

## 氷盤移動による海洋構造物の摩耗の予測と制御について

Estimation and Control Method for Abrasion of Offshore Structure Due to Movement of Ice Sheet

伊藤喜栄\*・浅井雄一郎\*・佐伯 浩\*\*・折谷徳弘\*\*\*・石井千万太郎\*\*\*\*

Yoshishige. Itoh, Yuichiro. Asai, Hiroshi. Saeki, Norihiro. Oritani and Chimatarou. Ishii

The abrasion of offshore structures constructed in cold regions occur when the movement of ice sheets are active during the time of thawing. Therefore, it is very important in the design of offshore structures for very cold region to estimate the abrasion amount due to a movement of sea ice sheet. Basic studies on the abrasion of various construction materials due to the movement of sea ice have been conducted by Saeki et al. Furthermore, as natural sea ice sheets contain fine sand, the authors also systematically experimented on various materials abrasion by sea ice containing sand. According to the data obtained, the authors propose an estimation method for the actual amount of abrasion on offshore structures. And the authors examined the adequacy of our abrasion estimation method, comparing it to the result of the observations of the light house in the Gulf of Bothnia.

Keywords: abrasion rate, contact pressure, fine sand

## 1. はじめに

近年、極地および亜極地において石油や天然ガスなどのエネルギー資源の探査や採掘が行われ始めており、そのため氷海域向けの海洋構造物の研究・開発が望まれている。氷海域に海洋構造物を建設する場合、その設計に当たっては構造物に作用する氷力が最も大きな設計外力となる。さらに、このような氷海域においては氷盤の潮流や風による水平方向の移動に伴う、また潮汐などの水位変化による鉛直方向の移動に伴う構造物表面の摩耗も考慮されなければならない。例えば、ボスニア湾に建設されているコンクリート製の海中燈台が氷盤の移動により大きいところで20年間で約140mm（年平均で約7mm/year）も摩耗したという調査報告がある。

また気象条件の厳しい氷海域においては、構造物を建設後に補修することは大変に困難であり、それゆえメンテナンスフリーが望まれる。例えばコンクリート製のケーソン型構造物の場合、摩耗対策として単にかぶり厚を大きくすると構造物の重量が増し喫水が大きくなってしまい、これを曳航する際に困難や危険が伴う。また水深の浅い海域を運搬することができなくなる。このようなことから氷盤移動による構造物表面の摩耗特性を正確に把握し、摩耗対策や適切なかぶり厚の設計が必要となる。

本研究は、海水と諸材料間の摩耗特性に関する佐伯らの系統的な実験の結果に基づいて、海水氷盤の移動による構造物表面の摩耗量の推定方法および摩耗制御対策について報告するものである。

## 2. 摩耗量の推定に必要な条件

構造物表面の氷盤移動による摩耗量を推定するために必要な条件は、大きく分けると構造物に関する条件、氷象条件、氷盤の運動に関する条件そして潮汐がある。構造物に関しては構造形式や断面形状、寸法などの条件があり、これらは氷盤貫入時の歪速度やアスペクト比（構造物の代表径と氷盤の厚さの比）、そして接触圧を決定するために必要である。氷象条件には氷の形態、氷厚、氷の強度、氷温そして水中に含まれる微粒砂の濃度と粒径などがあり、これらは歪速度、アスペクト比そして接触圧の決定に必要であり、また直接摩耗速度に影響を与える因子である。氷盤の移動速度、移動距離、移動方向といった運動条件は摩耗量の決定に必要であり、移動速度は当然ながら歪速度に影響する。潮汐は氷盤の鉛直方向の運動を起し、構造物表面の摩耗範囲に大きく影響を与えるものである。

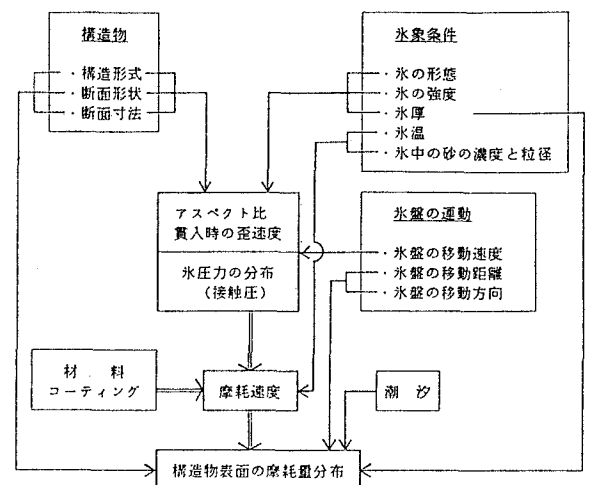


図1 摩耗量の推定方法

\* 正会員 大成建設

\*\* 正会員 北海道大学工学部土木工学科 (060 札幌市北区北13西8)

