

# 国内外摩擦耗能器研究进展

张津娟, 潘文, 叶燎原

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 近年来, 结构减震技术发展迅速. 采用安装摩擦耗能器的耗能支撑来保护结构, 属于被动控制范畴. 试验及理论分析表明, 该结构体系可耗散大量地震能量, 减震效果好. 本文主要介绍了摩擦耗能器的发展历史、工作原理、国内外的试验研究情况, 同时也介绍了设计时的细节问题及其在建筑抗震中的应用.

**关键词:** 摩擦耗能器; 抗震性能; 抗震设计

**中图分类号:** TU313 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2004)01-0084-05

## Theories and Applications of Friction Dampers

ZHANG Jin-juan, PAN Wen, YE Liao-yuan

(Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

**Abstract:** Passive energy dissipation technology is widely used to protect the structures from seismic damage together with traditional aseismic measures, and the friction dampers belong to the passive energy dissipation system. The results of many tests show that energy dissipation braces based on friction can dissipate a great deal of earthquake input energy and its aseismic behavior is very good. The theories and applications of friction dampers are summarized in such aspects as the development, theories, tests, design details and applications.

**Key words:** friction damper; aseismic behavior; aseismic design

### 0 引言

摩擦耗能装置的发展始于20世纪70年代末, 由于其减震效果好、构造简单、力学模型明确、适用范围广、维护方便, 现已广泛应用于水平刚度较小的多层、高层、超高层建筑, 高耸塔架, 大跨度桥梁、管线等, 并可用来改善已有老旧结构物的抗震或抗风性能<sup>[2]</sup>.

### 1 历史回顾

人们很早就已认识到: 摩擦可以阻止两接触的固体产生相对滑动, 并将这种作用应用于很多机械. 在某种程度上, 摩擦装置相当于自动闸. 基于这种思想, Pall 1980年提出了用摩擦耗能器来提高结构的抗震性能, 他首先设计出了有限滑动螺栓装置. Pall 和 Marsh 1982年都认为摩擦耗能器具有制动作用, 可以使结构的运动减缓而防止结构产生破坏, 他们研究的一种安装在X型支撑中央的双向摩擦器(通常称为Pall摩擦耗能器)已用于很多建筑, 如加拿大的一些建筑就使用了这种装置. 较新的摩擦装置有日本使用的Sumitomo摩擦耗能器(Aiken 和 Kelly, 1990), 还有一种由Nims 1993年提出的能量耗散控制器, 以及用于同心支撑框架的狭槽螺栓连接器.

我国在这方面的研究也开展的比较早, 陈宗明等 1988年研制的摩擦剪切铰耗能支撑装置具有明显的减震效果. 叶燎原等 1988年立足于我国实际情况, 提出的钢筋砼支撑钢板-橡胶摩擦耗能装置, 因其造价低、性能高、易生产、便施工, 很适合在我国推广使用<sup>[3]</sup>. 欧进萍等 1997年在Pall摩擦耗能器优点的基础上

收稿日期: 2003-04-09. 基金项目: 国家自然科学基金(项目编号: 59869002)和云南省科技攻关项目(项目编号: 2001NC45).

第一作者简介: 张津娟(1977.10~), 女, 硕士. 主要研究方向: 结构工程抗震.

提出了可用于工程的组合钢板耗能器<sup>[4]</sup>. 除此之外, 周云等 1998 年研制开发了圆环耗能器、双环耗能器、弹塑性—摩擦复合耗能器等多种新型实用的耗能器<sup>[5]</sup>. 1999 年, 周云、邓雪松、刘季合作研究开发了钢屈服—摩擦复合耗能器<sup>[7]</sup>, 具有构造简单、形状紧凑、体积小、造价低的优点. 东南大学王曙光等 1999 年设计的一种新型弹塑性—摩擦复合耗能器<sup>[6]</sup>, 该耗能器由耗能圆环和摩擦元件组成, 并综合利用了外部圆环弹塑性变形耗能能力和内部摩擦元件摩擦耗能能力.

## 2 基本原理

本文所提及的摩擦耗能器均是利用固体间滑动摩擦来实现耗能的机械装置. 在滑动过程中, 接触面应尽量保持干燥, 并且耗能器在整个使用过程中, 最主要的是保持连续、可知的摩擦反应, 这有赖于固体的表面情况, 但环境也会对其产生影响.

### 2.1 固体摩擦

干燥摩擦的研究已有很长一段历史, 较著名的有达·芬奇, 阿曼顿斯和库仑的理论. 其基本原理基于以下假设:

- 1) 总摩擦力大小依赖于接触面表面情况.
- 2) 总摩擦力大小与施加在接触面的力的大小成正比.
- 3) 若两接触体相对滑动速度较小, 则摩擦力与速度无关.

