

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

寺島貴志*・西畑昭史*・本田秀樹**
川合邦広***・佐伯 浩****

1. はじめに

寒冷地における海岸、海洋、湖沼などに建設される棧橋、係船杭、石油掘削リグ、取水塔などの直立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。過去に我が国で、この氷荷重により水位観測塔が引き抜かれたり、取水塔が倒壊した例がある。また米国の五大湖では、この氷荷重により棧橋の杭が引き抜かれる被害がよく発生する。したがって、氷荷重の作用を受ける海洋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、この鉛直方向氷荷重の理論解は得られているものの、実験的検証がほとんどなされていないのが現状である。

本研究では、円断面構造物に作用する鉛直方向氷荷重の理論的な算定方法を提案するとともに、この氷荷重を計測する実規模での野外実験を実施することによりこの理論の妥当性を初めて実証した。

2. 鉛直方向氷荷重の理論解析

(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（氷盤の撓み量）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、構造物の表面より氷盤が剝離する凍着破壊の二つに大別できる。更に、曲げ破壊については、図-1に示すように放射状クラックと同心円状クラックの二つのパターンに分類できる。従来の研究では、はじめに凍着破壊と曲げ破壊（放射状クラック）のどちらが発生するかを判断し、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

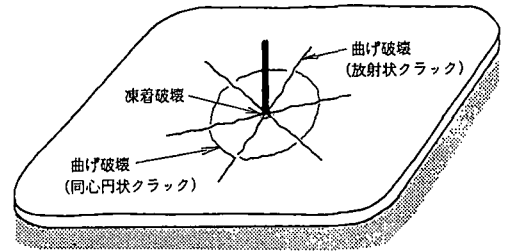


図-1 氷盤の破壊形態

ている。著者らは、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き、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り、その後同心円状クラックが発生するという新しい破壊モードが存在することを後述の理論解析により明らかにし、野外実験によりこの理論の妥当性を確認した。

(2) 鉛直方向氷荷重の算定式

一般に海洋構造物をはじめ、海岸、湖沼などに建設される杭式の構造物は、円断面の杭が用いられることが多い。円断面構造物に作用する鉛直方向氷荷重は、a)放射状クラックが発生するまでの氷荷重、b)放射状クラックが発生する時点の氷荷重、c)同心円状クラックが発生するまでの氷荷重、d)同心円状クラックが発生する時点の氷荷重及び、e)凍着破壊が起こる場合の氷荷重の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。

a) 放射状クラックが発生するまでの氷荷重

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、弾性学的に氷荷重 P_1 を次式のように表した。

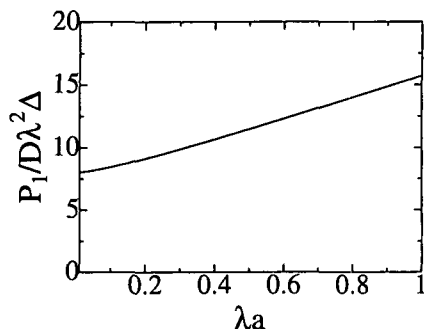
$$P_1 = 2\pi a D \lambda^3 \frac{[\text{kei}'(\lambda a)]^2 + [\text{ker}'(\lambda a)]^2}{\text{kei}(\lambda a)\text{ker}'(\lambda a) - \text{kei}'(\lambda a)\text{ker}(\lambda a)} \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_w}{D}} \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

ここで、 k_w は淡水または海水の単位体積重量、 D は式

* 正 会 員 パシフィックコンサルタンツ(株)
** 学生会員 北海道大学大学院
*** 正 会 員 (株)西村組
**** 正 会 員 工 博 北海道大学教授工学部土木工学科

図-2 氷荷重 P_1 の計算結果

(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 は氷盤の厚さ (氷厚), ν は氷のポアソン比, $\ker$ と $\ker i$ は Kelvin 関数, a は断面半径, Δ は水位変動量である。図-2 は式 (2-1) による氷盤破壊前の鉛直方向氷荷重 P_1 の計算値である。横軸は構造物の半径 a の無次元量を, また, 縦軸は氷荷重の無次元量を示している。

