

海洋平台-摇摆柱结构体系冰激振动试验*

刘菲菲^{1,2}, 张纪刚^{1,2}, 苏锐³, 韩永力^{1,2}

(1. 青岛理工大学土木工程学院 青岛, 266033)

(2. 山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心 青岛, 266033)

(3. 中垠地产有限公司 济南, 250101)

摘要 海洋平台-摇摆柱结构体系是一种新型结构体系,能够有效地控制海洋平台在冰荷载作用下的动力反应,同时可以和多种消能减振装置相结合,进一步提高结构耗能能力。通过采用 ANSYS 对模型方案进行优化,研究冰荷载作用下,连接杆数量、位置和摇摆柱直径对海洋平台抗振性能的影响,分析发现连接杆数量越多、摇摆柱直径越大,减振效果越好。考虑到摇摆柱与海洋的接触面积以及结构的经济性,方案 3(摇摆柱直径为 360 mm、连接杆 4 根)可以达到较好的控制效果。模型以 JZ20-2 北高点海洋平台为基础,按照方案 3 制作 1:10 的缩尺模型。通过原海洋平台和海洋平台-摇摆柱结构进行对比分析,发现海洋平台增设摇摆柱是一种有效减振措施。

关键词 海洋平台;冰激振动;连接杆;减振效果;海洋平台-摇摆柱

中图分类号 TU391;TH113

引言

海洋平台所处环境恶劣,经常会受到风、浪、流、冰甚至是地震作用,其中冰荷载是海洋平台的控制荷载。欧进萍等^[1]对 JZ20-2MUQ 海洋平台进行冰激振动性能研究发现,在重冰年海洋平台的冰振位移较大,严重威胁到平台的安全。为解决这个问题,在 20 世纪 90 年代初,在辽东湾 JZ20-2MUQ, JZ20-2MSW 等多座平台上安装了固定式破冰锥体。文献[2-3]对其中两座平台进行荷载和结构动力响应的同步检测,结果发现,冰板与锥体作用会产生规律性的破碎,冰力周期与结构自振周期接近,振动放大现象时有发生,因此提出了带有隔振锥系统的导管架海洋平台^[4],但由于冰荷载作用频率是一种宽频率特性,实际上其控制效果还是受到了很大限制。张力^[5]提出了单向大比尺、滑动式 TMD,并取得了较好的减振效果。Wu 等^[6]将 TMD 运用于平台抗震研究,也取得了较好的效果。文献[7-8]采用磁流变半主动控制对海洋平台进行振动控制。事实证明, TMD, TLD 对平台振动控制具有较好的效果,磁流变半主动智能控制技术具有较好工程应用前

景^[9],但存在 TMD, TLD 控制频率相对单一和磁流变阻尼器漏油及渗油的问题。为此,张纪刚等^[10-11]结合摇摆柱体系提出了新型海洋平台-摇摆柱结构体系,并在理论上研究了可行性。笔者在其研究的基础上建立了 1:10 的海洋平台-摇摆柱结构体系缩尺模型,并进行相应的试验研究。

1 海洋平台-摇摆柱结构体系介绍

摇摆结构体系主要是通过放松结构与基础之间的约束,使得结构与基础之间仅有受压能力而无受拉能力,在外力作用下通过自重或预应力使结构复位^[12]。采用摇摆结构来进行抗震设计,在国际上已有不少成功案例。美国旧金山-奥克兰海湾大桥改造加固,采用文献[13]提出的半刚性摇摆桥墩。东京大学津田校区 G3 楼结构加固,采用了摇摆墙与钢阻尼器联合加固技术^[14]。

海洋平台-摇摆柱结构体系主要通过连接杆将摇摆柱与海洋平台连接在一起,摇摆柱柱底铰接,具备一定的转动能力,如图 1 所示。在外加荷载作用下,摇摆柱的存在使海洋平台变形趋于一致,变形主要集中在摇摆界面。

* 国家自然科学基金资助项目(51378271, 51678321);国家重点研发计划重点专项资助项目(2017YFC0703600);山东省重点研发计划资助项目(2018GSF117029)

