

海岸構造物に作用する海水の力に関する研究 (5)

佐伯 浩*・浜中建一郎*・西谷 一典**
小野 敏行***・尾崎 晃*

1. ま え が き

最近、アメリカ合衆国、カナダ、ソ連、西ドイツそれに北欧の各国においては、海水と海岸、海洋構造物の相互作用それに、海水の工学的な面からの研究等が非常に活発になってきている。そのように海水の研究が盛んになってきている背景には次のような目的があるためと思われる。(1) 最近のエネルギー危機に対応して、海水の存在する寒冷地の海岸、海洋底にその存在が確認されている石油、ガスの掘削装置あるいはそのような地下資源の探査装置の海水に対する設計法を確立し、海水に対して有効で経済的構造物を開発するため。(2) 寒冷地の開発にともなう航路維持と寒冷地国の経済活動の国際化に伴う物資輸送の増大に対処するため航路維持が必要で、そのため砕氷船、砕氷貨物船それに耐氷船等の効果的設計法を確立する事と航路標識例えば海中燈台等の設計法を確立するため。(3) 海水盤を氷上滑走路、氷上軌道あるいは氷上貯蔵基地等のように交通施設あるいは貯蔵施設として利用するため。(4) 養殖漁業のための漁場等の保護のため、ある限られた海域の海水の動きを制御する必要があるため。

我が国にとっては現在、上記の (1)、(4) の問題が特に重要と考えられている。本研究は、海水の影響を最も受け易い構造形式である、抗構造物と海水に対して最も効果的な形状と云われている Cone 型構造物に作用する海水の力に関する実験を行なったのでその結果を報告する。

2. 実験装置と実験方法

実験は全てオホーツク海に面したサロマ湖(塩分量 $S=32\sim33\text{‰}$)の富士で、主にサロマ湖の氷を用いて行なわれた。実験に用いた海水のグレインサイズは平均 $10\sim13\text{ mm}$ 程度であった。また密度は $\rho=0.84\sim0.90\text{ gr/cm}^3$ 、塩分量は $S=3.0\sim5.5\text{‰}$ であった。直立杭に作用する氷圧力、斜抗、Cone 型構造物に作用する氷圧力の実験には、それぞれ筆者等が開発した氷圧力測定装置¹⁾

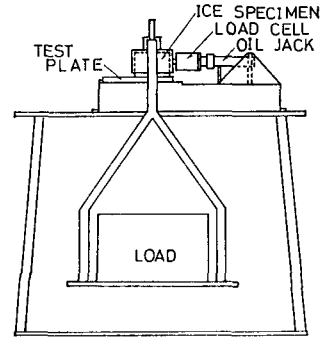


図-1

を用いた。また、Cone 型構造物や斜抗等の構造物の場合、海水と構造物材料間の摩擦も調べておく必要があるため、図-1 に示すような摩擦係数測定装置を試作して海水と土木材料特に鋼とコンクリート間の動摩擦係数と静止摩擦係数を求めた。

3. 直立単独抗構造物に作用する氷力

直立した単独の杭に作用する氷力については、経験公式、実験式それに理論式が数多く発表され、また実際に用いられている。筆者等は氷圧力測定装置を用いた実験結果と Field 試験から抗構造物に作用する氷力に対して次式を得ている²⁾。

$$F=C \cdot \sqrt{W} \cdot h \cdot \sigma_e \quad \cdots \cdots (1)$$

W : 氷力の作用方向からの最大投影幅 (cm), h : 氷厚 (cm), σ_e : 軸圧縮強度で径 10 cm, 高さ 20 cm の円筒供試体で荷重速度 $\dot{\sigma}_e=1\sim3\text{ kg/cm}^2\cdot\text{sec}$ で得られたもの (kg/cm^2), C : 抗の断面形状で決まる係数で、円断面に対して 5.0, 矩形断面に対して 6.8, 交角 90° の楔形に対しては $4.5\text{ (cm}^{1/2}\text{)}$ 。

同様の問題に対して、最近 Croasdale et al³⁾, Ralston⁴⁾ そして Reinicke et al⁵⁾ 等によって塑性限界理論を用いて新しい解析がなされた。これは氷盤を塑性体とし、それに矩形断面の抗を貫入させる力を理論的に求めたものである。Croasdale et al の結果と Reinicke et al の結果を示したものが図-2 である。上限は杭前面の氷が塑性破

