

海岸構造物に作用する海水の力に関する研究 (2)

佐伯 浩*・斎藤 修一**・渋谷 政文***・浜中建一郎*・尾崎 晃*

1. 緒 論

わが国において、海水の影響を受ける海岸は、北海道のオホーツク海に面した海岸と北海道東部の太平洋岸の一部に限られている。しかしこの海域がわが国漁業の宝庫であるのみならず、海底資源の存在も予測されている事と、寒冷地海岸及び海洋の開発が期待されていることを考えると、海水に対する対策あるいは設計方法を確立しておく必要がある。

本研究は、海岸・海洋構造物のなかで特に重要な構造形式である杭構造物に作用する氷圧力を求めることと、氷圧力に特に重要な因子となる海水の圧縮強度の試験方法の確立と圧縮強度を求める事を目的としている。

2. 過去に得られた氷圧力公式の検討

真氷あるいは海水が杭構造物に及ぼす力を求める氷圧力公式の主なるものを挙げると次の6つの式である。

F : 杭に作用する氷圧力 (kg), σ_n : 氷の圧縮強度 (kg/cm²), h : 氷の厚さ (cm), D : 杭の代表径 (cm)

$$[I] \quad F = \sigma_n \cdot D \cdot h, \quad \sigma_n = 28 \text{ kg/cm}^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

これは Canada Bridge Code に示されているもので、橋脚等に作用する氷圧公式である。

$$[II] \quad F = \sigma_n \cdot D \cdot h \quad \dots\dots\dots (2)$$

これはアメリカ合衆国で用いられている式で、 σ_n は条件に適合した氷の圧縮強度を用いる。

$$[III] \quad F = N_c \cdot \sigma_n \cdot D \cdot h \quad \left. \begin{array}{l} N_c = 2.0 + 0.7(h/D) \\ \text{ただし } 0 \leq (h/D) \leq 2 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

これは Denmark の Danish によって求められた式で、 N_c は接触係数と呼ばれている。

$$[IV] \quad F = [0.33\sigma_n + 12.5\{(h/D) - 0.15\}] \cdot D \cdot h \quad \dots\dots\dots (4)$$

この式は西ドイツの J. Schwarz によって求められたもので、 σ_n は実際の氷温 (T) と歪率速度 $\dot{\epsilon} = 0.003$

sec⁻¹ の時の圧縮強度を用いる。

$$[V] \quad F = 3.57\sigma_n \cdot \sqrt{D} \cdot h^{11/10} \quad \dots\dots\dots (5)$$

この式は Hirayama 等により実験により得られた実験公式である。

$$[VI] \quad F = N \cdot \left(\frac{\dot{u}}{D} \right)^\alpha \cdot D \cdot h \quad \dots\dots\dots (6)$$

N : 温度効果による係数, $\dot{u}$: 氷と杭の相対移動速度 (cm/sec), α : 係数 ($\div 0.25$)

この式は Canada の Gold により提案されたものである。

式 (1) は Canada において河川の橋脚に作用する氷圧算定に用いられている式であるが、Neill が指摘しているように、実際の氷圧力より大きい値を与えている。式 (2) はアメリカ合衆国で用いられているもので河川氷、海水のいずれにも用いられている。これは σ_n を適当に選べる事が式 (1) と異なっているが形は全く同じである。式 (3) の形は式 (1), (2) と同じであるが、式 (1), (2) より数倍大きく、 D の小さい場合には適用可能といわれている。式 (4) は Schwarz が得た式で、この式の特徴は、海水の圧縮強度を決定することに重点が置かれていて、数例の実測値から式 (4) を導いたものである。式 (5) は $D \leq 4.8 \text{ cm}$, $h \leq 3.0 \text{ cm}$ の小規模の実験から得られたものであり、 D と h が小さい場合には正確な値を与えるものと思われる。式 (6) は他の5つの式と非常に異なっている。この式の欠点は海水の強度 σ_n の効果が入っていないことと、 $(\dot{u}/D)$ が大きくなれば限りなく F が大きくなる事である。上記の6つの式のうち、(1) と (2) の式は真氷あるいは海水の強度が、Steel や Concrete 等他の土木材料に比べて強度が非常に小さいために、直感的に得られたものと思われる。式 (3) は Slender な杭のみに用いられるものであり、式 (4) は数例の実測値から求められたものである。式 (5) は詳細な実験から得られたもので、一番信頼性があるが、この式が大口徑の杭に適用できるかどうか疑問が残る。しかし式 (1)~(5) から F は次式で示される事は明らかである。

