

円断面構造物に作用する鉛直方向氷荷重の現地実験とその評価

寺島 貴志* ・ 成田 恭一** ・ 本田 秀樹***
大島 香織**** ・ 宇佐美宣拓**** ・ 佐伯 浩*****

1. はじめに

寒冷地の海岸, 海洋, 河川, 湖沼に建設される棧橋の杭, 係船杭などの円断面構造物に氷盤が凍着している場合には, 潮汐などに伴う水位変動があると, 構造物に鉛直方向氷荷重が作用する。このように構造物に鉛直方向氷荷重が作用することにより, 杭が引き抜かれたり座屈する被害が過去に発生している。したがって, 氷荷重の作用を受ける構造物を設計する際には, この鉛直方向氷荷重を十分に考慮する必要がある。しかし, 鉛直方向氷荷重の算定方法は種々提案されているものの, 氷盤の破壊形態や破壊過程を考慮した算定方法は寺島ら (1997) の方法を除いて示されていないのが現状である。さらに, 理論的な算定方法を検証するための実規模での現地実験は皆無に等しいのが現状である。

このような背景から, 本研究では, 既に著者らが提案している鉛直方向氷荷重の理論的な算定方法と実規模での初めての現地実験の結果とを比較することにより, 著者らの鉛直方向氷荷重の算定方法の妥当性や氷荷重に与える影響因子について考察するものである。

2. 鉛直方向氷荷重の理論解析

2.1 氷盤の破壊形態

円断面構造物に氷盤が凍着している状態で, 潮汐などに伴う水位変動があると, 構造物に鉛直上下方向の氷荷重が作用する。水位変動量 (氷盤のたわみ量) が大きくなると構造物に作用する氷荷重も増加するが, 水位変動量がある一定量に達すると氷盤は破壊する。その破壊形態は曲げにより氷盤が割れる曲げ破壊と, 構造物の界面より氷盤が剝離する凍着破壊の 2 つに大別できる。更に, 曲げ破壊については, 放射状クラックと同心円状クラックの 2 つのパターンに分類できる。従来の研究では, 放射状クラック発生後は直ちに同心円状クラックが発生するという前提で, 各々の場合の鉛直方向氷荷重の算定式

が提案されている。

著者らは, 氷盤の破壊形態や破壊過程を考慮して, 弾性床上の変断面の片持ち梁の理論から氷荷重の算定式を導いた。そして, 氷厚, 凍着力の大きさによっては放射状クラックが発生後に凍着破壊が起こるという破壊過程が存在することを後述の理論解析により明らかにし, 現地実験によりこの理論の妥当性を確認した。

2.2 鉛直方向氷荷重の算定式

円断面構造物に作用する鉛直方向氷荷重は,

- 放射状クラックが発生するまでの氷荷重 (P_1)
- 放射状クラックが発生する時点の氷荷重 ($P_{\max 1}$)
- 同心円状クラックが発生するまでの氷荷重 (P_2)
- 同心円状クラックが発生する時点の氷荷重 ($P_{\max 2}$)
- 凍着破壊が起こる場合の氷荷重 (P_0)

の 5 つに大別することができる。以下に, 各々の氷荷重の算定式を示す。

- 放射状クラックが発生するまでの氷荷重 (P_1)

Kerr (1975) は氷盤を弾性床上の無限に大きな薄い平板と仮定して, Kelvin 関数を用いて氷荷重 P_1 を次式のように表した。

$$P_1 = 2\pi a D \lambda^3 \frac{[\text{kei}'(\lambda a)]^2 + [\text{ker}'(\lambda a)]^2}{\text{kei}(\lambda a) \text{ker}(\lambda a) - \text{kei}'(\lambda a) \text{ker}'(\lambda a)} \dots\dots\dots (2-1)$$

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} \dots\dots (2-2) \quad \lambda = \sqrt{\frac{k_w}{D}} \dots\dots (2-3)$$

