

安装粘弹性转角阻尼器的海洋平台—摇摆墙体系 抗震性能分析*

张纪刚¹, 江志伟²

(1. 青岛理工大学 土木工程学院 蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033;
2. 北京工业大学 城市与安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 在海洋平台摇摆墙体系基础上, 在摇摆墙底部的铰接点处安装一粘弹性转角阻尼器, 进行被动消能结构振动控制, 利用 ANSYS 进行地震荷载作用下的抗震性能验算, 并对阻尼器的刚度和阻尼参数进行了分析。结果表明, 在摇摆墙底部施加的转角阻尼器能显著降低结构的地震反应。

关键词: 海洋平台; 摇摆墙; 粘弹性转角阻尼器; 振动控制; ANSYS

中图分类号: TV352 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2014)03-0450-06

0 引言

摇摆墙体系为新型可复位抗震结构(吕西林等, 2011; 周颖, 吕西林, 2011), 已有工程实例, 并有学者进行了摇摆墙体系的抗震性能研究, 认为摇摆墙能使原结构各层变形趋于一致, 有效控制变形集中(曹海韵等, 2011; 曲哲, 叶列平, 2011; 曲哲等, 2011), 可发挥结构整体抗震及耗能能力。Patil 和 Jangid (2005) 介绍了多自由度体系的导管架海洋平台采用多种被动控制装置, 如粘弹性阻尼器、粘滞阻尼器以及摩擦阻尼器等在遭受波浪荷载作用时的减振效果较好。Ma 等 (2010) 提出了 ETMD 减振系统, 是利用装置内部设备进行控制的, 结果表明 ETMD 减振系统在适当的频比和质量比条件下具有较好的减振效果, 但是 ETMD 系统受频率限制比较大, 控制频域宽度很窄。Jin 等 (2007) 研究了利用 TLD 对导管架海洋平台进行抗震分析, 并进行了试验研究和数值分析, 结果表明 TLD 的晃动频率与平台的自然频率比值是控制抗震的关键因素, TLD 的水与平台的质量比越大越有利于减震。综上所述, 由于平台的结构刚度较大且摩擦阻尼器、粘滞阻尼器、粘弹性阻尼器等为位移型或速度型阻尼器, 在导管架海洋平台不易发挥作

用, TMD 和 TLD 在海洋平台结构的减震是有条件的。结合摇摆墙结构的优点, 本文提出一种新型海洋平台—摇摆墙结构体系(张纪刚等, 2012, 2013), 提出在摇摆墙铰接处设置粘弹性转角阻尼器进行减震控制。

1 粘弹性转角阻尼器

目前大部分阻尼器都是直线拉压型, 专用于控制转动自由度的阻尼器还比较少, 近年来也有相关学者提出了多种新型转角阻尼器, 具有较好的设计方案和动力学性能。徐昕等 (2012) 提出一种扇形铅粘弹性阻尼器(图1), 该阻尼器既有粘弹性材料的速度相关型特点, 又有金属阻尼器的大阻尼特性, 是一种非常适合本研究的阻尼器。本文另提出一种新型粘弹性转角阻尼器的构造, 其构造简图见图2。图2为图4中H点处细部构造, 在图4所示铰接点H处布置一个箱体, 箱体可根据实际需求延纸面方向延长, 内部充满高粘稠度粘弹性材料或者粘滞流体, 在摇摆墙根部焊接若干搅拌叶片, 叶片可根据阻尼的需求调整个数和大小, 当摇摆墙发生转动时, 摇摆墙带动叶片, 搅动箱体的高粘稠性阻尼材料, 产生巨大的阻尼力, 从而耗散振动能量。

阻尼器的布置形式是多变的, 由于海洋平台—摇摆墙体系相对位移较小, 而摩擦、金属阻尼

* 收稿日期: 2013-08-18.