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。

b) 放射状クラックが発生する時点の氷荷重

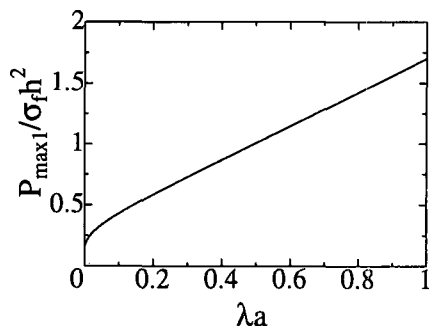
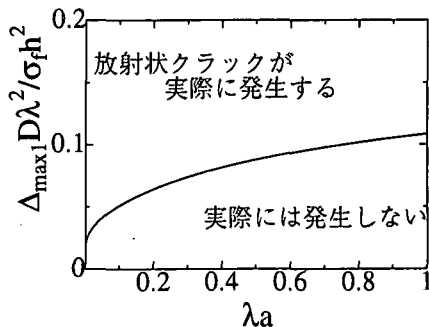
佐伯ら (1981) によると, 放射状クラック発生時点の水位変動量 $\Delta_{\max 1}$ と氷荷重 $P_{\max 1}$ は次式のように表される。

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

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

ここで, σ_f は氷盤の曲げ強度である。

この時の $P_{\max 1}$, $\Delta_{\max 1}$ の計算結果を図-3, 図-4 に示す。

図-3 氷荷重 $P_{\max 1}$ の計算結果図-4 水位変動量 $\Delta_{\max 1}$

c) 同心円状クラックが発生するまでの氷荷重

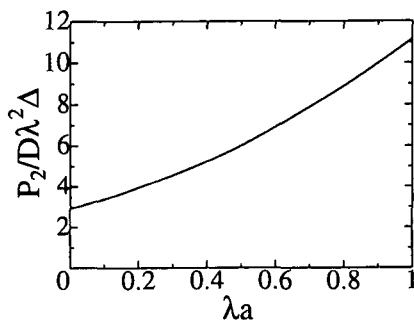
Christensen (1986) によると, 放射状クラック発生後の氷荷重 P_2 は次式で表される。

$$P_2 = \frac{2\pi k_w \Delta}{\lambda^2 [Dm_2(\lambda a) Dn_3'(\lambda a) - Dn_2''(\lambda a) Dm_3(\lambda a)] \cdot [Dn_3''(\lambda a) I_2 - Dn_2''(\lambda a) I_3]} \quad (2-6)$$

$$I_2 = 0.45694 - \int_0^{\lambda a} x Dm_2(x) dx,$$

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

ここで, Dm_2 と Dn_3 は Nevel (1972) によって定義された関数である。この時の鉛直方向氷荷重 P_2 の計算結果は図-5 となる。しかし, これは水位変動量 Δ の値により無制限に P_2 が大きくなるわけではない。

図-5 氷荷重 P_2 の計算結果

d) 同心円状クラックが発生する時点の氷荷重

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。

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

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。

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

この時の $P_{\max 2}$, $\Delta_{\max 2}$ の計算結果を図-6, 図-7 に示す。

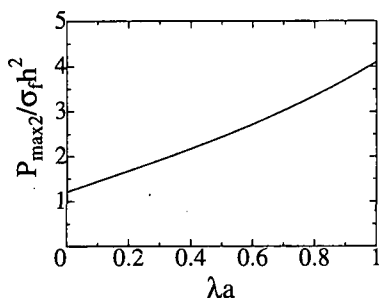


図-6 氷荷重 $P_{\max 2}$ の計算結果

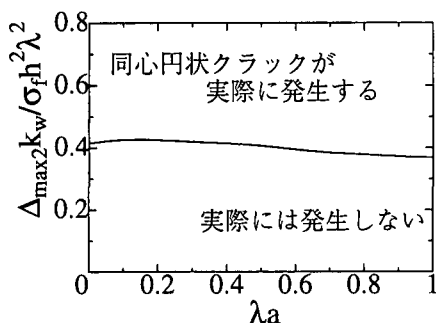


図-7 水位変動量 $\Delta_{\max 2}$ の計算結果

e) 凍着破壊が起こる場合の氷荷重

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、氷盤が凍着破壊する時の氷荷重 P_B は次式のように表される。

