

关于离岸工程结构的冰载

中国科学院力学研究所 戚隆溪 王柏懿

为了开发海洋,人们从60年代开始了全球性科学进军。海洋科学获得了迅速的发展,已成为与空间技术,核能利用并驾齐驱的三大科学技术领域之一。在探索解决海洋工程力学问题过程中,人们加速了对海冰载荷的研究步伐。

当然,海冰研究的起源可以追溯到早得多的年代。近500年来,人们就一直在尝试着开辟经过北极海域的航道。但是,近年来在北方有海冰覆盖的水域中发现了丰富的石油、天然气等自然资源。据估计,这将使世界已知的贮油量增加5—10%⁽¹⁾。勘探、开发和运输石油等自然资源的强烈需求,构成一种巨大的推动力,刺激人们大力开展对海冰与离岸结构相互作用的全面研究。

对于工程建设而言,应确保结构安全可靠并力争造价低廉。但是离岸工程决非陆地工程的简单移植。因为由浪、流、风、冰等因素组成的海洋环境是十分严酷的。海洋环境不仅给离岸工程设计、运行带来一系列的困难,而且作为一个潜在的灾害性因素,已经给人们大规模的开发活动造成了严重的威胁。据估计,1955—1975年间全世界的大型平台已发生过一百多次重大事故,损失达200亿美元以上。其中一半以上是海洋环境造成的。海冰的冻结,堆积与碰撞等亦是引起离岸结构破坏性灾害的原因之一⁽²⁾。这类灾害性环境因素可能推迟、减缓甚至限制海洋工程的进展,因而成为人们必须严肃对待、深入了解、切实解决的研究课题。事实上,海洋环境危险性问题已作为一种专门的范畴引起人们的日益关注⁽³⁾。

海冰是北方气候下所有离岸工程结构设计的主控因素。人们一直在努力优化海冰区域中石油开采平台的设计,研制能够减少冰载的最佳型式,并提出了各种设计概念^(4, 5)(图1)。但这些概念及设计思想是否合理、恰当,尚需有坚实的理论与实验研究来支持,尚需有大量的工程实践来验证。

近年来,采油工业国家,诸如美国、加拿大、挪威、荷兰、英国、西德以及苏联、日本等,都开展了大量的海冰研究计划,包括理论分析、现场观测和模拟实验等三个方面。但这些研究还是初步的、粗糙的、分散的。到目前为止,人们尚未解决如何正确预言作用在离岸结构上的冰载问题。因此,海冰研究已经成为海洋工程的一个最新前沿。

我国有着漫长的海岸线和宽广的大陆架。经初步探明,渤海、南海、东海等海域都有丰富的石油、天然气蕴藏量。加速我国近海资源的勘探和开发,与四个现代化建设有着密切的关系。我国的渤海也是流冰海域,每年约有两个月左右的冰封期,冰载是渤海石油平台设计的主要控制载荷。深入研究海冰及其对离岸结构的作用已逐渐受到我国海洋工程界的重视^(6, 7)。

