

水海域における防舷材に作用する水力に関する研究

秋田高等工業専門学校 正会員 榎 国夫
 パシフィックコンサルタント(株) 正会員 中澤 直樹
 (株)西村組 大澤 克幸
 北海道大学工学部 学生員 折谷 徳弘
 北海道大学工学部 正会員 佐伯 浩

1. はじめに

我が国の港湾や漁港においては、防舷材としてV型が多く用いられており、その取付方法は95%が縦づけか横づけで、斜めづけや二度づけ等はきわめて少ない。港湾における防舷材の破損原因としては、船舶の形状が防舷材の形状に合わないためとの意見が多く、また、破損防止対策として、防舷材の取付間隔を今より短くするか、より大きい規格のものを採用するか、あるいは接触表面を今より大きくすべきとの意見がある。漁港の場合については、防舷材の破損原因として、計画したものより大きな船舶が着岸する例や、接岸が乱暴であったり、風や波で船舶の動揺が激しいためと言われており、その破損防止対策としては、取付間隔を短くする、防舷材をより大きな規格にする、ゴム質の表面を丈夫にする等が考えられる。北海道のオホーツク海沿岸や道東地域の港湾においては、寒さによるゴム質防舷材の硬化もあり、防舷材の破損が多いようである。紋別港では、ここ数年間、防舷材の破損状況が詳しく調査されているが、その被害調査によると、縦づけの方がより多くの破損を受けている。オホーツク海沿岸に位置する港湾や漁港においては、冬期の寒さの他に、港内結水も防舷材破損への影響を与えていると考えられる。本研究は潮汐の水位変動による結水氷盤の上下動が防舷材に及ぼす水力について検討をしたものである。

2. 岸壁近傍の水盤の挙動

北海道のオホーツク沿岸の漁港や港湾においては、冬期間海水が凍結し、その氷厚は45~55cm程度になる。積算寒度から推定すると氷厚はもっと厚くなるはずであるが、積雪の影響もあって、上述した氷厚となる。岸壁近傍の水盤の状況を図1に示す。図1は(a)は、岸壁と氷盤は凍着していない場合で、このような場合は岸壁そのものには水位の上下動に起因する氷盤による力は作用しない。これに対して図1(b)や(c)の状態においては氷盤が岸壁に凍着している場合にしろ、そうでない場合にしろ、岸壁に上下方向の力が作用する。この場合の水力について考察する。r=0点での水位を基準とした氷盤の全撓みをΔとし、r地点での撓みをwとすると基本式は次式で示される。

$$\frac{d^4 W}{dr^4} + \frac{K}{D} W = 0 \quad D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (1)$$

E: 氷盤の弾性率、V: 氷盤のポアソン比、D: 氷盤の曲げ剛度、h: 氷厚、k: 海水の単位体積重量
 (1)式的一般解は次式で示される。

$$W(r) = e^{\lambda r} \{C_1 \cos(\lambda r) + C_2 \sin(\lambda r)\} + e^{-\lambda r} \{C_3 \cos(\lambda r) + C_4 \sin(\lambda r)\} \quad (2)$$

$$\text{ここで } \lambda = \left(\frac{K}{4D} \right)^{1/4}$$

図1(b)のFixの場合、r=∞でW(∞)=0であるから、C₁=C₂=0とならなければならない。次に、r=0でW=Δ、r=0でw'(0)=0とならなければならないのでC₃=C₄=Δとなる。よって、Fixの場合の撓み式は次式となる。

$$W(r) = \Delta e^{-\lambda r} \{\cos(\lambda r) + \sin(\lambda r)\} \quad (3)$$

$$M(r) = 2\lambda^2 \cdot \Delta \cdot D \cdot e^{-\lambda r} \{\cos(\lambda r) - \sin(\lambda r)\} \quad (4)$$

