

文章编号: 1000-4750(2016)Suppl-0156-05

含摩擦阻尼器钢连梁的往复加载试验

师 晓¹, 王彦栋², 曲 哲¹, 纪晓东²

(1. 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 河北, 三河 065201; 2. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 提出一种用于高层建筑的含摩擦阻尼器钢连梁。摩擦阻尼器以外的型钢梁段即使在罕遇地震作用下也预期保持弹性, 损伤只发生在摩擦片-钢板界面。采用高强螺栓与碟形弹簧串联为摩擦片-钢板摩擦界面施加正压力, 以减小温度应力等因素对摩擦力的影响。地震过后, 简单放松螺栓就可以释放结构残余变形, 并可拆卸摩擦片以查看其损伤程度, 如有必要可方便地更换摩擦片。对该钢连梁进行往复加载试验。结果表明, 选用的摩擦材料具有可靠的摩擦性能, 摩擦阻尼器表现出稳定且优异的耗能能力。摩擦力相对比较稳定, 未出现过大的超强, 有利于简化周边连接构件的设计。

关键词: 摩擦阻尼器; 钢连梁; 摩擦系数; 可更换; 快速恢复

中图分类号: TU317 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.05.S017

CYCLIC LOADING TEST OF STEEL COUPLING BEAM WITH FRICTION DAMPER

SHI Xiao¹, WANG Yan-dong², QU Zhe¹, JI Xiao-dong²

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Sanhe, Hebei 065201, China;

2. Department of Civil Engineering Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A steel coupling beam equipped with a friction damper in the mid span is proposed for the use in high-rise buildings. Damage is only likely to take place on the brake pad-to-steel friction interface while the other parts of the steel coupling beam are expected to remain elastic under major earthquakes. High-strength bolts and disc springs are placed in series to pressure multiple brake pad-to-steel interfaces to reduce the impact of temperature stress on the friction force. One can easily release the residual deformation after earthquake by loosening the bolts, either for damage inspection or for replacement if necessary. Cyclic loading tests on steel coupling beams with the proposed friction damper were conducted to show the reliable frictional behavior of the chosen material and superior energy dissipating capacity of the friction damper. The well-defined frictional force without much overstrength makes it easier to design the strength demand for adjacent elements and joints.

Key words: friction damper; steel coupling beam; friction coefficient; replaceable; quick recovery

框架-剪力墙/核心筒结构体系具有多道抗震防线。作为结构的第一道抗震防线, 连梁在地震作用下会发生较大的变形, 并集中结构的大部分损伤^[1]。从建筑结构损伤控制的角度来看, 连梁是安装附加阻尼器的理想位置(图1(a))。近年来, 各国学者研究了一系列连梁阻尼器, 其中大部分为钢阻尼器^[2-4],

也有部分为形状记忆合金类阻尼器^[5]或粘弹性阻尼器^[6]。Chung等^[7]提出了在连梁跨中区域设置摩擦阻尼器控制高层钢筋混凝土结构的地震反应, 并通过数值分析证明这类摩擦阻尼器的有效性。与其他类型的阻尼器相比, 摩擦阻尼器具有耗能性能稳定、行程大、初始刚度高的特点。摩擦阻尼器的出力比

收稿日期: 2015-05-01; 修改日期: 2016-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478441, 51308514)

通讯作者: 曲 哲(1983), 男, 陕西人, 副研究员, 工学博士, 主要从事建筑物减隔震与地震恢复能力研究(E-mail: quz@iem.ac.cn).

作者简介: 师 晓(1989), 男, 四川人, 硕士生, 主要从事建筑结构减隔震研究(E-mail: shixiao3882@gmail.com);

王彦栋(1991), 男, 山东人, 硕士生, 主要从事建筑结构减隔震研究(E-mail: jltxwyd008@163.com);

纪晓东(1979), 男, 山西人, 副教授, 工学博士, 防灾减灾研究所副所长, 主要从事建筑结构抗震减震研究

(E-mail: jixd@tsinghua.edu.cn).

