

円断面直立海洋構造物に作用する氷力に関する研究

佐伯 浩*・田中 祐人**・佐々木広輝***
小野 敏行****・山下 俊彦****

1. ま え が き

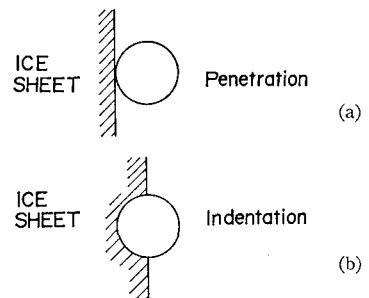
冬期結氷する海域に建設される海岸・海洋構造物を設計する際には、海水氷盤の移動に伴う氷力を考慮しなければならない。この氷力に関する研究は現在まで様々な方法により実験及び解析が行なわれており、全氷力を算定する式も数多く提案されている。これに対して、直立海洋構造物に作用する氷圧力分布に関しては、局部的には氷圧力がかなり大きくなることがわかっており、薄肉構造物等の設計にあたっては局部座屈に対しても十分考慮しなければならないことが明らかになっている。しかし、現在までの研究においては、直立海洋構造物に作用する全氷力に関する研究が主なものであり、直立海洋構造物に作用する局部的な氷圧力に関する研究は非常に少ない。この直立海洋構造物に作用する氷圧力分布に関する研究は、過去に著者の1人である佐伯^{1)~5)}が、直立矩形断面構造物と直立円断面構造物に作用する氷圧力の分布に関する研究を行なっている。しかし、これらの氷圧力分布に関する研究においても、実験のしやすさから、半無限氷盤が衝突・貫入する際に作用する面の法線方向の氷圧力分布しか対象とされていない。局部座屈に対しては面の法線方向の氷圧力がわかると、理論解析をすることが可能であるが、氷盤の移動による構造物の摩耗量を推定する場合に必要な接線方向応力や母線方向応力に関する研究と、法線方向応力あるいは氷盤貫入に伴う全氷力に関する系統的な研究は、実験の困難さもあり皆無である。本研究においては、直立円断面構造物に作用する法線方向、接線方向、母線方向の氷圧力分布に関する系統的な実験を行ったので、その結果を報告する。

2. 実験方法及び実験装置

実験装置の検定を除いて全ての実験はオホーツク海に面したサロマ湖で行なった。サロマ湖の海水は、通常2

月上旬では20~30 cmの氷厚であるが、積雪の影響もあり氷質はあまり良いとは言えない。そこで、実際の海水氷盤に2.5×3 mの穴をあけ、新たに結氷させて良質の氷盤をつくり、それを実験に用いた。氷海域に建設されるジャケット構造物におけるアスペクト比(構造物の幅/氷厚)は5程度以下であることから、今回用いた円断面構造物の径が54.5 cmであることを考慮して、氷厚は10~12 cm程度を目標として結氷させた。新たに結氷させた氷盤の密度は約0.86 gf/cm³、塩分量は8%、平均のグレインの径は11.1 mmであった。海水の強度については、直径10 cm、高さ20 cmの円柱海水氷供試体を用いて、歪速度が約10⁻³ sec⁻¹で一軸圧縮試験を行なった。一軸圧縮強度は平均して11.9 kg/cm² (1.19 MPa)であった。

今までの直立円断面構造物に作用する氷力に関する実験は、実験のしやすさと流水を対象としていたため、図一1(a)に示すような半無限氷盤が衝突貫入するときの氷力を対象としたものであった。しかし、実際の結氷海域においては、図一1(b)に示すように、潮位変動により氷盤が構造物に凍着しないで構造物に接している状況がみられ、そのような状態から氷盤が動きだすときの方が(a)の場合に比べてより大きな氷力が作用することが予想されている。よって今回の実験では図一1(a), (b)の2種類の接触条件について行なった。次に、今回実験に用いた模型杭の概略を図一2, 3, 4に示す。直径54.5 cm、高さ40 cmの半円柱状構造物に、貫入方向から15°, 30°, 45°, 75°, 90°のところにそれぞれ母線方向



図一1 初期の接触条件

* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 川崎製鉄開発センター

*** 学生員 北海道大学大学院 工学研究科土木工学専攻

**** 北海道大学工学部土木工学科

***** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

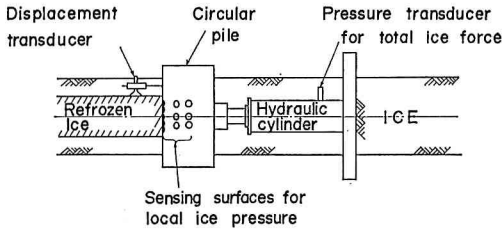


図-2 実験装置 (側面図)

