

海水盤の移動による自然石の摩耗に関する研究

Abrasion of Natural Stones due to a Movement of Sea Ice Sheet

花田真州*・原 文宏**・伊藤喜栄***・佐伯 浩****

Masakuni Hanada, Fumihiro Hara, Yoshishige Itoh and Hiroshi Saeki

If offshore structures are constructed in sea ice regions, wear of the surface of the structures by ice sheet which moves horizontally and vertically by tidal actions must be taken into consideration. The authors have carried out systematic experiments on the abrasion of various materials (various concrete, steel and various coatings) for about ten years. In these experiments, wear tester of reciprocating abrasion type which had been developed by Saeki et al was used. In this paper, the authors clarified the abrasion rate of various kinds of stones (granite, tuff, sandstone and andesite) through systematic experiments.

Keywords : abrasion, sea ice, contact pressure, offshore structure

1. はじめに

オホーツク海、ボーフォート海、ベーリング海それにボスニア湾といった、冬季間結氷する海域や流水の襲来する海域に海岸・海洋構造物を建設する場合、海水の水平及び鉛直上下方向移動に伴って生じる、海水と構造物表面間の摩擦力による構造物表面の摩耗現象に十分留意して設計すべきである。また、北海道や諸外国の冬期間結氷する河川に橋梁を建設する場合においても、融氷期の氷盤移動による橋脚表面の摩耗について考えておく必要がある。これは、ボスニア湾に数多く建設されたコンクリート製海中燈台が一冬の間に平均4～5 cm、最大では約14 cmも摩耗したという報告や、北海道の厚岸大橋並びに天塩川橋梁の橋脚の摩耗被害報告からも明らかである。

そこで著者らは、過去10年にわたり各種氷盤の移動による各種コンクリート及びその被覆材として考えられる鋼板や合成材料（低密度・高密度ポリエチレン、ポリウレタン、ポリエステル等）、それに特殊塗料等の摩耗試験を行い、その摩耗特性を明らかにしてきた。しかし近年、景観を損なわないようにするためコンクリート製海岸・海洋構造物表面を、また、摩耗を防止するため河口部橋梁橋脚を、それぞれ石材で被覆する例がみられる。そこで本研究では、各種石材の氷盤移動による摩耗量推定のために必要な摩耗速度（氷盤が1 km移動するときの平均摩耗量(mm)）を求めるとともに、摩耗機構を明らかにした。

2. 実験装置

氷に対する諸材料の摩耗に関する試験方法には基準が全くなかったため、1985年以来、相対摩耗試験機や回転盤試験機、タンブラー試験機、滑動式試験機など種々の試験方法が開発されてきた。しかし氷と構造物間の相互作用、氷の力学特性あるいは氷と諸材料間の摩耗特性に関する知識がなくて開発されたものや、他の材料の試験方法をそのまま準用したため、氷と材料の摩耗現象を再現したとはいえないものもある。そこで、摩耗試験の具備すべき条件を考え、評価項目を下記のように定め、各試験機の性能比較を行った。

