

多脚海洋構造物に作用する海水の力に関する研究

佐伯 浩* ・ 小野 敏行**・ 竹内 貴弘***
酒井 雅史****・ 押川 定生*****

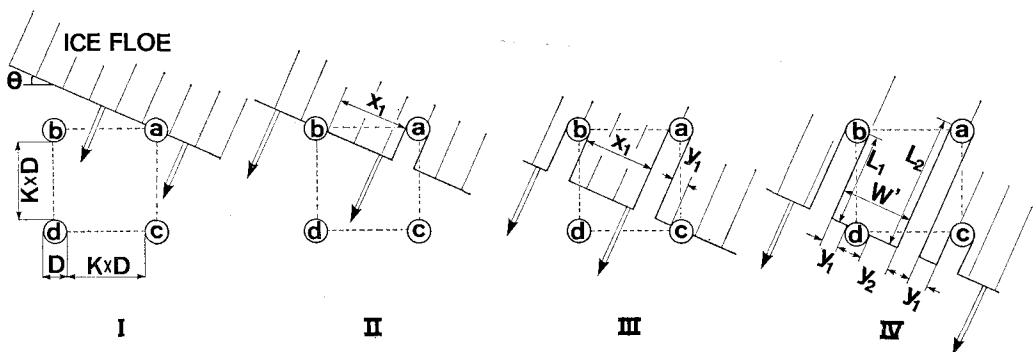
1. ま え が き

北極海、北部オホーツク海それに渤海等、冬期間海水で覆われる海域で石油、ガス等のエネルギー資源の埋蔵が確認されて以来、氷海域における海洋構造物の設計法の確立が急がれている。また、我が国においては、北海道のオホーツク海に面した海岸や道東の太平洋岸では流水による昆布、アワビ、ウニ等の水産物の被害も多く、昭和 52 年の 2 月から 4 月にかけては約 120 億の水産物の被害を出しているし、昭和 49 年にはサロマ湖に侵入した海水がホタテ、カキの養殖施設等に 20 数億円の被害を与えていて、流水の動きを制御する構造物の開発と流水に対する設計法の確立が望まれているのが現状である。そこで、本研究では複数の直立杭により構成されている多脚海洋構造物に作用する全氷力の算定法を取り扱ったもので、この成果は流水制御のための構造物の設計にも充分役立つと思われる。一般に氷海域に建設する海洋構造物の構造形式は直立単独構造物や CONE 型構造物等のように単純な構造型式の方が合理的な事はよく知られているが、渤海やオホーツク海等のように比較的水厚の小さい所では、Ice Jamming に若干の心配は残るも

の、建設の簡単さを考えると多脚海洋構造物も氷海域で充分可能性のある構造様式といえる。

2. 実験装置及び実験方法

多脚海洋構造物に作用する全氷力を実験的に正確に求めるには、氷海水槽を用いるのが一番簡単である。しかし、現実に氷海域に建設されている多脚構造物に海水氷盤が作用している状況をみると、多脚構造物の模型を用いて実験をしなくても、単独梁を用いた数種類の実験を組合せる事で多脚構造物に作用する全氷力の推定が可能となる。アラスカ、クック湾に建設されている 4 本脚の石油掘削リグに大きな氷盤が衝突、貫入する時の様子をモデル化して図示すると図—1 の如くなる¹⁾。杭径を D 、杭間隔を $K \times D$ 、氷盤の進入角度は θ である。図—1 において、I 図は氷盤が杭に達した時で、この時杭 a には、半無限氷盤による氷力が作用する事になる。次に氷盤が進行して II 図の位置に達すると a 杭にはそのまま半無限氷盤による氷力が作用し続けるが、杭 b には隅角部を有する氷盤による力が作用する事になる。この時、距離 X_1 が小さい場合には、氷盤の隅角部に大きなクラックが発生し、杭 b に作用する氷力は小さくなる。また X_1 が充