\*\*\* 正会員 北海道旭川土木現業所

\*\*\*\* 正会員 秋田大学工学部

図1にこれらの条件をまとめ、摩耗量の推定の手順を示した。ここで摩耗量を推定するうえで最も重要なのは摩耗速度（氷盤の移動距離1 km当りの平均摩耗深さ、mm/km）の決定である。摩耗速度の決定に当たっては、過去の著者らの系統的研究から海水氷盤と構造物表面間の接触圧、水温、構造物表面の材料、そして海水中の微粒砂の濃度と粒径が与えられなければならない。摩耗速度が決定されると、あとは氷盤の移動距離や潮汐等の条件により構造物表面の摩耗量が決定される。以下にそれぞれの項目について述べることにする。

(1)海水氷盤と構造物表面間の接触圧

大きな氷盤が構造物に向かって移動し貫入すると、構造物には大きな氷荷重が作用する。この氷荷重は、構造物の大きさ、断面形状、表面の傾斜角、氷盤と構造物表面の摩擦係数、氷盤の移動速度、氷厚それに氷の強度に大きく影響を受ける。同時に構造物表面の氷圧力の分布もそれらによって大きく影響を受けることになる。表1に各構造形式に対する平均接触圧力の算定式を示したが、接触圧を算定する理論式あるいは実験式は特に提案されていないことから、ここでは現在提案されている氷力式を氷盤と構造物の接触面積で除して、それを接触圧の算定式として用いた。なお $\sigma_v$ は平均接触圧、 $h$ は氷厚、 $w$ は構造物の幅そして $\sigma_c$ は一軸圧縮強度である。表1を見ると、くさび型断面の場合が最も氷盤貫入による接触圧が小さく、次に円形断面、矩型断面の順になっている。よって矩型断面より円形断面の方が摩耗に対して有利であるといえる。また矩型断面の場合は、氷盤の移動が卓越している方向に角部がくるように建設すると接触圧を少なくすることができる。さらに直立型の構造物にくらべ傾斜型の構造物の場合は氷盤が曲げ破壊を起こすため作用する氷力が小さく、それゆえ接触圧も小さくなると考えられる。また図2でいうと右下に行くほど摩耗に対して有利な構造といえる。

大規模な海洋構造物と氷盤の相互作用においては、氷が構造物の前面にわたって同時に破壊することはなく、独立の各領域において非同時に破壊するといわれている。したがって、小規模な実験の結果を大規模な構造物の氷力として評価した場合は、過大な評価となる可能性がある。このような非同時的破壊を考慮した明確な算定方法は提案されていないが、図3に示したSandersonらのまとめた結果では、氷盤と構造物間の接触面積が大きくなるにつれて接触圧は小さくなっていることがわかり、これより大規模構造物の接触圧の大略値は推定可能である。

また局所的な接触圧について佐伯らや田中らは直立型の矩型断面構造物に作用する氷力の実験を行っている。その結果によると最大の局部接触圧は、一軸圧縮強度（歪速度が $10^{-3} \text{sec}^{-1}$ ）の2.6~6.5倍となっている。また佐伯らは、最大の接触圧は氷の三軸圧縮強度を越えないことを実験により明らかにし、それは一軸圧縮強度の約4.5倍であると報告している。このことから、局部接触圧の最大値は一軸圧縮強度の4.5倍程度と考えてよく、安全側に設計するには、接触圧として $4.5\sigma_c$ を用いればよい。さらに佐伯らや田中らの円断面構造物に作用する氷力の貫入試験の結果によると、最大の局部接触圧は一軸圧縮強度の1.84~6.28であり、矩型断面の場合と同様に $4.5\sigma_c$ を用いれば安全側の設計が可能である。

