

氷盤移動による鋼矢板の摩耗とその推定法

Abrasion of Steel Sheet Pile Due to a Movement of Ice Floes and Its Estimation

寺島貴志*、今泉 章**、佐藤光一***、中田克哉****、花田真州*****、佐伯 浩*****

T. Terashima, A. Imaizumi, K. Sato, K. Nakata, M. Hanada and H. Saeki

Ice floes are widely known to abrade surfaces of structures constructed in sea water areas where ice floes move actively. Since both corrosion and abrasion by sea ice cause a decrease in the thickness of the steel of marine structures in frozen sea water areas, differentiating these effects is difficult in practice.

We measured thickness of the steel sheet piles used for the side walls of the channel and for the piers of the bridge built over the channel. From the measurements we found the abrasion of the steel by sea ice movements and developed a technique to estimate the abrasion depth.

Keywords : frictional forces, abrasion, steel sheet pile

まえがき

氷盤の移動が活発な水域に建設される構造物表面は移動する氷盤が及ぼす摩擦力によって摩耗することがよく知られている。Janson¹⁾によるボスニヤ湾に建設されているコンクリート製海中燈台の摩耗調査結果によると、海水の移動の激しい水域に建設されている燈台の場合、20年間で約140mm(年平均で約7mm/year)も摩耗した例が報告されている。しかし、氷海域に建設されている鋼製海洋構造物の場合、腐食と海水による摩耗が同時に鋼材肉厚減量に影響するため、それらを分離することが実際には困難である場合が多い。

現在、サハリン北部のオホーツク海においては、石油開発が行われようとしているが、この海域は海水の移動が活発であることと、これからの極地向け海洋構造物では、表面を鋼材で被覆した合成構造型式が有利であるともいわれていることから、海水移動による鋼材表面の摩耗の予測が設計上重要になってくる。

本研究は昭和53年12月に、北海道のオホーツク海に面しているサロマ湖に建設された第二湖口の水路(幅50m、長さ260m、水深5.0m)の側壁に用いられている鋼矢板、及びその水路に建設されている橋梁の橋脚部の鋼管矢板の残存肉厚の測定結果より、海水氷盤移動による鋼材の摩耗の実態と、摩耗量推定方法について明らかにしたものである。

1. 調査地点と調査方法

サロマ湖の第二湖口は、湖内の水質環境向上を主目的とし、航路としての利用も考慮して、昭和53年建設された。水路延長は約260mで、外海側には2本の導流堤が建設されている。この水路の側壁は鋼矢板で建設され、橋台のコンクリートは鋼管杭で回りを保護されている。調査は、図-1に示すように鋼矢板については2ヶ所、鋼管矢板についても2ヶ所で行った。鋼矢板はFSP IV Aである。また矢板の部分については凸部と凹部について、鋼矢板上端から50cmピッチで残存肉厚を測定した。また、それと同時に外観観察を行い、その結果を以下に示す。

(1) 鋼矢板

- ① L.W.L.近傍(+0.0~-1.0m)を観察した結果、凸鋼矢板への生物付着は認められなかった。これは流水によるためと考えられる。
- ② L.W.L.近傍には集中腐食による貫通孔等は認められなかった。
- ③ L.W.L.近傍の凸鋼矢板は流水による摩擦作用により滑らかな外表面を示していた。
- ④ 付着生物は主に海藻類で、-3.5m以深から海底面までの範囲に付着していた。これも流水の影響を受けていると判断できる。

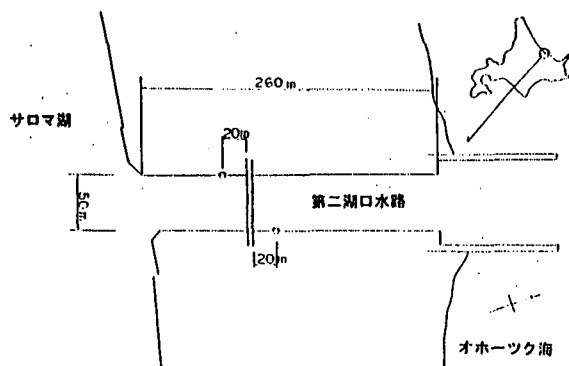


図1 調査位置図

- | | | |
|-------|-----|-----------------------------------|
| * | 正会員 | パシフィックコンサルタンツ(株)北海道支社 |
| ** | 正会員 | (株)西村組 |
| *** | 正会員 | 新日本製鐵(株)札幌支店 |
| **** | 正会員 | 北海道網走支庁水産課 |
| ***** | 正会員 | 北海道大学大学院工学研究科 (060 札幌市北区北13条西8丁目) |

