

II-19 直立杭に作用する氷圧力に関する研究

北大工学部 正員 佐伯 浩
 学生員 ○西谷一典
 小野敏行
 正員 尾崎 晃

1. 緒 論

海岸構造物に作用する氷圧力に関する研究は、最近国際的に非常に活発になってきている。特にU.S.A.、カナダ、ソ連、西ドイツそれに北欧の各国での研究成果はおびただしい量である。これは、アラスカでの石油開発、あるいは北海での石油開発によって、寒冷地海岸・海洋に埋蔵されているエネルギー資源の探査、あるいは掘削の必要にせまられていることと、その他の資源の開発が寒冷地にも及んできたためである。我が国においても、オホーツク海沿岸に石油、天然ガスの埋蔵が見込まれている事、オホーツク海沿岸の養殖漁業の海水からの保護、あるいは、毎年、海水によって被害を受けている昆布・ウニ等の海水からの防御の事もあり、海岸・海洋構造物と海水との関係を明らかにする事が急がれている。著者の以前の研究にもあるように、防波堤や離岸堤等のように、海水と完全に遮断するような構造物にとっては、海水圧よりも波圧の影響を強く受けるが、杭構造物では、海水圧の影響を強く受けるため、杭に作用する氷圧力を解明する必要がある。杭構造物に作用する氷圧力に関する公式はU.S.A.のAASHTOで用いられている式、カナダのBridge code で用いられている式、APIでRigの設計に用いられている式等があるが、これらは全て氷圧力を F (kg)、氷厚を h (cm)、杭径を D (cm)、係数を f とし、氷の圧縮強度を σ_c (kg/cm²)とする時 $F = f \cdot D \cdot h \cdot \sigma_c$ の形で表わされる。これらの式は全て直感的に得られたもので実験的裏づけがなかった。これに対して、Korzhavinは若干の実験結果から氷圧力式を得ており、Schwarzは数個の実験のPierでの観測結果から氷圧力式を求めたが、以上述べた全ての式は後の実験結果や、Neill等によって行なわれた実測値とは一致しない事が明らかになった。その後、Hirayama & Schwarzは小規模ながら詳細な実験に

よって、杭に作用する氷圧力に関する実験式を得た。この式は、SchwarzがBaltic海で得た実測値とよく一致する事を示した。本研究は海水盤の杭への貫入速度と氷圧力、それに氷盤破壊のmechanismの関係を明らかにするとともに、直立単独杭と一列に並んだ直立杭に作用する氷圧力について述べる。

2. 実験方法について

実験は全て、佐呂間湖にある富武漁港で行ない、実験に用いた海水は全て、佐呂間湖の海水と岩手海岸の流水及び地氷である。氷圧力の測定装置は、前回の場合より、幅と約20cm 広くしたもので、実験には幅88cm、長さ55cmの氷板を用いた。氷盤の強度は測定できないので、それと同一の場所で作採し、それから高さ20cm、径10cmの円筒状試体を作製し、それをstress rate $\dot{\sigma}_c \approx 2 \sim 4$ kg/cm²・sec、strain rate $\dot{\epsilon} \approx 0.003$ sec⁻¹で一軸圧縮試験して強度を求めた。氷圧力は5ton load cellを用い、それをDPMを通してvisigraphに記録した。この測定系は3000 Hzまで応答できる。また、実験に用いる氷盤の氷温はサーミスタの針状のprobeを氷にさし込んで測定し、同時に破壊した氷盤をとって、塩分量 S を電気伝導度計で測定し、氷温、塩分量、密度から、適宜に求めた圧縮強度の実験式から圧縮強度を求め、円筒状試体より得られたものと併用している。

3. 直立単独杭に作用する氷圧力

(1) 貫入速度 v (mm/sec)と氷圧力 F (kg)の関係
 海水はvisco-elastic substance的な力学特性を有している事はよく知られているが、そのため、圧縮強度等においてもstress rate、strain rateが強度に影響を及ぼす。当然、この貫入速度も氷圧力に影響を及ぼす事は明らかである。我々は以前、氷圧力実験にあたって、 F と v の関係について簡単な実験