水温変化に対応していること。

接触圧力の変化が可能でその範囲が適切であり、また一定に保つことが可能なこと。

相対速度の変化が可能で、適切な範囲であること。

試験中、静止摩擦力と動摩擦力が交互に働くこと。

測定精度がよく、簡単であること。

* 学生会員 北海道大学大学院（060 札幌市北区北13条西8丁目）

** 正会員 北海道大学大学院

*** 正会員 大成建設（株）土木本部

**** 正会員 北海道大学工学部

摩擦熱対策、氷の融解防止対策ができていること。

供試体及び氷の削り屑対策ができていること。

実際の摩耗量等の予測に役立つこと。

材料の相対的耐摩耗性を示す指標となり得ること。

評価の結果、氷による摩耗試験方法としては滑動式の摩耗試験装置が最もよく実現象を反映できることが明らかになった。

3. 実験方法

実験に用いた石材は、わが国でよく用いられている砂岩、凝灰岩、花崗岩、それに3種類の安山岩（輝石安山岩、石英安山岩A・B）の計6種類である。もちろんすべて産出地は異なっており、採石場からわけてもらった岩石を石材店で指定の大きさに成形してもらい、それを供試体として使用した。これらの石材は北欧や北米といった寒冷地諸国でもよく用いられているものである。使用した摩耗試験装置は著者らが開発した滑動式摩耗試験装置（図-1）である。これは、前述の摩耗試験装置が備えるべき条件をすべてクリアするものである。また、氷温は -10°C 、接触圧力は 10kgf/cm^2 、相対速度は 5cm/sec とした。これは過去に行った各種材料の実験結果から、積雪により氷温が -10°C 以下になることはなく、かつ -10°C 以上では摩耗に対する温度の影響がほとんどないことと、摩耗速度は接触圧力に比例すること、そして相対速度はあまり摩耗に影響を及ぼさないことなどが知られているからである。用いた氷は、砂などの不純物を含んでいない海水で、塩分の重量濃度は $0.3\sim 0.5\%$ 、単位体積重量は $0.90\sim 0.91\text{gr/cm}^3$ である。また、石材の場合は石材の種類によって摩耗の仕方が異なっていることから、摩耗した石材の粉末（削り屑）を回収し、顕微鏡によりその形状を観察した。さらに、各石材の一軸圧縮強度も求めた。

4. 実験結果と考察

(1) 石材の摩耗機構

各石材の海水による摩耗量と摩耗距離（氷の移動距離）の関係を示したのが図-2、図-3である。過去の実験結果より、コンクリートの摩耗の進行は、Surface Region、Transition Region、Stable Regionという3つの段階に分けられるが、コンクリート供試体表面をあらかじめカッターで切断してStable Regionの状態から摩耗実験を始めても、この時の摩耗速度と3つの段階を通した時のそれとは一致することが明らかにされている。このことより、岩石の状態からカッターで成形された今回用いた石材の供試体は、すでにStable Regionの状態にあると考えられる。事実、砂岩を7kmまで摩耗させたときの摩耗量増加の様子を図-2に示してあるが、最初から一様に摩耗していき、鋼や合成材料にみられた初期の凹凸の影響はないことが確かめられた。したがって、石材の摩耗量は摩耗距離に比例して直線的に増加するといえる。本実験では各石材とも摩耗距離が2kmまたは1kmまでしか行っていないが、

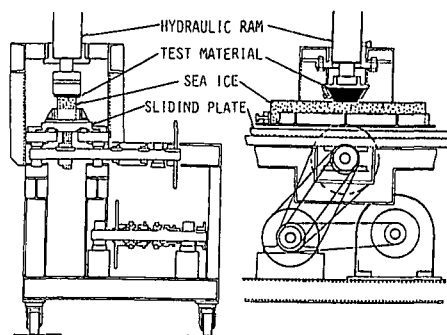


図-1 滑動式摩耗試験機

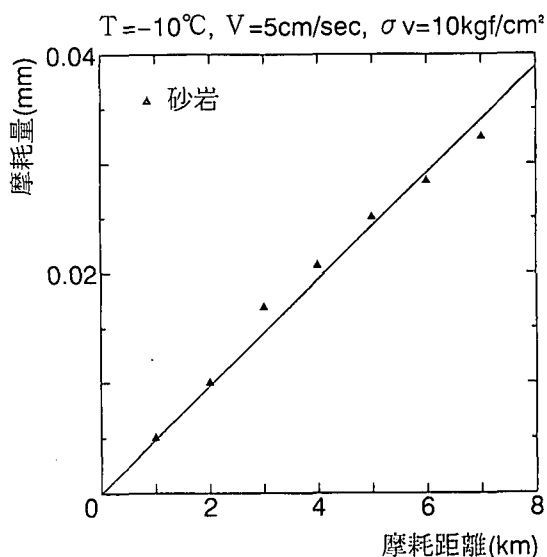


図-2 海水による砂岩の摩耗

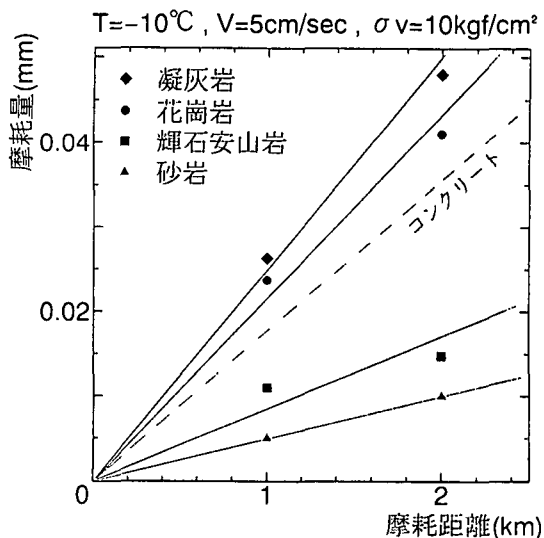


図-3 海水による各種石材の摩耗

それは上記の理由により、これ以降も一様に摩耗していくと判断したからである。ここで、図-3中の破線はコンクリート供試体の表面約1cmをカッターで切り落としたものである。