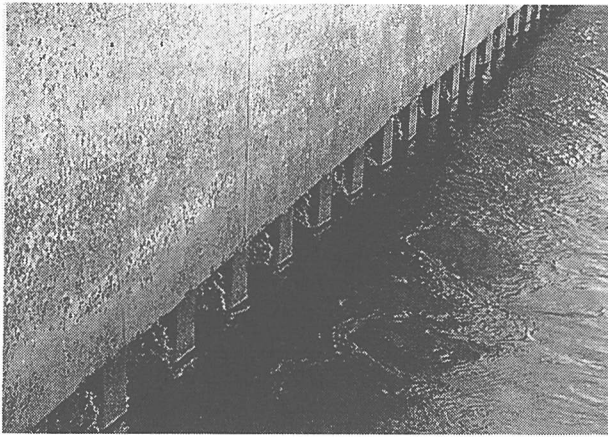


図 2 (a) 鋼矢板

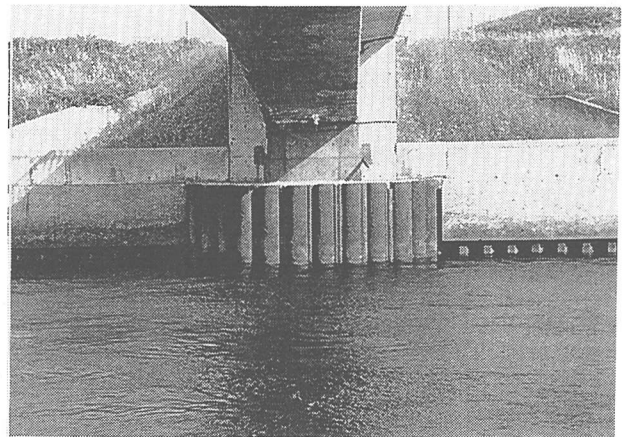


図 2 (b) 鋼管矢板

(2)鋼管矢板

- ① L.W.L.近傍で浅い観察結果では、飛沫帯には「さびこぶ」が認められた。
- ② L.W.L.近傍の鋼管矢板本体には付着生物は認められなかった。これは鋼矢板と同様に流水による摩耗によるものと推定される。
- ③ L.W.L.近傍には、鋼矢板と同様貫通孔は認められなかった。
- ④ L.W.L.近傍は、鋼矢板の凸部と同様、流水による影響で滑らかな外表面を示していた。また、流水の衝突あるいは氷力の作用に起因すると思われる偏平化が生じていた。目視によると、最大 10cm 程度の偏平化が±0.0～-1.0m の範囲で生じていた。これは、-1.0m 程度までは強い氷力を受けていることを示している。

この鋼矢板部と鋼管矢板部の写真を図-2 (a), (b)に示す。図-2 (a)の鋼矢板においては、凸部は平滑で、付着生物はまったくなく、凹部及び側部には多くの付着生物が観察されている。また、図-2 (b)の橋台保護の鋼管矢板においても同様に凸部は、腐食もほとんど見られず、付着生物も見られない。以上のことより、この湖口部の鋼矢板、鋼管矢板は氷盤移動の影響を強く受けていることを示し、その影響の範囲も凸のみであることが目視観測からも明かである。

2. 調査結果と考察

鋼矢板の水路右岸の残存肉厚と腐食速度(摩耗の影響も含む)の測定結果を図-3 (a)(b)に、同じく左岸のそれらを図-4 (a)(b)に示す。同様に鋼管矢板の測定結果を図-5 (a)(b)、図-6 (a)(b)に示す。

これらの結果より、以下の結論を得ることができる。

(1)鋼矢板について

- ① 右岸側と左岸側の鋼矢板の腐食傾向に顕著な差は認められない。
- ② 凸鋼矢板と凹鋼矢板の腐食傾向には大きな差が認められた。すなわち凹鋼矢板の腐食量は少なく、凸鋼矢板の腐食量は大きかった。
- ③ 凸鋼矢板の腐食は深度方向で異なっていた。+0.0m 近傍の腐食量が最も大きく、それ以深の腐食量は+0.0m の腐食量の半分程度であった。
- ④ この凸鋼矢板の+0.0m 近傍の腐食速度は0.2～0.28mm/year程度であり、凹部に比べてはるかに大きい値であった。