ここで, k_w は淡水または海水の単位体積重量, D は式 (2-2) に示される氷盤の平板剛度, E は氷盤の曲げ弾性率, h は氷厚, ν は水のポアソン比, a は構造物の半径, Δ は水位変動量である。

Kerr (1975) の理論では, 水位変動量が増加すると鉛直方向氷荷重は無限に増加することになる。しかし, 佐伯ら (1981) は, 水位がある値に達すると氷盤が曲げ破壊したり, 構造物と氷盤の界面で凍着破壊することを示し, 以下の理論解を得ている。

- 放射状クラックが発生する時点の氷荷重 ($P_{\max 1}$)

佐伯ら (1981) によると, 放射状クラック発生時点の水位変動量 $\Delta_{\max 1}$ と氷荷重 $P_{\max 1}$ は次式のように表される。

* 正会員	バシフィックコンサルタンツ(株)
** 正会員	島田建設(株)
*** 正会員	日本鋼管(株)
**** 学生会員	北海道大学大学院工学研究科
***** フェロー	工博 北海道大学教授大学院工学研究科

$$\Delta_{\max 1} = \frac{\sigma_f h^2}{6D\lambda^2} \cdot \frac{\text{kei}(\lambda a)\text{ker}'(\lambda a) - \text{kei}'(\lambda a)\text{ker}(\lambda a)}{[\text{kei}'(\lambda a)\text{kei}(\lambda a) + \text{ker}'(\lambda a)\text{ker}(\lambda a)]} \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

$$P_{\max 1} = \frac{\pi\sigma_f h^2}{3} \cdot \frac{\lambda a [\text{kei}'(\lambda a)]^2 + [\text{ker}'(\lambda a)]^2}{\text{kei}'(\lambda a)\text{kei}(\lambda a) + \text{ker}'(\lambda a)\text{ker}(\lambda a)} \quad \dots\dots\dots (2-5)$$

ここで、 σ_f は氷盤の曲げ強度である。

c) 同心円状クラックが発生するまでの氷荷重 (P_2)
Christensen (1986) によると、放射状クラック発生後の氷荷重 P_2 は次式で表される。

$$P_2 = \left(\frac{2\pi k_w \Delta}{\lambda^2 [Dn_2(\lambda a)Dn_3'(\lambda a) - Dn_2'(\lambda a)Dn_3(\lambda a)]} \cdot [Dn_3'(\lambda a)I_2 - Dn_2'(\lambda a)I_3] \right)$$

$$I_2 = 0.45694 - \int_0^{\lambda a} x Dn_2(x) dx,$$

$$I_3 = -0.45694 - \int_0^{\lambda a} x Dn_3(x) dx \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

ここで、 Dn_2 、 Dn_3 、 Dn_2' 及び Dn_3' は Nevel (1972) によって定義された関数である。式 (2-6) による鉛直方向氷荷重 P_2 は、水位変動量 Δ の値により無制限に大きくなるわけではない。

d) 同心円状クラックが発生する時点の氷荷重 ($P_{\max 2}$)

上述した複数の片持ち梁が同時に曲げ破壊する時、つまり、構造物を中心とする同心円状クラックの発生時点の氷荷重 $P_{\max 2}$ は Nevel (1972) によると、近似的に次式のように表される。

$$P_{\max 2} = 1.154 \sigma_f h^2 [1.05 + 2\lambda a + 0.5(\lambda a)^3] \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

式 (2-6) と式 (2-7) からこの時点の水位変動量 $\Delta_{\max 2}$ は次式となる。

$$\Delta_{\max 2} = \frac{1.154 \sigma_f h^2 \lambda^2}{2\pi k_w} \cdot \frac{[1.05 + 2\lambda a + 0.5(\lambda a)^3][Dn_2(\lambda a)Dn_3'(\lambda a) - Dn_2'(\lambda a)Dn_3(\lambda a)]}{[(Dn_3'(\lambda a)I_2 - Dn_2'(\lambda a)I_3)]} \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

e) 凍着破壊が起こる場合の氷荷重 (P_B)