* 正 会 員 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
*** 北海道大学工学部土木工学科

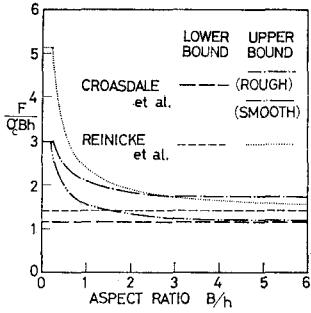


図-2

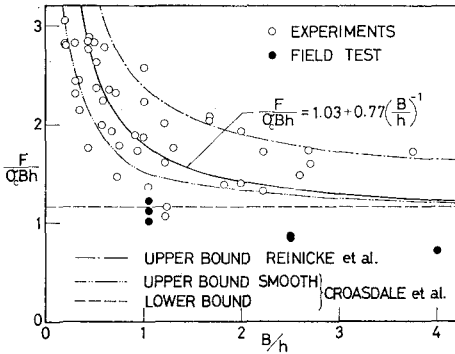


図-3

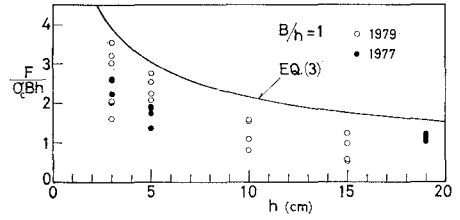
壊する場合に相当し、下限は塑性破壊が起らない場合の計算値である。また Croasdale は、抗表面が smooth な場合と rough な場合の計算を行こなっていて、表面が粗い場合の方が大きな氷圧力になる事を示した。図中の B は矩形断面抗の抗幅である。図-2 から明らかなように塑性理論より求めた矩形断面に作用する無次元氷力はアスペクト比 (B/h) のみの関数となり、次式で示される。

$$\frac{F}{\sigma_c B h} = f\left(\frac{B}{h}\right) \quad (2)$$

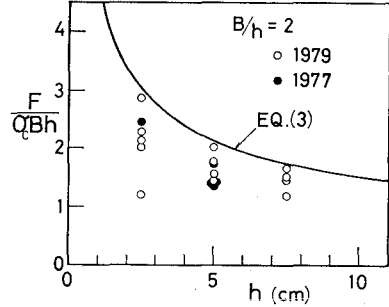
また、両理論ともアスペクト比に関係なく無次元氷力は 1.0 より大きい値を示している。図-3 に佐伯等の行った実験結果を示す。図からも明らかなように、実験値は理論曲線によく似かよった変化をしている。しかし、Field での実験値は、かなり小さい無次元氷圧力を示している。この実験値はバラツキが大きい、一般に氷厚が大きい程、無次元氷力は小さい値を示している、次にアスペクト比を一定にして詳細な実験を行なった。その結果を図-4 に示す。(1) 式を変形すると次式が得られる。

$$\frac{F}{\sigma_c \cdot B \cdot h} = C \cdot \left(\frac{B}{h}\right)^{-1/2} \cdot \frac{1}{\sqrt{h}} \quad (3)$$

佐伯等の (3) 式では、無次元氷力は、アスペクト比と氷厚の絶対値で決まっている事を意味している。同一のア



(a)



(b)

図-4

スペクト比であれば氷厚が大きくなればなる程、無次元氷力は小さくなる事を示している。図-4 (a) はアスペクト比 (B/h) = 1.0 の場合であるが、図からも明らかなように、(3) 式が実験値の包絡線となっているが、これは、(1) 式が実験値の包絡線を示している事と一致する。アスペクト比が 2.0 の場合も同様に、実験値の包絡線となっている。また (3) 式は、無次元氷力が 1.0 より小さい値を示す事がある事を示している。これに対して、Hirayama & Schwarz⁹⁾ は円断面抗に対し次式を得ている。

$$F = 3.57 D^{1/2} h^{11/10} \cdot \sigma_c \quad (4)$$

(4) 式を書きかえると次式を得る。

$$\frac{F}{\sigma_c \cdot D \cdot h} = 3.57 \left(\frac{D}{h}\right)^{-1/2} \cdot h^{-2/5} \quad (5)$$