(2)鋼管矢板について

- ① 右岸側と左岸側の鋼管矢板の腐食傾向には大きな差は認められなかった。
- ② 鋼管矢板の腐食は深度方向で異なっていた。+0.0m 近傍の腐食量が最も大きく、それ以深の腐食量は+0.0m の位置

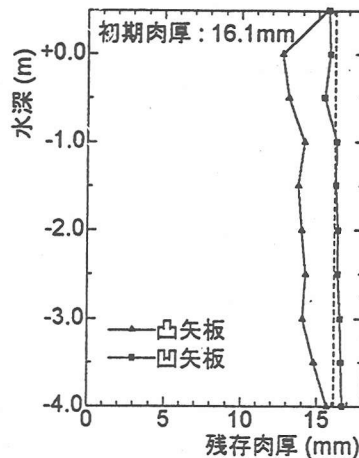


図 3 (a) 右岸鋼矢板残存肉厚

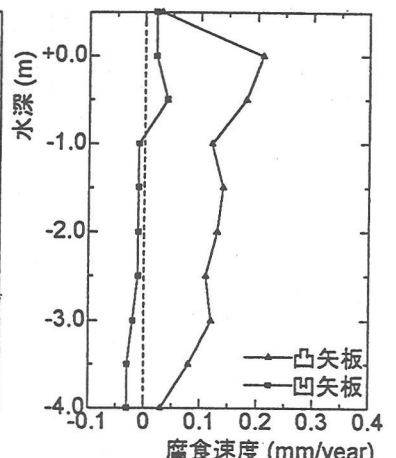


図 3 (b) 右岸鋼矢板腐食速度

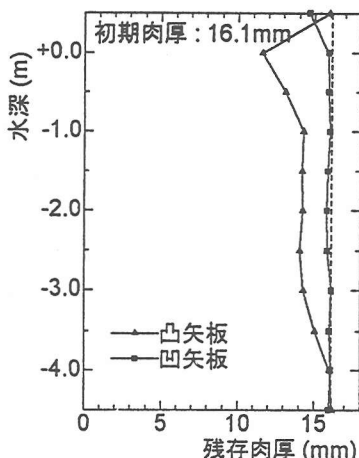


図 4 (a) 左岸鋼矢板残存肉厚

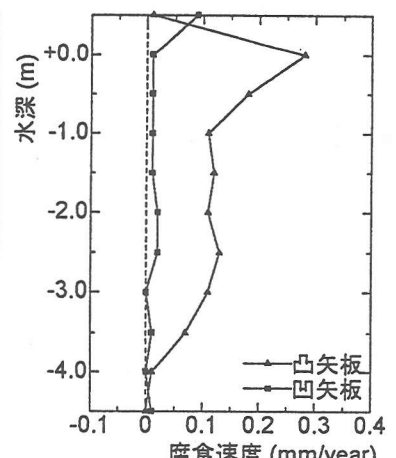


図 4 (b) 左岸鋼矢板腐食速度

のその半分程度であった。

③鋼管矢板本体の+0.0m 近傍の腐食速度は 0.35mm/year 程度で大きい腐食速度を示した。

以上の結果と、外観観察の結果より、冬期の流水の出入によって、海氷盤と鋼矢板等との摩擦によりそれらが摩耗していると判断することができる。また、上述してきた腐食量、腐食速度については、鋼矢板の凹部については適当な表現であるが、鋼矢板凸部と鋼管矢板については、氷盤の移動に起因する摩耗と腐食が同時に起こっていると推定される。また、鋼矢板の鉛直方向の腐食分布傾向からみても、湖口部に建設されている鋼材は腐食のみではないことになり、また、鋼管矢板の腐食速度が 0.35mm/year という値は、海水温が低く、海水の水質が清浄であることを考えると異常に大きく、摩耗の影響を強く受けていることを示している。

