

引用本文: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 Shu-jin, DING Zhu-qiu, SUN Lei, et al. RTMD Damping Technology Based on Hollow Floor and Experimental Study[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 37-44.

DOI:10.19815/j.jace.2019.07050

基于空腔楼板的 RTMD 减震技术及试验研究

李书进,丁注秋,孙 磊,孔 凡

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070)

摘要:利用目前在建筑物上得到广泛应用的钢筋混凝土空腔楼板结构所具有的空腔特征,提出了一种可置入空腔楼板内部的滚动式调谐质量阻尼装置(RTMD)。对这种减震装置进行了理论与试验研究,建立了该装置与结构相互作用的计算模型,利用 Lagrange 原理推导得到了受控结构的运动微分方程。对装有该装置的单层框架进行了振动台试验,采用自由振动、简谐激励和地震激励 3 种动力作用形式试验研究了设置有该阻尼装置下的结构减震情况。通过数值计算和试验研究对其进行了动力特性和减震性能分析。结果表明:所提装置可以有效减小结构的动力响应,特别是对结构的共振反应具有明显的抑制作用,能大幅减小结构的共振效应;该装置不额外占用建筑的使用空间,不影响结构使用功能,可有效解决控制装置设置与建筑功能相冲突的矛盾,对结构的地震反应也有一定的减震作用,应用前景广阔。

关键词:振动控制;耗能减震体系;空腔楼盖结构;滚动式调谐质量阻尼器;振动台试验

中图分类号:TU352

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)03-0037-08

RTMD Damping Technology Based on Hollow Floor and Experimental Study

LI Shu-jin, DING Zhu-qiu, SUN Lei, KONG Fan

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Based on the cavity characteristics of reinforced concrete hollow-floor structural system, which was widely used in buildings at present, a rolling tuned mass damper (RTMD) which could be placed in the hollow-floor was proposed. The theoretical and experimental research on this kind of damping device was carried out, the calculation model of the interaction between the device and the structure was established, and the motion differential equation of the controlled structure was derived by using the Lagrange principle. The shaking table test of single-layer frame equipped with the device was carried out. The vibration reduction of the structure equipped with the device was studied by three kinds of dynamic action forms of free vibration, simple harmonic excitation and seismic excitation. Through numerical calculation and experimental study, the dynamic characteristics and damping performance of the system were analyzed. The results show that the proposed device can effectively reduce the dynamic response of the structure, especially the resonance response of the structure, and greatly reduce the

收稿日期:2019-07-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51678464)

作者简介:李书进(1967-),男,湖北仙桃人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:sjli@whut.edu.cn。

resonance effect of the structure. The device does not occupy the use space of the building, does not affect the use function of the structure, so it can effectively solve the conflict between the setting of control device and the function of the building, and has a certain damping effect on the seismic response of the structure, so it has a broad application prospect.

Key words: vibration control; energy dissipation system; hollow-floor structure; rolling tuned mass damper; shaking table test

0 引言

在工程结构中恰当地安装耗能减震装置能有效减小结构的动力反应,是当前理论与工程界的重要研究方向^[1-4]。目前,除需对振动控制理论与应用技术做进一步深入研究外,研制和开发新的耗能减震装置也是该领域的一个重要方面。钢筋混凝土空腔楼板是一种先放置空心内模再浇灌混凝土从而内部为空心的楼板形式(图 1),具有质量轻、材料省、保温隔热性能好以及装配率高等特点,正逐步在工程中得到应用^[5-6]。利用空腔楼板中的内部空间,本课题组提出了一种可以置入其中的滚动式调谐质量阻尼器(RTMD)来达到结构减震的目的(图 2)^[7]。与传统的控制装置相比其具有如下优点:①制作方便,容易实现;②控制装置安装在楼板内,不影响结构的布置和使用功能;③属于被动控制技术,不需外加能源;④布置灵活,可以根据优化结果在结构平面内和高度方向灵活布置,特别是对于不规则结构,通过在楼板内不同位置进行合理布置,可以有效地对其扭转影响进行控制;⑤可以形成系列 TMD,鲁棒性更好;⑥控制理论较完备,技术要求较低,便于应用和普及。



图 1 空腔楼板结构
Fig. 1 Hollow-floor Structure

有关滚动式调谐质量阻尼器的研究,国内外学者从装置构造和减震性能等方面进行了一些探讨。Pirner^[8]将滚动式调谐质量阻尼器应用于电视塔结

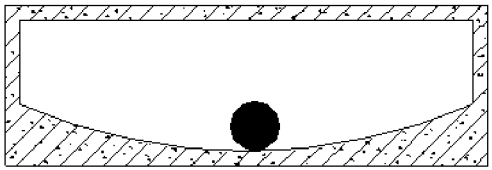


图 2 滚动式调谐质量阻尼器
Fig. 2 Rolling Tuned Mass Damper

构,探讨了该装置在风力作用下的减震性能;Zhang 等^[9-10]将该装置用于风力发电塔的减震,得到了较理想的结果;李书进等^[11]也对该装置的参数优化问题进行了分析。然而将该装置应用于动力荷载作用下建筑结构减震控制的研究则不多。本文将该阻尼器放置于空腔楼盖的预制空心腔体中,形成与建筑形式和谐统一的 RTMD,并对其进行分析和振动台试验,探讨其减震性能。

