

矩形断面の直立構造物に作用する氷力に関する研究

竹内 貴弘*・岡本 智**・折谷 徳弘***
山下 俊彦****・佐伯 浩*****

1. 序 論

北極海やオホーツク海等のように海水の影響を受ける海域において、海洋構造物を建設する場合、その支配外力は氷力(氷荷重)となることが多い。直立構造物に作用する氷力に関する研究は理論及び実験の両面から活発に行われてきており、氷力式は30近く提案されている(中澤等, 1986), (Hysing et al. 1979), (Sodhi et al.)。この中で、矩形断面を持つ直立構造物に作用する氷力式の誘導にあたっては、氷盤と構造物は全面が同時に接触する(図-1(a))との条件で実験がなされ、理論もそのような仮定のもとで解析されている。このような条件下では、氷盤の edge 部と構造物の面が接触した後、氷盤の移動とともに、氷盤が接触部近傍で同時に破壊を起こす。この時、構造物には最大の氷力(初期氷力)が作用するが、その後は氷盤の移動とともに氷盤は非同時的な破壊となり、氷力は最初の接触時の初期氷力を越えることはない。この氷力を継続氷力と言うことにする。今回の実験では氷力の減少を主にとりあげるが、その減少の要因として次のようなものが考えられる。

- (1) 非同時的破壊の発生
- (2) 氷厚が一定ではない
- (3) 氷盤に作用する環境力と氷盤を破壊するための力のバランス
- (4) 接触条件の違い

一般に提案されている氷力式はすべて、平坦な氷盤に構造物の面が完全に接触するような理想的な接触を仮定している。しかし、著者等の実海域の氷盤の形状の調査によると、氷盤縁部の形状は複雑であり、その鉛直断面も垂直になっていることは皆無であるため、氷盤の edge 部と直立構造物が同時に一様に接触することは現実には起こることはないと考えられる。本研究は氷盤と構造物間の接触条件の違いによる氷力の変化を詳細に実験的に

調べたもので、本研究により、今まで過大な氷力を示すと言われてきた直立構造物に作用する氷力式の改善を目的とするものである。

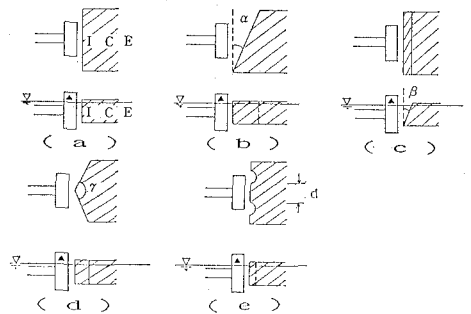


図-1 接触条件

2. 氷力の算定

直立構造物に作用する氷力を算定する際に、その影響因子として次のようなものが考えられる。

- (1) 氷盤の貫入速度 v (氷盤貫入に伴う歪速度 $\dot{\epsilon}$)
- (2) 断面の形状と構造物の幅 w
- (3) 氷の一軸圧縮強度 σ_c
- (4) 氷厚 h
- (5) アスペクト比 w/h
- (6) 氷盤の破壊パターン
- (7) 接触条件

氷力式は、現在提案されているだけでも30近くあり、経験式、実験式、理論式に大別される。今回の研究では著者の一人、佐伯等の実験式(Saeki et al, 1980)を基準として用い、氷力 F を算定することにした。Saeki の式は次式で示される。

$$F = K' C \sqrt{W} h \sigma_c$$

K' : 氷盤の貫入に伴う歪速度 $\dot{\epsilon}(=v/4w)$ の関数。

$\dot{\epsilon}$ が 10^{-3} のオーダーでは $K'=1.0$

c : 構造物の断面形状による係数。矩形では 6.8, 円柱では 5.0, 楔角 90° の場合では 4.5

w : 構造物の幅 (cm)

* 正会員 工修 清水建設(株) 技術研究所

** 北海道大学大学院 工学研究科

*** 学生員 北海道大学大学院 工学研究科

**** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

***** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

h : 氷厚 (cm)