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

放射状クラックの発生前に凍着破壊が起こる時点の水位変動量 Δ_{B1} は、式 (2-1) と式 (2-9) から次式のように表される。

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

ここで、 τ_B は構造物表面と氷盤の凍着強度である。

一方、放射状のクラックの発生後に凍着破壊が起こる時点の水位変動量 Δ_{B2} は、式 (2-6) と式 (2-9) から次式のように表される。

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

(3) 水位変動量と鉛直方向氷荷重との関係

前述したように従来までの研究では、氷盤凍着時に円断面構造物に作用する鉛直方向氷荷重は、凍着破壊と曲げ破壊（放射状クラック）のいずれが先に発生するかによってその算定式が異なる。本研究では図-8 に示すとおり、円断面構造物に作用する氷荷重は放射状クラックが発生する前（水位変動が $\Delta_{\max 1}$ に達する前）に凍着破壊が起こるケースと放射状クラックが発生後（水位変動量が $\Delta_{\max 2}$ の間）に凍着破壊が起こるケースの2ケースが存在するという前提のもとに氷荷重の理論解を導いた。

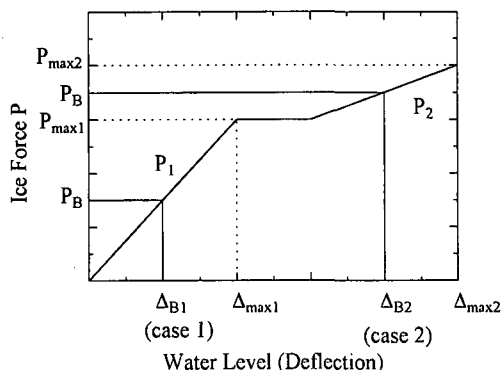


図-8 水位変動量と鉛直方向氷荷重との関係

3. 野外実験

(1) 実験方法

1997年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野外実験を実施した。野外実験では、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 25.4 cm と 40.0 cm の2種類でそれぞれ2本ずつ製作し、合計4ケースの実験を実施した。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かべた。

b) 12月中旬～下旬には港内が結氷して、氷厚も10 cm程度と野外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。この間降雪がなかったこともあり、氷厚が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-9 に示すように、杭を鉛直方向に速度 0.13 mm/秒 (46.8 cm/h) 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

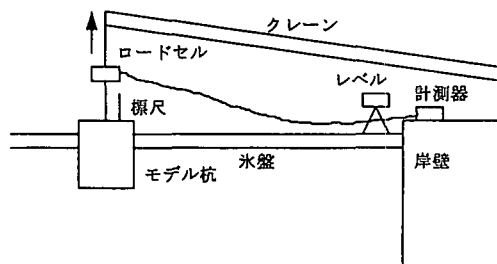


図-9 実験装置

変動速度に近い値である。この時に、クレーンと杭との間にロードセルを介して杭の引き抜き力を計測した。同時に、杭の設置地点、設置地点より 2 m, 4 m, 6 m の 4 地点において、5 秒間隔で杭の変位とその周囲の水盤の変位を 4 台のレベルで計測した。ここで、杭の引き抜き力と杭の変位はそれぞれ、実際の現象における氷荷重と水位変動量に相当するものとする。

c) 水盤の曲げ破壊または水盤と杭の凍着破壊が起こり、杭が完全に引き抜かれるまで計測を継続し、同時に、曲げ破壊時の水盤からの発生音と水盤のクラックパターンを目視とビデオ撮影により観察した。

d) 現場の水盤から直方体の供試体（供試体寸法：15 cm×15 cm×100 cm）6 本を切り出して、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、同時に現場の水厚を計測した。

(2) 実験結果

a) 水盤の破壊形態

実験を行った時の気温は概ね -4°C で一定していた。この時の水温は水盤に雪がのっていたことから $0\sim-2^{\circ}\text{C}$ の範囲であった。水盤の破壊形態は、はじめに 6 本の放射状のクラックが杭と水盤の界面から発生し、次に凍着破壊が起こり杭が引き抜かれた。従来の研究成果によると、理論的には放射状のクラックの発生に引き続いてただちに同心円状のクラックが発生するはずであるが、本実験では同心円状のクラックは発生しなかった。

b) 氷荷重の理論値と実験値の比較

図-10 及び図-11 は今回の実験における模型杭周囲の水盤の破壊モードを推定するために、2.の理論から半径 $a=25\text{ cm}$ と $a=40\text{ cm}$ の円形断面の場合について水厚 h を変化させて $P_{\max 1}$ と $P_{\max 2}$ と P_B を計算した結果である。理論式に用いたパラメーターのうちで、ヤング率 E と曲げ強度 σ_f は単純桁の 3 点曲げ試験から、 $E=2940\text{ MPa}$ と $\sigma_f=0.980\text{ MPa}$ の値を得た。また模型杭表面と水盤との凍着強度 τ_B は中澤ら (1985) による過去の系統的な実験のデータから、 $\tau_B=0.0715\text{ MPa}$ と推定した。現場では実測により $h=30\text{ cm}$ であったため、図-10 から $a=25\text{ cm}$ の場合について理論的には、まず氷荷重が