(2) 石材の摩耗速度

図-3の直線の傾きから摩耗速度を求め、まとめたものが表-1であるが、砂岩が最も小さくコンクリートの約1/3以下、鋼の約1.7倍であることが明らかになった。しかし花崗岩や凝灰岩はコンクリートより大きくなることも明らかになり、石材の種類によって摩耗速度が著しく異なることがわかった。また3種類の安山岩の摩耗速度を比べると、組成や採石場所の違いによりかなり異なることがわかった。同じ岩質で、かつ同じ札幌市内に存在する石でさえこれほど値がバラつくことを考えると、国内または世界各地には、さまざまな摩耗速度をもつ石が存在すると思われる。このことは、各種石材の摩耗速度をはっきりと断定することは難しく、現場で使う石材ごとに実験してみないと正確にはわからないことを示している。ただ、今回の実験結果を一つの目安とし、耐摩耗材として石材を用いるなら砂岩や安山岩が適当であり、凝灰岩や花崗岩は不向きであるという全体的な傾向は言えるのではないと思われる。

表-1には様々な材料の摩耗速度も列挙してあるが、コンクリート構造物の摩耗対策として考えられることを以下に挙げてみる。

- ①予想される摩耗量の分だけあらかじめコンクリートのかぶりを大きく取っておく
- ②構造物表面に石材を貼り付ける
- ③構造物表面にウレタンを巻き付ける
- ④構造物表面に鋼板を取り付ける

①と②は構造物の重量が重くなるという欠点がある。④については、さらに鋼板にZebbronやポリエチレン、ウレタンを貼りつけることが考えられる。ただ、Zebbronは厚く塗れないので、耐用年数が限られてしまうし、高密度・低密度ポリエチレンは現地加工ができないとか破損したときに修復することができないなどの欠点がある。したがって、これらの点を考慮して場所に応じた対策を施すことが望まれる。

(3) 各石材の特性

各石材の摩耗速度の大小は、岩石の生成の仕方や結晶構造、成分、強度等の違いによるものと考えられる。そこで石材の一軸圧縮試験を行い強度を調べた結果が表-2である。過去の実験において、コンクリートの摩耗速度は一軸圧縮強度に無関係という結果が得られているが、石材の場合は、強度が異なれば摩耗速度も異なっていた。しかし、その間に相関はみられなかった。ここで、一軸圧縮強度試験は、供試体の端面に少しでも凹凸があると、値の桁が変わるほど大きく

変動してしまい、正確な値を出すことは極めて難しいとされている。今回の実験でも石英安山岩Bと花崗岩がうまくいかなかったが、一般的な値を併記しておいたので、そちらを参照していただきたい。また、圧縮試験中の応力-歪曲線を最小二乗法により一次回帰した直線の傾きからヤング率を求めたものも記しておく。

次に摩耗試験中にでてくる石材の削り屑を集めて顕微鏡で拡大したものを写真1~4に示す。安山岩(写真1)は火成岩のうち細かい粒が多くガラス質な火山岩と言われており、摩耗試験後の供試体表面の凹凸は少なめで、割と均一に摩耗していた。花崗岩(写真2)は火成岩のうち粗い粒が多く完晶質な深成岩と言われ、摩耗後の凹凸が激しいのが摩耗量の多さの理由となっている。砂岩は粒の大きさが1/16~2mmの砂が堆積して固結した岩とされているが、写真3を見ても粒径は小さく一様なものが多く大きめの粒子も丸みを帯びているのがわかる。ま

$T = -10^{\circ}\text{C}$ 、 $\sigma_v = 10\text{ kgf/cm}^2$

材料	平均摩耗速度 (mm/km)
	海水による実験
コンクリート	0.0178
鋼	0.0030
ウレタンエラストマー	0.0030
Zebbron	0.0078
LDPE	0.0022
砂岩	0.0049
凝灰岩	0.0251
輝石安山岩	0.0084
石英安山岩A	0.0065
石英安山岩B	0.0177
花崗岩	0.0216

