

北海道大学工学部	正員	佐伯 浩
大成建設(株)土木設計部	正員	浅井 有一郎
東海大学札幌校舎	正員	泉 洸
北海道大学工学部	学生員	竹内 貴弘

1. まえがき

北海道、北部オホーツク海、バレンツ海それに中国の渤海等、冬期海水で覆われる海岸・海洋において、石油や天然ガスの探査、採掘のために、各種の海洋構造物が造られてきている。特にボーフォート海では、土砂や砂利による人工島あるいは大断面の構造物が建設されてきている。この寒冷地の海岸・海洋でのコンクリート製の構造物については、種々の解決せねばならぬ困難な問題が残されているが、それらを列举すると次のようになる。

- 1) 海水の圧力に対して充分耐えられる強度を有する事と押抜セン断に対する構造物の応力解析法の開発
- 2) 海上運搬のため軽量で水密性が高くなければならない
- 3) 寒冷地であるため、凍結融解に対して充分な耐力を有する事
- 4) 海水による摩耗に対しても充分耐えるもので有る事
- 5) 原油等を貯蔵するような構造物の場合には、油温が高い時、温度応力に対するひびわれ発生のない材料である事

上述した諸問題の解決については、1), 2), 3)の問題解決のため、最近では軽量の高強度コンクリートに関する種々の技術開発が行われてきている。海水によるコンクリートの摩耗の被害については、それが構造物の水際線近傍で起こるため凍結融解による被害か、摩耗による被害かの明確な判定は困難であるが、例えば、ボスニヤ湾に建設されているコンクリート製の海中燈台の被害や、北海道における厚岸大橋コンクリート製橋脚の被害にその例が見られる。また、1984年に北極海のボーフォート海に建設されたコンクリート製人工島 Super C I D S の今後の調査結果が待たれる。本研究は主に、海水によるコンクリートの摩耗試験方法の開発とその試験結果について述べたものである。

2. 摩耗試験方法

(1) 一般材料の摩耗試験

現在、海水に対するコンクリートの摩耗試験に関する研究成果は発表されていない。一般に摩耗は圧力を受けて接触している二つの材料が相対運動する時に起こる。相対運動の仕方によって、すべり摩耗と、ころがり摩耗に分けられるが、海水盤の移動に伴う海洋構造物の摩耗現象はすべり摩耗であるので、本研究ではすべり摩耗についてのみ考える。河本によると、すべりに対する摩耗試験機は図-1に示すように4つのTypeに分けられる。

(a)タイプは、Spindel's Abrasion Test ApparatusやSavin's Abrasion Test Apparatusと同じ原理で、平板の試験材料供試体に回転している円盤を一定荷重で押しつけるもので、単に試験片に生ずる摩耗のこん跡を測定する事により摩耗量を求めるもので、時間の経過とともに、接触圧力は小さくなる。

(b)タイプはDiesの摩耗試験機の原理で、試験材料供試体は一定の面積で円盤と接触しているため圧力は試験中変化しないが、試験材料と円盤との間に鋭い角度がついているため、供試体で円盤を削るような作用を生ずる事が心配されている。摩耗量は試験材料の重量測定により求める。

(c)タイプはKlingenstein's Abrasion Test Apparatusと同型式で、試験材料供試体が平板状をしていて、相手材料である丸棒を回転しながら押しつけるものである。供試体は摩耗により、窪みを生ずるが、摩耗量は供試体の重量測定で求める事ができる。この方法は、丸棒の中心は相対速度は0となり、外周部程速くなり、より摩耗し、中心部は摩耗が少なく、それだけ中心部の接触圧力は大きくなる。

