

## コンクリート製海洋構造物の水盤移動による摩耗量の予測方法に関する研究

Estimation Method for Abrasion of Amount of Concrete Offshore Structures

伊藤 喜栄\*・浅井 有一郎\*・折谷 徳弘\*\*・佐伯 浩\*・橋 治国\*

Yoshihide. Ito, Yuitiro. Asai, Norihiro. Oritani, Hiroshi. Saeki and Harukuni. Tatibana

Abrasion resulting from movement of sea ice sheet must be considered during the design of concrete offshore structures for regions where the sea freezes in winter. Such areas include the Arctic Ocean, the sea of Okhotsk, the Gulf of Bohai and the Bering Sea. Therefore, it is very important in the design of concrete structures for very cold region to estimate the abrasion amount due to a movement of sea ice sheet.

keywords: concrete offshore structures, abrasion rate, sea ice

## 1. はじめに

冬期結氷する海域に建設されるコンクリート製構造物の設計においては、構造物に働く氷力ほかに、氷盤の移動による構造物表面の摩耗を考慮しなければならない。氷盤移動による構造物の摩耗の被害としては、ボスニヤ湾の海中燈台や、北海道においても厚岸大橋の橋脚の摩耗などがあつた。またこのような寒冷な海域では、構造物を建設後に補修することは大変に困難であり、メンテナンスフリーが望まれる。しかし、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るため、水深の浅い海域を運搬することができなくなる。そのため、氷盤の移動によるコンクリート表面の摩耗量の正確な推定が必要となる。著者らはこれまでに、氷盤移動による種々のコンクリートの摩耗に関する系統的な実験を行ってきた。本研究はそれらの結果に基づいて、氷盤移動によるコンクリート製海洋構造物表面の摩耗量の推定方法について報告するものである。また昨年著者らが北海道内の橋梁橋脚の氷盤移動による摩耗量の詳細な調査を行ったので、その実測値と著者らの開発した摩耗量の推定値との比較も行った。

## 2. 海水氷盤の移動によるコンクリート表面の摩耗

摩耗実験は図1に示したように、氷を往復運動させその上に試験供試体を押し付けることにより摩耗させる方法で行った。実験に用いたコンクリートは、一軸圧縮強度が約568kg/cm<sup>2</sup>の通常骨材の高強度コンクリートN.C.と粗骨材のみ軽量骨材の高強度コンクリートL.W.C.と粗・細骨材ともに軽量骨材の高強度コンクリートL.L.W.C.、それに一軸圧縮強度が約350kg/cm<sup>2</sup>の軽量高強度コンクリートL.W.C.の4種類である。この実験により得られた結果を以下にまとめた。

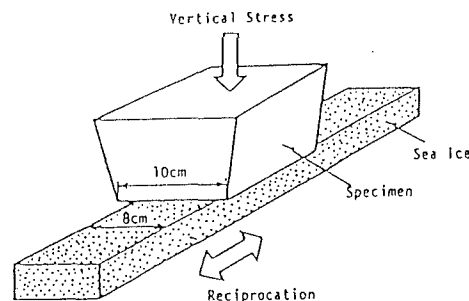


図1 摩耗試験の方法

- 1) コンクリートの強度および骨材の種類は、摩耗速度（氷盤の移動距離1km当りの平均摩耗深さ、mm/km）に影響を与えない。
- 2) 海水および淡水氷ともコンクリート表面の平均摩耗量は、氷盤の移動距離（摩耗距離）に比例して直線的に増加する。
- 3) 氷盤の移動速度が10cm/sec以上では、コンクリートの種類に関係なく一定の摩耗速度を示し、移動速度が10cm/sec以下では、速度の低下とともに摩耗速度は若干大きくなる。移動速度1cm/secの場合、摩耗速度増加は10cm/sec以上の場合より17%ほどであり、氷盤の移動速度を5cm/secと考えておけば安全側である。
- 4) 氷とコンクリート表面間の接触圧（鉛直応力）が増加するほど、摩耗速度は大きくなる。
- 5) 水温が低下するほど（強度が増加するほど）摩耗速度は大きくなる。淡水氷の場合は水温の低下とともに摩耗速度は直線的に増加する。これに対して海水の場合は、水温が-8℃以下になると急激に摩耗速度は大きくなる。この理由は、水温が-8℃より低くなると海水中のブライン中の塩類の一部が析出し、それが摩耗を大きくしていると考えられる。
- 6) 氷の結晶の方向性、氷とコンクリート間の相対速度は摩耗速度にはそれほど大きな影響を与えない。