较稳定,因此更容易确定与其连接的构件的承载力需求。此外,大部分摩擦阻尼器拆装便捷,必要时更换摩擦片即可恢复其功能。摩擦面是摩擦阻尼器力学性能的关键。各种类型的材料都曾被尝试用作摩擦片。与黄铜^[8-9],青铜合金^[10-11]和铝合金^[12-13]相比,刹车片所采用的专用摩擦材料具有更加优异的摩擦性能^[14-15]。

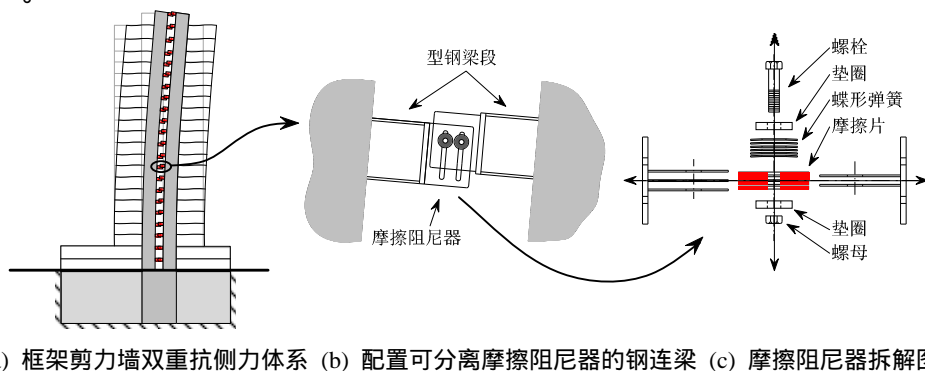


图1 设计摩擦阻尼器及其在高层结构钢连梁中的应用

Fig.1 Proposed friction damper and its use in steel coupling beams in high-rise building

1 连梁试件原型

以我国8度设防地区的某27层钢筋混凝土框架-核心筒结构作为设计试件的原型结构。该结构平面尺寸为40.8 m×40.8 m见方,中间核心筒尺寸为17.1 m×18.0 m。二十根钢筋混凝土(RC)柱分布在建筑四周。选取中间层(11层~15层)电梯口上方的2.5 m长RC连梁作为本次试验的连梁原型。其截面高1.0 m,宽0.2 m,采用C45级混凝土,对称配置HRB400钢筋,受拉钢筋配筋率为1.2%。

RC连梁承载力由受弯承载力控制。根据我国《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010),其受弯承载力为745 kN·m。计算RC连梁的刚度时,考虑受弯和受剪变形两部分影响,并考虑混凝土开裂对截面刚度的降低,将混凝土弹性模量取为原弹性模量的50%。由此计算得到的RC连梁承载力和刚度分别为596 kN和227 kN/mm。受作动器的加载能力限制,对RC连梁进行5/6缩比。缩比后连梁承载力和刚度分别为 $596 \times (5/6)^2 = 414$ kN和 $227 \times (5/6) = 189$ kN/mm。

2 试件和加载装置

连梁跨中摩擦阻尼器及其两侧型钢梁段按以下原则进行设计:1)摩擦阻尼器受剪承载力与不考虑超强的缩比后的RC连梁受剪承载力相等;2)钢

本文研究的摩擦阻尼器安装在钢连梁跨中,如图1(b)所示。将一组并联的碟形弹簧与多个摩擦片-钢板界面串联,并用高强螺栓预紧以施加稳定的正压力。连梁的预期损伤集中在摩擦片-钢板界面。松开螺栓即可拆卸摩擦片以查看其损伤情况。必要时可以方便地更换摩擦片(图1(c))。

连梁刚度与缩比后的RC连梁刚度接近(数值至少在同一量级);3)连接摩擦阻尼器的型钢梁段即使在罕遇地震作用下也不出现屈服或失稳。按上述原则设计得到的连梁试件如图2所示。图3为试验加载装置。