1 RTMD 的动力分析模型

基于空腔楼板的滚动式调谐质量阻尼器构造类似于传统 TMD:小球振子为质量体系;处于滑道上的小球重力分量提供恢复力;二者之间的滚动摩擦提供装置阻尼。通过对滑道半径、小球振子半径、接触面材料以及振子个数的合理设计,可使 RTMD 中小球滚动频率与结构控制频率调谐,从而达到耗能减震的目的^[7]。

设置有 RTMD 的剪切型多层空间结构计算简图如图 3 所示,其中, M_j, k_j, c_j, m_j 分别为结构第 j 层的质量、刚度、阻尼系数及 RTMD 中小球质量。在水平激励 F_j 作用下,主结构产生沿水平方向的位移,同时空腔中小球将产生沿滑道的转角位移(图 4),共有 $2n$ 个自由度,其中 R_j, r_j 分别为第 j 层 RTMD 滑道和球形振子的半径, θ_j 为第 j 层 RTMD 小球绕滑道圆心滚动的位移角, Ψ_j, ω_j 分别为球形振子的滚动位移角与自转角速度, f_j 为轨道提供的滚动摩擦力, g 为重力加速度, N_j 为滑道提供给小球的法向支持力。

采用 Lagrange 原理推导该受控结构的运动微分方程,即

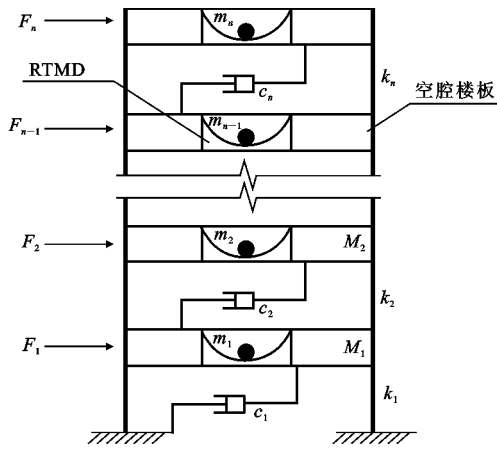


图3 结构计算简图

Fig. 3 Structure Calculation Diagram

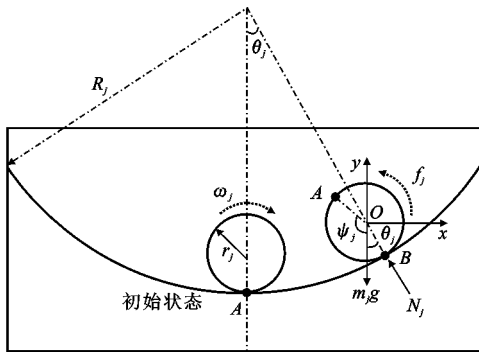


图4 RTMD详图

Fig. 4 Details of RTMD

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

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^{\text{nc}}\$ 为对应于广义坐标 \$q_i\$ 的非保守力; \$t\$ 为时间。

受控结构的动能包括主结构的动能、RTMD 振子平动及绕自身球心转动的动能, 即

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

式中: \$\dot{x}_j\$ 为主结构各层楼板相对地面速度; \$\dot{\theta}_j\$ 为各层 RTMD 小球绕滑道圆心滚动的角速度; \$\rho_j\$ 为 RTMD 滑道半径 \$R_j\$ 与小球半径 \$r_j\$ 之差; \$J_j\$ 为 RTMD 小球转动惯量, \$J_j = 0.4 m_j r_j^2\$。

如考虑 \$\theta_j\$ 为小量, 式(2)可写为

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

受控结构的势能包括主结构弹性势能及 RT-

MD 振子的重力势能, 即

$$V = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} k_j (x_j - x_{j-1})^2 + \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} m_j g \rho_j [1 - \cos(\theta_j)] \quad (4)$$

式中: \$x_j\$ 为主结构各层楼板相对地面位移。

同样考虑 \$\theta_j\$ 为小量时, 式(4)可化为

$$V = \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{2} k_j (x_j - x_{j-1})^2 + \frac{1}{2} m_j g \rho_j \theta_j^2 \right] \quad (5)$$

