

海水による各種コンクリートの摩耗に関する研究

大成建設 浅井 有一郎, 今野 潔
北海道大学 梶谷 哲彦, 竹内 貴弘
佐伯 浩

1. まえがき

オホーツク海、渤海、ポーフォート海、ボスニア湾といった、海水の結氷する海域において、コンクリート製の海洋構造物を建設する場合、コンクリートそのものの材質については、①コンクリートの対凍害性、②海水の移動および運動に伴うコンクリート表面の摩耗が問題となるし、構造の面からは、①1㎡当り 400トンを超える氷圧力に対する構造型式上の問題、②貯油を兼ねる構造物の場合のコンクリート内・外壁の温度差の問題、③長期離運搬等のための、水密性や軽量化の問題が重要となる。これら氷海域向けのコンクリート製海洋構造物の建設、開発に当っては多くの重要な課題が残されているが、本研究では特に氷盤移動、運動に伴うコンクリート表面の摩耗に関して、昨年に引きつづき報告する。氷海域に建設されている構造物において、海水の運動、移動に伴うコンクリート表面の摩耗例については、ボスニア海に数多く建設されているコンクリート製の海中燈台の多くに摩耗の例がみられるし、北海道厚岸湾口部に建設された厚岸大橋の橋脚が建設当初、海水による摩耗の影響を受けた事が報告されている。今まで、海水による摩耗の影響を受けた構造物は燈台や橋脚といったアスペクト比の小さな構造物に多く報告されていて、港湾や漁港の防波堤等、アスペクト比の大きな構造物については、そのような被害例を聞いていない。これは、防波堤のようなアスペクト比の大きな構造物が、今までは、沿岸近くの海水のあまり移動の激しくない場所に建設されてきたからであると思われる。海水がコンクリート構造物の表面を削る機構は前報告にも述べたように海水による摩擦力に起因するものであって、構造物の断面形状、アスペクト比によって異なるし、また、氷盤の作用機構例えば、氷盤の潮流や風による水平方向の移動による摩耗もあれば、潮汐や長周期波による鉛直方向の運動による摩耗もある。また、海水の摩耗を受ける領域は splash zone で、一般には凍結融解作用も受け易い領域であるので、現存する構造物から摩耗量等を推定する事は非常に困難であるが、最近の高強度コンクリートの開発により、凍結融解作用に対して耐久性のある構造物が開発されているので、今後は海水による摩耗の実体がより明確にされると思われる。

2. 実験装置と実験方法

海水による諸材料の摩耗機構及び摩耗量を明らかにするため、図-1. に示すような摩耗試験機を開発した。

これは著者の一人、佐伯等の海水と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設計されたもので、摩擦力に大きな影響を与える鉛直応力 σ_v 、相対速度 V が変化できるようになっているし、最大の特徴は往復運動による試験方法を採用していて、これは今まで氷以外の諸材料の摩耗試験法が回転運動によっているのと大きく異なっている。この往復運動による試験方法は、海水に対しては、極めて良い試験方法であるが、唯一の欠点としては、海水が試験材料の往復運動により、くり返し荷重を受けるため海水が疲労し、頻繁に海水を取り変え

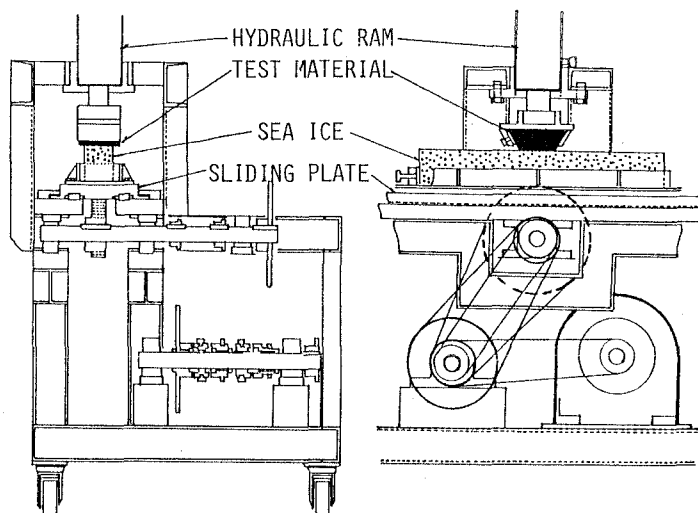


図-1. 摩擦試験機

ねばならない事である。図-2. に実験途中の写真を示しているが、直方体の海水の一部が欠けている様子が見られるが、これは海水の疲労により破壊が始まっている事を示している。このような欠点は見られるものの、海水による摩耗を調べるには、やはり、この往復運動による試験が実体にも合っていて合理的な試験方法といえる。

