

文章编号: 1000-5013(2013)01-0072-05

附加新型摩擦阻尼器减震结构的抗震性能分析

张鹏, 郭子雄

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 提出一种新型摩擦阻尼器, 利用理想弹塑性模型模拟阻尼器的恢复力特性. 通过对设置该摩擦阻尼器的耗能减震框架在 3 条地震波作用下进行时程分析, 研究摩擦阻尼器起滑荷载对结构减震性能的影响. 结果表明: 减震结构在小震与大震作用下的位移反应均比未设置减震装置结构大幅减小; 在小震作用下, 减震结构的楼层剪力与摩擦阻尼器的起滑荷载有关; 在大震作用下, 减震结构层间位移角随着阻尼器起滑荷载的增加而减小.

关键词: 摩擦阻尼器; 恢复力模型; 时程分析; 减震结构; 起滑荷载

中图分类号: TU 352.1

文献标志码: A

摩擦阻尼器具有减震效果好、力学模型简单、造价低廉、施工简单等优点, 可应用于新建和加固工程中. 摩擦阻尼装置在小震作用下给主体结构提供附加刚度, 在大震作用下通过滑动摩擦耗散能量, 保护主体结构. Pall 等^[1-2]提出了 Pall 摩擦阻尼器, 并进行循环荷载试验. 试验结果表明, Pall 阻尼器工作性能稳定, 耗能能力强, 滞回曲线接近理想矩形. 潘秀珍等^[3]提出一种长孔螺栓摩擦耗能器偏心支撑钢框架, 并进行低周往复荷载试验. 研究结果表明, 该结构形式具有良好的抗震性能. 本文采用自行提出的恢复力模型模拟阻尼器并对设置新型摩擦阻尼器的耗能减震结构进行时程分析, 研究摩擦阻尼器的起滑荷载对减震结构的影响, 同时, 验证该恢复力模型的适用性.

1 新型摩擦阻尼器恢复力模型

1.1 摩擦阻尼器的特征

新型摩擦阻尼器由开有两组长孔的滑动主板和开有螺栓孔的副板及紧固螺栓组成, 如图 1 所示. 滑动主板和副板间嵌入黄铜摩擦片, 以保持摩擦力稳定. 其工作机理如下: 通过高强螺栓对滑动主板与副板界面施加预紧力, 预紧力的大小由扭力扳手控制; 当作用在滑动主板上的拉力或推力超过摩擦界面的最大静摩擦力时, 滑动主板相对副板产生滑动摩擦来耗散能量.

1.2 新型摩擦阻尼器低周往复荷载试验概况

新型摩擦阻尼器低周往复荷载试验加载装置, 如图 2 所示. 摩擦阻尼器上下端与加载装置和台座连接. 试验采用液压伺服作动器加载, 两个位移计来测量阻尼器的相对滑动. 加载制度为力-位移混合控制, 阻尼器起滑前为力控制, 起滑后为位移控制, 位移幅值分别为 15, 45, 70 mm, 各位移幅值循环 3 次.

1.3 滞回性能及恢复力模型

总预紧力(P)分别为 343, 515 kN 阻尼器的滞回曲线, 如图 3 所示. 从图 3 可以看出: 摩擦阻尼器滞回曲线均呈现矩形, 具有典型的库伦特性, 滞回环面积大, 耗能能力强. 在荷载较小时, 摩擦阻尼器处于附着状态, 随着静摩擦力的增长, 位移增长很少, 阻尼器的位移基本上为弹性位移, 摩擦阻尼器的刚度为弹性刚度; 当荷载达到最大静摩擦力时, 阻尼器开始滑动, 此时, 滑动摩擦力较最大静摩擦力略有下降; 继续加载, 摩擦力基本上保持不变.

收稿日期: 2012-05-21

通信作者: 郭子雄(1967-), 男, 教授, 主要从事工程结构抗震防灾的研究. E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978107)

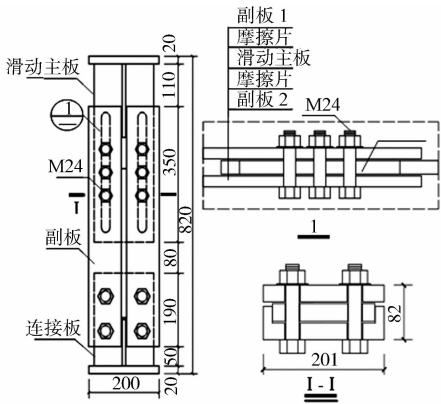


图 1 新型摩擦耗能器(单位:mm)