另一方面, 非保守力 \$Q_j^{\text{nc}}\$ (\$j=1, 2, \dots, 2n\$) 可由虚功原理推导得到。RTMD 中非保守力所做虚功 \$W\$ 包括外力做功、空腔楼板结构阻尼力虚功和 RTMD 小球滚动摩擦力做功, 即

$$W = \sum_{j=1}^n \{ F_j x'_j + [(\dot{x}_j - \dot{x}_{j-1}) c_j + \sum_{j=1}^n (\dot{x}_{j+1} - \dot{x}_j) c_{j+1}] \dot{x}'_j - f_j \frac{\dot{s}'_j}{r_j} \} \quad (6)$$

式中: \$x'_j, s'_j\$ 分别为 \$x_j\$ 与 \$s_j = R_j \theta_j\$ 的虚位移。

经推导得

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

式中: \$\mu_j\$ 为振子与滑道接触面的滚动摩擦因数。

结合式(6)与式(7)并作适当简化可得

$$W = \sum_{j=1}^n \{ F_j x'_j + [(\dot{x}_j - \dot{x}_{j-1}) c_j + \sum_{j=1}^n (\dot{x}_{j+1} - \dot{x}_j) c_{j+1}] \dot{x}'_j - \frac{\dot{\theta}_j}{|\dot{\theta}_j|} \mu_j m_j g \frac{R_j \dot{\theta}'_j}{r_j} \} \quad (8)$$

因此, 与 \$2n\$ 个广义坐标对应的广义位移可写为

$$Q_j^{\text{nc}} = F_j + \dot{x}_{j-1} c_j - \dot{x}_j (c_j + c_{j+1}) + \dot{x}_{j+1} c_{j+1} \quad j=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$Q_{j+n}^{\text{nc}} = - \frac{\dot{\theta}_j}{|\dot{\theta}_j|} \mu_j m_j g (R_j / r_j) \quad j=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

根据式(3), (5), (9), (10)由 Lagrange 原理[式(1)], 受控结构体系的运动微分方程可写为

$$(M_j + m_j) \ddot{x}_j + m_j \rho_j \ddot{\theta}_j + (k_j + k_{j+1}) x_j - k_j x_{j-1} - k_{j+1} x_{j+1} + \dot{x}_j (c_j + c_{j+1}) - \dot{x}_{j-1} c_j - \dot{x}_{j+1} c_{j+1} = F_j \quad j=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$\ddot{\theta}_j + \frac{5 \mu g R_j}{7 \rho_j^2 r_j} \frac{\dot{\theta}_j}{|\dot{\theta}_j|} + \frac{5 g \theta_j}{7 \rho_j} = - \frac{5}{7 \rho_j} \dot{x}_j \quad j=1, 2, \dots, n \quad (12)$$

由式(11), (12)可知, \$-m_j (\ddot{x}_j + \ddot{\theta}_j \rho_j)\$ 为第 \$j\$ 个小球反作用于主结构上的水平控制力; 振子滚动位移角 \$\theta_j\$ 取决于结构水平方向的加速度 \$\ddot{x}_j\$, 其自振频率 \$\omega_{0,j}\$ 为

$$\omega_{0,j} = \sqrt{\frac{5g}{7\rho_j}} \quad j=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

可以看出,RTMD 小球振动频率由振子和滑道半径的差决定,与振子质量无关,与文献[8],[9]类似。为使 RTMD 充分发挥作用,与传统 TMD 一样通常将它的频率调谐至结构基频附近^[12-15]。

2 RTMD 减震分析

选取单自由度空腔楼板受控结构作为分析算例,利用 Newmark-β 方法对方程进行求解。模型参数如下:主结构质量 $M=840\text{ kg}$,刚度 $k=170\ 520\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,阻尼比 $\zeta=0.02$,自振频率 $\omega_0=2.27\text{ Hz}$;取小球滚动摩擦因数 $\mu=0.05$,小球质量与主结构的质量比为 0.04 ,材料为铸铁(密度为 $7\ 800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$),经计算半径为 0.1 m 。将 RTMD 自振频率调至结构自振频率附近,计算得到滑轨半径为 0.134 m 。采用 Kobe 波和 El Centro 波作为激励,幅值分别为 $0.05g,0.1g,0.2g$,研究 RTMD 在不同地震波、不同峰值加速度作用下的减震效果。

图 5~10 分别为 3 种不同峰值加速度的 Kobe 波和 El Centro 波作用下结构减震前后的位移响应对比,以及同时刻的小球滚动位移角情况。定义位移削减指标 Δ_d 为