摩擦阻尼器两侧与型钢梁段焊接。采用两根 $\Phi 30$ 高强螺栓(等级10.9)为4个摩擦片-钢板摩擦界面施加正压力。摩擦片由羿射旭公司提供。其名义摩擦系数为0.31。据此计算得到需要为每个螺栓施加165.4 kN的预紧力以提供总共414 kN的摩擦力(即阻尼器剪力)。此外,将螺栓与8个并联的直径160 mm碟形弹簧串联,以减少温度应力等因素对正压力的影响。日本隔震结构协会出版的《被动减震结构设计·施工手册》建议压力范围为5 MPa~15 MPa^[16]。由单个螺栓预紧力除以碟形弹簧面积估算得摩擦面平均面压约为8.23 MPa,在建议的面压范围之内。试验时在每套碟形弹簧上串联一个力传感器以监测正压力的变化。

从两侧型钢梁段伸出交替布置的10 mm厚钢板。各钢板相互平行,间距10 mm。在钢板之间安装摩擦片,如图2所示。其中,在从一侧型钢梁段上伸出的钢板上开长圆孔,在另一侧的钢板上开圆孔。长圆孔的尺寸决定了阻尼器的行程。对于本文试件,初始螺栓位置两侧长圆孔长度均为210 mm。这样在10%左右的连梁弦转角下,螺栓不会与长圆

孔端部边缘接触。此外,假设连梁总长保持不变,两侧钢板按照各自圆弧轨迹运行时,螺栓与长圆孔会在连梁纵向发生相对位移。本文试件的长圆孔宽42 mm,比螺栓直径大12 mm,以保证在9%连梁弦转角时螺栓不会与长圆孔侧边缘接触。

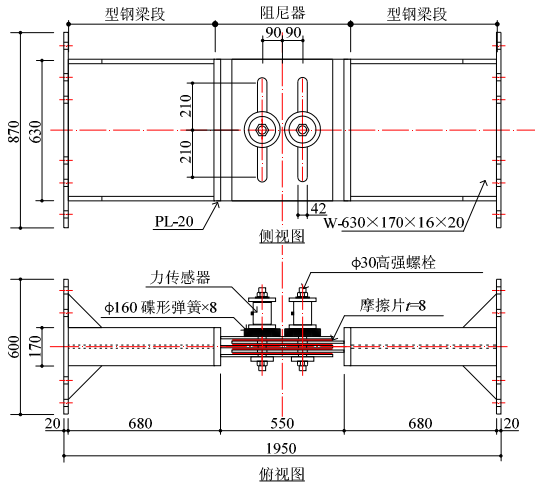


图2 带摩擦阻尼器钢连梁试件

Fig.2 Specimen of steel coupling beam with friction damper

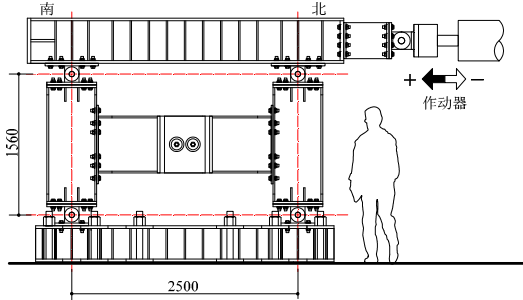


图3 加载装置

Fig.3 Loading setu

采用6个位移传感器测量连梁和摩擦阻尼器的变形。如图4所示,其中一对位移传感器用来测量连梁对角距离的变化(δ_1 与 δ_2),另外两对位移计用来测量两侧钢板沿长圆孔方向的相对竖向移动(δ_3, δ_4 和 δ_5, δ_6)。连梁弦转角 θ_{CB} 与摩擦阻尼器侧向变形 δ_{FD} 分别可由式(1)与式(2)计算得到。

$$\theta_{CB} = \frac{(\delta_2 - \delta_1)(2\sqrt{a^2 + e^2} + \delta_1 + \delta_2)}{4ae} \quad (1)$$

其中, a 和 e 为连梁的高度和长度。

$$\delta_{FD} = \frac{(\delta_4 - \delta_3) + (\delta_6 - \delta_5)}{2} \quad (2)$$

