

## 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

|       |     |       |
|-------|-----|-------|
| 大成建設  | 正会員 | 伊藤 喜栄 |
| 同 上   | 同 上 | 浅井有一郎 |
| 北海道大学 | 同 上 | 佐々木佳文 |
| 同 上   | 同 上 | 後藤 克人 |
| 同 上   | 同 上 | 佐伯 浩  |

### 1. 序 論

冬期間結氷する海域である、北極海、オホーツク海、渤海、ボフオート海、ベーリング海、それにボスニヤ湾などにおいてはコンクリート製の海岸・海洋構造物を建設する際に、その設計上、氷盤の潮流や風による水平方向の移動、潮汐等の水位変化による鉛直方向の移動に伴うコンクリート表面の摩耗を考慮しなければならない。

一般に海水による摩耗現象がみられるのは構造物の Splash Zone で、この部分は凍結融解作用も受け易い領域であるので、構造物の被害が摩耗によるものか、凍結融解によるものかの明確な判断は困難であったが、最近の凍結融解作用を受けない軽量高強度コンクリートの開発により、その耐摩耗性が注目されることとなってきた。海水による摩耗の被害防止対策として、鋼製構造物に対しては重防食用の種々の合成材料が耐摩耗性にも優れている事が明らかにされている。

今回までに我々は、海水のみによる摩耗特性について研究を続けた結果、構造物の摩耗量の推定は可能になってはきたが、最近のボスニヤ湾の海洋観測塔の報告を見ると一冬の間に平均 4 ~ 5 cm、最大で 10 数 cm もの摩耗が見られている。これは凍結融解作用を受けない高強度コンクリートであり、海水と構造物間の接触圧、相対速度、摩耗距離、氷温などから推定した摩耗量より大きくなっている。過去の研究からは氷温の低下に伴うブラインの中での塩類の析出により摩耗量が増加するという結果が得られたが、現実の問題としては海水中に砂を含んでいて、そのために推定以上の摩耗量が報告されたのではないかと考えた。

そこで今回は現在まで系統的に行なわれてきた海水による構造物の摩耗に関する研究結果及び砂等の不純物を含んだ海水によるコンクリートの摩耗特性について報告するものである。

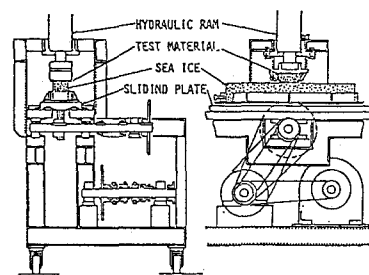
### 2. 実験装置

実験には佐伯等の海水諸材料間の摩擦係数に関する詳細な研究成果に基づいて開発された図-1 に示すような摩耗試験機を用いた。

以下に、この試験機の特徴を示す。

- 1) 海水は材料に対して往復運動をするため、材料には静止摩擦力、動摩擦力の両方が作用する。
- 2) 海水と材料間の相対速度を変化させることができる。
- 3) 海水と材料間の鉛直応力を自由に設定できる。
- 4) コンプレッサーにより、海水と材料間の接触面の氷片及び摩耗粉を除去する。

5) 摩擦熱からの融解を防ぐため、コンプレッサーの冷気で海水表面を冷却する。 図-1 摩耗試験機



試験後には、測定精度が 1/1000 mm の摩耗量測定機により、平均摩耗量  $S$  (mm) を求めることにした。

### 3. 過去の実験結果

過去の研究においては、主に次に示す 7 つの項目について実験を行ってきた。

- 1) 海水の方向性の効果
- 2) 海水による材料の摩耗機構

- 3) 相対速度の影響
- 4) 氷温の効果
- 5) 鉛直応力の効果
- 6) コンクリートの強度と平均摩耗量
- 7) 材料の表面処理

まず海氷の方向性による効果は、海水が方向性を持つ異方向の材料であることにより摩耗現象や摩擦係数に影響があるかどうかを調べたものだが、方向性による影響はないという結論を得た。

海氷による種々の材料の摩耗機構については、通常の骨材の高強度コンクリート（N・C）、粗骨材に軽量骨材を用いた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高強度コンクリート（L・L・W・C）、強度の小さいL・W・Cなどについて調べて見た。それによって摩耗の進行上、Surface Region・Transition Region・Stable Regionという三つの段階に分けられた。これは表1に示すように、それぞれ性質が異なっている。しかし、Stable Regionになるまでの総合の摩耗量は0.62mm程度であり、構造物の設計上、ほとんど問題にはならない。

