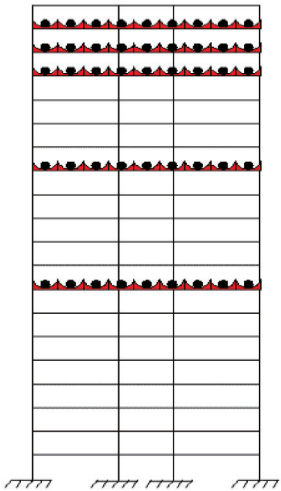
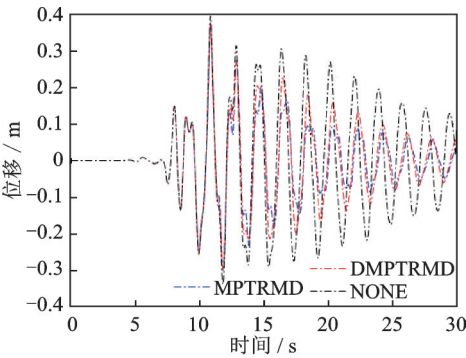


图 6 分布式布置
Fig. 6 Distributed setting (DMPTRMD)

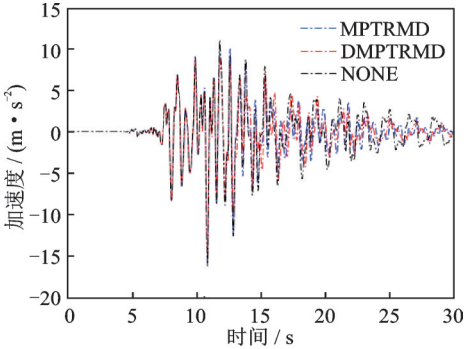
2.2 MPTRMD 减振性能分析

选取 1995 年日本神户实际强震记录 Kobe 波作为地震动激励,将其加速度峰值调至 310 cm/s²(对应设计基本加速度为 0.15g 时的 7 度罕遇地震),分别计算上述模型结构在未控和受控下的动力响应,探讨 MPTRMD 在地震作用下的减振效果。

图 7 为根据本文推导的 MPTRMD 控制方程计



(a) 位移响应
(a) Displacement response



(b) 加速度响应
(b) Acceleration response

图 7 Kobe 波作用下未控与受控结构的动力响应
Fig. 7 Dynamic response of controlled and uncontrolled structures under Kobe waves

算所得模型结构,在 Kobe 波地震作用下未控和两种阻尼器布置方式下的受控结构动力响应时程对比图。可以看出,MPTRMD 和 DMPTRMD 两种布置方式对结构的地震反应均有一定的减振作用。其对于位移和加速度峰值反应虽有一定的抑制作用,但效果不十分明显,主要原因是地震波的峰值响应一般出现在发生前期,此时振子处于启动初期,小球滚动角位移不大,没能及时耗散地震能量,但随着地震能量的持续输入,小球角位移增大,阻尼器逐渐发挥作用,减振效果明显,这一点在图 8 所示的反映整个时间尺度上的响应均方根对比图上更能清晰看出。图 8 显示了 Kobe 波作用下未控和受控结构动力响应均方根沿结构高度方向各层的数值对比,可以看到,受控后的结构在各层平面上的各动力反应均方根值均有

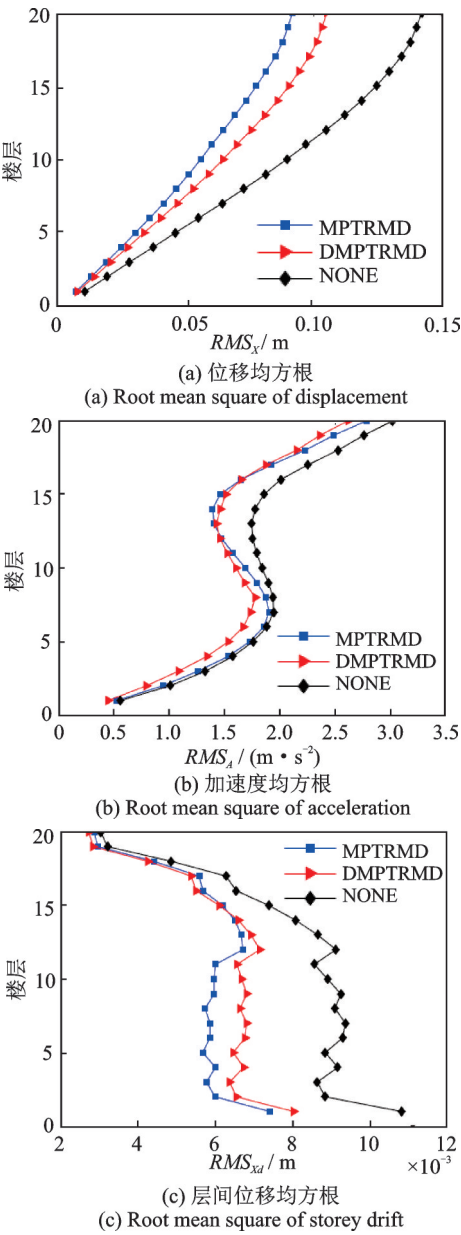


图 8 Kobe 波作用下未控与受控结构响应均方根
Fig. 8 RMS of uncontrolled and controlled structures response under Kobe waves