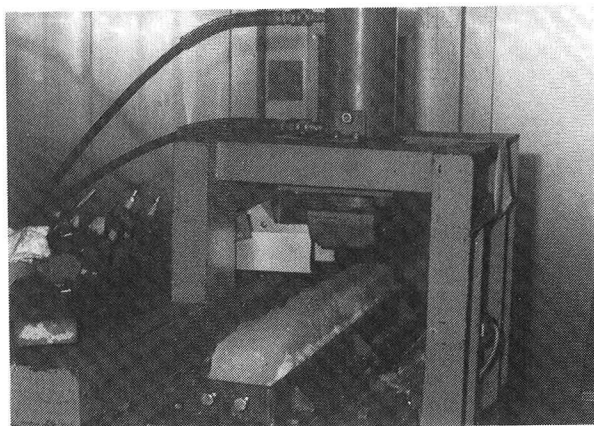


図-2. 摩擦試験状況写真

3. 摩耗試験の結果

1) 海水の方向性の効果

海水は表面から結氷が始まり、方向性を持っている。材料的には異方向の材料である。図-3. に示すように、グレインの方向に対して二通りの摩耗試験が考えられる。Type-aは、傾斜構造物表面の摩耗現象に近く、Type-bは直立構造物表面の摩耗現象に近い試験方法であると考えられる。同一の海水を用いて、この方向性の効果を調べた結果が図-4. である。これは水温 T が -20°C 、鉛直応力 σ_v が 10 Kg/cm^2 、摩擦速度 v が 5 cm/sec の場合であり、○印が図-3. におけるType-aであり●印がType-bであって、用いたコンクリート供試体は軽量高強度コンクリート (L.W.C) で表面を一部カットし、粗骨材が表面に出た材料である。図からも明かなように、海水の方向性による有意な差はない事が判る。この海水の方向性が摩擦係数に及ぼす効果を調べた佐伯等の研究結果によっても、方向性は摩擦係数に影響を与えないという結論と一致している。以上の結果より、海水による摩耗試験については、海水の方向性は意識しなくても良い事になる。

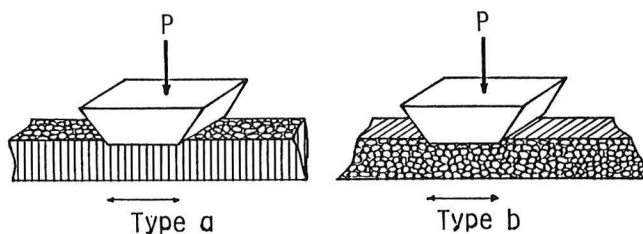


図-3. 海水の成長方向と摩擦方向

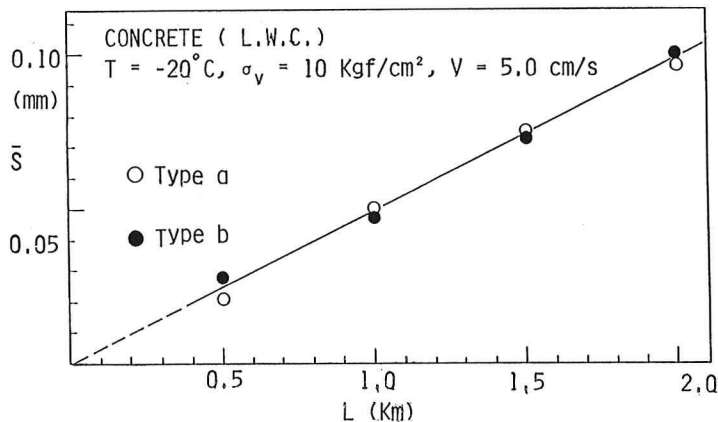


図-4. 摩擦方向の違いによる摩耗量

2) 海水による種々の材料の摩耗機構

前報にも報告したとおり、摩耗量

は摩耗距離 L 、鉛直応力 σ_v 、相対速度 v 、材料の強度それに海水強度等に依存する事が摩擦試験の結果から想像される。図-5. に各材料に対する平均摩耗量 S と摩耗距離の関係を示す。図中の、N.C は通常の骨材を用いた高強度コンクリート、L.W.C は粗骨材に軽量骨材、細骨材は通常の骨材を用いた軽量高強度コンクリート、L.L.W.C は粗、細骨材ともに軽量骨材を用いた高強度軽量コンクリートである。