更に実験上Stable Regionまで達するには長時間を要するので、これ以降はコンクリート供試体の表面を切断して、あらかじめStable Regionの状態にしてから実験を行なうこととした。

また、三つの段階を通したときのStable Regionでの平均摩耗速度と表面を切断したときの平均摩耗速度とは、一致していた事もここに付け加えておく。

相対速度の影響について述べると、摩擦係数にはかなり影響をおよぼす。20 cm/sec以上ではそれほど変化は見られないが、それ以下では速度の減少に伴い、摩擦係数は急激に増加することがわかっている。これに対して、平均摩耗速度は相対速度が10 cm/secまでの範囲では、緩やかに減少するが、10 cm/sec以上では速度に関わらずほぼ一定となった。

このことから、相対速度が小さいと、摩耗速度はある程度大きくなるが、逆に摩耗距離が大きくなりたくないため、実用上の事を考慮すると、相対速度、5 cm/sec程度がコンクリートの摩耗特性を調査する上で適当であると考え、これ以降の実験はすべて相対速度を5 cm/secとして行なった。

また、氷の強度も摩耗に大きな影響をおよぼす。氷の強度を示す指標としては、氷温が明らかにされている。氷温が-10℃以上では平均摩耗速度に大きな影響を及ぼさないが、-10℃以下になると平均摩耗速度が急激に増加する。これは、海氷のブライン中の塩類が約-8℃で析出しはじめるために、摩耗速度が加速したものと思われる。

鉛直応力に関しては、摩擦係数に影響を及ぼさないことが確認されている。もちろん、鉛直応力の増大につれて、摩擦力は大きくなるわけで、平均摩耗速度は他が同一条件であるなら、鉛直応力に比例することも過去の実験で証明されている。

次にコンクリートの強度と平均摩耗量については、一軸圧縮強度が568 kg/f/cm<sup>2</sup>のN・C、L・W・C、L・L・W・Cと一軸圧縮強度が350 kg/f/cm<sup>2</sup>、700 kg/f/cm<sup>2</sup>のL・W・C、計5種類のコンクリート供試体に対して摩耗試験を行なった。その結果、コンクリートの骨材や強度は、平均摩耗速度には無関係であることがわかった。

そして最後に表面処理の影響についてはコンクリート表面の高分子材料を被覆したり、含浸コンクリート等の超高強度コンクリートを摩耗対策として考えている。その結果が表2である。これはすべて、氷温-20℃、鉛直応力10 kg/f/cm<sup>2</sup>、相対速度5 cm/secで実験したようにコンクリート中の骨材や強度には無関係であるが、表面をZebronコーティングしたものは通常用いたコンクリートの1/5程度しか摩耗していない。またP I C版含浸コンクリートの鋼繊維を混入したものは、摩耗の課程で鋼繊維が剥離してしまい、全体として摩耗量が多くなる結果となった。

#### 4. 砂を含んだ氷の摩耗試験の実験

今回、砂を含んだ海氷による摩耗実験を行なうにあたって、まずどのように砂を均等に含み、かつ気泡のない氷を作製するかが問題となった。本実験では木枠の中に雪と砂を均一に混ぜて入れ、その上から水を入れる方法

| Region                | Surface               | Transition       | Stable   |
|-----------------------|-----------------------|------------------|----------|
| L; 摩耗距離 (km)          | 0 ~ 2 (km)            | 2 ~ 7 (km)       | 7 (km) ~ |
| S; 平均摩耗速度 (mm/km)     | 0.135                 | 0.07             | 0.05     |
| A; コンクリート表面の骨材占有率 (%) | 0                     | 0 ~ 10           | 10 ~     |
| コンクリート表面の状態           | 表面の凹凸、表層セメントペースト部分の摩耗 | 表面の粗骨材、細骨材の一部が露出 | 粗骨材の完全露出 |

表-1 コンクリートの摩耗機構

| 材 料 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 平均摩耗速度 (mm/km) |
|---------------------------|----------------|
| N・C (σ=568)               | 0.0470         |
| L・W・C (σ=350)             | 0.0500         |
| (σ=568)                   | 0.0554         |
| (σ=700)                   | 0.0586         |
| L・L・W・C (σ=568)           | 0.0564         |
| 含浸コンクリートP I C版            | 0.0552         |
| 含浸コンクリートP I C版 (鋼繊維混入)    | 0.0937         |
| Zebron                    | 0.0100         |

