

海水による各種コンクリートの摩耗特性

大成建設株式会社	正会員	伊藤 喜栄
大成建設株式会社	正会員	吉 田 明
北海道大学工学部	学生会員	佐々木 広輝
東海大学工学部	正会員	泉 洵
北海道大学工学部	正会員	佐 伯 浩

1. はじめに

オホーツク海、渤海、ポーフォート海、ベーリング海それにボスニヤ湾といった、冬期間結氷する海域において、コンクリート製の海岸、海洋構造物を建設する場合、その設計に当っては、海水の移動に伴って、海水と構造物表面間に作用する摩擦力によるコンクリート表面の摩耗量を考慮に入れねばならない。特に氷象条件の厳しい北極海の各海域に建設されるコンクリート製海洋構造物においては、巨大な氷圧に耐えねばならない事と、構造物の輸送に当っては、水深の浅い海域を通過せねばならないため軽量化が必要で摩耗を想定したコンクリートの摩耗量について、特に海水の移動速度、鉛直方向応力それにコンクリートの強度の効果を系統的な実験により明らかにしたものである。

2. 実験材料と実験方法

本研究においては、一軸圧縮強度 σ_c が 568 kg/cm^2 の粗・細骨材ともに通常の骨材を用いた普通コンクリート(N. C.)細骨材が通常の骨材で粗材が軽量骨材を用いた軽量高強度コンクリート(L. W. C)粗・細骨材ともに軽量骨材を用いた軽量高強度コンクリート(L. L. W. C)、それに、一軸圧縮強度が 350 kg/cm^2 の軽量コンクリート(L. W. C.)と 700 kg/cm^2 の軽量コンクリート(L. W. C)の5種類のコンクリートを試験材料として用いた。また、摩耗試験に用いた試験装置は、海水と諸材料間の摩擦係数に関する基礎実験の結果と海水と構造物間の相互作用に関する研究における氷力の時間変化を考慮して往復運動による摩耗機構となっている。また、コンクリート表面の摩耗量の測定は、海水と接触面に5本の測線を選定し、表面粗さ計により表面の凹凸を測定し、摩耗距離 $L=0 \text{ m}$ の値を基準として摩耗量を求めた。また、海水とコンクリート供試体間の相対速度 V は 1 cm/sec 、 5 cm/sec 、 20 cm/sec の3種類とし、鉛直方向応力 σ_v は 10 、 20 、それに 30 kg/cm^2 を標準とした。

3. 実験結果と考察

1) 平均摩耗量と摩耗距離の関係

コンクリートはセメントペースト、粗骨材それに細骨材の混合材料であるから、表面からの摩耗が進行するにつれて、その摩耗特性が変化するはずである。平均摩耗量 $\bar{S}$ と摩耗距離 L の関係を示したものが図1である。氷温 -20°C 、鉛直応力 10 kg/cm^2 、相対速度 5 cm/sec の一定条件で、コンクリートの一軸圧縮強度 σ_c が 568 kg/cm^2 のN. C., L. W. C. それにL. L. W. Cと一軸圧縮強度が 350 kg/cm^2 のL. W. Cの4種類のコンクリートを用いた結果である。図からも明らかのように、摩耗距離 L の変化に対して、平均摩耗量 $\bar{S}$ の変化は大きく三つの段階に分ける事ができる。これは、骨材の違い、コンクリートの一軸圧縮強度の違いに関係なく、全く同一の変化を示す。摩耗距離 L が 2 Km 以内で、コンクリート表面から 0.27 mm 内の摩耗速度は大きく 0.135 mm/Km であり、これはコンクリート表面の凹凸及び表層のセメントペースト部分が摩耗しているためで、摩耗試験後の供試体表面にはほとんど骨材が見られない。著者等はこの表層から 0.27 mm の範囲をSurface Regionと名づけた。次に摩耗距離 $2 \text{ Km} < L < 7 \text{ Km}$ の範囲で、コンクリートの表面から 0.27 mm と 0.61 mm の範囲では、Surface Regionに較べたら、摩耗速度はおそくなり、平均して 0.07 mm/Km である。この範囲での摩耗試験後のコンクリート表面は、細骨材及び粗骨材の一部が露出してくる。この範囲をTransition Regionと呼ぶ事にする。次に、摩耗距離 L が 7 Km を越える範囲では、摩耗速度はさらに小さくなり、約 0.05 mm/Km となり、表層の約 $1/5$ となる。この範囲では、粗骨材の露出面積もかなり大きくなり、この領域をStable Regionと名づける。実験では摩耗距離が

