

海岸構造物に作用する氷圧力に関する研究 (4)

佐伯 浩*・阿部 茂**・野村俊夫***
小野敏行*・尾崎 晃*

1. 緒 論

本研究は海岸・海洋構造物のなかでも、特に海氷の影響を強く受ける杭構造物に作用する氷圧力について実験的に調べたものであり、直立単独杭構造物、直立複数杭構造物、斜杭それに円錐型構造物に作用する氷圧力を取り扱っている。実験の大部分は佐呂間湖の富武士で行われたものである。

2. 単独直立杭に作用する氷圧力

単独直立杭に作用する氷圧力に関しては、多くの氷圧力公式が提案されているが、実験的裏付けのある式は、Schwarz 等の式と筆者等の式である。筆者等の得た式 (1) は Schwarz の Baltic 海での実測値それに Neill のカナダの河川での実測値によく一致し、実際の使用に耐えうるものと思われる。

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

ここに、 F : 氷圧力(kg), h : 氷厚(cm), W : 杭の最大幅 (cm), 円断面の場合は直径, C : 杭の断面形状による係数で、円断面の場合 5.0, 矩形断面では 6.8, 交角 90° の楔形の場合 4.5 ($\text{cm}^{1/2}$), σ_0 : 海水の一軸圧縮強度, 高さ 20 cm, 直径 10 cm の円筒供試体で、歪速度 $0.001 \sim 0.003 \text{ sec}^{-1}$ で試験された強度。

(1) 杭と氷盤間の相対速度による氷圧力の違い

氷は visco-elastic substance 的な力学特性を有しているため、杭と氷盤との相対速度 v によって氷圧力は異なる。実際の氷盤の動きは、風・潮流・海流等によって動く場合は極めて小さな速度であるが、長周期波等による場合は、かなり速い速度で杭に衝突する。式 (1) は簡単な予備実験から $v=1 \text{ mm/sec}$ 前後で最大の氷圧力を示すことが明らかとなったので、 $v=1 \text{ mm/sec}$ で実験を行なったものである。今回、 v (貫入速度と同じ) と氷圧力 F との関係を詳細に調べた。実験結果の一例を 図-1 に示す。実験値に若干のバラツキはあるが $v=1 \text{ mm/sec}$ で

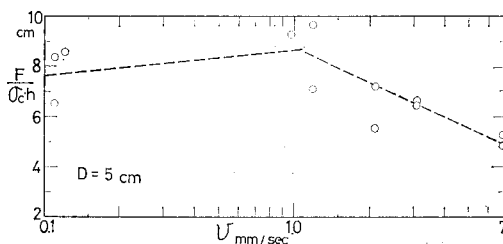


図-1

氷圧力 F は最大値を示す。実験に用いた氷盤の大きさは幅 60 cm, 奥行 50 cm である。最大の氷圧力 F は貫入量が約 $(D/2)$ であるから、変位量を $(D/2)$ とすると、 $v=1 \text{ mm/sec}$ とすると歪速度は $\dot{\epsilon}=0.002 \text{ sec}^{-1}$ となる。海水の一軸圧縮強度 σ_0 は $\dot{\epsilon}=0.001 \sim 0.003 \text{ sec}^{-1}$ で最大値を示すが、氷圧力の場合もこれと一致している。 $D=10 \text{ cm}$ の場合も $D=15 \text{ cm}$ の場合と同じく、 $v=1.0 \text{ mm/sec}$ で F が最大値を示す。

(2) 氷盤の破壊機構の違いによる氷圧力の変化

杭に作用する氷圧力は筆者等の実験結果によると v によって変化する事が明らかとなったが、 F は杭に接触している部分の氷盤の破壊機構の違いによって異なった値を示す。杭に接触している部分の海水の破壊様式は大きく3つに分類できる。図-2 に示すように (a) は、ほぼ完全な圧壊となる場合である。杭が氷盤に貫入するにつれて杭前面の氷には micro crack が生じ、乳白色を呈し、圧壊した細氷片は表面では盛り上がり、下面では落下する。このような破壊では杭径の半分まで貫入した時に最大の氷圧力を示す。氷圧力 F と時間の関係を調べたものの一例を 図-3 に示す。圧壊しながら貫入する 図-2 の (a) は、図-3 の (a) のように貫入とともに F が増大し、

