工程物理、工程力学 文章编号: 1000-8608(2007)01-0001-05

冰致自激振动测量与机理解释

岳前进*, 郭峰玮, 毕祥军, 许 宁

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在海洋平台上观测到了冰致结构的稳态振动,以及冰力和平台响应间的频率锁定现象. 通过对实测数据和冰与结构相互作用的破碎机理分析,证明冰致稳态振动属于自激振动. 给出了产生冰致自激振动的条件,提出了冰致自激振动的物理机制,指出冰致自激振动发生在冰加载速率的韧脆转变区,整个过程中冰内裂纹的形成与扩展受到了结构运动速度的控制. 冰内部的微裂纹行为是解释与描述冰致自激振动的关键要素.

关键词: 自激振动; 冰致振动; 振动测量; 冰力学行为; 微裂纹行为

中图分类号: O323 文献标识码: A

0 引 言

关于是否存在以及如何解释冰致结构自激振动现象一直存在较大争议. 自从20世纪60年代初观察到冰引起的结构振动后,人们对冰引起结构振动的原因一直存在两种不同的解释,一种认为振动过程中冰存在特定的破碎长度,与结构无关,即强迫振动;另一种观点则认为冰力周期受到结构的控制,即结构冰振是一种自激振动,其中芬兰学者Määttänen提出了自激振动模型,认为模型中的负阻尼与冰的单轴压缩强度–应变速率曲线中的负斜率有关. 其他自激模型包括王翎羽等提出的冰力振子模型[1]等. 许多学者对是否存在冰致自激振动持质疑的态度[2,3],主要原因在于缺少有说服力的观测数据及令人信服的机理解释.

交变冰力是在冰与结构相互作用的破坏过程中形成的,这是一个非常复杂的力学过程,目前还不能很好地用数值方法或物理模型描述这一过程,基于现场结构的测量结果仍然是最具说服力的. 早期现场测量中受测量技术的限制,有效的交变冰力非常少,大多的测量数据只能提供极值冰力分析. 早期在库克湾平台上只测量了平台的振动响应数据[4],后来瑞典学者在芬兰湾灯塔上进行了直接冰力测量,发现随冰速变化存在不同的冰力模型[2],并提出冰力可能受结构的控制,但是并没有获得支持冰致自激振动的详细数据.

人们对冰致自激振动存在性的质疑还在于对冰致自激过程的物理解释. 自激振动的基本特征是连续的能量受到结构(系统)的调制后形成了交变性的能量输入,许多自激振动过程都有明确的物理解释与判据,例如摩擦引起自激的物理解释是摩擦的"粘滑效应",而以往关于冰致自激振动模型并没有对形成交变能量的过程给出明确的解释.

本文利用在渤海辽东湾抗冰结构上开展的原型观测,同步、连续地监测冰力、结构响应与冰速变化数据,观测冰致结构的稳态振动以及冰力与响应的频率锁定现象,以确定冰致自激振动发生的条件. 在此基础上,分析冰致自激振动的物理过程和能量交换过程.

1 冰致结构的稳态振动

本文在渤海辽东湾JZ20-2油田的MSW平台

收稿日期: 2005-11-26; 修回日期: 2006-12-05.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10672029).
作者简介: 岳前进*(1958-),男,教授,博士生导师, E-mail: yueqj@dlut.edu.cn.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

上测量到了冰引起结构的稳态振动现象[5]. 该平台是一座没有安装破冰锥体的圆柱桩腿结构, 1999 2000年冬季在平台上安装了拾振器、冰压力计与摄像云台等测量装置(图 1). 由于冰压力计意外受损,只测量了结构响应与冰速的变化关系. 记录数据显示,冰与结构作用发生挤压破坏的过程中,大多数情况下结构冰振响应为窄带的随机振动.