\* 正会員 北海道大学工学部土木工学科（001 札幌市北区北13西8）

\*\* 学生会員 北海道大学大学院

よって海水の移動によるコンクリート表面の摩耗速度に影響を与える要因は、主に氷盤がコンクリートに作用する接触圧、それに水温（強度）である。図2は平均摩耗速度と水温、接触圧の関係を示したものである。しかし、この結果を用いた推定値より大きい摩耗量の報告がある。例えば、ボスニヤ湾の海洋観測塔の調査報告では一冬の間に平均4～5cmもの摩耗が見られている。この原因としては、海水中に微粒砂等の固い異物が混入している場合、それが含まれていない水に較べて摩耗量が大きいことから、この海域の海水中に微粒砂等が含まれていたものと考えられる。著者らは砂を含んだ海水によるコンクリートの摩耗実験も行っており、その結果は次の通りである。

- 1) 海水中に微粒砂等の不純物が混入すると摩耗量が増大し、その濃度が高いほど摩耗速度は大きくなる。
- 2) 海水中に含まれる微粒砂などの粒径が大きいほど、摩耗速度は大きくなる。
- 3) 微粒砂を含んだ海水は、それを含まない海水と同様に水温の低下（強度の増大）と共に、また接触圧の増加とともに摩耗速度は大きくなる。

図3は微粒砂を含んだ海水と、それを含まない海水の-10℃における摩耗速度と接触圧の関係を示したものである。これを見ると、平均粒径が0.14mmで砂含有率 $w$ が0.4%の場合、その摩耗速度は砂を含まない海水（ $w=0\%$ ）の約1.7倍であり、また平均粒径が0.7mmの場合は約2倍となる。さらに砂を含まない淡水水の摩耗速度は、海水と較べて約0.6倍となっている。よって、砂を含んだ海水、砂を含まない海水そして淡水水のいずれの場合についても、その水温と接触圧が与えられると、図2と図3に示した関係より平均摩耗速度を求めることができる。

図3 コンクリートの平均摩耗速度と接触厚の関係  
例えば砂含有率が0.4%で、その平均粒径が0.14mmの海水について、接触圧が50kg/cm<sup>2</sup>で水温が-5℃だとすると、図2よりそのときの平均摩耗速度は約0.09mm/mmで、図3の関係よりこれを1.7倍することにより平均摩耗速度は0.153mm/mmとなる。

### 3. 海水中に含まれる微粒砂に関する調査

著者らは、北海道のオホーツク海沿岸で実際の流水中に含まれている微粒砂量の調査を行った。流水を採取した地点は図4に示したように、北見枝幸、幌内、雄武の沿岸である。それぞれの地点で採取された微粒砂の粒度分布を調べた一例が図5であるが、北見枝幸の場合は沿岸付近で採取した試料で、他は岸から50mの地点のものである。それぞれの中央粒径は北見枝幸で0.177mm、幌内、雄武で0.165mmとなっていて、粒度分布はほぼ同じである。表1に今回の調査地点、試料の状態、水中の微粒砂含有量そして中央粒径値をまとめた。これをみると、微粒砂含有量については採取した試料は岸からの距離には特に関係がなく、その最大値は約0.37%で、これ