$$F = f(\sigma_n, D, h) \quad \dots\dots\dots (7)$$

* 正会員 北海道大学工学部土木工学科

** 正会員 北海道大学大学院工学研究科

*** 正会員 (株)東京瓦斯

3. 海水の圧縮強度 σ_n と試験方法について

海水が杭構造物に及ぼす力 F を見積るためには式 (7) から明らかなように海水の圧縮強度 σ_n を見積ることが必要である。試験に用いた海水はサロマ湖の湖水と常呂海岸で採取した流水である。サロマ湖内の海水は塩分量 (S) が約 33‰ で、オホーツク海の海水の塩分量にはほぼ等しい。今回の試験は昭和 51 年 2 月 9 日～17 日と 3 月 5 日～8 日までの 2 回に分けて行われた。試験地は前報告と同じ佐呂間町富富士である。海水を採取して圧縮試験完了まで 30 分以内であるようにした。また海水の圧縮強度は特にことわらない限り海水の成長方向 (結晶軸方向) に対して直角方向の圧縮強度である。前回は供試体に 10 cm 角の立方体で行ったが、今回は海水用のコア・サンプラーを作製したために、円筒供試体により試験を行った。このため供試体作製時間を大幅に短縮できた。

(1) 供試体の Size Effect について

海水も含めて氷の強度の試験方法ならびに供試体の試験方法は決まっていなのが現状で、各研究者の試験に用いている供試体寸法はまちまちでデータの比較にも困難が伴う。そこでわれわれは、この Size Effect に関する若干の実験を行った。供試体は円筒形で径 (ϕ) は 45, 100, 150 mm である。図-1 は $\phi=100$ mm の供試体で、高さ l を変えて実験を行ったものである。一般の土木材料と同じく、 l が小さいほど、圧縮強度 σ_n が大きくなる事を示している。また (l/ϕ) と σ_n の関係を示したものが図-2 である。データに若干のばらつきがあるが、これは自然の海水を用いているためである。この図から (l/ϕ) が大きくなるにつれて σ_n は小さくなる。これは Concrete 等の場合と同じである。以上の結果から

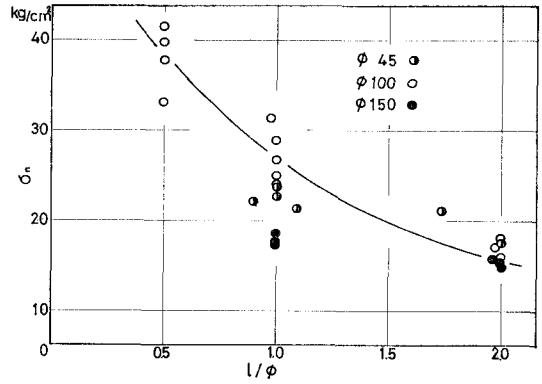


図-2

判断すると、海水の Size Effect は Concrete の場合と非常に似かよっている。海水は Brain, 気泡, 気孔それに純水より構成されているが、その分布は必ずしも一様でないことと、結晶体の大きさも数 mm あることから供試体の寸法は大きいほど、試験値の分散は小さいはずであるが、実際の海水は、オホーツク海沿岸では水厚が 50 cm～60 cm が一般的で、薄い海水の場合には大きな供試体が採取できない事になる事と、後でも述べるように海水の鉛直方向の塩分量 (S), 密度 (ρ), 水温 (T) それに圧縮強度 (σ_n) の分布が一様でない事が多く、大きい径の供試体を用いて強度試験を行うと、偏心荷重となり易いことになり試験は困難となる。よって $\phi=100$ mm が海水の圧縮試験に適当と思われる。また $(l/\phi) \leq 1$ になるとその破壊機構は圧壊となり非常に大きな強度を示す。実際の海水盤 (Ice Floe) の大きさは構造物の代表径に比べて非常に大きいことを考えると、Concrete 等と同じく $(l/\phi)=2$ が適当と判断し、以下の圧縮試験は $\phi=100$ mm, $l=200$ mm の円筒形とした。