図—1 多脚海洋構造物の氷盤への貫入の模式図

* 正 会 員 工 博 北海道大学教授 工学部土木工学科
** 北海道大学工学部土木工学科
*** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科
**** 正 会 員 工 修 大成建設(株) 土木設計部
***** 正 会 員 宮崎県土木部港湾課

分に大きければ半無限氷盤に作用する氷力(杭 b に作用する氷力と同じ大きさ)と同じ大きさとなる。次に III 図に示すとこまで氷盤が進行すると、杭 b と同様に c 杭に隅角部を有する氷盤が作用する事になる。この時、杭 c に

作用する氷力は b 杭と同様に考えればよい。

次に、図IVに示すところまで氷盤が進行すると杭 a には半無限氷盤が杭に及ぼす力が作用し、 b, c 杭には隅角部を有する氷盤が作用する事になり、杭 d には片持梁状の氷盤が作用する事になる。この時、杭 d に作用する氷力は、隅角部を有する氷盤が作用する氷力と片持梁が挫屈する時の氷力の小さい方の氷力が作用する事になる。多脚の海洋構造物に作用する氷力を上述のようにモデル化して考えると、多脚海洋構造物に作用する全氷力は、各杭に作用する氷力の総和で表わされる事になる。また全氷力は、氷盤の進行角 θ によっても変わる事になるし、杭間隔 $K \times D$ によっても変化する事になる。上述した多脚海洋構造物に作用する氷力を分解して考えると、図-2 に示す3つの Type に分ける事が可能となる。本研究では特に、Type II と Type III の場合の詳細な実験を行ない、過去に行ってきた筆者等の研究成果を利用して多脚海洋構造物に作用する氷力を明らかにしようとするものである。よって本研究では1本の杭に作用する氷力の実験を Type II, Type III について実験を行った。全ての実験はオホーツク海に面したサロマ湖の富士漁港で行った。氷厚 25 cm の氷盤に 3 m $\times$ 4 m の穴をあけ、新に良質の氷盤を造り、その氷盤を用いて実験を行った。氷厚 h は 12 cm で、グレインの平均径は 8~12 mm で、用いた杭の直径 D は 50 cm で、アスペクト比は $D/h \approx 5$ となる。実験に用いた杭を図-3に示す。氷盤の接する 20 cm の部分はステンスレ板となっている。また氷力は油圧シリンダー内の油圧を圧力センサで測定して求める事が出来る。また杭の氷盤への貫入速度 V は、杭貫入に伴う氷盤の歪速度 $\dot{\epsilon}$ が最大氷力なる領域で実験を行った。過去の研究成果によれば歪速度 $\dot{\epsilon}$ が $10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ で最大氷力を示す事が明らかとなっているので、貫入速度 V を $V=0.33 \text{ cm/sec}$ とし、 $D=50 \text{ cm}$ であるので、歪速度は $\dot{\epsilon}=1.67 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ で全ての実験を行った。

3. 実験結果

(1) Type I に作用する氷力

半無限の氷盤が単独の杭構造物に作用する氷力 F は、佐伯等の結果によると次式で示される。

$$F = C \cdot \sqrt{W} \cdot h \cdot \sigma_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで C は形状によって決まる係数で、矩形断面杭で 6.8、円断面で 5.0、交角 45° の楔形で 4.5 である。 W は氷盤の進行方向からの投影幅、 h は氷盤の厚さ、 σ_0 は直径 10 cm、高さ 20 cm の円筒供試体を歪速度 $\dot{\epsilon}=10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ で破壊させた時の海水の一軸圧縮強度である。こ