Fig. 1 A new type of friction damper device (unit:mm)

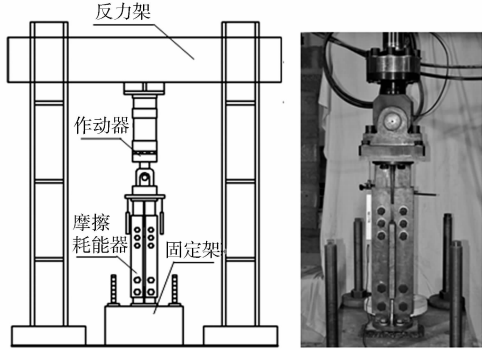


图 2 试验装置

Fig. 2 Test set-up

摩擦阻尼器是位移相关型阻尼器,可以利用恢复力和位移的滞回关系来建立摩擦阻尼器的恢复力模型^[4-5].摩擦阻尼器滞回曲线接近理想矩形,为了便于摩擦阻尼器的推广与应用,采用理想弹塑性性模型来模拟其恢复力模型.摩擦阻尼器的恢复力模型,如图 4 所示.模型各参数做如下规定.

1) 摩擦阻尼器滑动摩擦力的模型为

$$F = 2 \mu P.$$

式中: F 为滑动摩擦力; μ 为阻尼器滑动摩擦系数; P 为正压力;常数 2 代表阻尼器有两个摩擦面.

2) 摩擦阻尼器初始弹性刚度为 K_0 ;阻尼器起滑后的第二刚度为 0;阻尼器起滑后的卸载和反向加载刚度为 K_1 ; D_0 为起滑位移; D_y 为最大滑动位移.

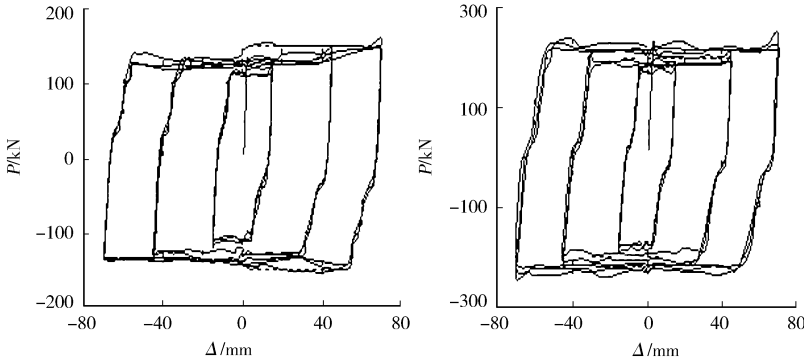


图 3 摩擦阻尼器滞回曲线

Fig. 3 Hysteresis curves of friction damper device

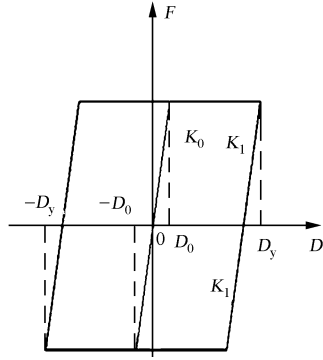


图 4 恢复力模型

Fig. 4 Restoring force model

2 摩擦耗能减震结构模型的建立

2.1 计算模型的参数设置

算例为 6 层钢筋混凝土框架结构,总高度为 20.7 m,底层层高为 4.2 m,2~6 层为 3.3 m,其平面布置如图 5 所示.构件截面尺寸为框架柱 400 mm×400 mm,框架梁 250 mm×500 mm.混凝土强度等级为 C30.摩擦耗能支撑布置位置,如图 5 所示.限于文章篇幅,本文只讨论在横向方向(X 轴方向)地震作用下摩擦阻尼器对结构的减震作用.为研究摩擦阻尼器起滑荷载对消能减震结构的影响,共设计 KJ, FDF200, FDF300, FDF400 四种工况.其中:KJ 为未减震框架结构, FDF200, FDF300 和 FDF400 均为耗能减震结构;摩擦阻尼器起滑荷载分别为 200,300,400 kN.