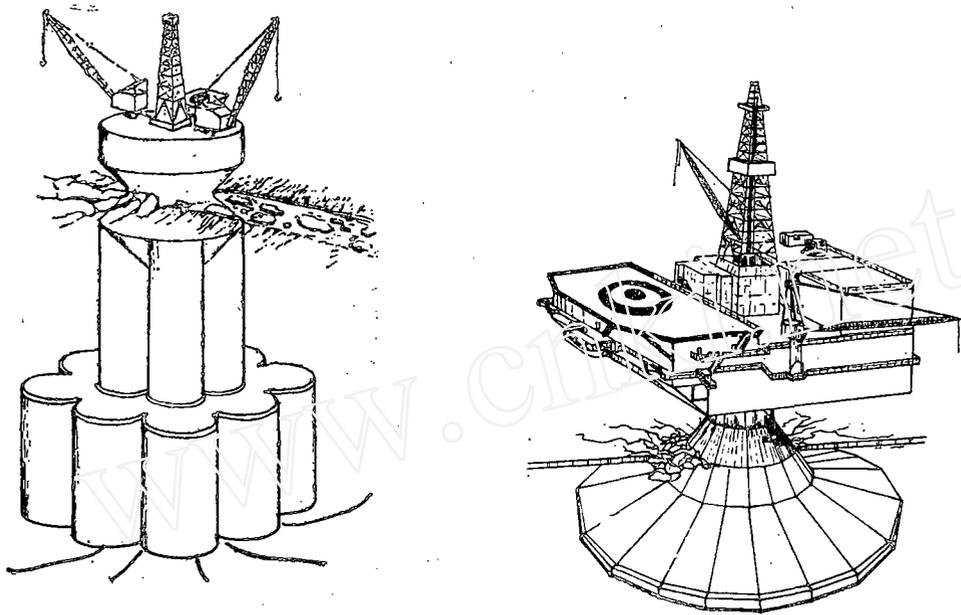


图1 两种 (a. b) 典型的抗冰平台设计

一、海冰与离岸工程结构相互作用的理论

任何一个置于海冰覆盖着的水域中的离岸结构，对于冰场的漂移运动构成了阻挡，因而将承受冰的作用力。这就是冰载。在北方海域发生冰载是一种普遍存在的现象。因为海冰除了沿岸很窄的坚冰区外，无论是封冰还是浮冰都处于不断运动状态之中。这是环境中风、浪、流等自然力的作用所致。其中主要是风和流的因素，特别是潮汐流。它们不仅驱动海冰运动，在冰层上形成压力丘，而且造成碎冰在离岸结构上的堆积。这是海洋工程冰力设计的一个特点。当海面完全由冰层覆盖时，波浪是不易发展的。但当结构周围的覆冰区很窄、很薄或者破裂时，仍可能有海浪的生长。浪、流结合可以造成海冰对结构的快速碰撞⁽⁸⁻¹⁰⁾。因此海冰运动是离岸工程的最大威胁之一，各类严重的冰载均可造成结构的破坏。例如，局部冰压可能导致结构部件的损伤；单独的向心载荷可能折断构件；冰层的横向推力可能使整个结构倒塌；上升的冰层可能将桩柱拔起；堆积冰的重量可能产生严重的负荷；无规振动的冰挤压作用可能引起结构的动态响应，甚至出现共振。

海冰与结构的相互作用大致分为三个阶段⁽¹¹⁾：

①冰层相对于结构开始运动时，冰层内的应力开始逐渐增加，一直到冰体内某个区域的应力强到足以使海冰出现初始破坏。这一阶段中应变可能是很小的，但应变可能出现非线性效应。②在冰体的缺陷区内破坏显著增加，逐渐产生更多的裂缝，形成新的边界，直到破坏过程全部完成。在这一阶段冰体内的应力将重新分布。③冰层破裂为较小的碎块后，从结构的周围流走。海冰的破坏有屈曲、挤压、弯曲和剪切等四种基本模式。至于哪种模式（或者是哪几种模式的组合）起主导作用，要依据具体情况和问题的分析而定。

针对渤海冰况，海冰对离岸工程结构的作用有以下四种形式^(6, 7)。

1. 挤压冰载 当气温保持寒冷或持续下降时，形成大面积浮冰，冰的强度持续增加，当

大面积浮冰随涨落潮汐流经钻井平台时，它将被桩柱阻挡在其前方，产生挤压。在这种情况下，尽管冰块未断裂但被磨碎成无数小的冰屑和碎末。根据几年来渤海湾内平台上的试验表明：较厚冰层（20厘米以上的大面积流冰）对平台的挤压破碎是造成严重破坏的主要形式。此外冰块与桩柱相遇时还可发生向上滑移折断现象，而且多数桩柱上冻结有锥形冰体或堆积着冰块。还有大冰块在气温回升后强度减弱，相撞后产生裂缝，从而被割裂成小冰块，由桩柱间滑移过去。但后两种情况对平台造成的载荷不会产生很大的威胁。