如图5所示,试验加载分为3个阶段。在第1阶段,首先通过力控制加载,使摩擦阻尼器剪力达到其受剪承载力的1/2。此时摩擦面尚未发生滑动,可得到连梁的初始刚度。此后加载采用位移控制,按

连梁弦转角幅值从0.5%、1%、2%、4%、6%到8%单调递增进行往复加载。该阶段各工况均加载两圈。为测试摩擦阻尼器的耐磨性能,在第2阶段以4%连梁弦转角为转角幅值加载30圈。在第3阶段,进行单调推覆加载,直到摩擦阻尼器中的高强螺栓卡住。

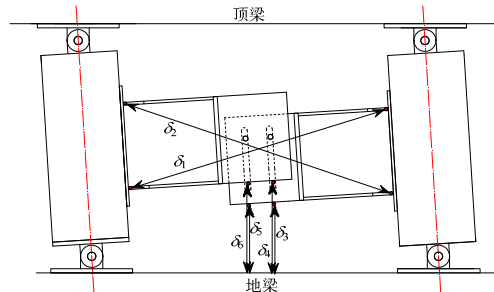


图4 量测方案

Fig.4 Displacement measurement

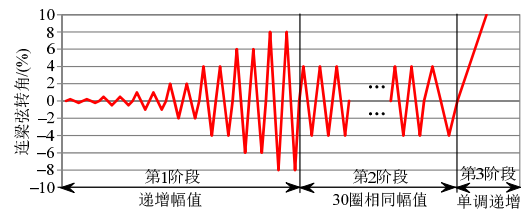


图5 加载方案

Fig.5 Load protocol

3 试验结果与讨论

摩擦界面在第1阶段前两圈加载时尚未发生滑动。连梁初始刚度可取为该工况滞回曲线正负峰值变形点连线的斜率(图6)。由此确定的初始刚度为104 kN/mm,是缩比后RC连梁刚度的55%。此时摩擦阻尼器的变形很小,不到连梁总变形的10%。在接下来的加载工况中,摩擦界面开始滑动,摩擦阻尼器的变形逐渐增大而型钢梁段变形基本保持不变。如图7所示,进入第2阶段后摩擦阻尼器变形占连梁总变形的比例增大到95%。

图8描述了各加载阶段摩擦阻尼器剪力比与剪切变形的关系。阻尼器剪力比为阻尼器剪力除以摩擦面个数与正压力之积(本试验摩擦面个数为4)。阻尼器剪力可根据其与作动器加载力的平衡关系求得。正压力则由串联的力传感器测量得到。当摩擦片滑动时阻尼器剪力比即为摩擦系数。可见,即使在第2阶段往复加载30圈的过程中,滞回曲线也非常稳定,没有出现承载力的下降。在第3阶段加载末段阻尼器剪力迅速上升,这说明螺栓已经接触到长圆孔边缘。试验在加载至9.8%连梁弦转角时终

