

海岸構造物に作用する海水の力に関する研究 (3)

——杭構造物に作用する氷圧力——

佐伯 浩*・齊藤修一**・小野邦夫***・浜中建一郎*・尾崎 晃*

1. 緒 論

わが国における海岸構造物の海水の被害例はそれほど多くはない。これは海水の影響を最も受け易い杭構造物が海水の常襲地帯であるオホーツク海沿岸では用いられていないためである。北海道のオホーツク海沿岸は1月初旬頃から4月初旬にかけては海水で覆われるため、この地域においてはほとんど全ての沿岸海洋での活動は停止する。この現象は、ある意味では漁業資源の保護にもなっているが、養殖漁業等への被害と200海里専管水域にともなう海面の有効利用の面から考えると海水の制御が是非とも必要である。本研究は、杭構造物に作用する氷圧力に対して二種類の実験を行ない、種々の断面の杭に作用する氷圧力公式を求めるとともに、現在用いられている外国の氷圧力公式について若干の検討を加えた。

2. 実験方法と装置

実験は1977年1月25日～2月8日と3月の中旬の2回、サロマ湖にある富富士漁港で行なった。サロマ湖は間口約250mの水路で外海とつながっているため、塩分量は約32‰でオホーツク海の塩分量とほぼ同じであり、そこでできた氷も海水と何ら変わりはない。実験はサロマ湖の氷と常呂海岸で結氷した海水と流水を用いて行なわれた。おのおのの水は塩分量、密度等は若干異なるが、力学的な性質は全く同じである。実験は2つの方法でなされた。

(A) 氷圧力測定装置による方法：われわれが一昨年開発した氷圧力測定装置を用いて、円形断面杭に対しては径 $D=3, 5, 7, 10, 15$ cm で実験を行ない、矩形断面杭に対して辺長 $B=3, 5, 7, 10, 15$ cm で実験を行なった。また矩形杭を 45° 回転し、氷に対して楔形になるようにして実験を行なった。この楔形杭の対角線長 $B'=2.8, 4.8, 7.0, 9.8, 14.1$ cm に対して実験を行なった。この杭の断面形と氷圧力の作用方向の関係を示したものが図-1である。実験の方法は、まず海水を70 cm

×90 cm×20 cm の大きさに切り出し、すばやくその氷塊を実験場まで振動・直射日光を避けて運搬し、氷圧実験用に60 cm×50 cmで所定の厚さに仕上げると同時に残りの氷塊より $\phi=10$ cm, $l=20$ cm の円筒供試体を作製し氷圧力と圧縮強度 σ_c を測定する。

(B) 大口径矩形断面杭の現場実験：氷圧力測定装置を用いる実験では、氷塊を現地海岸から切り出す必要があることと、その装置の規模から大断面の杭に作用する氷圧力の実験は困難である。われわれは前報告で氷圧力測定装置を用いた $D \leq 15$ cm の実験より求めた実験式が、Schwarz や Neill が現地測定した値と良い一致を示すことを明らかにしたが、今回は辺長 $B=20, 50, 80$ cm の矩形断面杭を図-2に示すように油圧ジャッキにより押し込む実験を行なった。

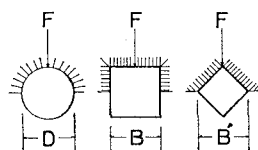


図-1

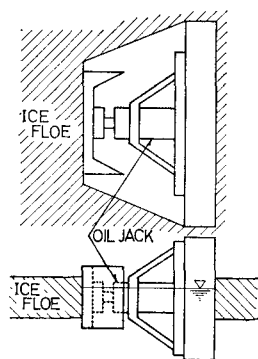


図-2

3. 氷圧力測定装置による実験結果

(1) 円形断面杭に作用する氷圧力

前回の報告でわれわれはこの杭に作用する氷圧力の実験を行なっているが、今回の海水は昨年海水に比べて海水の grain size が異なっていることと密度、塩分量に差があることにより再度実験を行なった。この円形断面杭に海水が貫入するときの破壊のメカニズムを図-3を用いて説明する。氷盤が貫入しはじめると杭に接した部分の海水に微小なクラックが生じ、しかもこれらの小さなクラックは grain