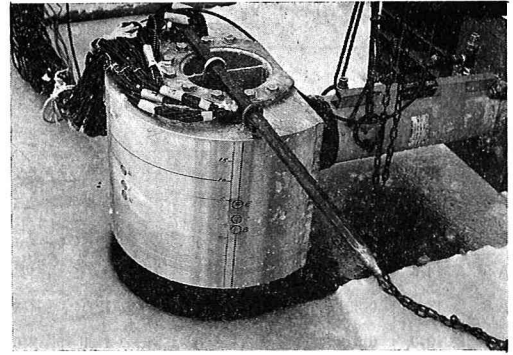


図-5 実験装置

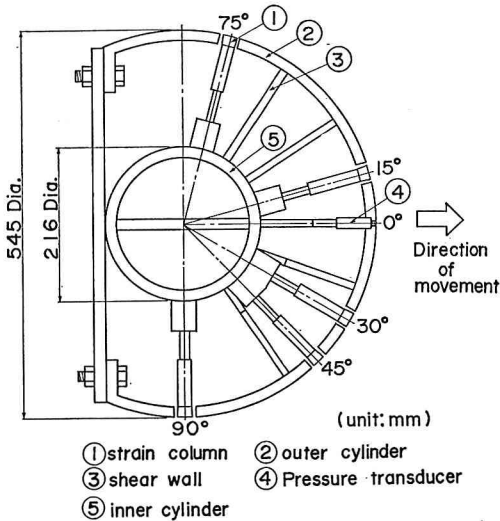


図-3 実験装置 (模型杭断面図)

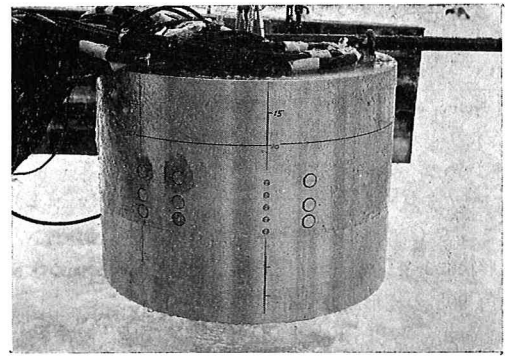


図-6 実験装置

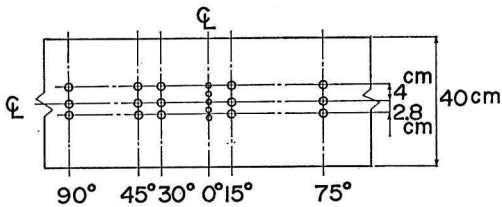


図-4 実験装置 (模型杭表面展開図)

に3本ずつ計15本の3分力測定用特殊ピンを埋込み、法線方向応力 (σ_n)、接線方向応力 (σ_t)、母線方向応力 (σ_z) を測定した。また貫入方向中心には、母線方向に5本の小型圧力変換器を取り付けて σ_r を測定した。模型構造物をストローク 300 mm の油圧ジャッキに固定して氷盤に貫入させた。全氷力は油圧ジャッキの内圧を圧力変換器で測定することにより求めた。油圧ジャッキの背面には、反力を緩和させるために 40 cm × 120 cm の控鋼板を取り付けた。貫入速度については、100 mm の変位計を用いて測定した。

3. 結果と考察

今回の実験結果を表-1に示す。RUN A1 から A9 は Indentation test の結果であり、RUN B1 から B3 は Penetration test の結果である。歪速度 $\dot{\epsilon}$ は Michell²⁾ の求めた $\dot{\epsilon} = V/4D$ を用いて求めた。 D は杭径であり、 V は貫入速度である。佐伯⁴⁾によれば、 $10^{-8} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ では、遷移領域の破壊と名付けられており、 $\dot{\epsilon} < 10^{-8} \text{ sec}^{-1}$ では、圧壊領域の破壊と言われている。今回の実験では $\dot{\epsilon}$ がこれらの範囲に入るようにした。 σ_B は最大氷力時の平均氷圧力 (P_a) であり、次式で求められる。

$$\sigma_B = F/A \quad \dots\dots\dots (1)$$

F : 最大全氷力 (KN)

A : Dh (Indentation test)

$Dh \sin(4\pi\dot{\epsilon}t_B)$ (Penetration test)

h : 氷厚 (cm)

t_B : 最大全氷力発生時間 (sec)

