
工程力学》

∦

文章编号: 1000-8608(2009)03-0313-04

冰锥作用位置对冰弯曲破坏模式影响数值分析

武文华*, 于佰杰, 岳前进

(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:通过显式动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA 模拟了冰锥相互作用的动态断裂过程,得 到了冰排内部的应力分布和裂纹扩展趋势.冰上下表面的应力分布有较大差别,在冰锥接触 处首先出现径向裂纹.基于数值结果比较了在不同冰锥作用位置时,冰应力分布及裂纹扩展 趋势的差异,并进一步分析了冰锥作用位置和破坏模式转变的关系.结果表明,冰锥作用位置 对冰排应力分布和裂纹扩展趋势的影响较小,不是影响破坏模式转变的一个重要因素.

关键词:冰锥作用位置;破坏模式;裂纹扩展;数值模拟

中图分类号: TU312.1 文献标志码: A

0 引 言

海冰对海洋结构的撞击是海洋石油资源开发 中面临的普遍问题.安装锥体抗冰结构能够降低 冰荷载,这是由于海冰的弯曲强度明显小于压缩 强度,安装锥体可使海冰以弯曲方式破坏.研究表 明海冰的弯曲断裂过程呈现明显的周期性,这就 可能引起平台的冰激振动.渤海 JZ20-2 平台现场 监测发现冰荷载频率与平台结构固有频率接近, 造成很大的安全隐患.

锥体结构的冰荷载研究已经取得了诸多成果. Wessels 等^[1]、Izumiyama 等^[2]均对冰和锥体弯曲破 坏过程进行过描述;Lau 等^[3]基于模型试验和现场 观测总结了冰锥相互作用过程,发现存在3种弯曲 破坏模式,分别对应不同的断裂长度;李峰等^[4]基 于现场观测提出冰与窄锥结构相互作用存在径向 断裂和环向断裂两种弯曲破坏模式,对应的断裂长 度有较大差别.由于断裂长度直接关系到海洋平台 所受外载的周期,破坏模式转变原因的研究成为海 洋平台抗冰结构设计的一个关键问题.

Wessels 等^[1]认为锥径增加后,锥体表面曲 率减小,导致冰排内部的环向拉应力减小,当锥径 增大到一定程度时环向裂纹将先于径向裂纹出 现;屈衍^[5]基于现场观测认为随锥径与冰厚比值 的增大,破坏模式由径向断裂向环向断裂转变,同 时指出海冰的力学性质及均匀程度都会影响破坏 模式的转变.由于冰锥相互作用过程复杂,现场环 境多变,各国学者对冰锥作用位置的影响程度尚 未达成一致意见.

数值方法能够方便地排除复杂环境的干扰, 在研究破坏模式转变的问题上有明显的优势. Lau^[6]应用离散元法模拟了冰锥相互作用过程, 然而离散元法计算复杂,不适合广泛的工程应用; Derradji-Aouat 等^[7]使用 LS-DYNA 模拟了冰和 水电站的相互作用过程,取得了较好的结果.将数 值方法用于考察冰锥作用位置对破坏模式转变的 影响程度具有重要意义.本文利用大型工程计算 软件 ANSYS/LS-DYNA^[8]对海冰和带锥平台结 构的相互作用产生的弯曲断裂过程进行数值模 拟,从断裂初始的临界应力状态和裂纹扩展趋势 两方面对海冰的破碎行为进行分析.

1 冰锥相互作用过程

冰排在风和潮汐的作用下以一定速度向锥体 结构运动,冰前缘与锥体接触并沿锥体表面向上 爬升.冰排在冰锥接触力、摩擦力和重力的共同作 用下发生断裂破碎.

在弯曲破坏范围内,冰排在锥体上断裂呈现 不同的破坏形态. 渤海 JZ20-2 平台上的现场观测

收稿日期: 2007-05-11; 修回日期: 2009-03-13.

基金项目:"八六三"国家高技术研究发展计划资助项目(2001AA602015);国家自然科学基金资助项目(10302005).

作者简介:武文华*(1973-),男,副教授;岳前进(1958-),男,教授,博士生导师.

发现存在环向断裂和径向断裂两种破坏模式.

(1)径向断裂

如图 1 所示,冰排与锥体接触后,接触点处产 生一系列径向裂纹,并向内扩展形成一系列同心 扇形冰板;冰排继续运动,最终从扇形根部同时断 裂形成一条环向裂纹;破碎的冰会在后续冰推力 作用下继续沿锥体爬升,最终滑下锥体漂走.



图 1 径向断裂模式 Fig. 1 Radial failure mode

(2)环向断裂

如图 2 所示,冰排与锥面接触后先出现曲率 较大的环向裂缝,破坏的位置远离冰锥接触点,断 裂几乎同时发生,在后续冰排推动下断裂的冰排 继续沿锥体表面爬升并进一步沿径向断裂成小碎 块,最终滑下锥体漂走.



Fig. 2 Circumferential failure mode

2 数值模型

冰排尺寸相对于锥体可视为半无限大,模拟 过程中用有限域代替,并使用无反射边界来处理 无限大域的边界问题.冰排使用辐射状映射网格 划分单元,以保证接触区域足够的网格密度,同时 可大量节省计算时间.冰排初速度为 0.6 m/s.

锥体结构如图 3 所示,上下锥角分别为 60°和 45°,交界处锥径 4 m;约束锥体底面的全部自由度;模拟时间为 100 ms,计算过程采用自动时间 步长.冰排和锥体的材料参数见表 1.



表1 模型的材料属性[9、10]

Tab. 1 Material properties for model^[9,10]

	$ ho/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3})$	E/Pa	ν
锥体	7 850	2×10^{11}	0.30
冰排	960	0.5 $\times 10^{9}$	0.27

3 冰排内部应力场分布

冰排受到锥体结构的作用,其上下表面的应 力分布会有所不同.图4为锥体直径3.5m时冰 排上下表面第一主应力分布.