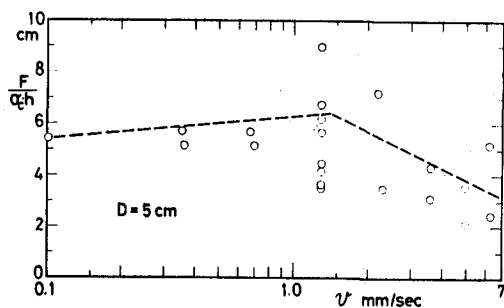


図-1 (a)

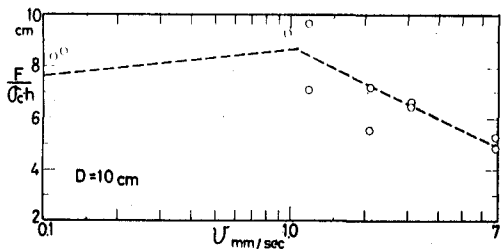


図-2 (b)

を行なったが、その時は $60\text{ cm} \times 55\text{ cm}$ の氷盤を用いていたが、 $U \approx 1\text{ mm/sec}$ 程度で最大の氷圧力を示した。今回は $D = 5\text{ cm}$ 、 10 cm の杭に対して F と U の関係を求めるために詳細な実験を行なった。その結果を図-1に示す。これによると、 $U = 1\text{ mm/sec}$ で最大の氷圧力を示すことが判る。特に $U > 1\text{ mm/sec}$ の領域では U の増加に伴い、氷圧力 ($F/\sigma_c \cdot h$) が急に減少する。

(2) 氷盤の破壊機構と氷圧力

(1) で氷圧力 F は貫入速度の影響を受ける事が明らかとなったが、この貫入速度の違いによって、杭に接した部分の氷盤の破壊機構も異なる事が明らかとなった。杭に接している部分の海氷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)は完全に圧壊に近い破壊様式を示す。これは貫入速度が小さい場合におこるもので、杭が氷盤に貫入し始めるにつれて、杭前面の氷盤には 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、(写真-1参照)

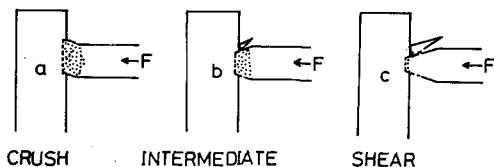


図-2

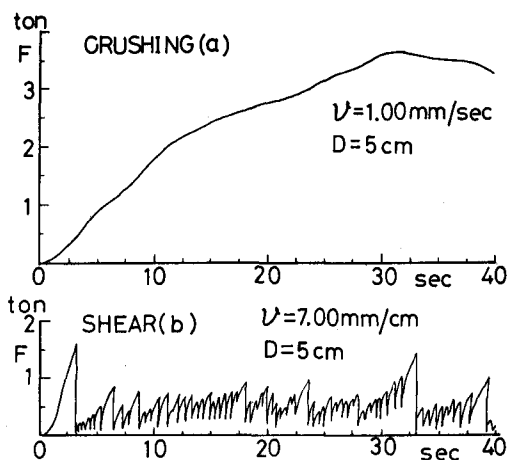


図-3

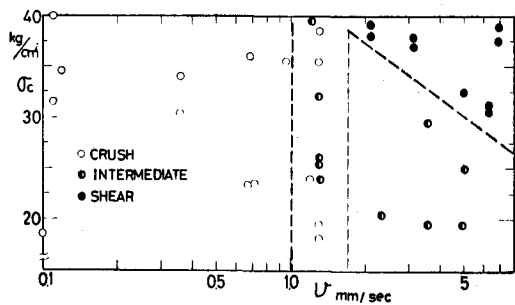


図-4

下面ではポロポロ落下する。この破壊した細氷片の大きさは、氷盤の grain size 程度である。氷圧力も徐々に増大し、杭径の半分 ($D/2$) 程度まで貫入した時に最大の氷圧力を示す。その時の氷圧力 F と貫入し始めた時からの経過時間との関係を図-3の(a)に示す。変化は極めて滑らかである。これに対して、貫入速度が非常に速く、 σ_c が大きい場合には、図-2の(c)のような破壊様式を示す。この場合の破壊状況はいわゆる Danish formula を導くにあたっての破壊モデルと同じように、斜めに大きな塊になってはげれる。この状態を写真-2に示す。しかし、このはがれ方は図-3の(b)の F の時間変化からも明らかのように、大きな亀裂が pulse 状に進行していく。一たここでは破壊の様式を shear と名づけているが、これは破壊した大きな氷片が shear によって破壊したような形をしているからであって、実際には引き裂き (Tear off) に近い破壊の仕方である。また、図-3(b)の pulse 状の力は grain が切れる時に相当しているよう