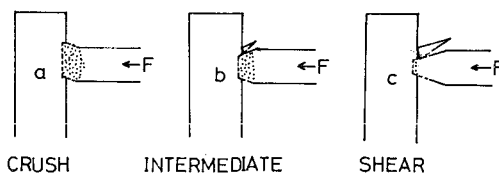


図-2

* 正会員 北海道大学工学部土木工学科

** 正会員 (株)日揮

*** 正会員 東京都港湾局

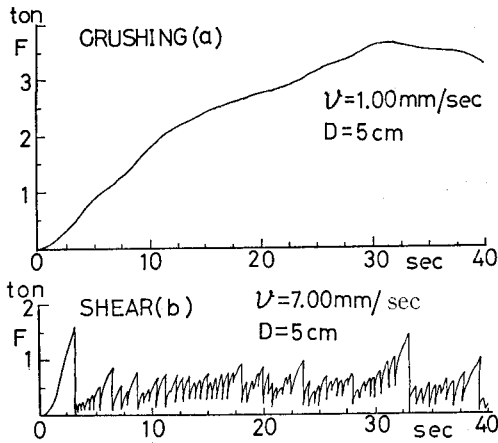


図-3

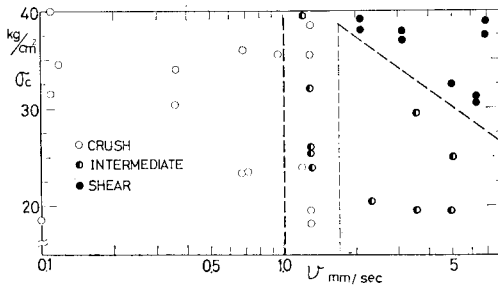


図-4

その変化は滑らかである。図-2の(c)は shear stress による破壊と思われる。この場合の破壊機構は氷盤中に斜めに亀裂が入り、杭の貫入とともにその亀裂は奥に進行し、最終的には氷盤の表面と下面に扇形の大きな氷片がはく離する。また、この場合の氷圧力は図-3の(b)のような非常に急激な pulse 状の力を示し若干周期性もみられる。図-2の(b) type の破壊は、(a)と(c)の中間的な破壊機構を示す。以上述べたように、氷盤の破壊様式は3つに分類できるが、これは氷の圧縮強度 σ_c あるいはヤング率と相対速度 v に関係する事が明らかとなった。その結果を図-4に示す。 $v \leq 1$ mm/sec では、 σ_c に関係なく、またヤング率に関係なく、破壊の mechanism は圧壊で図-2の(a)に相当している。 $v > 2$ mm/sec で σ_c が大きい場合には、図-2の(c) type の破壊をする事が明らかとなった。また $v > 1$ mm/sec で、 σ_c が比較的弱い場合には図-2の(b) type の破壊形式を示す。図-4と図-1より、 $v = 1$ mm/sec で F は最大値を示すが、この領域は完全な圧壊と中間領域との境界に相当している。サロマ湖氷上での実験では $v = 2 \sim 3$ mm/sec で最大氷圧力を示した。これは氷盤の大きさが半無限である事によるためである。

(3) 衝撃力による氷圧力

氷盤が杭に衝突する場合の衝撃力は、上記の実験から

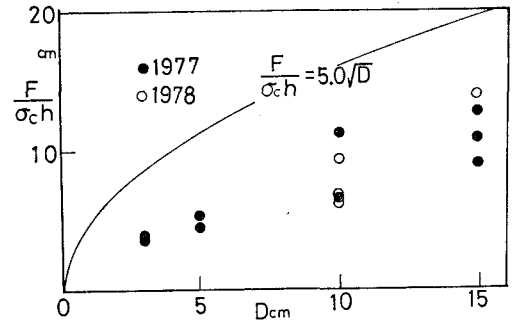


図-5

式(1)より小さな F を示すことが予想される。実験は鋼製すべり台上を氷盤を固定した鋼製箱を滑落させ、氷盤を鋼製杭に衝突させる事によって衝撃力を求めた。衝突速度は $v = 7.4$ m/sec で、鋼製箱の重量は 270~700 kg の範囲で変える事ができる。実験の結果を図-5に示す。図中の実線は、式(1)で示される値であるが、衝撃力は式(1)より小さい値を示す。この理由は、 $v = 1$ mm/sec で F が最大を示すことに起因している。以上の結果から式(1)は氷盤が衝突する場合にも充分に適用できる事が明らかとなった。