表-1 石材と各種材料の平均摩耗速度

材料	密度 g/cm ³	一軸圧縮強度 kgf/cm ²	一般的な一軸圧縮強度 kgf/cm ²	ヤング率 kgf/cm ²
砂岩	2.59		969	
凝灰岩	1.69	210	342	0.285
輝石安山岩	2.61	1340		1.82
石英安山岩A	2.70	1550	1413	
石英安山岩B	2.80	482		0.504
花崗岩	2.65	725	1662	1.21

表-2 各種石材の物理的特性

た、摩耗試験後の表面状態は6種類の石材のなかで一番なめらかであった。凝灰岩は4mm以下の火山岩が堆積して固結した岩と言われているが、写真4を見ても粒子は割と大きめで大小にあまり差はなく一番角張っている。

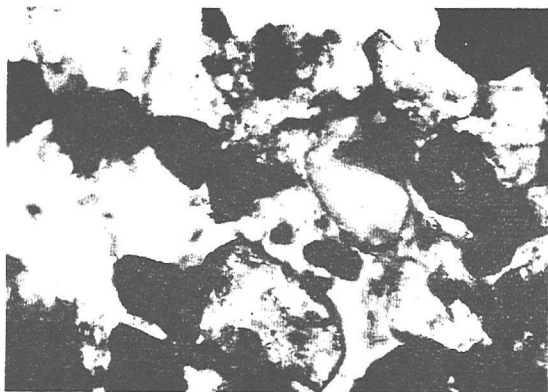


写真-1 安山岩の削り屑の拡大写真

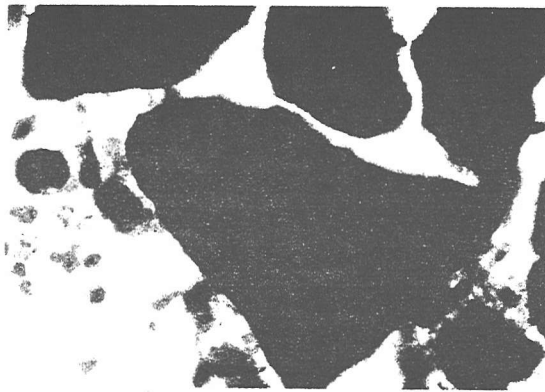


写真-2 花崗岩の削り屑の拡大写真

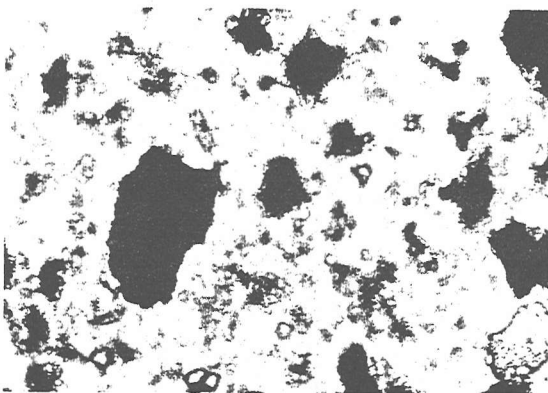


写真-3 砂岩の削り屑の拡大写真

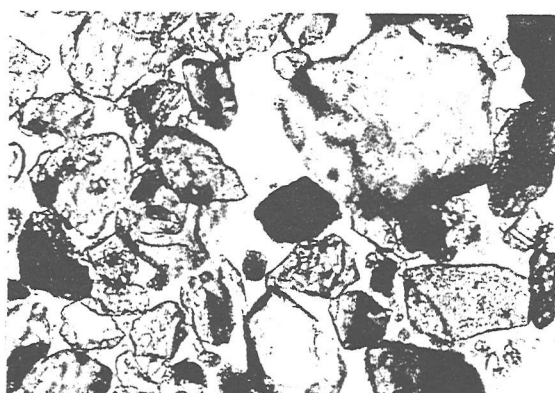


写真-4 凝灰岩の削り屑の拡大写真

粒径の小さいものが多い砂岩と安山岩は、摩耗後の石材の表面がなめらかであり、反対に粒径の大きいものが多い凝灰岩と花崗岩は、摩耗後の石材表面にくぼみが多数見られる。これは図-3で示された、摩耗速度の小さいグループと大きいグループに対応している。参考までに、砂岩と凝灰岩の摩耗試験前、後の表面の凹凸の様子をそれぞれ図-4、図-5に示す。このことより、石材の摩耗速度は摩耗中に削り取られる石材の粒子の大きさに大きく依存していると考えられる。すなわち、粒子が大きければ、わずか1個の粒子でも氷との接触によって削り取られると、その後に大きな穴を残してしまうので、摩耗深さが大きくなり、摩耗速度も大きくなる。一方、小さい粒子ならば、削り取られても摩耗深さは小さく、一様に摩耗していくように見える。したがって、耐摩耗材として石材を用いるときには、含まれる粒子の大きさが小さいものを選ばよく、安山岩や砂岩の他にも、例えば流紋岩や玄武岩などを用いても良いかと思われる。