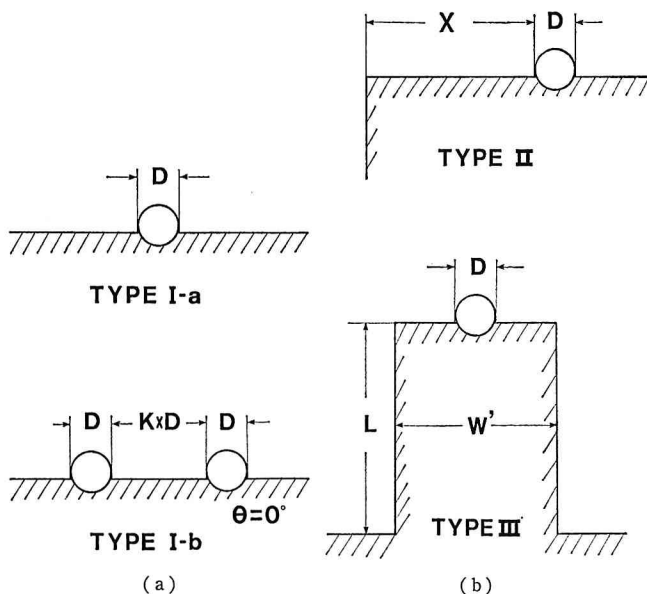


図-2 模式化した氷盤の作用形態

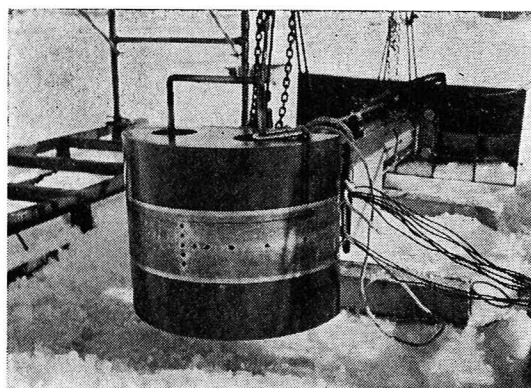


図-3 氷力測定装置

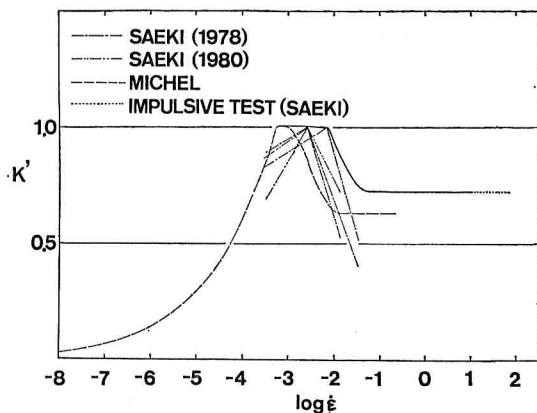


図-4 減衰係数 K' と歪速度 $\dot{\epsilon}$ の関係

の (1) 式は氷盤の貫入速度を種々かえて実験を行った時の最大の氷力を表わしたものである。しかし杭の断面が大きくなると次式で示される歪速度 $\dot{\epsilon}$ は、一般に

$$\dot{\epsilon} = V/4D \dots\dots\dots (2)$$

小さくなり、そのような構造物においては、(1) 式は過大な氷力を与えることになる。このような場合は、次の (3) 式を用いて氷力を計算するとよい⁹⁾。

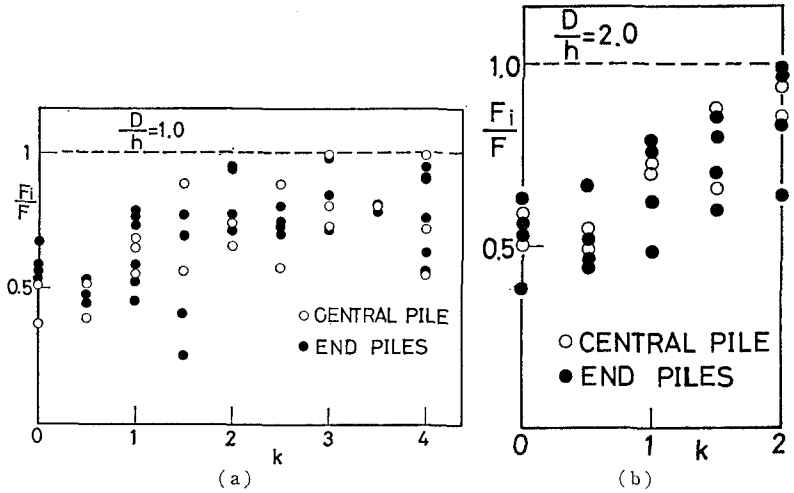
$$F = K' \cdot C \cdot \sqrt{W} \cdot h \cdot \sigma_c \dots (3)$$