3. 直立複数杭に作用する氷圧力

実際の海水の作用を受ける杭構造物で単独で設置されるものとしては海中燈台などに限られ、普通は複数の杭によって造られる構造物が多い。本実験は、海水圧の作用方向に直角に一行に3本の杭が並んでいる場合の各杭に作用する氷圧力を求めた。3本の杭を同時に set するため、昨年まで用いていた氷圧力測定装置を改良して、幅 88 cm、奥行 50 cm の氷盤で実験可能で、斜杭、円錐杭の実験も出来るようになっている。図-6に新氷圧力測定装置の略図を示す。また図-7に示すように、各杭に作用する氷圧力を F_1, F_2, F_3 とし、杭間隔を KD とする。また3本の杭に作用する全氷圧力を F_t とする。まず3本の杭に作用する全氷圧力 F_t と式(1)で示される

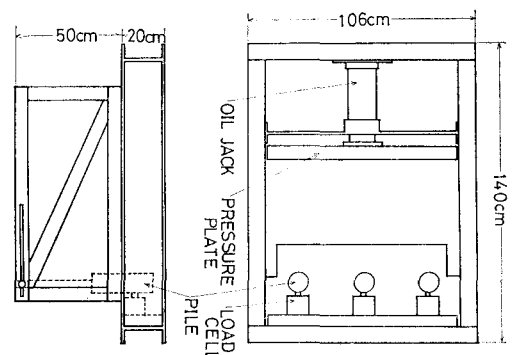


図-6

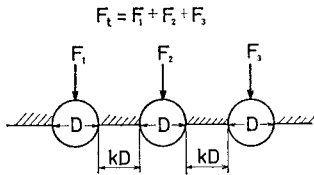


図-7

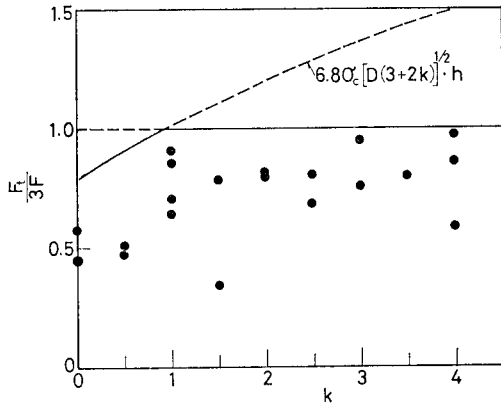


図-8

単独杭に作用する氷圧力の3本分 $3F$ との比 $(F_t/3F)$ と K との関係を示したものが図-8である。図からも明らかなように、 $K > 1$ の範囲では $(F_t/3F) \approx 1.0$ となり、各杭の氷圧力は式(1)で表わされる事になる。杭間隔が D 以上となると、隣接の杭の干渉を受けず、単独杭と考えてよい事を示している。 $K < 1$ の範囲では $(F_t/3F)$ は1より小さくなる。これは杭どうして干渉し合ってる事を示している。 $K=0$ の場合は、1本の杭と考えてよいから式(1)が用いられる。また $K < 1$ の場合にも拡張すると $(F_t/3F)$ の理論値は次の式(2)で示される。

$$F_t/3F = 0.453 \sqrt{3+2K}, \quad K < 0.94 \dots\dots (2)$$

F_t の計算は矩形断面杭と仮定して計算している。また、 $K \geq 0.94$ では $(F_t/3F) = 1.0$ となり、式(1)が適用可能である。次に杭の位置(中央杭と端杭)により、氷圧力の差を調べてみたが、有意な差は見られず、3本とも同程度の氷圧力を示した。1本1本の杭に作用する氷圧力も $K \geq 0.94$ では式(1)をこえる事はない。以上の結果から、1列に並んだ複数杭に作用する氷圧には式(1)が適用可能である。