(d)タイプは機構的には(c)タイプと同じであるが、試験供試体及び相手材料が両方とも中空の円筒形をしていて、その端面を接触させ、押しつけて一方を回転させて試験を行うもので、(c)タイプと違って、中心部は中空になっているので、圧力分布及び相対速度が一樣に近く、鈴木式摩耗試験はこの型式であり、上述した4型式の試験機のうちでは最も合理的な試験機といえる。この他、(a)タイプの改良型の大越式迅速摩耗試験機があるが、それは接

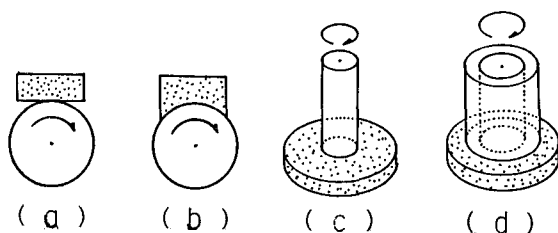


図 - 1 摩耗試験の基本型式

触圧力を一定に保つように改良されてはいるが、未だ多くの問題点を残している。材料別にみると、プラスチックについては、鈴木式摩擦・摩耗試験機を用いる事が多い。また粗骨材のすりへり試験ではロスアンゼルス試験機による試験が有名である。また、アスファルト混合物のすりへり試験には水浸摩耗試験という特殊な試験が行われている。

(2) 現実の海水による摩耗現象

海水によるコンクリート等の構造物材料の摩耗試験法は確立されていない。基本的には、実際の海洋構造物と海水間が、どのような摩耗機構になっているかによって試験方法が決定される事になる。直立の構造物においては、矩形断面の場合、移動してくる氷盤は構造物の前面で楔状に破壊が起こるため、図-2(a)に示すように、構造物前面において、上下方向に摩擦力が作用し、主として構造物前面の氷盤接触部に摩耗が発生する。これに対して直立の円断面の構造物の場合には、図-2(b)に示すように、氷盤が進行してくる側の領域で、上下方向と円周方向に摩擦力が作用する。著者等の行ったINERTA160を塗装した円断面直立杭に作用する水力の実験(Aspect Ratio 3~5)においては、杭の両側面の塗装の摩耗が著しかった。また構造物近傍の海水の破壊機構はAspect Ratio、海水の弾性率あるいは強度によって異なっているが、ある程度歪速度が大きくなると氷盤は断続的に破壊する事になる。そのような場合、構造物に作用する摩擦力も断続的に作用する事になる。著者等は過去に海水と海洋構造物に用いられる種々の材料(コンクリート、鋼、塗装した鋼、腐食した鋼等)間の摩擦係数に関して系統的な実験を行っているが、その結果を要約すると次のようになる。

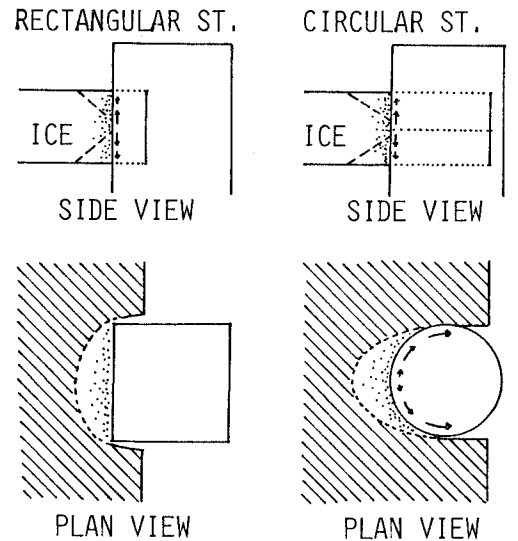


図-2(a) 図-2(b)