基金项目: 国家自然科学基金(51378271)、中国博士后科学基金面上—一等资助(2013M530307)、山东省博士后创新项目专项资金资助项目(201302020)及山东省高校优秀科研创新团队计划共同资助。

器等都是位移相关型阻尼器, 本文将阻尼器布置于摇摆墙底部的铰接点处, 摇摆墙只有转动自由度, 且转动位移较小, 因此选用速度相关型的粘弹性转角阻尼器进行耗能减震, 并利用 ANSYS 来进行有限元计算。

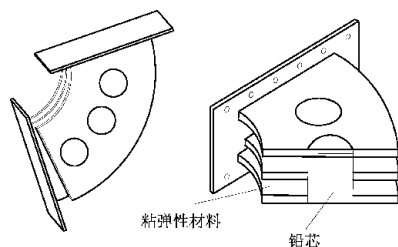


图1 扇形铅粘弹性阻尼器

Fig. 1 Sector lead viscoelastic damper

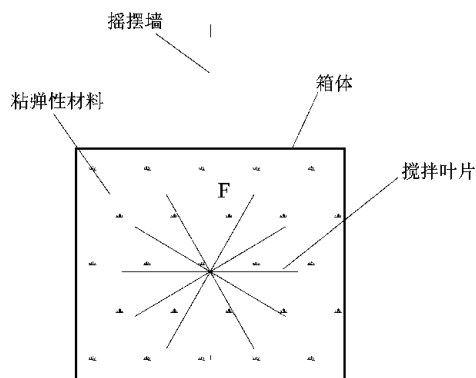


图2 粘弹性转角阻尼器

Fig. 2 Viscoelastic rotary dampers

2 计算模型及参数

图3为海洋台平—摇摆墙体系原型, 经简化选取如图4所示的三层海洋平台摇摆墙体系, 其中AD为海洋平台原结构, EH为摇摆墙, BG、CF、DE为链杆, A点固接, B、C、E、F、G、H点均为铰接。AD、EH、BG、CF、DE均选用BEAM23单元, 质量 m_1 、 m_2 、 m_3 为MASS21单元。为简化计算, 取层高 $h_1 = h_2 = h_3 = 2\text{ m}$, $m_1 = m_2 = m_3 = 100\text{ kg}$, AD弹性模量为 $E_1 = 2 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$; 为使高阶自振频率稳定, 取EH弹性模量为 $E_2 = 2 \times 10^{18}\text{ N/m}^2$, AD、EH的惯性矩均取为 $I_1 = I_2 = 4.5 \times 10^{-8}\text{ m}^4$ 。

以图1和图2所示阻尼器为模型基础, 与图4所示海洋平台简化模型相结合, 根据经典的粘弹性

材料的开尔文模型, 在H点处粘弹性阻尼器应用COMBIN14单元, 设置H点阻尼器的单元属性为垂直于纸面的ROTZ方向单自由度抗扭转模型, 在H点阻尼器处提供抵抗变形的扭矩。采用3条经典的地震波——天津波(EW)、El-Centro波和Taft波进行抗震性能验算, 不改变3条波的频谱特性, 仅将3条波的地面运动最大加速度选为 $2.2\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

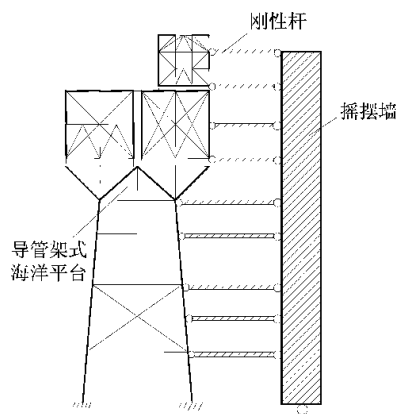


图3 海洋平台—摇摆墙体系

Fig. 3 Offshore platform with rocking wall

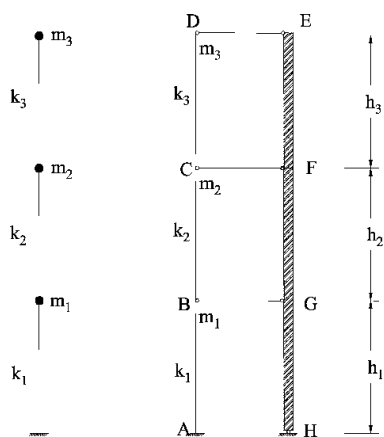


图4 海洋平台—摇摆墙体系简化模型

Fig. 4 Simplified model of offshore platform with rocking wall

3 计算结果

首先计算在H点(粘弹性阻尼器)无阻尼器情况下体系对天津波(EW)的反应, 保持H点阻尼为0, 依次增大H点刚度, 为简便计算, 分别计算H点刚度值 K_H 分别为0、10、 10^2 、 10^3 、 10^4 和 $10^5\text{ N} \cdot \text{m}/\theta$ 时, 体系的地震反应和结构自振频率的变化, 结果见表1、图5。