最大曲げの発生位置は、dM/dr=の位置であるから(5)式が得られる。またMmaxは(6)式で表される。

$$\lambda r = 0, \lambda r = \frac{\pi}{2} + n\pi \quad (5)$$

$$M_{\max} = 2\lambda^2 \cdot \Delta \cdot D \quad (6)$$

氷盤の曲げ強度を σ_f とすると、氷盤の曲げ破壊時の水位変化量 $\Delta_{\max}$ 及び、単位当りの鉛直水力は、次式で示される。

$$\Delta_{\max} = \frac{b \cdot h^2}{12 \cdot \lambda^2 \cdot D} \cdot \sigma_f \quad (7)$$

$$P = \frac{dM}{dr} (r=0) = -4\lambda^3 \cdot \Delta \cdot D = -\frac{K\Delta}{D\lambda} \quad (8)$$

(7)、(8)式より最大の鉛直方向力は次式で示される。

$$\begin{aligned} P_{\max} &= -\frac{K}{\lambda} \Delta_{\max} = -\frac{K}{\lambda} \cdot \frac{b \cdot h^2}{12 \cdot \lambda^2 \cdot D} \cdot \sigma_f \\ &= \frac{K \cdot h^2}{12 \cdot \lambda^3 \cdot D} \cdot \sigma_f \quad (9) \end{aligned}$$

次に図1.(c)のHingeの場合、(2)式の一段階より $r=\infty$ で $W(\infty)=0$ となり、 $C_1=C_2=0$ となる。 $r=0$ で $W(0)=\Delta$ より $C_3=\Delta$ 、さらに $r=0$ で $M=0$ となるから、 $C_4=0$ となる。よって最大曲げモーメントの発生位置は $dM/dr=0$ の位置であるから次式となる。

$$\lambda r = \frac{\pi}{4} \quad (10)$$

また、最大の曲げモーメントと、氷盤の曲げ強度を σ_f とする時の最大変位は次式となる。

$$M_{\max} = -\sqrt{2D \cdot \lambda^2 \Delta} e^{-\pi/4} \quad (11)$$

$$\Delta_{\max} = \frac{-\sigma_f \cdot \sqrt{2 \cdot h^2 \cdot e^{\pi/4}}}{12D\lambda^2} \quad (12)$$

また、鉛直方向力は(13)式、最大の鉛直方向力は(14)式で示される。

$$P = -2D\lambda^3 \Delta \quad (13)$$

$$P_{\max} = 2D\lambda^3 \frac{\sigma_f \sqrt{2 \cdot h^2 \cdot e^{\pi/4}}}{12D\lambda^2} = \frac{\sqrt{2}}{6} \cdot \lambda \cdot \sigma_f \cdot h^2 \cdot e^{\pi/4} \quad (14)$$

岸壁近傍の氷盤の破壊は一般に図2に示すような過程を経ることになる。潮差が非常に小さい場合には、氷盤の曲げ破壊まで至らないことになる。しかし、北海道のオホーツク海沿岸の潮差では、通常氷盤は曲げ破壊することになるが、凍着強度の非常に小さな特殊な材料でできた岸壁の場合は、曲げ破壊の前に、氷盤と岸壁間でせん断破壊することもある。この時の水力(単位幅当り)は次式で示される。

$$P = \tau_\beta \times A = \tau_\beta \times h \quad (15)$$

ここで、 τ_β は氷盤と岸壁材料間の凍着強度でAは接触面積を示す。

3. 防舷材に作用する水力

前節に岸壁近傍の氷盤と岸壁間の相互作用について述べたが、実際には、結氷開始時からの経過時間や、潮位等によって、図3に示すようないろいろな水象形態を示すことになり、単純な取扱いは困難であるが、ここでは防舷材のとりつけ方には、大きく分けて縦づけと横づけがあるが、図4に示すように、縦づけの場合は、防舷材下部は海面に近い図4の(a)、(b)のような状態に単純化して考える。縦づけの(a)の場合、岸壁と氷盤はFrictionlessの接触条件と考えると、この防舷材に作用する最大鉛直方向水力は、半無限氷盤のedgeに荷重が作用する耐荷力の問題におきかえる