收稿日期:2017-03-07;修回日期:2017-11-30

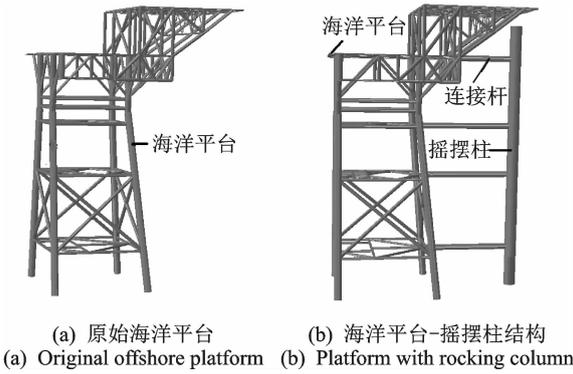


图 1 海洋平台
Fig. 1 Offshore platform

2 摇摆柱直径和连接杆数量优化

摇摆柱和连接杆作为海洋平台重要构件,其摇摆柱直径、连接杆数量和位置对平台均具有十分重要

要的影响。考虑以上因素,提出了 5 种布置方案,如图 2 所示,具体尺寸如表 1 所示。

方案 1 采用了 6 根连接杆,连接杆刚度足够大,与海洋平台和摇摆柱间采用铰接。方案 2~5 与方案 1 主要区别是连接杆的数量和位置。摇摆柱考虑直径变化,分别取 240, 360 和 480 mm 三种情况进行研究,壁厚均为 6 mm。由于试验时采用的是 1:10 缩尺模型(具体相似比见表 2),在采用 ANSYS 进行最优结构选型时,模型和冰荷载均进行了缩尺。模拟时主要考虑海洋平台-摇摆柱体系在弯曲冰(冰与结构接触面呈斜面时,冰将沿坡面上爬到一定高度后发生弯曲折断,此时产生冰力为弯曲冰)和挤压冰 1(冰排在移动过程中,冰与结构接触前端形成“损伤”区和裂纹,冰产生冰屑剥落形成)作用下的选型,如图 3 所示。模拟时,连接杆采用 LINK8 单元,海洋平台和摇摆柱采用 BEAM188 单元。

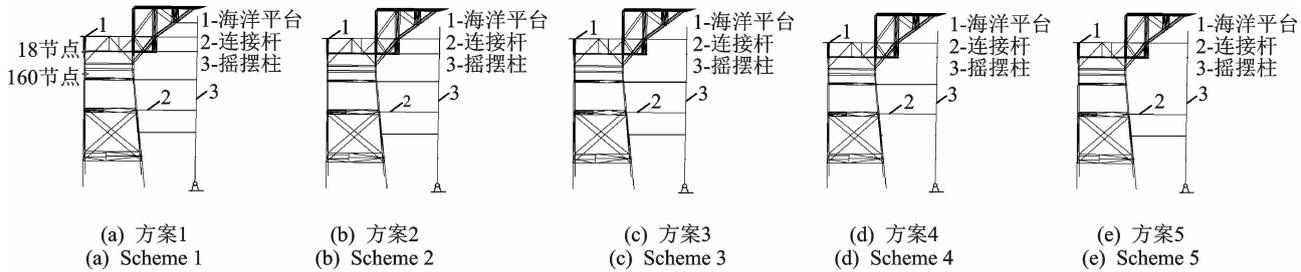


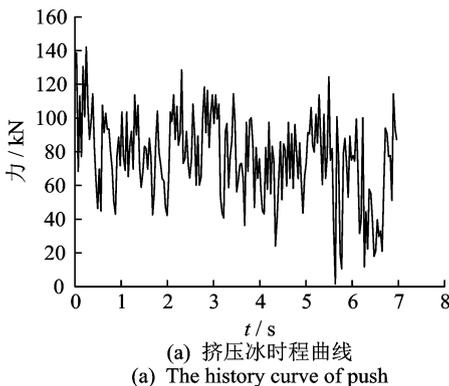
图 2 连接杆布置方案

Fig. 2 The scheme of connecting rods

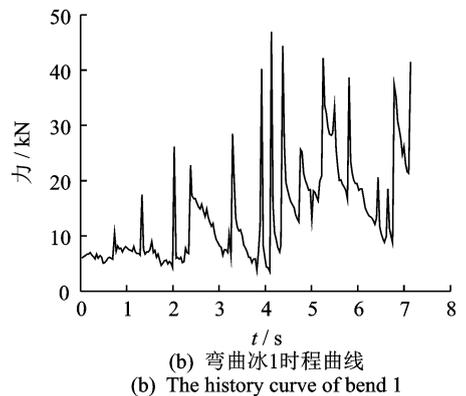
表 1 海洋平台-摇摆柱布置方案

Tab. 1 The scheme of offshore platform with rocking column

试验方案	摇摆柱			连接杆个数
	直径/mm	壁厚/mm	壁厚/mm	
1	240	360	480	6
2	240	360	480	5
3	240	360	480	4
4	240	360	480	3
5	240	360	480	3