表 1 天津波作用下阻尼器刚度和体系自振频率、D 点最大位移关系表

Tab. 1 Natural frequency of the system and maximum displacement at point D in different damper stiffness under Tianjin wave

K_H	0	10	100	1 000	10 000	1 000 000
f	0.855 99	0.856 02	0.856 25	0.858 63	0.882 03	1.088 3
D_{\max}	0.174 814 1	0.174 784 6	0.174 518 2	0.171 773 4	0.206 751	0.183 219

注： K_H 为 H 点阻尼器的转动刚度，单位为 $N \cdot m/\theta$ ； f 为体系的第一自振频率，单位为 Hz ； D_{\max} 为地震荷载下 D 点最大位移，单位为 m ，下同。

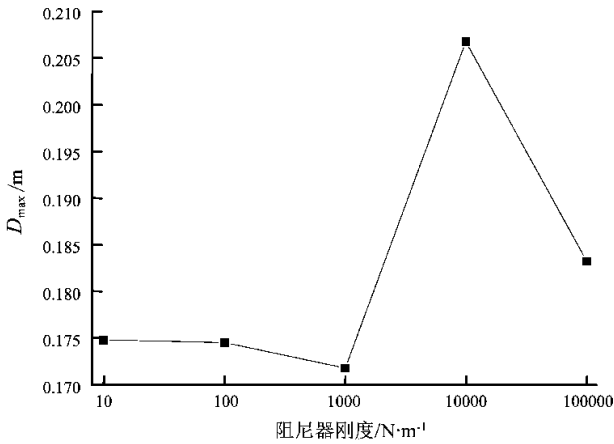


图 5 天津波下 D_{\max} 与阻尼器刚度关系
Fig. 5 Relationship between D_{\max} and the stiffness of damper under Tianjin wave

由频率的计算公式 $\omega_n = \sqrt{\frac{k^*}{m^*}}$ 可知，体系的自振频率随着阻尼器刚度的增大而增大；尽管刚度越大，阻尼器的输出力越大，但是增大的阻尼器刚度并没有给体系的地震反应带来实质性的减小，反而当 $K_H = 10^4$ 时，地震反应增大，根据天津波频谱特性可知，当体系自振频率在 $0.856 \sim 1.089 Hz$ 之间，地震的动力系数处在较高水平当中，体系地震反应不稳定，极易发生共振，因此单纯增加阻尼器刚度是不合理的。

保持 H 点阻尼器刚度为 0，依次增大 H 点阻尼，为简便计算，分别计算取 H 点转动阻尼值 C 分别为 0、10、 10^2 、 10^3 、 10^4 和 $10^5 N \cdot m \cdot s/\theta$ 时，体系的地震反应和结构自振频率的变化，结果见表 2、图 6。

表 2 天津波作用下阻尼器阻尼、阻尼比、D 点最大位移关系表

Tab. 2 Damping ration and maximum displacement at point D in different damping of damper under Tianjin wave

C_H	0	1 000	3 000	6 000	10 000	20 000
ζ	0	0.016 60	0.049 80	0.099 61	0.166 01	0.332 02
D_{\max}	0.174 814 1	0.165 094	0.154 042	0.143 36	0.132 544	0.112 339