3. 海氷移動による鋼材摩耗の推定方法—サロマ湖第二湖口の場合—

海氷の移動によるコンクリート、鋼材その他の被覆材料の摩耗のメカニズム、摩耗速度に関する研究は、伊藤等²⁾、高橋等^{3) 4)}、佐伯等⁵⁾によって行われている。それらの成果によると、摩耗速度 S' (氷盤の 1km の移動量に対する材料表面の平均摩耗量, mm/km) は材料固有の値で、海水の温度が -8°C 以上では、氷温や相対速度にはほとんど依存せず、接触圧力に強く依存する。鋼材の摩耗速度 S' は次式で示される。

$$S' = 0.0003 \cdot \sigma_v \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$S': \text{mm/km} \quad \sigma_v: \text{kgf/cm}^2$$

接触圧力が σ_v で、摩耗距離を L とすると、平均の摩耗量 $\bar{S}$ (mm) は次式で示される。

$$\begin{aligned} \bar{S} &= S' \cdot L \\ &= 0.0003 \cdot \sigma_v \cdot L \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$L: \text{摩耗距離(km)}$$

よって、鋼材の摩耗量を推定するためには、 σ_v と L を推定しなければならない。

(1) 接触圧力 σ_v の推定

サロマ湖第二湖口水路を通過する流水が側壁の鋼管矢板へ及ぼす接触圧力や、湖口部を通過する流水の量等の計測は全然されていない。よって、この接触圧力を推定することは極めて困難である。ここでは、いくつかの仮定に基づいて接触圧力 σ_v を推定することにした。図-7 に示すように、今外海から湖内に流水が侵入する時、水路内は流水で満たされると仮定し、水路幅 $2l=50\text{m}$ とし、代表的なオホーツク海の氷盤の大きさと水路の流速から水路内では氷盤がアーチを形成する可能性が高いことが明かとなった。よって図-7 に示すように、水路内でアーチを形成した状態で氷盤群が湖内に流入すると仮定した。この理由として、アーチの形状を 2 次放物線形とし、その高さ f と水平距離 $2l$ の比 $f/2l$ は原等の研究結果から $0.40 \sim 0.53$ とすると、 $F_H = \frac{1}{2} F_V$ となる。 F_H に鋼矢板壁と海氷間の摩擦係数を乗じたものが、氷盤の流下を妨げる摩擦力 F_f となるが、摩擦係数については Saeki et al⁶⁾ の研究結果から、静止摩擦係数で 0.23 以下、動摩擦係数で 0.1 程度であることが明らかにされている。この摩擦力と流下しようとする力 F_V を比べると、明かに F_V の方が大きく、水路内の氷盤群はアーチを形成しつつ流下することが可能であることがわかった。よって、氷盤に作用する単位幅当たりの流体力 q (kgf/m) を求める必要がある。この q を図-7 に示すように放物線形アーチに作用することにより F_H を求めることが可能となる。氷盤に作用する流体力は

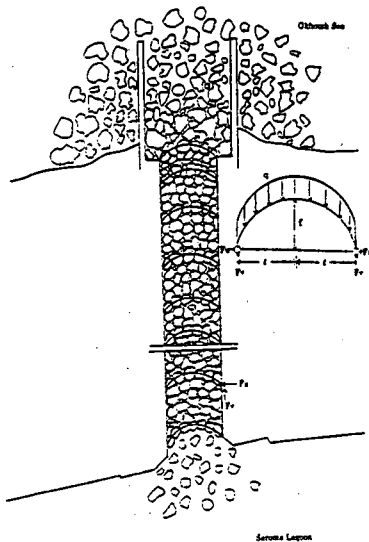
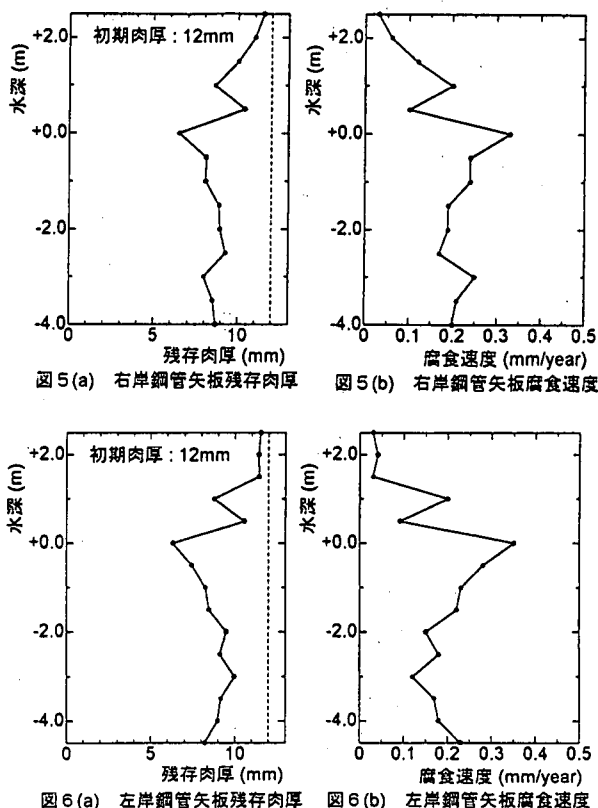


