

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0338-05

基于 PFD-SMA 支撑体系的海洋平台结构振动控制研究

张纪刚¹, 刘艳梅², 王贤茂³

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东, 青岛 266033; 2. 隔而固(青岛)振动控制有限公司, 山东, 青岛 266108;

3. 青岛渤海建设集团有限公司, 山东, 青岛 266001)

摘 要: 该文首先对 PFD-SMA 支撑体系的滞回性能进行试验研究, 分别研究形状记忆合金长度、Pall 型摩擦阻尼器的摩擦力(即滑动螺栓预紧力)对其耗能能力的影响, 试验结果表明该体系具有较好的耗能能力, 支撑长度、摩擦力对其性能有影响: 形状记忆合金支撑长度越短、摩擦力越大, 越容易发挥形状记忆合金的超弹性性能。然后将其应用于导管架式海洋平台隔震结构, 利用有限元分析软件 ANSYS 分析平台在 seismic 波下的减震效果, 结果表明这种体系具有良好滞回性能, 能够消耗较多的能量, 能满足安全和稳定性的要求。

关键词: PFD-SMA 支撑体系; 海洋平台; 滞回性能; 振动控制; ANSYS

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.04.S025

RESEARCH OF VIBRATION CONTROL OF OFFSHORE PLATFORM STRUCTURE BASED ON THE PFD-SMA BRACE SYSTEM

ZHANG Ji-gang¹, LIU Yan-mei², WANG Xian-mao³

(1. Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China;

2. GERB (Qingdao) Vibration Control Company, Limited, Qingdao, Shandong 266108, China

3. Qingdao Bohai Construction Group Company, Limited, Shandong 266001, China)

Abstract: The experimental research on the hysteretic behavior of a Pall-typed frictional damper with shape memory alloy(PFD-SMA) brace system is done. The influence of length of SMA brace and the slip force of the Pall-typed damper are analyzed, and the test results show that the PFD-SMA brace system has better energy dissipation ability, the shorter of the length of SMA and the greater of the slip friction force, the better superelasticity of SMA is showed. Then the PFD-SMA brace system is put in jacket offshore platform isolation layer, the vibration effect of the platform is analyzed subjected to earthquake wave with the finite element analysis software ANSYS. The results show that the system has a good hysteretic behavior, and is able to consume more energy to meet the requirements of security and stability.

Key words: PFD-SMA brace system; offshore platform; hysteretic behavior; vibration control; ANSYS

美国于 1947 年在墨西哥湾 6m 水深处安装了世界上第一座设备齐全的钢质导管架海洋平台, 开创了海洋开发的新时代。随后导管架式海洋平台逐步

扩展至深水域或者更恶劣的海洋环境中。迄今为止, 世界上已经建立起各种不同功能的海洋平台近万座^[1]。为了适应社会的发展和确保能源的供给,

收稿日期: 2012-04-17; 修改日期: 2013-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(50809032, 50739001); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(博士基金)项目(BS2010HZ008);

山东省高校优秀科研创新团队计划项目

通讯作者: 张纪刚(1975—), 男, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事结构振动控制、空间钢结构研究(E-mail: zhangjigang_hit@163.com).

作者简介: 刘艳梅(1986—), 女, 山东人, 硕士, 主要从事结构振动控制研究(E-mail: liuyanmei1986@163.com);

王贤茂(1971—), 男, 山东人, 高工, 硕士, 从事结构工程研究(E-mail: qd001@qd001.com).