σ_c : 氷の一軸圧縮強度 (kgf/cm²). 最大氷力を示すような $\dot{\epsilon}$ ($\dot{\epsilon}=1 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$) で円柱供試体 (径 10 cm, 高さ 20 cm) を用いて試験を行う。

このように, Saeki の式は上記の影響因子がほとんど考慮されている点で優れていると言える。

3. 実験方法

実験は平成 3 年 2 月 1 日～14 日まで北海道石狩郡新篠津村の篠津湖 (旧石狩川の三日月湖) で行った。接触条件の氷力へ与える影響を明確にするために氷厚は一定の平坦氷とした。現地の氷は、純粋な氷と雪が圧縮されて固まった雪氷とで層状になっているため、次のような実験用の氷盤を作製した。まず湖に張った厚さ約 30 cm の氷盤に 1.2 m × 2.2 m の穴を開け、新たに結氷させて、結晶粒径を小さくするようにし、また良質な氷盤を作製するため、氷盤作製中は完全な除雪を行った。油圧ジャッキの控板の幅は 120 cm とした。また結晶の平均径は 4～6 mm であった。

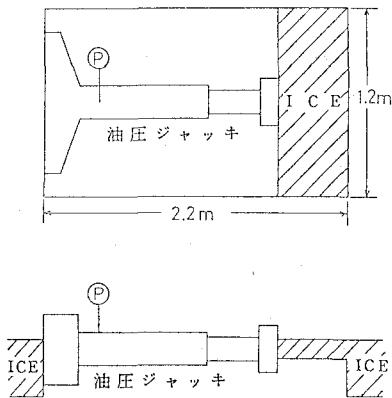


図-2 実験装置

実験は図-1 のように接触条件を変えて 5 つのケースについて行った。

- (a) 理想的な接触条件, すなわち氷盤と構造物の全面が同時に接触するような場合。
- (b) 平面的に氷盤の edge が斜めになった状態で貫入する場合で、氷盤の edge とインデンターの面との角度 α を変化させた。
- (c) 氷盤の edge がインデンターの面と平行であるが、鉛直面に対して傾斜した状態で、角度 β を変化させた。
- (d) 楔形の氷盤で、その交角 γ を変化させた。
- (e) 氷盤の edge の一部を直径 15 cm のコアドリ

ルで抜取り、部分接触の条件で、穴の間隔 d を変化させた。

また、実験条件は以下の通りである。

- ・氷温は $-1 \sim -3^\circ\text{C}$ と高く、結晶構造による異方性の効果が小さいため、海水とほぼ同様の力学特性を有すると考えられる。
- ・インデンターの幅 $w=30(\text{cm})$
- ・貫入速度 $v=0.96(\text{cm/sec})$
- ・一軸圧縮強度 $\sigma_c=37.5(\text{kgf/cm}^2)$

氷力の測定はジャッキ内油圧を圧力変換器により測定し、それにジャッキ内断面積を乗じることにより氷力を算出した。その他に、インデンター先端に 15 個の圧力センサーを取り付け、局部氷圧力の変化も同時に測定した。