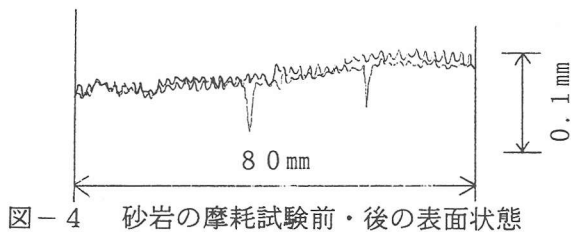


図-4 砂岩の摩耗試験前・後の表面状態

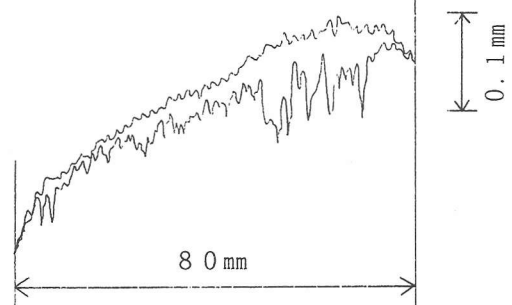


図-5 凝灰岩の摩耗試験前・後の表面状態

(4) 摩耗量の予測手法

現実の構造物の摩耗量を予測する場合には、摩耗速度と接触圧力それに氷の移動距離がわかればよい。氷温に関しては、過去の実験結果より低温になれば摩耗速度は急激に増加することがわかっているが、現実問題として-10℃を考慮しておけば安全側である。また、摩耗速度は接触圧力に比例することがわかっている。著者らが10年

にわたって行ってきた一連の実験は 10kgf/cm²の接触圧で行っているので、今まで求めてきた摩耗速度(S_r)を10 (kgf/cm²)で除して 1kgf/cm²当たりの摩耗速度を出し、それに接触圧力(σ_v)と氷の移動距離(L)をかけ合わせると実際の摩耗量(S)を求めることができる。

$$S = (S_r / 10) \times \sigma_v \times L$$

S : 平均摩耗量(mm)

S_r : 各種材料の摩耗速度(mm/km)

σ_v : 氷と構造物間の接触圧力(kgf/cm²)

L : 氷の移動距離(km)

5. まとめ

今回の実験で得られた結論を以下に示す。

- 1) 石材の摩耗量は摩耗距離に比例する。
- 2) 各種石材により摩耗速度は大きく異なる。また同じ安山岩でも、成分や採石場所により摩耗速度が異なる。
- 3) 砂岩や安山岩の摩耗速度はコンクリートの約 1 / 3 であり、耐摩耗材として優れている。
- 4) 石材に含まれる粒子の大きさが小さいほど、石材の摩耗速度は小さくなる。
- 5) コンクリートの摩耗対策として考えられる方法を明らかにしたが、石材を用いれば美観上もよいし摩耗対策としても有効である。
- 6) 各種材料の摩耗速度を示した。

さらに、石材はコンクリートに比べて凍結融解作用を受けにくいと言われていることを考え合わせると、コンクリート構造物の表面を石材で被覆すること、あるいは直接石材を用いることは、氷盤の摩耗対策として効果があることが明らかになった。

参考文献

- ・伊藤喜栄、吉田明、佐々木広輝、泉冽、佐伯浩
：海氷による各種コンクリートの摩耗特性、海洋開発論文集Vol. 3、P155～159、1987
- ・伊藤喜栄、浅井有一郎、佐藤栄一、後藤克人、佐伯浩
：砂を含んだ海氷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、P167～170、1990
- ・原文宏、高橋良正、佐伯浩、佐藤浩、渡邊将人、折谷徳治
：氷盤移動によるコンクリート表面の摩耗試験方法の評価、第9回寒地技術シンポジウム、P157～163、1993
- ・Y. Itoh, Y. Tanaka and H. Saeki
：Estimation Method for Abrasion of Concrete Structures Due to Sea Ice Movement,
The Proceedings of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE,
Vol. II, P545～552, 1994
- ・日本鉱業会岩石試験データシート作成・利用研究委員会
：岩石試験データシートの作成と利用の現況～三軸圧縮試験について～、日本鉱業会誌8月号、1986