我国建造了许多海上石油平台，由于其所处环境恶劣，所受荷载复杂，因此海洋平台的抗震研究备受关注。为了提高平台的可靠性和安全性，海洋平台的振动控制成为海洋工程技术人员的研究课题。振动控制技术从理论分析、试验研究、结合实际工程的分析设计向工程试点和应用逐步发展。许多减震、隔震技术已经取得了巨大的社会和经济效益^[2]。

欧进萍等人^[3]研究了导管架式海洋平台结构阻尼体系，并分析了这种体系的减震效果。文中针对海洋平台结构的型式与特点，提出了在海洋平台结构导管架端帽和甲板之间设置柔性阻尼层的新型阻尼隔震方案，结果表明，阻尼隔震体系利用隔震层的集中变形耗散能量，明显减轻结构的振动，起到良好的减震效果。张纪刚等人^[4]考察了4种地震作用下无控结构、纯隔震结构、形状记忆合金隔震结构和形状记忆合金阻尼隔震结构的反应，并对模型结构进行数值计算分析，表明各种隔震结构方案对海洋平台结构导管架端帽位移和平台甲板加速度均有很好的控制效果。Pall型摩擦阻尼器^[5-7](PFD)具有耗能能力强，耗能能力不受支撑屈曲力的影响而备受关注，形状记忆合金(SMA)支撑具有形状记忆效应和超弹性特性并具有自复位功能^[8]，为了充分发挥二者的优点张纪刚提出了 PFD-SMA 支撑体系^[9-10]，理论分析表明 PFD-SMA 支撑体系有较好的耗能效果，能达到普通支撑效果，且 SMA 支撑越短，SMA 越能发挥作用，有利于耗能。本文对 PFD-SMA 支撑体系进行试验研究，验证理论分析的正确性，同时将该体系应用到海洋平台进行减震分析。

1 PFD-SMA 支撑体系试验研究

1.1 PFD-SMA 支撑体系试验

PFD-SMA 支撑体系^[9-10]由 Pall 型摩擦阻尼器^[5-7]和4根 SMA 支撑组成。图1是试验简化模型，外围框架是四连杆加载装置，四连杆长为 2200mm，

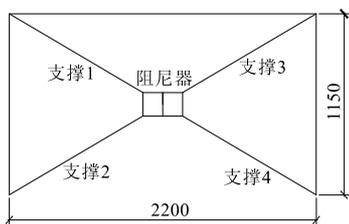


图1 Pall-SMA 支撑体系试验装置图

Fig.1 Test scheme of PFD-SMA brace system

高为 1150mm，其中的阻尼器为 Pall 型摩擦阻尼器，其与四连杆加载装置的比例为 1:10。为节省 SMA 材料，支撑两侧由普通钢板连接，连接方式为螺栓连接。试验加载方式为三角波加载，加载历程如图2所示。采用动态应变仪测量支撑的应变，采样频率为 1Hz。

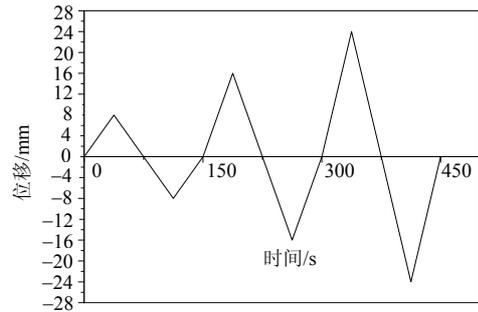


图2 加载历程

Fig.2 Load process

1.2 试验结果与分析

本试验考虑不同阻尼器预紧力和支撑长度对 PFD-SMA 支撑体系滞回特性的影响，SMA 支撑截面面积和对应的长度如表1所示。试验主要研究支撑内力以及阻尼器恢复力的滞回曲线，试验测得4个支撑的内力，本文只对有代表性的支撑1进行分析。限于篇幅，只选取截面面积为 40mm²的支撑进行分析。

表1 SMA 支撑截面面积及其对应长度

Table 1 Cross-sectional area and its corresponding length of SMA brace

截面尺寸/(mm×mm)	长度/mm		
4×10	40	—	320
4×20	—	160	320
备注	预紧力分别采用 10N·m 和 20N·m	预紧力分别采用 15N·m 和 20N·m	