2. 堵塞冰载 当沿岸大面积浮冰随落潮向东流去时，冰温因水深和水湿的增加而升高，冰压强度减低，冰块在流动中相互碰撞而破碎。众多的较小冰块又随涨潮向西流回时，可能在平台的桩柱和导管架之间以及水平横梁上堆积、堵塞起来。当冰块源源不断涌向平台时，还可能在平台前方形成倾斜的迎冰面，并在其上堆积起大量冰块。一旦冰堵塞后，它将继续生长，可以达到很大的厚度，并不易消失。这类堆积堵塞冰会对结构造成水平载荷、垂直载荷以及使水平梁上举的力。但它一般不会给平台造成严重的威胁。特别是当冰块堵塞到整个平台结构的前方之后，流冰块对于平台的作用不是在桩柱前，而是前移到堆积冰的外沿上，而且堵塞冰和导管架形成一个整体，可以使桩柱所受的冰压力大大减小。

3. 撞击冰载 在波浪和海流的作用下，浮冰块可以与离岸结构发生碰撞，产生冰的撞击作用力。这种冰力主要是点载荷提供的。考虑到在有风暴的海浪作用下，撞击冰载是相当可观的，因此在设计大梁等关键部件时，必须计入这种冲击力。浮冰块的撞击冲量与海浪高度、周期、浮冰块的尺寸与撞击速度等参数有关。

4. 动态冰载 当冰载是非正常的，或者当结构与海冰的弹性形变影响到冰的破坏过程时，出现了负阻尼效应，就会发生海冰-结构的动态相互作用。这种冰作用力以及结构中与此相应的动态应力是周期性起伏变化的，冰的破坏过程也是周期性的。因而结构便出现振荡。在最坏的情况下，还可能引起共振。这类情况常常发生在细长结构中（如桩柱、灯塔等）。海冰的动态载荷及结构的动态响应疲劳设计计算是关键因素。

一般说来，海冰与离岸结构的相互作用是很复杂的，依赖于很多因素⁽¹³⁾，诸如驱动冰层的作用力性质，冰-结构相互作用期间的应变率大小，冰质弹塑性变形的机制（近来一些作者认为应该将海冰作为粘弹-塑性介质来处理⁽¹⁴⁾），冰的破坏模式与强度，以及结构本身的动态响应等等。这就是说，离岸结构的形状尺寸以及海冰的物理力学性质（最终反映在冰压强度上），相对运动速度，冰块的尺寸等都直接影响着冰力的大小。而冰压强度又与气温、水温、冰温、冰厚、冰密度、冰盐度及杂质含量等参数有关。由于这一物理过程涉及的因素甚多，到目前为止，国内外尚未发展出普遍适用的海冰作用理论，对冰载的估算还没有统一的方法和规范。现有的理论研究都是针对某些简单的情况进行分析处理或数值计算的⁽¹⁵⁻²¹⁾。只要简化假设适当，理论模型就可以给出最大载荷估计。当然，改进和完善冰载的理论研究，精确预言海冰对离岸结构的作用是海洋工程力学中一个急待解决的问题。理论分析对于建立设计准则、从事实验研究均有指导意义。

二、海冰及其对离岸结构作用的现场观测

对海冰环境参数进行长期、系统的采集是现场观测的首要任务。收集的数据可以为初步设计提供依据。这里首先要对海冰覆盖的时间空间分布，表面特征，以及浮冰块的尺寸，运动情况等观测；此外还要测量海冰的厚度以及密度、温度和盐分的剖面分布。这些对

于工程设计来说是至关重要的。

现场观测的第二项任务是测量海冰的物理力学性质。包括冰的结晶结构，弹塑性特性，变形特征，应力分布，压缩、拉伸和剪切强度，以及作用在结构上的作用力等。这样才能对海冰-结构的相互作用进行定量的估价，给出切实准确的工程设计依据。

为了了解海面上覆盖冰层的大尺度力学效应，人们往往利用海中天然的接地障碍物，例如天然岛屿、沿岸岬角和接地冰山等。有的甚至建造了各种人工冰岛来进行观测⁽²²⁾ (图2)。

近年来，前述的各主要采油和海运国家均对各自的海域进行了广泛的调查，动用了包括从卫星、飞机、考察船到天然浮冰等一切可能的手段，发展了各种有效的测试方法和仪表，取得了可观的进展⁽²³⁻³³⁾。图3介绍了一种可以在现场长期测量海冰压力的嵌入式传感器⁽³⁴⁾。文献⁽³⁵⁾介绍了在一个海湾型水域中进行海冰调查的方法和结果。

