

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

大成建設(株)土木設計部	伊藤 喜栄
大成建設(株)開発一部	浅井有一郎
新日本製鉄(株)	佐藤 栄一
北海道大学工学部	後藤 克人
北海道大学工学部	佐伯 浩

1. まえがき

北極海、オホーツク海それにボスニア湾といった、冬期結氷する海域や流水の襲来する海域に海洋構造物を建設する場合、海水が構造物に及ぼす種々の水力のほかに、海水の流れや風によって起こる水平方向移動や潮汐等による鉛直上下方向移動に伴って起こる構造物材料表面の摩耗についても充分な考慮が払われなければならない。このことは、ボスニア湾等に過去に建設された海中燈台の摩耗による被害側からも明らかである。今後の水海域における天然ガスや原油といったエネルギー資源の開発に際しては、特にポーランド海の場合は、バロー岬沖の水深が浅いため、構造物の軽量化が必要であり、コンクリート製構造物の場合、正格なコンクリート表面摩耗量推定による適切なカブリ厚さの選択が必要となる。また鋼製構造物の場合は、極海域においては腐蝕に対してメンテナンスフリーの条件が必要であるため、摩耗防止や腐蝕防止対策として二液混合タイプの耐久性のあるコーティング材や重防蝕材による被覆が必要で、それらの摩耗量の推定が重要となる。著者等は、ここ数年上述した材料の海水盤移動による摩耗に関する基礎的実験を行ってきたが、本論文では砂を含んだ海水盤の移動によるコンクリート、鋼及び重防蝕被覆材料の摩耗特性と摩耗速度に関する実験結果について報告する。

2. 実験方法

砂を含んだ水の供試体の作製方法ならびに摩耗試験機については昨年度に発表したものと同一である。試験に用いた材料は、軽量高強度コンクリート（一軸圧縮強度 $568\text{Kg}/\text{cm}^2$ 、細骨材は通常骨材、粗骨材は軽量骨材）と鋼であり、コーティング材としてはZebron、重防蝕被覆材としてはL.D.P.E.（低密度ポリエチレン）、H.D.P.E.（高密度ポリエチレン）それにウレタンである。過去の実験結果から、水盤の移動速度は摩耗にはそれ程影響を及ぼさないため、本実験では $V = 5\text{cm}/\text{sec}$ 、で実験を行った。また、摩耗量の測定方法は前報と同様の方法である。水中の砂の濃度の現地調査は1990年2月、紋別海岸を中心に4地点で海水を採取し、海水中の砂の濃度を調べた。その結果、重量濃度は、 $0.002 \sim 0.412\%$ で昨年の $0.001 \sim 0.368\%$ と近い濃度を示していた。また、全サンプル中の最大の粒径は 0.30mm （一個）であったが、それを除くと最大粒径は 0.15mm 以下であった。また、ほとんどの粒径は 0.10mm 以下であった。そこで本研究では主に平均粒径 0.14mm の砂を用いて実験を行った。また、砂を含まない海水による軽量高強度コンクリートの補足実験と、淡水水による実験を行った。

3. 実験結果とその考察

(1) 海水によるコンクリートの摩耗速度

著者等は、過去6年間、海水盤の移動によるコンクリートの摩耗の実験を系統的に行ってきた。その結果、コンクリートの場合、強度に関係なく、また骨材の種類に関係なく摩耗速度 $\bar{S}$ （海水盤の移動 1Km に対するコンクリート表面の平均摩耗深）は同じで、水温 T と接触圧 σ_c にのみ依存することを明らかにした。また、水盤の移動速度 V も $V < 5\text{cm}/\text{sec}$ では、 V が小さくなると摩耗速度が若干大きくなる傾向は見られるが、顕著ではないことを明らかにした。そこで、今回は高接触圧での実験を新たに行ない、コンクリートに対する平均摩耗速度 S を求めるグラフを作製した。その結果が図1である。図から明らかなように、水温が -10°C 以下になると、急に摩耗速度が大きくなるが、これは海水のブライン中の塩類（ $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 等）が析出するためであると思われる。また同一の水温では、接触圧に比例して摩耗速度が増加している。アスペクト比の小さい（アスペクト比から5以下程度）構造物の海水盤移動による摩耗量を図1より求める場合、佐伯等やTanaka等の研究より、接触圧 σ_c は海水の一軸圧縮強度 σ の4~5倍程度の値を採用すべきである。