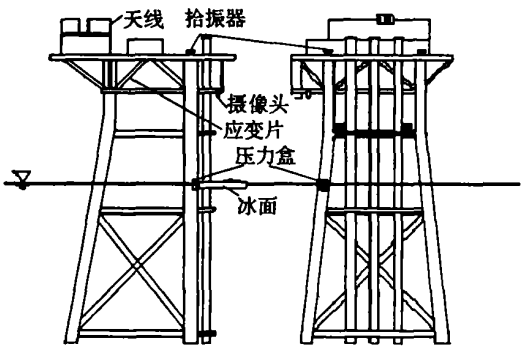

图 1 JZ20–2 MSW平台的冰振测量系统

Fig. 1 Measurement system on JZ20–2 MSW platform

但是在特定的冰速范围内(现场为 2~ 4 cm/s),冰能引起平台的稳态振动. 结构振动基本保持恒定幅值,且幅值远大于随机振动. 数据显示,在一定的冰速范围内结构能保持稳态振动最长可达十几分钟,只是幅值随冰速增加而缓慢地降低[6]. 图 2给出了冰致稳态振动响应曲线. 当冰厚约为 20 cm 时,振动的加速度幅值可达 0.16g,对平台构成很大的威胁.

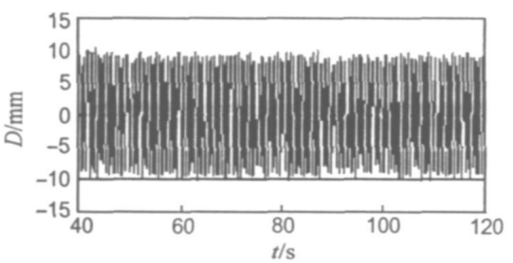

图 2 稳态振动曲线

Fig. 2 Steady state vibration curve

对响应数据进一步观察分析发现,稳态振动时结构响应曲线接近简谐振动. 因为振动过程中海洋平台处在线性系统范围以内,所以如果响应为确定性的,则激励必然为确定的. 如果用强迫振动理论来解释冰致稳态振动,冰的破碎尺寸(激励频率)只与冰的特性有关,就要求冰的破碎尺寸必须严格保持一致,而实际上海冰是一种非常复杂的天然复合材料,内部含有大量杂质,一般情况下只能以随机的尺寸破坏,形成随机荷载. 显然,在稳态振动的情况下只能是冰激励受到了结构的控制. 因此冰致稳态振动不是一般意义上的强迫振动,应该用自激振动来解释.

2 冰力的频率锁定现象

为了对冰致稳态振动作进一步研究,本文又在辽东湾 JZ9–3油田的一座单桩柱结构(MDP–1)上进行了测量. 单腿结构能更好地研究冰力与结构响应的关系. 在该结构上实现了冰力、响应与冰速的同步测量,实验装置见图 3.

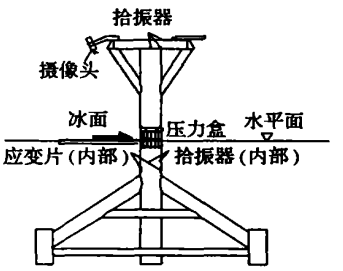

图 3 JZ9–3(MDP–1)平台冰振测量装置

Fig. 3 Measurement system on JZ9–3 platform

JZ9–3(MDP–1)结构的测量结果显示,当冰发生挤压破坏时,随冰速由慢到快变化会发生 3种不同的振动现象:准静态振动、稳态振动与随机振动. 这里重点讨论稳态振动过程. 同步记录的冰力时程、结构振动响应与冰速数据显示,在稳态振动过程中,存在频率锁定现象,即冰力的变化频率与结构振动频率完全相同,并且在一定的冰速范围内保持“锁定”状态,如图 4所示.