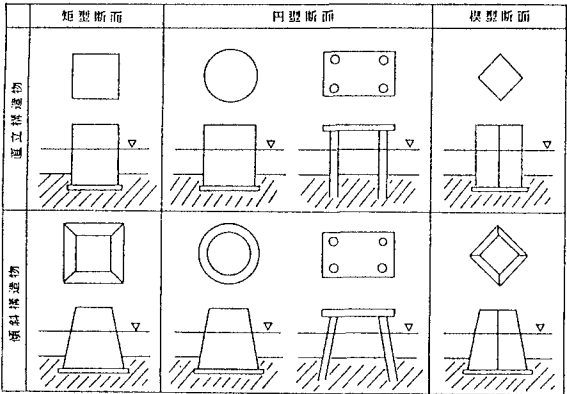


図2 海洋構造物の構造形式

|      | $\sigma_v$ :平均接触圧(kgf/cm <sup>2</sup> )           | $h=200\text{cm}$<br>$w=10000\text{cm}$ |                          |
|------|---------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------|
| 直立矩型 | $\sigma_v=(1.4+0.97h/w)\sigma_c$                  | $\sigma_v=1.42\sigma_c$                | 理論式(Reinicke)            |
|      | $\sigma_v=(1+0.304h/w)\sigma_c$                   | $\sigma_v=1.006\sigma_c$               | 理論式(Morgenstern, Nattal) |
|      | $\sigma_v=(6.8/\sqrt{w})\sigma_c$                 | $\sigma_v=0.068\sigma_c$               | 実験式(Saeki)               |
| 直立楔型 | $\sigma_v=C\sigma_c/\sqrt{w(1+\mu k/\tan\alpha)}$ | $\sigma_v=0.035\sigma_c$               | 理論式(Takahashi)           |
| 直立円型 | $\sigma_v=(5.0/\sqrt{w})\sigma_c$                 | $\sigma_v=0.05\sigma_c$                | 実験式(Saeki)               |
| 傾斜円型 | $\sigma_v=5.0\sigma_c/\sqrt{D}$                   | $\sigma_v=0.05\sigma_c$                | 実験式(Hirayama)            |

※  $\sigma_c$ :氷の一軸圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>)

表1 各構造形式に対する平均接触圧

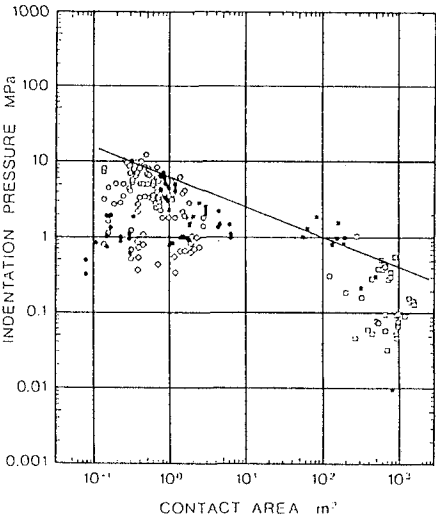


図3 接触圧と接触面積の関係

## (2) 海水による諸材料の摩耗速度

著者らは諸材料の摩耗に関する実験を系統的に行いその特性を明らかにしてきた。その結果によると、海水の移動によるコンクリート表面の摩耗速度を支配する要因は主に接触圧と水温であり、図4にそれらの関係を示した。各接触圧において水温が $-10^{\circ}\text{C}$ 以上では水温の低下とともに摩耗速度は緩やかに増加し、水温が $-10^{\circ}\text{C}$ 以下になると急激に摩耗速度は大きくなっている。これは水温が $-10^{\circ}\text{C}$ 以下になると海水中のブライン（海水中の高濃度の塩水）から塩類の結晶が析出しはじめ、その結晶の粒が摩耗を促進させるものと考えられる。

またコンクリートと他の材料ゼブロン(Zebtron)、高密度ポリエチレン(L.D.P.E.)、低密度ポリエチレン(H.D.P.E.)、ウレタンエ(Urethane)、それに鋼(Steel)の平均摩耗速度と水温の関係を示したのが図5である。コンクリートは水温が $-10^{\circ}\text{C}$ より低くなると平均摩耗速度は急激に大きくなるのに対して、その他の材料は水温の低下とともに緩やかに直線的に増加していく。またコンクリートに較べて他の材料の平均摩耗速度はかなり小さい。中でもL.D.P.E.は最も小さく、H.D.P.E.、Urethane、Steelはほぼ同じ平均摩耗速度となっている。Zebtronは海洋構造物の塗装としてよく用いられるが、平均摩耗速度はSteelなどの約2倍である。この結果から氷海域の鋼構造物をH.D.P.E.、L.D.P.E.、Urethaneなどで重防蝕することは摩耗対策としても非常に効果があるといえる。

