

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0063-05

套筒型限位支座滑移性能试验研究及有限元模拟

柯 珂^{1,2}, 赵宪忠^{1,2}, 陈以一^{1,2}, 罗魏凌³

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学建筑工程系, 上海 200092; 3. 上海机械施工有限公司, 上海 200072)

摘 要: 该文以实际工程为背景, 对不同几何构形摩擦副的滑移性能进行了试验研究及分析, 并对套筒型支座在剪力和弯矩下的滑移性能进行了试验研究。试验结果及理论分析表明摩擦副的几何构形对支座的滑移性能有较大影响。通过有限元分析, 滑移支座的滑移性能也能得到较为准确的模拟, 据此提出了基于有限元的对支座滑移性能的评估方法。

关键词: 滑移支座; 试验研究; 摩擦副; 摩擦力; 有限元

中图分类号: TU279.72 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.S059

EXPERIMENTAL STUDY AND FEM SIMULATION ON TUBULAR SLIDING BEARING

KE Ke^{1,2}, ZHAO Xian-zhong^{1,2}, CHEN Yi-yi^{1,2}, LUO Wei-ling³

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Shanghai Mechanized Construction Corporation Ltd., Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on a practical engineering project, the experimental research of sliding bearing under shear as well as bending is conducted. The sliding behavior of the friction pair of different shapes is also investigated. Test results indicate that the shape of a friction pair would significantly influence the sliding property of bearing. Based on FEM analysis, sliding behavior can also be simulated well and the methodology combining experimental study and numerical simulation is proposed to assess the property of sliding bearing.

Key words: sliding bearing; experimental research; frictional pair; frictional force; FEM

随着建筑形式的复杂化, 用于结构上的滑移限位支座逐渐被推广。其通常在支座中设置减摩材料, 通过滑移释放变形, 其构造和用于建筑结构或桥梁结构的摩擦型隔震支座相近^[1,3-7]。而在结构中滑移支座时常要承受形式复杂的荷载, 存在不利工况下发生自锁的可能。摩擦力过大时, 也会在结构中产生不利内力, 影响结构安全, 故其在不同形式荷载下的滑移性能通常需要进行评估。对于套筒型支座, 摩擦副通常为圆曲面, 故应对摩擦副几何构形对滑移性能的影响进行深入研究。而由于摩擦系数对试验装置具有较高敏感性, 用于测试滑移性能

的高精度加载装置也极为重要。此外, 对于复杂的受力情况, 试验模拟可能会引入更多误差, 故基于有限元技术对支座滑移的模拟也具有重要意义。

1 试验设计

1.1 支座构造及受力形式

本文的套筒型支座由内轴和外套筒组成。在内轴和外套筒之间嵌固环形的减摩滑移铜套, 内侧填充减摩材料, 内轴表面进行减摩处理, 以满足内轴和外套筒间可发生相对滑移的要求。但支座仍需承受弯矩和剪力(图 1)。

收稿日期: 2012-05-25; 修改日期: 2013-02-27

通讯作者: 赵宪忠(1972-), 男, 吉林桦甸人, 教授, 工学博士, 从事钢结构研究(E-mail: x.zhao@tongji.edu.cn).

作者简介: 柯 珂(1987-), 男, 湖南长沙人, 博士生, 从事钢结构研究(E-mail: 1987keke@tongji.edu.cn);

陈以一(1955-), 男, 浙江天台人, 教授, 工学博士, 从事钢结构研究(E-mail: yiyichen@tongji.edu.cn);

罗魏凌(1982-), 男, 湖南邵阳人, 工程师, 工学学士, 从事结构设计(E-mail: luoweiling2000@163.com).