(a) 挤压冰时程曲线
(a) The history curve of push



(b) 弯曲冰1时程曲线
(b) The history curve of bend 1

图 3 冰力时程曲线

Fig. 3 The history curves of ice load

在弯曲冰 1 作用下,原结构端帽处和下层甲板的位移响应依次为 0.76 cm 和 1.33 cm,加速度响应依次为 0.097 g 和 0.193 g;挤压冰作用下,原结构端帽处、下层甲板的位移响应依次为 1.51 cm 和 2.78 cm,加速度响应依次为 0.172 g 和 0.322 g。通过图 4 和图 5 对比发现,施加摇摆柱后,不论位移

还是加速度均明显降低,以方案 1 中摇摆柱直径 360 mm 的海洋平台为例,在弯曲冰 1 作用下导管架端帽处位移和加速度分别降低 67.11% 和 88.49%,效果十分明显。5 个方案中,方案 1 减振效果最好,随着连接杆数量的减少,位移和加速度也随之上升。在挤压冰作用下,方案 3 位移和加速度降低效果基本上可达 50% 以上;弯曲冰作用下可达到 40% 以上,效果明显,已经可以满足要求。从经济性上来说,适当的减少连接杆数量可以有效降低

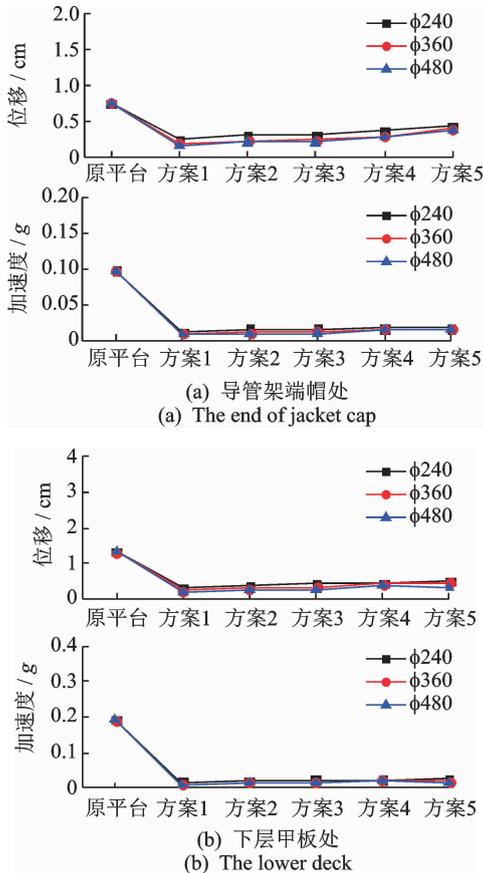


图 4 弯曲冰 1 作用下海洋平台-摇摆柱体系最大动力反应
Fig. 4 The maximum dynamic response of offshore platform with rocking column under bending 1

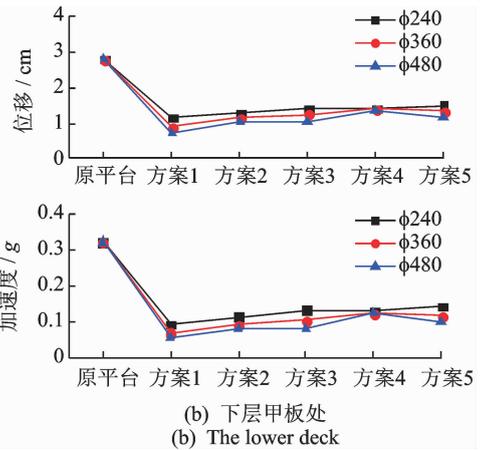
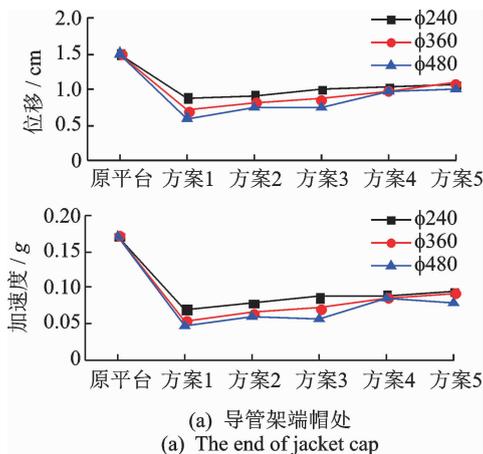