(2) 海水による諸材料の摩耗速度

コンクリート、Zebron、L.D.P.E、H.D.P.E、ウレタンエラストマー、それに鋼の、接触圧 σ_c が10Kgf/cm²、速度が5.0cm/secの時の摩耗速度 $\bar{S}$ と水温の関係を求めたものが図2である。コンクリートは水温が-10℃より低くなると摩耗速度は急激に大きくなるのに対して、その他の材料は水温の低下とともに直線的に摩耗速度が増加していく。また、コンクリートに較べて他の材料の摩耗速度ははるかに小さい、接触圧10Kgf/cm²、速度5cm/secの時の水温-10℃、20℃の各材料の平均摩耗速度 $\bar{S}$ を表1に示す。L.D.P.Eが最も摩耗速度が小さく、H.D.P.E、ウレタンエラストマーそれに鋼はほぼ同じ摩耗速度となっている。またZebronは海洋構造物の塗装としてよく用いられるが、鋼や他の化学合成の倍近く摩耗速度が大きい。以上のことから、水海域の鋼構造物においては、防蝕対策としてはH.D.P.E、L.D.P.Eそれにウレタンエラストマーによる重防蝕が非常に効果があることが明らかとなった。

(3) 淡水水による摩耗速度

次に、淡水水によるコンクリート（軽量高強度）とL.D.P.Eの摩耗試験を行った。接触圧は σ_c は10Kgf/cm²、速度は5.0cm/secであり、その結果を図3に示す。コンクリートの場合、前にも述べた通り、海水の場合は-10℃より低くなると急激に摩耗速度が増加するが、淡水水はゆるやかに増加する。この摩耗速度の変化率からみると海水の場合の急激な摩耗速度の増加がブライン中の塩類の析出で説明できるが、-10℃より高い温度でも海水の方が淡水水の場合に較べて摩耗速度が大きい。同一の水温では、淡水水の方が強度が強いので、強度の影響でもない。その理由の一つは、海水中にはブラインがつまっているブラインポケットが無数にある。水がいくら摩耗していても海水の表面にはブラインポケットがあり、常に表面には凹凸がある。この海水表面の粗さがコンクリートの摩耗速度を大きくしているものと考えられる。また、表面のなめらかなL.D.P.Eの場合、海水の方がごくわずかに摩耗速度が大きい、その差はほとんどない。後でも述べるが、L.D.P.EやH.D.P.Eのような均質な材料に対しては、それ程摩耗速度に影響を受けないからである。ブライン中の塩類の析出量は水温が-20℃以下では図4に示すように、ブライン重量の1%以下である。一般の海水の場合、ブラインの重量は高々10%程度であるから、-20℃の場合で塩類の析出濃度（固形分の濃度）は0.1%程度でその粒径も極めて小さいが、図1に示したように、コンクリートの摩耗を促進する作用がある。

(4) 砂を含んだ海水による諸材料の摩耗速度

実際の海水の砂の濃度調査から、オホーツク沿岸部の海水の砂の濃度の最高値は約0.4%であった。これは汀線から数10cmにかけてであり、もっと沖合でも、このような濃度になっているかどうかは未だ不明である。著者等の研究によると、砂を含んだ海水によるコンクリートの摩耗は、同一の平均粒径の砂であれば、濃度が高くなればなる程、摩耗速度は直線的に大きくなることが明らかとなっている。また、水中の砂の濃度が大きくなるにつれて摩耗速度が大きくなることも明らかとなっている。今後は北部オホーツク海、北極海などの海水中の砂の粒度分布、濃度の調査が必要である。本研究では、著者等の調査を行ったなかで最高の濃度であった0.4%とし、砂の平均粒径 $\bar{d}$ も主に0.14mmとして実験を行った。コンクリート、L.D.P.E、H.D.P.E、ウレタンエラストマー、Zebron、鋼に対する摩耗量 S と水の移動距離 L の関係を示したものが図5である。この時の実験条件は、水温-10℃、接触圧10Kgf/cm²、移動速度は5cm/sec、である。コンクリートを除いた各材料とも、移動距離 L が小さい初期の段階では、急激に摩耗が進行し、ある一定の摩耗量に対すると、その後は摩耗速度が一定となる。この初期の摩耗速度の大きい理由は、材料表面の凹凸が削られる過程と考えることができ、それが摩耗すると一定の摩耗速度となる。これに対して、コンクリートの場合は、細骨材、粗骨材を含んでいるため、一定の摩耗速度に達するためには、かるい摩耗が進まなければならない。各材料の摩耗速度が一定になるまでの摩耗量は、L.D.P.Eで0.0058mm、H.D.P.Eで0.0100mm、ウレタンエラストマーで0.0235mm、鋼で0.0100mm、Zebronで0.0800mm、コンクリートで0.6mmとなる。各材料とも、以上述べた摩耗量に達すると、その後の一定の摩耗速度となる。コンクリートについては、本実験と同様前報で報告したが、摩耗初期に急激に摩耗するが、 S が0.6mmに達し、粗骨材が表面に出てくると、その後の摩耗速度は小さくなる。ウレタンエラストマーと鋼それにZebronは同程度の摩耗速度であるがL.D.P.E、H.D.P.Eはそれらより大きめの摩耗速度を示す、上述した各材料の摩耗速度を表にしたものが表2である。表1の砂を含まない場合に較べて、摩耗速度はZebronとコンクリートでは2倍、鋼やウレタンエラストマーで4～5倍、ポリエチレンで9倍となっている。この事実は諸材料の摩耗に水中の砂（固形分）の含有は非常に大きく影響していることを示している。次に、コンクリート、H.D.P.EそれにL.D.P.Eの各材料に対して、砂の平均粒径 T と砂の濃度 W が摩耗速度 $\bar{S}$ に与える影響を調べたものが図6である。同図より明らかなように、同一の材料であれば、砂の濃度 W が大きくなる程と摩耗量は増加する