Fig. 4 The distribution of the 1st principal stress at top and bottom surface of ice sheet

图 4 显示冰锥接触处的上表面应力最大,向 外缘逐渐递减;下表面在略偏离接触区的位置出 现对称的两个应力集中区域.冰排上下表面第一 主应力最大值随时间变化曲线如图 5 所示.



Fig. 5 Stress-time history at top and bottom surface of ice sheet

可以看出,随冰锥的相互接触,冰排上下表面 应力增大,上表面增加得更快.当冰排中应力值增 大到材料所许可的最大应力时发生断裂. 上表面 的应力最大值促使冰排出现径向裂纹,下表面的 应力最大值促使冰排产生环向裂纹,通过比较两 值即可得到冰锥接触位置对破坏模式的影响.

冰锥接触位置对破坏模式的影响 4

图 6 为冰排上下表面应力最大值随冰锥接触 位置的变化规律.

由图可见,下表面应力总小于上表面应力,断 裂始终从冰锥接触点处开始,首先出现的是径向 裂纹.冰锥接触位置的变化对上下表面应力分布 影响不大.



The effect of contact positions on ice Fig. 6 stress distributions

通过添加失效准则可以进一步从冰排裂纹扩 展的趋势分析冰锥作用位置的影响.冰速较高时 冰排可视为弹脆性材料,其破坏以拉伸破坏为主, 采用"最大主应力失效准则"较为合理.模拟过程 中以 0.65 MPa 为失效强度.

裂纹扩展情况如图 7 所示. 当冰锥接触处锥 径较小(D=2.0 m)时,出现一条径向裂纹,并沿 着径向扩展:当接触处锥径增大为 2.4 m 时出现 两条间距较窄的径向裂纹;继续增加锥径到 3.5 m 时裂纹条数增为3条,径向裂纹间距离变大.

图 8 是不同接触位置时下表面第一主应力分 布情况,冰排下表面有明显的环形应力集中区域, 因其应力值未达到失效强度,不会出现环向裂纹. 接触处锥径增大后下表面环向应力增大,可见接



图 7





(a) D=2.0 m

(b) D=2.4 m 不同接触位置时的裂纹扩展趋势

Fig. 7 Crack propagation inclinations at different contact positions



第 49 卷

触处锥径增加会略有利于环向裂纹的形成,但尚 无法引起径向断裂和环向断裂两种破坏模式的转 变.

5 结 论

(1)冰锥作用时,最大应力出现在冰排上表面的接触点处,裂纹首先出现在此位置,并沿径向扩展.

(2)冰锥接触位置的变化对冰排内应力分布 影响较小.

(3)随接触位置变化冰排出现的裂纹数量增加,下表面应力最大值增大,但没有引起破坏模式的转变.

由此可知,冰锥作用位置不是影响破坏模式 转变的重要因素.

参考文献:

- [1] WESSELS E, KATO K. Ice forces on fixed and floating conical structures [C] // Proceedings of the 9th International IAHR Symposium on Ice. Sapporo: IAHR International Committee, 1988
- [2] IZUMIYAMA K, KITAQAWA H, KOYAMA, et al. On the interaction between a conical structure and ice sheet $\lceil C \rceil / /$ 11th International Conference on under Port Ocean Engineering and Arctic Conditions-POAC'91. St. John's: Ocean Engineering Research Centre, Memorial University of Newfoundland, 1991

- [3] LAU M, MOLGAARD J, WILLIAMS F M. An analysis of ice breaking pattern and ice piece size around sloping structures [C] // Proceedings of the 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Newfoundland; ASME, 1999
- [4] 李 峰,岳前进.不同破坏模式下锥体结构冰力定性分析[J].大连理工大学学报,2005,45(6):785-788
 (LI Feng, YUE Qian-jin. Qualitative analysis of ice forces on conical structures under different failure modes [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(6):785-788)
- [5] 屈 衍.海洋结构的冰激振动及冰荷载研究[D].大 连:大连理工大学,2006
- [6] LAU M. A three dimensional discrete element simulation of ice sheet impacting a 60° conical structure [C] // Proceedings of the 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Ottawa:[s n], 2001
- [7] DERRADJI-AOUAT A, LAU M. Ice loads on electric power generating stations in the Bell Isle Strait [C] // Proceedings of the 18th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. New York: [s n], 2005
- [8] HALLQUIST J O. LS-DYNA Version 970 Keyword User's Manual [M]. California:Livermore Software Technology Corporation, 2003
- [9] 丁德文.工程海冰学概论[M].北京:海洋出版社, 1999
- [10] 张明元,杨国金. 辽东湾北岸海冰物理力学性质 [J]. 中国海上油气(工程), 1999, **11**(4):13-20

Numerical analysis for position-effect of ice-cone interaction on ice bending failure modes

WU Wen-hua*, YU Bai-jie, YUE Qian-jin

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on explicit dynamic software ANSYS/LS-DYNA, the numerical simulation for crack evolution of the interaction between an ice sheet and conical structure is presented. The stress distribution and crack propagation inclination in ice sheet are obtained. There is great difference in the stress distribution between the top and the bottom surface of ice. Radial crack appears firstly at ice-cone contact position. The difference of ice stress distribution and the crack propagation inclination with different ice-cone contact positions is studied on the basis of numerical results. The relationship between the ice-cone contact position and failure mode transform is also analyzed. The results show that ice-cone contact position has less effect on ice sheet stress distribution and crack propagation. Ice-cone contact position is not the sensitive factor of failure modes transition.

Key words: ice-cone contact position; failure mode; crack propagation; numerical simulation