图 5 挤压冰作用下海洋平台-摇摆柱体系最大动力反应
Fig. 5 The maximum dynamic response of offshore platform with rocking column under pushing ice

工程造价和安装费用,也可以减少连接杆与平台和摇摆柱连接部位损伤。

对于摇摆柱而言,从图 4 和图 5 可以看出,摇摆柱直径越大,减振效果越好,直径为 480 mm 时,效果最好,但是考虑到摇摆柱与海洋的相互作用,摇摆柱直径应该尽可能的缩小,同时为了防止钢管屈曲和保证最优控制效果,取摇摆柱直径为 360 mm。综上所述,取方案 3 摇摆柱直径为 360 mm 的海洋平台进行试验研究。

3 试验模型和传感器布置

试验模型依据 JZ20-2 海洋平台进行制作,几何相似比为 1 : 10,如表 2 所示。根据频率相似比 $S_v = \frac{\sqrt{S_E/S_p}}{S_l} = 10$ (其中 $S_E = 1$) 计算缩尺后模型配重为 468 kg。试验共设置了 3 个加速度拾振器和 3 个位移传感器,分别位于导管架端帽(160 节点)、下层甲板(18 节点)及上层甲板(14 节点)处,如图 7 所示。

表 2 主要相似关系

Tab. 2 The similar relations of platform model			
力学变量	相似比	力学变量	相似比
长度 L	1/10	力 F	1/50
弹性模量 E	1	刚度 K	1/5
质量 m	1/898	加速度 \ddot{x}	1/17.956
位移 x	1/10	时间 t	1/13.4

