

海水接触による鋼材の損耗に関する基礎的実験

Abrasion Tests of Steel due to Sea Ice Contact

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 ○正員 大塚 淳一 (Junichi OTSUKA)
 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 正員 木岡 信治 (Shinji KIOKA)

1. まえがき

北極海やオホーツク海など海水・流水の移動が活発な氷海域において、海水による衝突や摩擦によって構造物の変形・摩耗・剥離などの損耗が発生する。氷海は、その氷の摩耗に加えて、低温で海中酸素濃度が高く腐食性が強いことから、構造物の損耗が激しいといわれる。鋼材の損耗率は通常海域の2倍という報告例があるほか、コンクリートでは20年間で約14cmも摩耗したという報告例¹⁾もある。我が国でも、海水の接触・衝突による鋼矢板式の護岸や導流堤等の著しい材料損耗や、コンクリート剥離で鉄筋が露出する等の被害事例がある。とくに昨今の気候変動による海水減少は、海水運動の活発化や漂流速度の高速化を招き、氷塊の衝突や、海水の接触や摩擦による構造物の腐食や摩耗の促進などといった構造物の損傷・劣化が加速する。これまでも Itoh ら^{例え²⁾}によって、海水によるコンクリートの摩耗に関する研究が精力的になされ、その摩耗メカニズムを明らかにするとともに、実用的な摩耗推定方法を提案している。しかし鋼材については腐食が同時に進行するといった複合的な損耗や、海水による純粋な損耗量そのものの計測の不確かさから、定量的にその研究が実施された例は少ない。本報では、鋼材の損耗要因のうち、まずは海水による摩耗に着目した海水と鋼材との基礎的なすべり摩耗試験を行い、その摩耗特性について調べるとともに、損耗要因に対する寄与について考察を加えた。

3. 試験方法

摩擦・摩耗試験方法には様々な形式が知られているが、Itoh ら²⁾と同様な理由により、滑動式(ブロック・オン・プレート)を採用した。図-1に示すように、鋼製ケースに収納された角柱の人工海水³⁾(幅8cm、高さ5~10cm、長さ70cm)に、構造物を意図した試験体(SS400)を、油圧ジャッキで適当な圧力で氷に接触させる。鉛直下向きに圧力をかけた状態で鋼製ケースを一定速度の往復運動(最大ストローク50cm)により摩擦させる。その動作の基本原理は、ACサーボモーターでボールネジを回転させることで実現しており、長距離の安定したすべり摩擦が可能な機構となっている。試験は温度制御できる低温室で実施し、適当な摩擦距離の後、Itoh 等²⁾と同様な方法で、試験体の摩耗面の5測線上における表面粗さを測定することにより、損耗量を推定した。人工海水の幅は8cm、構造物である試験体の幅は10cmで、試験体の両端1cmは海水と接する事がないため摩耗することがなく、摩耗量測定基準点となる。その基準点との差を摩擦によって損耗した量と考え、すべての測線上の平均をとり損耗量と定義した。主な実験条件を表-1に示す。コンクリートの摩耗量は接触圧力に

大きく依存することが知られており²⁾、本実験でも、まずは接触圧力が摩耗量に及ぼす影響を調べるために、接触圧力を0.37MPa~1.1MPaの3段階において実施した(ケースA,B,C)。また表中のA-1とA-2は同一実験条件を意味し、実験のバラツキと、接触圧力の影響の程度との相互比較を行うために設定した。