凍着破壊が起こる時点は、放射状クラックの発生前と発生後の 2 つの場合が考えられる。いずれの場合にも、凍着破壊時の氷荷重 P_B は次式のように表される。

$$P_B = 2\pi a h \tau_B \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

ここで、 τ_B は構造物表面と氷盤の凍着強度である。放射状クラック発生前の凍着破壊時の水位変動量 Δ_{B1} は、式 (2-1) と式 (2-9) から次式のように表される。

$$\Delta_{B1} = \frac{\tau_B h}{D\lambda^3} \cdot \frac{\text{kei}(\lambda a)\text{ker}'(\lambda a) - \text{kei}'(\lambda a)\text{ker}(\lambda a)}{[\text{kei}'(\lambda a)]^2 + [\text{ker}'(\lambda a)]^2} \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

また、放射状クラック発生後の凍着破壊時の水位変動量 Δ_{B2} は、式 (2-6) と式 (2-9) から次式のように表される。

$$\Delta_{B2} = \frac{a h \tau_B \lambda^2}{k_w} \cdot \frac{[Dn_2(\lambda a)Dn_3'(\lambda a) - Dn_2'(\lambda a)Dn_3(\lambda a)]}{[Dn_3'(\lambda a)I_2 - Dn_2'(\lambda a)I_3]} \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

一方、同心円状クラックと凍着破壊が同時に発生する場合、曲げ強度、凍着強度と λa との関係は次式で表すことができる。

$$\sigma_f h / \tau_B a = \frac{2\pi}{1.154 [1.05 + 2\lambda a + 0.5(\lambda a)^3]} \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

3. 現地実験

3.1 実験方法

1997 年と 1998 年の 1 月に、潮汐の影響を受けない網走湖の呼人漁港で実規模の現地実験を実施した。現地実験では、円断面構造物をモデル化したスチール製で中空の模型杭を使用した。使用した模型杭は、半径 10.8、25.4 及び 40.0 cm の 3 種類である。これらの模型杭を用いて合計 9 ケースの現地実験を実施した。以下に、実験の手順を示す。

a) 漁港内の水面が凍結する前の 12 月初旬に、理論的に岸壁の影響を受けないように、岸壁から 10 m 程度離して模型杭を浮置した。

b) 12 月中旬～下旬には港内が結氷して、氷厚も 10 cm 程度と現地実験の条件が整ったが年末年始をはさんだことから、実験は翌年 1 月初旬に実施した。この間降雪が少なかったこともあり、氷厚が 20～30 cm 程度に増加した。実験は気温が低く、実験条件として適した午後 6 時から深夜にかけて実施した。図-1 に示すように、模型杭を鉛直方向に速度 46.8 cm/hr (1997 年) 及び 72.0 cm/hr (1998 年) でクレーンで引き上げた。この速度は実現象における潮汐による水位変動速度より大きめの値である。この時に、クレーンと模型杭との間にロードセルを介して模型杭の引き抜き力(鉛直方向氷荷重に相当)を計測した。同時に、模型杭の設置地点、設置地点より 2 m、4 m の 3 地点において、5 秒間隔で氷盤のたわみ量(水位変動量に相当)を 3 台のレベルで計測した。

c) 曲げ破壊または凍着破壊が起こり、模型杭が完全

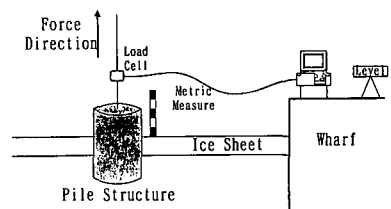


図-1 実験装置

に引き抜かれるまで計測を継続し、同時に、曲げ破壊時における氷盤からの発生音と氷盤のクラックを目視とビデオ撮影により観察した。

d) 現場の氷盤から直方体の供試体(供試体寸法: 15 cm×15 cm×100 cm) 17本を切り出して、現地において単純桁の3点曲げ試験から曲げ弾性率と曲げ強度を求めた。また、同時に現場の氷厚を計測した。