図
1
5

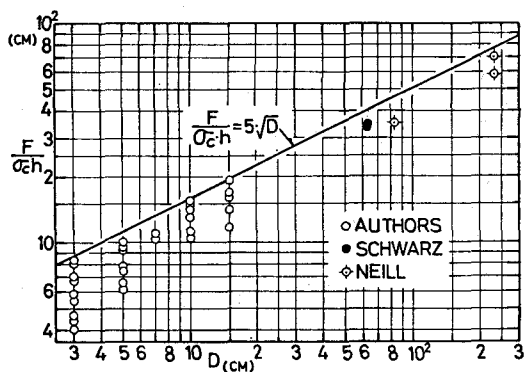
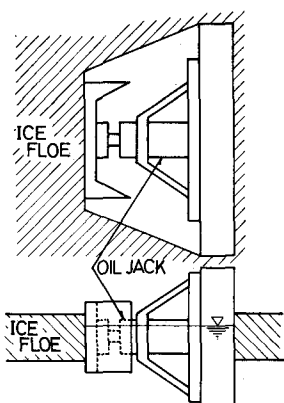
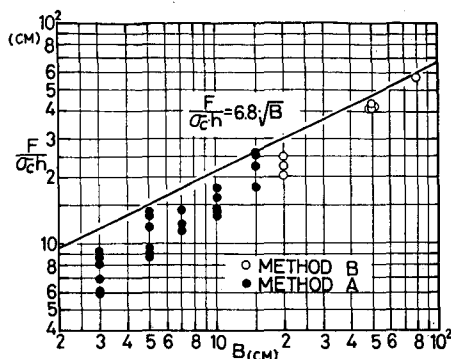


図-6 (a)

図
1
6
(b)



で、grain size が 3 mm ~ 6 mm であった事と一致している。ひが大ききても、 σ_c が小さい場合には、(a) と (c) の中間的な破壊状況を示し、(b) のように氷盤の上、下面辺縁にのみ shear 破壊が起る。これらの破壊様式は、氷の一軸圧縮強度 σ_c と貫入速度 $\dot{v}$ によって分類される。その結果を図-4 に示す。 $\dot{v} < 1 \text{ mm/sec}$ の範囲では、強度 σ_c に関係なく、全て、crushing failure を示す。また、 $\dot{v} > 1.5 \text{ mm/sec}$ の範囲で、 σ_c の小さい領域では図-2 の (b) に示す、intermediate な破壊様式を示す。このように σ_c と $\dot{v}$ によって破壊様式は3つに分けられるが、図の $\dot{v} \approx 1 \text{ mm/sec}$ の所で最大の氷圧力を示す。これは前にも述べたように、88 cm $\times$ 55 cm の氷盤を用いた実験結果であるが、佐呂間湖の無限の氷盤において、図-5 の装置により実験を行なった結果、 $\dot{v} = 2 \sim 3 \text{ mm/sec}$ 程度で最大の氷圧力を示した。この時の矩形杭の杭幅 B は $B = 50 \text{ cm}$ で、氷厚は約 20 cm であった。

(3) 単独の直立杭に作用する氷圧力に関する考察

筆者等は、氷圧力測定装置を用いて、円断面杭、矩形断面杭、楔形断面杭(交角 90°) に作用する氷圧力公式を求めた。この結果の一部を図-6 に示す。この時の氷盤の貫入速度は $\dot{v} = 1.0 \text{ mm/sec}$ であり、 B は矩形杭の杭幅 (cm)、 D は円形杭の直径である。我々の詳細な実験から次式を得た。

$$F = C \sqrt{W} \cdot h \cdot \sigma_c \quad \text{----- (1)}$$

F : 氷圧力 (kg), C : 杭の形状による係数で、円断面杭の場合には 5.0、矩形断面杭の場合には 6.8、楔形断面杭(交角 90°) の場合には 4.5 ($\text{cm}^{1/2}$)、 h : 氷厚 (cm)、 σ_c : 氷の一軸圧縮強度で、直径