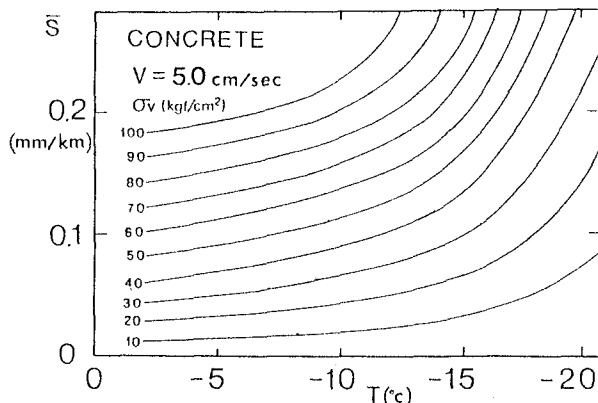


図2 コンクリートの平均摩耗速度と水温の関係

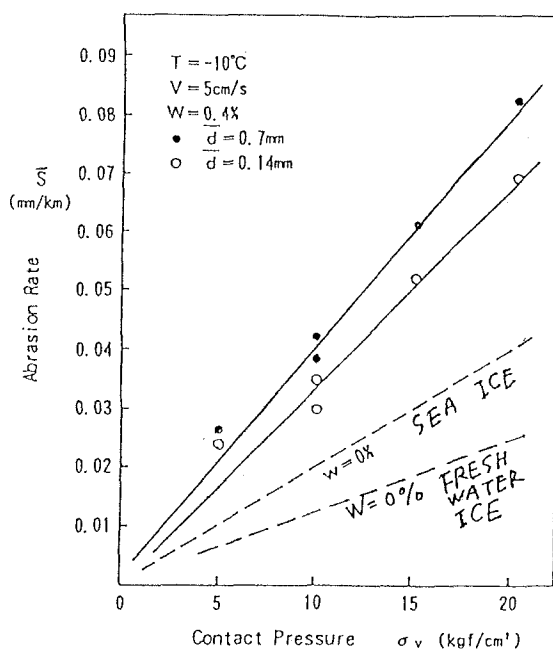


図3 コンクリートの平均摩耗速度と接触厚の関係

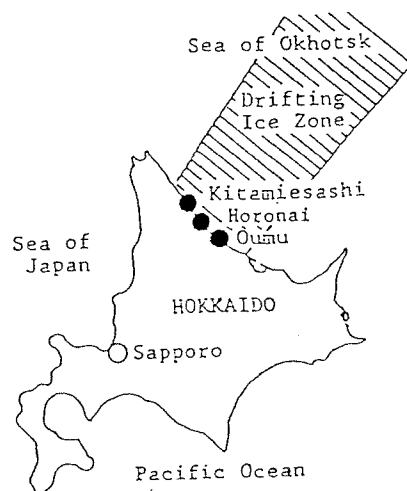


図4 流水採取地点

はこの海域における海水中の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みられない。その値は試料全体の7割が約0.12~0.17mmであった。この結果、海水中に微粒砂等の不純物が含まれていることは明かであり、コンクリート製海洋構造物の水盤移動による摩耗量を推定する場合、この影響を考慮しなければならない。よって北海道のオホーツク海沿岸における摩耗量の推定には、含有量として約0.4%、中央粒径として0.17mm前後を考えればよいと思われる。

| 水域   | 岸からの距離  | 試料       | 固形成分含量 % | 中央粒径値 mm |
|------|---------|----------|----------|----------|
| 雄 武  | 岸       | 流水(上)    | 0.0038   | 0.144    |
| 雄 武  | 岸       | 流水(下)    | 0.0014   | 0.005    |
| 雄 武  | 岸       | 流水(屑)    | 0.0107   | 0.054    |
| 雄 武  | 岸       | 流水(濁)    | 0.0277   | 0.117    |
| 雄 武  | 1 0 m   | 流水(25cm) | 0.0015   | 0.020    |
| 雄 武  | 5 0 m   | 流水(30cm) | 0.0894   | 0.165    |
| 雄 武  | 1 0 0 m | 流水(屑)    | 0.0095   | 0.144    |
| 幌 内  | 5 m     | 流水       | 0.0065   | 0.144    |
| 幌 内  | 5 m     | 流水(青)    | 0.0012   | 0.010    |
| 幌 内  | 1 5 m   | 流水(濁)    | 0.2546   | 0.177    |
| 幌 内  | 4 0 m   | 流水       | 0.1020   | 0.144    |
| 幌 内  | 5 0 m   | 流水(濁)    | 0.3683   | 0.165    |
| 北見枝幸 | 岸       | 流水(清)    | 0.0121   | 0.165    |
| 北見枝幸 | 岸       | 流水(濁)    | 0.3739   | 0.177    |
| 北見枝幸 | 岸       | 流水(濁)    | 0.1162   | 0.177    |
| 北見枝幸 | 岸       | 流水(大)    | 0.0318   | 0.177    |
| 北見枝幸 | 岸       | 流水(青)    | 0.0009   | 0.035    |