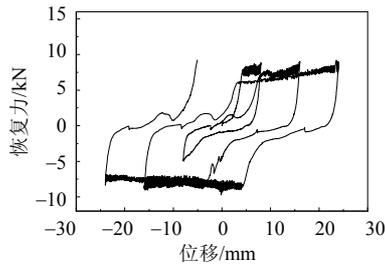
1.2.1 支撑长度的影响

图3、图4为滑动螺栓预紧力为 10N·m 时，阻尼器恢复力和支撑1内力的滞回曲线，可知曲线均较为饱满，SMA 支撑未能完全表现出材料的超弹性性能。图5、图6为预紧力为 20N·m 时，阻尼器恢复力和支撑1内力的滞回曲线，由于预紧力足够大，即使四连杆发生较大位移，阻尼器也未能起滑，使得阻尼器滞回曲线近似为双旗形，而 SMA 支撑的滞回环较窄，表现出较好的超弹性性能，符合材料本身的本构关系曲线。表2为不同支撑长度分析结果对比表，可以看出随着支撑长度的变化，阻尼器最大恢复力和支撑最大内力的变化值最大仅为 14%，基本不受支撑长度的影响。

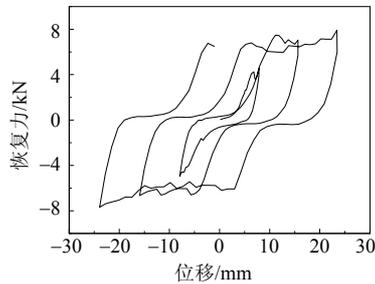
表2 支撑不同长度分析结果对比(面积为 40mm²)
Table 2 The result comparison of with brace different length (sectional area is 40mm²)

预紧力/ (N·m)	I 支撑长度为 40mm		II 支撑长度为 320mm	
	阻尼器恢复力 最大值/kN	支撑内力 最大值/kN	阻尼器恢复力 最大值/kN	支撑内力 最大值/kN
10	9.0	4.86	7.89 (-0.14)	5.46 (0.11)
20	17.5	14.77	16.53 (-0.06)	14.88 (0.01)

注:表中括号内数值=(II-I)/II。



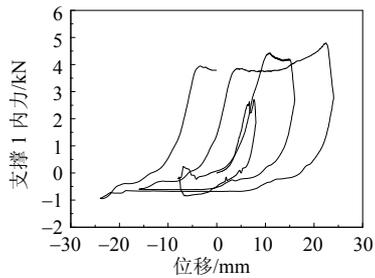
(a) 支撑长度为 40mm



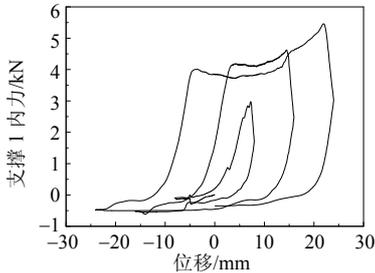
(b) 支撑长度为 320mm

图3 Pall型摩擦阻尼器恢复力的试验滞回曲线
(预紧力 10N·m)

Fig.3 The hysteretic curve of restoring force of Pall-type friction damper (preload is 10N·m)



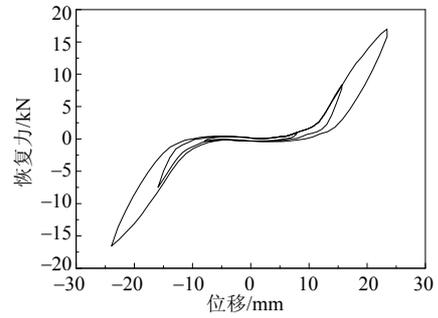
(a) 支撑长度为 40mm



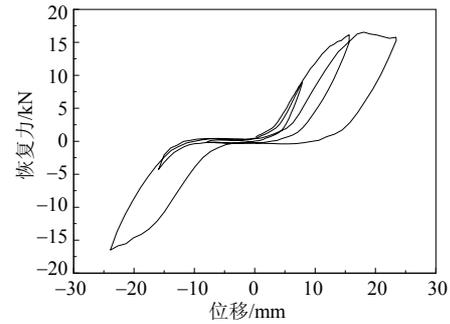
(b) 支撑长度为 320mm

图4 SMA 支撑1内力的试验滞回曲线(预紧力 10N·m)