これらのコンクリートは材令28日の圧縮強度が 568kgf/cm^2 とみな同一の強度にそろえてある。また Zebtron はコンクリートの供試体に 500μ 厚にコーティングしたものである。図より、骨材に関係なく摩耗量にはほとんど差がない事が明らかになった。次に、この摩耗の仕方を調べるために N.C. と Zebtron について、片対数紙にプロットしたものが図-6. である。同図より明かなように、コンクリートの平均摩耗量 $\bar{S}$ は、摩耗距離 L によって三つ

の直線で近似できる。初期の急激に摩耗が進行する領域 ($L < 2\text{km}$) は、コンクリート供試体表面のセメントペースト部分の凹凸が削られる領域である。中間の比較的ゆるやかに摩耗する領域はコンクリート供試体の細骨材部分まで摩耗が進行している事を示し、 $L > 7\text{km}$ の範囲では粗骨材の摩耗が始まった領域と察せられる。また、Zebtron のように均質な材料の場合には、初期の急激に摩耗する領域はコーティング表面の凹凸が摩耗する領域で、その後は一様に摩耗していくと考えられる。その点を説明するために、供試体表面を 1cm 厚でコンクリートカッターで切落して試験を行ったものが図-7. である。この試験は N.C.、L.W.C.、L.L.W.C. の三種類で行っている。この時のコンクリート供試体表面の写真の一例を図-8 に示す。このように粗骨材が表面に出た状態で試験をすると平均摩耗量 $\bar{S}$ は、摩耗距離 L の増加とともに直線的に増加し、この勾配は図-5. の $L > 7\text{km}$ の各コンクリートの $\bar{S}/L$ の勾配に一致している事が判る。以上の結果より、コンクリートの表面より 0.6mm 程度の摩耗があると、それ以後は摩耗距離 L に比例して摩耗量が増加する

事が明らかとなり、鉛直応力が $\sigma_v = 10\text{kgf/cm}^2$ 、相対速度が $v = 5.0\text{cm/sec}$ 、コンクリートの28日強度が $\sigma_c = 568\text{kgf/cm}^2$ で水温が $T = -20^\circ\text{C}$ (一軸圧縮強度 $50 \sim 70\text{kgf/cm}^2$) での平均摩耗量 $\bar{S}$ は次式で示される。

$$\text{コンクリート} \quad \bar{S} = 0.05 \times L$$

$$\text{ZEBRON} \quad \bar{S} = 0.01 \times L \quad \text{..... (1)}$$

$\bar{S}$: 平均摩耗量 (mm)、 L : 摩耗距離 (km)