ことができる。この時の耐荷力 P_{cr} は Panfilov の近似式により次式で示される。

$$P_{cr} = 0.16 \left(1 + 2.30 \frac{b}{l} \right) \sigma_f \cdot h^2 \quad (16)$$

$$0.07 < \frac{b}{l} < 1.0 \quad l = \left(\frac{D}{K} \right)^{1/4}$$

ここで b は、半無限水盤の直線 edg の載荷幅を意味している。これは防舷材の幅と考えてよい。これに対して、Panfilov は数多くの実験を行っている。その結果を図 5 に示す。実験による耐荷力は分散しているが、その上限式 ($P_{crUpper}$) と下限式 ($P_{crLower}$) は次式で示される。

$$P_{crUpper} = \left(0.58 + 0.27 \frac{b}{l} \right) \sigma_f \cdot h^2 \quad (17)$$

$$P_{crLower} = \left(0.35 + 0.39 \frac{b}{l} \right) \sigma_f \cdot h^2 \quad (18)$$

また、平均的な式は次式となる。

$$P_{cr} = \left(0.45 + 0.38 \frac{b}{l} \right) \sigma_f \cdot h^2 \quad (19)$$

この実験式である (19) 式は、理論式の近似式である (16) 式の約 2 倍となっている。この理由は、①実験では理論とまったく同じ載荷条件ではない。②実験によって求められる σ_f 、 E は実験の方法によってかなり異なった値を示す、などが考えられる。耐荷力の問題としては安全側の式が用いられるべきであり、水力としては、大きめの値を示す (19) 式を用いるのが良いと思われる。次に図 4 (c) の横づけの度合を考えてみる。問題を単純化して考える。水盤の edg の一部に水盤に平行な圧縮力を受けた場合の耐荷力を考えるべきであるが、それを無視すると、基本的には図 4 (a) と同じと考えてよい。この場合 b の幅が広がるので耐荷力も大きくなり、よって防舷材には大きな力が作用することになる。従って、基本的には (22) 式で鉛直方向水力を計算できる。ただし、この時、浮水盤と防舷材間に存在する水盤は破壊しないとの仮定が必要である。この水盤の座屈荷重の方が小さければ、座屈荷重で水力は決まることになる。図 4 をモデル化すると図 6 のようになる。ここでは理論的取り扱いを簡単にするため、防舷材と水盤、浮水盤と水盤の間はヒンジを仮定し、両端は自由とする。また、ヒンジ側の長さは防舷材長と同じと考えるので、短形板の座屈の問題と考えることができる。よってこの時の撓みの一時解は次式で示される。

$$W = f(y) \cdot \sin \frac{w \pi x}{a} \quad (20)$$

$$f(y) = c_1 e^{-\alpha y} + c_2 e^{\alpha y} + c_3 \cos \beta y + c_4 \sin \beta y$$

この (20) 式は $x=0$ で $w=0$ 、 $x=a$ で $w=0$ を満足しているし、 $x=0$ 、 $x=a$ それぞれに対して $M_x=0$ も満足している。次に x 軸に平行な辺の境界条件を入れる。この両辺は“自由”であるので、 $y=0$ 及び $y=b$ で $M_y=0$ 、 $V_y=0$ を満足せねばならない。

$$\begin{aligned} M_y = & -D \sin \frac{w \pi x}{a} \{ \alpha^2 c_1 e^{-\alpha y} + \alpha^2 c_2 e^{\alpha y} - \beta^2 c_3 \cos \beta y - \beta^2 c_4 \sin \beta y \} \\ & - \nu \frac{w^2 \pi^2}{a} \{ c_1 e^{-\alpha y} + c_2 e^{\alpha y} + c_3 \cos \beta y + c_4 \sin \beta y \} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} V_y = & -D \sin \frac{w \pi x}{a} \{ -\alpha^3 e^{-\alpha y} c_1 + \alpha^3 e^{\alpha y} c_2 + \beta^3 \sin \beta y \cdot c_3 - \beta^3 \cos \beta y \cdot c_4 \} \\ & - (2 - \nu) \frac{w^2 \pi^2}{a^2} \{ -\alpha e^{-\alpha y} c_1 + \alpha e^{\alpha y} c_2 - \beta \sin \beta y \cdot c_3 + \beta \cos \beta y \cdot c_4 \} \end{aligned} \quad (22)$$

M_y 、 V_y はそれぞれ (21)、(22) で表されるので、この両式に、 $y=0$ 、 $y=b$ での境界条件を入れることにより $c_1 \sim c_4$ を未知数とする 4 本の 4 元連立一次方程式が得られる。そして、それらの係