表 1 流水中に含まれている砂の調査結果

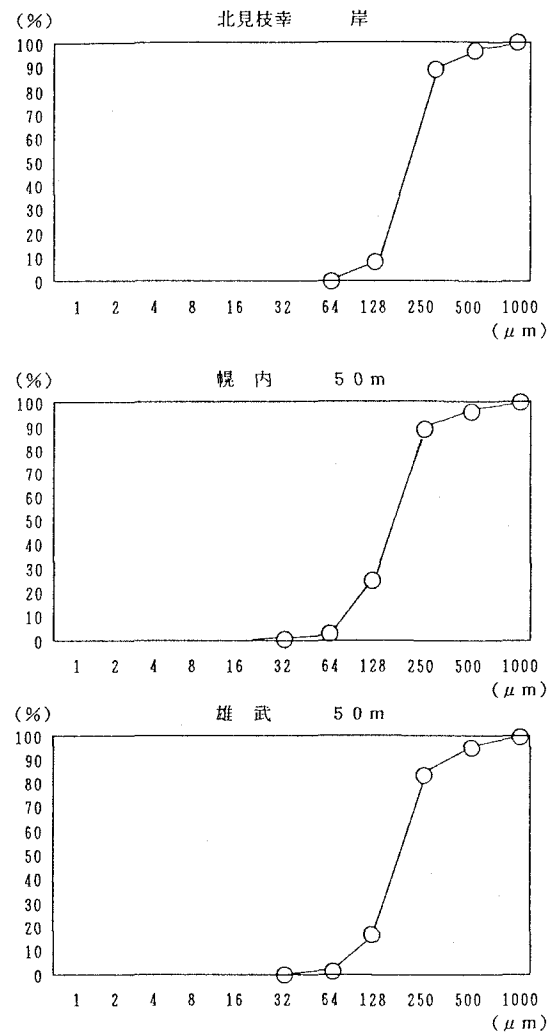


図 5 海水中に含まれている砂の粒度分布

#### 4. 摩耗量の推定方法

図6に摩耗量の推定方法の手順を示す。精度よく摩耗量を推定するためには、構造物の形状と断面形状および寸法、氷象条件として氷の形態、氷厚、氷温、氷の強度、それに氷中の砂の粒径と濃度、また氷盤の運動条件としては氷盤の移動速度、移動距離そして移動方向を調べ、さらに潮汐の条件を調べるにより可能となる。まず平均摩耗速度Sの決定に当たっては、これまで述べたように接触厚 $\sigma_H$ 、氷温T、材料の種類、そして氷中の砂の濃度と粒径が与えられねばならない。接触圧の分布については、その構造物の形式、断面形状・寸法により変化するが、佐伯らや田中らの実験結果によると、円断面構造物でアスペクト比（構造物の幅÷氷厚）が5.0の場合、氷盤貫入時の歪速度によって接触圧は異なるが、最大で氷の一軸圧縮強度の約4倍となっている。また円断面構造物に作用する摩擦力の分布は氷盤の進行方向より30° くらいの位置で最大であり、それは一軸圧縮強度の0.3~0.4倍となっている。この時この位置の接触圧は、氷と構造物間の摩擦係数が約0.1であることから、一軸圧縮強度の3~4倍となり、前述した4倍とよく一致している。接触圧 $\sigma$ が求まり、氷温Tが与えられると、図2の関係より、また氷中に砂が含まれている場合は図3の関係（図2の1.7~2.0倍の値を用いる）より平均摩耗速度S が決定される。次に氷盤の移動距離それに移動方向が与えられれば摩耗量分布が推定可能となる。また潮位変動が大きい場合には、摩耗範囲は広がるが、最大摩耗量は減少することになる。

#### 5. 実測値との比較

上記の推定方法による摩耗量の推定値と、著者らが調査したコンクリート製橋脚の摩耗量の実測値との比較を行った。調査したのは北海道の天塩川にかかっている旧羽幌線の鉄道橋の橋脚で、この橋梁自体は昭和9年3月に竣工しているが、橋脚は氷盤移動による摩耗が激しいため、その内の2本の橋脚は補修のため、氷の影響を受ける範囲は約30cm厚でコンクリートが巻かれている。我々が調査した橋脚は1980年に補修されたもので、調査時点で10年が経過したことになる。橋脚の断面形状は図7に示すように楕円形で長径が

960cm、短径が490cmで周長が24mである。摩耗量測定位置は図7に示すように①、②、③、④の4地点である。各測定点の摩耗深さの鉛直分布を図8に示す。4測線の平均摩耗量はそれぞれ10.4mm、10.6mm、8.5mm、3.5mmであった。上流側の氷盤が衝突・貫入する部分である①及び②は下流側の④の約3倍の摩耗量となっている。この天塩川の橋梁の建設位置は、潮汐の影響を受けるので、氷盤は上下方向に移動し摩耗は約1mの範囲で起こっていた。またこの部分のコンクリート表面を観察した結果、コンクリートの摩耗試験後の表面状態とよく似ていたし、凍結融解作用も起こっていないので氷盤移動による摩耗と判断し、補修後10年経過していることから、年平均1.0mmの摩耗があったものと推定した。この天塩川橋梁付近の氷盤の移動距離は年によって異なるが、この橋の上流20～30kmの雄信内近くで天塩川は大きく屈曲して、氷盤の移動が大きいのはその屈曲部より下流側であることから、年平均の氷盤移動距離は20～30kmと考えてよい。氷盤の移動時期は3月中旬以降であり、氷の表面は雪で覆われていることから、氷温は $-2^{\circ}\text{C}$ ～ $-3^{\circ}\text{C}$ であると推定され、一軸圧縮強度は $10\sim 20\text{kg}/\text{cm}^2$ となる。接触圧を一軸圧縮強度の4倍とすると接触圧は $40\sim 80\text{kg}/\text{cm}^2$ と推定される。よって図2より平均摩耗速度は $0.06\sim 0.15\text{mm}/\text{km}$ となる。年間の氷盤の移動距離を20kmとすると年間の平均摩耗量は $1.2\sim 3.0\text{mm}/\text{年}$ となり、30kmとすると $1.8\sim 4.5\text{mm}/\text{年}$ となる。水位変動により橋脚の摩耗範囲は鉛直方向に約100cmの範囲で、氷厚は平均して50cmであるから単純に推定値の半分程度と考えてよく、移動距離20kmで $0.6\sim 1.5\text{mm}/\text{年}$ 、30kmで $0.9\sim 2.25\text{mm}/\text{年}$ となり、実測値の摩耗量とはほぼ一致した。