(3) 式において K' は、Michel 等や佐伯等の実験結果から図一 4 に示す各実験結果の包絡線を

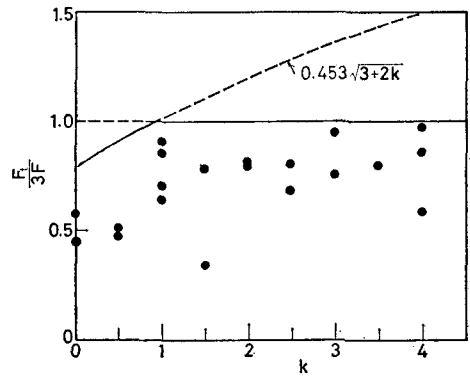
用いればよい。図からも明らかなように K' は (2) 式で示される歪速度に依存する。この (3) 式により Type I-a の場合の氷力の計算が可能となる。次に $\theta = 0^\circ$ の場合には、図一 1 における杭 a と杭 b が同時に氷力を受ける事になり、図一 2 (a) の Type I-b に相当する事になる。佐伯等は杭径 D の三本杭を一列に並べた場合の氷力の実験を行っているがその結果を図一 5 に示す。(a), (b) 図はそれぞれアスペクト比が 1.0, 2.0 である。両図において K は杭間隔を示す係数であり、縦軸の F は (1) 式で示される半無限氷盤が単独杭に作用する氷力であり、 F_t は三本の杭に作用する氷力である。両図から明らかなように、中央の杭と両端の杭に作用する氷力には有意な差はない事が判る。また、 $K \geq 1.0$ の範囲では、実験値の包絡線は 1.0 以下となり、(1) 式で示される氷力と同じか、あるいは小さく、杭相互干渉がなく独立した杭と考えて良い事が判る。この結果は加藤等と一致する⁹⁾。この事実は、多脚杭構造物の場合には杭間隔 $K \times D$ が小さい場合には、多脚構造物と考えるので一体となった構造物と考えるべきである。図一 6 は一列に並んだ 3 本の杭に作用する全氷力を (1) 式で示される氷力の 3 倍で除したものと K の関係を調べたものである。図中の曲線は三本の杭が一体と考えた場合の氷力と (1) 式の 3 倍の比である。よって、図一 1 において $K \leq 1$ の場合は一体と考える事ができるので、多脚構造物に作用する全氷力は次式となる、

$$\left. \begin{aligned} F_t &= C_1 \cdot \sqrt{K \times D + 2D} \cdot h \cdot \sigma_c & \theta = 0^\circ \\ F_t &= C_2 \cdot \sqrt{2(K \times D + D) + D} \cdot h \cdot \sigma_c & \theta = 45^\circ \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

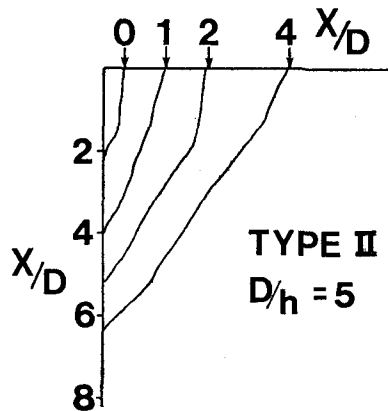
ここで、 C_1 は 6.8、 C_2 は 4.5 である。以上で、任意の θ に対する半無限氷盤が単独杭に作用する場合の氷力と、 $\theta = 0^\circ$ の場合における図一 1 の杭 a, b に作用する氷力を求める事ができる。またこの場合、杭 c, d には氷力は作用しない事になる。また、 $K \leq 1$ と杭間隔が小