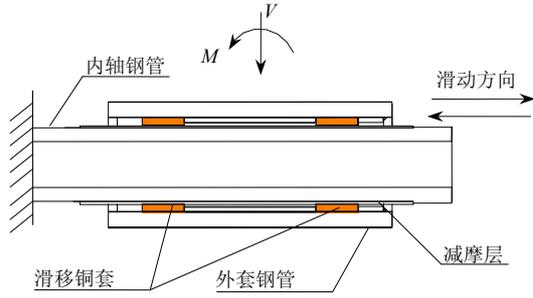


图 1 套筒滑移支座构造及受力简图

Fig.1 Constitution of sliding bearing and load diagram

1.2 试验内容

支座在滑移过程中会在摩擦副上产生摩擦力，结构需要提供驱动力以平衡该力。而当摩擦力超过一定限值时则有可能对结构产生不利内力。本文对滑移性能的评估主要集中于摩擦力。与平面类滑移支座^[1-6]不同，对于套筒型支座，摩擦副为圆曲面，故为考察该构造对滑移性能的影响，先分别对支座中采用的减摩材料进行不同几何构形摩擦副滑移性能的试验，再对实际支座进行滑移性能试验。



图 2 摩擦副中的滑移铜套

Fig.2 Copper ring of friction pair

1.3 加载装置与加载方案

不同几何构形摩擦副滑移性能试验及支座滑移性能试验在一个自平衡的反力框中进行。平面摩擦副的试验装置，水平方向采用 2000kN 的伺服作动器施加正压力，垂直方向采用 200kN 的伺服作动器施加垂直力，用于测试摩擦力。HDZ-1 和 HDZ-2 和 PHK 分别为摩擦块底座和滑块，试验时在装置中设置两对摩擦副(图 4)。

对于曲面摩擦副的滑移试验，采用类似装置，替换曲面摩擦块用以模拟支座中的圆曲面摩擦副(图 5)。

对于支座的滑移性能试验，考虑要同时施加弯矩和剪力，采用图 6 所示装置。其中内轴连接跟动装置，其采用极低摩擦系数的线性导轨制成，用于实现内外轴套发生相对位移时的跟动。内轴上端与 100kN 伺服作动器连接，可测得支座内外套筒发生相对滑移时的摩擦力。2 个水平方向 500kN 作动器

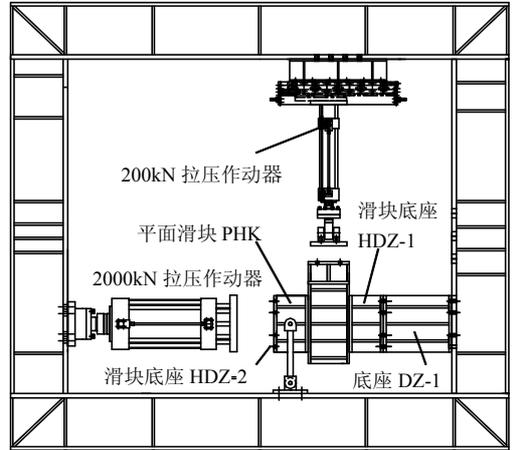


图 1 平面摩擦副的滑移试验装置

Fig.1 Test setup for plane friction pair



图 2 摩擦副的布置

Fig.2 Arrangement of friction pairs



图 3 曲面摩擦副的滑移试验装置

Fig.3 Test setup for curved friction pair

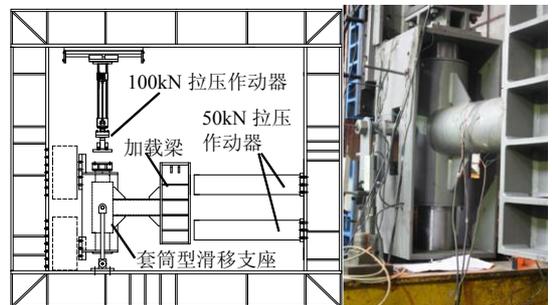


图 4 套筒支座滑移测试加载装置

Fig.4 Test setup for tubular sliding bearing

通过刚性加载梁与外套筒连接, 调节两作动器的力值可以模拟弯矩和剪力。加载时先通过水平作动器施加至目标荷载, 保持荷载不变, 竖向作动器缓慢推动内轴向下滑动, 测试摩擦力, 不考虑速率的影响。