表-2 各種コンクリートの平均摩耗速度

で行なった。初めに木枠を作る。これは先程と同じ摩耗試験機を使用するために、幅8 cm、長さ70 cm、高さ10 cmの大きさに定めた。そして、水がもれないようにシリコンを内側、特に接合部分に塗る。更に出来上がった氷が取り出し易いように、内側にビニールシートを貼った。

次に木枠の体積に見合うように、雪を大きな容器に入れ、その中に定めた質量の砂を入れて、かき混ぜる。この時、“粉雪”等の固まりにくい、さらさらした雪の方が十分に砂と混じり合う。そして十分に砂が混じり合った状態になった後に木枠に水を入れる。ただし、雪が解けてしまつては意味がないので、あらかじめ0℃近くまで冷やしておいた水をゆっくりと入れる。そして、水を入れ終わったら、最後に表面を押しつけて、気泡を取り除く。

こうして作成した氷は、砂も均等に含まれ、気泡も見られず、実験に用いるのに十分適当であった。また実験条件を氷温-10℃、相対速度5 cm/sec、鉛直応力10 kg f/cm<sup>2</sup>、15 kg f/cm<sup>2</sup>と設定した。実験に用いた供試体は、粗骨材に軽量骨材を用いた軽量高強度コンクリート(L.W.C)である。

実験は次の三項目について行なった。

- 1) 平均粒径( $\bar{d}$ )=0.7 mmの珪砂を含んだ水中の砂の濃度変化による摩耗量の比較
- 2)  $\bar{d}$ =0.7 mmの珪砂と $\bar{d}$ =0.14 mmの細砂との粒径の違いによる摩耗量の変化。
- 3) 鉛直応力の効果

1) の濃度は重量濃度で0.4% (木枠内に約20 gの砂)、1.0%、2.0%、4.0%、6.0%、8.0%の6種類とし、2) の粒径の違いは、濃度を0.4%に定めて行なった。3) の鉛直応力は10 kg f/cm<sup>2</sup>と15 kg f/cm<sup>2</sup>での摩耗量の違いを比較した。

- 1) L.W.Cコンクリートで行なった濃度変化による摩耗量の違い

同種類の軽量高強度コンクリート(L.W.C)を使用して、濃度別に摩耗量を調べた。その結果を図2に示す。

これから判断すると、過去の海水のみの実験同様、摩耗量は摩耗距離に比例している。また、氷に含まれる砂の濃度が増加する程、摩耗量は増加している。

更に砂の濃度と平均摩耗速度との関係を片対数グラフにしたものを図3に示す。図3から明らかなように、コンクリートの摩耗速度は、二段階に大別できる。氷中の砂の濃度が0~0.5%程度までは、海水のみの場合の7割増しのオーダーで急激に増加し、その後は緩やかな一本の直線で近似出来る。したがって、砂を少し含んだだけでも、摩耗量に大きな影響を与えることがわかる。これは砂を含むことによって氷の表面とコンクリート材料間の摩擦係数が増大するからと考えられる。