4. 実験結果

- (1) 貫入試験を行った際のそれぞれの接触条件における破壊の形態を図-3 に示す。

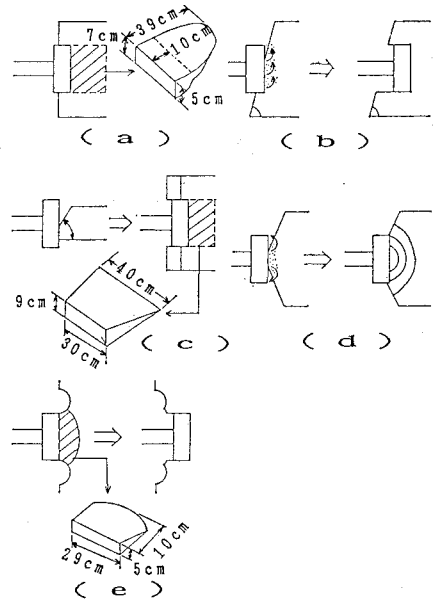
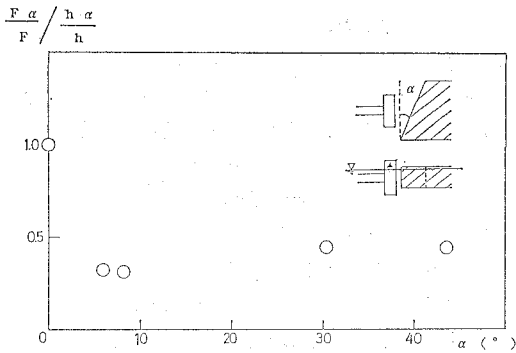
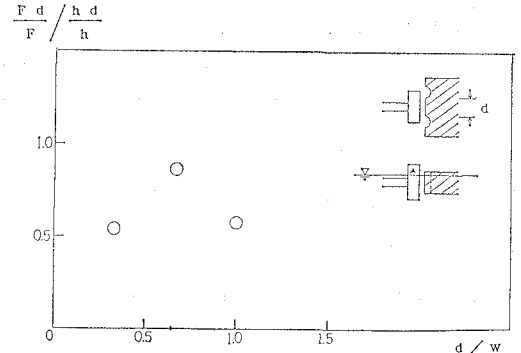
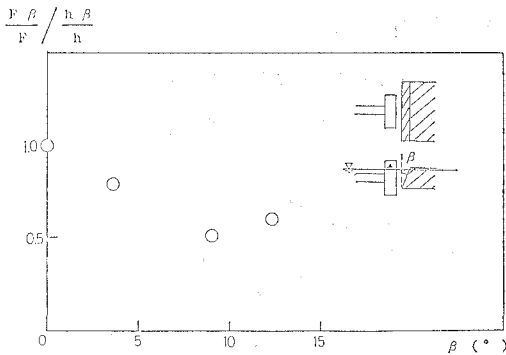
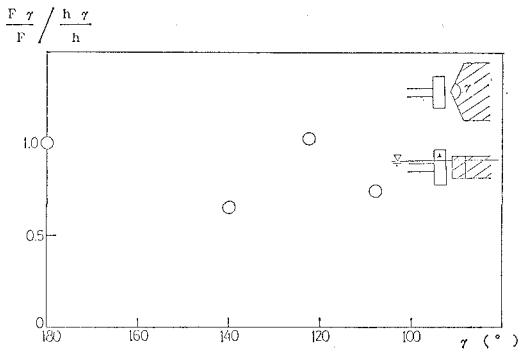


図-3 氷盤の破壊パターン

- (a) 理想的な接触の場合で、上、下方向にせん断破壊した。
- (b) 図-1(b) の接触条件で $\alpha=5.9^\circ$ の場合である。圧縮破壊し、破壊した氷片を図のように排除しながら貫入した。
- (c) 図-1(c) の接触条件で $\beta=3.6^\circ$ の場合である。最初に圧縮破壊を起こし、その後、曲げ破壊を起こした。

図-4 初期氷力 F_α と α の関係図-7 初期氷力 F_d と d/w の関係図-5 初期氷力 F_β と β の関係図-6 初期氷力 F_γ と γ の関係

力 F_α と理想的な条件 (図-1(a)) での初期氷力 F の比を、角度 α を変化させた時の氷厚 h_α と理想的な条件での氷厚 h の比 (h_α/h) で補正した値 $(F_\alpha/F)/(h_\alpha/h)$ と α の関係は図-4 で示され、氷盤の edge とインデンターのなす角 α が 5° を越えると氷力は F (理想的条件での初期氷力) の 50% 以下となる。