図一 5 一列に並んだ複数直立杭に作用する氷力



図一 6 一列に並んだ杭の全氷力



図一 7 隅角部を有する氷盤の破壊

さい場合には多脚構造物でも一体となった単独直立構造物として氷力を求めて良い事を明らかにした。

(2) Type II に作用する氷力

Type II は隅角部を有する氷盤が杭に作用する場合の氷力で、図一 2 (b) における X が D に較べて充分大きければ、Type I-a と同様の結果になる事が予測される。

実験はアスペクト比 $D/h \div 5.0$, 隅角部から杭端までの距離 X を杭径 D で除した X/D を 0, 1.0, 2.0, 4.0, 5.0 それに ∞ で実験を行った。この結果, 氷盤の破壊の仕方は X/D が小さい場合には 図-7 に示すようなクラックが発生し, 氷盤が割れる。その氷盤のクラックの発生状況は相似形に近い形をしている。またこのクラックの発生は氷盤の貫入の初期に発生する。当然の事ながら, X/D が小さい程, 少ない貫入量でクラックが発生する。そして, クラック発生後の氷力はクラック発生時の氷力よりかなり小さく, クラック発生時の氷力を越える事がない。実験は各ケース 3 回づつ行ない, その平均を示したものが 図-8 である。図中の縦軸は, 各 X/D に対する実験値氷力を (1) 式で無次元化したもので $F/hx \rightarrow \infty$ は, 半無限氷盤が作用する時の氷力を示している。図-8 より, X/D が小さくなるにつれて無次元氷力は小さくなる事, $X/D \geq 5$ では X/D に関係なく一定氷力を示す事を示している。この事は隅角部を有する氷盤が杭に作用する場合でも, 隅角部からの距離 X が $X \geq 5D$ くらい離れると, 隅角部の影響はなくなり, 半無限氷盤が作用するのと同じになる事を示している。この実験はアスペクト比 D/h が 5.0 の場合であるが, 図-8 からだけではこの関係が他のアスペクト比によって変化するかどうかは今のところ明らかでない。よって Type-II については 図-8 と氷力の式 (1) あるいは (3) を用いる事によって杭に作用する氷力を求める事が可能となる。

(3) Type III に作用する氷力

図-2 (b) に示す, Type III の場合の氷力を考えると 3 つのケースが考えられる。 W' が杭径 D に対して充分大きい場合には (1) あるいは (3) 式に一致するはずである。また杭端から氷盤の隅角までの距離が小さい場合 ($X < 5D$) には Type II と考えて氷力を求める事ができる。また, 幅 W' が小さい場合には, この梁そのものが挫屈する事になる。以上考えられる三つの破壊様式のうち, もっとも小さい氷力を示すものが, このような片持梁的な氷盤が構造物に及ぼす力となる。上述した二つの氷力についてすでに求める事が可能であるが, 挫屈を起こす場合の氷力については未だ未解決な問題が多い。水面に浮んだ片持梁の挫屈については Sodhi が詳細な解を得ている。図-9 に示すように外力を受ける反対側は大きな氷盤に繋がっているため, Fix の条件が良いが, 杭と接する所での荷重の条件を Hinge, Fix それとも Frictionless と考えるかによって挫屈荷重は大きく異ってくる事になる。実験は幅 50 cm と一定にし, 氷厚 h は 12 cm, 梁の長さは 100, 200, 250, 420 cm に対して実験を行った。その結果を表-1 に示す。表において, 実験により挫屈が起ったものを○印, 起らなかったものを×印, また, Sodhi の解で, FC は荷重端が Frictionless で他端が Fix, HC は荷重端が Hinge で他端が Fix, CC