2.2 摩擦耗能结构运动微分方程

摩擦耗能减震结构在地震动作用下的运动方程^[6]为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{P}(t) - \mathbf{H}\mathbf{F}(t).$$

式中: \mathbf{M} 为结构的质量矩阵; \mathbf{C} 为结构的阻尼矩阵,采用 Rayleigh 阻尼 $\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}$; \mathbf{K} 为结构的刚度矩

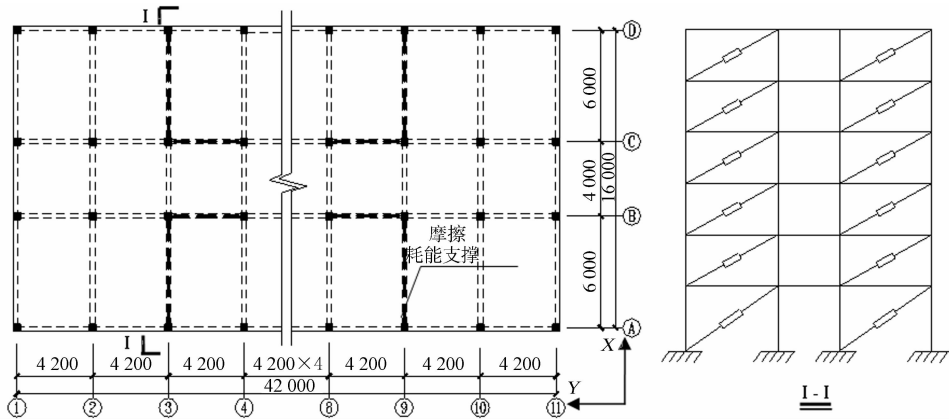


图 5 结构平面布置图(单位:mm)

Fig.5 Layout of the structure (unit:mm)

阵; $\boldsymbol{P}(t)$ 为地震波激励向量; $\boldsymbol{F}(t)$ 为摩擦阻尼器的恢复力; \boldsymbol{H} 为转换矩阵.

假设耗能减震结构的主体框架结构为线弹性. 利用 MIDAS/GEN 非线性边界单元滞回系统来模拟摩擦耗能支撑. 利用 MIDAS/GEN 分析软件对结构在 EI Centro, Taft 和 Northridge 3 条地震波下进行阻尼器非线性的弹塑性时程分析, 结构的地震反应取 3 条地震波作用下的平均值. 多遇地震和罕遇地震时, 程峰值加速度分别为 $70, 400\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$.

3 减震性能分析

3.1 小震作用下结构性能分析

3.1.1 楼层剪力 各种工况下, 结构 X 向楼层剪力, 如表 1 所示. 表 1 中: Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 分别为 KJ, FBF200, FBF300, FBF400 的楼层剪力. 从表 1 可以看出: 减震结构的楼层剪力随着摩擦阻尼器起滑荷载的增加而增加. 摩擦阻尼器起滑荷载为 200 kN 时, FBF200 的楼层剪力较框架 KJ 均下降 10% 左右, 说明在小震作用下摩擦阻尼器已经起滑并引起结构阻尼的增加, 各楼层加速度均降低; 摩擦阻尼器起滑荷载为 300 kN 时, FBF300 第 1 层至第 4 层的楼层剪力基本上与框架 KJ 一致, 说明在小震作用下摩擦阻尼器已经起滑但耗能量较小, 摩擦阻尼器为结构提供的附加阻尼效应和附加刚度效应相当; 摩擦阻尼器起滑荷载为 400 kN 时, FBF400 的楼层剪力较框架 KJ 提高了 20% 左右, 说明在小震作用下摩擦阻尼器没有起滑, 未引起结构阻尼的增加, 阻尼器为结构提供附加刚度.

因此, 可说明设置摩擦阻尼器楼层加速度的反应是基于阻尼器的附加刚度及附加阻尼两个方面的效应. 随着阻尼器引起结构刚度的增加, 结构加速度上升, 而又随着阻尼引起结构阻尼的增加, 结构加速度减小, 最终将导致结构加速度减小.