(5) 式も無次元氷力はアスペクト比と h で決まる事になり、同一のアスペクト比であれば、氷厚が増大すれば無次元氷力は小さくなる事を示している。以上に述べたように、実験結果から判断すると塑性解析によって得られた、Croasdale et al, Ralston, Reinicke et al の結果には実際に適用するには大きめの氷圧力を示す事が予想される。これは大口径の杭に作用する氷力の実測結果を考慮して得られた A. P. I.⁷⁾ の氷力公式の無次元氷力が 0.3 ~ 0.7 になっている事でも理解できる。なお、図-3, 4 に示されている実験値は、貫入速度は、1mm/sec で、Strain rate $\dot{\epsilon} = 0.001 \sim 0.004$ 程度となっていて、最大の氷力を示す領域で実験されている事になり、Michel⁹⁾ 等の示した Transition Region となっている。

4. 斜抗及び Cone 型構造物に作用する氷力

海氷の強度特性として、曲げ強度 σ_B は一軸圧縮強度 σ_0 の数分の一と弱いのが特徴である。よって氷盤を曲げて破壊させるようにすると、構造物に作用する氷力は小さくなり、設計上有利となる。図-5 のように、海氷に作用する力を F_V と F_H とすると、海氷と構造物の摩擦係数を静止摩擦係数を μ_S 、動摩擦係数を μ_K とし法面の角度を θ とする時、 F_V 、 F_H は次式で表わされる。

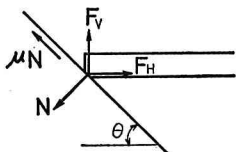


図-5

$$F_H = N \cdot \sin \theta + \mu N \cos \theta \quad (6)$$

$$F_V = N \cdot \cos \theta - \mu N \sin \theta \quad (7)$$

上式の摩擦係数 μ を μ_S と μ_K に分けて調べた結果が図-6 である。我々が実験に用いた斜抗及び Cone 型構造物は、Carbon Steel Rough に相当し、 $\mu_K \approx 0.1$ 、 $\mu_S \approx 0.2 \sim 0.3$ となる。我々の実験では、氷盤を一定速度 (1 mm/sec) で実験を行こなっているため、破壊時では当然動摩擦係数を対象とすればよい。前回の報告¹⁾でも述べたように、斜抗の場合と Cone 型構造物の場合の氷盤の破壊の mechanism は全く同じで、まず氷盤と構造物の接触点の一部貫入し、その後その部分から放射方向に数