- (3) 図-1(c) の条件では、 $(F_\beta/F)/(h_\beta/h)$ と β の関係は、図-5 で示され (ここに h_β は角度 β を変化させた時の氷厚)、edge 面の傾斜角 β が増加するとともに、初期氷力 F_β は F に比べて緩やかに低下し、 β が 10° を越えるとほぼ一定値になり、 F の 50% 程度となる。
- (4) 図-1(d) の条件では、 $(F_\gamma/F)/(h_\gamma/h)$ と γ の関係は、図-6 で示され (ここに h_γ は交角 γ を変化させた時の氷厚)、交角 γ が 140° くらいまでは、 γ が小さくなるにつれて F_γ は小さくなるが、 $140^\circ \geq \gamma \geq 110^\circ$ の範囲では、 F_γ は変化せず、 F の 70% 程度となる。
- (5) 図-1(e) の条件では、 $(F_d/F)/(h_d/h)$ とインデンターの幅 w と氷盤との接触幅 (穴の間隔) d の比 d/w との関係は図-7 で示され (ここに h_d は氷盤との接触幅 d を変化させた時の氷厚)、 d/w が 1.0 以下では F_d は F の 80% 以下となる。

- (6) 図-8 は 図-1(a) のような理想的な接触条件における氷力の時間変化を示したものである。インデンターが氷盤に接触した時から氷力が上昇し始め、氷力のピークの時点で氷盤の接触部近傍が破壊している。この時の氷力が初期氷力である。この結果から継続氷力の各ピーク値は初期氷力の 70% を越えることはないといえる。

Nakazawa の研究によれば、継続氷力ピーク

- (d) 図-1(d) の接触条件で $\gamma=139.7^\circ$ の場合である。最初に圧縮破壊を起こし、その後、せん断破壊した。

- (e) 図-1(e) の接触条件で $d/w=1.0$ の場合である。最初に前面のせん断破壊を起こし、その後圧縮破壊しながら貫入した。

- (2) 図-1(b) の条件で角度 α を変化させた時の氷

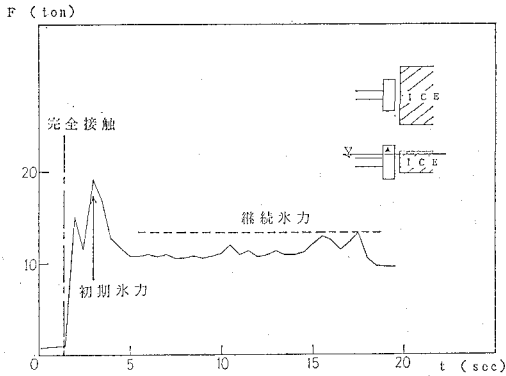


図-8 氷力の時間変化 (理想的な接触)

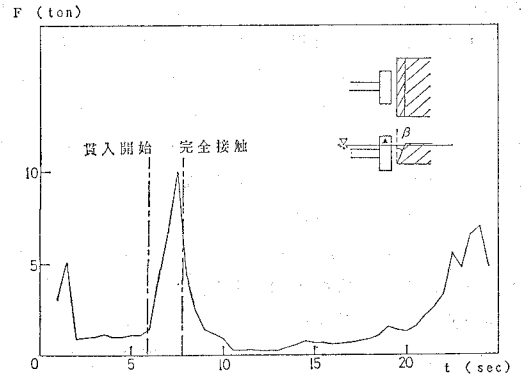


図-11 氷力の時間変化 (氷盤の edge が鉛直面に対して傾斜した状態)

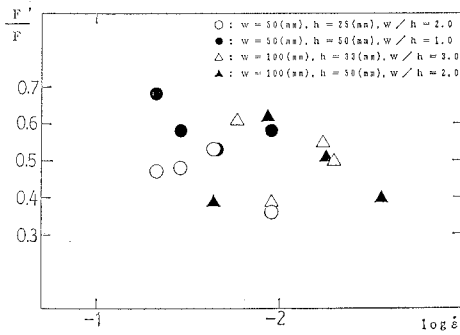


図-9 継続氷力と歪速度の関係

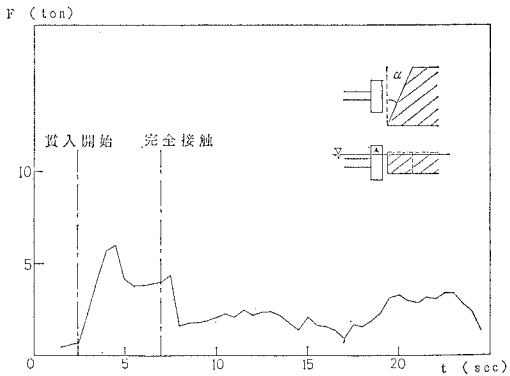


図-10 氷力の時間変化 (平面的に氷盤の edge が斜めになった状態)