10 cm、高さ 20 cm の円筒状試体で、stress-rate $\dot{\sigma}_c = 2 \sim 4 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 、strain rate $\dot{\epsilon} \approx 0.003 \text{ sec}^{-1}$ で試験した強度 (kg/cm^2)、 W : 杭の最大幅で、円断面杭では直径を示す (cm) この式の係数 C は次元を有しているが、式は $F = f(W) \cdot (h \times \sigma_c)$ の形で表わされ、種々の計算には都合が良。この式はまた、Schwarz & Hirayama の式にもよく一致しているし、Schwarz や Neill が求めた実測値ともよく一致していて、現在のところ、他のどの式よりも、実測値に一致している。さて、最近、Croasdale et al. (1976)、Ralston (1977)(1978)、Reinicke et al. (1978) の3つの注目する研究が発表された。これらは、いずれも、矩形断面杭が氷盤に作用する時の杭に作用する氷圧力を塑性解析したものである。理論計算の結果はそれぞれ少しずつ異なっているが、その結果を図-7 に示す。若干の計算の違いによって、結果も異なっている。Lower Bound は Croasdale 等の結果の方が Reinicke の値より小さい。また、Reinicke の Upper Bound は $D/h > 2$ の範囲では Croasdale

の Rough Surface の場合と非常に近い値を示している。また、Aspect Ratio (B/h) が大きくなると ($F/\sigma_c B h$) の値は一定値に漸近する様子かわかりこの漸近値は Lower Bound に一致している。図-8に我々の実験結果を示す。(a) は矩形杭の場合で、図中に Croasdale と Reinicke の理論曲線を示している。我々の実験値にはかなりのバラツキがあるが、我々の Data の上限は Reinicke の Upper Bound に近い値を示している。また、我々の Data の平均曲線は Croasdale の smooth な場合の Upper Bound に近い値を示している。矩形杭に対する我々の実験式は次式の如く示される。

$$\frac{F}{\sigma_c B h} = 1.03 + 0.77 \left(\frac{B}{h}\right)^{-1} \quad \text{----- (2)}$$

我々の得た(1)式を(2)式にならって整理すると次の(3)式が得られる。

$$\frac{F}{\sigma_c B h} = 6.8 \left(\frac{B}{h}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot h^{-\frac{1}{2}} \quad \text{----- (3)}$$

(1)式を図-8のように示すと(3)式より、 h がパラメーターとなって出てくる。また円断面杭に対しては(b)図より、次式を得る。

$$\frac{F}{\sigma_c D h} = 0.69 + 0.56 \left(\frac{D}{h}\right)^{-1} \quad \text{----- (4)}$$

以上の結果から、Croasdale等の行った塑性解析による理論値は我々の実験値にかなり良い一致をして

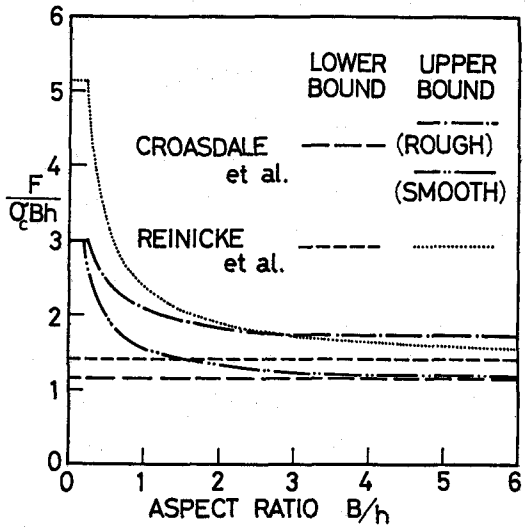
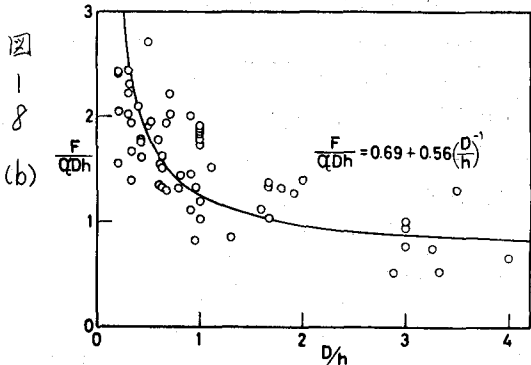
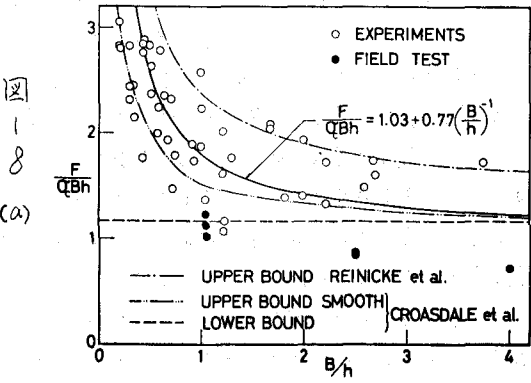