10mmまでで、表層から約0.76mmまで摩耗が進んだ状態までであるが、その後もこの傾向がつづくかどうか疑問の残るところである。そこで次に、コンクリートの供試体の表面を約6mm～10mm切り取って、粗骨材を完全に露出した状態（露出面における骨材の占める面積は45～60%）で摩耗試験を行った結果が図2.である。実験条件は図1.の場合と同じである。一軸圧縮強度が568kgf/cm²で骨材の異なる三種類のコンクリートと一軸圧縮強度が350kgf/cm²と700kgf/cm²の5種類のコンクリートであるが、平均摩耗量と摩耗距離の関係は一本の直線で近似され、平均の摩耗速度は0.05mm/Kmである。この事実は、試験条件が同じであるなら、コンクリートの強度、使用骨材に関係なく、コンクリートの表層から0.61mm程度を越えると同じ摩耗速度を示す事を示している。次に摩耗試験後のコンクリート供試体面の骨材の露出面積と海水との接触面積との比率（%）Aと平均の摩耗速度の関係を示したものが図3.である。骨材の占有面積が10%程度を越えると、骨材の占有面積に関係なく、平均摩耗速度はほぼ一定値の0.05mm/Kmとなる。コンクリート表面の粗度が大きいため、海水の摩耗量も多く、また海水には往復運動により繰り返し荷重が働くため、頻繁に海水を取りかえねばならず、一つの材料の試験をするためには長時間を要する。以上の結果より、コンクリート供試体の表層（6～10mm）を切り取って試験を短縮する事により、試験時間を大幅に短縮する事が可能で、以後の試験は全て、この方法により行った。

2) 相対速度と平均摩耗量の関係

コンクリートの摩耗量は、海水とコンクリート表面間の摩擦力に起因する。この摩擦力は、一般に鉛直方向応力と海水とコンクリート表面間の摩擦係数の積で表わされる。過去の佐伯等の結果から、摩擦係数は動摩擦・静止摩擦係数ともに、接触面積及び鉛直方向圧力には依存せず、材料表面の粗さ及び海水と材料間の相対速度に強く依存し、海水の強度に非常に関係ある水温は、材料の種類によって摩擦係数におよぼす影響の度合いが事な事が明らかになっている。図4.に、水温-8℃、鉛直応力2kgf/cm²の条件でのコンクリートと海水間の摩擦係数 μ と相対速度Vの関係を示したものである。図中の●印が静止摩擦係数、○印が動摩擦係数であるが、図からも明らかなように、摩擦係数は相対速度の影響を浮け、相対速度が $V > 20\text{ cm/sec}$ の範囲では、それほど相対速度の依存性が大きくないが、 $V < 20\text{ cm/sec}$ の範囲では、相対速度が小さくなるにつれて、急激に摩擦係数が大きくなる。このような性質は無処理の鋼や塗装した鋼についても同じである。一軸圧縮強度の異なる4種類のコンクリートに対する、相対速度と平均摩耗速度の関係を調べたものが図5.である。実験の範囲は相対速度が20cm/sec以下と狭く、また実験データ数も少ないが、傾向としては、相対速度が小さくなるにつれて、平均の摩耗速度が大きくなる事を示していて、変化の様子も、相対速度が小さくなるにつれて、摩耗速度のふえ方が大きくなり、図4.に示されている摩擦係数の変化の傾向と非常に似ている。相対速度が小さくなれば、摩耗速度が大きくなるが、その半面、摩耗距離しが大きくならないため、実用上の事を考えると、コンクリートの摩耗特性を調べるために相対速度Vが5cm/sec程度が適当と考えられる。相対速度を20cm程度で実験をすると、全体の試験時間は短縮できるが、海水の取りかえが大変な事と、往復運動タイプの摩耗試験機では、方向が変化する時に機械に無理がかかり、装置全体が激しい振動を伴うからである。よって以後の実験では、相対速度 $V = 5\text{ cm/sec}$ を標準としている。