根据以上假设, 可以得到下式:

$$F = \mu N \quad (1)$$

其中,  $F$ 、 $N$  分别为摩擦力与作用力;  $\mu$  为摩擦系数, 由于滑动前的摩擦系数与滑动过程中的系数不同, 故分别定义为静摩擦系数( $\mu_s$ )和动摩擦系数( $\mu_k$ ). 而且, 摩擦力  $F$  与运动趋势或者运动方向相反.

库仑摩擦理论为摩擦耗能器的研制奠定了理论基础, 但两固体的材料及滑动界面处发生的无数物理、化学反应, 都会影响到  $\mu$  值, 将  $\mu$  看作常量并不符合实际情况. 现代的固体干燥摩擦理论主要集中于确定真正的接触面以及研究发生在界面附近处的变形过程, 包括: 弹性、弹塑性、不光滑处的粘塑性反应、表面膜、残余颗粒、酶作用物. 显然, 要对所有因素进行分析是很困难的, 与金属塑性理论相比, 滑动摩擦还没有成熟的理论依据, 因此更多是依赖试验.

### 2.2 环境影响

材料在滑动中会沿着耗散能量的界面局部发热, 使材料软化或加速其氧化. 最典型的是摩擦耗能器中的这种滑动系统, 耗能器周围的环境如空气湿度, 或引起耗能器发生物理、化学反应的污染物, 都会改变摩擦界面的物理、化学特性, 从而影响摩擦反应. 尤其在复杂的环境里, 腐蚀会加重这一影响, 包括裂缝腐蚀和不同金属接触导致的腐蚀. 对前一种腐蚀, 裂缝的几何形状对其影响很大, 开裂严重的地方氧化加速, 但氧气缺乏的地方(如螺纹节点处, 被夹紧的面), 因缺乏氧气而腐蚀缓慢. 不同金属接触腐蚀指的是在腐蚀性空气中, 两种不同金属间存在一种直接的电的接触. 比如, 若把潮湿的钢铁和铜放置在一起, 钢铁的腐蚀速度会加快. 目前要对氧化历程做出定量的预测还不可能, 必须求助于物理试验来决定在特定环境中腐蚀的程度, 并探知腐蚀在滑动体系中对摩擦特性的潜在影响.

周云和邓雪松 1999 年对影响摩擦耗能器性能的因素总结为以下几方面<sup>[16]</sup>: (1) 摩擦元件类型; (2) 摩擦片和接触面处理情况; (3) 高强螺栓的影响; (4) 摩擦元件和孔槽的几何尺寸; (5) 使用时间; (6) 滑动速度与温度; (7) 循环次数; (8) 外荷载类型; (9) 加工精度.

## 3 耗能器的试验研究情况<sup>[1]</sup>

很多学者对摩擦装置进行了试验研究, 以证明其应用于结构抗震的有效性. 1982 年, Pall 和 Marsh 对纯框架、交叉支撑框架、摩擦耗能支撑框架做了对比试验; 结果表明装有摩擦耗能支撑装置的框架层间滑移较纯框架小得多, 剪力和弯矩也明显减少, 而其轴力要大于纯框架, 且摩擦耗能支撑的主要构件一直保持弹性. Filiatrault 和 Cherry 1987 年对 1/3 比例的、装有摩擦耗能支撑的三层钢框架结构输入几种不同的

地震波:0.52 g的1940 El Centro波、0.52 g的1966 Park field N65E波、0.3 g的Newmark - Blume - Kapur人工信号、0.52 g的有限带宽白噪声;其结果说明摩擦耗能支撑框架比传统的纯框架和交叉支撑框架表现好<sup>[8]</sup>。接着,他们(1988)对纯框架、摩擦耗能支撑框架、基础隔振支撑钢框架予以数学计算对比研究;试验表明<sup>[9]</sup>;基础隔振支撑和摩擦耗能支撑框架在El Centro波作用下效果很好,但在1977年布加勒斯特和1985年墨西哥城地震波作用下,只有摩擦耗能支撑框架表现良好。