$$\Delta_d = \frac{\max|d(t)| - \max|d_c(t)|}{\max|d(t)|} \tag{14}$$

式中: $d_c(t)$ 为结构受控后的位移响应; $d(t)$ 为未受控结构的位移响应。

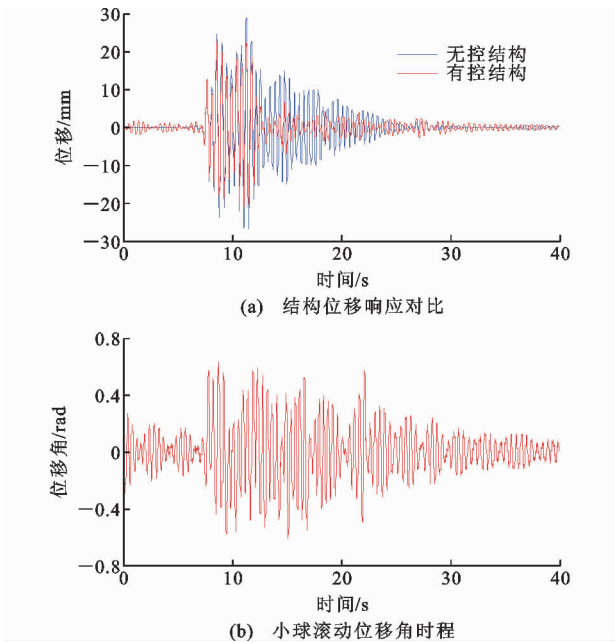
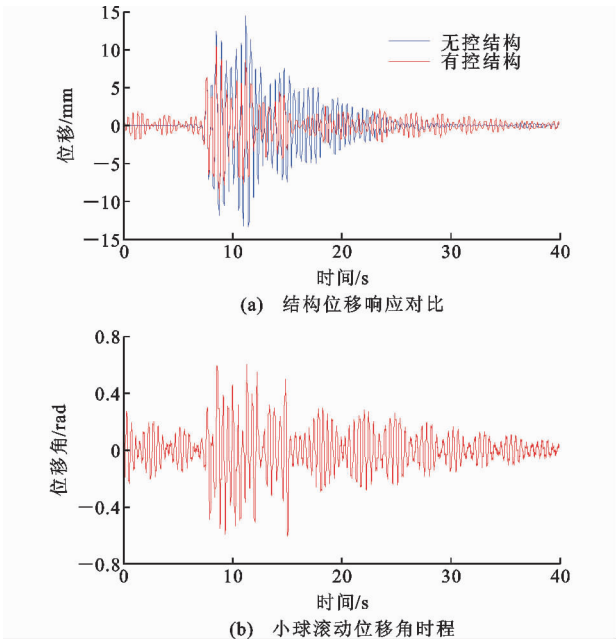


图 6 峰值加速度 0.1g 的 Kobe 波作用下结构响应
Fig. 6 Structural Response Under Kobe Wave with Peak Acceleration 0.1g

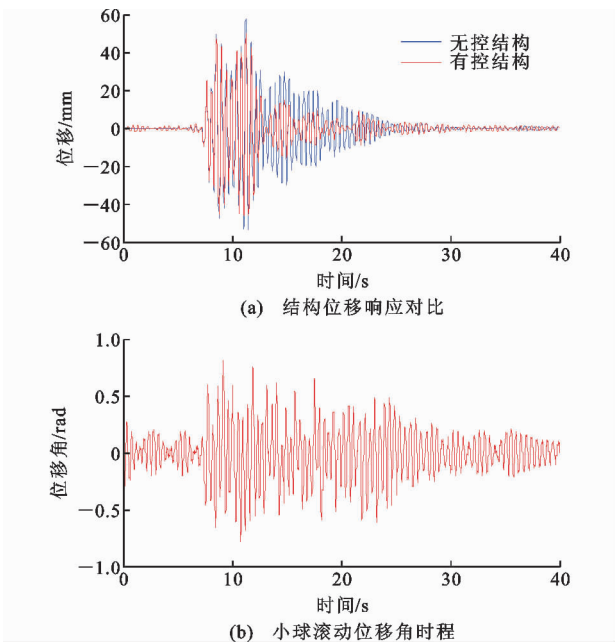


图 7 峰值加速度 0.2g 的 Kobe 波作用下结构响应
Fig. 7 Structural Response Under Kobe Wave with Peak Acceleration 0.2g

计算得 Kobe 波 3 种峰值激励下的位移峰值削减指标分别为 25%,20%,11%,El Centro 波则为 22%,21%,−1%。由此可见,不同的地震激励下 RTMD 的减震效果存在差异,对于本文算例 Kobe 波下的减震效果要好于 El Centro 波。同时,不同峰值水平的地震波激励下 RTMD 的减震效果差别

图 5 峰值加速度 0.05g 的 Kobe 波作用下结构响应
Fig. 5 Structural Response Under Kobe Wave with Peak Acceleration 0.05g