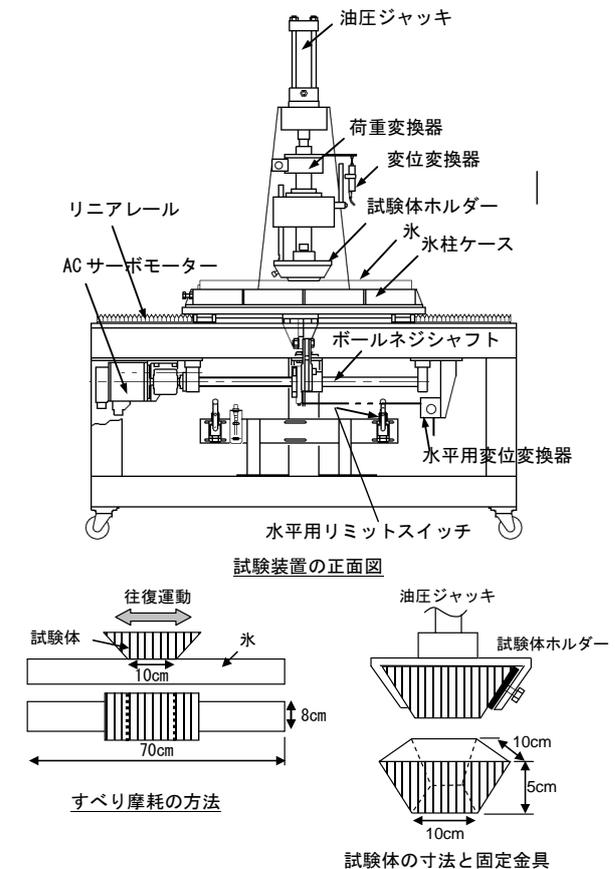


図-1 すべり摩耗試験装置と摩耗方法の概要図

表-1 主な実験条件

ケース	A-1	A-2	B	C
氷温(℃)	-10	-10	-10	-10
接触圧力(MPa)	0.6	0.6	0.37	1.1
移動速度(m/s)	0.06	0.06	0.06	0.06
振幅距離(m)	0.3	0.3	0.3	0.3
最大摩擦距離(km)	13.3	28.5	28.5	34.1

3. 試験結果および考察

図-2には、摩耗(損耗)量と摩擦距離との関係を示す。同図には、幾つかの異なる接触圧力下での結果を示している。まず両者の関係を見る前に、一般材料のすべり摩耗の進行の基本形式について触れておく。同図が示

すように、一般には3つのタイプが存在する。すべり開始から摩耗（損耗）率が次第に変化して、後に一定の摩耗率となる場合、摩耗率が変化している状態を初期摩耗、一定の摩耗率の状態を定常摩耗状態と呼ぶ。特に Type-A のように、初期摩耗（シビア摩耗）状態での摩耗率が大きく、定常摩耗（マイルド摩耗）状態における摩耗率が小さいことが多い。初期摩耗状態はなじみ期間ともいわれ、初めにもっていた表面粗さの大きい突起がつぶされたり、摩耗して除去されるとともに表面層の構造も変化して、互いに都合良くすべることができるようになる。あるいは金属材料間の摩擦の場合（特に遷移元素の場合）、シビア摩耗段階において、表面の同一箇所が反復摩擦されると、摩擦面では接触と分離を繰り返す（凝着摩耗）、その結果、雰囲気気体吸着に対して摩擦面が機械活性化される。その場合、酸素の化学吸着膜が形成され、真実接触部の中の固体直接接点部が大幅に縮小される。その結果、移着素子のサイズが小となり、摩耗粒子の微細化と比摩耗量の激減がもたらされる、という機構で説明される⁴⁾。Type-C は直線的に損耗が進行するタイプである。図-2 を見ると、バラツキはあるが、Type-A に近く、初期には摩耗率が大きい、次第に減少してくるが見て取れる。海水によるコンクリート摩耗の場合にも Type-A もしくは B の形式であることが報告されている。

次に接触圧力の影響について考察する。一般に、すべり摩耗に関して、次の Holm の式が知られている。

$$W = k \frac{P}{p_m} L$$

ここに、 W は荷重 P の下、距離 L 摩耗したときの摩耗体積、 p_m は軟らかい方の個体押し込み硬さ、 k は摩耗係数とよばれる定数である。海水によるコンクリート摩耗²⁾の場合にも、摩耗量は摩擦距離に比例すること、荷重つまり接触圧力に比例することが明らかにされ、摩耗量推定には、上式と同様な形式の算定式が提案されている。図-2 を見ると、大きなバラツキは見られるものの、圧力が大きくなるにつれて摩耗量が増大する傾向は見られない。むしろ、最も圧力が大きいケース C が最も小さな摩耗量を示している。同一条件で実施したケース A の 2 つの結果の違い（バラツキ）も踏まえると、ケース A と B では、明確な違いが見られず、ほぼ同一と見なすことができる。また接触圧力が最も高いケース C については、測定誤差と考えることもできるし、損耗は腐食が支配的と考えた場合、接触圧力の増大により鋼材表面が貧酸素状態となり腐食が進行しにくいと考えることもできる。なお、今回腐食についての定量的な計測や評価を行わなかったが、海水には腐食生成物と思われる赤さびが付着していた。いずれにしても、本実験の範囲では、接触圧力の増大にともなう摩耗量が増大する傾向は見られず、正味の材料の塑性変形にともなう接触・分離を起因とする凝着摩耗による可能性は低いことが推察され、腐食摩耗による可能性が考えられる。極論すれば、海水は直接鋼材を摩耗させるのではなく、海水は鋼材表面に発生する腐食膜・生成物を除去し、鋼材の新生面・活性面を露出させ、腐食しやすい状態を創出する。換言すれば鋼材の損耗は、主に腐食によるもので、海水はそれを促進させているという解釈である。また腐食による表面の強度低下、腐食疲労や腐食割れによる強度低下による機械的摩耗を加速させる。これは、一般に海底面近傍におけるサンドエロージョンのメカニズ