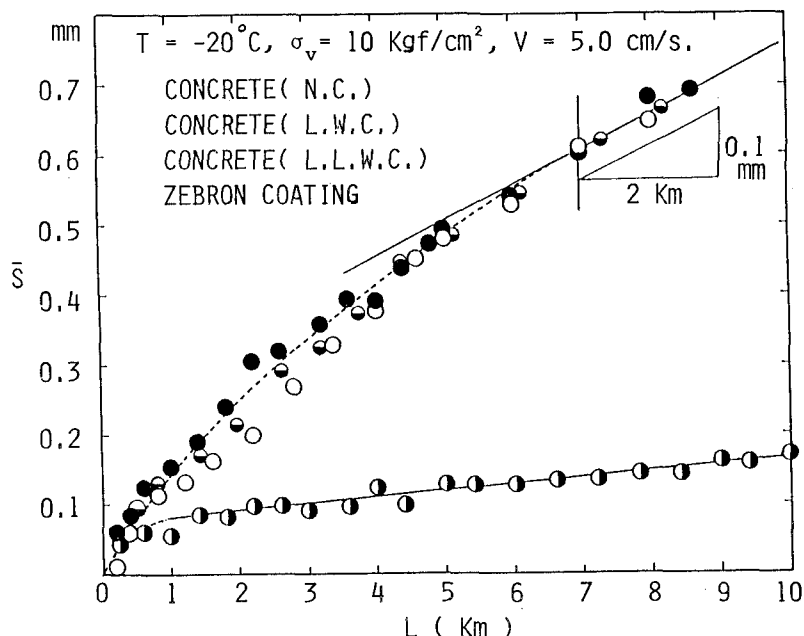


図-5. 各材料の摩耗量と摩耗距離の関係

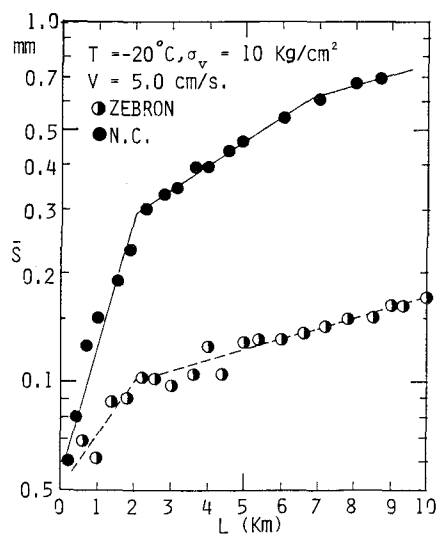


図-6. 摩耗機構

3) コンクリートの摩耗量に及ぼす鉛直応力の効果

海水と諸材料間の摩擦係数は鉛直応力には依存しない事が佐伯等の研究により明らかにされている。しかし、当然の事ながら鉛直応力が増大すれば摩擦力は鉛直応力に比例して大きくなるので、鉛直応力は摩耗量にも影響を与える事になる。 $T = -0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $v = 5\text{ cm/sec}$ 、 $L = 1\text{ Km}$ の時の平均摩耗量と鉛直応力の関係を示したものが図-9.である。コンクリートの供試体はL.W.Lである。図からも明かなように、摩耗量は鉛直応力に直線的に比例している。

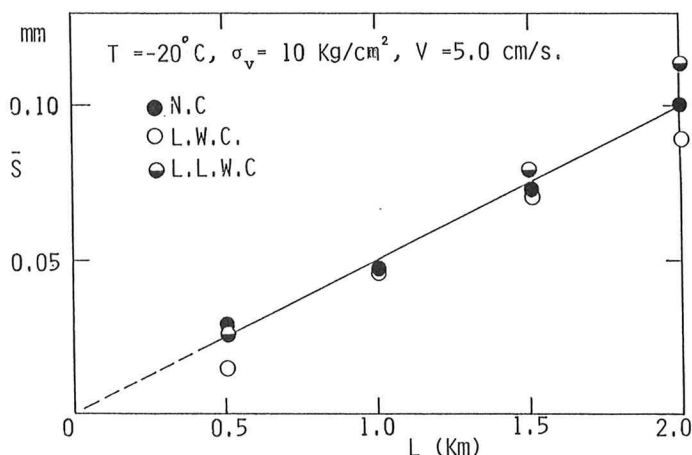


図-7. 粗骨材露出時の摩耗量

4) 摩耗量と氷温との関係

コンクリートの摩耗は当然の事ながら海水の強度に依存する。海水の一軸圧縮強度、曲げ強度、せん断強度は、気泡が全然含まれていない場合には、ブラインの体積に強く依存するし、気泡が含まれている場合には、氷温と密度に依存する。

また気泡量が中規模の場合には、強度は氷温と空隙率（気泡量とブライン量の和）に依存する。本実験に用いた海水は密度が $0.895 \sim 0.92\text{ gr/cm}^3$ で大きな変化はなく、よって氷温が強度を示すパラメーターとなる。氷温を -5 、 -10 、 -20°C と変化させて摩耗量に及ぼす氷温の効果を調べたものが図-10.である。各氷温に対する海水の一軸圧縮強度は -5°C で $20 \sim 25\text{ Kg/cm}^2$ 、 -10°C で $33 \sim 53\text{ Kg/cm}^2$ 、 -20°C で $50 \sim 70\text{ Kg/cm}^2$ である。氷温が -10°C より高い領域では、氷温にはそれ程大きく依存しないが、氷温が -10°C より低くなると、摩耗量がふえてくる事になる。この理由の一つには、海水中のブライン中の塩類の一部が $T = -8^{\circ}\text{C}$ くらいから析出を始めるため、その析出した塩類がコンクリートの摩耗に影響しているものと考えられる。