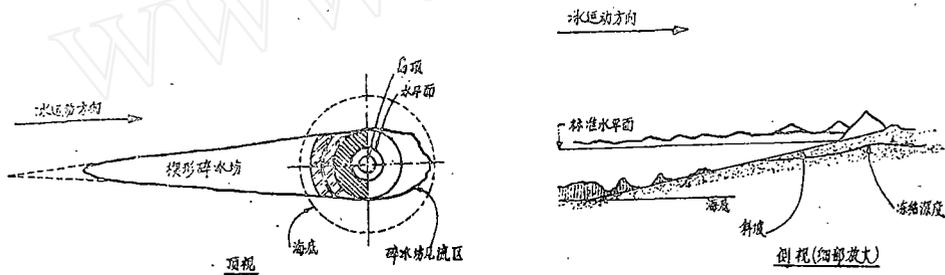


图2 典型的人工冰岛简示

由于现场观测是一项耗资费时的活动，因此我们强调在采集离岸工程数据时尽量注意与工程部门的生产活动紧密结合。图4给出在一个灯塔结构中安置测量装置的典型实例⁽³⁶⁾。它可以在现场直接测出作用在墩柱上的真实冰力。

现场观测在海冰研究中占有重要的地位，它既能提供原始数据，又能验证理论设计，人们对积累、分析现场数据应予以足够的注意。

三、海冰研究的模拟实验

如上所述，海冰的理论研究尚处于初级阶段，现场观测耗资大、周期长，因此有必要开展在可控的实验室条件下海冰模拟实验研究。

现场观测和模拟实验是两种互为补充的手段。企图用全尺度现场试验来覆盖所有在工程中应当考虑的状态范围几乎是不可能的；而在某个现场下测试的数据仅适用于具体结构和海冰状况下的特定情况。因此不能用来直接推导普适的海冰作用方程。另外，现场试验的条件（包括冰厚度、强度及运动速度等重要参数）无法人为地控制。在全同状况下重复试验的机会极少。而模拟实验则能为海洋工程人员提供灵活试验各种设计概念的机会，对于深刻系统地掌握海冰作用的机理和规律大有裨益。但是由于海冰-结构相互作用问题涉