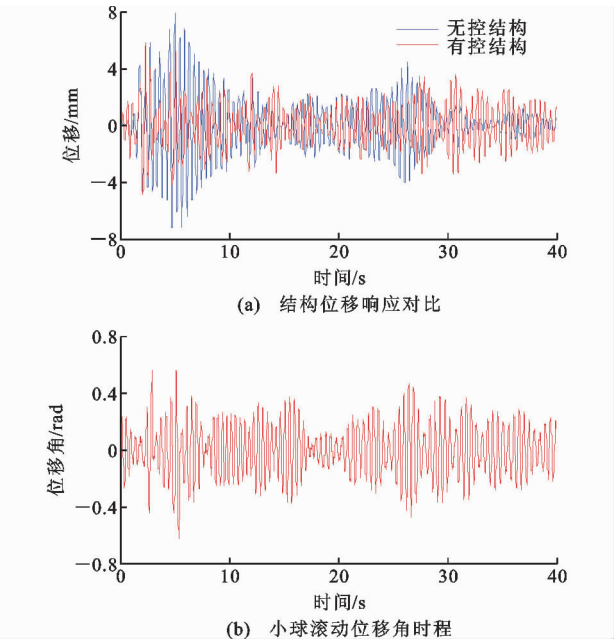


图 8 峰值加速度 0.05g 的 El Centro 波作用下结构响应
Fig. 8 Structural Response Under El Centro Wave with Peak Acceleration 0.05g

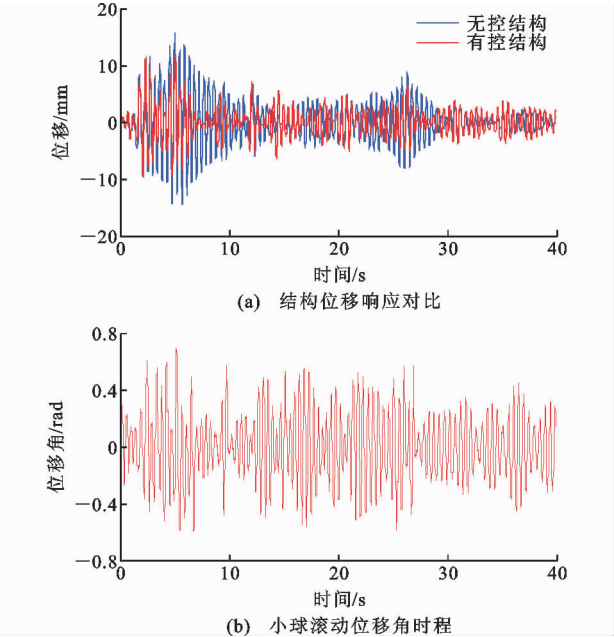


图 9 峰值加速度 0.1g 的 El Centro 波作用下结构响应
Fig. 9 Structural Response Under El Centro Wave with Peak Acceleration 0.1g

较大,激励不大时 RTMD 的减震效果明显,但随着地震动加速度峰值的增大减震效果变弱,甚至在

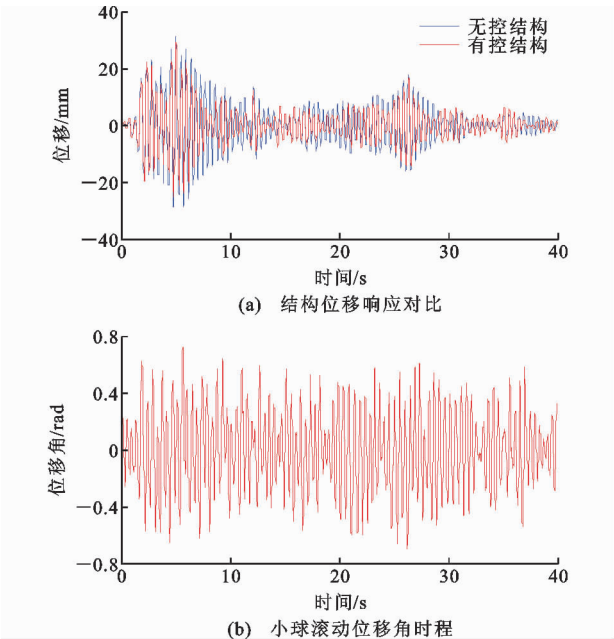


图 10 峰值加速度 0.2g 的 El Centro 波作用下结构响应
Fig. 10 Structural Response Under El Centro Wave with Peak Acceleration 0.2g

El Centro 波时会有放大位移响应的情况,表明该装置对于地震控制有一定的效果但也存在减震的复杂性和不一致性,与传统 TMD 类似^[15-18]。此外,从小球滚动角位移时程可看出 RTMD 的小球振子转角不大,在一定误差范围内可以使用小量假定对控制方程进行简化。

3 试验研究

3.1 试验模型与装置

试验用模型为一个单层框架,减震装置 RTMD 放置在框架顶部。模型结构由 2 个高 400 mm、截面尺寸为 100 mm×1 mm 的不锈钢片和 1 个长 300 mm、截面尺寸为 100 mm×10 mm 的铝合金板刚接组成,其中 2 个不锈钢片模拟框架柱,铝合金板为框架梁,具体参数见表 1。经实测,模型结构自振频率为 2.27 Hz,阻尼比为 0.013。RTMD 的弧形轨道采用铝合金制作,滚球则采用铸铁材料。取小球与主结构的质量比为 0.04,将其滚动频率调至主结构的自振频率 2.27 Hz,经计算可得 RTMD 的各参数如表 2 所示,并据此完成 RTMD 的加工和制作。