3.2 実験結果

a) 氷盤の破壊形態

実験時の気温は概ね -4°C (1997年) 及び $-11\sim-16^{\circ}\text{C}$ (1998年), この時の水温は -2.6°C (1997年) 及び $-6.4\sim-8.4^{\circ}\text{C}$ (1998年) でほぼ一定していた。図-2に示すとおり、氷盤の破壊形態は、全てのケースにおいて、はじめに6本の放射状クラックが模型杭と氷盤の界面から発生し、次に凍着破壊が起こり模型杭が引き抜かれた。また、この時の氷荷重が最大であった。ここで、特筆すべき点は放射状クラックは6本が全て同時に発生しないことである。円形断面の場合には、杭と氷盤との接触面における曲げモーメントは半径方向に同一なため、理論的には放射状クラックは同時に発生するものと考えられる。しかし、実際には、非同時に放射状クラックが発生することは、後述する曲げ試験により明らかとなった氷盤の曲げ強度に分散があることに起因するものと考えられる。従来の研究成果によると、理論的には放射状クラックの発生に引き続いてだちに同心円状クラックが発生するはずであるが、本実験では同心円状クラックは発生しなかった。

b) 氷荷重と氷盤のたわみ量の計測結果

図-3にロードセルにより計測した氷荷重と模型杭の設置地点 (0 m), 模型杭から2 m 及び4 m の地点における氷盤のたわみ量の経時変化の一例を示す。半径が10.8 cm の場合には、実験開始後110 sec で放射状クラックが発生し、この時の氷荷重は13.2 kN であった。また、210 sec 時に凍着破壊が発生して模型杭が引き抜かれ、この時の氷荷重は28.8 kN であった。半径が25.4 cm の場合には、実験開始後140 sec で放射状クラックが発生し、この時の氷荷重は18.9 kN であった。また、270 sec 時に凍着破壊が発生して模型杭が引き抜かれ、この時の氷荷重は37.5 kN であった。半径が40.0 cm の場合には、実験開始後240 sec で放射状クラックが発生し、この時の氷荷重は25.5 kN であった。また、380 sec 時に凍着破壊が発生して模型杭が引き抜かれ、この時の氷荷重は44.1 kN であった。

以上により、杭径が増加するにしたがって、放射状クラックと凍着破壊の発生時刻が遅く氷荷重が大きい。また、放射状クラック発生後ある時刻までは、氷荷重と氷盤のたわみ量の傾きがほぼ同様である。換言すれば、氷

荷重と氷盤のたわみ量は比例関係にある。しかし、模型杭が引き抜かれる直前は氷荷重に対して氷盤のたわみ量の傾きが大きめとなっている。

c) 曲げ強度と曲げ弾性率の測定結果

現場の単純桁の3点曲げ試験から、1997年及び1998年1月のそれぞれの実験時における氷厚は約30 cm, 20

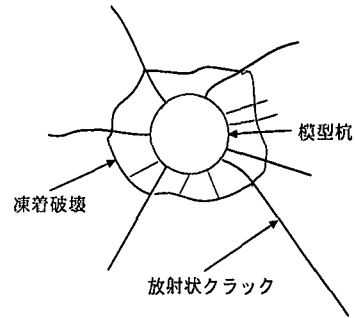
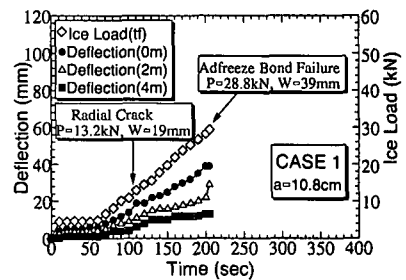
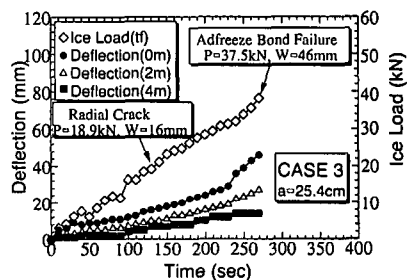