図7 接触圧力推定のための仮定

抗力と流体氷盤間の摩擦力に分けることができる。水路内が氷盤で完全に覆われているとすると、形状抵抗（抗力）は無視できることになるので摩擦力のみを考慮することにする。上田等⁷⁾の研究結果より、この摩擦力による流体力 $q(\text{kgf/m})$ は、氷盤の長さを 1m、海水の単位体積重量を 1.02tf/m^3 とすると、単位幅あたり、(3)式のように表せる。

$$q = 510 \cdot C_f \cdot V^2 \quad \dots\dots(3)$$

ここで C_f は水と氷との摩擦係数、 V は流速(m/s)である。一様の氷盤群の摩擦係数 C_f について上田等はかなり広いレイノルズ数の範囲で 0.007 としており、氷盤の下面に椀形粗度をつけた時 $C_f=0.026$ としている。また Mcphee は北極海の浮氷盤での測定結果より $C_f=0.100$ を得ている。また、榎等⁹⁾は種々の氷厚の氷盤が Ice Jam を形成した時の摩擦係数について $C_f=0.300$ を得ている。サロマ湖第二湖口を通過する氷盤群の状況については調査結果が皆無であることから、種々の摩擦係数に対する、アーチ形成時の流体力 q を計算した結果を表-1に示す。次に二次放物線形のアーチを形成し、河合等の結果より $f=1.01$ とした時の水平方向氷力 $F_H(\text{kgf})$ は(4)式のように表せる。

$$F_H = \frac{ql^2}{2f} = \frac{1}{2}ql \quad \dots\dots(4)$$

q に(3)式から得られた値、 l に 25(m)を代入すると表-2が得られる。

ここで、国松等⁹⁾のオホーツク海沿岸の流氷の大きさ、及び氷厚の調査より、氷厚 1m 程度の氷が最も多いことから、氷厚を 1m とし、水路側壁矢板の凸部に氷圧 F_H が作用すると仮定すると、接触面積は 0.3m^2 となる。これより接触圧力 σ_v は $F_H/3000$ で計算できることになる。よって、この σ_v が得られると摩耗速度 S' は(1)式で求められる。よって、この摩耗速度 S' は、 F_H に依存し、 F_H は流速と摩擦係数 C_f に依存することになる。摩耗速度 S' の計算結果を表-3に示す。

(2)氷盤移動距離 L の推定

次に、摩耗量を求めるためには、(2)式中の氷盤の移動距離 L を推定する必要がある。この氷盤の移動距離 L を求めるために、二つの条件に分ける。

①湖内が結氷する場合

湖内の結氷が流氷来襲より早い場合、湖内の第二湖口近傍に約 $160,000\text{m}^2$ の開水面が残される。このような状態で流氷が侵入すると湖内に入った海水の一部は結氷氷盤下にアンダーターニングしながら潜り込むことになる。そして潮汐が干潮に向かうと湖内に流入した海水は湖外に出ていくことになる。よって、水路内の氷盤移動速度（流速と同じと仮定する）が 1m/s 程度だと湖内外開水面は約 1 時間で流入した氷盤で覆われることになる。よって、水路内では 1 日 2 回潮の場合は、水路の出入を考えると 1 日に 12.8km の移動距離となる。

②湖内が結氷していない場合

湖内が結氷していない場合には、湖外の流氷は流出、流入の潮流に従って移動するとする。過去の調査結果によると、湖外が流氷に覆われ、湖内が結氷していない状態で、湖内への流氷侵入でホタテ貝の養殖施設に大きな被害を与えたのは、第二湖口を開削以後では昭和 63 年、平成元年、2 年、3 年それに 5 年の 5 回である。