Fig.4 The hysteretic curve of internal force of SMA brace 1 (preload is 10N·m)



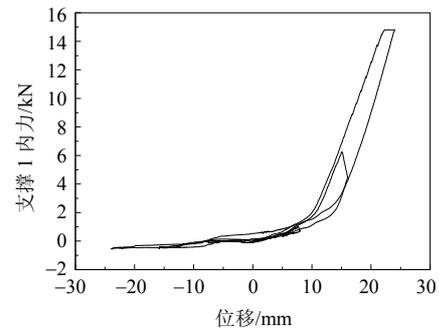
(a) 支撑长度为 40mm



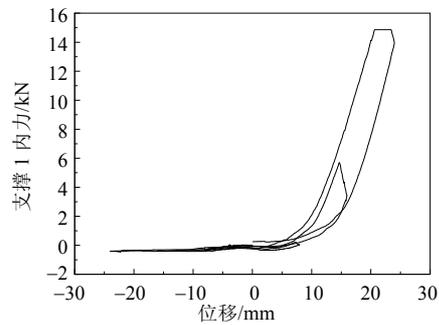
(b) 支撑长度为 320mm

图5 Pall型摩擦阻尼器恢复力的试验滞回曲线
(预紧力 20N·m)

Fig.5 The hysteretic curve of restoring force of Pall-type friction damper (preload is 20N·m)



(a) 支撑长度为 40mm



(b) 支撑长度为 320mm

图6 SMA 支撑1内力试验滞回曲线(预紧力 20N·m)

Fig.6 The hysteretic curve of internal force of SMA brace 1 (preload is 20N·m)

1.2.2 滑动螺栓预紧力的影响

1) 支撑截面面积为 40mm² 时, 不同滑动螺栓预紧

力对比分析结果如表 3 所示, 表 3 数据表明随着预紧力的增大, 阻尼器恢复力最大值的变化可达 52%, 而支撑内力最大值也有一定程度的增大, 最大可达 67%, 说明预紧力的大小对阻尼器恢复力和支撑内力最大值影响较大。由图 3~图 6 可知, 支撑能够承受的压力较小; 不论采用何种长度的支撑, 随着预紧力的增加, 阻尼器恢复力和支撑内力滞回曲线均由饱满变为相对较窄。预紧力足够大时, 阻尼器未能起滑, SMA 支撑表现出较好的超弹性性能。

表 3 不同预紧力下试验分析结果对比(面积为 40mm²)
Table 3 The test result comparison with different preload (sectional area is 40mm²)

支撑长度/mm	I 预紧力为 10N·m		II 预紧力为 20N·m	
	阻尼器恢复力最大值/kN	支撑 I 内力最大值/kN	阻尼器恢复力最大值/kN	支撑 I 内力最大值/kN
40	9.0	4.86	17.5 (0.48)	14.77 (0.67)
320	7.89	5.46	16.53 (0.52)	14.88 (0.63)

注: 表中括号内数值=(II-I)/I。

由以上分析可知, 实际应用 PFD-SMA 支撑体系时, 如果预紧力较小, 阻尼器容易起滑, 体系消耗的能量比较大; 如果预紧力较大, 虽然阻尼器未能完全起滑, 但 SMA 能表现出较好的超弹性性能, 支撑体系也会消耗较大的能量。实际使用宜考虑选择适宜面积和长度的 SMA 支撑, 既能获得较好的滞回性能, 又能节省材料。研究结果与理论分析^[9-10]吻合较好。