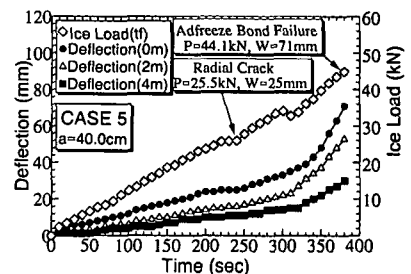
図-2 氷盤の破壊形態



(a) 半径が10.8 cm の場合



(b) 半径が25.4 cm の場合



(c) 半径が40.0 cm の場合

図-3 氷荷重と氷盤のたわみ量の経時変化

cm, 氷盤の曲げ強度は平均 10.0 kgf/cm^2 , 10.8 kgf/cm^2 , 曲げ弾性率は平均 $27,000 \text{ kgf/cm}^2$, $23,500 \text{ kgf/cm}^2$ であった。また, 2ヶ年の実験では, 曲げ強度の最小値は 7.8 kgf/cm^2 , 最大値は 13.4 kgf/cm^2 , 17 供試体の分散は 2.31 (標準偏差は 1.52) であり氷盤の曲げ強度にはばらつきがあることがわかる。

d) 現地実験と理論解析との比較

i) 放射状クラック発生時の氷荷重及び水位変動量

半径 a と λ の無次元量 λa と放射状クラック発生時における氷荷重 $P_{\max 1}$ の無次元量との関係を図-4 に示す。図中には, 1998 年の現地実験 5 ケースにおいてクラック発生音により確認した, 放射状クラックの発生回数 15 回分 (1 ケース当たり平均 3 回) のデータを示したもので, 実線は前述した著者らが求めた理論式 (2-5) による計算値で, $\square$ は 1998 年の現地実験における実測値である。また, 無次元量 λa と放射状クラック発生時における水位変動量 $\Delta_{\max 1}$ の無次元量との関係を図-5 に示す。これらによると, $P_{\max 1}$ 及び $\Delta_{\max 1}$ の計算値に対して実測値にはばらつきがあるが, これは前述した氷盤の曲げ強度のばらつきや氷厚の非一様性に起因するものと考えられる。

ii) 氷荷重の計算値と実測値の比較

図-6 は氷盤のたわみ量 (水位変動量) と引き抜き力 (氷荷重) との関係を示したもので, $\bullet$ は今回の実験における実測値, 実線は前述の算定方法による計算値である。図中で, P_1 は理論による放射状クラック発生前の水位変動量に対する氷荷重で, P_2 は放射状クラック発生後の氷荷重である。放射状クラック発生の前と後の実測値の曲線の傾きがそれぞれ, P_1 及び P_2 の傾きと概ね一致した。また, 理論上の $P_{\max 1}$ の付近で実際に放射状のクラックが発生し, ケース 1 では実測値が計算値よりやや大きめであるが, 他のケースでは理論上の P_B の付近で実際に凍着破壊が起こり模型杭が引き抜かれ, その時点の氷荷重が最大となった。なお, 同心円状クラックが発生する時の $P_{\max 2}$ の計算値は非常に大きくなるため, 図-6 には示されていない。以上の結果により, P_1 , P_2 , $P_{\max 1}$, P_B の理論的な算定方法の妥当性が確認された。