3) 水温と平均摩耗速度の関係

前節でも述べたように、海水と諸材料間の摩擦係数は、材料によっては水温に依存する。一軸圧縮強度が568kgf/cm²の骨材の異なる三種類のコンクリートに対して、水温と平均摩耗速度の関係を調べた結果が図6.である。コンクリートの骨材の種類に関係なく、同じ変化を示すが、水温が $T > -10^\circ\text{C}$ 範囲では、水温の低下に対して平均摩耗速度の変化は小さいが $T < -10^\circ\text{C}$ の範囲になると、摩耗速度は急激に大きくなる。海水とコンクリート間の摩擦係数については、水温に僅かに依存し、摩耗速度の傾向とはかなり異なっている。この理由として考えられるのは、海水中に含まれるブラインの中の水塩類の一部が-8℃くらいから析出を始め、それが摩耗を加速しているとも考えられ、今後、淡水氷にて同様の実験を行う事により確かめられると思われる。海水によるコンクリートの摩耗量と鉛直方向応力の関係についてはすでに発表しているが、その結果によると、鉛直方向応力の増加に伴って、平均摩耗量は増加している。 σ_v が10kgf/cm²では、 σ_v の増加とともに、平均摩耗量は直線的に増加するが、 σ_v が10kgf/cm²を越えると、平均摩耗量は急激に増加する傾向がある。一軸圧縮強度が568kgf/cm²のコンクリートに対して、相対速度5.0cm/secの条件で、平均摩耗速度と水温と鉛直方向応力の関係をまとめたものが、図7.である。図からも明らかなように、水温が-10℃以下では、鉛直方向応力 σ_v に関係なく、ほぼ一定の摩耗速度を示すが、-10℃より低くなると、摩耗速度は急に大きくなる。また、

鉛直方向応力が大きくなるにつれて、摩耗速度は大きくなる。

4) コンクリートの強度と平均摩耗量の関係

すでに、一軸圧縮強度が 568 kgf/cm^2 の N. C. , L. W. C. , L. L. W. C の三種類のコンクリートと、一軸圧縮強度が 350 kg/cm^2 と 700 kgf/cm^2 の L. W. C. の計5種類のコンクリートに対する摩耗試験を行ってきたが、図1. 図2. に示すように、平均摩耗量と摩耗距離の関係からは、コンクリートの骨材の違い及び強度の違いはコンクリートの摩耗特性及び摩耗量に影響を与えない結果となっているし、図5. の摩耗速度と相対速度の関係からも、コンクリートの骨材の違い、強度の違いに関係なく $\bar{S}$ と V は一本の曲線で示される。以上の結果より判断して、海水によるコンクリートの摩耗量及び摩耗速度は、コンクリートの骨材の種類や、強度の違いによっては、ほとんど影響を受けない事が明らかとなった。この事実は、今後の氷海域の海洋構造物の設計に当って貴重な資料になるものと考えられる。

4. 実海域における海水によるコンクリート構造物の摩耗量の推定について

著者等は過去5年間に亘って、海水氷盤の移動に伴うコンクリートの摩耗量、摩耗速度に関する研究を行ってきた。実験条件の設定、実験数の不足もあるが、現時点で考えられる海水の移動によるコンクリート構造物表面の摩耗量・摩耗速度の推定法について述べる。コンクリートの海水による摩耗については、最終的に、海水の温度（海水の強度を示すパラメーターの一つである）、鉛直応力（構造物表面に作用する法線方向圧力）、摩耗距離（構造物の周辺の海水氷盤の移動距離）それに、相対速度（氷盤の移動速度）がコンクリートの摩耗量を決定する主要な因子となる。しかし、この中で、相対速度については、図5. に示されているように、他の因子に較べてそれ程大きな効果は示していないし、また、氷盤の移動速度が小さい場合は、移動量が小さい事を意味する。その事から判断すると、相対速度が $V = 5 \text{ cm/sec}$ 程度の摩耗速度で考えておけば充分と考えられる。さらに残る3つの因子のうち、摩耗量ではなく摩耗速度で表わせば、摩耗速度は鉛直方向氷力 σ と氷温で決定される事になる。その意味から考えると、コンクリートの海水移動による摩耗速度は図7. により決定される事になる。図7. を用いて摩耗量を推定する場合、氷温については、積雪がない場合は表面温度は結氷初期を除き、ほぼ大気的气温に等しく、氷盤下層は海水の結氷温度に等しい -1.8°C である。また氷盤中の氷温分布は複雑で、氷盤の移動の少ない厳冬期は直線分布と仮定すれば安全側であるが、海水の移動の激しい融解期になると氷盤厚の20～40%下層は -1.8°C 程度になる事もある。また、潮位変動によって氷盤も上下方向に移動するので、その点も充分考慮しておく必要がある。また、コンクリート構造物表面に作用する法線方向氷圧については、構造物の代表径と氷厚の比（アスペクト比）及び氷盤の移動速度に伴う氷盤の歪速度、構造物の断面形状それに海水の強度に影響を受けるため、複雑で、未だ研究成果も少ない状況ではあるが、佐伯等の結果によると、アスペクト比が5.0で、歪速度が $10^{-3} \text{ sec.}^{-1}$ 程度で、最大の法線方向氷圧力は海水の一軸圧縮強度の3～4倍程度で非常に大きな値を示すことになる。しかし、これは局部的な法線方向氷圧力で、他の領域は非常に小さくなる。また、アスペクト比が20以上になると、法線方向氷圧力はかなり小さくなる事が予想されるため、今後は構造物に作用する全氷力よりも、氷圧力分布の研究が重要となってくる。また、実際の摩耗量を推定するためには、氷盤の移動距離が与えられねばならない。氷盤の移動状況や氷象条件は各海域によって非常に異なっている。氷盤の移動について見れば、一般に水深の浅い沿岸域においては、氷盤の移動は岸沖方向が卓越し、深い海域では、海岸に平行な方向の運動が卓越する。しかし、これもIce Ridgeの発達の場合や風向、風速それに海流・潮流の強さによって複雑に変化する。北海道のオホーツク沿岸では、水深10m程度までは沿岸に直角方向に移動する傾向が強く、それより深くなると、動きそのものは螺旋を描いたりして複雑ではあるが基本的には沿岸に平行に移動する。よって水深10mより浅に建設される構造物の場合は、1年間に離岸距離の2～4倍の移動量を考えればよいことになる。また北極海においては、局地的な氷盤の動きについては調査結果もあるが、全海域については、現在アイス・レーダーの建設が計画中で、将来的にはリモートセンシング技術の発達により氷盤の移動機構、移動量も明確になると考えられる。