## (3) 海水中に含まれる微粒砂が摩耗速度に与える影響

海水中に含まれる微粒砂について、著者らは1990年と1991年にオホーツク海沿岸で流水を採取し調査を行った。1990年の結果によると、微粒砂含有量は採取した試料の岸からの距離に関係なく、その最大値は約0.37%であり、これはこの海域における海水中的微粒砂含有量の最大値と考えられる。一方、微粒砂の中央粒径についても岸からの距離とは関係がなく、その値は試料全体の7割が約 $0.12\sim 0.17\text{mm}$ であった。また1991年の結果では、微粒砂含有量は最大で網走港外の0.17%、中央粒径の最大値は北見枝幸港外の $0.29\text{mm}$ であった。

このように海水中にいろいろな固形成分が混入する原因としては図6のように、まず海水が形成される過程において水中の懸濁物質が取り込まれたり、特に沿岸水や湾内の水については生活排水の流入や道路粉塵の飛来、海岸構造物等の剝離・混入があると思われる。また大気中の汚染物質や黄砂のように遠くの野地・農地から飛来する微粒砂が氷盤上に降下し、それが太陽熱を吸収し海水中に取り込まれることも考えられる。いずれにせよ海水中に微粒砂等の固形成分が含まれていることは明かであり、海水氷移動による海洋構造物の摩耗量の推定にはこの影響を考慮しなければならない。

また著者らは微粒砂を含んだ海水による諸材料の摩耗速度についても実験を行っており、微粒砂を含んだ海水のほうがそれを含まない海水よりコンクリートの摩耗速度は大きく、同一の接触圧では、中央粒径が大きくなるほど摩耗速度は大きくなるという結果を得ている。図7は海水に含まれる微粒砂の濃度が $W\%$ のときのコンクリートの平均摩耗速度 $S_W$ を、微粒砂を含まないときの平均摩耗速度 $S(W=0)$ で無次元化した値 $S_W/S(W=0)$ と、微粒砂の中央粒径の関係を示し

