

寒冷地における港湾構造物近傍の氷盤の破壊状況について

Sea Ice Failure near Port Facilities in Cold Regions

早川哲也*・寺島貴志**・西畑昭史***・山角浩一****・浜岡荘司*****・佐伯浩*****

Tetsuya Hayakawa, Takashi Terashima, Akifumi Nishihata, Koichi Yamakado, Soshi Hamaoka and Hiroshi Saeki

Ports and fishing ports in cold regions in Hokkaido freeze during winter. Changes in sea level after ice sheets have adfrozen to port facilities, such as floating structures, quays and breakwaters, create vertical ice loads. Floating structures often suffer damage from sea ice, making it important to consider the influence of the sea ice in the design of such structures in cold regions.

In this study, investigations of sea ice conditions were conducted to estimate ice loads, and the distribution of ice thickness and the area range where the ice sheet undergoes flexural failure were clarified.

Keywords: Freezing in ports, Ice Failure, Distribution of ice thickness

1. はじめに

北海道内の比較的寒冷な地域の港湾・漁港では冬期に港内が結氷する。このような海域では、港湾構造物に海水が凍着した場合、水位変動により鉛直方向の氷荷重が作用することが考えられる。例えば、海水の影響により浮体構造物が被災する例もある。笹島ら(1996)は、結氷した海域において浮体構造物に関する現地実験を行い、塗装を黒色にすることにより海水の影響を小さくできることや、海水盤の曲げ破壊が発生する領域への設置を避ける(写真-1)ことを報告している。

しかしながら、海水盤の曲げ破壊が発生する機構については検討されておらず、この発生位置を予測することはできない。また、浮体構造物を設計するためには氷荷重を適切に算定する必要があるが、直立構造物に働く鉛直方向氷力の算定式(例えば西畑ら1996)は、海水の曲げ弾性率や氷厚から求めるものであり、まず、港内の海水盤の状況を把握することが重要となる。

そこで本研究では、北海道の結氷した港湾・漁港において現地調査を行い、海水盤の破壊領域や海水の状況について検討した。

2. 調査概要

1997年2月4日にサロマ湖内の富武士漁港において、氷厚分布の測定、水中カメラによる海水の状況の撮影及び水位変動による海水盤のたわみの測定を行った。たわみの測定は水準測量により行い、岸壁から20mの区間を1m毎に測定した。調査終了後には、 $4.5 \times 4.5 \times 45\text{cm}$ の供試体を作成し、歪み速度 $10^{-3}/\text{sec}$ で曲げ強度及び曲げ弾性率の測定を行った。

また、同年2月23日～25日に港内結氷が発生した北海道の港湾・漁港9港において曲げ破壊領域の調査を行った。写真-1に示したような海水盤の曲げ破壊領域について、その形状や港湾構造物からの距離を測定し、構造形式との関係について検討した。

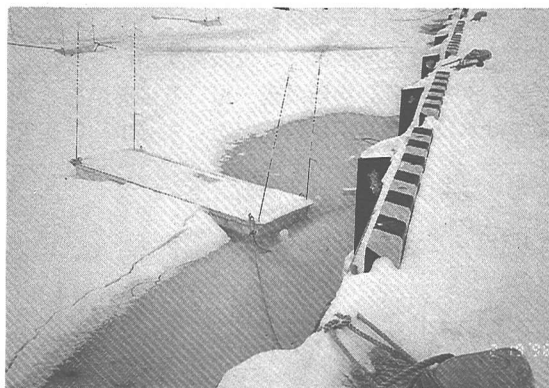


写真-1 結氷海域での浮体に関する実験

*	正会員	北海道開発局開発土木研究所 (062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)
**	正会員	パシフィックコンサルタンツ (株)
***	正会員	パシフィックコンサルタンツ (株)
****	工修	(株) 西村組
*****	水修	(株) オホーツク流水科学研究所
*****	正会員	工博 北海道大学工学部

3. 岸壁付近の海水の状況

(1) 氷厚分布と海水の状況

図-1は、氷厚分布の一例を示したものである。港湾構造物の法線と直角方向（ r 軸）に離れるにしたがって氷厚は減少し、ある距離 $r_1=130\text{cm}$ 以遠では一定となる傾向にある。岸壁付近の氷厚 h_1 は 24cm 、 r_1 以遠の氷厚 h_2 は 19cm であり 8 割程度となっている。