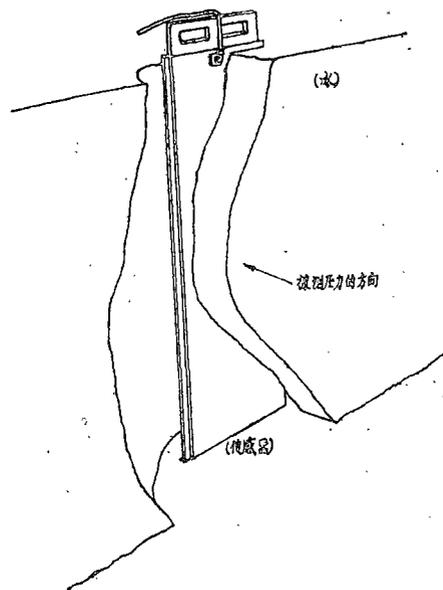


图3 一种现场使用的冰压传感器

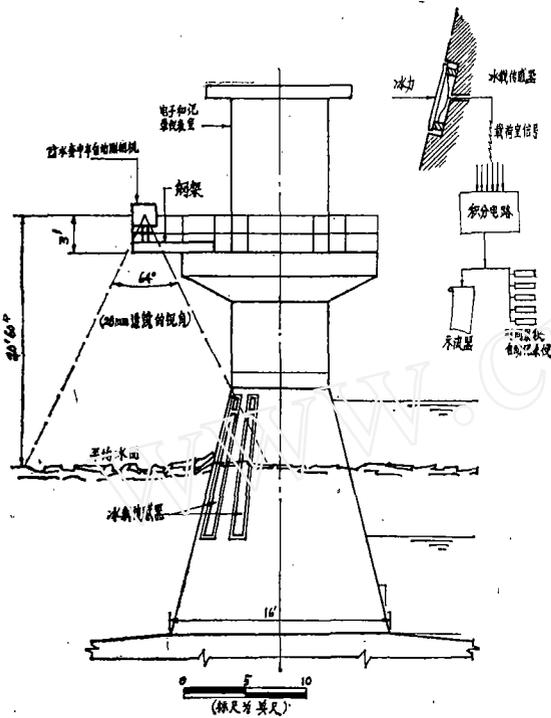


图4 现场冰力测量装置

模拟条件较好，是海洋工程力学研究的基本手段之一。

及的因素太多，要想在一次模拟实验中全部再现所有的条件也是根本不可能的。因此它往往不能直接提供工程设计参数，还需有现场测试结果相互校准。但它对于推导相关参数之间的函数关系是个不可少的工具。

海冰实验室研究大体包括两类试验：一是研究海冰本身的物理和力学性质(37-42)，另一是研究海冰与各类离岸结构相互作用(43-50)。后者一般要求建造一定规模的试验水槽及相应的机构，主要是冷冻系统(图5)和移动机构，以模拟海冰和结构的相对运动。图6给出几种典型的模拟冰槽。它们在结构、型式和尺寸上均不相同，各有特色。有的是圆筒形(图6d)；有的是长方体图6a,b)；有的是水、冰、结构三组元体系(图6a,b,d)；有的仅有冰和结构两个组元(图6c)；有的是模型结构移动(图6b,d)；有的是模型冰层移动(6a)。这类模拟设备耗资较大，但可以开展的实验项目较多，模

