

# 渤海海冰对直桩柱的作用力\*

张明元 隋吉学 严德成 孟广琳

(国家海洋局海洋环境保护研究所, 大连 116023)

**提要** 于1990年1月在锦州湾采样, 主要测试了在不同的冰温和不同的应变速率下渤海海冰的挤压强度, 并且研究了海冰挤压强度与冰温及应变速率的关系。对半径  $R = 2, 3, 4, 5$  cm 圆柱压头的海冰挤压强度  $R_{CM}$  进行了试验, 由此求得了海冰的局部挤压系数和接触系数。分析了冰块宽度  $B$  与桩柱宽度  $b$  之比与挤压系数的关系。在  $-10^{\circ}\text{C}$  冰温下, 对半圆形, 压头端部尖角  $2\alpha$  等于  $180^{\circ}, 120^{\circ}, 90^{\circ}, 60^{\circ}$  五种压头进行了试验, 从而求得桩柱的形状系数, 建立起大冰原对桩柱挤压作用的最大冰压力公式。

**关键词** 应力 应变 挤压系数 挤压件

海上流冰对海上结构物会产生巨大的破坏作用。1969年, 渤海二号平台被海冰摧毁, 其它国家也有类似事件发生 (Wang, 1988)。目前海工设计中常采用直立桩柱结构。冰的挤压破坏力为控制荷载。海洋工程的设计对海冰的挤压强度比较重视, 本试验主要研究的就是海冰的挤压强度。

目前国外关于海冰对直桩柱的作用力有许多研究 (Hiro, 1977)。苏联学者 Кожавин<sup>1)</sup> 观测和分析了桩柱切入大冰原的过程后提出大冰原被桩柱切入时的最大冰压力公式, 为  $P = m \cdot k \cdot b \cdot h \cdot R_{CM}$ 。由此可见, 想得到作用于直立桩柱的冰荷载, 首先必须确定形状系数  $m$  及挤压强度  $R_{CM}$ 。国内只见到很少的研究成果和报告 (李世山, 1983; 张明元, 1989)。

## 1 试验方法

选择渤海冰情较重的锦州湾为试验区。采样点为锦州湾葫芦岛港池内。该处海冰为平整固定冰。采样时间为1990年1月, 现场水深为3m, 海水盐度为25.798, 海冰盐度为5.599, 海冰密度为  $910\text{kg}/\text{m}^3$ 。该区海冰样基本为柱状晶体结构, 平均粒径为8.0mm。

在试验现场, 用电动链锯切割原冰, 运回岸边试验室。用圆盘锯精心加工成尺寸为  $7.5\text{cm} \times 15\text{cm} \times 45\text{cm}$  的立体柱, 装入电冰箱内按拟定试验冰温恒温以备试验。试验是在10t 液压式冰压力机配以加载装置完成的。试验方法如图1所示。用压力机的压头位移表示试样垂直变形, 记录信号通过动态电阻应变仪由函数记录仪记录。

根据工程实际情况, 主要对半径  $R$  为 5cm, 4cm, 3cm, 2cm 的圆柱体; 压头端部

\* 国家海洋局海洋环境保护研究所重点课题。

收稿日期: 1991年1月11日; 接受日期: 1991年12月20日。

1) 固定式海上平台设计问题, 天津大学编译。

$2\alpha$  等于  $180^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  三角形平板挤压件进行试验。其中对  $R = 4\text{cm}$ ,  $2\alpha = 180^\circ$  压头做了冰温为  $-5^\circ\text{C}$ ,  $-10^\circ\text{C}$ ,  $-15^\circ\text{C}$ ,  $-20^\circ\text{C}$  的试验。其余各压头进行了  $-10^\circ\text{C}$  冰温下的试验。每组试件在同一温度下进行 5 个应变速率的试验。这样, 对于  $R = 4\text{cm}$ ,  $2\alpha = 180^\circ$ , 每组 5 个试件  $\times$  5 个应变速率  $\times$  4 个温度  $\times$  2 种压头 = 200 个试件; 对于  $R = 5\text{cm}$ ,  $3\text{cm}$ ,  $2\text{cm}$ ;  $2\alpha = 120^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ , 每组 5 个试件  $\times$  5 个应变速率  $\times$  1 种温度 ( $-10^\circ\text{C}$ )  $\times$  6 种压头 = 150 个试件。这样, 对于  $7.5\text{cm} \times 15\text{cm} \times 45\text{cm}$  的试件进行了 360 个样本试验。