また、海水の状態も r_1 を境に異なっており、 $r \geq r_1$ の領域では氷温 -2°C における海水の曲げ強度が約 $5 \sim 10\text{kgf/cm}^2$ 、曲げ弾性率が約 $3.2 \sim 4.3 \times 10^4\text{kgf/cm}^2$ であるのに対して、 $r < r_1$ では測定用の供試体が作成できないほど強度が低いものとなっていた。

写真-2は、水中カメラにより岸壁付近の海水を撮影したものである。港湾構造物付近では、凍着・融解が水位変動と共に繰り返されるため、海水盤は厚くなっているものの層状に形成されていた。（写真の場所では 5cm 程度の海水が 3 段程度に重なっていた。）

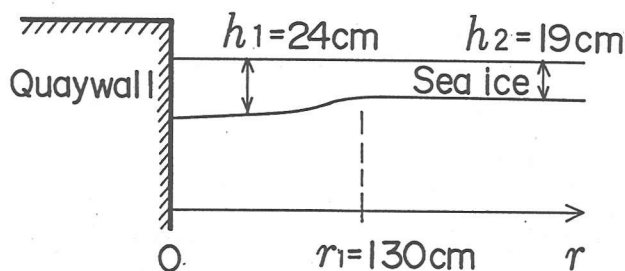


図-1 氷厚分布

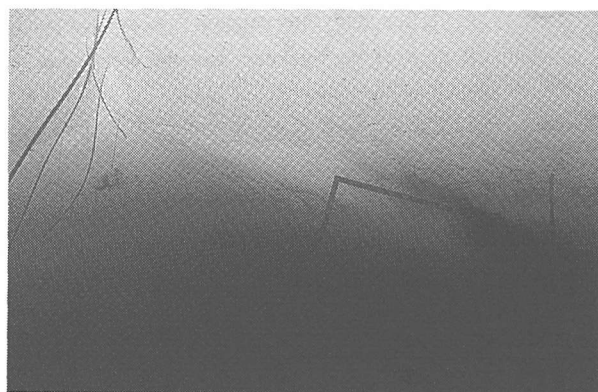


写真-2 海水の状況

(2) 水位変動による海水盤のたわみ

図-2は、港湾構造物からの距離 r での水位変動による海水盤のたわみ W を示したものであり、海水盤が港湾構造物に凍着している海水に引っ掛かっている状況である。同時に、西畑ら（1996）が示した下記の式

(1) から算定される理論値を示している。ただし、港湾構造物付近の海水盤は水没した状態にあり、フラジィングを考慮した理論式を用いる必要があるが、ここでは水没範囲も小さいことから式 (1) を適用した。

$$W(r) = \Delta \exp(-\lambda r) \cos(\lambda r) \quad (1)$$

$$\lambda = \left(\frac{k_w}{4D} \right)^{\frac{1}{4}} \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

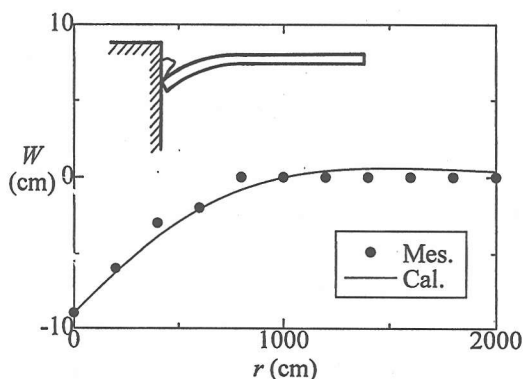


図-2 海水盤のたわみ

ここで、 E は海水盤の曲げ弾性率、 h は氷厚、 ν はポアソン比、 k_w は海水の単位体積重量、 Δ は水位変動量である。

式 (1) は氷盤を一樣厚さの弾性体と仮定し、海水盤と岸壁の境界をヒンジ支点として導いた理論式である。実際の海水は粘弾性体であり、図-1に示したように厚さは一樣ではない。しかし、厚さが一定となる地点での海水盤の曲げ弾性率と厚さの平均値を用いる ($E=3.81 \times 10^4\text{kgf/cm}^2$ 、 $h=19\text{cm}$ 、 $\Delta=9.0\text{cm}$ 、 $\nu=0.3$ 、 $k_w=0.001\text{kgf/cm}^3$) と、観測値と計算値がよく一致する傾向にある。よって、西畑ら（1996）の方法により鉛直方向に働く氷力の算定が可能であると考えられ、式 (2) より計算される構造物に働く鉛直方向氷力は 250kgf/m である。