(2) 破壊速度の違いによる σ_n の変化

圧縮強度は荷重速度 ($\dot{\sigma}$) あるいは歪率速度 ($\dot{\epsilon}$) の違いによって強度が変化する。一般に他の材料試験においても破壊速度が決められている。Schwarz は Baltic 海の海水の σ_n の試験から、歪率速度 $\dot{\epsilon}=0.003 \text{ sec}^{-1}$ で最大の圧縮強度を示すことを明らかにしたがデータ数等は不明である。図-3 にわれわれの結果を示す。 $\dot{\epsilon} \geq 0.003 \text{ sec}^{-1}$ の範囲では σ_n はほとんど一定であるが若干、 $\dot{\epsilon}$ が大きくなるにつれて σ_n が小さくなる傾向が見られる。これは Schwarz の結果に一致している。これに対して Peyton は荷重速度 ($\dot{\sigma}$) と σ_n の関係から、 $\dot{\sigma}=2 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の時 σ_n が最大となることを実験から示している。また Tabata は、 $T=-2^\circ\text{C}$ で $\dot{\sigma} \geq 2 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$, $T=-5^\circ\text{C}$ で $\dot{\sigma} \geq 1.0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$, $T=-10^\circ\text{C}$ で $\dot{\sigma} \geq 0.6 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の範囲では海水が完全な弾性体と見なされることを示している。われわれの実験結果は

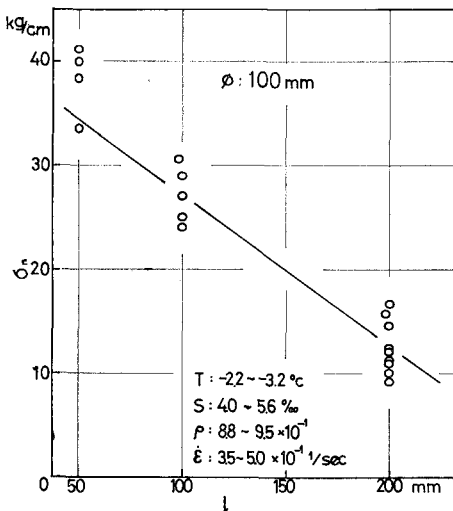


図-1

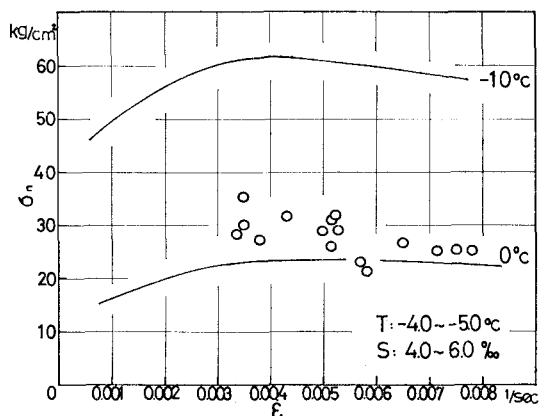


図-3

$\dot{\epsilon} \geq 0.003$ であり, $2 < \dot{\epsilon} < 4 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ であることから十分弾性体の範囲である。以上の結果を総合すると、海水の σ_n の試験においては, $\dot{\epsilon} \approx 2 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 程度、歪率 $\dot{\epsilon} \geq 0.003 \text{ sec}^{-1}$ で実験を行うことが望ましい。

(3) 荷重方向差による σ_n の変化

海水は一般に鉛直下方に向かって結晶が成長することにより、成長軸に対する荷重をかける方向によって、強度 σ_n が異なることが Peyton や Schwarz により報告されているが、Schwarz は $T \geq -10^\circ\text{C}$ の範囲ではその差が小さいことを示しているが、実験の実体が明確でない。われわれの結果の一部を図-4に示す。この結果からは、成長方向に対して直角方向の方が大きい σ_n を示している。また南満鉄道において行われた淡水氷においてもわれわれと同じ結果になっているが、Butkovich の結果では逆になっている。一般に氷温が $T \geq -10^\circ\text{C}$ の範囲ではその差よりも、測定値そのものの分散が大きいため明確なことは今後の詳細な実験を待つしかない。