参考文献

1) 佐伯浩, 浅井有一郎, 泉洸, 竹内貴弘: 海水によるコンクリートの摩耗に関する研究, 第10回海洋開発シンポジウム, p.68-73, 1985

2) 浅井有一郎, 今野潔, 梶谷哲彦, 竹内貴弘, 佐伯浩: 海水による各種コンクリートの摩耗に関する研究, 第11回海洋開発シンポジウム, p.85-89, 1986

3) H.Saeki, T.Ono, N.Nakazawa, M.Sakai and S.Tanaka : The Coefficient of Friction between Sea Ice and Various Materials Used in Offshore Structure, Proc. of Offshore Technology Conference, Vol.1, p.375 - 382, 1984

4) H.Saeki, T.Ono, N.Nakazawa, M.Sakai and T.Tanaka : The Coefficient of Friction between Sea Ice and Various Materials Used in Offshore Structures, Jour. of Energy Resources Technology, Trans. of ASME, Vol. 108, p.65 - 71, 1986

5) H.Saeki, T.Ono, N.E.Zong and N. Nakazawa: Experimental Study on Direct Shear Strength of Sea Ice, Annals of Glaciology, I.G.S., 6, p.218-221, 1985

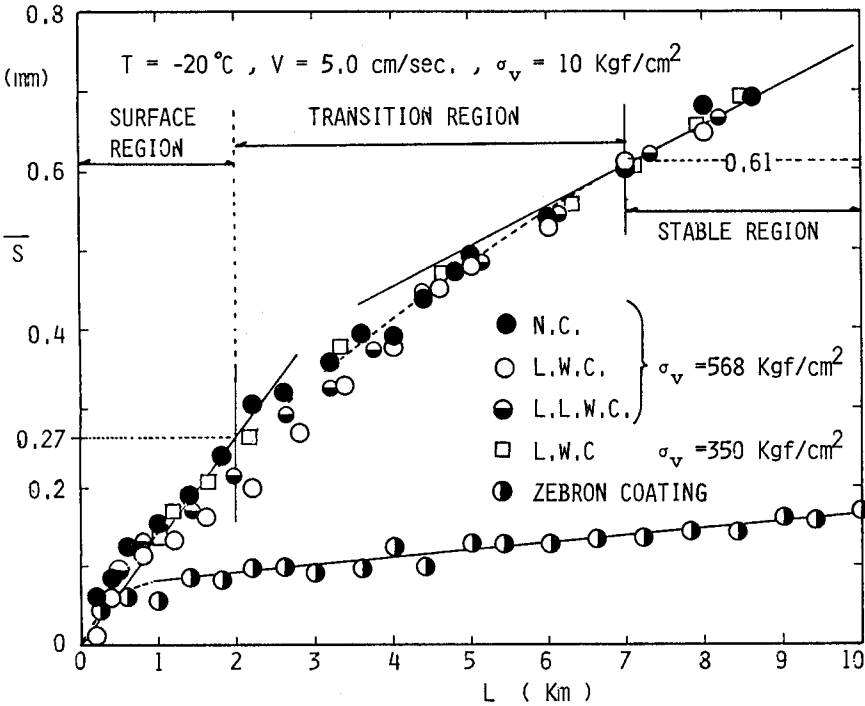


図1 各種コンクリートの