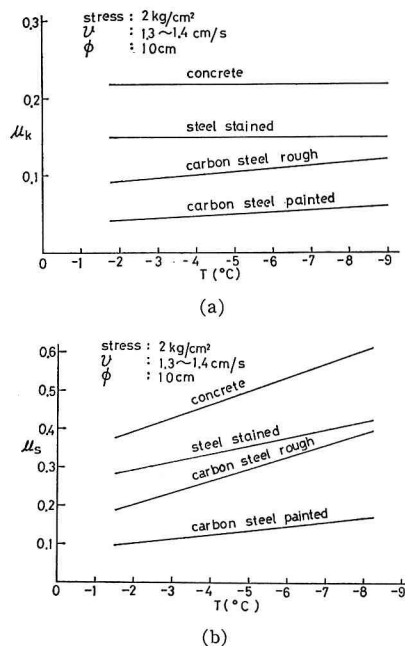


図-6

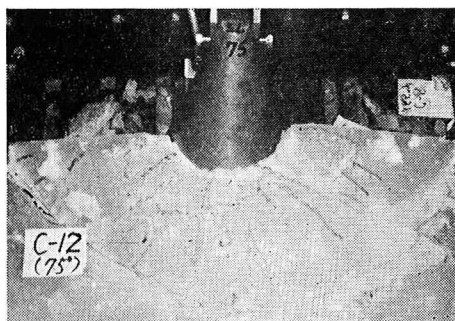


図-7

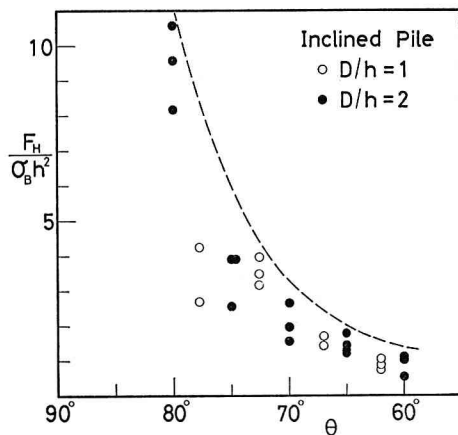


図-8

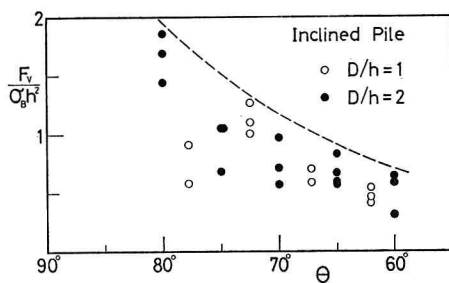


図-9

本の Radial Crack がはいり、その後同心円状のクラック (Circumferential Crack) が発生し完全に氷盤が破壊するが、この時最大の氷力を示す。図-7 に $\theta = 75^\circ$ 、氷厚 $h = 5$ cm の場合の Cone 型構造物に対して、同心円状クラックが発生した時の写真を示す。まず斜抗に作用する氷力の実験結果を図-8、9 に示す。図-8 には水平力を示す。 $(F_H / \sigma_B h^2)$ は、斜抗の傾斜角 θ が小さくなるにつれて、急激に低下する。氷厚は 5 cm と一定厚で、抗径を 5、10 cm の 2 種類に対して実験を行なった。実験値から、抗径の影響はほとんどない事が判る。また $\theta > 70^\circ$ の範囲では θ の増加とともに F_H は急激に増大する。また図-9 の $(F_V / \sigma_B h^2)$ は、やはり F_H の場合と同様に θ が小さくなるにつれて $(F_V / \sigma_B h^2)$ の値は低

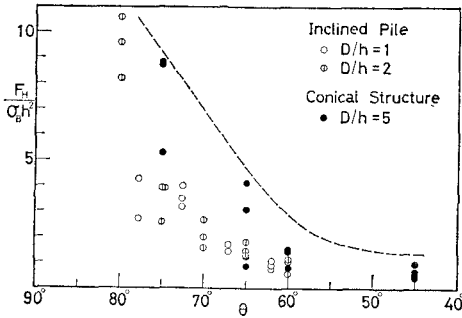


図-10

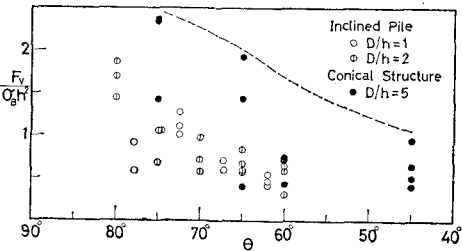


図-11

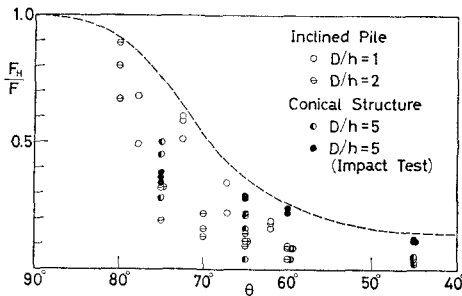


図-12

下する。図-9において、 $\theta \leq 60^\circ$ の場合には $(F_V / \sigma_B h^2)$ の値は最大 1.0 程度となる。この場合は F_H も小さいことから、半無限氷盤の edge に鉛直荷重が作用した場合の Bearing Capacity を求める荷重条件に近い。Panfilov⁹⁾ はこの Bearing Capacity の実験を行こなっているが、それによると F_V は、 $0.6 < F_V / \sigma_B h^2 < 0.9$ となっていて、我々の実験における F_H の小さい場合の結果に非常に近似している。