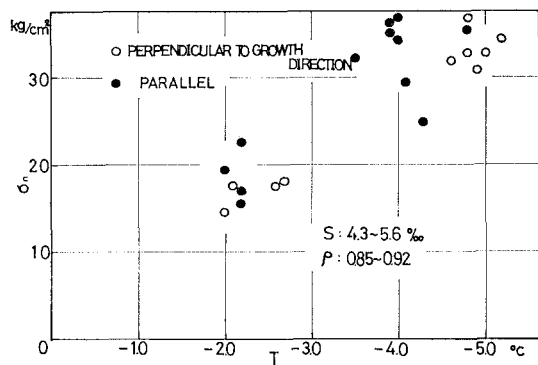


図-4

(4) 海水の圧縮強度

海水の圧縮強度におよぼす因子は、氷温 (T)、Brain 量、気泡量、気孔量、結晶形および大きさ等であるが、

前報告にも示したように、 σ_n に一番大きな影響を与える因子は氷温と気泡量・気孔量の目安となる密度 (ρ) である。今年の佐呂間湖の結氷は例年より遅れ、通常2月上旬には氷厚が 45 cm 前後あるが、今年は 25 cm 程度であった。本格的な結氷が始まってから 10 数日しかたっていないため、新鮮な海水で密度も $8.86 \leq \rho \leq 9.27 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ で大きく昨年の氷に比べて気泡量が少なかった。図-5に氷温と σ_n の関係を示す。Butkovich は、 $-50^\circ\text{C} \leq T \leq 0$ の範囲で圧縮強度の実験を行っているが、その結果では σ_n と T の関係は直線関係ではないが、 $-6.0^\circ\text{C} \leq T \leq -1.0^\circ\text{C}$ の範囲では、近似的に直線で表わすことができる。 σ_n と T の関係は次式で示される。

$$\sigma_n = -5.05 \cdot T + 7.45 \quad \text{.....(8)}$$

($-1 \geq T \geq -6$) σ_n : 圧縮強度 (kg/cm^2), T : 氷温 ($^\circ\text{C}$)

実験値は分散が大きく、式(8)で示される σ_n の $\pm 33.5\%$ の中にほとんどのデータが含まれる。このように同一の氷温でも σ_n の分散が大きいの、同一場所から採取した氷でも、密度、塩分量が少しずつ異なることと供試体中の Brain、気泡の分布が一樣でないことと海水中の結晶の大きさ、その分布が少しずつ異なっていることによるものと思われる。

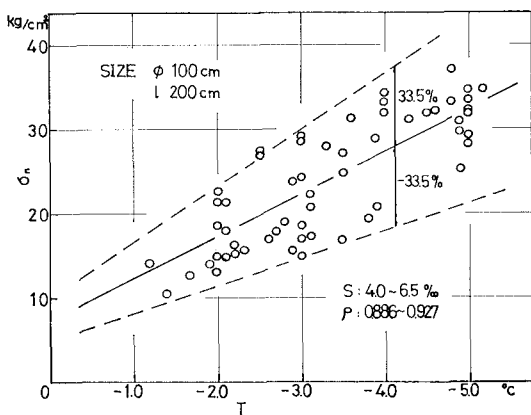


図-5

4. 杭構造物に作用する氷圧力

杭に作用する氷圧力を求める式は式(1)~(6)に示されているが、実験によって求められたものは Hirayama 等の式のみである。しかし Hirayama らが行った実験は、杭径 (D)、氷厚 (h) が小さく、現実の設計に適用できるかに疑問がある。われわれは杭に作用する氷圧力測定装置を試作し、その測定装置を用いて氷厚 (h) は 3~18 cm、杭径 (D) は 3, 5, 10, 15 cm の4種類で実験を行った。測定装置の概略図を図-6に示す。実験方法は、まず 70 cm×70 cm の海水を切り出し、それを所定

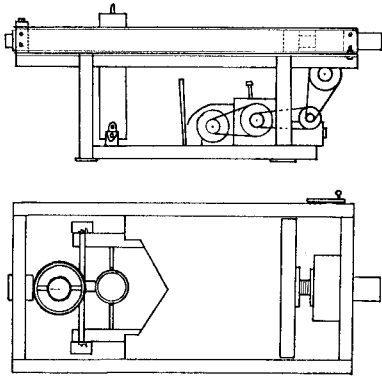


図-6

の大きさに整形して図-6の測定装置に乗せ、氷板の一端を押して、他端に設置されている杭に貫入させて杭に作用する力を求めた。試作した試験装置の性能は満足すべきものであった。押された氷板が杭に接すると同時に杭に氷圧力が働き、それから $(D/2)$ 進むと最大の氷圧力を示し、それ以後は一定の氷圧力を示すことが明らかとなった。このことは海水が杭の最大投影面積の所まで貫入した時に最大氷圧力を示すことを意味している。氷板の圧縮強度は杭に接する部分の海水を用いることはできないので、また氷厚が薄い場合には供試体を作ることができないので、 σ_n は式 (8) から求めた。