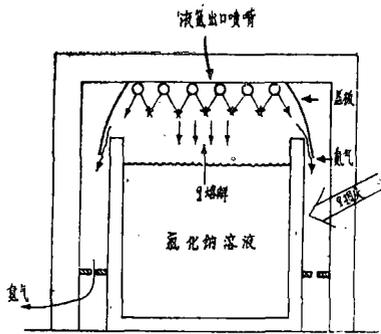


图5 冰槽冷冻过程示意

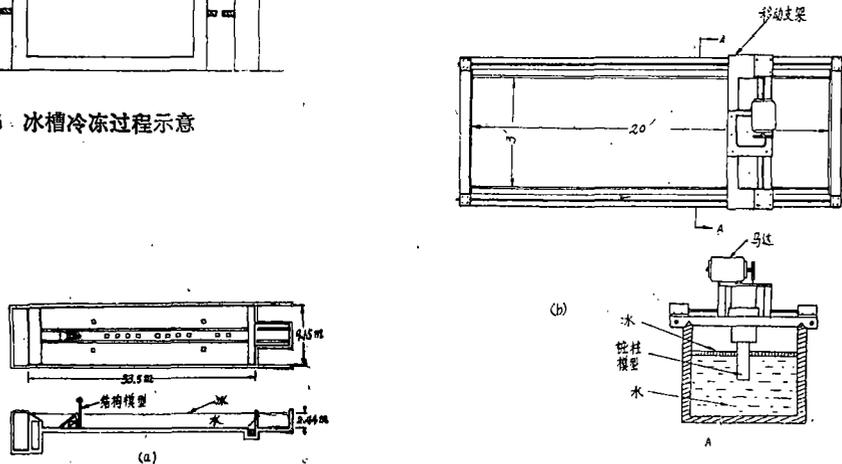


图6 几种典型的冰槽结构

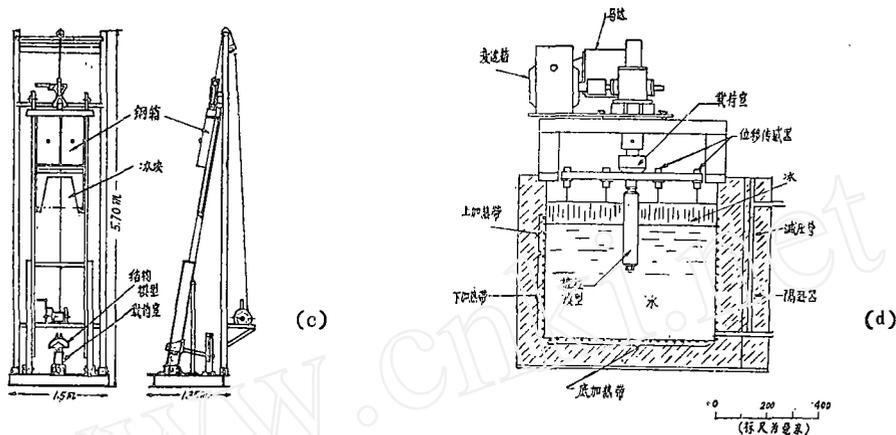


图6 几种典型的冰槽结构

海冰模拟实验研究中有两个关键问题应当重视：第一，模型冰是否合理地代表了天然冰？冰的年代、类型、结构、温度、盐分不同，其力学性质便不尽相同。在利用湖水或人造冰来模拟海冰（特别是在实验室条件下制造模型冰时）应当考虑这一因素^[51]。即使直接从海冰中取样，也会遇到尺度效应、各向异性及异质杂混效应以及盐水泄排效应等问题。因此对冰样品的大小、数量及贮存方式均需适当注意。第二，小尺度的试验是否反映了真实情况的物理实质？为了使模型试验的结果有意义，必须满足一定的相似条件，即在模拟体系中要保证几何相似、运动相似和动力相似。下面将专门讨论此问题。但现有的试验业已证明，小尺度的实验模拟试验可以满足一定的相似条件，给出令人满意的结果。

四、海水模拟试验的相似律

发展一个适当的理论体系，使得小尺度的试验结果可以正确地解释并作为分析大尺度作用的依据。这便是相似律研究的任务。如前所述，海冰-结构相互作用是十分复杂的问题，事实上无法实现全模拟，只能折中选取。这就是说，要针对具体对象和研究目标，抓住特定过程中的物理本质，导出相应的模拟条件。现在分别讨论下述两个课题实验研究的相似律。

1. 海冰对孤立垂直圆柱的作用 假定作用在垂直圆柱上的冰力是圆柱直径和冰厚等参数的函数^[45]：

$$F = f(D, H, d_{cr}, V, \rho, \sigma, T_i, T_w, k) \quad (1)$$

其中， F 为冰作用在圆柱上的力， D 为圆柱直径， H 为冰厚， d_{cr} 为冰晶的平均直径， V 为冰相对于圆柱的运动速度， ρ 为冰密度， σ 为冰压强度， T_i 为冰温度， T_w 为水温度， k 为冰与结构之间的接触系数。利用 Π 定理进行量纲分析，可以构成下述的无量纲形式：

$$\frac{F}{\sigma DH} = f\left(\frac{D}{H}, \frac{D}{d_{cr}}, \frac{\sigma}{\rho V^2}, \frac{T_i - T_w}{T_w}, k\right) \quad (2)$$

式中 D/H ， D/d_{cr} ， $\sigma/(\rho V^2)$ ， $(T_i - T_w)/T_w$ ， k 便是一组相似参数。人们要通过模型试验来确定无量纲的冰作用力 $F/(\sigma DH)$ 与上述各参数之间的函数关系。如果模型的几何比例因子为 n ，冰强度的比例因子为 p ，则各参数的比例关系为： $D_m = nD$ ， $H_m = nH$ ， $d_{cr,m} = nd'_{cr}$ ， $\rho_m = p^{-1}\rho$ ， $V_m = pV$ ， $F_m = n^2 pF$ ，其中下标 m 表示模型的参数。

此外，还有一些因素很难用函数关系表达出来。例如当 $D/d_{cr} < 10$ 时，冰样的尺度效应应当考虑。对于接触效应的影响，哪些因素影响着接触系数的问题，没有得到充分的研究。

2. 孤立垂直圆柱对海冰作用的动态响应 对于研究冰和结构动态相互作用模型试验的相似律, 要从结构和冰层的动态平衡方程中导出^[50]。结构的运动方程为

$$[K] \{\delta\} + [d] \{\dot{\delta}\} + [M] \{\ddot{\delta}\} = \{F(t)\} \quad (3)$$