2 基于 PFD-SMA 支撑的海洋平台抗震分析

2.1 海洋平台结构有限元模型

阻尼器单元由 COMBIN40、BEAM4、LINK8 单元组成。由于在有预应变的情况下, SMA 的荷载-位移曲线呈平行四边形, 滞回性能良好, 因此分析时采用经过预处理的 SMA 支撑。对经过预处理的 SMA 支撑进行非线性分析时, 如果基本参数相同, 实体单元和 LINK8 单元的有限元模型滞回曲线相似, 为提高分析效率, 可以采用 LINK8 单元代替实体 SOLID185 单元进行分析, 分析时选用双线性等向强化(BISO)模型。为充分发挥 SMA 支撑作用, 在导管架端帽与上部水平层之间设置隔震层, 隔震橡胶垫采用 COMBIN14 和 COMBIN40 单元, 将 PFD-SMA 支撑体系放置在隔震层内, 结构有限元模型如图 7。

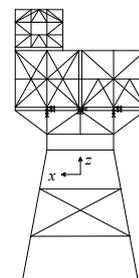
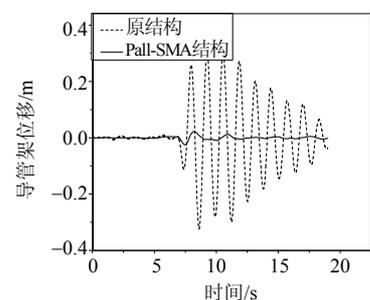


图 7 海洋平台有限元模型

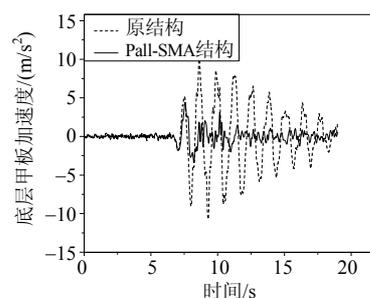
Fig.7 The element model of ocean platform

2.2 抗震分析

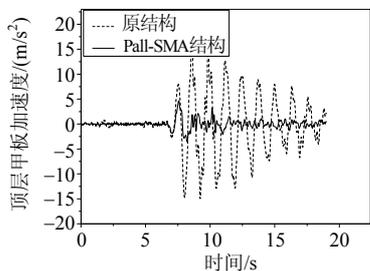
抗震分析时只采用 x 方向的地震波进行分析。3 种地震波作用下, 海洋平台原结构、布置 PFD-SMA 支撑体系结构的地震反应见表 4, 有代表性的天津波作用下相应的地震反应时程曲线见图 8。由表 4 可以看出, 设置 PFD-SMA 支撑体系以后, 减震效果非常明显。天津波作用下导管架最大位移的减震效果甚至达到 92.5%, 而甲板最大加速度的减震效果最大为 73.3%, Taft 波作用下, 导管



(a) 导管架位移时程



(b) 底层甲板加速度时程



(c) 顶层甲板加速度时程

图 8 天津波作用下 JZ20-2MUQ 平台地震反应时程曲线

Fig.8 Time-history curve of earthquake response of JZ20-2MUQ platform structure subjected to Tianjin earthquake

表 4 JZ20-2MUQ 平台结构地震反应

Table 4 Earthquake response of JZ20-2MUQ platform structure

地震波	控制方法	导管架最大 位移/cm	底层甲板 最大加速度/ (cm/s ²)	顶层甲板 最大加速度/ (cm/s ²)
天津波	原结构	30.3	1150	1750
	PFD-SMA 支 撑结构	2.26 (0.925)	444.1 (0.614)	467.9 (0.733)
	原结构	10.2	747	914
Taft 波	PFD-SMA 支 撑结构	2.0 (0.804)	504.2 (0.325)	516.6 (0.769)
	原结构	9.52	589	1066
	El-Centro 波	PFD-SMA 支 撑结构	4.67 (0.509)	398 (0.324)