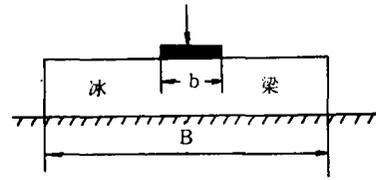


图 1 局部挤压试验

Fig. 1 Indentation test

## 2 试验结果与讨论

**2.1 海冰挤压强度与应变速率的关系** 当桩柱受到以一定速度运动的流冰作用时, 要考虑应变速率对海冰强度的影响。对每个温度都进行了 5 个级别的应变速率试验, 从图 2 可以看出海冰的挤压强度与应变速率有明显的关系。对于  $R = 4\text{cm}$ ,  $\theta = -21^\circ\text{C}$ ,  $-15^\circ\text{C}$ ,  $-9^\circ\text{C}$  时, 挤压强度达到最大值对应的应变速率分别为  $3.2 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ ,  $4.2 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ ,  $7.2 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 。几种温度都可以得出这样一个规律, 不同的应变速率对应着不同的挤压强度; 冰温低者, 挤压强度最大值对应的应变速率较小。过去研究得出冰的应变速率为  $3 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$  时, 冰的抗压极限强度最大。由此可知海冰的挤压强度和抗压强度与应变速率的关系是一致的。

由压头的速率得出的结果, 进一步由压头的速率(挤压件的变形速率)和天然条件下冰块运动的速度联系起来, 将试验室中试验的应变速度的影响转化到天然条件下冰的运动速度对冰强度的影响, 并反映到冰压力计算中去, 得出  $\dot{\epsilon} = \frac{V}{2b}$  关系, 其中  $\dot{\epsilon}$  为应变速率,  $V$  为冰块运动速度,  $b$  为桩柱的宽度。

**2.2 局部挤压系数** 为了研究桩柱对海冰的局部挤压问题, 就要测试海冰的挤压强度, 但现在实用多为海冰的抗压强度, 这就要根据试验及弹性理论建立起它们之间的关

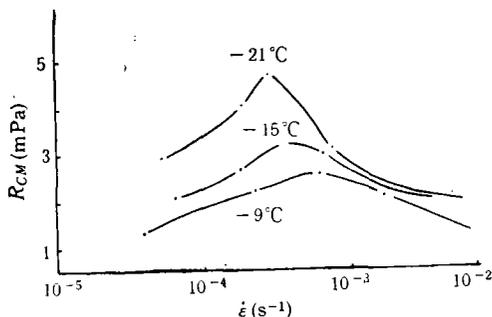
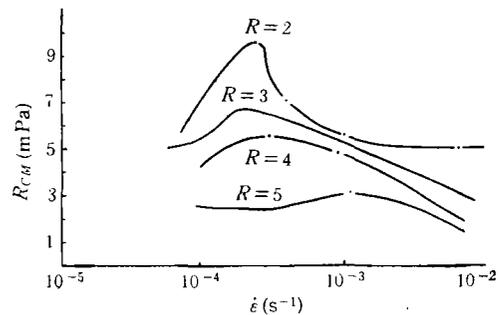
图 2 海冰挤压强度与应变速率的关系( $2\alpha=180^\circ$ )Fig. 2 Relationship between crushing strength and train rate of sea ice ( $2\alpha = 180^\circ$ )

图 3 不同 R 的挤压件与强度的关系

Fig. 3 Relationship between different indenter ( $R$ ) and crushing strength

系。本试验不但测试了海冰的单轴抗压强度而且进行了海冰的挤压强度试验。测试和计算结果见图 3 和表 1。

表 1 海冰挤压系数  $I$ Tab. 1 Sea ice crushing factor  $I$ 

$R(\text{cm})$	$R_{CM}(\text{kPa})$	理论值 $I$	试验值 $I$	$b/h$
5	5340	2.21	1.57	1.43
4	5773	2.37	1.69	1.14
3	6589	2.58	1.93	0.86
2	7382	2.88	2.16	0.57

两个试验的温度皆为  $-10^{\circ}\text{C}$ ，挤压试件的尺寸为  $45\text{cm} \times 7\text{cm} \times 13\text{cm}$ ，即  $B = 45\text{cm}$ ， $h = 7\text{cm}$ 。抗压试件尺寸为  $7\text{cm} \times 7\text{cm} \times 17.5\text{cm}$  棱柱体。韧脆过渡区的水平单轴抗压强度为  $3410\text{kPa}$ 。用不同半径的圆柱挤压件测试的  $R_{CM}$  和  $\sigma_c$  求得挤压系数。