図-7 に $D=100$ mm の場合の水厚 h と (F/σ_n) の関係を示す。図中の一点鎖線は平均値で、実線は平均値より $\pm 33.5\%$ をとったものであり、測定値がこの範囲には入っている。 $\phi=30, 50$ mm の場合も同様の結果であった。これは測定値の分散の原因が σ_n の見積りにあることを示している。この図より (F/σ_n) は h と直線的な関係があることがわかる。

$$(F/\sigma_n) \propto h \quad \dots\dots\dots (9)$$

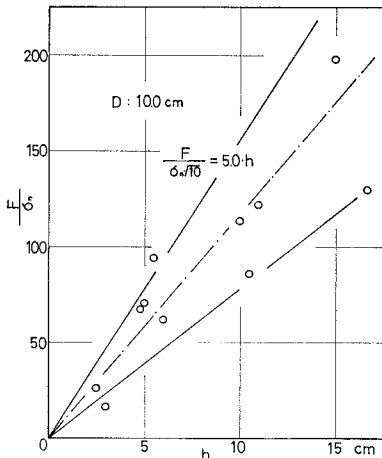


図-7

次に式 (9) の関係が得られたので、 $(F/\sigma_n \cdot h)$ と D の関係を示したものが図-8である。この測定値の包絡線をとると $(F/\sigma_n \cdot h)$ と D の間には次の式が得られる。

$$(F/\sigma_n \cdot h) \propto \sqrt{D} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式 (9), (10) より下は次式に書き換えられる。

$$F \propto \sigma_n \cdot \sqrt{D} \cdot h \quad \dots\dots\dots (11)$$

この式 (11) の係数を求めるために $(F/\sigma_n \cdot \sqrt{D} \cdot h)$ と D の関係を示したものが図-9である。測定値にばらつきがあるが、これは前に述べたように σ_n 分散が大きいために起こるもので、図-5においても測定値のほとんど全部が平均値の $\pm 33.5\%$ の中に入っている。また測定値によっては、杭に接する部分の氷板の下部に氷の剝離現象が見られたことによって測定値が小さくなった例もある。安全側の係数をとると杭に作用する氷圧力は次式で示される。

$$F = 5.0 \cdot \sqrt{D} \cdot h \cdot \sigma_n \quad \dots\dots\dots (12)$$

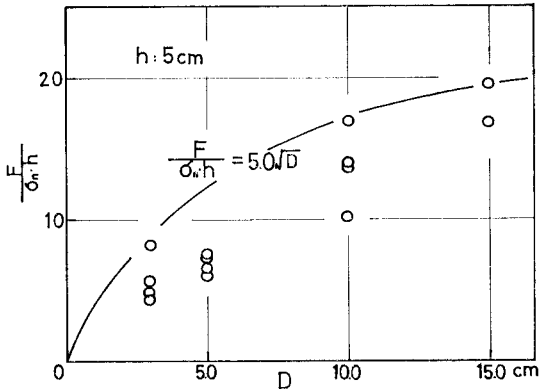


図-8

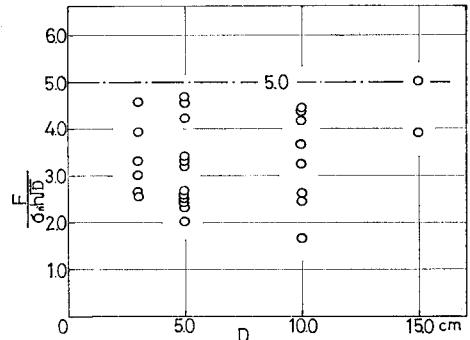


図-9

5. われわれの実験式と実測値および他の式との比較

われわれの得た式 (12) と現在 U.S.A. やカナダで用いられている式 (1), (2) と比較すると $D < 25$ cm の

範囲では図-10 に示すように式 (12) の方が大きい値を示し、 $D > 25$ cm では、式 (1), (2) は式 (12) より大きい値を示し、 $D = 100$ cm の時には式 (1), (2) は式 (12) の 2 倍の水圧力を示すことになる。現実の海岸・海洋構造物の径は 25 cm よりはるかに大きいので、式 (1), (2) は大きめの値を示すことになる。図中の点は、Neill と Schwarz の実河川での実測結果であるが、この値と比べても式 (1), (2) は大き過ぎることを示している。これは Neill も指摘している。式 (3) の Danish の式は、 $2 \leq N_e \leq 3.4$ で変化するが、杭径が 1.2~1.6 cm 以下では式 (12) の方が大きい、それを越えると Danish の式の方が大きくなり、 $D = 100$ cm の時は式 (12) の 4~6.8 倍大きい水圧力を示す。式 (5) は式 (12) と非常によく似かよった形をしている。Neill, Schwarz の実測結果と式 (5), (12) を比較したものが図-11 である。これによると $h > 37$ cm では式 (5) の方が大きく、 $h < 37$ cm ではその逆である。 $h < 60$ cm の