摩耗距離に対する摩耗特性

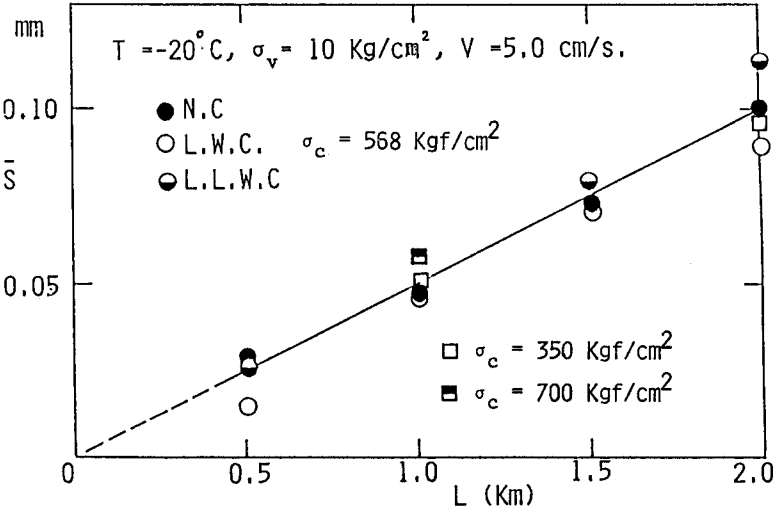


図2 Stable Region
における摩耗距離と平均摩耗量
の関係

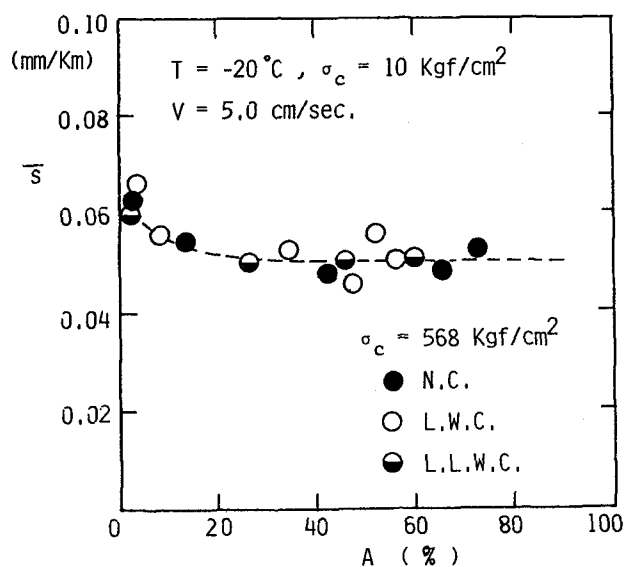


図3 骨材の占有面積と平均摩耗量の関係

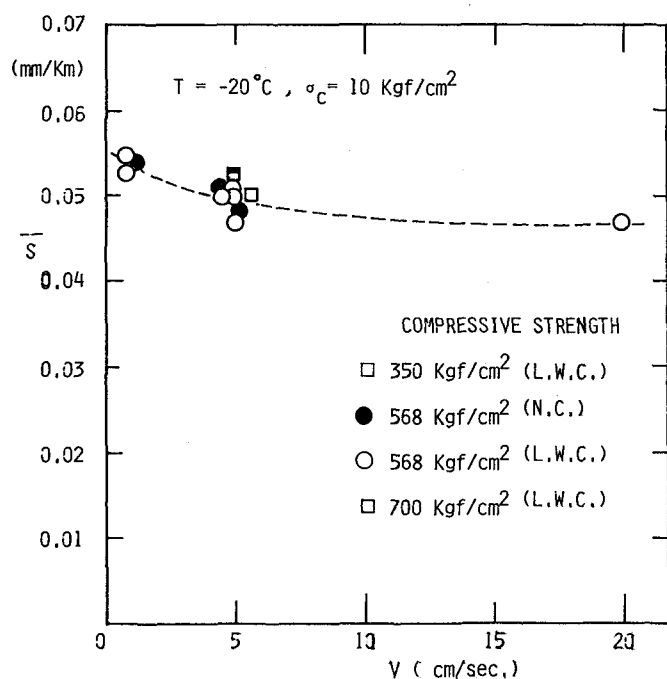


図5 相対速度と平均摩耗速度の関係

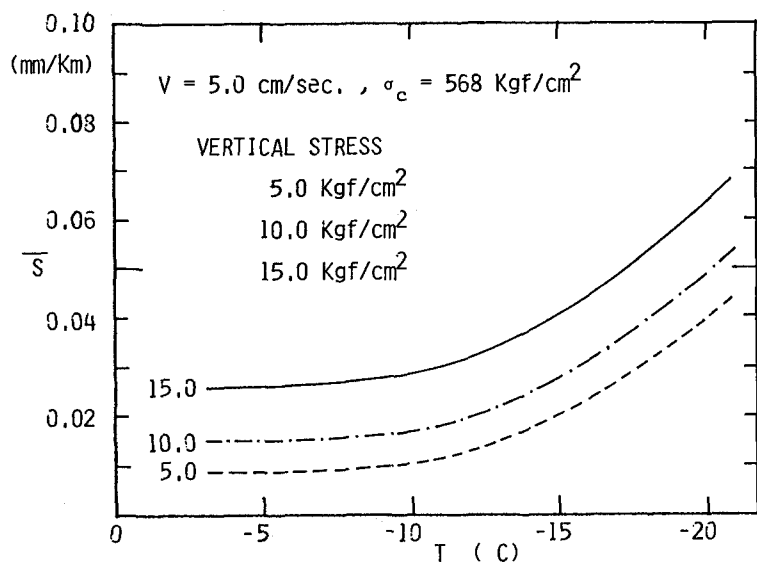


図7 各鉛直応力の対する氷温と平均摩耗速度の関係

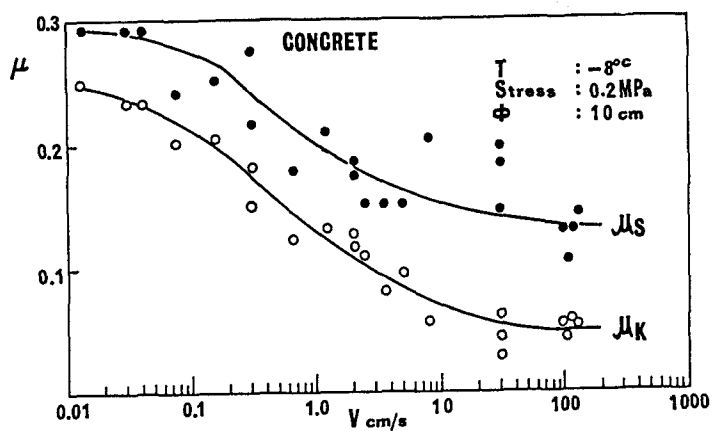


図4 相対速度と摩擦係数の関係

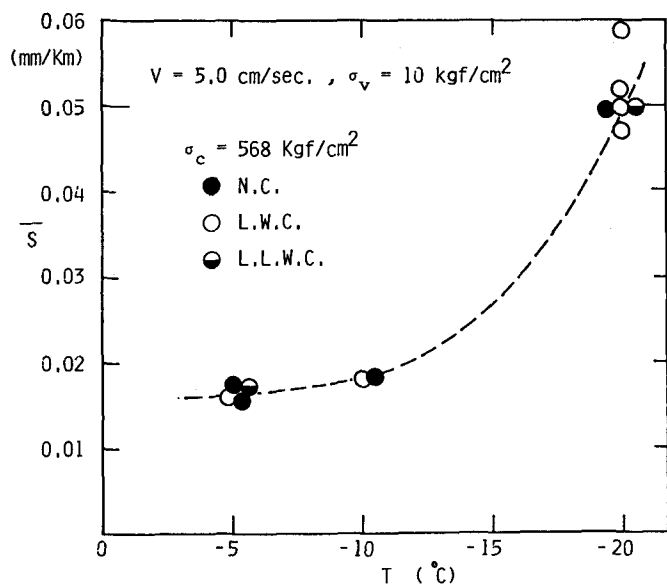


図6 氷温と平均摩耗速度の関係