次に Cone 型構造物に作用する氷圧力を図-10, 11 に示す。図中の Cone 型構造物の径 D は、氷盤が最初に Cone に接する位置の Cone の直径である。この実験では $D=25\text{ cm}$ で実験を行こなっている。図-10, 11 とともに Cone 型構造物の方がより大きな氷力を受けるが、これは (D/h) が大きい方が大きい氷力を示すようである。しかし D が大きい方が F_V , F_H が大きくなる理由の一つに、図-7 の写真でも判るように、氷盤に放射状

のクラックが生じ、平面的にみて、三角形の片持梁の先端が Cone に接して、それが同時に破壊する時に最大の氷圧力を示す。しかし杭径が小さいと、氷盤の接触面積が小さいため、梁の鋭角な先端が杭からはずれる事があるため小さい氷力を示す事になる。次に F_H と (1) 式で示される直立杭に作用する氷力 F との比 (F_H/F) と θ の関係を示したものが図-12 である。これによると $\theta < 65^\circ$ の範囲では F_H/F が小さな値となり、斜杭あるいは Cone 型構造物の特性を充分発揮している領域と云えるし、またその領域の氷盤は完全に曲げで破壊する。それに対して、 $\theta \geq 80^\circ$ では、破壊様式は直立杭の場合に非常に似かよっていて、 F_H も直立杭の氷力に非常に近い値を示す。

以上、筆者等は斜杭あるいは、Cone 型構造物作用する氷圧について述べたが、これはあくまでも氷盤を破壊させるに必要な力である。Croasdale¹⁰⁾ は $\theta=45^\circ$ の Cone に作用する氷圧力公式を得ているがこれは次式で示される。

$$F_H = 1.6\sigma_B h^2 + 6.0\rho g D h^2 \dots\dots\dots (8)$$

式中、 ρ は氷の密度である。この式の第一項は氷盤を破壊する力、第二項は壊れた氷塊を押しつけるながら氷盤が進行するための力としている。この他に Afanasev^{10), 11)} 等の実験結果も発表されているし、Ralston¹¹⁾ の塑性理論も発表されているが、実験の規模等も小さいため、今後はより大規模な実験あるいは現地観測が望まれる。

5. あとがき

本研究は、文部省科学研究費自然災害特別研究（代表者佐伯浩）によった事を付記するとともに、実験に協力して載いた北大工学部の吉本靖俊、中沢直樹、広井美樹の諸氏に深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 佐伯・阿部・野村・小野・尾崎： 海岸構造物に作用する氷圧力に関する研究 (4)，第 25 回海講論文集，pp. 315～318，1978。
- 2) Saeki, K., H. Hamanaka, A. Ozaki: Experimental study on ice force on a pile, Proc. P.O.A.C. 77, pp. 695～706, 1977。
- 3) Croasdale, K. R., N. R. Morgenstern, J. B., J. B. Nuttle: Indentation tests to investigate ice pressures on vertical piles, Jour. of Glaciology, Vol. 19, No. 81, pp. 301～312, 1977。
- 4) Ralston, T. D.: An analysis of ice sheet indentation, Proc. IAHR Symposium on ice problems, pp. 13～32, 1978。
- 5) Reinicke, M. K., R. Remer: A procedure for the indentation of ice forces, Proc. IAHR Symposium on ice problems, pp. 217～238, 1978。
- 6) Hirayama, K., J. Schwarz, H. C. Wu.: An investigation of ice forces on vertical structures, Iowa Institute of Hydraulics, University of Iowa (IIHR Report No. 158), 1974。

- 7) Saeki, H., T. Ono, A. Ozaki, S. Abe: Estimation of sea ice forces on pile structures, Proc. IAHR Symposium on ice problems, pp. 465~479, 1978.
 - 8) Michel, B., N. Toussaint: Mechanisms and theory of indentation of ice plates, Jour. of Glaciology Vol. 19, No. 81, pp. 285~300, 1977.
 - 9) Kerr, A.D.: The bearing capacity of floating ice plates subjected to static or quasi-static loads, Jour. of Glaciology, Vol. 17, No. 76, pp. 229~267, 1976.
 - 10) Croasdale, K.R.: Ice forces on fixed rigid structures, A report prepared for the Working Group on Ice Interaction on Hydraulic Structures, Committee on Ice Problems, IAHR, 1978.
 - 11) Ralston, T.D.: Ice force design consideration for conical offshore structures, Proc. P.O.A.C. '77, pp. 741~752, 1977.
-