が、平均粒径が0.14mmの場合は濃度Wが0.4%をこえると各材料とも摩耗速度は直線的に増加する。これに対して、平均粒径の大きな0.70mmの場合は、濃度Wが1%をこえると、摩耗速度は濃度Wの変化とともに直線的に増加する。また平均粒径が大きい程、各材料とも摩耗速度は大きくなる。また、平均粒径が0.14mmの場合はコンクリートの方がH.D.P.EやL.D.P.Eに較べて摩耗速度が大きい、砂の平均粒径が0.7mmの場合はそれに逆転して、ポリエチレンの方が大きくなることも明きらかとなった。これを詳しく調べた結果が図7である。ここではL.D.P.Eとコンクリートに対して、平均摩耗速度 $\bar{S}$ と平均粒径 $\bar{d}$ の関係を調べたものであるが、平均粒径0.4mm程度を境にして摩耗速度が逆転することが明きらかとなった。

4. まとめ

オホーツク海の北海道沿岸部の海水中に含まれる砂の粒径及び濃度について昨年に引きつづき調査を行ったが、数多いサンプル中、最大粒径は0.3mmで一個のみ確認され、次に大きい粒径は0.15mmであった。また、砂の濃度は昨年と同様に0.4%を越えることはなかった。次に過去5年の実験と本年の実験よりコンクリートの海水盤移動による摩耗量を推定するグラフを作製した。次にコンクリートに対して淡水水による摩耗試験の結果から、海水による摩耗速度が大きいことを確かめたが、その理由は、海水中のフラインボケットの存在であることと、水温が-10℃以上では海水中のフライン中の塩類の析出であることを示した。次に、砂を含んだ海水の移動による各種材料の平均粒径が大きい程、また砂の濃度が大きい程摩耗速度が大きいことを明らかにした。特に、合成材料においては砂の粒径が非常に大きく濃度が高くなると摩耗速度が極端に大きくなることを示したが、今のところそのような海水の存在は確認されていないし、著者等の海水の調査範囲が沿岸部でもあることから、今後はより沖合の海水中の砂の調査と他の水海域での調査が望まれるところである。

参 考 文 献

- 1) 佐伯浩、浅井有一郎、泉洸、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
- 2) Y.Itah,A.Yoshida,K.katoh,K.Sasaki,and H.saeki:An Experimental Study On Abrasion of Concret 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：海水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、
- 4) Y.Itah,A.Yoshida,Y.Asai,K.Saeki,and H.Saeki:Testing Methods on Sea Ice-Concrete Sliding Abrasion Proc. of P.O.A.C.1986
- 5) 伊藤喜栄、浅井有一郎、佐々木佳文、後藤克人、佐伯浩：砂を含んで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 第14回海洋開発シンポジウム

材 料	平均摩耗速度(mm/km)	
	海水による実験 ($\sigma_c=10\text{kgf/cm}^2$)	
	T=-20℃	T=-10℃
コンクリート(L.W.C) ($\sigma_c=568\text{kgf/cm}^2$)	0.0500 0.0550	0.0178
L.D.P.E	0.0029	0.0022
H.D.P.E	0.0045	0.0030
ウレタンエラストマー	0.0045	0.0030
銅	0.0045	0.0030
Zebron	0.0081	0.0078

表1 海水による各種材料の摩耗速度

材 料	平均摩耗速度(mm/km)	
	砂を含んだ水 ($\sigma_c=10\text{kgf/cm}^2$ $d=0.14\text{mm}$, $w=0.4\%$)	
	T=-10℃	
コンクリート(L.W.C) ($\sigma_c=568\text{kgf/cm}^2$)	0.0350	
L.D.P.E	0.0213	
H.D.P.E	0.0273	
ウレタンエラストマー	0.0159	
銅	0.0137	
Zebron	0.0156	