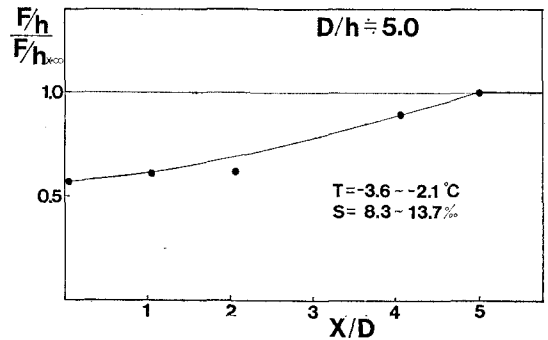


図-8 X/D の変化に対する無次元氷力の変化

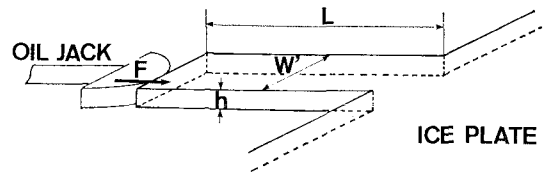


図-9 浮片持梁の挫屈のモデル

表-1 浮片持梁の挫屈に関する実験結果

W' (cm)	L (cm)	EXPERIMENT F (ton)	BUCKLING OCCUR OR NOT	CALCULATED LOAD		
				FC	HC	CC
50	100	8.33	×	8.12	32.30	128.30
		8.18	×			
"	200	6.57	×	2.37	8.63	32.30
"	250	8.37	×	1.99	6.08	20.80
"	420	8.61	○	1.60	4.25	7.95
		6.72	○			

は両端が Fix で計算した挫屈荷重である。この表からも明らかのように, 荷重端は Fix として計算して良い事を示している。以上の結果より, Type III で挫屈が起るとした場合の氷力は Sodhi により次式で計算できる。

$$\frac{\sin(\alpha L/L_b)}{\alpha} = \frac{\sin(\beta L/L_b)}{\beta} \quad (\lambda > 1) \quad \dots (5)$$

ここで,

$$L_b = \left(\frac{E \cdot h^3}{12\gamma} \right)^{1/4}, \quad 2\lambda = F / (W' \cdot \gamma \cdot L_b^2)$$

$$\alpha = \sqrt{(\lambda - 1)/2}, \quad \beta = \sqrt{(\lambda + 1)/2}$$

L : 梁の長さ, W' : 梁の幅, E : 海水の弾性係数

F : 挫屈荷重, γ : 海水の単位体積重量

以上の結果より各 Type に対する杭に作用する氷力を求める事ができる。

4. 多脚海洋構造物に作用する全氷力

ここで最も単純な 4 本脚の構造物を考える事にする。まず, 図-1 の IV において, 図中の各寸法は次式で求める事ができる。

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= D \{ (K+1) \sin \theta - 1 \} \\ Y_1 &= D \{ (K+1) (\cos \theta - \sin \theta) - 1 \} \\ X_1 &= W' = D \{ (K+1) \cos \theta - 1 \} \\ L_1 &= D \{ (K+1) \cos \theta - 0.5 \} \\ L_2 &= D \{ (K+1) (\cos \theta + \sin \theta) - 0.5 \} \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