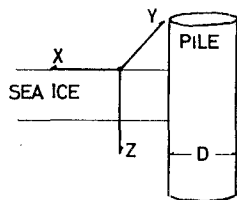


図-3

* 正会員 北海道大学工学部土木工学科

** 正会員 (株)東北電力土木部

*** 正会員 (株)竹中土木

に沿って発達し、1~2本の大きな縦亀裂がX方向に発生すると同時に杭前面の海水は圧縮され乳白色を呈する。これらのクラックの発生にもかかわらず氷圧力は増大し続け、そのうちZY面にXY面に平行に水平なクラックができる。この水平クラックはZ方向に引張応力が発生していることを示し、このとき、氷盤が杭径の半分(D/2)貫入している。このことは海水が杭の最大投影面積のところまで貫入したとき最大氷圧力を示す。この最大氷圧力を示した後は杭前面の氷は完全に圧壊するとともに、ある場合には氷盤の表面と裏面に大きな剝離が生じる。その後は氷圧力は減小し最大氷圧力の1/3~1/5程度になるが、これは有効氷厚の減小等によるものと思われる。実験の結果を図-4, 5, 6に示す。

図-4より $F \propto h$ の関係が得られる。'76年と'77年では塩分量、密度、Grain size に差があるが、結果には差がない。図-5は、 $F \propto \sqrt{D}$ の関係を示している。図-6で係数を決めると円形断面杭に作用する氷圧力公式は次の(1)式で示される。

$$F = 5.0 \cdot \sqrt{D} \cdot h \cdot \sigma_c \dots \dots \dots (1)$$

この実験値の分散の原因は、海水の圧縮強度の分散性に起因しているものと思われ、我々の実験結果では±33%程度のバラツキがあった。図-5には、SchwarzやNeillが大口径杭に作用する氷圧力の実測結果が示されているが、(1)式によく一致していることから円形断面杭に作用する氷圧力は(1)式で充分である。

(2) 矩形断面杭に作用する氷圧力

一般の海洋・海岸構造物には円形断面杭が用いられることが多いが、Rig等の場合には矩形断面杭が用いられることがある。この矩形断面杭に作用する氷盤破壊のあらましは円形杭のそれとほとんど同じであったが、杭前面の乳白色の領域は幾分か小さかった。また最大氷圧力は杭前面の氷が圧壊を始めても最大氷圧力を示すことは少なく、ほとんどの場合圧壊がかなり進んでから(B/5程度の貫入の時)最大氷圧を示す。図-7にFと氷厚hの関係を示す。図-4の円形杭の場合と同じく $F \propto h$ の関係があり、また図-8のFとBの関係からは $F \propto \sqrt{B}$