表 1 X 向楼层剪力对比

Tab.1 Comparison of the storey shear force at X direction

楼层号	Q_0/kN	Q_1/kN	$\frac{Q_1-Q_0}{Q_1}/\%$	Q_2/kN	$\frac{Q_2-Q_0}{Q_2}/\%$	Q_3/kN	$\frac{Q_3-Q_0}{Q_3}/\%$
6	651	583	-11	647	-0.6	810	20
5	1 097	957	-15	1 077	-2.0	1 373	20
4	1 374	1 233	-11	1 370	-0.3	1 733	21
3	1 625	1 490	-9	1 633	-0.5	1 960	17
2	1 834	1 640	-12	1 990	8.0	2 380	23
1	2 031	1 840	-10	2 303	12.0	2 713	25

3.1.2 层间位移角及层位移 在小震作用下, 各种工况各楼层的绝对位移(Δ)和层间位移角(θ), 如图 6(a)和图 7(a)所示. 从图 6(a), 图 7(a)中可看出: 框架 KJ 第 2 层和第 3 层的层间位移角分别为 $1/490, 1/535$, 均超过 GB 50011-2010《建筑抗震设计规范》^[7]对框架结构弹性层间位移角限值 $1/550$ 的规定; 减震结构各楼层层间位移角较框架 KJ 大幅降低, 各楼层的层间位移角均小于 $1/900$. 其中, 减震结构第

2 层的层间位移角仅为框架 KJ 的 50% 左右; 减震结构顶层绝对位移仅为 KJ 的 50% 左右; 不同起滑荷载的减震结构绝对位移和层间位移角相近, 小震作用下起滑荷载对结构位移反应不敏感. 其原因为阻尼器的附加刚度效应和附加阻尼效应使结构位移反应减小, 阻尼器起滑荷载不同仅使得各减震结构附加刚度和附加阻尼比例不同. 因此, 摩擦阻尼器在小震作用下可有效减小结构的层间位移和总位移.

3.2 大震作用下结构性能分析

各种工况在大震作用下各楼层的绝对位移和层间位移角分别如图 6(b) 和图 7(b) 所示. 其中, 框架模型 KJ 进行大震作用下的弹性时程分析, 其弹塑性层间位移角按 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》规定的计算公式进行计算, 有 $\Delta u_e = \eta_p \Delta u_e$. 式中: Δu_e 为弹塑性层间位移; η_p 为弹塑性层间位移增大系数; Δu_e 为罕遇地震下按弹性分析的层间位移.

从图 6(b), 图 7(b) 中可以看出: 减震结构各楼层的绝对位移较框架 KJ 均大幅度减小, 其中阻尼器起滑荷载为 400 kN 的减震结构 FBF400 的楼层总位移为 KJ 的 40%. 随着阻尼器起滑荷载的增加, 减震结构各楼层的绝对位移减小; 减震结构各楼层的层间位移角较框架 KJ 也大幅减小, 减震结构各楼层位移角均小于 1/110. 随着阻尼器起滑荷载的增加, 耗能结构各楼层的层间位移角减小. 其主要原因为减震结构在大震作用下随着阻尼器起滑荷载的增大, 阻尼器耗能能力越强, 其为结构提供的附加阻尼也越大, 减震结构位移反应也越小.