2 试验结果与分析

2.1 等效摩擦系数的定义

对于摩擦系数的概念, 一般是基于摩擦副为平面的假定取摩擦力与正压力的比值, 但当接触面为文中套筒型支座对应的曲面或异形截面时, 摩擦力不应直接采用压力乘以材料摩擦系数, 基于结构分析的基本假定, 类似的仍采用下式定义的等效摩擦系数作为评价滑移性能指标。

$$\mu_e = \frac{f}{F} \quad (1)$$

其中: μ_e 为等效摩擦系数; f 为摩擦力; F 为支座摩擦副上的合压力。

2.2 摩擦副几何构形的影响及机理

摩擦副滑移试验中测试的摩擦系数(等效摩擦系数)按下式计算:

$$\mu_e = \frac{f}{2F_N} \quad (2)$$

式中: f 为实测摩擦力, 由竖向作动器和重力修正部分组成; F_N 为水平作动器的输出的压力值。

试验对两种减摩材料分别进行了平面摩擦副及曲面摩擦副的滑移试验, 结果如表 1 所示。

表 1 不同几何构形摩擦副的滑移试验结果

Table 1 Test results with friction pairs of different geometric shapes

	正应力	平面摩擦系数	曲面等效摩擦系数	曲平比
减摩材料 1	10MPa	0.123	0.193	1.57
	20MPa	0.112	0.166	1.48
减摩材料 2	10MPa	0.041	0.079	1.93
	20MPa	0.042	0.076	1.81

就同种材料而言, 摩擦副的几何构形对滑移性能的影响是显著的, 在等值压应力下, 摩擦副改为曲面后等效摩擦系数有了明显增大, 其主要是由于圆曲面摩擦副对摩擦力存在一个放大效应。对于圆曲面的摩擦副, 单面受压时(图 6), 根据力平衡关系, 等效摩擦系数可按下式计算:

$$\mu_e = \frac{f}{F} = \mu \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sigma(\theta) d\theta}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sigma(\theta) \cos\theta d\theta} \quad (3)$$

其中: μ 为摩擦副材料摩擦系数, 即平面摩擦系数; $\sigma(\theta)$ 为沿摩擦副的应力分布函数。故摩擦副上的应力分布会对等效摩擦系数产生影响, 假定为常值时, 式(3)可简化为:

$$\mu_e = \frac{\pi}{2} \mu \approx 1.57\mu \quad (4)$$

此放大系数与表 1 中的曲平比较为接近。

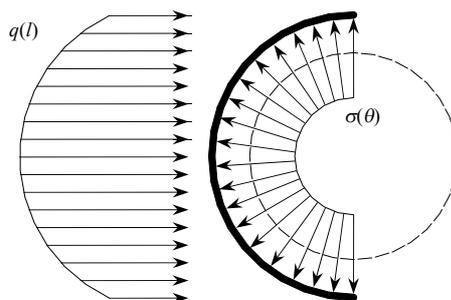


图 7 曲面摩擦副受压时的应力模式

Fig.7 Compression stress distribution for curved friction pair

3.3 支座滑移性能结果

对于套筒滑移支座, 采用减摩材料 2 作为摩擦副, 在试验加载方式下可得到不同剪力和弯矩下的摩擦力-位移曲线和摩擦系数。

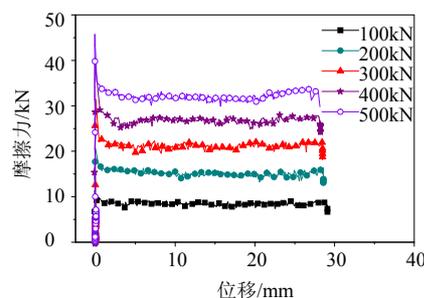


图 8 不同剪力下的摩擦力位移曲线

Fig.8 Friction force-displacement curves under shear

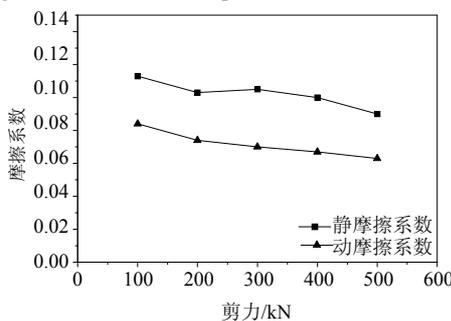


图 9 不同剪力下的摩擦系数

Fig.9 Friction coefficients under shear

与隔震滑移支座性能相似^[5], 支座在受剪和受弯时的曲线均存在静摩擦点, 且摩擦系数随荷载变化而变化, 故对于支座滑移性能的评估应该同时考虑静摩擦系数、动摩擦系数以及支座实际承受的荷