$$P = \frac{\Delta k_w}{2\lambda} \quad (2)$$

4. 海水盤の破壊状況と港湾施設の構造形式

(1) 海水盤の破壊形態

直立構造物の周辺では、潮汐などの水位変動に伴い海水盤が破壊する場合があります、破壊形態としては、以下に示す4つが考えられる。

(a) 直立構造物に海水盤が凍着している場合、水位変動により凍着面においてせん断破壊が発生する。

(写真-3)

(b) 直立構造物に海水盤が凍着している場合、ある距離において曲げ破壊が発生する。(写真-4)

(c) 直立構造物に海水盤が凍着していない場合、上部工や防舷材などに引っ掛かった状態となり、曲げ破壊が発生する。(写真-5)

(d) (c) と同様な状況でせん断破壊が発生する。

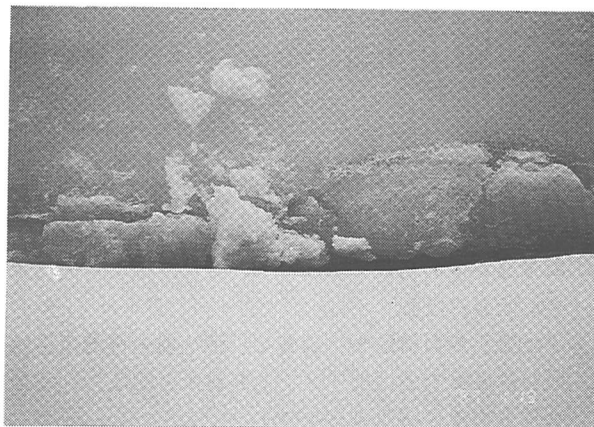


写真-3 せん断破壊

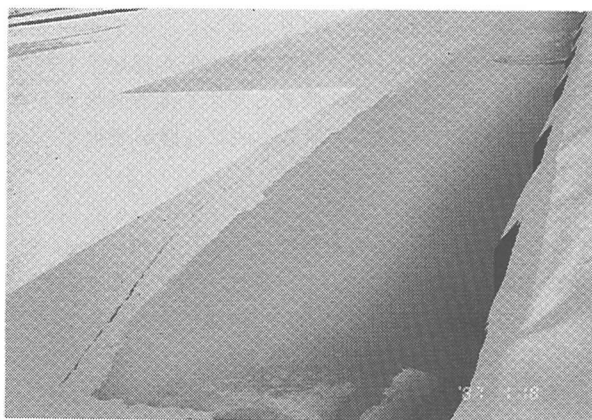


写真-4 曲げ破壊

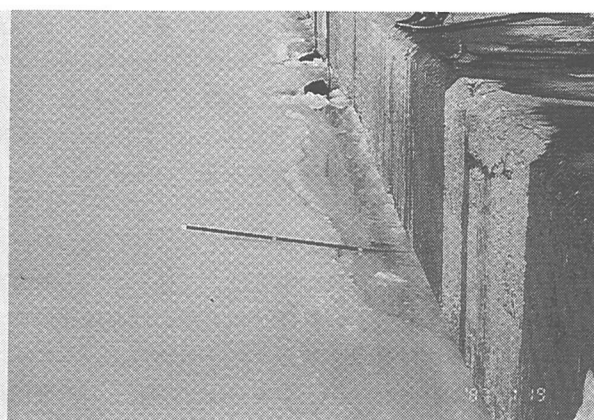


写真-5 曲げ破壊 (上部工に引っ掛かった状態)

今回の現地調査では、合計 20 施設における海水盤の破壊状況に関するデータを得ることができた。これらの施設は水深 5.5 m 以下の岸壁・物揚場及び防波堤であり、構造形式の内訳は、コンクリート単塊式が 15 施設、鋼矢板式が 5 施設である。