注： C_H 为 H 点阻尼器的转动阻尼，单位为 $N \cdot m \cdot s/\theta$ ； ζ 为体系的阻尼比，下同。

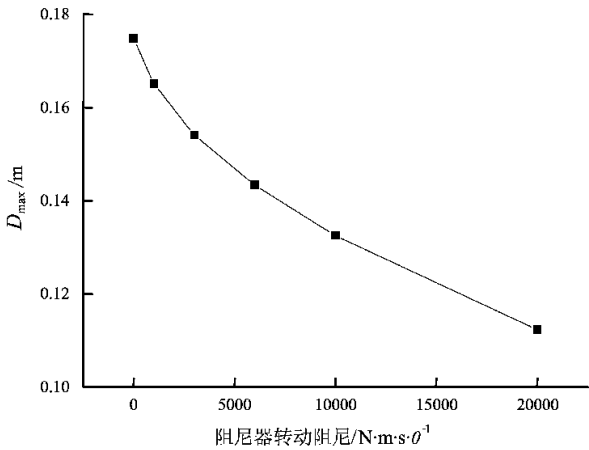


图 6 天津波下 D_{\max} 与阻尼器转动阻尼关系
Fig. 6 Relationship between D_{\max} and the rotary damping of damper under Tianjin wave

由表 2 和图 6 可知，在天津波作用下， D 点最大位移随着阻尼器转动阻尼的增大而减小，阻尼的存在有减小结构地震反应的作用，并且随着阻尼比的增大，结构的地震反应有继续减小的趋势，根据结构动力学原理，当阻尼增大到一定程度时，结构将锁闭，不会发生振动。但是，阻尼器的阻尼不会无限制增大，也很难出现使结构完全锁闭的情况，并且在很多情况下，经济性也是很多大阻尼器的限制条件，由图 6 可知，随着阻尼的增大， D 点最大位移的减小量递减，也就是说阻尼越大，单位阻尼对减振控制的贡献越小，经济性越差。

为了更好地说明问题，下面给出如图 4 所示结构在 EL-CENTRO 波和 TAFT 波下的振动情况，见表 3~6、图 7~10。

表 3 EL-CENTRO 波作用下阻尼器刚度和 D_{\max} 关系

Tab. 3 Relationship between the stiffness of the damper and D_{\max} under EL-CENTRO wave

K_H	0	10	10^2	10^3	10^4	10^5
D_{\max}	0.375 4	0.375 7	0.379 8	0.419 3	0.552 8	0.397

表 4 EL-CENTRO 波作用下阻尼器阻尼和 D_{\max} 关系

Tab. 4 Relationship between the damping of the damper and D_{\max} under EL-CENTRO wave

C_H	0	10^3	3×10^3	6×10^3	104	2×10^4
D_{\max}	0.375 4	0.287	0.247 3	0.203 4	0.163 4	0.108

由表 3、图 7a 和表 5、图 8a 可知，在不同的地震波激励下，尽管结构自振频率的规律保持不变，阻尼器刚度对体系的抗震性能的影响依然是没有规律的，因此在实际工程中，应当首先测量平台所在位置的海底场地的卓越周期，综合考虑平台自身的刚度、粘弹性转角阻尼器的刚度和平台的质量等参数，使自振周期避开场地的卓越周期，以降低发生共振的概率。由表 4、图 7b

表 5 TAFT 作用下阻尼器刚度和 D_{\max} 关系

Tab. 5 Relationship between the stiffness of the damper and D_{\max} under TAFT wave

K_H	0	10	10^2	10^3	10^4	10^5
D_{\max}	0.157	0.156 8	0.156 6	0.155 3	0.154	0.286 7

表 6 TAFT 作用下阻尼器阻尼和 D_{\max} 关系

Tab. 6 Relationship between the damping of the damper and D_{\max} under TAFT wave

C_H	0	10^3	3×10^3	6×10^3	104	2×10^4
D_{\max}	0.157	0.128 8	0.093 4	0.074 7	0.056 2	0.031

和表 6、图 8b 可知，即便是在动力系数比较大的 EL-CENTRO 波作用下，转角阻尼的存在也会给体系的抗震性能带来本质上的提升，但过大和过小的阻尼都会产生不利效果，所以实际中还需根据结构的抗震需求合理设计阻尼。下面选择天津波和 TAFT 波，取 $K_H = 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}/\theta$ 、 $C_H = 10^5 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\theta$ 进行抗震验算，对有无阻尼器的情况进行对比，结果见图 9。