较大程度的降低,特别是最能反映结构变形程度的层间位移有明显减小,阻尼器控制效果明显。

为了解阻尼器不同布置方式下的减振情况,表 1 列出了 Kobe 波作用下模型结构分别在两种布置方式时的减振率,总体上看以控制第一阶响应为主的集中式布置(MPTRMD)和控制前三阶响应为主的分布式布置(DMPTRMD)表现有所差异,各有侧重,对于第一阶振型贡献较大的本算例,集中式布置总体上略强于分布式布置。

表 1 两种布置方式的减振性能

Tab. 1 Vibration reduction performance of two models

布置方式	最大值响应减振率/%			均方根响应减振率/%		
	位移	加速度	层间位移	位移	加速度	层间位移
MPTRMD	5.04	2.62	11.43	35.42	7.78	31.50
DMPTRMD	5.56	7.45	14.94	26.00	13.27	25.81

2.3 阻尼器拆分个数对控制效果的影响

将质量阻尼器中的振子拆分形成多重质量阻尼器,拆分个数是对控制效果有很大影响的重要参数,这里以本节算例为例对该问题进行探讨。

算例中振子总质量保持不变,而将每层分解的阻尼器个数分别按 100, 300, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 8000, 10000(阻尼器总个数乘 5)16 种工况进行计算,得到两种布置方式下各工况位移响应均方根的减振率如图 9 所示。可以看出,将单个小球质量分散后,在开始个数不多的情况下多重阻尼器的控制效果有快速的提升,但随着个数进一步增多其控制效果渐渐趋于平缓,并出现下降趋势。上述现象表明,传统单个质量阻尼器由于振子质量较大,启动困难,将其分解成多个阻尼器能有效提高减振效率,但数量达到一定程度后,其提

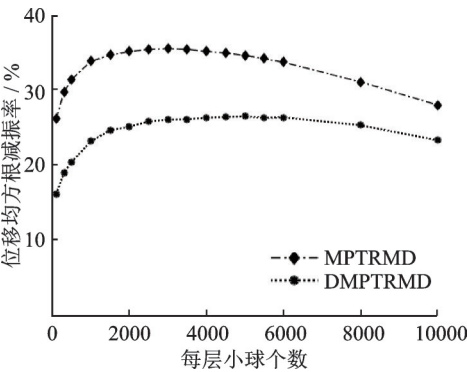


图 9 不同小球个数的减振性能
Fig. 9 Vibration reduction performance with different numbers of balls

升能力趋缓甚至下降,因此存在一个最优区间。对于本例在每层布设 3000 个左右阻尼器,即可使其减振效果最佳。

3 结 论

将本课题组所提的滚动碰撞式调制质量阻尼器(PTRMD)进行扩展,提出了一种能分散布设在空腔楼板预制腔体内的多重滚动碰撞式调谐质量阻尼装置(MPTRMD)。利用 Lagrange 变分原理建立了设有该装置的受控系统动力学方程,并对其减振性能进行了探讨,得到的结论如下:

(1)分别采用控制结构第一阶响应的集中式布置和控制前三阶响应的分布式布置对一高层建筑的减振性能进行了数值分析,计算表明两种布置方式对结构的地震反应均有一定的控制作用,但对于响应减振效果各有侧重。对本算例,由于第一振型贡献较大,总体上集中式布置方式略强于分布式布置。

(2)MPTRMD 在地震作用初期对于响应的抑制效果不太显著,不过随着地震能量的持续输入,阻尼器逐渐发挥作用,减振效果明显,特别是在反映整个响应时间尺度上的均方根方面均有较大程度的降低。

(3)对于阻尼器拆分数量的分析表明,将 PTRMD 的振子拆分后,在开始个数不多的情况下多重阻尼器的控制效果有快速的提升,说明将其分解成多个小质量的 PTRMD 能有效提高其减振效率。但随着数量进一步增多,达到一定程度后,其提升能力趋缓并出现下降趋势,因此存在一个最优区间。

参考文献:

- [1] 陈颖环,傅礼铭.双向密肋空腔楼盖技术在大型商业建筑中的应用[J].华中建筑,2007,25(10):32-34.
Chen Y H, Fu L M. Application of waffle cavity slab technology in large-scale commercial architecture[J]. Huazhong Architecture, 2007, 25(10): 32-34.
- [2] Churakov A. Biaxial hollow slab with innovative types of voids[J]. Construction of Unique Buildings and Structures, 2014, 21(6): 70-88.
- [3] 吕伟荣,姚帅,李强,等.宽扁梁现浇空心楼板竖向受力性能研究[J].建筑结构,2020,50(15):63-68.
Lü W R, Yao S, Li Q, et al. Study on vertical mechanical performance of cast-in-situ hollow floor with wide flat beam[J]. Building Structure, 2020, 50(15): 63-68.
- [4] 李书进,丁注秋,孙磊,等.基于空腔楼板的 RTMD 减震技术及试验研究[J].建筑科学与工程学报,2020,37(3):37-44.
- Li S J, Ding Z Q, Sun L, et al. RTMD damping technology based on hollow floor and experimental study[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 37-44.
- [5] 李书进,杨微婷,杜政康,等.滚动碰撞式调制质量阻尼器及其减振性能研究[J].振动工程学报,2018,31(5):845-853.
Li S J, Yang W T, Du Z K, et al. Study on a pounding tuned rotary mass damper and its vibration reduction performance[J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(5): 845-853.
- [6] 李书进,孙磊,余恒,等.滚动碰撞式调制质量阻尼器减振性能试验研究[J].振动工程学报,2020,33(5):861-868.
Li S J, Sun L, Yu H, et al. Experimental study on the vibration control performance of a pounding tuned rotary mass damper[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(5): 861-868.
- [7] Abe M, Fujino Y. Dynamic characterization of multiple tuned mass dampers and some design formulas[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1994, 23(8): 813-835.
- [8] 李春祥,熊学玉.结构 MTMD 地震反应控制最优参数研究[J].振动与冲击,1999,18(1):63-66.
Li C X, Xiong X Y. Research on MTMD optimal parameters to suppress seismic response of structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 1999, 18(1): 63-66.
- [9] 涂文戈,邹银生.MTMD 对建筑结构多模态控制的减震分析[J].地震工程与工程振动,2003,23(5):174-179.
Tu W G, Zou Y S. Study on multistory structures with multi-mode control of MTMD[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2003, 23(5): 174-179.
- [10] Zhang P, Song G B, Li H N, et al. Seismic control of power transmission tower using pounding TMD[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(10): 1395-1406.
- [11] 李英娜,张井财,薛启超.地震作用下 PTMD 对 JZ20-2MUQ 型导管架式海洋平台的减振研究[J].振动与冲击,2017,36(18):238-244.
Li Y N, Zhang J C, Xue Q C. PTMD's vibration reduction effect on the JZ20-2MUQ offshore jacket platform[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(18): 238-244.
- [12] 鲁正,陈筱一,王佃超,等.颗粒调谐质量阻尼器减震控制的数值模拟[J].振动与冲击,2017,36(3):46-50.
Lu Z, Chen X Y, Wang D C, et al. Numerical simulation for vibration reduction control of particle tuned mass dampers[J]. Journal of Vibration and Shock,

- 2017, 36(3): 46-50.
- [13] Jankowski R. Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2005, 34(6): 595-611.
- [14] Jankowski R. Analytical expression between the impact damping ratio and the coefficient of restitution in the non-linear viscoelastic model of structural pounding[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2006, 35(4): 517-524.
- [15] Rana R, Soong T T. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers[J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(3): 193-204.
- [16] 秦丽, 李业学, 徐福卫. TMD对结构地震响应控制效果的研究[J]. *世界地震工程*, 2010, 26(1): 202-206.
Qin L, Li Y X, Xu F W. Research on control effectiveness of TMD to structural seismic response[J]. *World Earthquake Engineering*, 2010, 26(1): 202-206.
- [17] Ioi T, Ikeda K. Houde damper for a damped vibration system[J]. *Bulletin of JSME*, 1980, 23 (176) : 273-279.

Study on a multiple pounding tuned rotary mass damper and its damping performance

LI Shu-jin¹, FAN Pei-ran¹, KONG Fan², ZHANG Yuan-jin³, WANG Lei-chong⁴

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2.College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3.School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

4.Wuhan University of Technology Advanced Engineering Technology Research Institute of Zhongshan City, Zhongshan 528403, China)

Abstract: Based on the previous research of pounding tuned rotary mass damper (PTRMD), a multiple pounding tuned rotary mass damper (MPTRMD) is proposed, which can be distributed and installed in the prefabricated cavity of the hollow floor slabs. This arrangement of MPTRMD is designed to take advantage of the cavity of the hollow modules thus avoiding extra spatial occupation of the dampers and maintaining the original layouts and functions of the structures. Moreover, this damping method is flexible to be installed in both horizontal and altitude directions of the structures according to the practical needs of the engineering applications. The device separates the practical mass of a single oscillator into multiple lightweight dampers, making it technically possible for the miniaturization and the application of the dampers with large additional mass. The dynamic equation of the controlled system with MPTRMD is derived, and its vibration reduction performance is also studied. The results show that the proposed MPTRMD has strong energy dissipation capacity and can effectively reduce the dynamic responses of the structure with different control schemes. The analysis about the number of dampers split shows that after the PTRMD vibrator is split, the control effect of the damper is rapidly improved when the number is small at the beginning, but with the further increase of the number, after reaching a certain degree, the lifting capacity slows down and has a downward trend, shows that there is an optimal interval.

Key words: vibration control; pounding tuned rotary mass damper; multiple tuned mass damper; vibration reduction performance; hollow-floor structure

作者简介: 李书进(1967—),男,博士,教授,博士生导师。E-mail:sjli@whut.edu.cn。