ムと同様であり、電気防食などの対策がとられる。つまり、腐食しにくい環境を創出することが、その摩耗・損耗の対策となっている。また、海水と鋼材との間に錆などの粒子が介在し、これが研磨材の役割をし、摩耗を加速することも考えられる。これは、材料表面の突起あるいは材料に介在する砥粒による切削であるアブレシブ摩耗と呼ばれる摩耗形態に分類されよう。この摩耗特性も接触圧力と摩擦距離に比例するとした Holm の摩耗式で説明できる場合が多い。このように、鋼材の損耗は、さまざまな要因からなることが推察される。

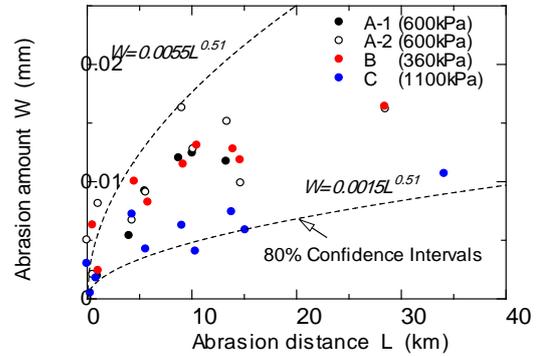


図-2 摩耗量と摩耗距離との関係

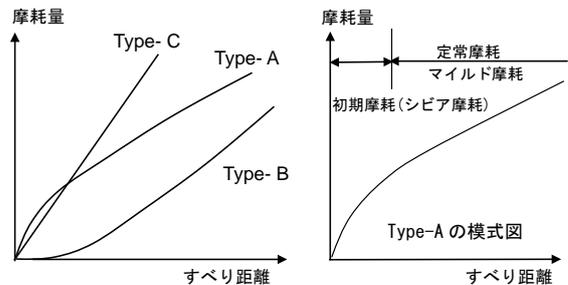


図-3 摩耗進行の基本形式

5. おわりに

海水と炭素鋼とのすべり摩擦・摩耗試験を実施した。その摩耗（損耗）量は、多くの材料で一般に成り立つ Holm 式に示されるような接触圧力に比例して増大するという傾向はみられず、凝着摩耗の寄与が低く、腐食生成物の除去による腐食の加速、錆粒子の介在によるアブレシブ摩耗の可能性が考えられた。現在、腐食しにくい SUS, Ti 等の摩耗試験や、水槽における腐食試験（繰り返し錆除去）、腐食生成物の介在を考慮した摩耗試験など種々の実験を展開中であり、別の機会に報告したい。

参考文献

- 1) Janson, J. E. Long Term Resistance of Concrete Offshore Structures in Ice Environment, 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Houston, American Society of Mechanical Engineers. Vol. III., pp. 225-231, 1988.
- 2) Itoh, Y., Tanaka, Y., and Saeki, H. Estimation Method for Abrasion of Concrete Structures Due to Sea Ice Movement. Proc. of the Forth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, April 10-15, Vol. II, pp. 545-552, 1994.
- 3) 木岡信治・森昌也・山本泰司・竹内貴弘：流氷期の津波来襲を意図した流氷の構造物への衝突に関する中規模実験およびその数値計算手法の基礎的検討，海岸工学論文集第 55 巻，pp.851-855，2008.
- 4) 笹田直著：摩耗，養賢堂，2008.