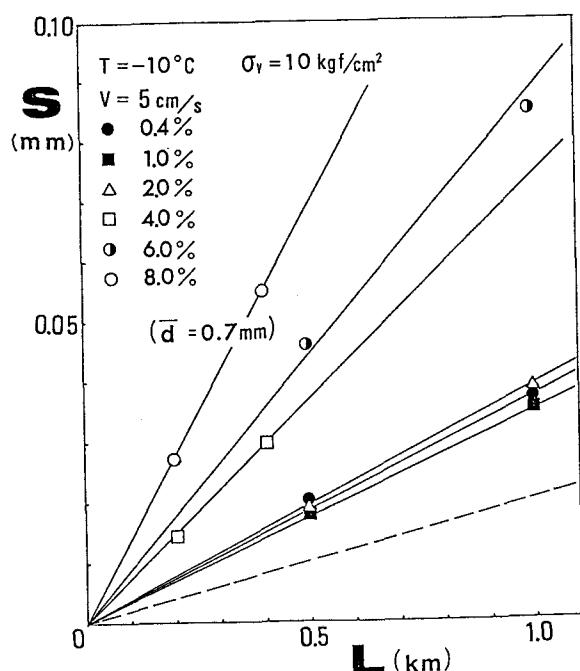


図-2 砂の濃度別にみる摩耗距離と摩耗量

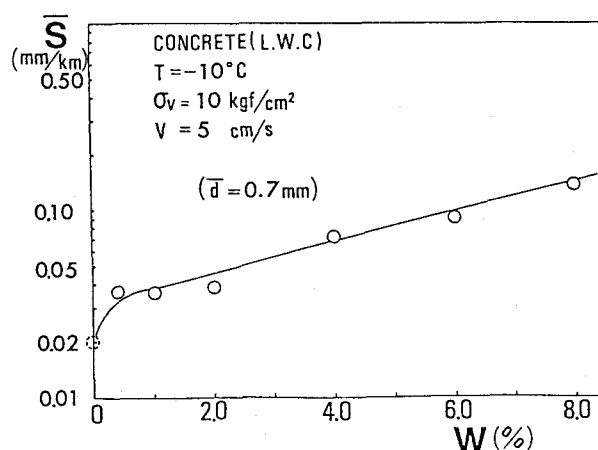


図-3 砂の濃度による摩耗速度

## 2) 砂の粒径による効果

海水に含まれる砂の粒径の大小が摩耗量に及ぼす影響を図4に示す。これはさきほど述べた二種類の粒径に対して行なった実験である。また、濃度は二種類共に0.4%とした。

図4から明らかではあるが、同じ濃度であるならば、粒径が大きい方が摩耗量に大きな影響を与える。1)で述べたように、粒径が大きくなると、表面の平均粗さも増大し、それが摩擦係数をも増大させることになる。同一の接触圧であるなら、当然摩擦係数も粒径の増大とともに大きくなるため摩耗量に当然大きな差がでてくる。

更に氷の表面上に砂粒子の一部が露出している時に、例えば、粒径の大きな砂も小さな砂も同じ面積だけ表面に露出していた場合、粒径の大きな砂はまだ大部分が氷中にあるのに対して、粒径の小さな砂は逆に大部分が露出していることになる。すなわち粒径の小さな砂は氷の表面に露出してくると、剥離し易くなり、コンクリートの摩耗に及ぼす効果が小さく、粒径の大きな砂は、まだ大部分が氷中にあるわけだから剥

離せず摩耗に大きな効果がある。この氷の表面は実験中にはコンプレッサーによって剥離した砂を吹き飛ばすため、この剥離した砂の量は、はっきりとは確認できなかったが、コンクリート供試体の淵に付着した砂を実験後に比較すると、粒径の小さな砂の方がより多く付着していたことも裏付けになっている。また図4の破線は砂の入っていない海水によるものである。

## 3) 鉛直応力の効果

図5は0.4%濃度の二種類の砂を含んだ氷について鉛直応力を $10 \text{ kg/cm}^2$ ・ $15 \text{ kg/cm}^2$ について摩耗試験を行なった結果である。過去の実験では摩耗量は鉛直応力に比例し、また摩擦係数は鉛直応力によらず一定であった。

そして図5に示す通り、砂を含んだ氷に対しても同様の結果を得た。

## 5. 海水の調査

今回の実験では、様々な濃度の砂まじりの氷について行なった。

また粒径の違いについても二種類ではあるが行なった。しかし実際の海水中に含まれている不純物の濃度や粒径については、詳しいことは不明であった。

そこで、今回、図6に示してある、雄武、幌内、北見枝幸に接岸した流氷を調査した。今年は例年にない暖冬のため、流氷の接岸が大幅に遅れたために、数多くのサンプルを採取できなかったが、表3に示すような数値を得た。また、この表の状態という項目にある、きれいな氷、きたない氷というのは採取したときの見たままの状態であり、青白く氷の表面に不純物が見当たらない海水を“きれいな氷”、砂浜に打ち上げられたりして氷の表面に砂が付着し、くすんだ色をした海水を“きたない氷”とした。そして空白部分は“きれいな氷”と“きたない氷”のどちらとも言えない中間の氷である。

砂浜まで遡上して、表面が砂だらけの海水を採取する時は、その表面を除いた内側の部分だけをサンプルとして採取した。

この表を見る限りでは、海水は最大重量濃度でも、0.37%程度しか不純物を含んでいない。春先の暖かくなる融氷期に多少変化するために、ある程度の濃度増加を考慮したとしても、今回の重量濃度の最小値0.4%以下の砂を含んだ氷についても実験する必要がある。

また、海水に含まれていた砂の平均粒径は $\bar{d} = 0.03 \text{ mm}$ 程度であった。これも、平均粒径に見合った砂を用いた実験が必要だと思われる。