止。若假设连梁弦转角等于联肢墙层间位移角的4倍，则加载终止时层间位移角为2.45%，大于我国抗震规范规定的框架-核心筒结构1/100的弹塑性层间位移角限值。

试验结束后拆卸摩擦阻尼器。观察到摩擦片除在滑动方向出现划痕外，没有明显的局部损伤。此外，碟形弹簧在与其接触的钢板上留下了圆形的压痕。

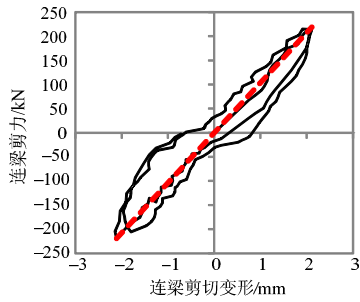


图6 试件初始刚度计算

Fig.6 Determination of initial stiffness of specimen

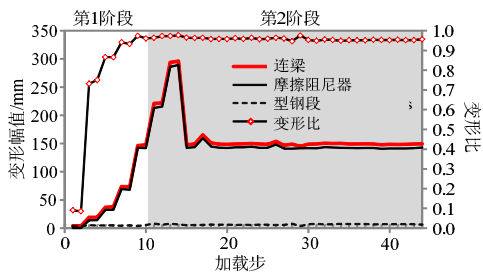


图7 连梁变形分解

Fig.7 Transvers deformation decomposition

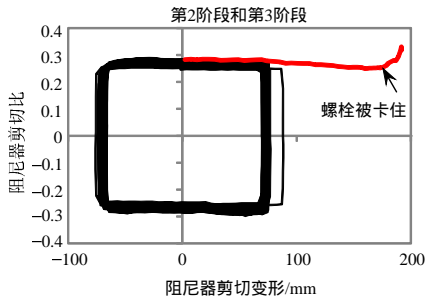
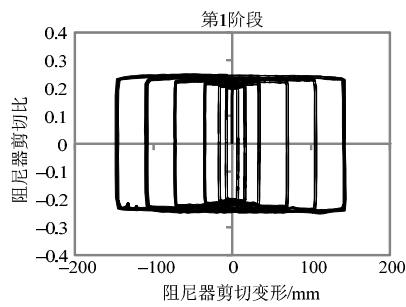


图8 摩擦阻尼器滞回曲线

Fig.8 Load-deformation hysteresis of friction damper

高强螺栓为摩擦面提供的正压力在加载过程中出现了下降。在第1阶段，当正压力下降到90%目标力时则重新拧紧螺栓。而在第2阶段和第3阶段未对正压力进行补偿，以观察大变形等幅加载过程中正压力下降的情况。如图9所示，螺栓在第1阶段被重新拧紧三次。正压力在加载过程中总体呈下降趋势，但局部细节表现为周期性小幅升降。这种周期性变化幅度约为6 kN，大概占目标力的2%。这一现象可能是由贴合摩擦片的钢板不完全等厚引起的。

虽然正压力在减小，摩擦力却在加载过程中不断增大(图10)。除第1阶段的静摩擦力外，摩擦力在第1阶段从252 kN增加到312 kN，超强24%；在第2阶段继续增加到334 kN，超强33%。与此同时，动摩擦系数从第1阶段初的0.20增加到第2阶段末的0.28。动摩擦系数的增加或与摩擦性能受摩擦面温度影响有关。本次试验未监测摩擦片的温度变化，后续工作将研究温度对摩擦片摩擦性能的影响。

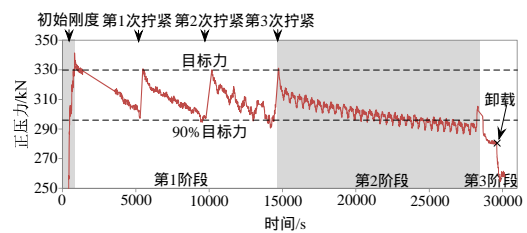


图9 摩擦面正压力变化

Fig.9 Variation of normal force on the frictional interface

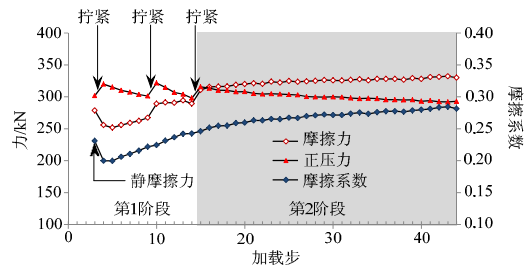


图10 钢板-摩擦片界面摩擦系数变化

Fig.10 Variation of friction coefficient of brake pad-to-steel interface

4 结论

设计了一种用于高层建筑钢连梁的摩擦阻尼器。该阻尼器在震后可方便地拆卸以查看其损伤情况。如有必要可通过更换摩擦片快速恢复其结构功能。通过往复加载试验检验了其抗震性能。试验结果表明，摩擦阻尼器滞回曲线饱满稳定，有很好的能量耗散能力。但是，将该阻尼器投入工程应用前仍有以下问题需要解决。