注：表中括号内各数值为减振效果=(原结构反应-PFD-SMA 支撑结构反应)/原结构反应。

架最大位移减振效果为 80.4%，但是底层甲板最大加速度的减振效果有所降低；在 EL-Centro 波作用下，减振效果也较明显，能满足安全度、舒适度的要求。由图 8 也可看出设置 PFD-SMA 支撑体系的海洋平台在天津波作用下具有良好的减振效果。

3 结论

(1) PFD-SMA 支撑体系有较好的耗能效果，可达到普通支撑的耗能效果，即使在阻尼器抱死的情况下该体系由于 SMA 支撑也能耗能。

(2) PFD-SMA 支撑体系对海洋平台结构具有较好的减振效果。

参考文献：

- [1] 魏巍. 导管架式海洋平台地震破坏状态分析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004: 1-3.
Wei Wei. Research on seismic damage states of jacket offshore platform structures [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004: 1-3. (in Chinese)
- [2] 周亚军, 赵德有. 海洋平台结构振动控制综述[J]. 振动与冲击, 2004, 23(4): 40-43.
Zhou Yajun, Zhao Deyou. Review of structural control for offshore platform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2004, 23(4): 40-43. (in Chinese)
- [3] 欧进萍, 龙旭, 肖仪清, 吴斌. 导管架式海洋平台结构阻尼隔振体系及其减振效果分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 115-122.
Ou Jinping, Long Xu, Xiao Yiqing, Wu Bin. Damping isolation system and its vibration-suppressed

effectiveness analysis for offshore platform jacket structures [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3): 115-122. (in Chinese)

- [4] 张纪刚, 吴斌, 欧进萍. 海洋平台结构 SMA 阻尼隔振振动台试验与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(6): 241-247.
Zhang Jigang, Wu Bin, Ou Jinping. Shaking table tests and analysis of offshore jacket platform structures model with SMA damping isolation systems [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(6): 241-247. (in Chinese)
- [5] 吴斌, 张纪刚, 欧进萍. 考虑几何非线性的 Pall 型摩擦阻尼器滞回特性分析[J]. 工程力学, 2003, 20(1): 21-26.
Wu Bin, Zhang Jigang, Ou Jinping. The analysis of hysteretic behavior of Pall-typed frictional dampers considering geometry nonlinearity [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(1): 21-26. (in Chinese)
- [6] Wu B, Zhang J, Williams M, Ou J. Hysteretic behavior of improved Pall-typed frictional dampers [J]. Engineering Structures, 2005, 27: 1258-1267.
- [7] 吴斌, 张纪刚, 欧进萍. Pall 型摩擦阻尼器的试验研究与数值分析[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(2): 7-13.
Wu Bin, Zhang Jigang, Ou Jinping. Experimental research and numerical analysis of Pall-typed frictional dampers [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(2): 7-13. (in Chinese)
- [8] Jason M C, Reginald D R, Davide F, Ferdinando A. Seismic assessment of concentrically braced steel frames with shape memory alloy braces [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(6): 862-870.
- [9] 张纪刚, 卢爱贞. PFD-SMA 支撑体系抗震性能研究[J]. 中南大学学报, 2011, 42(10): 3157-3163.
Zhang Jigang, Lu Aizhen. Analysis of hysteretic behavior of advanced PFD-SMA frictional damping brace system [J]. Journal of Central South University, 2011, 42(10): 3157-3163. (in Chinese)
- [10] 张纪刚, 卢爱贞, 欧进萍. PFD-SMA 支撑体系滞回性能[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(11): 1713-1719, 1742.
Zhang Jigang, Lu Aizhen, Ou Jinping. Hysteretic behavior of advanced PFD-SMA frictional damping brace systems [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(11): 1713-1719, 1742. (in Chinese)