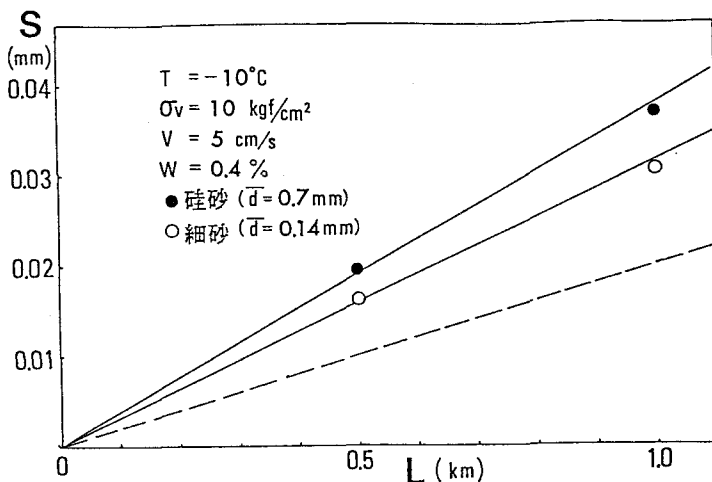


図-4 砂の粒径別平均摩耗量

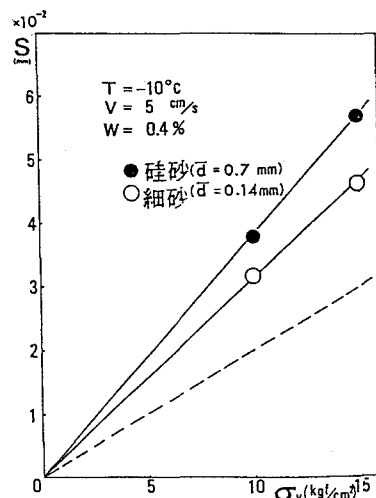


図-5 摩耗量に及ぼす鉛直応力の効果

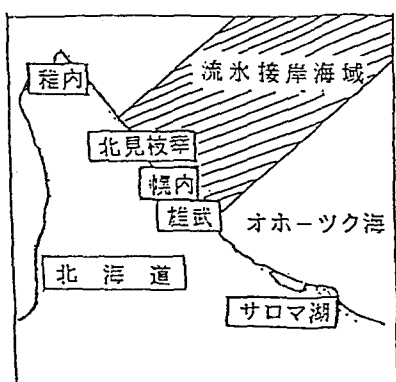


図-6 流水の接岸地域

|      | 状 体   | 水重量(kg) | 不純物の重量(g) | 重量濃度(%) |
|------|-------|---------|-----------|---------|
| 北見枝幸 | きれいな水 | 1.725   | 0.01639   | 0.001   |
| 北見枝幸 |       | 0.775   | 0.24810   | 0.032   |
| 北見枝幸 | 汚い水   | 0.900   | 1.05707   | 0.117   |
| 幌内   | きれいな水 | 1.015   | 0.01193   | 0.001   |
| 幌内   | 汚い水   | 0.995   | 2.54569   | 0.256   |
| 幌内   | 汚い水   | 1.200   | 4.41985   | 0.368   |
| 雄武   | きれいな水 | 0.850   | 0.01289   | 0.002   |
| 雄武   |       | 1.005   | 0.10784   | 0.011   |
| 雄武   | 汚い水   | 0.765   | 0.21332   | 0.028   |

表-3 流水の調査結果

しかし、暖冬異変による影響や、サンプルの数不足など幾つかの因子を考慮に入れると、表3に示した数値が平均的なものなのかどうか、今後更に数多くのサンプルを採取して、調査を進めていかねばならない。

## 6. 結 論

今回の実験結果から以上の結論を得た。

- 1) 海水中に砂などの不純物が含まれると摩耗量は増大する。
- 2) 海水中に含まれる不純物の濃度が大きい程、摩耗量は増大する。
- 3) 海水中に含まれる砂などの粒径は大きい程、摩耗量は増大する。
- 4) 海氷によるコンクリート構造物の摩耗量は、海氷に砂を含んでいる場合も、含んでいない場合も、コンクリートと海氷間の接地圧（鉛直応力）に比例する。
- 5) 氷海域での、海氷に含まれる不純物の濃度や粒径などの充分な調査が必要である。

## 参考文献

- 1) 佐伯浩、浅井有一郎、泉湧、竹内貴弘、  
：海氷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) Y.Itoh,A.Yoshida,K.Kato,K.Sasaki,and H.Saeki  
：An Experimental Study on Abrasion of Concrete Due to Sea Ice,Proc.of O.T.C,1986
- 3) 浅井有一郎、今野潔、梶谷哲彦、竹内貴弘、佐伯浩  
：海氷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
- 4) Y.Itoh,A.Yoshida,Y.Asai,K.Sasaki,and H.Saeki  
：Testing Methods on Sea Ice-Concrete Sliding Abrasion,Proc.of P.O.A.C,1988