(1) 摩擦系数在加载过程中增大的机制有待厘清,并通过进一步研究定量地估计摩擦系数在使用过程中的增长幅度。

(2) 连梁大部分变形都集中在跨中位置的摩擦阻尼器。若不采取合理措施保护连梁上方的楼板,这种集中变形会对楼板提出更高的变形要求。后续试验将研究这一集中变形给楼板造成的损伤。

参考文献:

- [1] Mahin S A, Bertero V V. Nonlinear seismic response of a coupled wall system [C]. Reston: Proceedings ASCE National Convention, 1975: 1-30.
- [2] Fortney P, Shahrooz B M, Rassati G A. Large-scale testing of a replaceable 'fuse' steel coupling beam [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2007, 133(12): 1801-1807.
- [3] Kumagai H, Shimazaki K, Hayashi S. Coupling beam dampers with low yield point steel Part 1: Experimental study on coupling beams with steel dampers in mid-span [J]. Journal of Structural and Construction Engineering, Transaction of AIJ, 2009, 74(638):755-763.
- [4] Wang T, Guo X, He X K, Duan C S, Du Y F. Experimental study on replaceable hybrid coupling beams [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 166/167/168/169: 1779-1784.
- [5] Mao C X, Dong J Z, Li H, Ou J P. Seismic performance of RC shear wall structure with novel shape memory alloy dampers in coupling beams [J]. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, Proceedings of SPIE, 2012, 8345(2): 304-320.
- [6] Constantin C, Michael M. Viscoelastic coupling dampers (VCDs) for enhanced wind and seismic performance of high-rise buildings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2013, 42(15): 2217-2233.
- [7] Chuang H S, Moon B W, Lee S K, Park J H. Seismic performance of friction dampers using flexure of RC shear wall system [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2009, 18(7): 807-822.
- [8] Grigorian C E, Yang T S, Popov E. Slotted bolted connection energy dissipators [J]. Earthquake Spectra, 1993, 9(3): 491-504.
- [9] Rojas P, Ricles J M, Sause R. Seismic performance of post-tensioned steel moment resisting frames with friction devices [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2005, 131(4): 529-540.
- [10] 森下邦宏, 平井潤, 本田誠, 井上幸一. 複数摺動面を有する摩擦型ダンパーの実験的研究[J]. 日本建築学会構造系論文集, 日本建築学会, 2003, 547: 61-68. Morishita K, Hirai J, Honda M, Inoue K. Experimental approach of slip damper consists in multiple sliding plates for structural seismic control [J]. Journal of Structural and Construction Engineering, Transaction of AIJ, 2003, 547: 61-68. (in Japanese)
- [11] Morgen B G, Kurama Y C. Characterization of two friction interfaces for use in seismic damper applications [J]. Materials and Structures, 2009, 42: 35-49.
- [12] 吉岡智和, 大久保全陸. 梁端下端フランジに高力ボルト摩擦すべりダンパーを設置したH形鋼梁の曲げせん断実験[J]. 日本建築学会構造系論文集, 日本建築学会, 2003, 573: 177-184. Yoshioka T, Ohkubo M. Bending-shear tests of wide flange steel beam using the bolted frictional-slippage damper on the bottom flange at the beam end [J]. Journal of Structural and Construction Engineering, Transaction of AIJ, 2003, 573: 177-184. (in Japanese)
- [13] Terai M, Sato T, Yoshioka T, Minami K. Studies of bolted frictional-slippage damper with rubber washer: Dynamic loading test of friction damper using aluminum alloy sliding plates [J]. Journal of Structural and Construction Engineering, Transaction of AIJ, 2007, 614: 107-114.
- [14] Pall A S, Marsh C. Response of friction damped braced frames [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1982, 108(ST6): 171-175.
- [15] Kanzawa Y, Hanamura H, Sano T, et al. Development of the friction damper with fourfold shear high-strength bolt connection [C]. Tokyo: Summaries of Technical Papers of AIJ Annual Meeting, 2002, B-2: 773-776.
- [16] 日本隔震结构协会. 被动减震结构设计·施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 527-530. The Japan Society of Seismic Isolation. Manual of design and construction for passive-controlled structure [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008: 527-530. (in Chinese)