JZ9–3(MDP–1)平台的测量证实了对 JZ20–2 MSW 平台稳态振动的解释,即冰力受到了结构的“调制”,这是自激振动的基本特征. 但是仍然不清楚是什么造成了自激振动.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

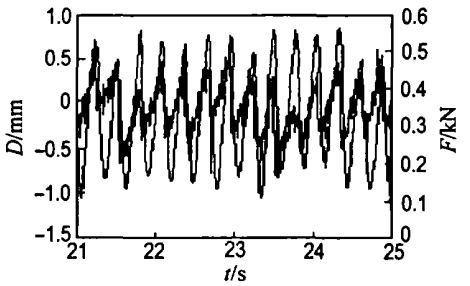

图 4　冰力的频率锁定现象

Fig. 4　Lock-in of ice force and response

3　冰致自激振动的机理分析

3.1　冰的压缩实验结果分析及微裂纹损伤行为

现场观测表明,只有当冰与结构作用产生挤压破坏并且冰速为 2~ 4 cm /s时,才会产生自激振动. 因而,为了说明冰致自激振动的物理过程,需要分析冰在受压状态下的破坏行为. 已有的文献对渤海辽东湾海冰进行了单轴与受限压缩实验,其中冰的单轴压缩实验可以基本反映冰与结构相互作用的行为.

实验结果表明,海冰的单轴压缩强度对加载速率极为敏感,图 5为温度 7℃ 时压缩强度与应变速率的关系 (盐度 0.004 09~ 0.004 23),在低加载速率下为韧性破坏,在高加载速率下为脆性破坏,而在韧脆转变点处的强度最大. 对试件破坏过程的观察表明,当接近韧脆转变点处时冰内出现大量微裂纹,这是一种累积损伤破坏,在加载初期试件就出现微裂纹,裂纹的数量随加载幅值的增加而增加.

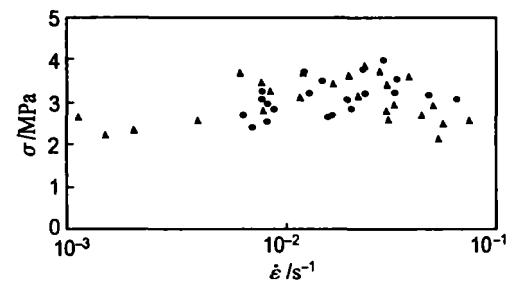

图 5　海冰压缩强度与加载速率的关系

Fig. 5　Compressive strength of sea ice with loading rate

为了定量观察冰内部裂纹,已有的文献利用人造纯净冰观察了裂纹密度与应力的关系. 具体的方法是采用多个试样,在试样加载中途切片以观察裂纹的数量. 图 6为冰试样达到最大荷载前裂纹密度随应力增加的关系.

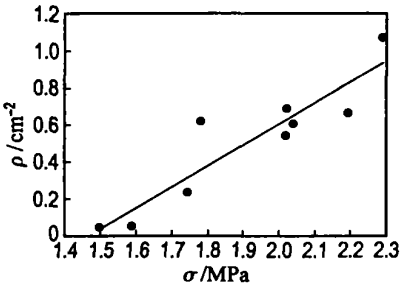

图 6　冰在压缩过程中裂纹密度与应力关系

Fig. 6　Crack density with stress under compression

3.2　冰致自激振动的物理机制解释

许多学者对冰在压缩过程中的韧脆转变及内部裂纹行为做了比较系统的研究,这些工作对了解冰的基本力学行为,甚至一般固体材料的韧脆性及其转变行为有重要意义[7 8]. 其中文献[9 10]分析了冰与结构相互作用过程中冰的裂纹损伤行为,本文则由此对解释冰致自激振动受到启发.