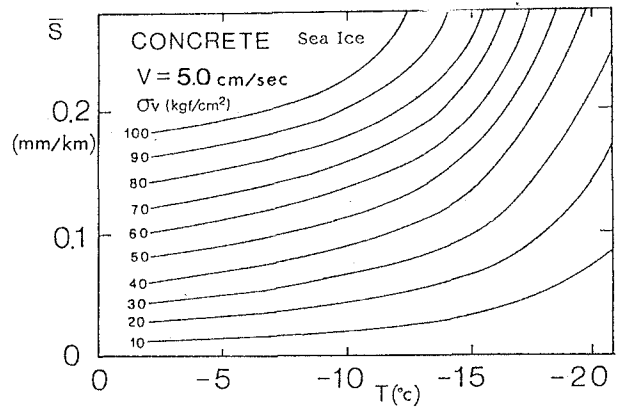


図4 コンクリートの平均摩耗速度と水温の関係

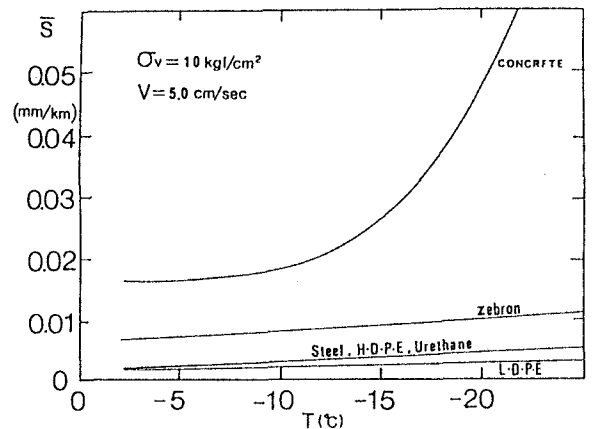


図5 諸材料の平均摩耗速度と水温の関係

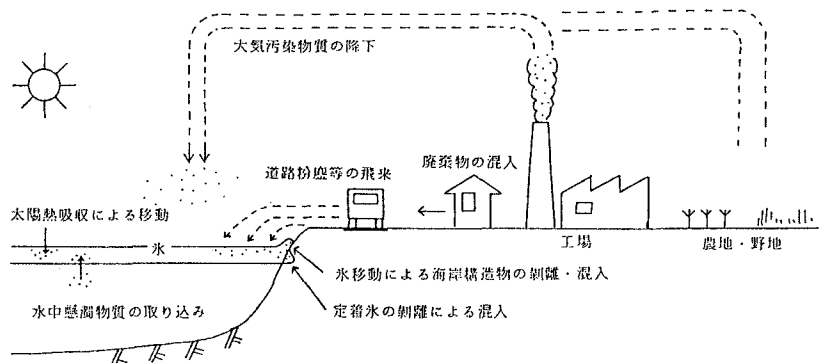


図6 水中固形成分の混入過程

たものであるが、同一の中央粒径の場合、砂の濃度が高いほど無次元摩耗速度が大きくなり、また同じ濃度であれば中央粒径が大きいほど無次元摩耗速度が大きい。

他の材料については、図8にゼブロン(Zebron)、高密度ポリエチレン(L.D.P.E.)、低密度ポリエチレン(H.D.P.E.)、ウレタンエ(Urethane)、鋼(Steel)それとコンクリートに対する摩耗量と摩耗距離の関係を示した。これは微粒砂の濃度0.4%、中央粒径0.14mmの場合であるが、コンクリートを除いた各材料とも、ある一定の摩耗量に達すると、その後は平均摩耗速度は一定になる。これは初期の摩耗は、材料表面の凸凹が削られる過程と考えることができる。各材料の平均摩耗速度が一定になるまでの摩耗量は、L.D.P.E.で0.0058mm、H.D.P.E.で0.0100mm、ウレタンエラストマーで0.0235mm、鋼で0.00100mm、Zebronで0.0800mm、コンクリートで0.6mmであり、このときの平均摩耗速度と微粒砂を含まないときの平均摩耗速度をくらべると、Zebronとコンクリートで約2倍、SteelやUrethaneで4～5倍、L.D.P.E.とH.D.P.E.では約9倍となっている。

図9は微粒砂の中央粒径が0.14mmでの各接触圧におけるコンクリートの平均摩耗速度と微粒砂濃度の関係を示している。これは図4において、-10℃以下では接触圧に関係なく摩耗速度の増加が緩やかでほとんど変化がないことから、氷温が0℃<T<-10℃の摩耗速度を安全側をとって-10℃での摩耗速度で代表し、その値と図7の結果を用いて求めたものである。これより接触圧と微粒砂濃度がわかればそのときの摩耗速度が推定が可能である。

#### (4) 水温

水温については、氷盤の移動の活発な時期の水温を選択するべきである。氷盤の移動の活発な時期は、ボスニヤ湾、北極海、オホーツク海北部海域等では氷の融解期の3～5月であり、その時期の水温はボスニヤ湾、北極海、オホーツク海北部海域では平均で-10℃、北海道のオホーツク沿岸では-4～-5℃である。よって、平均的な摩耗量を推定するのであれば、それらの水温を用いればよい。

### 3. 実測値と推定値の比較

ここではボスニヤ湾の海中燈台を例にとり摩耗量の実測値と推定値の比較を行うことにする。この摩耗量の調査は1988年の冬に行われたが、調査された燈台はコンクリート製で直径が8mの円型断面である。現地氷盤の厚さは約1mであり、氷温は-10℃、氷盤の移動距離は約100～200kmであった。そして調査の結果は、平均摩耗量が50mmで局所最大摩耗量は150mmにも達していた。

まず現地氷盤に微粒砂が含まれていない場合を考えると、氷温が-10℃のときの一軸圧縮強度は図10より約40kgf/cm<sup>2</sup>とし、このときの接触圧は表1の直立円型の式を用いると $\sigma_v = (5.0/\sqrt{w}) \cdot \sigma_c = (5.0/\sqrt{800}) \times 40 = 70 \text{ kgf/cm}^2$ となる。そして図4より接触圧が70kgf/cm<sup>2</sup>で氷温が-10℃のときの平均摩耗速度 $S = 0.14 \text{ mm/km}$ が求まる。また、この燈台が建設されているボスニヤ湾は潮差がほとんどない。よってこの場合の平均摩耗量は $0.14 \times (100 \sim 200) = 14 \sim 28 \text{ mm}$ となる。