海洋平台-摇摆柱结构体系主要根据方案 3 (图 2(c)) 进行布置,连接杆采用壁厚为 10 mm 的方钢管。海洋平台和摇摆柱通过方钢管铰接,

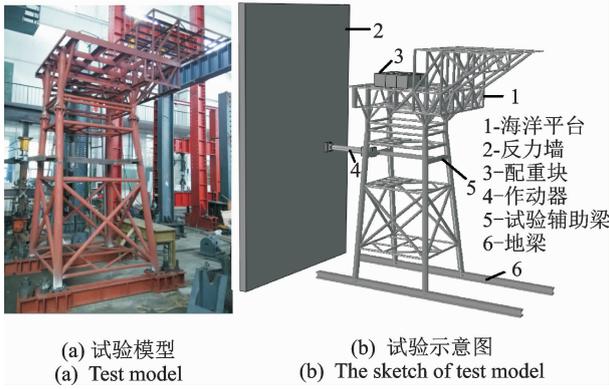


图 6 原海洋平台

Fig. 6 Original offshore platform

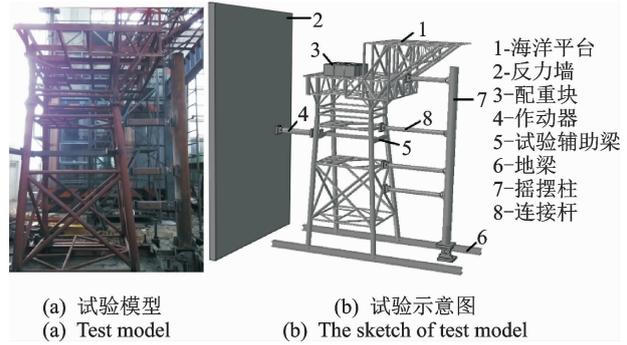


图 8 海洋平台-摇摆柱结构体系

Fig. 8 Offshore platform with rocking column

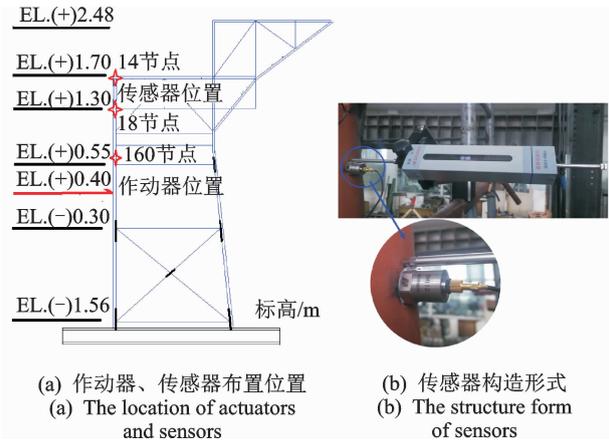


图 7 作动器、传感器布置位置及其构造形式

Fig. 7 The location and structure form of actuators and sensors

摇摆柱通过地梁、转动构件与地面铰接,如图 8 所示。

4 海洋平台-摇摆柱结构体系冰激试验

4.1 荷载工况

冰力加载点选在试验模型 EL. +0.40 m 处,也就是原海洋平台正倒锥顶面处。试验采用力控制,通过作动器进行加载,如图 7,8 所示。试验共采用了 4 条冰力时程曲线,其中 3 条弯曲冰、1 条挤压冰。弯曲冰时程由大连理工大学于 1996 年~1997 年实测,挤压冰时程由渤海石油公司于 1989 年~1990 年量测。试验时,将冰力按照表 2 中的相似关系进行处理,处理后结果如图 3 和图 9 所示。

4.2 试验结果分析

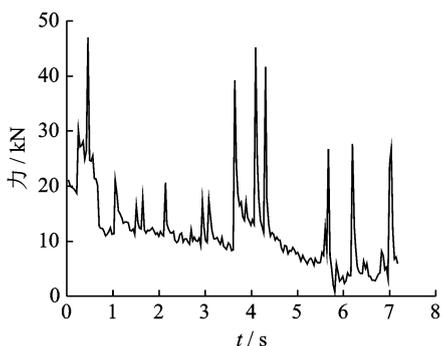
试验结果如表 3 所示,海洋平台施加摇摆柱后结构的位移明显减小,尤其是在弯曲冰 2 和弯曲冰 3 作用下,结构端帽处位移减小幅度甚至可达 60% 以上,如图 10,11 所示,可有效控制结构在重冰期的

表 3 冰荷载作用下结构动力反应

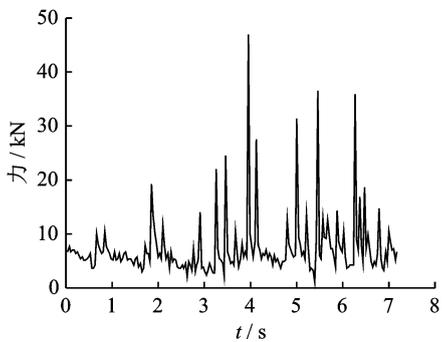
Tab. 3 The structural dynamic response under ice load

测点	工况	弯曲冰 1			弯曲冰 2			弯曲冰 3			挤压冰		
		原结构	海洋平台-摇摆柱	减振效果/%									
端帽处 (160 节点)	最大位移/cm	0.61	0.42	31.14	0.92	0.34	63.04	0.82	0.29	64.63	2.22	1.55	30.18
	最大加速度/g	0.020	0.015	24.64	0.021	0.020	2.88	0.030	0.028	6.79	0.099	0.062	37.44
下层甲板 (18 节点)	最大位移/cm	1.82	0.98	46.15	1.58	1.05	33.54	1.65	0.87	47.27	2.74	2.13	22.26
	最大加速度/g	0.038	0.026	31.37	0.039	0.036	7.28	0.060	0.049	17.97	0.153	0.109	28.96

减振效果=(原平台响应-海洋平台摇摆柱体系响应)/原平台响应×100%



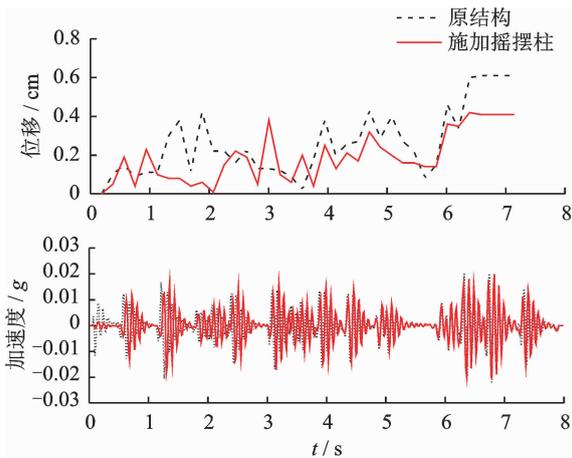
(a) 弯曲冰2时程曲线
(a) The history curve of bend 2