表-1において、 T_i は氷温 ($^{\circ}\text{C}$)、 σ_c は海水の一軸圧縮強度、 P_a は平均氷圧力である。

1) 全氷力と経過時間

半無限氷盤が構造物に貫入するときの最大氷力は Saeki が以下の式を提案している。

表-1 実験結果

Run	h (cm)	V (cm/sec)	$\dot{\epsilon} \times 10^{-3}$ (sec $^{-1}$)	F (kN)	σ_B (MPa)	t_B (sec)	T_i (°C)
A 1	12.0	0.565	2.59	126	1.93	4.73	-2.4
A 2	12.0	0.019	0.087	84.1	1.29	228	-2.2
A 3	12.0	0.021	0.096	66.0	1.01	47.8	-2.5
A 4	12.0	1.38	6.31	135	2.07	1.17	-2.7
A 5	14.0	1.45	6.65	106	1.39	0.735	-4.5
A 6	17.0	0.451	2.07	34.9	0.377	1.11	-4.3
A 7	10.0	0.318	1.46	89.3	1.64	4.86	-2.0
A 8	9.8	0.678	3.11	121	2.27	31.3	-1.9
A 9	9.3	0.023	0.106	43.2	0.852	107	-2.0
B 1	13.5	0.263	1.21	63.0	3.5	16.3	-3.2
B 2	13.5	0.209	0.959	43.2	11.5	4.24	-5.2
B 3	14.5	0.399	1.83	63.0	0.97	42.0	-3.3

Note: $\sigma_c = 1.19$ (MPa), $D = 54.5$ (cm)

$$F = C \sqrt{D} h \sigma_c \dots\dots\dots (2)$$

ここで C は形状係数と呼ばれる係数で、構造物の断面形状により異なる。(円断面: 5.0, 矩形断面: 6.8, 交角 90° の楔形断面: $4.5 \text{ (cm}^{1/2}\text{)})$

この式は氷力が氷盤貫入に伴う歪速度 $\dot{\epsilon}$ に依存することから、最大の氷力を示す $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の氷力の式である。

全氷力を(2)式で除した無次元氷力と歪速度の関係を示したのが図-7である。(2)式は接触条件が Penetration を対象としていることにより、今回の Penetration test の無次元氷力は1前後の非常に良い結果を得た。また、図中に示されている、1980年の結果²⁾とも良い一致を示している。また Indentation test の結果は $\dot{\epsilon} = 3 \times 10^{-3}$ 近傍で2以上になっており、接触条件の違いにより全氷力が大きく異なっており、Penetration よりも Indentation の方が大きな氷力が構造物に作用することがわかった。更に、接触条件が Indentation の場合、最大氷力が現在提案されている氷力式⁷⁾⁻⁹⁾より大きくなること

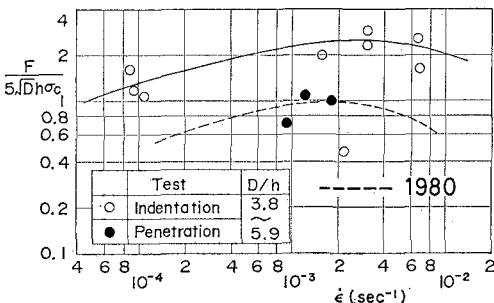


図-7 歪速度と最大全氷力の関係

が判明したために、氷力式の再検討が必要かと思われる。今回の実験結果では、円断面構造物に対して以下の式のように示される^{1),2)}。

$$F = f \cdot 5 \sqrt{D} h \sigma_c \dots\dots\dots (3)$$

f : 補正係数 Penetration: 1.0

Indentation: 2.6

次に、歪速度と最大氷力発生時間の関係を図-8に示す。この図より、歪速度が大きくなると最大氷力発生時間が短くなることがわかる。また Indentation test において、 K と n が定数である、 $t_B = K \cdot \dot{\epsilon}^n$ で表わされる以下の式が求められる。

$$t_B = 2.71 \times 10^{-3} \cdot \dot{\epsilon}^{-1.14} \dots\dots\dots (4)$$

これより、接触面での氷の歪は以下の式になる。

$$\epsilon = \dot{\epsilon} t_B = 2.71 \times 10^{-3} \cdot \dot{\epsilon}^{-0.14} \dots\dots\dots (5)$$

氷は歪速度が小さくなると、破壊モードはせん断破壊領域から遷移破壊領域に変化する。式(5)からも明らかのように、歪速度が小さくなるにつれて氷の歪は増し、氷の変形は大きくなる。