结构能保持持续等幅的振动,其先决条件是有周期性的能量输入,以补充振动过程中的阻尼损耗. 因此在冰致自激振动过程中冰对结构必然有一个稳定的周期性能量输入,原理解释如下:

冰与结构作用发生挤压破坏时,冰速与冰的加载速率间的关系可以表示为[11 12]

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_{ice}}{\Gamma D_{str}} \tag{1}$$

式中: $\dot{\varepsilon}$、v_{ice}、D_{str} 分别为冰的应变速率、冰速和结构的直径; Γ为与结构和冰的宽厚比有关的系数,通常在 2~ 4选取. 该式只是对冰速与冰的应变速率关系的粗略估计,并没有考虑结构自身的运动速率,只适用于结构刚度较大、结构运动速率远小于冰速的情况. 实际上对于柔性结构来讲,结构运动速率 v_{str} 和冰速 v_{ice} 的大小处于同一量级,结构对冰的真实加载中应该考虑结构运动对加载速率的影响.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

因此式(1)中的冰速应该为相对冰速,即

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_r}{D_{str}} \tag{2}$$

其中 $v_r = v_{ice} \pm v_{str}$. 当结构与冰运动方向一致(图 7(b))时,相对冰速 $v_r = v_{ice} - v_{str}$;当结构回弹(图 7(c))时,相对冰速 $v_r = v_{ice} + v_{str}$.

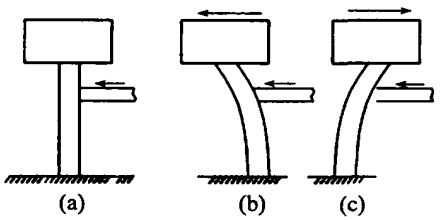

图 7 结构与冰相对运动示意图

Fig. 7 Sketch of ice-structure interaction

以冰为研究对象,如果相对冰速 v_r 使得对冰的加载应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 位于韧脆转变区,当结构与冰运动方向一致(加载阶段)时

$$v_r = v_{ice} - v_{str} \tag{3}$$

此时由于 v_{str} 和 v_{ice} 数量值相当,相对速率 v_r 较小,根据式(2)可知应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 较小,冰处于韧性破坏区,冰内部形成了大量微裂纹,如图 8所示. 文献[11]在对人造纯净冰的常应变速率单轴压缩实验中发现,在接近韧脆转变点处的韧性区,冰内部出现许多稳态开裂的裂纹,而且在加载初期就会有裂纹的出现,当裂纹达到一定数量时,由于裂纹的贯通而破坏.

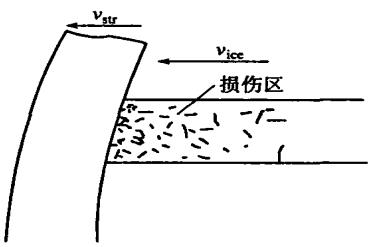

图 8 冰与结构同向运动中形成的微裂纹

Fig. 8 Micro crack formed in equidirectional motion of ice and structure

当结构位移达到最大时,冰内部裂纹达到饱和,损伤的冰板无法继续承受结构的回复力,结构开始回弹(卸载阶段),此过程中

$$v_r = v_{ice} + v_{str} \tag{4}$$

由于相对速率 v_r 的增大,加载速率 $\dot{\varepsilon}$ 进入脆性破坏区,在加载阶段形成的密集裂纹同时失稳开裂,损伤的冰形成了粉末状碎冰.

根据以上结论和假设,冰致自激振动的机理可以表述如下:

结构与冰同向运动(加载阶段)时,加载速率较小,冰处于韧性破坏阶段,冰内形成大量微裂纹,根据固体断裂理论,这一阶段由于微裂纹损耗的断裂表面能很小,结构在巨大冰力作用下储存了较大的变形能;而在结构与冰反向运动(卸载阶段)时,大量已经饱和的微裂纹失稳贯通,先前储存在结构中的"多余"能量以表面能和少量热能的形式耗散掉,在一个周期内冰板输入到结构中的"净能量"刚好维持了稳定的振动,系统能量收支平衡.

4 结 语

通过室内冰力学行为的研究,对冰引起的稳态振动机理进行了分析. 指出冰在韧脆转变阶段的微裂纹行为是解释冰致稳态振动的关键,在冰与直立柔性结构相互作用过程中,冰与结构的相对速度控制了冰的加载速率. 在结构加载过程形成了稳态开裂的裂纹,而在卸载过程中形成的微裂纹同时失稳开裂,使冰的破碎频率被结构控制在自身的固有频率上. 这一观点还能解释冰与结构相互作用的频率锁定现象.