値 F と初期氷力との比 F'/F と歪速度 $\dot{\epsilon}$ の関係は図-9 で示される。アスペクト比によって若干の傾向の違いが見られるが、 $\log \dot{\epsilon}$ が $-1 \sim -3$ の範囲で、 F'/F は、ほぼ $0.3 \sim 0.7$ の範囲に含まれていることがわかる。本研究の結果は、これにほぼ一致している。また、同様な研究を行った Saeki, Sodhi 等の結果とも一致を示している。

(7) 図-10 は、図-1(b)のような条件 ($\alpha = 8.2^\circ$) での氷力の時間変化を示したものである。インデンターが氷盤に接触した時から氷力が上昇し始めるのは理想的な条件の場合と同じであるが、インデンターの全面が氷盤に完全に接触する前に氷力はピークをむかえている。Saeki の式では、氷力 F は $\sqrt{w}$ 、 h に比例する、すなわち接触面積が大きくなるにつれ、 F は大きくなるはずである。ところが図-10 に示されるように、インデンターが完全に接触する前に氷力はピークをむかえている。これは、氷盤が完全に接触する前にピークをむかえた時点で接触部近傍の氷盤が破壊し、その後は氷盤の移動とともに氷盤は非同時的な破壊となることによると思われる。このことは初期氷力が理想的な場合の F に比べて小さくなることの大きな要因であると考えられる。

(8) 図-11 は 図-1(c) のような条件 ($\beta = 9.0^\circ$) での氷力の時間変化を示したものである。これも (7) の場合と同様に、インデンターが氷盤の全面に完全に接触する前に氷盤は破壊し、その時点で氷力はピークをむかえている。

この実験結果により、直立矩形断面構造物と氷盤縁部との接触条件によって図-1(a) に示すような理想的条件での初期氷力 F より小さな氷力を示すことが明らかとなった。これは、先に構造物が接触した部分から破壊が発生し、それにともないクラックが氷盤内部にまで進行するためである。

5. 結 論

氷海域における海洋構造物設計の際、既存の氷力式を用いると、設計が過大になる傾向が見られた。これは、既存の氷力式が、どれも理想的な接触条件での初期氷力

を示していることによるものである。15点の圧力センサーによる局部氷圧力の測定結果では、氷盤が破壊に至るまでは、各点の氷圧力が大きくなっていくが、一度破壊してクラックが入ると各点の氷圧力のピークは同時には起こらなくなる。継続氷力が初期氷力より小さくなるのはこのことによるものと考えられる。実海域においては理想的な接触が起こることは考えられない。したがって、氷盤縁部の形状を考慮することにより、既存の氷力式より、約80%程度の氷力に低減できると考えられる。今回の研究では接触条件を5ケースに限定し、しかも実験データもそれほど多くないため、今後は、実験データの裏付けと、多様な接触条件を考慮することが課題となる。

参 考 文 献

- 中澤直樹・竹内貴弘・小野敏行・佐伯 浩 (1986): 海洋構造物に作用する氷力の評価, 海洋開発論文集, Vol. 2, pp. 115-121.
- Hysing, T. Gran, A., Vaage, B., Skjoldal, S., Korbijin, F., Verlo, P. O. and E. Klausen (1979): Ice loads on marine structures, Marine Structures and Ships in Ice, Rep. No. 79-02, pp. 1-125.
- Saeki, H. and A. Ozaki (1980): Ice forces on piles, Physics and Mechanics of Ice, Ed. Per Tryde, Springer-Berlag, pp. 342-350.
- Sodhi, S. and N. Nakazawa (1990): Frequency of intermittent ice crushing during indentation tests, IAHR 90, The 10th International Symposium on Ice, Vol. 3, pp. 277-289.