加载采用加拿大 Quanser 公司生产的小型振动

表 1 模型参数

Tab. 1 Parameters of Model

不锈钢片尺寸	不锈钢片质量/g	框架梁尺寸	框架梁质量/g	自振频率/Hz	阻尼比
400 mm×100 mm×1 mm	295(单片)	300 mm×100 mm×10 mm	1 090	2.27	0.013

表 2 RTMD 参数

Tab. 2 Parameters of RTMD

轨道半径 R/mm	小球半径 r/mm	小球质量/ g
50	15	120

台进行,工况有自由振动、简谐激励和地震激励等。将结构模型固定在振动台面,在其顶部和台面各布置 1 个加速度计用于记录结构顶部和台面的加速度反应,同时各布置 1 个激光位移计测量结构顶部和台面的位移时程,试验现场照片见图 11。

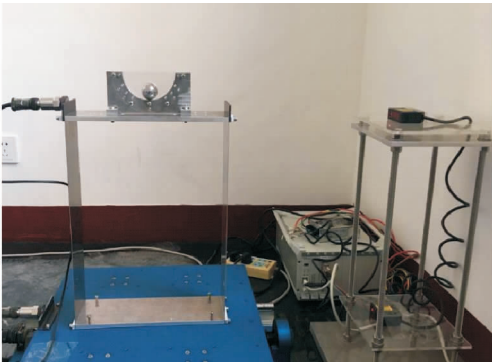


图 11 试验现场

Fig. 11 Test Site

3.2 自由振动

对无控和有控模型结构分别进行自由振动试验,初始位移为 20 mm,测得两者框架顶部位移时程对比曲线如图 12 所示,同时给出了理论计算对比曲线。从图 12 及试验过程可以看到,由于阻尼比小,无控钢框架的自由振动衰减非常缓慢,而安装了 RTMD 的有控结构位移响应衰减迅速,减震效果非常明显。理论计算曲线与试验曲线大致吻合。

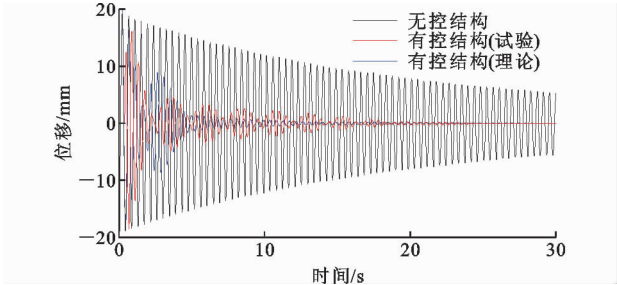


图 12 模型结构有控与无控自由振动位移时程曲线对比

Fig. 12 Comparison of Displacement Time History Curves of Controlled and Uncontrolled Free Vibration of Model Structure

3.3 简谐激励

采用频率在模型自振频率附近的简谐波对框架进行激励。为对比分析 RTMD 在不同频率简谐激励下的减震情况,试验选用了频率范围在 2.0~2.5 Hz 之间的简谐波,含盖了框架结构的自振频率。图

13 为有控和无控结构在激励频率为 2.27 Hz,即结构发生共振时的位移反应曲线,可以看出 RTMD 的设置大幅抑制了结构的共振响应,位移削减指标达到 67%。对于不同频率的简谐激励,将其试验结果汇总并量纲一化后的对比见图 14,其中横坐标频率比为简谐激励的频率与主结构的自振频率之比;纵坐标为位移削减指标。可以看到,RTMD 在外激励频率与主结构自振频率相等或接近时减震效果最好,随着激励频率偏离结构自振频率减震效果逐步降低,但还是能在一定宽度的频段上抑制主结构的振动响应,特别是当外激励频率大于主结构的自振频率时。当外激励频率往小于主结构自振频率的方向偏离时,阻尼器的减震能力弱化较快,甚至当频率比小于 0.92 时反而会增大结构的响应,反映了该装置也存有与传统 TMD 一样的控制频带不宽、鲁棒性不强的弱点^[14]。

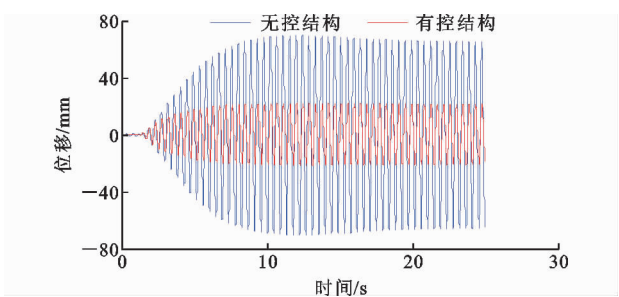


图 13 主结构共振时框架顶部位移时程曲线

Fig. 13 Top Displacement Time History Curve of Frame in Resonance of Main Structure