然而,本文的研究只是对冰致稳态振动的机理进行了解释,还没有建立动冰力模型对结构的振动响应的预测. 观测结果显示,冰致稳态振动存在频率锁定现象,不符合强迫振动理论,更符合自激振动的观点. 如果建立自激振动模型,还需要对系统内能量的相互作用进行分析,这是今后需要开展的工作.

本文的研究还表明,冰与结构相互作用产生的动冰力是一个十分复杂的过程,现场原型结构可以真实地反映这一过程,但是利用室内模型实验模拟这一过程则比较困难,对模型冰与实验模型都提出了很高的要求. 如果能在室内实验中再现冰致自激振动过程,将对这一问题的研究提供很大帮助. 这也是即将开展的探索性工作.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献:

[1]王翎羽,徐继祖. 冰与结构动力相互作用的理论分析模型 [J]. 海洋学报,1993, **15**(13): 140–146

[2] ENGELBREKTSON A. Dynamic ice loads on lighthouse structures [C]// **Proceedings of 4th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions**. Canada: [s n], 1977

[3] PEYTON H R. Sea ice forces. Ice pressures against structures [R]. Ottawa: National Research Council of Canada, 1968: 117–123

[4] BLENKARN K A. Measurement and analysis of ice forces on Cook Inlet structures [C]// **Proceedings of the Second Offshore Technology Conference**. Houston: OTC, 1970

[5] YUE Q J, BI X J. Ice-induced jacket structure vibrations in Bohai Sea [J]. **J Cold Regions Eng**, 2000, **14**(2), 81–92

[6]岳前进,杜小振,毕祥军. 冰与柔性结构作用挤压破坏形成的动冰力 [J]. 工程力学,2004, **21**(1): 202–208

[7]李洪升,岳前进,郑靖明,等. 海冰韧脆转变特性的宏微观分析 [J]. 冰川冻土,2000, **22**(1): 48–52

[8]岳前进,毕祥军. 人造柱状冰韧脆转变区裂纹的初步研究 [J]. 冰川冻土, 1995, **17**(增): 106–112

[9] JORDAAN I J. Mechanics of ice–structure interaction [J]. **Eng Fract Mech**, 2001, **68**: 1923–1960

[10] KARNA T, KAMESAKI K, TSUKUDA H. A numerical model for dynamic ice–structure interaction [J]. **Comput Struct**, 1999, **72**(4): 645–658

[11] MECHEL B, TOUSSAINT N. Mechanism and analysis of indentation of ice plat [J]. **J Glaciology**, 1977, **19**(81): 285–300

[12] RALSTON T D. An analysis of ice sheet indentation [C]// **Proceedings of the Fifth IAHR Symposium on Ice Problems**. Lulea: IAHR, 1978: 13–31

Measurement and explanation for its mechanism of ice-induced self-excited vibration

YUE Qian-jin*, GUO Feng-wei, BI Xiang-jun, XU Ning

(State Key Lab. of Struct. Anal. for Ind. Equip., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract The phenomena of ice-induced steady state vibration and frequency lock-in between ice force and response were observed on offshore platform. The further analysis of full-scale test data and laboratory-conducted compression tests of sea ice under corresponding load speed demonstrates that it is a typical self-excited vibration. The conditions occurring in ice-induced self-excited vibration and physical mechanism are discussed. It is pointed out that ice-induced self-excited vibration takes place at loading rate of ice failure within ductile-brittle region, and in the whole process formation and spread of micro crack in ice are controlled by vibration velocity of the structure. The micro crack behavior in ice is the key factor for describing and explaining ice-induced self-excited vibration.

Key words self-excited vibration; ice-induced vibration; measurement of vibration; ice mechanics behavior; micro crack behavior

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net