iii) 氷荷重に与える影響因子

今回の実験のように, 凍着破壊時に最大氷荷重が構造物に作用する場合がある。凍着破壊時の氷荷重に与える影響因子は, 式 (2-9) に示しているように, 構造物の直径, 氷厚及び凍着強度である。ここで, 模型杭の直径を氷厚で無次元化した $2a/h$ と引き抜き力の実測値を接触面積で除した凍着強度との関係を図-7 に示す。これによると, 氷荷重に与える影響因子の 1 つである凍着強度は, $30 \geq h \geq 20 \text{ cm}$ の範囲では $2a/h=1$ 付近で急激に小さくなり $2a/h>1$ で一定値になることが明らかとなった。

iv) 氷盤の破壊の発生限界と氷荷重の推定方法

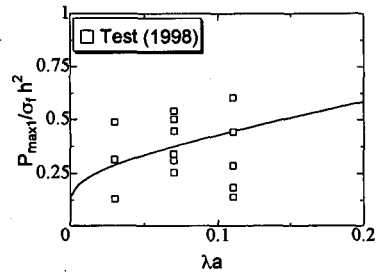


図-4 放射状クラック発生時の氷荷重

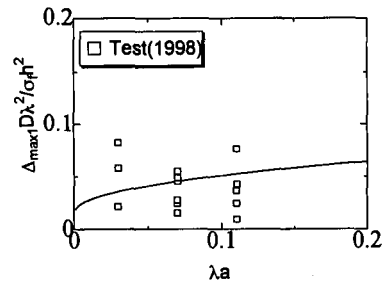
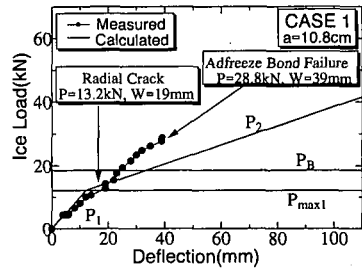
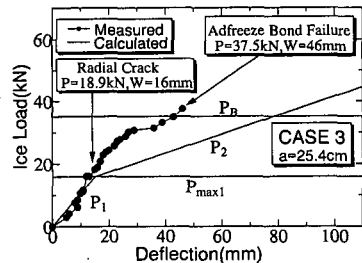


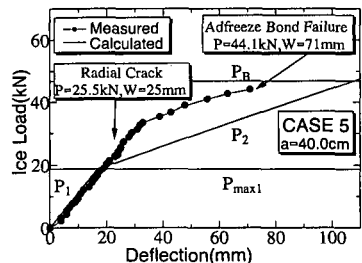
図-5 放射状クラック発生時の水位変動量



(a) 半径が 10.8 cm の場合



(b) 半径が 25.4 cm の場合



(c) 半径が 40.0 cm の場合

図-6 変位と氷荷重との関係

円断面構造物に作用する鉛直方向氷荷重を推定するには、 P_{max1} は最大の氷荷重とならないことから、現場の水盤の物性値から凍着破壊が起こるか、曲げ破壊（同心円状クラック）が起こるかを判定し、 P_B か P_{max2} を求めれば良い。図-8に無次元量 λa と氷盤の破壊の発生限界との関係を示す。図中で実線は氷盤が曲げ破壊（同心円状クラック）と凍着破壊の理論上の発生限界を示したもので、式(2-12)による計算値である。実線より上の領域が凍着破壊、下が曲げ破壊（同心円状クラック）の発生領域で、●及び□は現地実験における実測値である。今回の現地実験においては、全て凍着破壊であったため、計算値と実測値は一致している。よって、図-8と現場の水盤の物性値から氷盤の破壊形態を予測し、曲げ破壊（同心円状クラック）の場合には式(2-7)により、凍着破壊の場合には式(2-9)により最大氷荷重が推定可能である。