2) Indentation test の氷圧力分布

図-9, 図-10に RUN A 2 及び RUN A 7 の $\theta = 15^\circ, 45^\circ$ における $z=0$ (氷厚中心), 2.8, 4.0(cm) の位置での σ_r の時間変化を示す。図からも明らかのように、 $t/t_B < 0.8$ では各測定点の法線方向の氷圧力 σ_r の変化が激しく、 $t/t_B \geq 1$ の範囲では一定の氷圧力を示す傾向が見られる。この現象は歪速度の小さい RUN A 2 の場合が顕著である。これは全氷力の時間変化と同様の傾向である。また RUN A 7 の遷移領域の場合には、 $\theta = 15^\circ$ の $z=4.0 \text{ cm}$ 地点で $t/t_B = 0.73$ で破壊が起こり、ほぼ同時刻から $z=0$ の場所の破壊も進行している

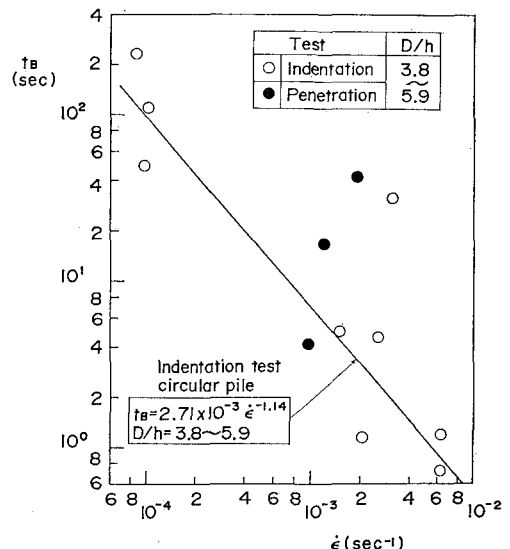
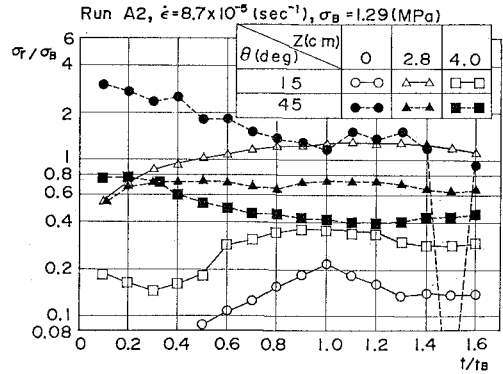


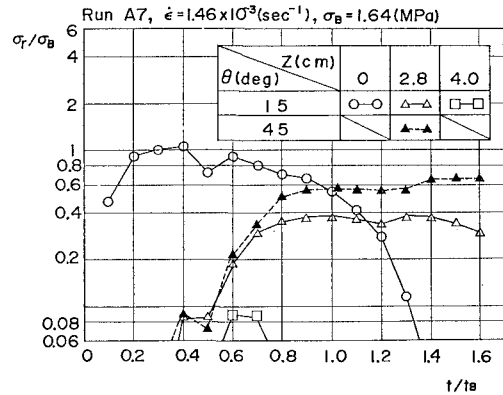
図-8 歪速度と最大氷力発生時間の関係

ことを示している。これに対して、同じ $\theta=15^\circ$ でも、氷厚中心より下側の $z=2.8$ cm の地点では、貫入に伴って $t/t_B > 1$ の領域においても氷圧力がゆるやかではあるが増大が続けている。 10^{-3} sec^{-1} 程度の歪速度における氷盤の破壊状態は、構造物に接触する氷盤の上・下面が剥離するせん断破壊であるが、この氷圧力の分布から必ずしも同時に破壊していないことを示している。この理由は氷盤内の鉛直方向の水温分布が一般でなく、一般に氷盤の表面は気温にほぼ等しく、下面は海水の結氷温度である -1.8°C であるため、水温に依存する海水強度も一様でない事によると考えられる。