1 日 2 回潮とし、湖口水路の流速変化を正弦波と仮定し、最大流速を $V_{\max}$ とすると、流速は次式で示される。

$$V = V_{\max} \sin \frac{2\pi}{T} t \quad \dots\dots\dots(5)$$

また、氷盤移動距離 $L(\text{km})$ は次式で求められる。

$$L = \int |V| dt \quad \dots\dots\dots(6)$$

周期 T を 12 時間とし、 $V_{\max}=2.5\text{m/s}$ とすると、氷盤の移動距離は 1 日当たり約 138km となり、 $V_{\max}=2.0\text{m/s}$ とすると、約 110km となる。

(3)摩耗量の推定

湖内が結氷していないとき、流速により接触圧力が変わり、摩耗速度も変化するし、氷盤の移動距離もまた変化する。摩耗量 $S(\text{mm})$ は(2)式で示すように、摩耗速度 $S'(\text{mm/km})$ と氷盤の移動距離 $L(\text{km})$ を乗ずることにより求められる。今、ある時刻 $t(\text{sec})$ における流速を $V(\text{m/s})$ とし、 dt 時間で摩耗する量 $dS(\text{mm})$ は、以下の式で表せる。

表1 単位長さあたりの流体力

$q(\text{kgf/m})$	C_f	0.007	0.011	0.026	0.100	0.200	0.300
$V(\text{m/s})$ 0.1	0.036	0.056	0.133	0.510	1.020	1.530	
0.2	0.143	0.224	0.530	2.040	4.080	6.120	
0.5	0.893	1.403	3.315	12.750	25.500	38.250	
1.0	3.570	5.610	13.260	51.000	102.000	153.000	
1.5	8.033	12.623	29.835	114.750	229.500	344.250	
2.0	14.280	22.440	53.040	204.000	408.000	612.000	
2.5	22.313	35.063	82.875	318.750	637.500	956.250	

表2 水平氷力の計算表

$F_H(\text{kgf})$	C_f	0.007	0.011	0.026	0.1	0.2	0.3
$V(\text{m/s})$ 0.1	0.45	0.70	1.66	6.38	12.75	19.13	
0.2	1.79	2.81	6.63	25.50	51.00	76.50	
0.5	11.16	17.53	41.44	159.38	318.75	478.13	
1.0	44.63	70.13	165.75	637.50	1275.00	1912.50	
1.5	100.41	157.78	372.94	1434.38	2868.75	4303.13	
2.0	178.50	280.50	663.00	2550.00	5100.00	7650.00	
2.5	278.91	438.28	1035.94	3984.38	7968.75	11953.13	

表3 摩耗速度の計算表

$S'(\text{mm/km})$	C_f	0.1	0.2	0.3
$V(\text{m/s})$ 0.5	1.59×10^{-5}	3.19×10^{-5}	4.78×10^{-5}	
1.0	6.38×10^{-5}	1.28×10^{-4}	1.91×10^{-4}	
1.5	1.43×10^{-4}	2.87×10^{-4}	4.30×10^{-4}	
2.0	2.55×10^{-4}	5.10×10^{-4}	7.65×10^{-4}	
2.5	3.98×10^{-4}	7.97×10^{-4}	1.19×10^{-3}	

$$dS = S' dL \\ = S' |V| dt \cdot 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (7)$$

摩耗速度 S' (mm/km) は(1)、(3)、(4)式などから以下の式で表せる。

$$S' = 6.375 \times 10^{-4} \times C_f \times V^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

したがって全体の摩耗量 S (mm) は(7)式を積分して(9)式のように表せる。

$$S = \int S' |V| dt \cdot 10^{-3} \\ = 6.375 \cdot C_f \int |V|^3 dt \cdot 10^{-7} \quad \dots\dots\dots (9)$$

流速を(5)式のように1日2回潮の正弦波で与えると、1日当たりの摩耗量 S_{1day} (mm/day) は(10)式のように与えられる。

$$S_{1day} = 2.338 \cdot 10^{-2} \cdot C_f \cdot V_{max}^3 \quad \dots\dots\dots (10)$$

これを図示化したものが図-8である。氷盤が Ice Jam 状の場合の摩擦係数 C_f が 0.3 の時、 $V_{max}=2.5$ m/s では1日 0.11mm 摩耗することになる。

次に、湖内が結氷している場合の摩耗量を推定する。流速は 2m/sec とし C_f を 0.3 とすると、移動距離は1日 12.8km であるから、1日当たりの摩耗量は表-3を用いることにより $12.8\text{km} \times 7.65 \times 10^{-4} \text{mm/km}$ となり、 $9.80 \times 10^{-3} \text{mm/day}$ となる。