次に局所的な最大の摩耗量についてであるが、一軸圧縮強度は平均の場合と同様に約40kgf/cm<sup>2</sup>とする。局所接触圧を一軸圧縮強度の4.5倍とすると $\sigma_v = 4.5 \sigma_c = 4.5 \times 40 = 180 \text{ kgf/cm}^2$ であり、平均摩耗速度は図4より0.4mm/kmとなるから、局所最大摩耗量は $0.4 \times (100 \sim 200) = 40 \sim 80 \text{ mm}$ となる。しかし、これらの推定値は実測値と較べると小さいものになっている。

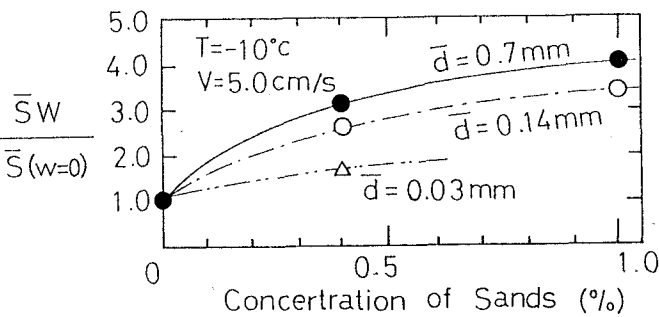


図7 コンクリートの無次元摩耗速度

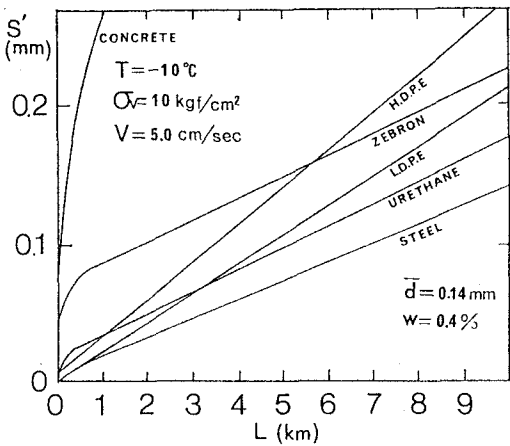


図8 諸材料の摩耗量と摩耗距離の関係

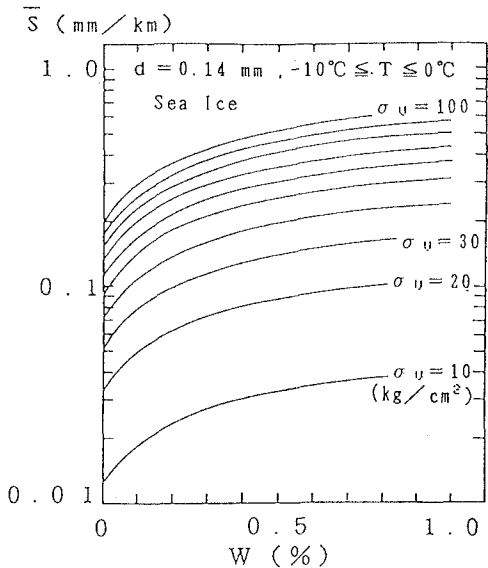


図9 コンクリートの各接触圧における平均摩耗速度と微粒砂濃度の関係

そこで、この海域の水盤の中にも微粒砂等の固形成分が含まれている可能性があるので、その影響を考慮し摩耗量を推定してみる。この海域での微粒砂の量と中央粒径については調査されていないので、著者らが行ったオホーツク海の調査結果を用いて、濃度を0.4%、中央粒径を0.14mmと仮定する。接触圧および局所最大接触圧は海水中の微粒砂には関係ないので、それぞれ70kgf/cm<sup>2</sup>と180kgf/cm<sup>2</sup>である。よって平均摩耗速度は図9より0.35mm/kmであり、平均の摩耗量は潮差がないので0.35×(100~200)=35~70mmとなり、また局所的な摩耗速度は図9から1.0mm/kmでそのときの局所最大摩耗量は1.0×(100~200)=100~200mmである。実際このボスニヤ湾の水盤中に微粒砂がどのくらい含まれているかわからないが、オホーツク海での微粒砂の濃度と粒径を仮定したら実測値に近い値になったことから、ボスニヤ湾の水盤中にも微粒砂が含まれていたことが考えられ、また本推定方法が実用可能であると思われる。