数の行列 Δ が零となる条件を求めればよい。しかし、この座屈する可能性のある氷盤の長さ a は氷盤と岸壁がF i xの状態で破壊した時は(5)式より $\lambda r = \pi/2 + n\pi$ 、H i n g eの場合は(10)式より $\lambda r = \pi/4$ を満足する r に一致する。

ここで、 $\nu = 0.3$ 、 $K = 0.001 \text{ kg f/cm}^2$ 、 $E = 10,000 \text{ kg f/cm}^2$ とし、氷厚を20 cmとすると、 a はF i xの場合約6 m、H i n g eの場合3 mとなり、座屈荷重は非常に大きいものとなるので、氷盤の座屈現象はそれほど重視する必要はないと考える。以上の考察より、防舷材に作用する鉛直方向氷力は(19)式により算出される。

4. あとがき

本論では、一様な厚さの平坦な氷盤が水位変化による上下動に伴い防舷材に作用する鉛直方向氷力の計算方法について述べた。岸壁近傍の氷盤はその成長過程においても、潮汐等による水位変動により曲げ破壊を起こし、図3に示すように複雑な氷象をしているのが実状である。今後、岸壁近傍の氷盤の破壊のメカニズムをより詳細に調査する必要があるし、又、厚さの変化する氷盤に対する耐荷力の問題も取り扱う必要がある。

参 考 文 献

- 1) P I A N C日本国内委員会：防舷材破損実態調査報告書、1983
- 2) F.T.Christensen: Interaction Between Floating Ice Sheets and Vertical Structures due to Water Level Fluctuations, Tech.Univ.of Denmark, S.Paper5, NO.38,1986
- 3) A.D.Kerr: Bearing Capacity of Floating Ice Plates, Journal of Glaciology,1976