水路建設後 16 年を経ているが、5 回結氷していない年があるので結氷年は実質的に 11 年間である。流氷侵入の日数は正確なデータはないが平均的に 20~30 日である。ここでは 20 日とすると、この 16 年間での湖内結氷年の全摩耗量 S_1 は $S_1 = 9.80 \times 10^{-3} \text{mm} \times (11 \times 20) = 2.16 \text{mm}$ となる。

これに対して湖内が結氷しない場合の全摩耗量 S_2 は、式(10)を用い、 $V_{max}=2.5$ m/s、 $C_f=0.3$ とすると、この 16 年間で 5 回結氷しない年があり、流入が 20 日間とすると、非結氷時の全摩耗量 S_2 は $S_2 = 0.1096 (\text{mm/km}) \times 5^{(回)} \times 20^{(日)} = 10.96 \text{mm}$ となる。

よって、この 16 年間の全摩耗量は $S_1 + S_2 = 2.16 \text{mm} + 10.96 \text{mm} = 13.1 \text{mm}$ となる。今の手順を表-4にまとめた。最大摩耗量を示す +0.0m の位置では、16 年間の最大腐食量(摩耗量)が 3.5mm~4.0mm であることを考えると、計算された摩耗量は大きい。これは、氷盤が Ice Jam 状になって流体力が最も大きい状態であること、流速もサロマ湖で観測される最も大きな値を用いていること、氷と構造物の接触面積を小さめに考えたこと、などの理由によるものと考えられる。換言すれば、考えられる中で最も厳しい条件を適用して推定したということだ。したがって、得られた値が大きめなのは当然であって、 C_f は 0.3 のまま、最大流速 V_{max} を 2.0 m/s にすると、16 年間の全摩耗量は 7.8mm となり、かなり近づく。

以上、氷盤移動によって鋼材が摩耗すると考えたときの肉厚減少推定値と、流氷の影響を受ける鋼矢板凸部及び鋼管矢板の肉厚減少実測値を比べるとほぼ一致しており、また、サロマ湖口部の鋼矢板の凸部と凹部の残存肉厚の調査結果から判断すると、凹部の腐食量は極めて少ないことから、凸部の腐食は実際には、流氷による摩耗と判定できる。

(4) 腐食速度について

サロマ湖第二湖口における腐食量及び腐食速度は、鋼矢板の凹部の測定結果から推定することができる。鋼矢板の場合図-3、4の測定結果より、腐食速度 (mm/year) は、最大で 0.10 mm/year 以下となっていて、我が国の他の海域に較て小さい値である。このサロマ湖の水温は図-9に示すように、最高の8月で 20℃、12月から3月中旬までは 0℃以下となっていて、水温は他の海域と較べて低く、湖口部は外海から清浄な海水が出入することもあり、腐食速度は極めて小さい。よって、流氷の影響を直接受けるような、海洋に孤立して建設されている海洋構造物や、海水の移動の激しい水路等に用いられる

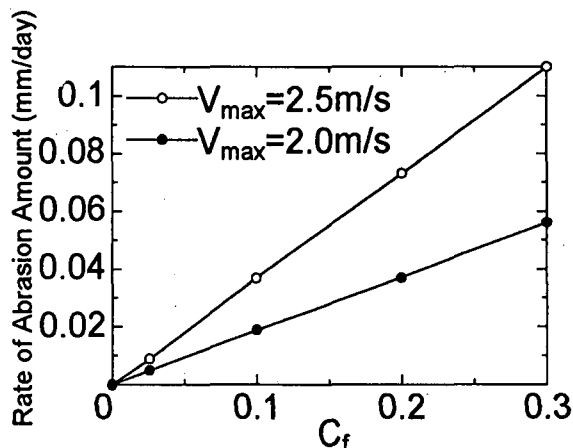


図8 湖内が結氷していないときの1日当たりの摩耗量

表4 サロマ湖第二湖口鋼矢板摩耗量の推定

	単位	結氷時	非結氷時 ($V_{max}=2.5$ m/s, $C_f=0.3$)
移動距離(1日当たり)	km/day	12.8	138
摩耗量(1日当たり)	mm/day	9.8×10^{-3}	0.11
建設後(16年)の結氷年数、非結氷年数	year	11	5
流氷侵入の日数(1年当たり)	day	20	20
摩耗量	mm	2.16	10.96
16年間の全摩耗量	mm	13.1	