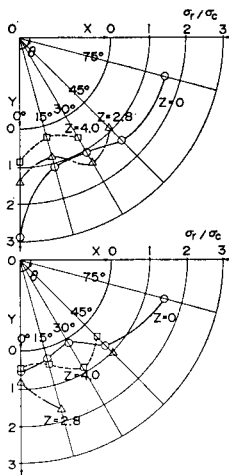
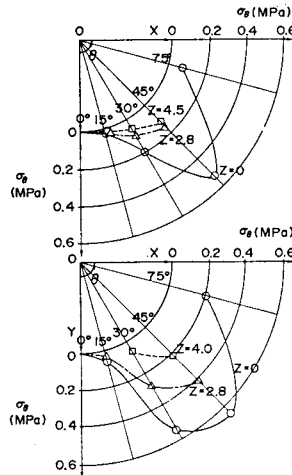
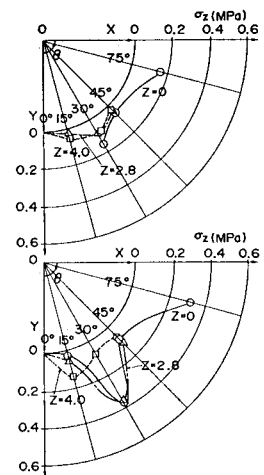
図一11、図一12に最大全氷力発生時の各破壊モードに対する法線方向氷圧力と接線方向氷圧力を示している。まず、法線方向氷圧力については、遷移破壊領域の場合は、 $\theta=0^\circ$ の氷厚中心部 ($z=0$) に氷圧力が集中しているのに対して、延性破壊領域では氷圧力の集中度は小さく、ほぼ一様に分布している。また、接線方向氷力については、両破壊領域とも $\theta=45^\circ$ 近くに応力が集中していて、氷厚の中心部では最大で 0.6 MPa となっていて、これは一軸圧縮強度の約 50% となっている^{8),10)}。次に、図一13は母線方向の氷圧力分布である。最大氷力は $\theta=30^\circ$ の氷厚中心部に作用しているが、その値は接線方向氷力に比べて小さく、その約 $30\sim 60\%$ となっている。図一11, 12, 13より、構造物表面に作用する最大の摩擦力 $\sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_z^2}$ は海水の一軸圧縮強度の約 65% 程度となっていることが明らかとなったが、この力は今後の海水による防蝕のための塗装の摩耗を予測するにあたって非常に重要となる。



図—9 経過時間の法線方向氷圧力の関係



図—10 経過時間と法線方向氷圧力の関係

図—11 最大氷力時の法線方向氷圧力
(上: $\dot{\epsilon}=1.5\sim 6.7\times 10^{-3}$, 下:
 $\dot{\epsilon}=8.7\times 10^{-5}\sim 1.1\times 10^{-4}$)図—12 最大氷力時の接線方向氷圧力
(上: $\dot{\epsilon}=1.5\sim 6.7\times 10^{-3}$, 下:
 $\dot{\epsilon}=8.7\times 10^{-5}\sim 1.1\times 10^{-4}$)図—13 最大氷力時の母線方向氷圧力
(上: $\dot{\epsilon}=1.5\sim 6.7\times 10^{-3}$, 下:
 $\dot{\epsilon}=8.7\times 10^{-5}\sim 1.1\times 10^{-4}$)

参 考 文 献

- 1) Saeki, H., K. Hamanaka and A. Ozaki: Experimental Study on Ice Force on a Pile, Proc. of 4th International Conference of Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, pp. 695~706, 1977.
 - 2) Saeki, H. and A. Ozaki: Ice Force on Piles, Physics and Mechanics of Ice, Ed. by P. Tryde, Springer-Verlag, 1980.
 - 3) 佐伯 浩・小野敏行・山田 満・尾崎 晃: 直立杭構造物に作用する海水の力に関する研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 369~403, 1981.
 - 4) 佐伯 浩・田中祐人・小野敏行・酒井雅史・尾崎 晃: 直立杭構造物に作用する氷圧力分布と氷盤の破壊周期について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 653~657, 1983.
 - 5) 竹内貴弘・田中祐人・小野敏行・佐伯 浩: 直立海洋構造物に作用する氷圧力の分布について, 第2回寒地技術シンポジウム, pp. 160~265, 1985.
 - 6) 加藤一行・岸本弘晴・三田重雄: 塩氷の三軸圧縮試験, 第2回寒地技術シンポジウム, pp. 148~165, 1986.
 - 7) Reinicke, K. M. and R. Remer: A Procedure for the Determination of Ice Forces—Illustrated for Polycrystalline Ice, Proc. of IAHR Symposium on Ice Problems, Part 1, pp. 217~238, 1978.
 - 8) Ralston, T. D.: An Analysis of Ice Sheet Identification, Proc. of IAHR Symposium of Ice Problems, Part 1, pp. 13~31, 1978.
 - 9) 田中義明・川崎哲郎・戸沢 秀: 円柱構造物の氷荷重解析に関する一考察, The 2nd Inter. Symposium—Okhotsk Sea & Sea Ice Abstract, pp. 31~32, 1987.
 - 10) Häusler, F. U.: Multiaxial Compressive Strength Test on Saline Ice with Brush-Type Loading Plates, Proc. of IAHR Symposium on Ice Problems, Vol. II, pp. 526~536, 1981.
-