図-1 により氷盤が移動する事によって各杭に次々に氷力が作用する事になる。氷力の作用形態はアスペクト比、及び歪速度によって異っているが、ここでは氷盤が杭に貫入して最大氷力が発生し、氷盤が破壊しても、その最大氷力を持続していると仮定して全氷力を計算するものとする。これは一度氷盤が破壊すると、その後は断続的に氷盤の破壊が起り、その破壊間隔は必ずしも一定とはならない事と、アスペクト比及び歪速度にも依存するため、非常に複雑となるので設計の安全性も考慮して、そのような計算法を採用した。計算は、まず θ を与えて、(6) 式より各諸元を計算する。杭 a に対しては、(1) あるいは (3) 式で計算して氷力 F_1 を求める。杭 b に対しては、Type II の計算で、(1) あるいは (3) 式と図-8 を用いて氷力 F_2 を計算する。次に c 杭に対しては、b 杭と同様の方法により氷力 F_3 を計算する。次に杭 d に対しては (1) あるいは (3) 式で計算される氷力と図-8 における X のかわりに Y_1 あるいは Y_2 において図-8 より求める氷力それに Type III で示した Sodhi の両端 Fix とした時の座屈荷重の三つの氷力の最小のものをもって F_4 とし、 $F_1 + F_2 + F_3 + F_4$ で全氷力を求める。次に、また前と違った θ を与えて同様の計算をすればよい。最終的に θ を変化させて最大の全氷力を求める事になる。ここで $h=1\text{m}$ 、 $D=5\text{m}$ 、 $\sigma_c=50\text{kg/cm}^2$ 、 $E=30\,000\text{kg/cm}^2$ とし、杭間隔係数 K を $K=3, 6, 9$ と変えて、角 θ に対して計算した結果を図-10 に示す。杭相互の関係を全く無視するならば、縦軸は 4.0 となるが、先に貫入した杭により氷盤が破壊されるため、全氷力はそれより小さい値を示す。当然の事ながら、 K が大

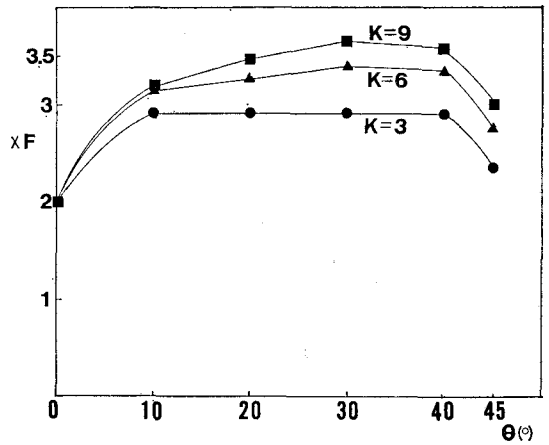


図-10 全氷力の θ に対する変化

きくなる程、最大の全氷力は 4 に近づく事になる。また K が小さくなると 2 に近づく事になる。また角 θ に対しては $\theta \approx 30^\circ$ で最大全氷力を示す事も判る。

参 考 文 献

- 1) Peyton, H. R.: Sea Ice Strength, Geophysical Institute of University of Alaska, 1966.
- 2) Michel, B. and N. Toussaint: Mechanisms and Theory of Indentation of Ice Plates, Jour. of Glaciology, Vol. 19, No. 81, pp. 285~300, 1977.
- 3) 佐伯 浩・小野敏行・竹内貴弘: 直立海洋構造物に作用する氷力について, 土木学会第 29 回年講, 1984.
- 4) Saeki, H., T. Ono, A. Ozaki and S. Abe: Estimation of Sea Ice Forces on Pile Structures, Proc. of IAHR Symposium on Ice Problems, pp. 465~478, 1978.
- 5) 加藤一行・D. S. Sodhi: 並列する円柱構造物に作用する氷荷重, 石川島播磨技報, Vol. 24, No. 1, pp. 1~5, 1984.
- 6) Sodhi, D. S. and D. E. Nevel: Review of Buckling Analysis of Ice Sheets, CRREL Special Rept., 80-26, pp. 131~146, 1980.
- 7) Saeki, H. and A. Ozaki: Ice Forces on Piles, P. Tryde ed., Physics and Mechanics of Ice, Springer-Verlag, pp. 242~250, 1979.