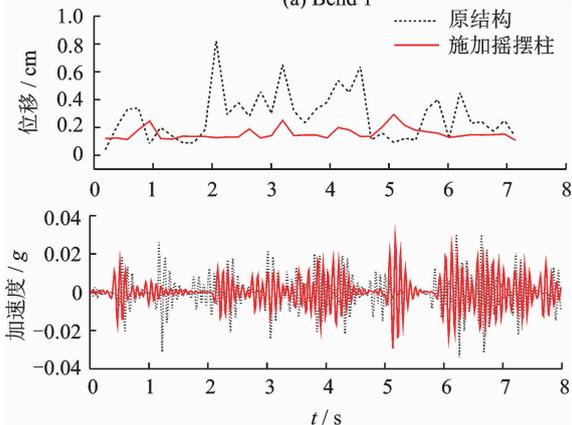
(b) 弯曲冰3时程曲线
(b) The history curve of bend 3

图9 冰力时程曲线

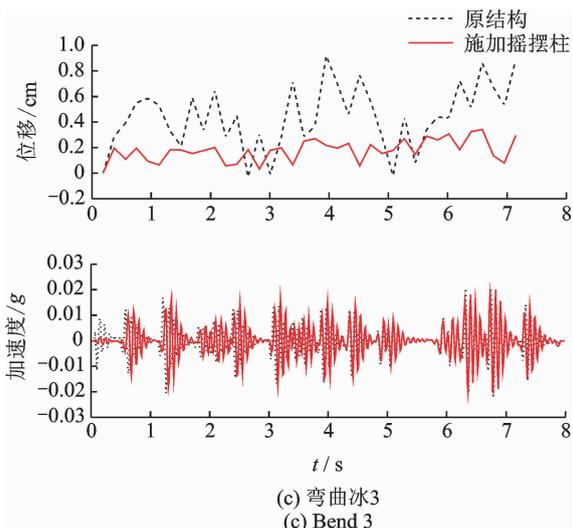
Fig. 9 The history curves of ice load



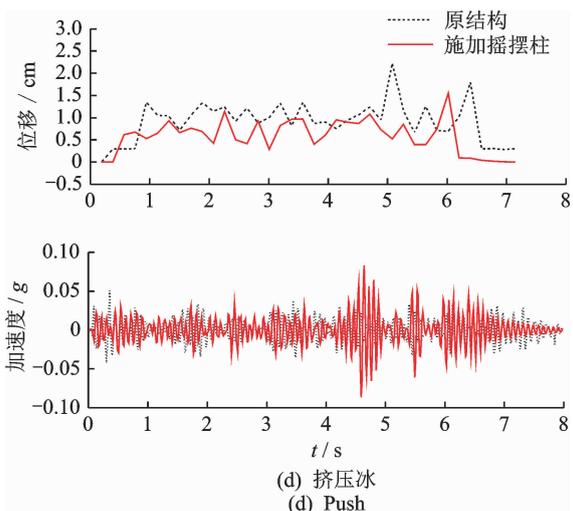
(a) 弯曲冰1
(a) Bend 1



(b) 弯曲冰2
(b) Bend 2



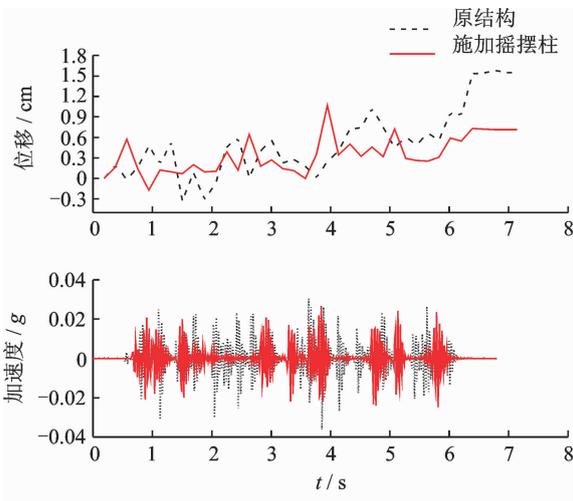
(c) 弯曲冰3
(c) Bend 3



(d) 挤压冰
(d) Push

图10 冰荷载作用下导管架端帽处最大动力反应

Fig. 10 The maximum dynamic response of jacket end cap under ice load



(a) 弯曲冰1
(a) Bend 1

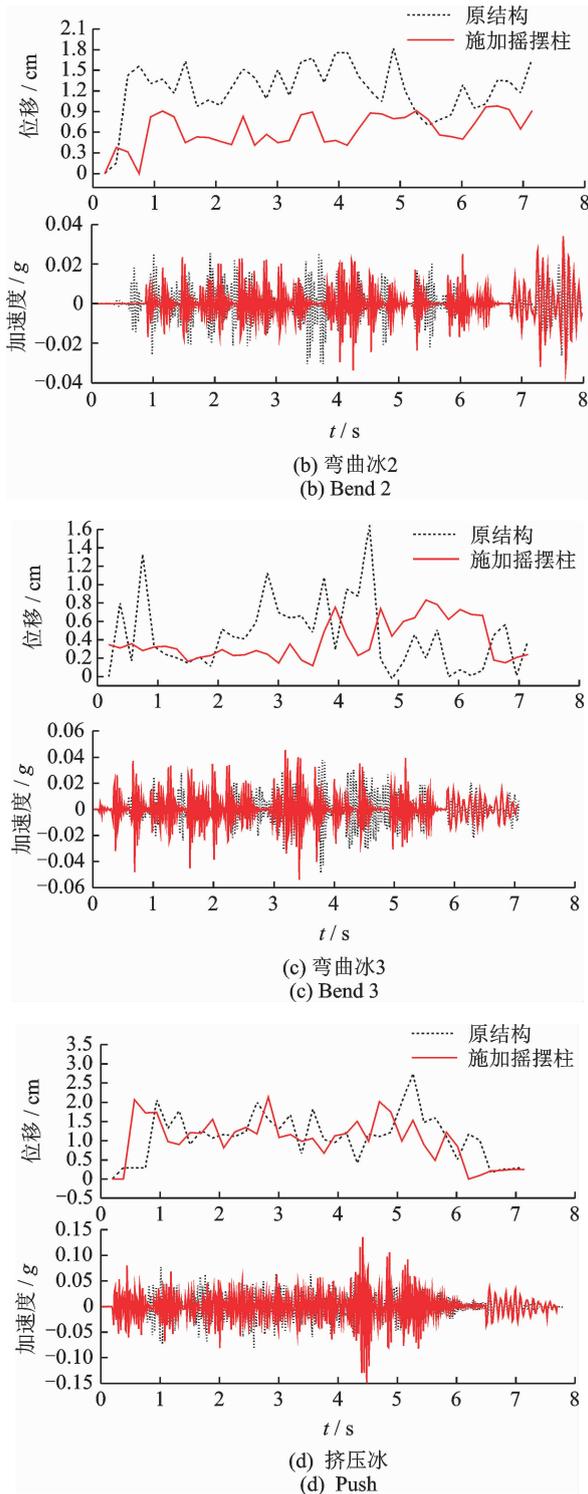


图 11 冰荷载作用下下层甲板最大动力反应

Fig. 11 The maximum dynamic response of lower deck under ice load

侧向位移,保护输油管道。相对于位移而言,端帽处加速度仅减小 2.88%。挤压冰作用下,端帽处位移和加速度依次减小 30.18%,37.44%,下层甲板位移和加速度依次减小 22.26%,28.96%,结构位移和加速度均得到了有效控制。这主要是由于弯曲冰

相较于挤压冰能量较小,原平台在弯曲冰作用下本身加速度反应就小,摇摆柱不能充分发挥作用。挤压冰荷载为弯曲冰荷载的 3 倍,在挤压冰作用下,摇摆柱与海洋平台能很好的协调受力,充分发挥摇摆柱的作用,这也说明外荷载越大海洋平台-摇摆柱体系控制效果越好,表明海洋平台-摇摆柱体系具有较高的抗灾防灾能力。