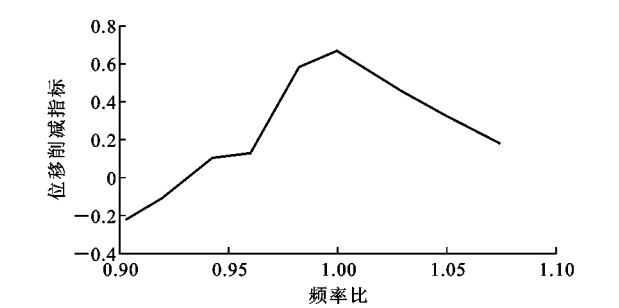


图 14 不同频率简谐激励下的减震情况

Fig. 14 Vibration Reduction Under Harmonic Excitation of Different Frequencies

3.4 地震激励

采用峰值加速度分别为 0.1g、0.2g 的 Kobe 波和 El Centro 波对模型进行激励,研究所提装置对结构的减震情况。图 15、16 分别为无控和有控结构在不同地震波、不同峰值加速度下的位移响应对比,可以看出,装 RTMD 减震装置后结构的地震反应均有不同程度的降低,特别是地震动的后半段。试验

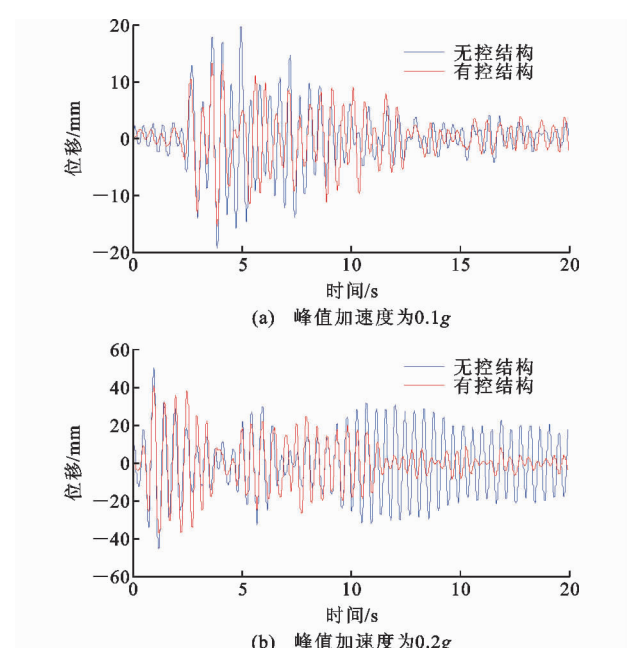


图 15 Kobe 波作用下结构响应

Fig. 15 Structural Response Under Kobe Wave

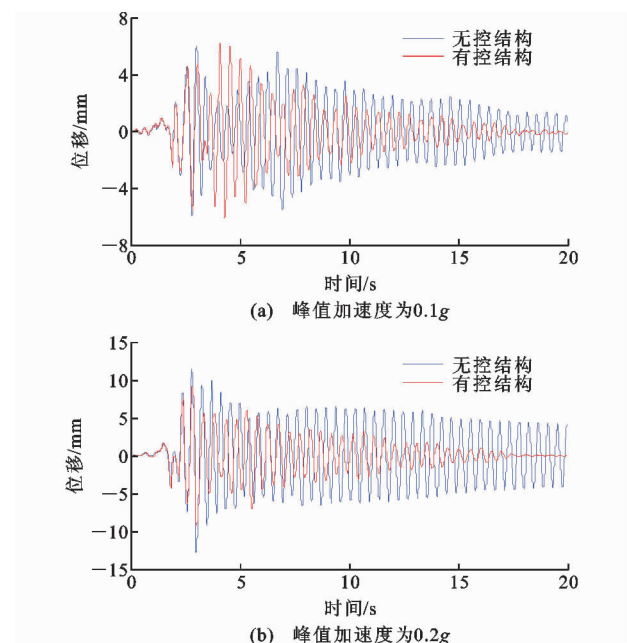


图 16 El Centro 波作用下结构响应

Fig. 16 Structural Response Under El Centro Wave

过程中的观察也发现,在地震激励的初期,小球还未滚动起来,结构的反应没能得到有效控制,但当小球滚动起来以后,主结构的反应得到明显的控制,表明 RTMD 阻尼器的减震具有一定的滞后性^[18-19]。