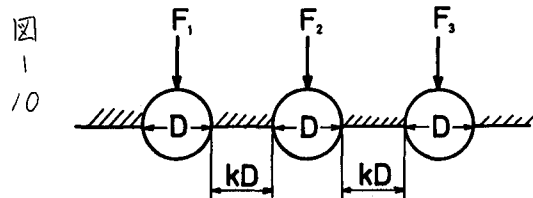
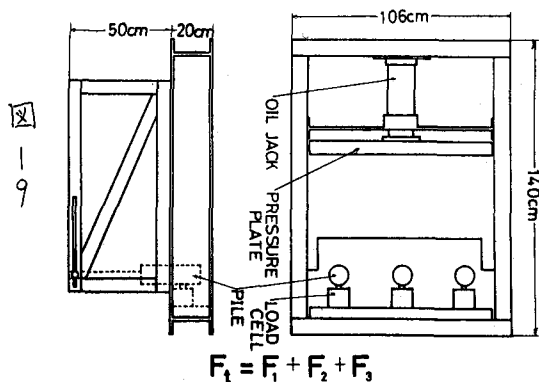
図-7

いることから、杭構造物に作用する氷圧力の計算には塑性解析の手法がかなり有効であることを示している。尚、筆者等の Data の分散は大きいが、この理由は、実験に用いる氷盤の強度が正確に見積もれない事による。同一の場所で採氷した大きなブロックから20数本の円筒供試体を作製し、同一の氷温で一軸圧縮強度を測定しても、実験値は平均値のまわりに±30%近くバラツク。それなのに、実験に用いる氷盤の杭に接する部分の強度は測定できないからである。なお、圧縮強度の Data がバラツク最大の原因は、Brine、air bubble の分布が不均一な事によるものと思われる。

4. 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場合もあるが、一般には複数杭によって造られる構造の方が多い。特に、杭構造物によって海水を制御しようとするとき、どうしても複数の杭で海水を制御する事になる。本実験は、海水圧の作用方向に対して直角に一列に杭が並んでいる場合の氷圧力を取り扱う。実験には図-9に示す装置を用いて、杭を同時に3本





setして実験を行なった。これは特に杭相互の干渉をとり扱っているものである。氷盤は $88\text{ cm} \times 55\text{ cm}$ の大きさのものを用いた。杭の貫入速度は、単独杭の場合に最大の氷圧力を示す $v = 1.0\text{ mm/sec}$ として実験を行なった。各々の杭に作用する氷圧力を図-10に示すように F_1, F_2 , それに F_3 とし、杭と杭の間隔を kD とし、 $F_1 + F_2 + F_3 = F_t$ とする。図-11に個々の杭に作用する氷圧力 F_i と (1) 式で示される F の比 (F_i/F) と k との関係を示す。これによると F_i は F を越える事はない。これは、複数杭の場合にも (1) 式が充分適用できる事を示している。しかし、 k が小さくなってくると3本の杭が一体となった矩形杭のような作用をする。(写真-3 参照)