範囲では両式の差はほとんどないことがわかる。われわれは海水で実験し、固定した杭に向かって氷を押しつけるのに対して、Hirayama らは水路に氷を張らせ、そこを台車に取り付けた杭に氷を割りながら進行させる試験法である。今後はより大きい径の杭の実験が必要である。

実測値との比較などから、われわれの求めた式 (12) は十分実用に足るものと思われる。なお氷塊が波動あるいは流れ等により衝突する場合の衝撃力も単に荷重速度が速いだけで根本的には式 (12) が適用できる。

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、北海道庁網走土木現業所、佐呂間漁業協同組合及び常呂漁業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東海大学の泉 洵氏、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) 土木学会編：海洋構造物設計指針 (案) 解説。
- 2) Weeks, W.F., A. Assure: Fracture and Sea Ice, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Res. Rep., 269, Sep. 1969.
- 3) Neill, C.R.: Ice Pressure on Bridge Piers in Alberta, Canada, I.A.H.R. Ice Symposium, Reykjavik, 1970.
- 4) Schwarz, J.: The Pressure of Floating Ice-Fields on Piles, I.A.H.R. Ice Symposium, Reykjavik, 1970.
- 5) Peyton, H.R.: Sea Ice Strength, Geophs. Inst., Univ. of Alaska, Rep. No. NR-307-247/7-6-55.
- 6) Frederking, R. and L.W. Gold: Ice Force on Isolated Circular Pile, Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Norway, 1971.
- 7) Hirayama, K., J. Schwarz and H. Wu: Model Technique for the Investigation of Ice Force on Structures, Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Iceland, 1973.
- 8) Schwarz, J., K. Hirayama and H. Wu: Effect of Ice Thickness on Ice Forces, Proc. of 6th. Annual Offshore Tech. Conf., Houston, 1974.
- 9) Hirayama, K., J. Schwarz and H. Wu: Ice Forces on Vertical Piles Indentation and Penetration, I.A.H.R. 3rd International Symposium on Ice Problems, U.S.A., 1975.
- 10) 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，第 22 回海講演集，1975.

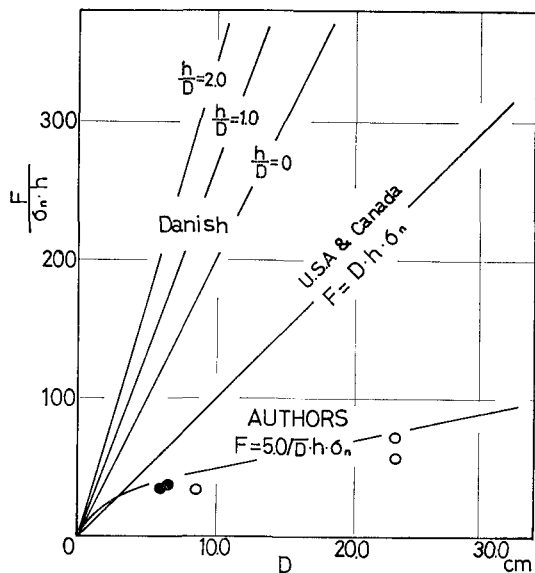


図-10

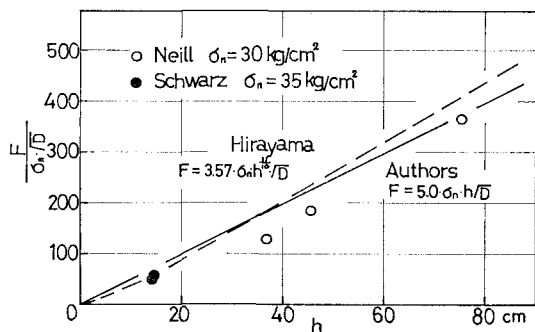


図-11