载。而对于限位支座通常存在由静止到滑动的过程，故更应重视静摩擦系数对滑移性能的影响。此外，试验结果表明支座等效摩擦系数与对应材料曲面摩擦系数较为接近，故也证实了圆曲面摩擦副对摩擦系数的放大效应，同时亦表明跟动加载装置具有相当的精度。

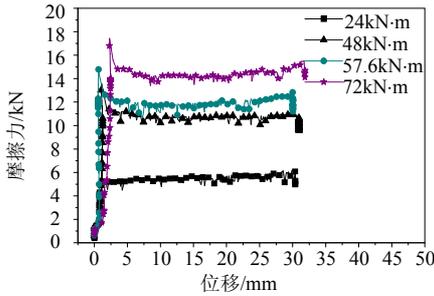


图 10 不同弯矩下的摩擦力位移曲线

Fig.10 Friction force-displacement curves under bending

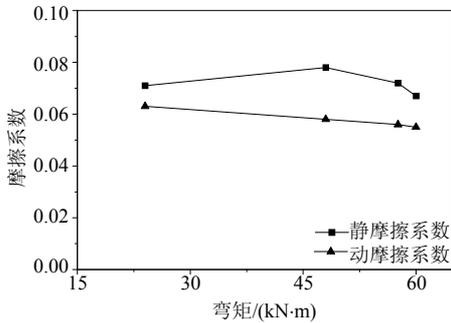


图 11 不同弯矩下的摩擦系数

Fig.11 Friction coefficients under bending

3 支座滑移行为的有限元模拟

3.1 工况试验的有限元模拟

对于套筒滑移支座，为考虑复杂工况下的有限元模拟准确程度，本文采用通用有限元分析软件 ABAQUS 对试验进行了模拟。试验和有限元对比结果如图 13 所示，可见有限元方法可对滑移和摩擦进行较为准确的模拟。但是在建模过程中必须提前获取对应的材料摩擦系数。

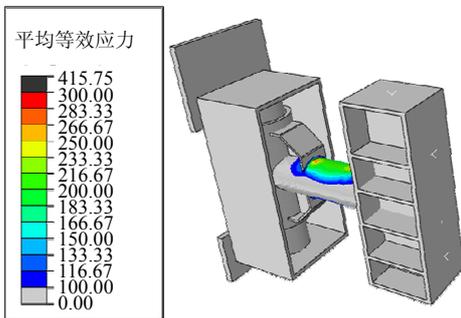


图 12 支座试件应力云图

Fig.12 Stress distribution of specimen

3.2 基于材料摩擦系数及有限元的滑移性能评估

通过有限元模拟结果和试验结果对比可见，数值方法可较准确的计算滑移时的摩擦力，进而可用于模拟和评估各类支座的滑移性能，具体步骤如图 14 所示。

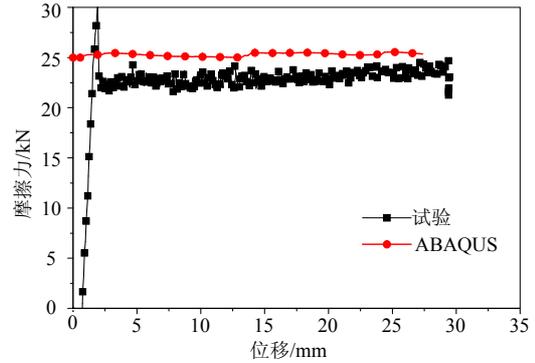


图 13 滑移支座试验结果与有限元对比

Fig.13 Comparison between test and FEA

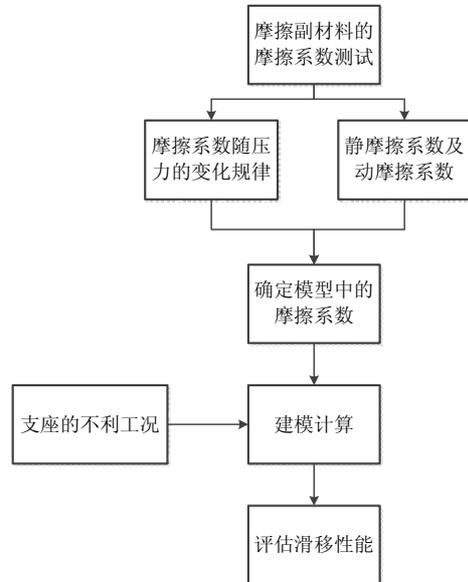


图 5 基于有限元的支座滑移性能评估方法

Fig. 5 Assessment method of sliding behavior of bearing based on FEA

按照以上步骤，对于复杂构造及受力的支座，当不考虑环境因素的影响时^[6,11]，其滑移性能的评估在试验部分可简化对摩擦副材料滑移性能的研究，进行材料的基本摩擦行为的测试，一方面在经济上和效率上更具优势，另一方面可用于校准试验结果。