4. 斜杭と円錐構造物に作用する氷圧力

図-6 に示されている氷圧力測定装置を用いて、斜杭と円錐構造物に作用する氷圧力の実験を行なった。実験の結果、 $\theta \leq 62^\circ$ の範囲では斜杭と円錐構造物では、受ける氷圧力は全く同じである事が明らかとなった。氷盤の破壊機構は図-9に示すように氷盤が押しつけられる

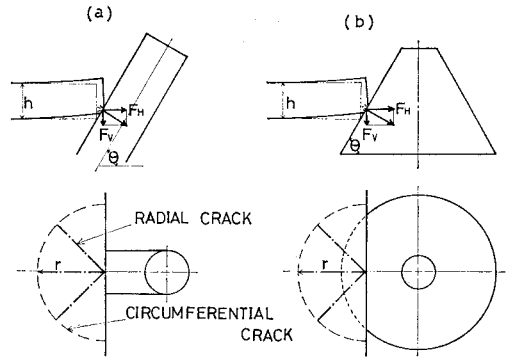


図-9

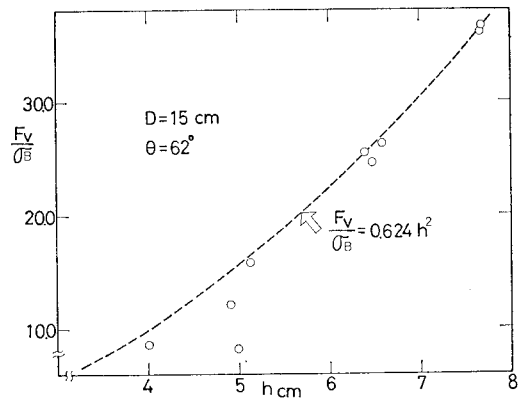


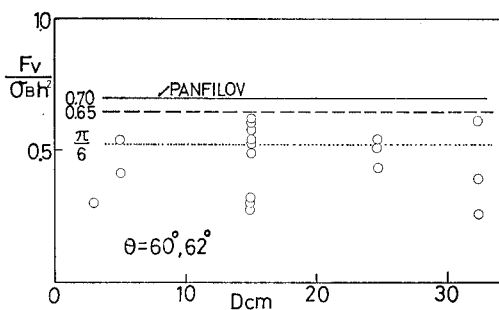
図-10

と、まず氷盤の下面が杭に接するが、接すると同時に少しずつ接触点は上昇する。ある程度上昇した時、氷盤と杭の接触点より radial crack がはいり(図中の一点鎖線)、さらに押されて、接触点は上昇し、ついには、曲げによって半円状に破壊が起こる(circumferential crack, 破線)。この氷盤の破壊は、片持梁の曲げ破壊に近い。また、この時、氷盤下面の杭との接触面積は小さく、ごく一部分で圧壊が起こっているにすぎない。このように傾斜した構造物あるいは傾斜面を有する構造物に海水が押しつけられる時には、最終的に曲げで破壊するために、杭径の影響はほとんどない事が明らかとなった。このように傾斜した構造物に氷圧力が作用する場合、杭面と氷盤との間には摩擦力が作用するが、一般には小さいとして無視されているので、ここでも摩擦力は考慮していない。よって水平分力 F_H と鉛直分力 F_V との間には次の関係がある。

$$F_H = F_V \cdot \tan \theta \dots\dots (3)$$

(1) 斜杭、円錐構造物に作用する氷圧力 ($\theta \leq 62^\circ$)

傾斜角が $\theta \leq 62^\circ$ の場合、曲げで破壊する事から F_V は氷厚 h の2乗に比例することが予測できる。 $\theta = 62^\circ$ 、 $D = 15$ cm の場合の実験結果を図-10に示す。これによると F_V/σ_B は氷厚の2乗に比例している。係数は、この場



図—11

合 0.624 となる。また D の効果を示したものが、図—11 である。これは $\theta = 60^\circ, 62^\circ$ の場合の結果であるが D の効果は、ほとんどない。 D に関係なく $F_V / \sigma_B \cdot h^2$ はほぼ一定値をとる。実験から上限値をとると、 $\theta = 60^\circ, 62^\circ$ の場合、 F_V は次式で示される。

$$F_V = 0.65 \cdot h^2 \cdot \sigma_B \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 σ_B : 曲げ強度 (kg/cm²)、高さ・幅ともに 10 cm, span 長 40 cm の桁で、荷重速度 $\dot{\sigma}_B = 0.2 \sim 2.0$ kg/cm²·sec で得られた値。