摩擦力の作用機構

- 1) 動摩擦係数、静止摩擦係数ともに接触面積に無関係であり、静止摩擦係数は動摩擦係数の2倍以上である。
- 2) 鉛直応力については、動摩擦係数は無関係であるが、静止摩擦係数については、鉛直応力が 5 kgf/cm^2 以下では、鉛直応力が小さい程、静止摩擦係数は大きくなる。
- 3) 海水の成長方向と摩擦の方向の関係については、静止摩擦係数、動摩擦係数ともに、その方向性に対する摩擦係数の差は顕著ではない。
- 4) 海水と供試体間の相対速度と摩擦係数については、無塗装の鋼材では、相対速度が 3 cm/sec 以上では動・静摩擦係数とも一定値を示し、それ以下の相対速度では、速度の低下とともに両摩擦係数とも大きくなる。また、コンクリートの場合には、相対速度が $20 \sim 30 \text{ cm/sec}$ 以上では両摩擦係数とも一定値を示すが、それ以下では両摩擦係数とも相対速度の低下とともに増大する。
- 5) 海水中における摩擦試験の結果では、鉛直応力 2 kgf/cm^2 、相対速度 35 cm/sec 程度では、空中での試験結果と動摩擦係数、静止摩擦係数とも、コンクリート、鋼、ZEBRON塗装の鋼ともに差がない事が明らかとなった。鉛直応力が非常に小さく、相対速度が非常に大きくない限り、海水存在による潤滑の効果は期待できない。
- 6) 材料の表面粗さと摩擦係数の間には相関が強く、材料表面の粗さが粗い程、静止・動摩擦係数とも大きい値を示す。

海水と海洋構造物間の摩擦係数に関連した結果から判断して、海水による諸材料の摩耗に関する試験装置を開発するに当たっては次のような条件を考慮すべきと思われる。

- 1) 摩擦力が材料の摩耗量に影響すると思われるので、鉛直応力及び相対速度を変化できるような試験機である事。
- 2) 摩擦係数は水中であれ、大気中であれ差はないので、試験を簡単にするため大気中の試験で良い。
- 3) 試験材料供試体の形状は、固定し易くかつ、試験後の摩耗量の測定が簡単な形状が望ましい。
- 4) 試験材料(鋼やコンクリート)が、対象とする海水の強度に較べて強い場合、海水の方の摩耗量が非常に多い事が予想される。削られた氷片が試験材料と海水の間に入ると摩耗量に影響する事が予測されるので、削られた氷片が残らないようにする必要がある。
- 5) 試験材料は一定の圧力で海水に押しつけられるため、長時間の試験中には摩擦熱により、海水表面が融解する事が予想されるので、それに対する対策が必要である。
- 6) 海水と諸材料間の摩擦係数に関する実験結果によると、静止摩擦係数は動摩擦係数よりはるかに大きい。また、現実の問題として、氷盤の動きは間歇的であり、構造物に作用する水力も断続的である事がある。そのため、摩耗の試験では、特に厳しい試験法として、静止摩擦と動摩擦が作用するような試験方法が望ましい。

既存の種々の材料の摩耗試験は、主に回転方式であるが、上述した海水による摩耗の試験では、回転方式であると

常に材料と海水が接しているため、削られた海水片が接触面に残る事と、摩擦熱の発生が予想される事と回転初期は別として動摩擦しか作用しない事になり、試験方法としては適当でない。そこで著者等は、海水による諸材料の摩耗量を測定するための試験機として、上述した1)～6)の条件を可能な限り満足するような試験機を開発した。

(3)新しい摩耗試験機

著者等の開発した摩耗試験機を図-3に示す。この試験機は3つのシステムより成り立っている。一つは、ギヤードモーターと歯車とクラッチより成る、相対速度を3種類に変えて海水を定速で往復運動させるシステムである。