从表 1 中得出的结果可知，冰块宽度 ( $B = 45\text{cm}$ ) 与桩柱宽度  $b$  之比不同，挤压系数亦不同。 $B/b$  大， $I$  亦大；反之  $I$  变小。本试验测得的最大值  $I$  为 2.16。从理论上分析，要确定冰块与实际有效计算宽度  $B$ ，利用弹性理论中关于宽度  $b$  的条形荷载作用于半无限弹性体的结论，根据圣维南原理在半无限弹性体中的应力分布与荷载在表面的分布无关反而与合力的数值与位置有关。若采用冰的计算宽度  $B = 15b$ ，冰的挤压强度  $R_{CM}$  与抗压强度  $\sigma_c$  的关系可按  $R_{CM} = \sigma_c \cdot \sqrt[3]{B/b} = 2.47\sigma_c$  计算。但冰块宽度  $B$  不能超过桩柱宽度  $b$  的 15 倍。试验结果  $B/b = 45/4 = 11$  倍时， $R_{CM}/\sigma_c = 2.16$ 。由计算式  $I = 1 + 4/\exp\sqrt{h/b}$  (Bruum, 1971) 计算值为 2.88。试验结果与理论计算结果规律基本上是一致的。本试验测试结果略低于理论计算结果。

**2.3 形状系数** 形状系数  $m$  是反映结构物迎冰面水平剖面形状系数。冰与桩柱的作用，由于桩柱的形状不同，冰对桩柱的作用力不一样。为了测试形状系数，选取了半圆形， $2\alpha$  分别为  $180^{\circ}$ ， $120^{\circ}$ ， $90^{\circ}$ ， $60^{\circ}$  五种挤压件在  $-10^{\circ}\text{C}$  冰温下进行试验。试验结果参见

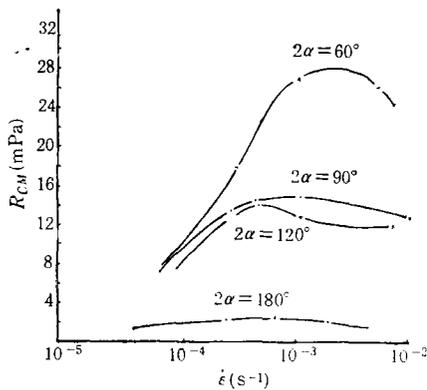


图 4 挤压件形状与强度的关系

Fig. 4 Relationship between shape of indenter and strength

图 4。观察试验情况，挤压件为半圆形，一般压点下面出现裂缝，然后扩展成几条裂缝，并贯通；也有的破坏，还有的加载开始时，出现贯通，但靠两侧承载，等两侧局部压碎，而不承载。对于挤压件为平板，开始加载，形成一条或两条裂缝。由于冰块的结构不均匀，有微裂缝，先开始扩展，荷载继续上升，这时裂缝的两侧承载，最后贯穿，荷载达到最大，然后马上下降。对于  $2\alpha$  等于  $120^{\circ}$ ， $90^{\circ}$ ， $60^{\circ}$  三种情况，大部分为劈裂，脆坏。破坏前裂缝四周没有微缝。

从挤压件为不同形状的试验结果计算分析得出结果如表 2。此结果与 Коржавин 得出的结果基本一致。本试验结果  $2\alpha = 90^{\circ}$ ， $60^{\circ}$  时比他的试验值偏小。

表 2 桩柱形状系数  
Tab. 2 Shape factor of pile

桩柱端部夹角 ( $2\alpha$ )	180°	120°	90°	60°	半圆形
形状系数 ( $m$ )	1.00	0.82	0.68	0.45	0.91

**2.4 冰与桩柱接触不完全系数** 苏联专家<sup>1)</sup>通过试验现场的观察得出,当桩柱与冰接触面积超过  $bh$  ( $h$  为冰厚)时,达到完全接触是不可能的。引进了接触系数  $k$  为 0.4—0.7。现在一般都认为接触系数与桩柱的宽度和冰的运动速度有关。本试验对半径  $R = 2\text{cm}$ ,  $3\text{cm}$ ,  $4\text{cm}$ ,  $5\text{cm}$  的圆柱进行了试验,证明接触系数  $k$  确与桩柱的宽度有关,  $k$  值范围为 0.40—0.72。