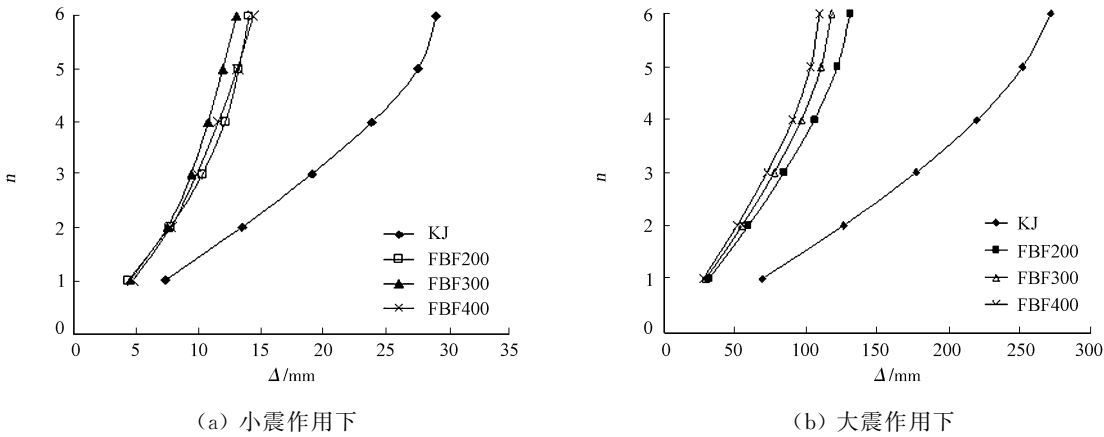


图 6 楼层绝对位移

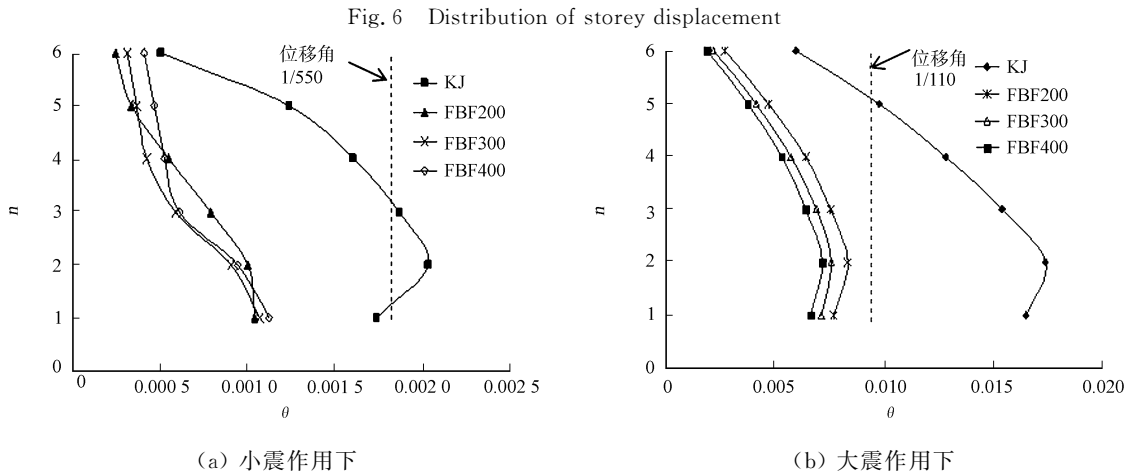


图 7 层间位移角

4 结论

本文基于已有摩擦阻尼器滞回性能试验结果, 进行摩擦耗能减震结构在小震和大震作用下的时程分析, 可以得到以下 4 点结论.

- 1) 摩擦阻尼器滞回曲线呈现理想矩形,采用弹塑性模型可较好地模拟摩擦阻尼器的恢复力特性.
- 2) 在小震作用下,减震结构的楼层剪力与摩擦阻尼器的工作状态有关.当阻尼器未产生滑动时,阻尼器为结构提供附加刚度,减震结构的楼层剪力较未减震结构上升.当阻尼器产生滑动时,阻尼器为结构提供附加刚度和附加阻尼,减震结构的楼层剪力较未减震结构出现下降.
- 3) 减震结构在小震和大震作用下的位移反应较未减震结构大幅度降低.减震结构在小震作用下层间位移角均小于 1/900,在大震作用下层间位移角均小于 1/110,表明减震结构具有良好的抗震性能.
- 4) 在大震作用下,减震结构层间位移角随着阻尼器起滑荷载的增加而减小.

参考文献:

[1] PALL A S, MARSH C. Seismic response of friction damped braced frames[J]. Journal of the Structural Division, 1982, 108(6): 1313-1323.

[2] FILIATRAULT A, CHERRY S. Performance evaluation of friction damped braced steel frames under simulated earthquake loads[J]. Earthquake Spectra, 1987, 3(1): 43-55.

[3] 潘秀珍, 郝际平, 王德法, 等. 单斜杆耗能器偏心支撑结构的抗震性能研究[J]. 工程力学, 2010, 27(6): 57-64.

[4] 郭子雄, 杨勇. 恢复力模型研究现状及存在问题[J]. 世界地震工程, 2004, 20(4): 47-51.

[5] 郭子雄, 吕西林. 高轴压比框架柱恢复力模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(5): 32-38.

[6] 徐玉野, 王全凤. 面向设计的摩擦耗能框架结构时程分析法[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2003, 24(3): 264-270.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

Study on Aseismic Performance of A New Type of Friction Damper Device

ZHANG Peng, GUO Zi-xiong

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A new type of friction damper device (FDD) was proposed, and the ideal elasto-plastic model was used to simulate the hysteretic characteristics of the FDD. The frame structure with the FDD was analyzed by the time history method under three kinds of earthquake waves. The initial slip force of the FDD was discussed. It's shown that the displacement response of structures with damper device is significant less than the ones without damper device; the storey shear force of the damper-added structures is relative to the initial slip force of the FDD under small earthquakes; with the increase of the initial slip force of the FDD, the story drift angle of the damper-added structures decrease under strong earthquakes.

Keywords: friction damper device; hysteretic behavior; time history analysis; damper-added structures; initial slip force

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)