これは幅8cm、高さ5～10cm、長さ70cmの直方体の海水を固定した鋼製箱を一定速度で動かす装置で、往復運動のストロークは50cm、速度は2cm/sec、5cm/secそして20cm/secの3種類に変える事ができる。これは、諸材料と海水の摩擦係数に関する実験結果に基づいて決められた。また、往復運動であるので、反転する時に静止摩擦力が作用する事になるので、静止摩擦力と動摩擦力が試験材料に作用する事になる。もう一つのシステムは試験材料を一定圧力で海水に押しつける装置で、これは油圧ポンプと油圧ジャッキそれに試験材料供試体を固定する装置よりなる。油圧ポンプの能力は0～720kgf/cm²まで可変で、長時間動作させるので水冷の冷却装置が取り付けられている。油圧ジャッキの能力は0～50tであるから、試験材料と海水の接触面積によって試験材料の受ける圧力は海水圧縮強度まで圧力を加えても充分な余裕がある。また試験に用いる試験材料供試体の形状は図-4に示すような台形断面形で、供試体固定金具も図-4に示すように、それと同様な形をしていて、二本のボルトで鋼板をととして固定する。次に第三番目のシステムは試験材料の摩耗したものや、削られた海水片を取り除くためと、摩擦熱から海水の融解を防ぐために、コンプレッサーにより二つのノズルから試験水温と同じ気温の空気を試験材料供試体と海水の接触面の両端に吹きつけ、削られた氷片と供試体の摩耗粉を吹き飛ばすとともに、海水表面を冷却する装置である。その他、海水を往復運動させるためのリミッタースイッチ、往復回数をセットするカウンター等よりなる。また、試験する直前に海水の表面を同じ粗さにするために、試験材料供試体をセットする前に図-5に示す治具を供試体のかわりにセットして海水を動かし海水表面を削り平坦にする。