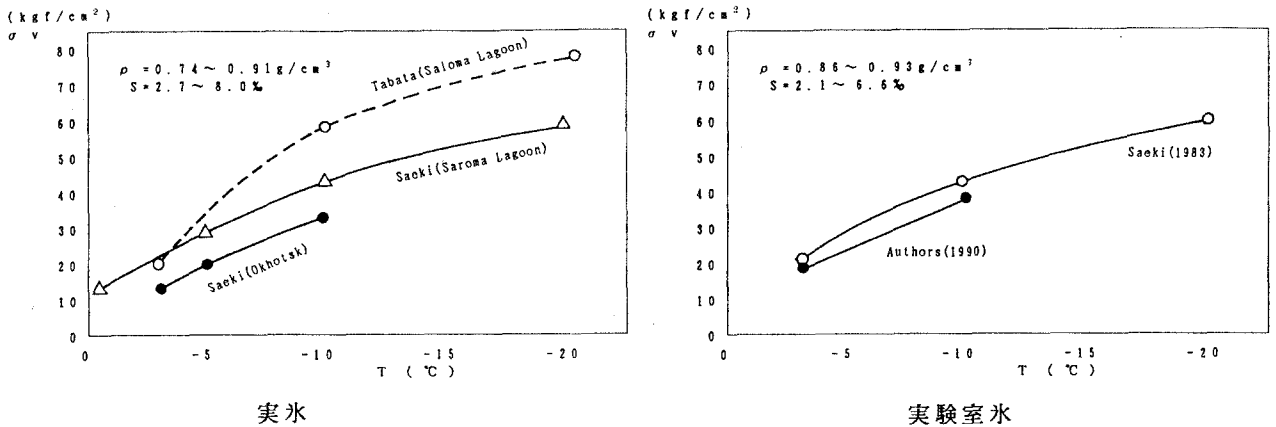


図10 海水の一軸圧縮強度と水温の関係

#### 4. 摩耗制御対策について

氷海域に建設される海洋構造物の摩耗防止対策として考えられるのは、接触圧を小さくするような構造にするか、あるいは摩耗しにくい材料を用いることである。前者については、上述したように構造物の断面を円型にするほうが矩型にするより接触圧を減少させることができる。また矩型断面の場合でも、氷盤移動の卓越方向に角部を向けることにより、接触圧を少なくすることができる。さらに傾斜をつけることにより氷力が小さくなって、接触圧を減らすことができる。

後者に関しては、まずコンクリート構造物の場合は、摩耗量を推定して適切なかぶり厚にすることが考えられる。またかぶり厚を大きくとれない構造物の場合は、その表面を摩耗しにくいステンレス等で覆うということも考えられる。鋼製の構造物については、ゼプロンなどで塗装したり、ポリエチレン等の摩耗しにくい材料でコーティングすることにより摩耗量を減らすことができる。

#### 参考文献

- 1) 伊藤喜栄、浅井有一郎、佐々木佳文、後藤克人、佐伯 浩：砂を含んだ海水の移動による種々の高強度コンクリートの摩耗に関する研究，海洋開発論文集Vol.4，1988
- 2) 伊藤喜栄、浅井有一郎、後藤克人、佐伯 浩：砂を含んだ水による軽量高強度コンクリートの摩耗に関する実験的研究，第5回寒地技術シンポジウム講演論文集，1989
- 3) 橋 治国、水野克彦、石井次郎、佐伯 浩、山下俊彦：自然水中の固形成分について，第6回オホーツク海と流水に関する国際シンポジウム，1991
- 4) 伊藤喜栄、浅井有一郎、折谷徳弘、佐伯 浩、橋 治国：コンクリート製海洋構造物の氷盤移動による摩耗量の予測方法に関する研究，海洋開発論文集，Vol.7，1991
- 5) 高橋陽一、久連山秀樹、佐藤 浩、原文宏、佐伯 浩：氷盤と構造物表面間の接触圧力について，第7回寒地技術シンポジウム講演論文集，1991
- 6) 竹内貴弘、岡本 智、上田俊也、折谷徳弘、佐伯 浩：氷盤エッジ部の形状と氷力の関係について，第7回寒地技術シンポジウム講演論文集，1991
- 7) 高橋陽一、伊藤喜栄、浅井有一郎、折谷徳弘、佐伯 浩：氷盤移動による構造物表面の摩耗に関する研究，第7回オホーツク海と流水に関する国際シンポジウム，1992
- 8) J.E. Janson : Long Term Resistance of Concrete Offshore Structures in ice Environment, Proc. of the 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1989
- 9) T.J.O. Sanderson : Ice Mechanics Risks to Offshore Structures