其中 $[K]$ 为结构的刚度张量, $[d]$ 为结构的阻尼张量, $[M]$ 为结构的质量张量, $\{\delta\}$, $\{\dot{\delta}\}$ 和 $\{\ddot{\delta}\}$ 分别为结点的位移矢量、速度矢量和加速度矢量, $\{F(t)\}$ 为激励冰力。

上式中, 如果模型的几何相似, 其比例因子为 n , 冰强度的比例因子为 b , 则其它各参数的比例关系为: $F_m = n^2 p F$, $K_m = n K$, $d_m = n^2 d$, $M_m = n^3 M$, $t_m = n t$, $\delta_m = n p \delta$,

$$\dot{\delta}_m = p \dot{\delta}, \quad \ddot{\delta}_m = n^{-1} \ddot{\delta}, \quad \omega_m = n^{-1} \omega.$$

另外, 冰层的共振面由下述微分方程控制:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1-\nu}{2} \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right\} &= \frac{\rho(1-\nu^2)}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - \frac{1-\nu}{2} \left\{ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right\} &= \frac{\rho(1-\nu^2)}{E} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 u 为 x 方向上的位移, v 为 y 方向上的位移, ν 为海冰的泊松比, E 为海冰的弹性模量, ρ 为海冰的密度。上式右边的系数 $\frac{\rho(1-\nu^2)}{E} = \frac{1}{c^2}$, c 为平板中压缩波的波速, 可用振动方法

测得。和式(4)要求一样, 首先要保证几何和时间上的相似性, 即 $u_m = n p u$, $v_m = n p v$, $t_m = n t$ 。还要冰性质相同, 即冰晶尺寸在几何上成比例, 弹性模量保持相同 ($E_m = E$)。

至于浮冰对孤立圆柱的撞击载荷同样可以从运动方程出发求出相似关系。

参 考 文 献

- (1) DenHartog, S. L., SS Manhattan test. A review of the ice program, POAC 71: 101.
- (2) Robert, C. M., Pomonik, G., Instrumentation for offshore structures, The 3rd Intern. Ocean Development Conf. (1975): 537.
- (3) Teleki, P. G., et al, Environmental hazards on the United States continental shelf, POAC 79: 435.
- (4) Gerwick, B. C., Jahns, H. O., Conceptual design of floating drilling production and storage caisson for arctic waters, POAC 79: 1173.
- (5) Hancock, J. A., et al, Preliminary design of the arctic mobile drilling structure, POAC 79: 1191.
- (6) 吴磊、王以谋, 渤海石油平台海洋环境资料的收集分析, 第1届离岸工程及海洋资源开发学术讨论会(1981).
- (7) 张连选, 渤海湾的海冰综述, 海洋石油, 1(1981).
- (8) Assur, A., Forces in moving ice field, POAC 71: 112.
- (9) Bruun, P. M., Johannesson, P., The interaction between ice and coastal structures, POAC 71: 683.
- (10) Allyn, N., Wasilewski, B. R., Some influence of ice rubble field formation around artificial islands in deep water, POAC 79: 39.
- (11) Dangs, J. V., Effect of cone-shaped structures on impact forces of ice floes, POAC 71: 609.
- (12) Ross, B., et al, Ice floe-offshore platform interaction, POAC 71: 674.
- (13) Sackinger, W. M., Nelson, R. D., Sea ice stress near grounded obstacles, 1974 OTC (OTC 3528): 1495.
- (14) Karlsson, T., A viscoelastic-plastic material model for drifting sea ice, Sea Ice (1971): 188.
- (15) Campbell W. J. et al, A numerical model for sea ice dynamics, Sea Ice, (1971): 176.
- (16) Afanas'ev, V. P., et al, Ice pressure on individual marine structures, Studies in Ice Physics and Ice Engineering (1973): 50.
- (17) Frederking, R., Gold, L. W., Ice forces on an isolated circular pile, POAC 71: 73.