5 结 论

1) ANSYS 模拟分析选型发现,连接杆数量、位置和摇摆柱直径对海洋平台影响很大。连接杆数量越多、摇摆柱直径越大,减振效果越好,但考虑到摇摆柱与海洋的接触面积以及结构的经济性,采用方案 3(摇摆柱直径为 360 mm、连接杆为 4 根)进行结构设计。

2) 通过原海洋平台与海洋平台-摇摆柱结构体系试验对比发现,摇摆柱对海洋平台具有良好的控制效果。尤其是在弯曲冰 2 和弯曲冰 3 作用下,结构端帽处位移减小幅度甚至可达 60% 以上。在挤压冰作用下,端帽处位移和加速度依次减小 30.18%,37.44%,下层甲板位移和加速度依次减小 22.26%,28.96%,控制效果较好。为对海洋平台-摇摆柱结构体系进行深入研究,后续可对海洋平台-摇摆柱结构在挤压冰作用下的结构响应进行详细的研究。

参 考 文 献

[1] 欧进萍,段忠东,肖仪清. 基于实测动冰力时程的海洋平台结构冰振反应分析[J]. 海洋工程,1999,17(2): 70-78.
 Ou Jinping, Duan Zhongdong, Xiao Yiqing. Ice-induced vibration analysis of JZ20-2MUQ offshore platform using in-situ ice force histories[J]. Ocean Engineering, 1999,17(2):70-78. (in Chinese)

[2] Yue Qinjin, Bi Xiangjun. Ice induced jacket structure vibration[J]. Cold Regions Engineering, 2000,14(2): 81-92.