表2 砂含有海水による各種材料の摩耗速度

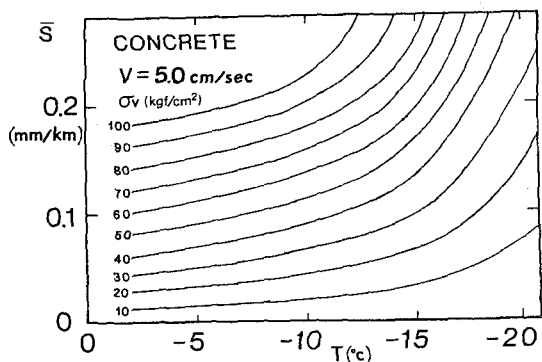


図1 海水によるコンクリートの平均摩耗速度

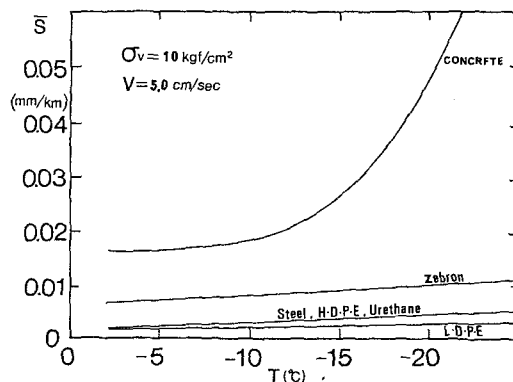


図2 各種材料の海水による摩耗速度

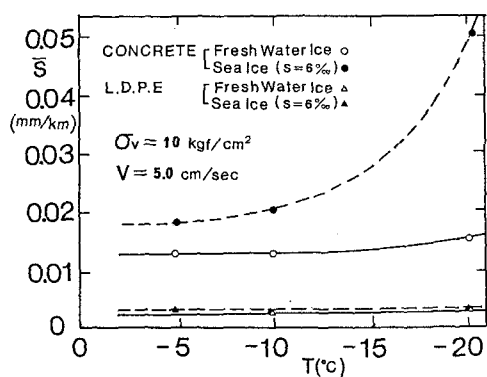


図3 淡水水と海水による摩耗速度の差

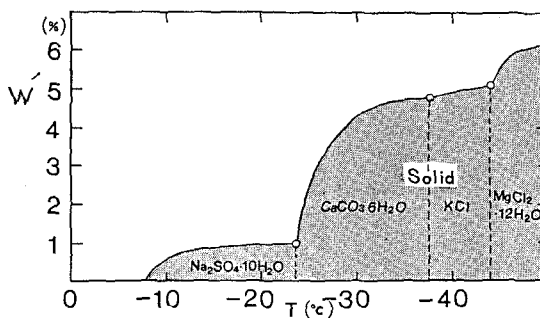


図4 ブライン中の固形分の析出量

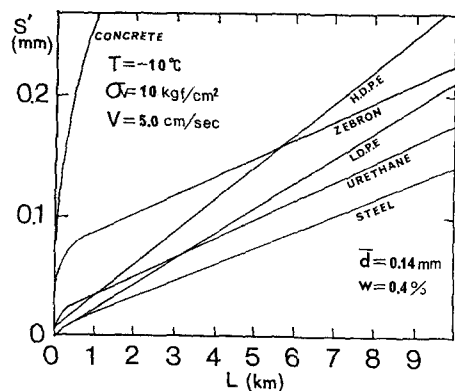


図5 平均摩耗量と距離の関係

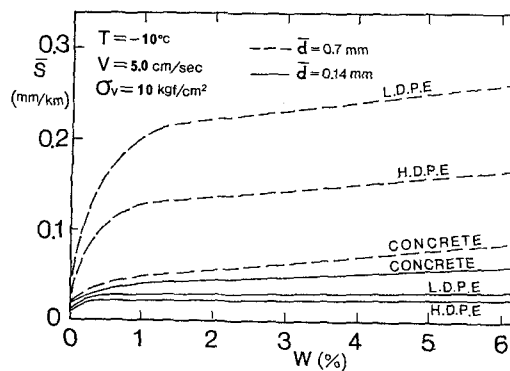


図6 摩耗速度へ及ぼす粒径と濃度の効果

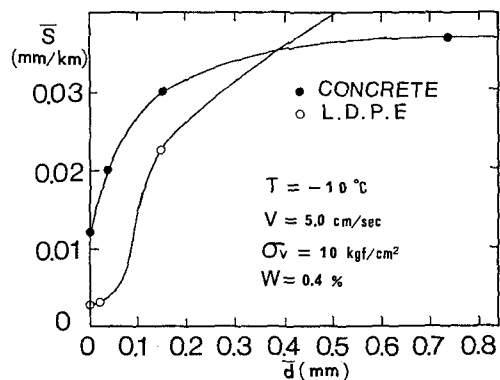


図7 摩耗速度へ及ぼす粒径の効果