**2.5 大冰原对直立桩柱的冰压力** 冰对桩柱的作用力,在不同条件下有几种形式。流冰期间,冰对桩柱的冲击力和摩擦力。整个冰盖层由于温度的变化引起膨胀而产生对桩柱的挤压膨胀力。当冰与桩柱冻结在一起时,由于水位波动引起的垂直作用力。实践证明对桩柱具有更大危险性,使桩柱破坏的主要作用形式是巨大的冰原包围了桩柱,使整个海面处于冰覆盖状态,在水动力的作用下,大冰原整体移动挤压桩柱,如桩柱强度能承受,则冰原被切割而移动,这种荷载呈周期性的变化,并伴随着振动。测试这种作用力的方法有几种。如现场在桩柱上安装压力盒,若有条件在实验室做模拟试验最好。本试验主要用不同的挤压件测试海冰的挤压强度,获得各种系数确定大冰原对桩柱的作用力  $P = Imkbh\sigma_c$ , 试验获得的  $k$  为 0.40—0.72,  $m = 0.91$ ,  $I$  为 1.57—2.16。取它们的平均值  $k = 0.56$ ,  $m = 0.91$ ,  $I = 1.87$ , 代入公式  $P = Imkbh\sigma_c$ ,

$$P = 1.87 \times 0.91 \times 0.56bh\sigma_c = 0.95bh\sigma_c$$

式中,  $P$  为大冰原切入桩柱最大冰压力 (KN);  $b$  为桩柱宽度 (cm);  $h$  为冰厚 (cm);  $\sigma_c$  为冰单轴抗压极限强度。此结果可供海洋工程设计部门参考使用。

### 3 结论

通过上述分析讨论可得出如下几点结论:海冰的挤压强度与应变速率有关。应变速率在  $7.2 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ — $3.5 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$  时,达到最大值。海冰的挤压系数与桩柱宽度对冰厚比有关,是  $b/h$  的函数。本试验得出的海冰挤压系数  $I$  为 1.56—2.16。试验得出圆柱形桩柱形状系数  $m = 0.91$ ;  $2\alpha = 180^\circ, 120^\circ, 90^\circ, 60^\circ$  时,  $m$  分别为 1.00, 0.82, 0.68, 0.45。接触系数  $k$  与桩柱宽度有关,一般可取 0.40—0.70。渤海海冰对直立桩柱的作用力可用  $P = 0.95bh\sigma_c$  计算。

### 参 考 文 献

- 李世山, 1983, 海冰物理特征值及其对桩柱作用的测量, 海洋与湖沼, 14(6): 560—564。  
张明元, 1989, 渤海海冰对海上结构物的作用, 海洋环境科学, 8(1): 105—108。  
Bruum, Per M., 1971, The interaction between ice and coastal structures, POAC proceedings ist, 2: 684—714。  
Wang, Q. J., 1988, The dual rigidity on anti-ice structure, IAHR proceedings 9th, 1: 561—569。  
Hiro Shi Saeki, 1977, Experimental study on ice force on pile, POAC proceedings 4th, 3: 695—706。

1) 见本文第 132 页脚注。

## EFFECT OF BOHAI ICE CRUSHING STRENGTH ON VERTICAL STRUCTURES

Zhang Mingyuan, Sui Jixue, Yan Decheng, Meng Guanglin

(*Institute of Marine Environmental Protection, SOA, Dalian 116023*)

### ABSTRACT

Jacket platforms with vertical or nearly vertical legs are typical structures in the Bohai Sea. Vertical structures may be destroyed by ice crushing against them. This research is aimed at studying the relation between sea ice crushing strength and ice temperature and strain rate. For columnar sea ice at the strain rate that causes the maximum crushing strength the indentation factor is 3.0. The obtained crushing strength of a cylinder indenter ( $R=2, 3, 4, 5\text{cm}$ ) was used to compute the indentation factor and contact factor of sea ice. The relation between the indentation factor and the ratio of the ice thickness to indenter width is analysed. The indentation factor is not constant but rather is a function of ice thickness to indenter width ratio. For continuous crushing in which the ice is not frozen to indenter, the contact factor is a function of the strain rate. The crushing strength of sea ice was experimented for 5 indentors (semicircle,  $2\alpha=180^\circ, 120^\circ, 90^\circ, 60^\circ$ ) at ice temperature  $-10^\circ\text{C}$ . From this, the shape factor of the pile was obtained. The shape factor is 0.91 for a circular indenter. The value of maximum compressive force of sea ice on a pile in large ice-fields is applicable to ocean engineering.

**Key words** Stress Strain Indentation factor Indenter