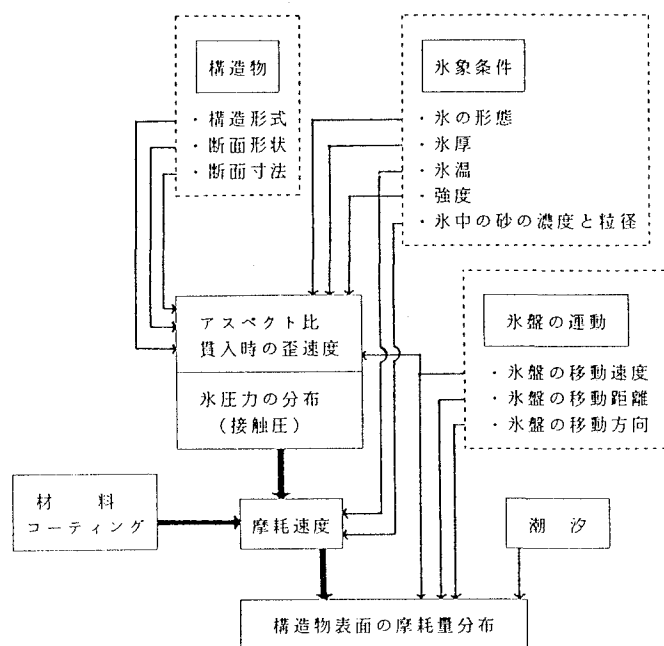


図6 摩耗量の推定方法

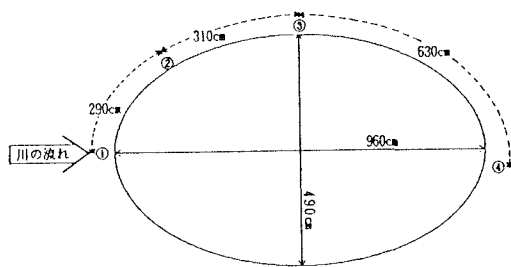


図7 橋脚の断面図

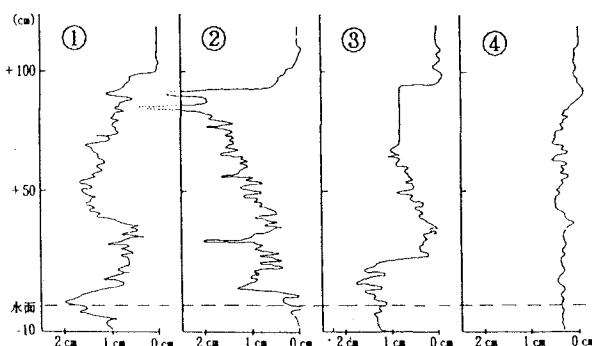


図8 摩耗量測定結果

#### 参考文献

- 1) 原文宏、後藤 克人、折谷 徳弘、佐伯 浩：結氷河川における橋脚の摩耗に関する研究、土木学会第45回年次講演会
- 2) 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. 5 1989年6月
- 3) 伊藤 喜栄、浅井 有一郎、佐藤 栄一、後藤 克人、佐伯 浩：砂を含んだ海水盤の移動による種々の建設材料の摩耗に関する研究、海洋開発論文集 Vol. 6 1990年6月
- 4) 高橋 陽一、原文宏、後藤 克人、折谷 徳弘、佐伯 浩：結氷移動による橋脚の摩耗量の調査と予測、第6回 寒地技術シンポジウム 1990年12月
- 5) 伊藤 喜栄、浅井 有一郎、折谷 徳弘、佐伯 浩：海水盤の移動によるコンクリート製海洋構造物の摩耗量の推定方法について、1991年 オホーツクシンポジウム