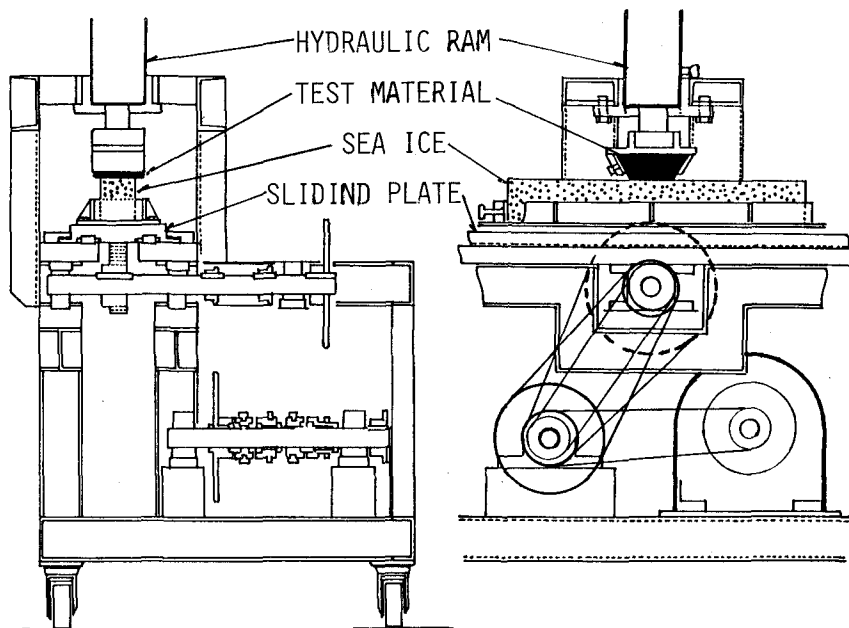


図 - 3 摩耗試験機

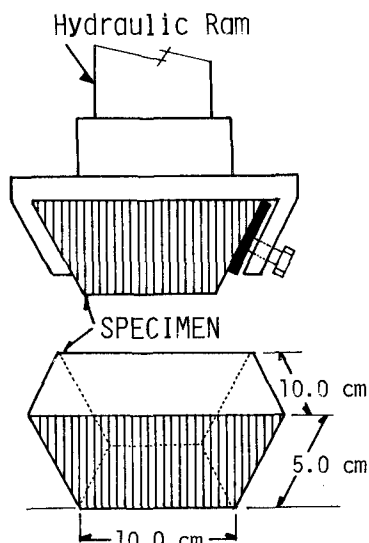


図 - 4 供試体寸方と固定金具

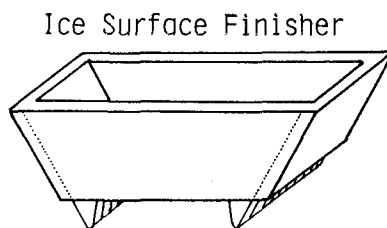


図 - 5 氷表面仕上金具

(4)摩耗試験の手順

新しく開発した摩耗試験機で試験を行う時、まず試験に用いる海水を所定の大きさ(高さ5～10cm、幅8cm、長さ70cm)に切断する。この時、海水の成長方向と摩擦面の事を考えて作製する。図-6に示すように、(a)タイプの試験は主に傾斜構造物

に氷盤が作用する時に近い状態の試験であり、(b)タイプの試験は直立構造物に氷盤が作用する時に近い摩耗試験となる。この海水を鋼製箱に入れ、鋼板をかいしてボルトで締めつける。その後鋼製箱に淡水を流し込み凍らせて海水を鋼製箱に密着させて摩耗試験機にセットする。次に図-5に示す治具で海水表面を仕上げる。その後その治具を取りはずし、表面粗さを測定した試験供試体を図-4に示す鋼製金具で固定して試験を始める。

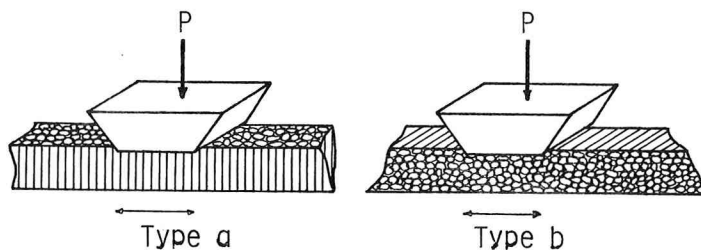


図 - 6 海水の成長方向と摩擦力の作用方向の関係

この時、表面の摩耗量を測定する摩耗距離から往復運動の回数をカウンターにセットしておく事と所定の接触圧力になるようジャッキで試験材料を海水に押しつけるが、この時、急に圧力を加えると海水にクラックが入る事もあるので、所定の圧力になるまで静かに押しつける。おおよそ $0.2 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$ の応力速度以下で押しつけると良い結果が得られる。所定の摩耗距離の試験が終わると供試体を油圧ジャッキにより引き上げ、それを取りはずす。この時、供試体の表面には薄く氷が付着している事があるので、それをブラシで取り去る。その後、図-7に示す表面粗さ測定機で摩耗した供試体表面の粗さを測定して摩耗量を測定する。

測定を終了した供試体をまた摩耗試験機にセットして試験を続ける。この表面粗さを測定する時、暖かい所に試験材料供試体を出して測定すると、コンクリートの場合には凍結融解作用を受ける可能性もあるので、試験時と同じ条件で粗さを測定する事が望ましい。本実験では図-8(a)に示すように供試体に5本の測線を設定して、その線上の表面形状を測定して摩耗量を求めた。また供試体の幅は10cmで、海水の幅は8cmであるので供試体の両側には摩耗しない部分が残るので、そこを基準に摩耗量を求める事が可能となる。試験供試体の表面形状の測定精度は $1/1000\text{mm}$ である。また、この摩耗試験機の加圧ジャッキのピストン部に歪ゲージを張りつけると摩擦力も測定でき、摩耗試験と同時に摩擦係数も測定できる事になる。