(2) 曲げ破壊位置と構造形式の関係

図-3 は、構造形式の違いによる海水盤の曲げ破壊が発生する位置について、港湾構造物からの距離を階級別に割合で示したものである。曲げ破壊が確認された 20 施設の構造形式は、鋼矢板式が 5 施設でコンクリート単塊式 15 施設であった。鋼矢板式については、1.5m 未満で曲げ破壊が 100%発生しているのに対して、コンクリート単塊式では 53.4%であった。また、破壊位置の平均値は鋼矢板式が約 0.9 m、コンクリート単塊式が約 1.6m であり、コンクリート単塊式は鋼矢板式の約 1.7 倍を示している。

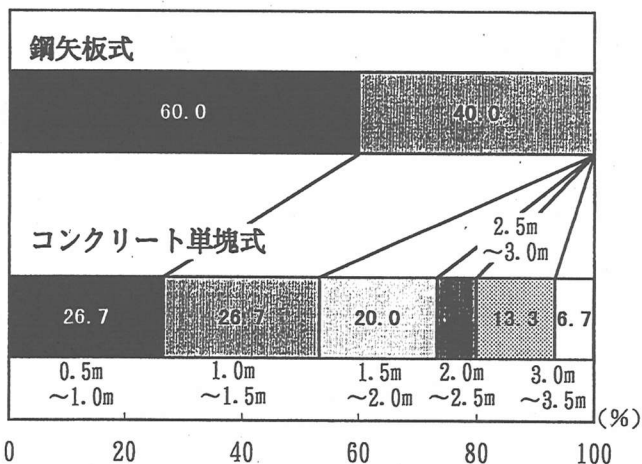


図-3 曲げ破壊位置と構造形式の関係

ここで、式（１）と同様な方法で導かれる岸壁からの距離 r での曲げモーメント M 及び M が最大となる地点 r_b は式（３）となる。（西畑ら 1996）

$$M(r) = -2D\lambda^2 \Delta \exp(-\lambda r) \sin(\lambda r)$$

$$r_b = \frac{\pi}{4} \left[\frac{Eh^3}{3k_w(1-\nu^2)} \right]^{1/4} \quad (3)$$

ただし、式（３）は海氷盤と港湾構造物の境界がヒンジ支点という条件で導かれたものであり、以下の３つの状況が考えられる。

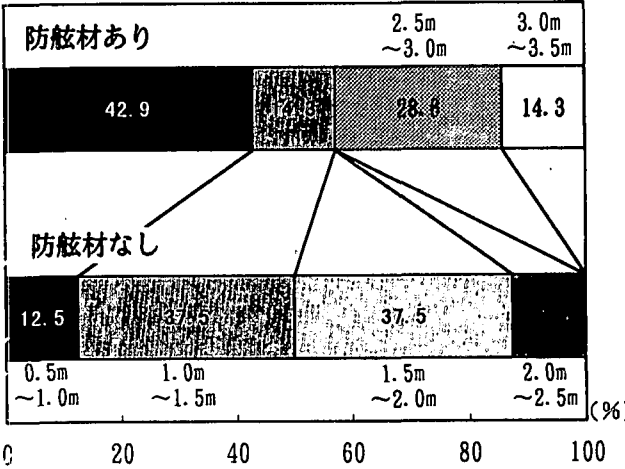
- ①海氷盤が港湾構造物に凍着し、せん断破壊が先に生じた場合、前述したように海氷盤が海水に引っ掛かった状態になる。
- ②海氷盤が港湾構造物に凍着し、海氷盤と港湾構造物の境界において曲げ破壊が先に生じた（固定支点の場合は境界で曲げモーメントが最大となる。）場合、クラックの表面で海氷盤が噛み合うことがしばしば発生する。（西畑ら 1996）
- ③直立壁より突き出した上部工に海氷盤が引っ掛かった状態。

このような場合、位置 r_b において海氷盤の曲げ破壊が発生すると考えられ、海氷盤の曲げ弾性率 E が同じであるとすれば、氷厚が厚ければ曲げ破壊が発生する位置は港湾構造物から離れる。つまり、コンクリート単塊式より鋼矢板式の方が港湾構造物に近い位置で曲げ破壊が発生していることから、鋼矢板式では氷厚が薄いうちに上記の状況となり曲げ破壊が生じていると考えられる。これは鋼矢板式の方が海水の凍着しやすく凍着強度が大きい（言い換えれば、コンクリート単塊式は、気温が下がり氷厚が大きくなった時点で凍着し曲げ破壊が発生する。）ためであり、この理由としては次の３つが考えられる。