为证明摩擦耗能器的适用性,Filiatrault和Cherry1987年首先开始此类研究,他们对摩擦耗能支撑的性能做了评估。两个完全相同的三层、1/3比例的钢框架结构,可以很容易地实现纯框架、交叉支撑框架、摩擦耗能支撑三种配置,他们对这三种配置在低振幅下的固有频率和阻尼比进行了测量,并通过振动台输入一系列具有不同震级和频率的地震波;结果发现摩擦耗能支撑结构对于高强度信号反应明显较纯框架和交叉支撑框架好得多。例如在给结构输入1952年Taft波,最高加速度值为0.60 g,所得的弯矩图中,摩擦耗能支撑框架的最小。同一地震加速度下,摩擦耗能支撑框架加速度最小,再次说明它可以有效的减小地震反应,并且摩擦耗能支撑约耗散掉90%的输入能量,可以有效保护主要结构以防止其破坏<sup>[8]</sup>。但此试验的缺陷在于:在1/3比例的结构中安装实际尺寸的交叉摩擦耗能支撑,会降低这一装置表现的可信度。Aiken1988年对摩擦耗能支撑做了另一试验研究,对一个三跨、1/4比例的九层钢框架结构进行了振动台测试;结果发现<sup>[10]</sup>,对一给定地震波,摩擦耗能器的减震效果随震级增加而加强。试验中,纯框架结构最大地面加速度为0.25 g时所产生的最大位移为7.9 cm,而装有摩擦耗能器的结构在0.65 g的加速度下所产生的位移是7.1 cm,摩擦耗能支撑约耗散掉70%的输入能量,且主要结构构件仍保持在弹性范围。由Aiken和Kelly1990年对装有Sumitomo摩擦元件的单轴人字支撑进行数字研究;结果指出摩擦耗能器性能非常好,滞回曲线连续,在整个试验持续时间内几乎接近完美的库仑模型<sup>[11]</sup>。

近年来,我国也开展了很多类似的试验,刘季等<sup>[12]</sup>1996年所做的摩擦耗能支撑的低周反复循环荷载试验,对摩擦耗能支撑的受力过程、工作性能和耗能性能给予了详细的分析;结果表明,摩擦耗能支撑具有较好的滞回特性,能耗散大量的能量。刘伟庆等<sup>[17]</sup>1997年对摩擦耗能支撑钢筋砼框架结构做了振动台试验,对比一榀普通钢筋砼框架、一榀钢支撑钢筋砼框架和一榀摩擦耗能支撑钢筋砼框架1/8比例模型在振动台作用下的表现,通过振动台输入El Centro波,研究这三类不同型式框架结构在地震作用下的破坏形态和动力特性;结果显示摩擦耗能支撑钢筋砼框架结构开裂晚,在摩擦耗能器启动后,结构自振周期加长,从而有效避免共振效应,其抗震性能良好。周云等1997年对装有不同摩擦耗能装置的支撑进行了低周反复循环荷载试验;结果再次说明摩擦装置具有安全阀的作用,并能消耗大量的能量<sup>[15]</sup>。1998年,他们对安装有弹塑性—摩擦复合耗能器钢筋砼框架模型给予伪动力对比试验,试验和分析表明,所研制的耗能减震器工作性能稳定、耗能效率高、减震效果好。接着,周云等1999年又提出一种钢屈服—摩擦复合耗能器,并对其进行了性能试验和对比试验;结果证明这种耗能器具有良好的耗能性能<sup>[7]</sup>。欧进萍等2001年对组合钢板屈服耗能器进行了滞回特性试验和疲劳性能试验,试验中分别输入El Centro波、Taft波、天津波和正弦波,通过输入不同幅值来模拟“大震”和“小震”;结果表明<sup>[4]</sup>,组合钢板屈服耗能器可以很好地控制地震位移反应,对加速度反应也有一定的控制效果。

通过众多试验证明,摩擦耗能支撑既具有交叉支撑结构减小位移反应的优点,又结合了纯框架结构减小加速度反应的特点。

#### 4 实际操作及设计中的注意事项

近年来,对装有能量耗散装置结构体系的反应,已开始数字和理论的研究。耗能器何时启动直接取决于启动力的大小,因此确定启动力非常必要。大多数启动力是用非线性分析反复计算得到的,但是当结构体系趋于复杂并且未知参数增加时,这种方法就变的不科学,也不能保证结果满足设计标准和规范的要求。Filiatrault和Cherry1990年提出了一种可用于实际工程的方法,称为摩擦阻尼支撑框架分析方法,可以有效地确定启动力。这一方法包括建立摩擦耗能支撑的详细模型,并假设所有剩余结构构件保持弹性。另外,这种方法还引入了一个相对性能指数,来估计装有摩擦阻尼装置的结构相对于未加装置结构的反应。