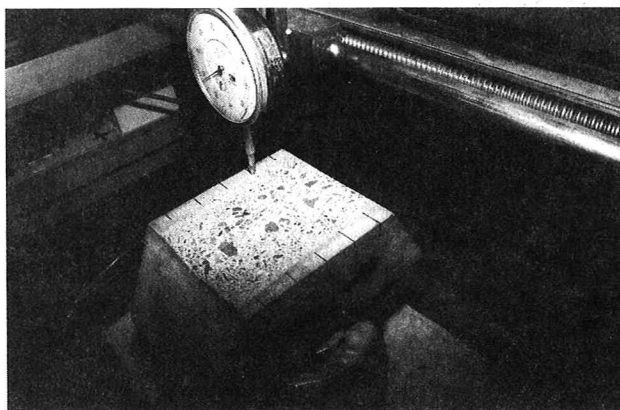


図 - 7 摩耗量測定機

3. 摩耗試験結果

本研究では3種類の材料の摩耗試験を行った。一つは普通ポルトランドセメントに通常の骨材(細骨材・粗骨材)を用いたもの(N. C.)、二つ目は普通ポルトランドセメントに粗骨材は通常の骨材、細骨材は軽量骨材を用いたもの(L. W. C)。三つ目は、コンクリート供試体に500 μ 厚ZEBRON Coatingしたものである(ZEBRON)。この供試体の製作に当たっては、材令28日の圧縮強度が 568 kgf/cm^2 とみな同一の強度にそろえてある。両コンクリートとも高強度コンクリートである。

(1) 摩耗の形状

図-8(a)は試験材料が軽量の高強度コンクリート(L. W. C)の摩耗試験前の5測線の断面形状である。この供試体の中央部が若干ふくらんでいる事が判る。これに鉛直応力 σ_v が $\sigma_v = 10 \text{ kgf/cm}^2$ で加圧し、相対速度 V が $V = 5 \text{ cm/sec}$ 、水温、大気温度とも -20°C で実験を行い、摩耗距離 L が $L = 5 \text{ km}$ の場合の結果を図-8(b)に示す。図からも明らかなように、測線1(S1)の方が測線5(S5)より摩耗量が大きくなっている。これは、試験材料供試体の厚さが正確には一定になっていないためと思われる。供試体の向きを変えてみたが5測線が一樣に摩耗する事はなかった。

また、同一の測線上では中央部の摩耗量が多く、両脇は少ないが、これは海水の方の両側面側の変形量が中央部より大きいためである。このように全ての実験で試験供試体の海水に接する部分は水平面にならないでU字型に摩耗している。そこで摩耗量 S としては、平均の摩耗量で表し、5測線の摩耗量を平均して、平均摩耗量 $\bar{S}$ として表す事にした。各測線の両端は海水と接しておらず、摩耗量は0で、この試験供試体が一様に削れていない事は、鉛直応力が場所によって異なっていて好ましい事ではないが、図-1に示されているような方法でも同様な摩耗の仕方をする事を考えると、仕方がないと思われる。

(2) 摩擦距離 L と平均摩耗量 $\bar{S}$ の関係

海水の移動に伴ない、海水と構造物表面には摩擦力が作用する。当然の事ながら、摩擦距離 L が大きくなる程、摩耗量 S は大きくなるはずである。その結果の一部を図-9に示す。この図-9は、鉛直応力 $\sigma_v = 10 \text{ kgf/cm}^2$ で相対速度 V が $V = 5 \text{ cm/sec}$ 、水温 T が $T = -20^\circ\text{C}$ の場合の普通コンクリート(N. C.)、軽量コンクリート(L. W. C.)、それにZEBRON塗装のコンクリート(ZEBRON)に対する平均摩耗量 $\bar{S}$ と摩擦距離 L の関係を調べたものである。図からも明らかなように最初の摩擦距離 L が1kmくらいまでは急激に摩耗量がふえるが、 $L > 1 \text{ km}$ の範囲では比較的ゆるやかに摩耗量が増加していく。この初期の摩耗量の急激な増加は、試験材料表面の凸部が削られるもので、この時の接触圧力は 10 kgf/cm^2 をはるかに越えていると想像される。また、両コンクリートの場合には表面のセメント部分の摩耗であって、未だ骨材にまで達していないためでもあると思われる。また両高強度コンクリート(N. C. と L. W. C.)の摩耗量にはほとんど差がない事が明らかとなった。また、ZEBRON塗装した供試体の摩耗量は、塗装の効果により、コンクリートの場合に較べて非常に少なく、コンクリートの摩耗量の $1/5$ 以下である。この理由の一つとしては、ZEBRONの場合、コンクリートに較べて静止摩擦係数、動摩擦係数とも $1/3$ 程度である事と、塗装の層内は均一であるため、摩耗が進行しても摩擦係数はほとんど変化しないものと考えられる。コンクリートの場合には摩耗が進行すると、骨材が現われてきて摩擦係数はおおきくなるが、セメントペーストの部分より骨材のすりへり抵抗が大きいので摩耗量の変化は逆にゆるやかになるものと思われる。