[3] Wang Shengyong, Yue Qianjin. Vibration reduction of bucket foundation platform with fixed ice-breaking cone in the bohai sea[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2012,26(4):160-168.

- [4] Wang Shengyong, Yue Qianjian, Zhang Dayong. Ice-induced non-structure vibration reduction of jacket platforms with isolation cone system[J]. *Ocean Engineering*, 2013(70):118-123.
- [5] 张力. 导管架海洋平台冰激振动控制的实验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- [6] Wu Qiong, Zhao Xilu, Zheng Rencheng. Experimental study on a tuned-mass damper of offshore for vibration reduction[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016,744(1):1-8.
- [7] 管友海,李华军,黄维平. 海洋平台磁流变阻尼器半主动控制研究[J]. *青岛海洋大学学报:自然科学版*, 2002,32(4):650-656.
Guan Youhai, Li Huajun, Huang Weiping. Study on magneto rheological fluid damper vibration control of offshore platforms [J]. *Journal of Qingdao Ocean University: Natural Science Edition*, 2002, 32(4): 650-656. (in Chinese)
- [8] 嵇春艳,万乐坤,尹群. 海洋平台磁流变阻尼器控制技术[J]. *海洋工程*, 2008,26(3):27-32.
Ji Chunyan, Wan Lekun, Yin Qun. Study on magneto rheological fluid damper vibration control for offshore platforms based on fuzzy control strategy[J]. *The Ocean Engineering*, 2008,26(3):27-32. (in Chinese)
- [9] 梅真,高毅超,郭子雄. 磁流变阻尼器动力性能测试与建模[J]. *振动、测试与诊断*, 2017,37(3):553-559.
Mei Zhen, Gao Yichao, Guo Zixiong. Dynamic testing and modeling of a magnetorheological damper [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017,37(3):553-559. (in Chinese)
- [10] 张纪刚,苏锐,刘菲菲,等. 海洋平台-摇摆柱减振体系中连接杆优化研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2015(5):144-150.
Zhang Jigang, Su Rui, Liu Feifei, et al. Optimization of link bars of new ocean offshore platform with rocking-column vibration control system [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2015(5):144-150. (in Chinese)
- [11] 张纪刚,王剑阁,韩永力. 用于海洋平台结构的钢管混凝土摇摆柱构造性能试验研究[J]. *北京工业大学学报*, 2015(7):1028-1034.
Zhang Jigang, Wang Jiange, Han Yongli. Experimental research of CFST rocking columns used in offshore platform [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015(7): 1028-1034. (in Chinese)
- [12] 周颖,吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. *建筑结构学报*, 2011(9):1-10.
Zhou Ying, Lü Xilin. State-of-the-art on rocking and self-centering structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2011(9):1-10. (in Chinese)
- [13] Astaneh-Asl A, Shen J H. Rocking behavior and retrofit of tall bridge piers [C] // *Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation, Structures Congress*. Reston VA, USA: The American Society of Civil Engineers, 1993: 121-125.
- [14] Wada A, Qu Z, Ito H, et al. Seismic retrofit using rocking walls and steel dampers [C] // *Proceedings of ATC/SEI conference on improving the seismic performance of existing buildings and other structures*. San Francisco, CA, USA: Applied Technology Council, 2009:1010-1021.



第一作者简介:刘菲菲,女,1988年11月生,博士生。主要研究方向为海洋平台结构振动控制、预制装配技术等。曾发表《转角阻尼器对海洋平台-摇摆墙体系抗振分析》(《海洋工程》2016年第34卷)等论文。

E-mail: feifeiliu2015@163.com

通信作者简介:张纪刚,男,1975年12月生,教授、博士生导师。主要研究方向为海洋平台结构振动控制、大跨钢结构关键施工技术及建筑垃圾的再生利用等。

E-mail: jigangzhang@126.com