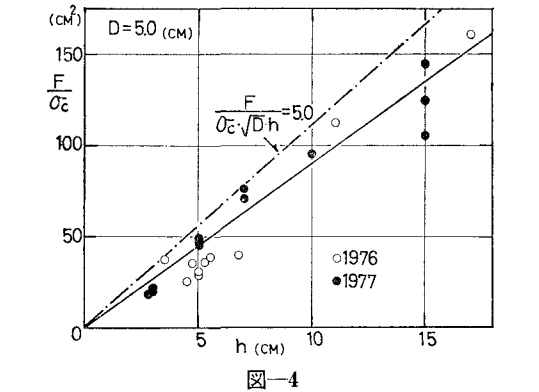


図-4

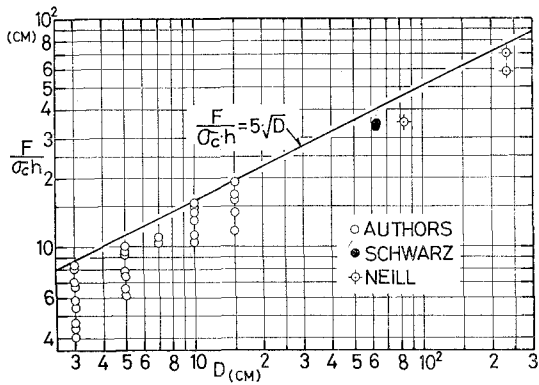


図-5

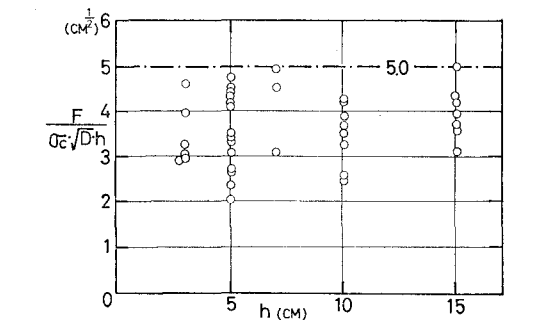


図-6

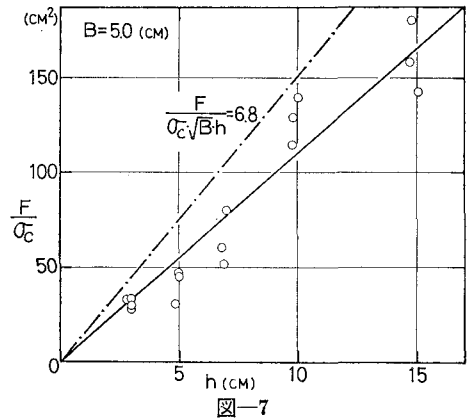


図-7

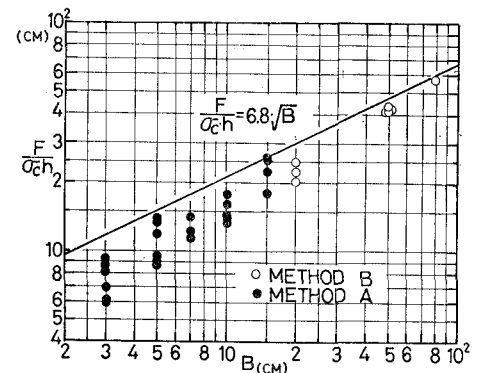
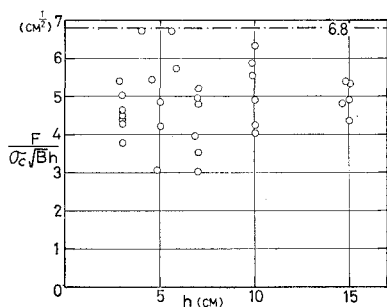


図-8



図—9

の関係が得られる。実験式の係数を求めるために $F/\sigma_c \cdot \sqrt{B} \cdot h$ と h の関係を示したものが図—9である。図—6の場合と同じく安全側の値をとると矩形断面杭に作用する氷圧力は次の(2)式で示される。

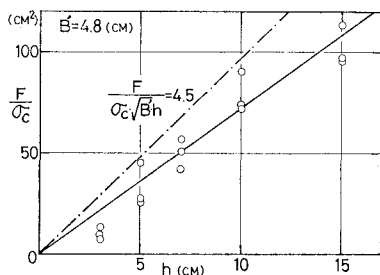
$$F = 6.8 \cdot \sqrt{B} \cdot h \cdot \sigma_c \quad (2)$$

(3) 楔形杭に作用する氷圧力

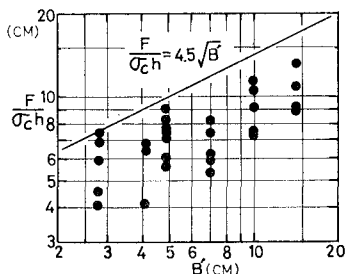
これは矩形杭を45°回転させて氷盤を貫入させたものである。氷圧力 F と氷圧 h の関係を調べたものが図—10である。楔形の場合も円形・矩形断面杭の場合と同じく $F \propto h$ の関係が得られた。次に F と B' の関係を調べたものが図—11で、これも他の杭の場合と同じく $F \propto \sqrt{B'}$ の関係が得られた。実験式の係数を求めたものが図—12である。これから楔形杭に作用する氷圧力式は次の(3)式で示される

$$F = 4.5 \cdot \sqrt{B'} \cdot h \cdot \sigma_c \quad (3)$$

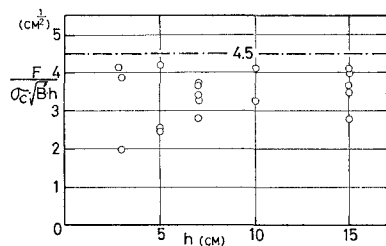
以上の3種類の杭に対する実験から、垂直に立った孤立した杭に作用する氷圧力は断面形に関係なく $F \propto \sqrt{D} \cdot h \cdot \sigma_c$ の関係がある。また係数は杭の断面形によって異



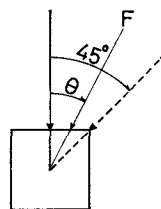
図—10



図—11



図—12



図—13

なる形状係数と云える。矩形断面杭については図—13に示すように氷圧力の作用方向が $\theta = 0$ の時形状係数が6.8であり、 $\theta = 45^\circ$ の時は4.5となる。また実験の結果 $0 < \theta < 45^\circ$ の範囲では係数が6.8~4.5の間にあることが明らかとなったが最大の氷圧力は $\theta = 0$ の時であった。この

ことから矩形杭に作用する氷圧力公式には(2)式を用いればよい。また $0^\circ < \theta < 45^\circ$ の範囲では杭にかなり大きな振りが働くことになる。また杭と氷盤の相対速度が0.5 mm/sec以上であれば氷圧力は相対速度の影響は受けない。