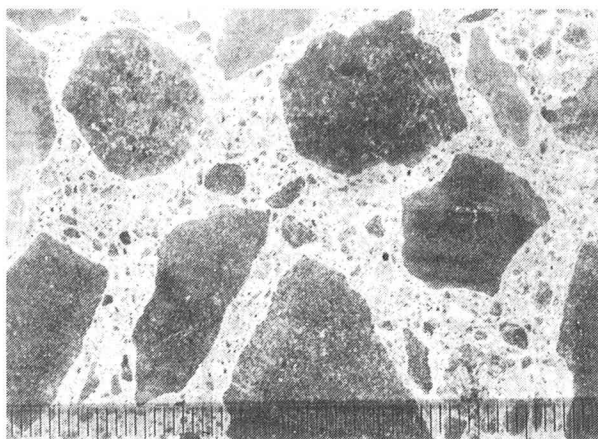


図-8. 粗骨材露出時の表面写真

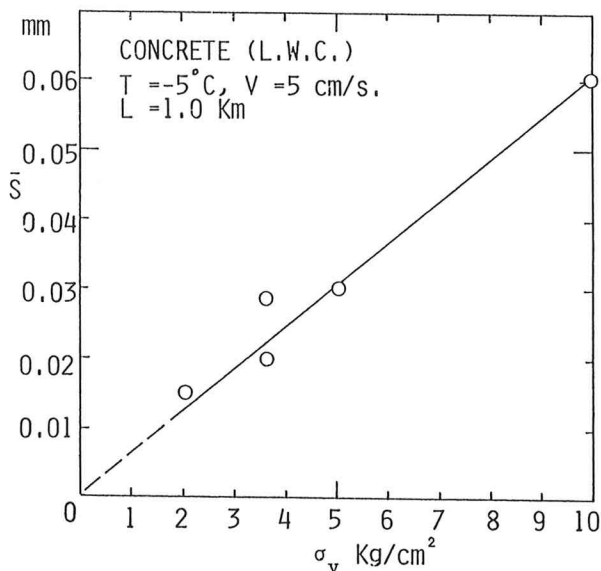


図-9. 摩耗量に及ぼす鉛直応力の効果

4. 結 論

- (1) 海水によるコンクリートの摩耗は摩耗量によって三つの段階に分けられる。
- (2) コンクリートの骨材の種類が異なっても、一軸圧縮が同一で試験条件が同じであれば摩耗量は同じである。
- (3) 海水の成長方向は摩耗量には影響しない。
- (4) 鉛直応力の増大とともに摩耗量は直線的に増大する。
- (5) 氷温の低下とともに摩耗量は増大するが $T < -10^{\circ}\text{C}$ になると急に摩耗量が増大する。

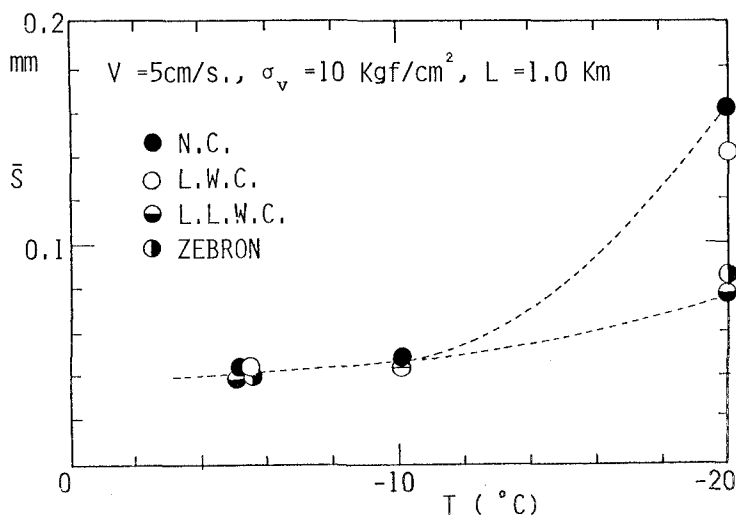


図-10. 摩耗量に及ぼす氷温の効果

5. 参考文献

- 1) 佐伯浩、浅井有一郎、泉洲、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、泉洲、竹内貴弘、佐伯浩：海水の移動に伴う
- 3) Eranti, E. and G. C. Lee: Introduction to Ice Problems in Civil Engineering, Dept. of Civil Eng. and Center for Cold Regions Eng., Science and Technology 81-1, State Univ of New York, 1981
- 4) Saeki, H., Ono, T., Nakazawa, N., Sakai, M. and Tanaka, S.: The Coefficients of Friction between Sea Ice and Various Materials Used in Offshore Structures, Proc. of O.T.C., 1984
- 5) 河本実：材料試験，朝倉書店，1979
- 6) Saeki, H., Nomura, T. and Ozaki, A.: Experimental Study on the Testing Methods of Strength and Mechanical Properties for Sea Ice, Proc of IAHR Ice Symposium, P.135—149, 1978
- 7) Saeki, H., Ono, T., Zong, N. E. and Nakazawa, N.: Experimental Study on the Symposium on Direct Shear Strength of Sea Ice, Annals of Glaciology, Proc. of the Symposium on Snow and Ice Processes at Earth's Surface, P.218—221, 1985
- 8) Saeki, H., Ono, T., Nakazawa, N., Sakai, M. and Tanaka, S.: The Coefficient of Friction between Sea Ice and Various Materials, Jour. of Energy Resources Technology, ASME, P.65—71, 1985