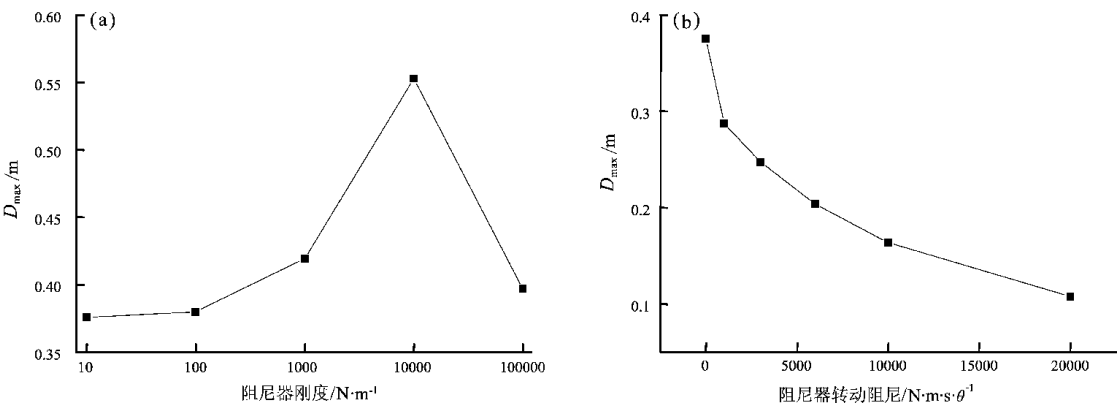


图 7 EL-CENTRO 波作用下，阻尼器刚度 (a) 及阻尼 (b) 与 D_{\max} 的关系

Fig. 7 Relationship between the stiffness (a) and damping (b) of damper and D_{\max} under EL-CENTRO wave

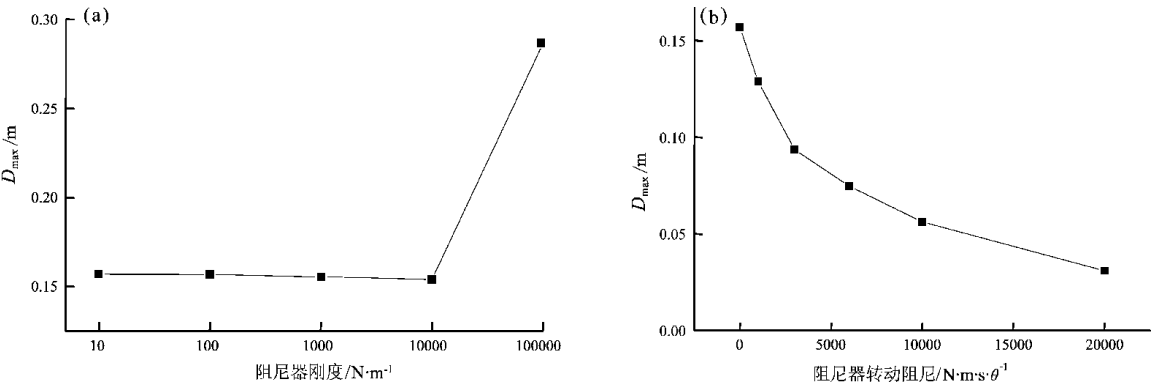


图 8 TAFT 波作用下，阻尼器刚度 (a) 及阻尼 (b) 与 D_{\max} 的关系

Fig. 8 Relationship between the stiffness (a) and damping (b) of damper and D_{\max} under TAFT wave