4 结论

本文对不同几何构形的摩擦副以及一种套筒型滑移支座进行了一系列试验，并结合理论分析和

有限元模拟提出了以下结论和建议:

(1) 支座滑移性能对摩擦副的几何构形较为敏感, 圆曲面形式的摩擦副对滑移性能存在不利影响。本文结合试验和理论分析证明了曲面摩擦副对摩擦系数的放大效应。

(2) 对本文试验的支座, 摩擦系数呈现随正应力增大而减小的趋势, 且有静摩擦平台, 在设计时应考虑摩擦系数变化对支座滑移性能的影响。而对于圆曲面摩擦副的支座, 应考虑几何构形对支座滑移性能的不利影响, 可采用本文定义的等效摩擦系数进行体系分析。

(3) 采用的跟动加载装置能良好模拟不同工况下的荷载, 对此类支座试验具有一定参考意义。

(4) 支座的滑移行为可以通过有限元进行较为精确的模拟, 故据此提出了基于材料摩擦属性和有限元技术的支座滑移性能的评估方法, 可以用于评估支座的滑移行为和校准试验结果。

参考文献:

- [1] 荣强, 盛严, 程文灏. 滑移隔震支座的试验研究及力学模型[J]. 工程力学, 2010, 27(12): 42—45.
Rong Qiang, Sheng Yan, Cheng Wenrang. Experimental investigation and mechanical model of sliding isolation bearings [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(12): 42—45. (in Chinese)
- [2] 王璐, 王曙光, 欧谨, 刘伟庆. 弹性滑移支座力学性能的实验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(1): 77—82.
Wang Lu, Wang Shuguang, Ou Jin, Liu Weiqing. Experimental study on mechanical behavior of an elastic sliding bearing [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(1): 77—82. (in Chinese)
- [3] 程华群, 刘伟庆, 王曙光. 弹性滑移支座在高层隔震建筑隔震建筑中的应用研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(3): 48—53.
Cheng Huaqun, Liu Weiqing, Wang Shuguang. Application study on elastic sliding bearings in Isolated high-rise building [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(3): 48—53. (in Chinese)
- [4] Mokha A, Constantinou M C, Reinhorn A M. Teflon bearing in base isolation. I: Testing [J]. Journal of structural Engineering, ASCE, 1990, 116(2): 438—454.
- [5] Mokha A, Constantinou M C, Reinhorn A M. Further results on frictional properties of teflon bearings [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1991, 117(2): 622—626.
- [6] 曾聪, 陶忠, 潘文, 张志强. PTFE-不锈钢摩擦滑移隔震支座摩擦系数的影响因素研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(1): 58—63.
Zeng Cong, Tao Zhong, Pan Wen, Zhang Zhiqiang. Research of the influence factors of the friction coefficient between PTFE and stainless steel plate of FPE [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 31(1): 58—63. (in Chinese)
- [7] Tsopelas P, Constantinou M C. Study of elastoplastic bridge seismic isolation system [J]. Journal of structural Engineering, ASCE, 1997, 123(4): 489—498.
- [8] Jangid R S. Optimum friction pendulum system for near-fault motions [J]. Engineering Structures, 2005, 27(3): 349—359.
- [9] Lawrowski Z. Polymers in the construction of serviceless sliding bearings [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2007, 7(11): 139—150.
- [10] 姚振纲, 刘祖华. 建筑结构试验[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.
Yao Zhengang, Liu Zuhua. Architectural structure experiment [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996. (in Chinese)
- [11] Campbell T, Fatemi M, Manning D. Friction in bridge bearings with contaminated TFE slide surface [J]. Journal of structural Engineering, ASCE, 1993, 119(11): 3169—3177.