$$\sigma_v = 10.0 \text{ Kg/cm}^2 \quad V = 5.0 \text{ cm/sec} \quad T = -20^\circ\text{C}$$

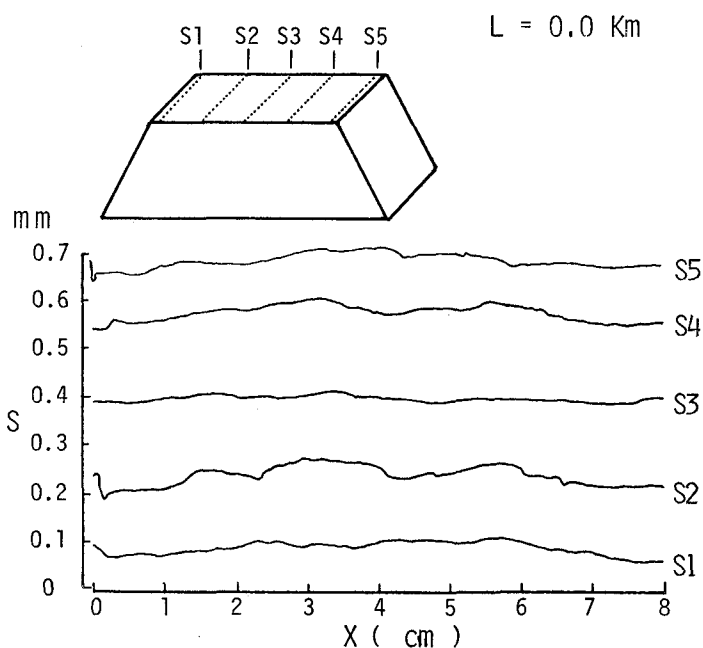


図 - 8 (a) 摩耗試験前の供試体の表面状態

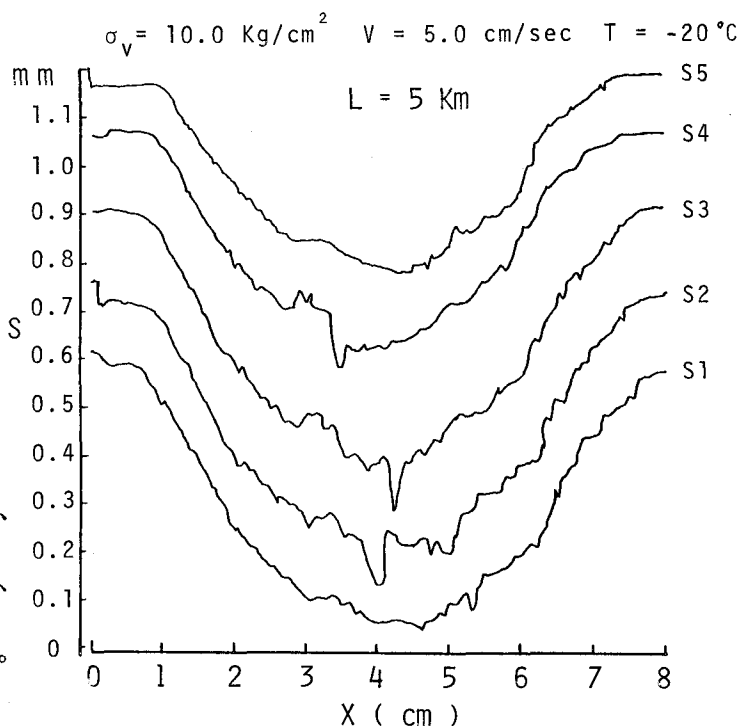


図 - 8 (b) 摩擦距離5Kmの時の表面状態

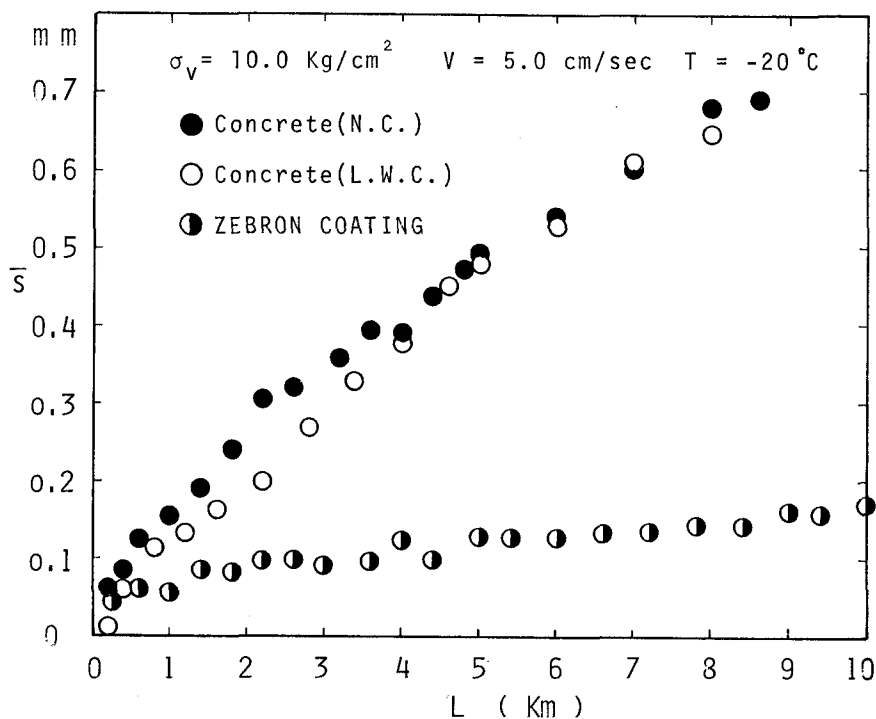


図 - 9
各材料にたいする
摩擦距離と平均摩耗量
の関係

あ と が き

著者等の開発した摩耗試験機は、若干の問題点は残っているが、一応実用になるものと考えている。鉛直応力の変化に伴う摩耗量の変化や、摩耗量に及ぼす相対速度の効果、海水の強度の効果、コンクリートの強度の効果等については後日発表する事にする。本研究の実験に協力して戴いた、北大工学部の小野敏行氏、大成建設(株)の蟹江俊仁氏に深甚なる謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 河本 実: 材料試験, 朝倉書店, 1979
- 2) プラスチック標準試験法研究会編: プラスチック実用試験ハンドブック, 工業調査会, 1981
- 3) 松野三郎, 南雲貞夫, 三浦裕二, 山之口 浩: アスファルト舗装に関する試験, 建設図書, 1980
- 4) 日本道路建設業協会編: 舗装工事に関する試験方法ハンドブック, 山海道, 1980
- 5) Saeki, H., 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, p375-382, 1984