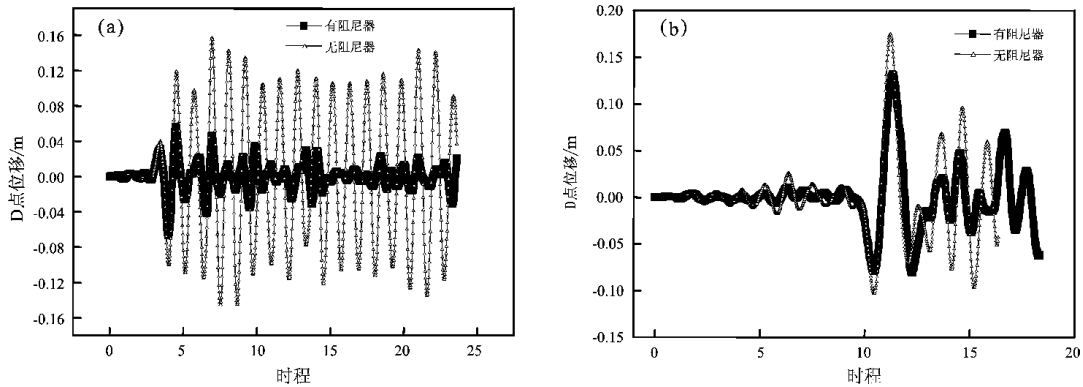


图9 Taft波(a)和天津波(b)作用下,有无阻尼器D点位移对比

Fig. 9 Contrast of displacement of point D with and without damper under Taft (a) and Tianjin (b) wave

4 结论

本文通过对海洋平台—摇摆墙体系中摇摆墙铰接点处安装粘弹性转角阻尼器进行了有限元分析,并对阻尼器参数进行了简单优化,可得出如下结论:

(1) 在摇摆墙底部铰接点处安装转角阻尼器对海洋平台摇摆墙体系的抗震性能具有显著效果。

(2) 可以通过调节阻尼器的刚度来调整结构的自振频率,以降低结构与地震发生共振的概率;可以根据经济等情况综合考虑调节阻尼器阻尼以达到最好的消能减震效果。

(3) 阻尼器的构造和性能还需进一步优化。

参考文献:

- 曹海韵,潘鹏,叶列平,等. 2011. 混凝土框架摇摆墙结构体系的抗震性能分析[J]. 建筑科学与工程学报,28(1):64-69.
- 吕西林,陈云,毛恩君. 2011. 结构抗震设计的新概念——可恢复功

能结构[J]. 同济大学学报(自然科学版),39(7):942-948.

曲哲,和田章,叶列平. 2011. 摇摆墙在框架结构抗震加固中的应用[J]. 建筑结构学报,32(9):11-19.

曲哲,叶列平. 2011. 摇摆墙—框架体系的抗震损伤机制控制研究[J]. 地震工程与工程振动,31(4):40-50.

徐昕,周云,吴从晓. 2012. 扇形铅粘弹性阻尼器性能的有限元分析研究[J]. 防灾减灾工程学报,32(4):444-451.

张纪刚,江志伟,李秋义. 2013. 刚度对海洋平台—摇摆墙体系抗震性能的影响研究[J]. 土木工程学报,46(增刊1):287-291.

张纪刚,嵯焕雯,江志伟. 2012. 基于摇摆墙体系的新型海洋平台振动控制研究[J]. 土木工程学报,45(增刊2):151-155.

周颖,吕西林. 2011. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. 建筑结构学报,32(9):1-10.

Patil K. C., Jangid R. S. . 2005. Passive Control of Offshore Jacket Platforms[J]. Ocean Engineering,32(16):1933-1949.

Jin Q., Li X., Sun N., et al. . 2007. Experimental and Numerical Study on Tuned Liquid Dampers for Controlling Earthquake Response of Jacket Offshore Platform[J]. Marine Structures,20(4):238-254.

Ma R. J., Zhang H. T., Zhao D., et al. . 2010. Study on the Anti-vibration Devices for a Model Jacket Platform[J]. Marine Structures,23(4):434-443.

Analysis of Seismic Performance of Offshore Platform with Rocking Wall System Installed Viscoelastic Rotary Dampers

ZHANG Ji-gang¹, JIANG Zhi-wei²

(1. Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, China)

(2. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract

Based on the offshore platform-rocking wall system, we installed a viscoelastic rotary damper in the hinge point at the bottom of the rocking-wall for passive energy dissipation and structure vibration control. The seismic performances are calculated by using ANSYS software under the earthquake load, and the stiffness and damping parameters of damper are analyzed and compared. The results show that the rotary damper is installed at the bottom hinge of the wall can significantly reduce the seismic response of structures.

Key words: offshore platform; rocking wall; viscoelastic rotary damper; vibration control; ANSYS