更确切的说, 相对性能指数是最高应变能和整个时间段内应变能反应的平均数. 与最小相对性能指数对应的即为启动力. Filiatrault 和 Cherry 1990 年对摩擦阻尼支撑框架分析方法做了全面的分析, 希望建立设计启动力与用来确定特殊结构的关键参数间的函数关系. 建议其关系如下:

$$V_S = f(T_b/T_u, T_g/T_u, N) m a_g$$

这里,  $V_S$  为  $N$  层结构作用于所有摩擦耗能器的总滑移剪切荷载,  $m$  为结构总质量,  $T_b$ 、 $T_u$ 、 $T_g$  分别为装有支撑、未装支撑的结构周期和场地卓越周期,  $a_g$  为设计最大地面加速度. 通过试验测试  $T_b/T_u$ 、 $T_g/T_u$  和  $a_g$  的不同数值, 每一个特定的  $T_b/T_u$  和对应的  $N$  得到一个双折线图.

对框架结构设计程序, Filiatrault 和 Cherry 总结为以下几点<sup>[14]</sup>:

- 1) 对未加支撑框架的设计考虑除地震以外的所有荷载;
- 2) 确定  $T_u$ , 选择交叉支撑如  $T_b < 0.4 T_u$ , 估计特定建筑场地的  $a_g$ ,  $T_g$ ;
- 3) 确定落在参数研究范围内的  $T_b/T_u$ 、 $T_g/T_u$ 、 $a_g/g$  和  $N$ . 若无法确定, 用 FDBFAP 做详尽的动力分析来确定启动力;
- 4) 画出特定值  $T_b/T_u$  和  $N$  对应的设计启动力范围;
- 5) 运用设计启动力范围确定  $V_S$ , 并将其分配到各层;
- 6) 将各层的滑移剪力分配给各层的摩擦耗能器, 从几何图形确定装置的启动力;
- 7) 确保风载不引起装置滑移, 如有必要, 修正未加支撑结构设计再返回第二步, 或修正启动力, 并做进一步的动力分析;
- 8) 确保滑移发生前交叉支撑不会受拉屈服, 如有必要, 修改设计.

以上方法已用于目前的设计中, 为保证所有结构构件设计合理, 有必要对最后设计进行详细的非线性分析. 随着计算机的广泛使用, 需要提出更自动化的方法. 国内的吴斌等 1997 年通过分析 Pall 摩擦耗能器的机构变形情况, 建立了摩擦器芯板螺栓槽孔的设计方法, 并通过对摩擦器的受力分析, 确定出了摩擦器螺栓紧固力的设计方法. 若使用 Filiatrault 和 Cherry 开发的设计程序, 就要清楚在大地震中结构完全依赖于摩擦耗能器. 在抗震防护系统中, 摩擦耗能器的作用是关键因素, 不仅在安装期间, 甚至在整个预期设计寿命期间, 耗能器都应该保持性能良好.

## 5 摩擦耗能器应用情况

最近几年, 摩擦耗能器被广泛应用于商业建筑领域, 其目的是加强新结构或加固已建结构的抗震能力. 其中主要有加拿大使用的 Pall 摩擦装置和日本使用的 Sumitomo 摩擦耗能器. 在我国, 许多实际工程也采用了摩擦耗能器来提高结构的抗震能力.

在加拿大, 共有 13 个建筑物安装了 Pall 摩擦装置, 其中 6 个用于加固, 7 个用于新建建筑. 加拿大 Montreal 肯考迪亚大学的 McConnel 图书馆在加固中使用了摩擦耗能器, 因此减少了 1.5% 的工程投资. 还有 Montreal 附近的 Ecole Polyvalante 的三个学校, 对这些建筑采用摩擦耗能器的加固方案可以减少 40% 的加固费用和 60% 的修建时间. 加拿大宇航局建筑群的主体建筑和为 67 届博览而建的 8 层钢结构建筑, 均采用了安装摩擦耗能器的加固方案.

截止到 1997 年, 日本采用摩擦耗能器的建筑有 30 幢<sup>[17]</sup>, 较多的是使用 Sumitomo 摩擦耗能器, 用来减少地面振动和小震的影响. 如位于 Omiya City 31 层钢框架的索尼办公楼和东京的某 22 层建筑.

摩擦耗能器已用于我国十余座单层、多层工业厂房结构中<sup>[17]</sup>, 云南省洱源县振戎中学的新建教学楼作为一个试点工程, 采用了摩擦耗能支撑框架结构, 为今后该项技术在实际工程中的应用提供了参考资料.

## 6 结语

摩擦耗能器既可用于新建建筑, 又可用于抗震加固工程. 高耸结构中安装摩擦耗能器可以有效控制结构的侧向位移, 减小结构的风振效应和地震反应. 近年来, 随着对耗能减震体系研究的深入, 许多国家制定了耗能减震结构设计、施工规范和规程. 我国也在新出台的《建筑结构抗震设计规范》中增加了隔震和耗能

减震方面的相关内容,以加速该项技术的实施进程.摩擦耗能器作为耗能减震技术之一,因其适应性强,可以给予大范围推广.