4. おわりに

本研究で得られた主要な結論を要約すると次の通りである。(1)2ヶ年の実験時における氷厚は約30cm, 20cm, 単純桁の3点曲げ試験による氷盤の曲げ強度は10.0 kgf/cm², 10.8 kgf/cm², 曲げ弾性率は27,000 kgf/cm², 23,500 kgf/cm²であった。(2)実験では理論解析の予測結果と同様に、初めに氷盤に放射状クラックが発生し同心円状クラックが発生する前に凍着破壊が発生し、この時の氷荷重が最大であった。また、放射状クラック発生時の氷荷重 P_{max1} とこの時の水位変動量 Δ_{max1} の計算値に対して実測値にはばらつきがあるが、これは氷盤の強度のばらつきや氷厚の非一様性に起因するものと考えられる。(3)弾性理論による計算値と実測値を比較した結果、 P_1 及び P_B の計算値と実測値はほぼ一致する。また P_2 についても、実際には放射状クラックが同時に発生していないことから計算値と実測値はほぼ一致するものと見なせる。したがって、弾性理論による理論解析は妥当であることが実証された。(4)氷荷重に与える影響因子の1つである凍着強度は、 $30 \geq h \geq 20$ cmの範囲では $2a/h=1$ 付近で急激に小さくなり $2a/h>1$ で一定値になることが明らかとなった。(5)以上のことから、円断面構造物に作用する鉛直方向氷荷重を推定するには、 P_{max1} は最大の氷荷重とならないことから、現場の水盤の物性値から凍着破壊が起こるか、曲げ破壊（同心円状クラック）が起こるかを判定し、 P_B か P_{max2} を求めれば良いことが明らかとなった。(6)設計上人為的に制御できるのは凍着力だけである。したがって、円断面構造物に作用する鉛直方向氷荷重を低減するためには、凍着強度の小さ

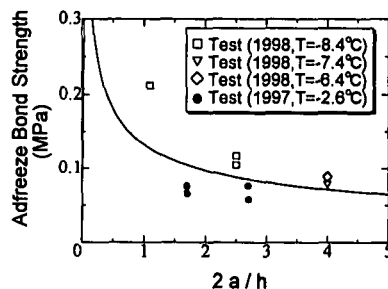


図-7 $2a/h$ と凍着強度との関係

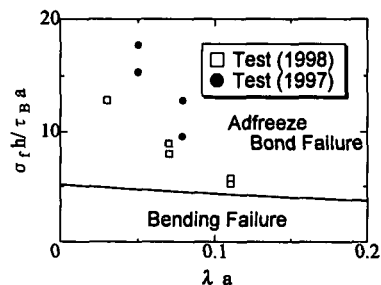


図-8 凍着破壊と曲げ破壊の発生限界

い材料 (INERTA 160, ZEBRON, 合成材料など) を採用することや、構造物と氷盤との接触面積が小さくなるように設計することも1つの低減方法と考えられる。また、杭径によって氷盤が破壊する時刻が異なることから、複数の杭で構成される構造物の場合には異なる径の杭を配置することにより、同時に氷盤が破壊することを防ぎトータルの氷荷重を低減することが可能である。

最後に、本研究の実施にあたり、北海道網走土木現業所及び西網走漁業協同組合の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 佐伯 浩, 小野敏行, 山田満, 尾崎 晃 (1981): 直立杭構造物に作用する海水の力に関する研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 396-400.
- 寺島貴志, 西畑昭史, 本田秀樹, 川合邦広, 佐伯 浩 (1997): 氷盤凍着時に円断面構造物に作用する鉛直方向氷荷重に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 991-995.
- Christensen, F. T. (1986): Interaction between Floating Ice Sheets and Vertical Structures Due to Water Level Fluctuations, Series Paper 38, Technical University of Denmark, pp. 7-58.
- Kerr, A. D. (1975): The Bearing Capacity of Floating Ice Plates Subjected to Static or Quasi-Static Loads; Journal of Glaciology (1976).
- Nevel, D. E. (1972): The Ultimate Failure of a Floating Ice Sheet, Proc. IAHR Ice Symposium 1972, pp. 17-22.