- ①中澤ら（1985）は、古いコンクリート及び錆びていないスチールと海氷の凍着強度について検討しており、氷温が海水温程度の場合は、スチールへの凍着強度の方が大きいとしている。また、スチールが錆びていると考えても、表面が粗くなれば凍着強度は大きくなることを報告しており、鋼矢板式への海氷盤の凍着強度は大きくなると考えられる。
- ②鋼矢板式はコンクリート単塊式より海氷との接触面積が大きく、凍着力が大きい。
- ③コンクリートよりスチールの方が熱伝導率が高く、気温が下がった場合、矢板付近の水温も低下し凍着し易い。また、凍着した場合でも氷温が低くなるとともに凍着強度が大きくなることが、中澤ら（1985）により示されている。

（３）曲げ破壊領域に対する防舷材の影響

図－４は、防舷材の有無による海氷盤の曲げ破壊が発生する位置について、港湾構造物からの距離を階級別に割合で示したものである。曲げ破壊が確認されたコンクリート単塊式 15 施設のうち、防舷材付きが 7 施設、防舷材なしが 8 施設であった。防舷材がない場合、2.5m 未満で曲げ破壊が 100%発生しているのに対して、防舷材付きでは 57.2%であった。また、破壊位置の平均値は防舷材付きが約 1.8m、防舷材なしが約 1.3m であり、防舷材付きは防舷材なしの約 1.4 倍の値となっている。これは、防舷材がある場合は海氷盤が引っ掛かり易く、前述と同様に氷厚が小さいときに曲げ破壊が発生するためと考えられる。



図－４ 防舷材の影響

(4) 湖内と湖外の比較

コンクリート単塊式 15 施設のうち湖内の施設が 1 施設、湖外の施設が 14 施設であった。海氷盤の破壊位置については、湖内が 1.7m、湖外が平均で 1.5m であり、湖内の破壊位置が湖外の約 1.1 倍である。また、鋼矢板式が 5 施設のうち湖内の施設が 1 施設、湖外の施設が 4 施設であった。鋼矢板式では、湖内が 1.4m、湖外が 0.8m であり、湖内の破壊位置が湖外の約 1.8 倍であった。

5. まとめ

海氷盤の曲げ破壊について検討するため、結氷した北海道の港湾・漁港で調査を行い、氷厚の分布や破壊位置と構造形式の関係について検討した。海氷の状況については、港湾構造物から離れるにつれ氷厚は小さくなり、ある距離以遠では一定となることが明らかとなった。また、曲げ破壊が発生する位置については、鋼矢板式よりコンクリート単塊式の方が港湾構造物から離れた位置で発生し、さらに、防舷材が設置されている場合の方が離れた位置で曲げ破壊が生じる傾向にある。

本研究では、曲げ破壊と港湾構造物の関係について定性的な検討にとどまっており、曲げ破壊が発生する位置を正確に予測するまでに至らなかった。曲げ破壊が発生する機構を明らかにするためには、水位変動による海氷盤のたわみ、氷厚、曲げ強度、曲げ弾性率を破壊が発生するまで経時的に観測する必要があると考えられる。

参考文献

- 笹島隆彦・早川哲也・寺島貴志・吉田稔・浜岡莊司・佐伯浩 (1996) : 寒冷地に建設される浮体構造物に対する氷の影響について, 海洋開発論文集, Vol.12, pp.373-378
- 中澤直樹・五十嵐昇・竹内貴弘・小野敏行・佐伯浩 (1985) : 海氷と構造物材料表面間の凍着強度について、寒地技術シンポジウム講演論文集, pp.172-177
- 西畑昭史・木岡信治・寺島貴志・成田恭一・佐伯浩 (1996) : 水位変動に伴う種々の直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重, 寒地技術論文・報告集, Vol.12, pp.530-536
- 早川哲也・笹島隆彦・寺島貴志・吉田稔・浜岡莊司・佐伯浩 (1997) : 寒冷海域における浮体構造物に関する研究, オホーツク海と流氷に関する国際シンポジウム講演要旨集, pp.36-41