- (18) Mohaghegh, M. M., Fracture of sea ice sheets, 1974 OTC (OTC 2046): 121.
- (19) Tinawi, R., Murat, J. R., Creep of floating sea-ice sheets; A finite element formulation, POAC 79: 779.
- (20) Sodhi, D. S., Bucking analysis of wedge-shaped floating ice sheets, POAC 79: 797.
- (21) Weeler, J. D., Probabilistic force calculations for structures in icecovered seas, POAC 79: 1111.
- (22) Sackinger, W. M., Nelson, R. D., Ice stresses near grounded structures, POAC 79: 57.
- (23) Winchester, J. W., Offshore data acquisition and role of buoys, European Symp. on Offshore Data Acquisition Systems (1974): 1.
- (24) Rogers, J. C., et al, Arctic coastal sea ice dynamics, 1974 OTC (OTC 2047): 133.
- (25) Smirnov, V. N., Determination of elastic characteristics of an undisturbed ice cover using static and dynamic methods, Studies in Ice Physics and Ice Engineering(1973): 46.
- (26) Dietrich, J., et al, Iceberg investigation along the west coast of Greenland, POAC 79: 221.
- (27) Rossiter, J. R., et al, Airborne radar sounding of arctic icebergs, POAC 79: 289.
- (28) Jryde, P., Flexural and uniaxial compression strength of sea ice in Danish waters, POAC 79: 633.
- (29) Wang, Y. S., Crystallographic studies and strength tests of field ice in the Alaskan Beaufort sea, 9OAP6C7: 15.
- (30) Ladanyi, B., Borehole relaxation test as a means for determining the creep properties of ice covers, POAC 79: 757.
- (31) Ishida, T., et al, Preliminary tests of stress and strain measurement within ice sheet, Sea Ice (1971): 174.
- (32) Sukhov, B. P., Underwater profiling of iceberg using submersibles, Oceans'78: 225.
- (33) Smirnov, V. N., Lin'kov, E. M., Tiltmeter observations of seaice oscillations, Studies in Ice Physics and Ice Engineering (1973): 184.
- (34) Templeton, J. S., Measurement of sea ice pressures, POAC 79: 73.
- (35) Michel, B., et al, Ice effects on oceanographic conditions in Rupert bay, POAC 79: 515.
- (36) Atkison, C. H., et al, Measurement of ice forces against a lightpier, POAC 71: 569.
- (37) Prodanovic, A., Model tests of ice rubble strength, POAC 79: 89.
- (38) Haynes, F. D., Temperature effect on the uniaxial strength of ice, POAC 79: 667.
- (39) Vittoratos, E. S., Kry, P. R., A comparison of in-situ and laboratory uniaxial fresh water ice strength, POAC 79: 683.
- (40) Hamza, H., Muggeridge, D. B., Plane strain fracture toughness of fresh water ice, POAC 79: 697.
- (41) Sinha, N. K., Frederking, R. M. W., Effect of test system stiffness on strength of ice, POAC 79: 708.
- (42) Tusima, K., Tabata, T., Friction measurements of sea ice on flat plates of metals, plastics and coatings, POAC 79: 741.
- (43) Edwards, R. Y., et al, An arctic ice model basin-design, construction and operating experience, POAC 71: 541.
- (44) Shvaishtein, Z. I., Experimental studies in an ice-research laboratory, Studies in Ice Physics and Ice Engineering (1973): 16.
- (45) Schwarz, J., et al, Effect of ice thickness on ice forces, 1974 OTC (OTC 2048): 145.
- (46) 低温试验施設と冰海再現水槽, 运输省船舶技术研究所报告 (1974).
- (47) 船研に冰海船舶试验水槽を完成, 船舶, 5, 585(1980): 58.
- (48) Saeki, H., et al, Experimental study on ice forces on a cone-shaped and an inclined pile structures, POAC 79: 1081.
- (49) Frederking, R. M. W., Laboratory tests on downdrag loads developed by floating ice covers on vertical piles, POAC 79: 1097.
- (50) Määttänen, M., Laboratory tests for dynamic ice-structure interaction, POAC 79: 1139.
- (51) Timco, G. W., The mechanical and morphological properties of doped ice; A search for a better structurally simulated ice for model test basins, POAC 79: 719.

Ice Floe Loads on Offshore Platform Structures

Qi Long-xi Wang Bo-yi

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)