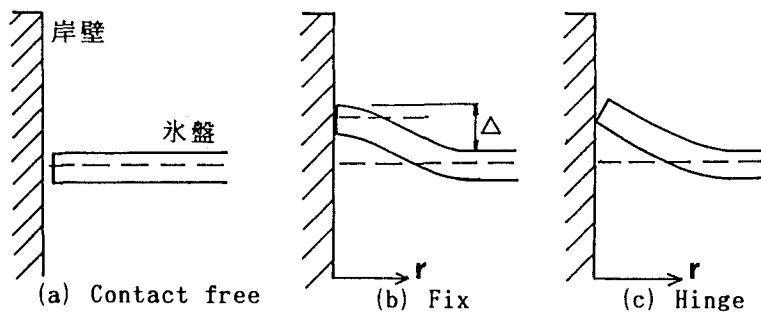


図1. 岸壁近傍の氷盤の状況

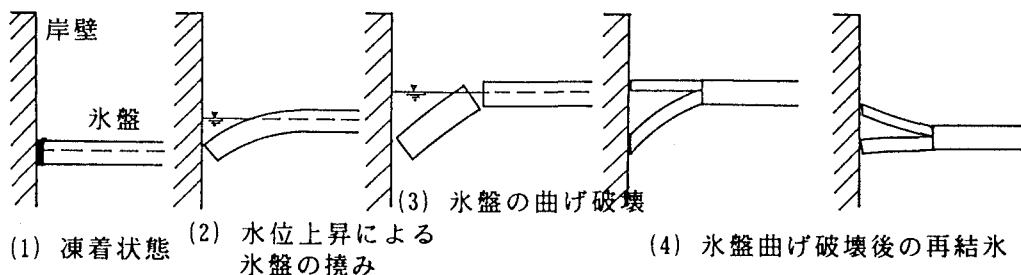


図2. 岸壁近傍の氷盤の破壊

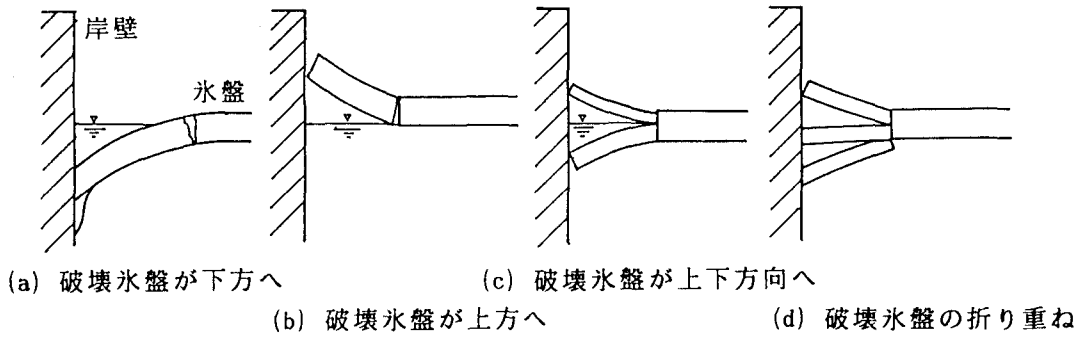


図3．岸壁近傍の水盤

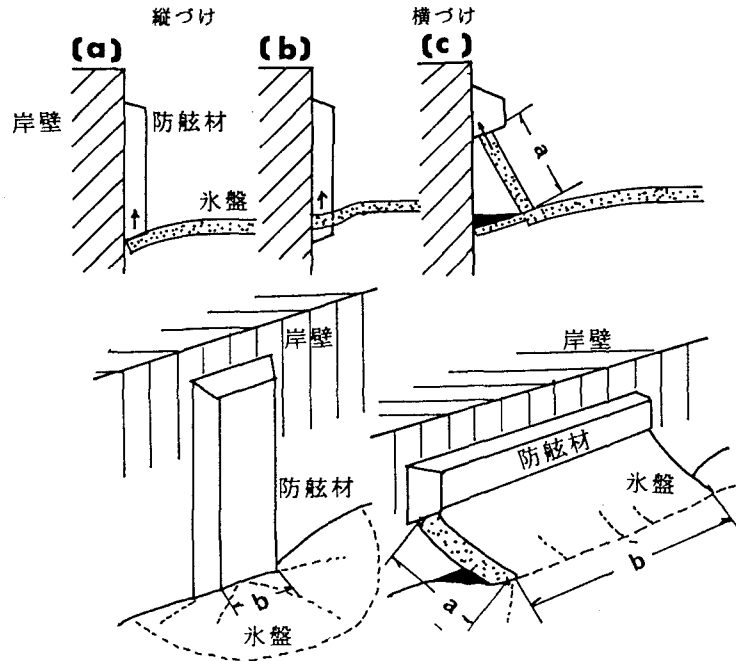


図4．防眩材の取り付け方法と作用水力

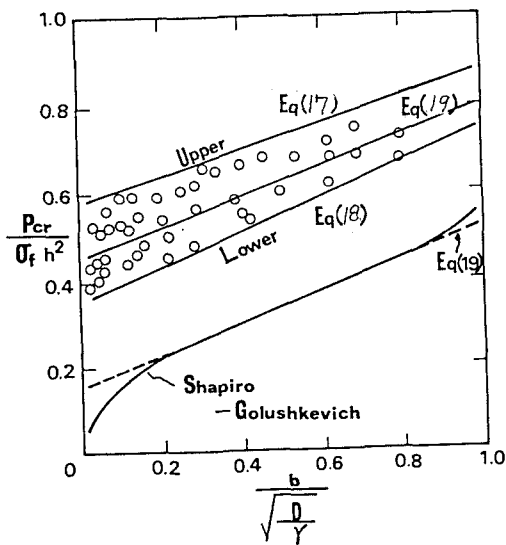


図5．半無限水盤の耐荷力

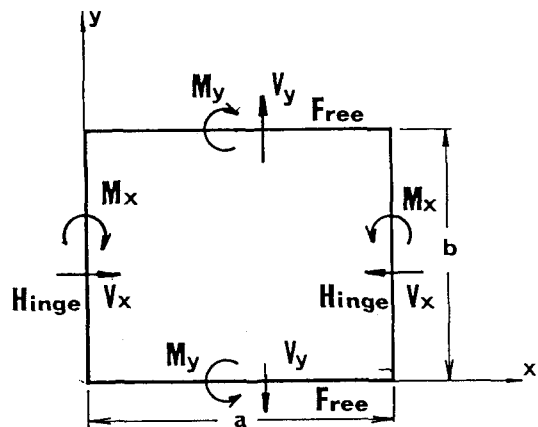


図6．図4.(c)のモデル化