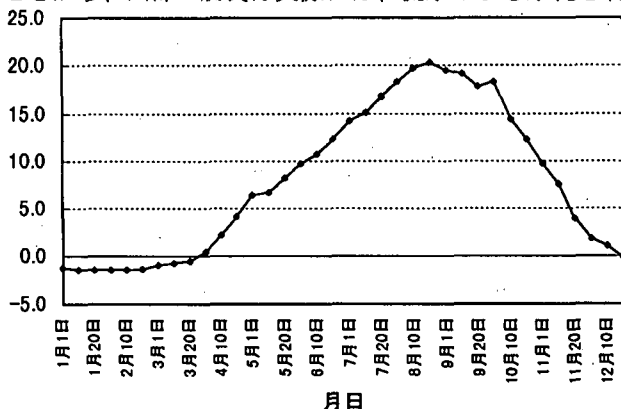


図9 サロマ湖内の平均水温(1987~1989年)

鋼管矢板や鋼矢板の凸部では腐食の影響より氷盤移動に伴って起こる摩耗を考慮せねばならないことが明らかとなった。

4. 結 論

サロマ湖第二湖口の建設に用いられている鋼矢板及び鋼管矢板の残存肉厚の調査結果と若干の解析結果より以下の結論が得られた。

- 1) 流水の影響を受けない鋼矢板凹部の残存肉厚の調査結果より、飛沫帯で腐食速度が 0.04~0.10mm/year で、それより深い所では 0.01mm/year 以下となっていて、我が国の他の海域に較べて小さい値となっている。これは水温が低いこと、海水が清浄であること、海水の塩分量が 33~34‰であることなどによるものと思われる。
- 2) 上記の調査結果より、流水の影響を受ける鋼矢板凸部及び鋼管矢板の飛沫帯での腐食速度（摩耗速度）は 0.2~0.35mm/year であり、それより深い-1.0~-4.0m 地点では飛沫帯での腐食速度に比べて半分程度であるが、凹部に比べていずれも極めて大きい値を示した。このことは、凹部は海水の影響を受けずに“腐食”しているのに対して、凸部は海水の影響を強く受けて“摩耗”している可能性を示している。
- 3) 鋼材の摩耗に関する過去の研究成果を用いて、水路内においてアーチ形成が生ずると仮定して、海水による鋼矢板の摩耗量を推定した結果、16 年間の摩耗量を推定することができ、最大腐食量の測定値と概ね一致する。このことから、凹部の腐食量は、飛沫帯では腐食と海水による“摩耗”が同時に作用し、それより深い-1.0~-4.0m 地点では主に海水による“摩耗”と考えることができる。

=参考文献=

- 1) Janson, J. (1987), Long Term Resistance of Concrete Offshore Structures in Ice Environment, Prof. 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Vol.Ⅲ, p225-231
- 2) 伊藤喜栄他(1988), コンクリート製海洋構造物の氷盤移動による摩耗量の予測方法に関する研究, 土木学会海洋開発論文集 Vol.7, p221-225
- 3) 高橋陽一他(1991), 氷盤移動による構造物表面の摩耗に関する研究, 第 7 回寒地技術シンポジウム講演論文集, p368-375
- 4) 高橋陽一他(1990), 氷盤移動による橋脚摩耗量の予測方法に関する研究, 第 6 回寒地技術シンポジウム講演論文集, p367-373
- 5) 佐伯浩他(1985), 海水移動によるコンクリートの摩耗に関する研究, 土木学会海洋開発論文集 Vol.1, p68-73
- 6) Saeki H, et al(1984), The Coefficient of Friction between Sea Ice and Various Materials Used in Offshore Structure, Jour. of Energy Resources Technology, Trans. of ASME, Vol.108, p65-71
- 7) 上田俊也他(1992), 浮氷盤に作用する流体力に関する実験的研究, 土木学会海洋開発論文集, Vol.8, p135-140
- 8) 榎国夫他(1992), Ice Boom による氷盤移動制御, 土木学会海洋開発論文集, Vol.8, p153-158
- 9) 国松靖他(1993), オホーツク海沿岸部の流氷盤の大きさに関する研究, 土木学会海洋開発論文集, Vol.9, p95~100