4. 大口径杭の現地実験

本実験では油圧ジャッキのストロークの関係で、矩形断面杭で実験を行なった。 $B = 20, 50, 80$ cmである。氷厚は最大50 cmまで試験可能である。油圧ジャッキの能力は50 tである。実験は一定時間間隔ごとに油圧メータの読み、ストローク長、氷盤上に設置したマークの変位量を測定した。杭の貫入の状況、破壊の仕方は氷圧力測定装置の場合とほとんど同じであったが、氷圧力測定装置の場合にみられた縦亀裂は見られなかった。この縦亀裂の発生は氷盤の大きさが有限であるためと思われる。実験結果を図—8の○印で示す。図から明らかなように氷圧力測定装置により得られた実験値と本実験で得られた測定値は1本の直線で示される。つまり氷圧測定装置は現実の氷圧力の作用機構をよく再現している事を示している。これは試験開始前に設置したマークが実験後もほとんど変位しなかったことから、氷圧力測定装置が側方変位を押える構造にしていることと符合している。以上のことから(1),(2)式は実際の氷圧力の見積りに充分役立つものと思われる。

5. 現在用いられている氷圧力公式との比較

現在用いられている氷圧力公式の主なものは次の(4),(5)式である。

$$F = \sigma_c \cdot D \cdot h \quad \sigma_c = 28 \text{ kg/cm}^2 \quad (4)$$

$$F = f \cdot \sigma_c \cdot D \cdot h \quad 0.3 \leq f \leq 0.7 \quad (5)$$

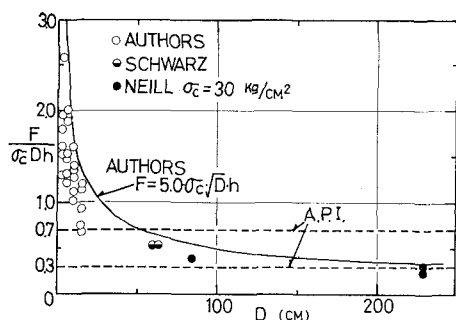


図-14

(4) 式はカナダの Bridge Code に示されているもので主に橋脚の設計に用いられている。(5) 式は A.P.I. が Fixed offshore structure の設計に対して定めたものである。この f は杭の断面形、海水の接近速度によって決まるとされているが詳細についても決められていない。また、非圧縮強度 σ_c の求め方についても決められていない。ともかく、この f はいくつかの実測値から決められたものと思われる。(1) 式と (4), (5) 式を比較すると f は円形断面杭に対して (6) 式を得る。

$$f = 5/\sqrt{D} \dots\dots\dots (6)$$

ここで $(F/\sigma_c \cdot D \cdot h)$ と D の関係を円断面杭について実験値、実測値をプロットしたものが 図-14 である。これから判断すると、Canadian Bridge Code の式は $D < 25$ cm の範囲では (4) 式の方が小さく、 $D > 25$ cm では (1) 式が小さい値を示すが実測値に較べて大き過ぎることから一般の構造物の設計に対しては過大な氷圧力を与える。A.P.I. 式においては $f=0.3$ が $D=280$ cm に相当し、 $f=0.7$ で $D=51$ cm に相当する。なお (1),

(2), (3) 式中の海水の圧縮強度 σ_c の試験方法は前報告に述べた方法によるものである。さらにわれわれは杭に海水が衝撃的に作用する場合の実験を行なったが結果は (1), (2) 式が衝撃実験に対しても充分適用できることが明らかとなった。

6. おわりに

本研究は文部省科学研究一般研究 (C) の「寒冷地海岸における構造物の効果的設計」の一部であることを付記するとともに、本研究を実施するにあたって御協力戴いた佐呂間湖養殖漁業協同組合の各位にお礼申し上げるとともに実験に協力して戴いた北大工学部の小野敏行氏に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Neill, C.R.: Ice Pressure on Bridge Pier in Alberta, Canada, I.A.H.R. Ice Symposium, Reykjavik, 1970.
- 2) Schwarz, J.: The Pressure of Floating Ice Field on Piles, I.A.H.R. Ice Symposium, Reykjavik, 1970.
- 3) 佐伯・斉藤・浜中・尾崎: 海岸構造物に作用する海水の力に関する研究 (1), 第 22 回海講論文集, 1975.
- 4) 佐伯・斉藤・渋谷・浜中・尾崎: 海岸構造物に作用する海水の力に関する研究 (2), 第 23 回海講論文集, pp. 22~26, 1976.
- 5) Saeki, H., S. Saito, K. Hamanaka and A. Ozaki: Experimental Study on the Compressive Strength of Sea Ice and the Ice Forces on an Isolated Circular Pile, Coastal Eng. in Japan, Vol. 19, pp. 73~87, 1976.
- 6) American Petroleum Institute: Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms, 7th Edition, 1976.