#### 参考文献:

- [1] T T Soong, G F Dargush. Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering[M]. State University of New York at Buffalo. USA. 1997.
- [2] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社,1997. 24~26.
- [3] 潘文,叶燎原. 低造价耗能支撑装置及其计算模型[Z]. 中一意隔震消能合作研究专题研讨会,1997.
- [4] 欧进萍,吴斌. 组合钢板屈服耗能器性能及对其高层钢结构减振效果的试验研究[J]. 建筑结构学报,2001,22(1):26~32.
- [5] 周云,刘季. 新型耗能(阻尼)减震器的开发与研究[J]. 地震工程与工程振动,1998,18(1):71~79.
- [6] 王曙光. 耗能支撑钢筋砼框架结构的抗震性能研究及工程应用[D]:[博士论文]. 南京:东南大学,1999.
- [7] 周云,邓雪松,刘季. 钢屈服-摩擦复合耗能器的性能研究[J]. 地震工程与工程振动,1999,19(1):127~131.
- [8] Filiatrault A, Cherry S. Performance Evaluation of Friction Damped Braced Frames Under Simulated Earthquake Loads[J]. Earthquake Spectra, 1987, 3(1):57~78.
- [9] Filiatrault A, Cherry S. Comparative Performance of Friction Damped Systems and Base Isolation Systems for Earthquake Retrofit and Aseismic Design[J]. Earthquake Engrg. Struct. Dyn, 1988, 16, 389~416.
- [10] Aiken I D, Kelly J M, Pall A S. Seismic Response of a Nine - Story Steel Frame with Friction Damped Cross - Bracing[J]. Report No. UCB/EERC - 87/17, University of California, Berkeley, CA. 1988.
- [11] Aiken I D, Kelly J M, Pall A S. Earthquake Simulator Testing and Analytical Studies of Two Energy - Absorbing Systems for Multistory Structures[J]. Report No. UCB/EERC - 90/03, University of California, Berkeley, CA. 1990.
- [12] 刘季,周云,李暄. 新型摩擦耗能支撑试验研究[J]. 工程抗震,1996,(2):10~13.
- [13] 刘伟庆,魏琰,丁大钧,等. 摩擦耗能支撑钢筋砼框架结构的振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,1997,18(3):29~37.
- [14] Filiatrault A, Cherry S. Seismic Design Spectra for Friction - Damped Structures[J]. Struct. Engrg., 1990, 116(5): 1334~1355.
- [15] 周云,刘季. 两种摩擦耗能器的比较试验研究[J]. 地震工程与工程振动,1997,17(1):40~48.
- [16] 周云,邓雪松. 影响摩擦耗能器性能的因素分析[J]. 工业建筑,1999,29(6):1~4.
- [17] 周云,徐彤,俞公骅,等. 耗能减震技术研究及应用的新进展[J]. 地震工程与工程振动,1999,19(2):122~131.

(上接第83页)

目前,国内使用的粘钢加固方法,为了确保施工质量,对各施工步骤提出了较其他加固方法更为细致的要求<sup>[4]</sup>.在通常情况下,施工质量很大程度上取决于原结构卸载完全与否.但在实际工程中,由于各种条件的限制,不可能对被加固结构进行完全卸载,因此进行结构加固设计时必须注意考虑由于原结构卸载不完全所产生的二次受力问题.

由于钢筋混凝土梁与钢板是通过结构胶粘接成为共同工作的整体,因此对结构胶的力学性能提出很高的要求,特别是其抗剪和耐久性能.另外结构胶的质量及施工工艺也非常关键,处理不当,钢板将不能完全发挥作用,建议设计时考虑现场操作工艺稳定性的影响.

#### 参考文献:

- [1] 张树传. 构件外部粘钢法中加固点的快速确定[J]. 福建建筑,2001,(75):33~34.
- [2] 李文盛,符晶华,卢哲安. 不同卸载条件下粘钢加固梁的研究[J]. 武汉理工大学学报(理工版),2002, 24(6):48~50.
- [3] 魏强,常浩. 环氧树脂涂层钢筋、环氧树脂建筑结构胶在钢筋混凝土结构维护加固中的应用[J]. 宁夏石油化工,2001,(4):30~32.
- [4] 吴志国,白威,孙胜军. 建筑结构粘钢加固技术应用[J]. 宁夏工程技术,2002,(6):92~94.