4 结 语

(1)基于空腔楼板的 RTMD 对结构动力反应有明显的抑制作用,且不占用建筑物额外空间,布置灵

活,是一种理想的耗能减震装置。

(2)自由振动下装有该减震装置的有控结构动力响应衰减迅速,减震效果显著。

(3)该减震装置对结构的共振反应具有有明显的抑制作用,能大幅减轻结构的共振效应。

(4)RTMD 装置对结构的地震反应有一定的减震作用,但在地震动复杂、随机性强的影响下,不同地震波的减震效果有所不同,且有一定的滞后性。

(5)基于空腔楼板的 RTMD 减震装置作为一种被动耗能减震体系,还有很多内容需要研究,主要有:在该装置运动方程的推导时,为简化计算采用了 θ 为小量的假定,在激励不强,结构反应不大时问题不大,但对于高烈度或罕遇地震时则并不适用,此时振子冲程进一步加大,甚至与滑道顶部发生碰撞,其减震原理会发生改变;RTMD 对结构地震反应的抑制存有滞后现象,在地震响应前期对结构动力反应影响并不显著,因此有必要在控制装置方面加以改进;多个装置的设置形成多重 RTMD(MRTMD),并对其参数、位置进行优化。

参考文献:

References:

- [1] YAO J T P. Concept of Structural Control[J]. Journal of the Structural Division, 1972, 98(7): 1567-1574.
- [2] 欧进萍. 结构振动控制——主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
OU Jin-ping. Structural Vibration Control — Active, Semi-active and Intelligent Control[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [3] 李春祥. 地震作用下高层建筑 TMD 控制研究与设计[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(6): 746-749.
LI Chun-xiang. TMD Control Research and Design of Tall Buildings Subjected to Seismic Excitation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(6): 746-749.
- [4] ZHANG P, SONG G, LI H N, et al. Seismic Control of Power Transmission Tower Using Pounding TMD[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(10): 1395-1406.
- [5] 李保德, 李晶晶, 傅礼铭. 现浇钢筋混凝土密肋空腔楼盖的协同工作性能[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(10): 44-47.
LI Bao-de, LI Jing-jing, FU Li-ming. Research on the Bonding Properties of Case-in-place Reinforced Concrete Dense Rib Cavity Ceiling[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(10): 44-47.

- [6] 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 Ying-huan,FU Li-ming. Application of Waffle Cavity Slab Technology in Large-scale Commercial Architecture [J]. Huazhong Architecture, 2007, 25 (10):32-34.
- [7] LI S J, FU L M, KONG F. Seismic Response Reduction of Structures Equipped with a Voided Biaxial Slab-based Tuned Rolling Mass Damper [J]. Shock and Vibration, 2015, 2015:760394.
- [8] PIRNER M. Actual Behaviour of a Ball Vibration Absorber [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(8):987-1005.
- [9] ZHANG Z L, CHEN J B, LI J. Theoretical Study and Experimental Verification of Vibration Control of Offshore Wind Turbine by a Ball Vibration Absorber [J]. Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-cycle Design and Performance, 2013, 10(8):1087-1100.
- [10] CHEN J, GEORGAKIS C T. Tuned Rolling-ball Dampers for Vibration Control in Wind Turbines [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(21):5271-5282.
- [11] 李书进,王见祥,孙磊,等.基于空腔楼盖的新型耗能减震装置参数优化[J].建筑科学与工程学报, 2017, 34(2):10-17.
LI Shu-jin, WANG Jian-xiang, SUN Lei, et al. Parameter Optimization of New Energy Dissipation Device Based on Hollow Floor Slab [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(2):10-17.
- [12] 陈鑫,李爱群,张志强,等.自立式高耸结构悬吊式 TMD 减振动力试验与分析[J].振动工程学报, 2016, 29(2):193-200.
CHEN Xin, LI Ai-qun, ZHANG Zhi-qiang, et al. Dynamic Experiment and Analysis of Self-standing High-rise Structures with Pendulum TMD [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(2):193-200.
- [13] 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 Li, LI Ye-xue, XU Fu-wei. Research on Control Effectiveness of TMD to Structural Seismic Response [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(1):202-206.
- [14] RANA R, SOONG T T. Parametric Study and Simplified Design of Tuned Mass Dampers [J]. Engineering Structures, 1998, 20(3):193-204.
- [15] SINGH M P, SINGH S, MORESCHI L M. Tuned Mass Dampers for Response Control of Torsional Buildings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(4):749-769.
- [16] 周锡元,阎维明,杨润林.建筑结构的隔震、减振和振动控制[J].建筑结构学报, 2002, 23(2):2-12, 26.
ZHOU Xi-yuan, YAN Wei-ming, YANG Run-lin. Seismic Base Isolation, Energy Dissipation and Vibration Control of Building Structures [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(2):2-12, 26.
- [17] XIANG P, NISHITANI A. Seismic Vibration Control of Building Structures with Multiple Tuned Mass Damper Floors Integrated [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(6):909-925.
- [18] CARMONA J E C, AVILA S M, DOZ G. Proposal of a Tuned Mass Damper with Friction Damping to Control Excessive Floor Vibrations [J]. Engineering Structures, 2017, 148:81-100.
- [19] GHARIB M, KARKOUB M. Shock-based Experimental Investigation of the Linear Particle Chain Impact Damper [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2015, 137(6):061012.