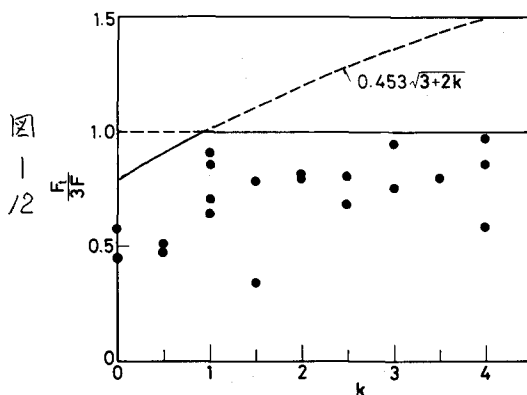
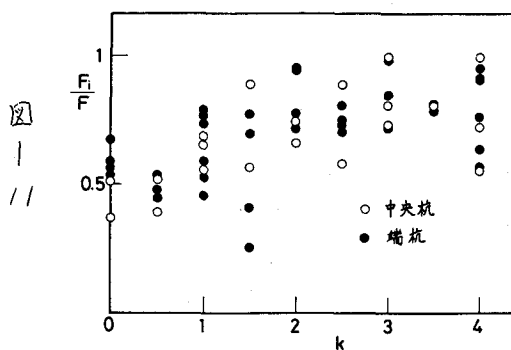
次に $F_t/3F$ と k の関係を調べたものが図-12 である。 k の小さい時には3本の杭が一体となって働くので、これを矩形杭に近似すると、 F_t は (1) 式より次式の如く示される。

$$F_t = 6.8\sqrt{3D+2kD} \cdot h \cdot \sigma_c \quad \dots\dots (5)$$

 $\sqrt{3D+2kD}$ は3本の杭が一体となって1本の矩形杭を構成していることを意味する。次に F_t と $3F$ の比を計算する。

$$\frac{F_t}{3F} = \frac{6.8\sqrt{3D+2kD} \cdot h \cdot \sigma_c}{3 \times 5.0\sqrt{D} \cdot h \cdot \sigma_c} = 0.453\sqrt{3+2k} \quad \dots\dots (6)$$

また、 $F_t/3F = 1$ となるのは $k = 0.94$ の時である



から結論として次の事がいえる。

$k \geq 0.94$ の範囲では、各杭が単独の直立杭となり (1) 式が適用される。また、この事実は杭間隔が $0.94D$ 以上であれば、互いの杭の間には相互干渉の作用は極めて小さい事を示している。(写真-4 参照) また $k \leq 0.94$ の範囲では、日本の全氷圧力は (5) 式で示されるから、1本の杭に作用する氷圧力は次式で示される。

$$F = 2.27\sqrt{3D+2kD} \cdot h \cdot \sigma_c \quad \dots\dots (7)$$

$k \leq 0.94$

また3本の杭の各々に作用する氷圧力について調べたが端杭、中央杭の間の氷圧力には有意な差は認められなかった。

あとがき

本研究の実験に当って、手伝っていただいた(株)日揮の阿部茂氏及び東京都庁の野村俊夫氏に感謝するとともに、実験場を提供下さった佐呂間徳協の方に深甚なる謝意を表したい。

参考文献

(1) Neill, C.R.; Ice Pressure on Bridge -

Pier in Alberta, Canada, IAHR, Ice Symposium, Reykjavik, 1970.

- (2) Schwarz, J.; The Pressure of Floating Ice Field on piles, I.A.H.R., Ice Symposium, Reykjavik, 1970.
- (3) Schwarz, J. and K. Hirayama; Experimental Study of Ice Forces on Piles, I.A.H.R. Symposium on Ice Problems, 1973.
- (4) 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 Engineering in Japan, vol. 19, 1976.
- (5) Saeki, H., K. Hamanaka and A. Ozaki; Experimental Study on Ice Force on a Pile, P.O.A.C. 77, St. Johnes 1977.
- (6) Croasdale, K.R., Morgenstern, N.R., and Nuttall, J.B.; Indentation Tests to Investigate Ice Pressure on Vertical Piers, Symposium on Applied Glaciology, International Glaciological Society, Cambridge, England 1976.
- (7) Ralston T.D.; An Analysis of Ice Sheet Indentation, I.A.H.R. Symposium on Ice Problems, Sweden, 1978.
- (8) Reinicke, K.M. and R. Remer; A Procedure for The Determination of Ice Forces - Illustrated for Polycrystalline Ice -, I.A.H.R. Symposium on Ice Problems, Sweden, 1978.

写真右上より

写真-1 v速. CRUSHING FAILURE

写真-2 v速. SHEAR

写真-3 $K \approx 0.5$ 3本の杭は一体となって働く。

写真-4 $K \approx 2$ 杭相互の干渉は小さい。