図—9 に示されているように完全に曲げで破壊するものとする次式を得る。

$$F_V = \pi \cdot h^2 \cdot \sigma_B / 6 \quad \dots\dots\dots (5)$$

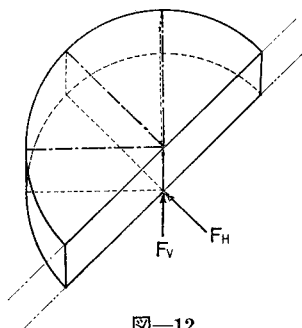
一般に半無限板の edged load の場合の bearing capacity は次の式 (6) で示される。

$$F_V = A \cdot h^2 \cdot \sigma_B \quad \dots\dots\dots (6)$$

Kashtelyan は半無限板 6 分割の bearing capacity を求めているが、それによると $A \approx 0.70$ となる。また Panfilov は半無限板の edge load による bearing capacity の実験を行っているが、図にも示されているように $A = 0.7$ となる。これらの値は筆者らの得た式 (4) に非常に近い値を示している。この事は $\theta \leq 62^\circ$ では、半無限板の edge に鉛直荷重が作用する場合の bearing capacity に一致する事が明らかとなった。

(2) 斜杭, 円錐構造物に作用する氷圧力 ($62^\circ < \theta \leq 90^\circ$)

θ の値が大きくなってくると、当然 F_H も大きくなっ



図—12

てくるため、 $\theta \leq 62^\circ$ では軸応力を無視したが、ここでは、図—12 に示すように、曲げと圧縮荷重が作用した場合を考えると次式を得る。

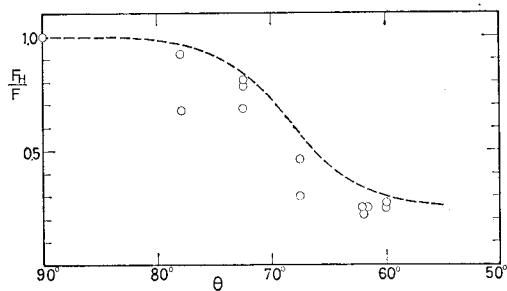
$$F_H = \sigma_B \cdot h^2 \cdot \pi \left\{ \frac{\tan \theta}{6 - 4 \cdot \tan \theta (h/r)} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

我々の調査と実験結果から、式 (7) 中の (h/r) は $1/8 \sim 1/10$ の値を示すことが明らかとなった。 F_V は次の式で表わされる。

$$F_V = \sigma_B \cdot h^2 \cdot \frac{\pi}{6} \left(\frac{1}{1 - (2/3)(r/h) \cdot \tan \theta} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$(h/r) = 1/8$, $\theta = 60^\circ$ の場合次の式 (9) を得る。

$$F_V = 0.612 \sigma_B \cdot h^2 \cdot \sigma_B \quad \dots\dots\dots (9)$$



図—13

軸応力を考慮すると、理論値は 図—11 の実験値に良い一致を示す。 $\theta = 90^\circ$ のときの F_H を F とし、 (F_H/F) と θ の関係を示したものが、図—13 である。これによると、 $\theta > 78^\circ$ の範囲では、直立杭とみなしても良い。また $\theta \leq 62^\circ$ の範囲では杭径に無関係の領域とみなされる。この斜杭, 円錐杭では $v = 1.25$ mm/sec で実験を行った。

5. おわりに

本研究は文部省科学研究費、一般研究 (c) の「寒冷地における海岸・海洋構造物の効果的設計法に関する研究」によるものである事を付記する。また調査、実験に協力して載いた佐呂間漁業協同組合の方々および北工学部の斉藤浩司、西谷一典の両氏に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Neill, C. R.: Ice pressure on bridge piers 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) 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.
- 4) Saeki, H., K. Hamanaka and A. Ozaki: Experimental study on ice force on a pile, P.O.A.C. 77, 1977.