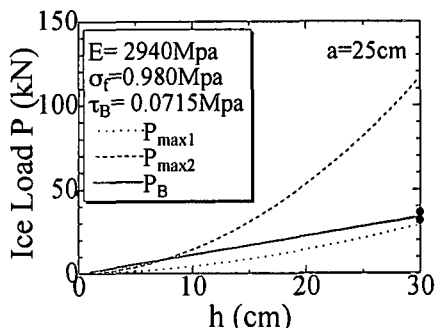


図-10 氷厚と氷荷重との関係

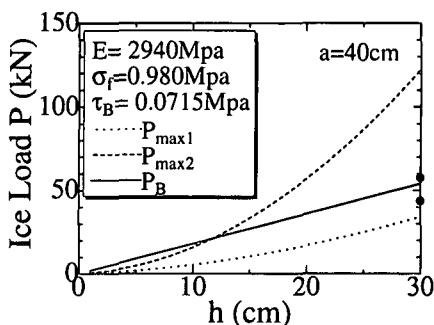


図-11 氷厚と氷荷重との関係

$P_{\max 1}$ に達した時点で水盤に杭近傍から放射状クラックが発生する。その後に杭から離れたところで同心円状クラックが発生する時点の水荷重 $P_{\max 2}$ は約 120 kN と非常に大きくなるため、その前に氷荷重が P_B に達した時点で水盤と杭表面の剝離（凍着破壊）が起こると予想された。図-11 から、 $a=40\text{ cm}$ の場合も同様の破壊モードになると理論的には予想された。

図-10 及び図-11 で黒丸は実験値を示しており、実験前の予想どおり、放射状クラックの発生後に凍着破壊が起こり、凍着破壊時の氷荷重の計算値と実験値はほぼ一致した。

図-12 及び図-13 は杭の変位（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、実線は今回の実験における実測値、点線は前述の理論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杭の変位に対する氷荷重で、 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 および P_2 の傾きとおおむね一致した。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、それに続いて理論上の P_B の付近で実際に凍着破壊が起こり杭が引き抜かれ、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

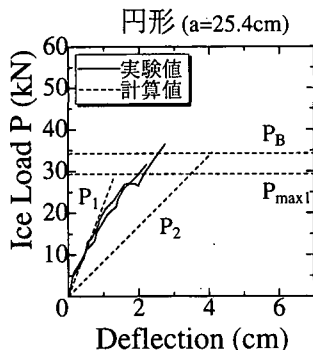


図-12 変位と氷荷重との関係

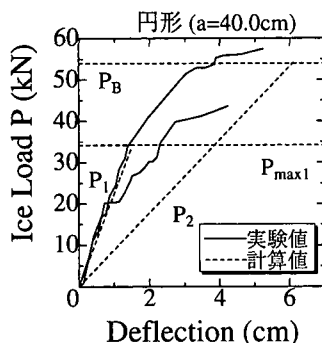


図-13 変位と氷荷重との関係

時の $P_{\max 2}$ は図-10 及び図-11 に示すとおり約 120 kN と非常に大きくなるため、図-12 及び図-13 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 の理論式の妥当性が確認された。

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) 従来の研究では、氷盤の曲げ破壊時には放射状クラックの発生後直ちに同心円状クラックが発生し、凍着破壊は放射状クラックの発生前に起こる場合があると考えられていた。しかし、著者らによる新しい氷荷重の計算方法により、氷厚、凍着力の大きさによっては放射状クラックの発生後に凍着破壊が発生し同心円状クラックが発生しないという新しい破壊モードが存在すること、放射状クラック発生後かなりの水位変動の後、同心円状クラックが発生することが初めて理論的に明らかとなった。

(2) 野外実験を実施した結果、現場の氷盤の氷厚は $h=30$ cm、曲げ弾性率は $E=2940$ MPa、曲げ強度は $\sigma_f=0.980$ MPa、凍着強度 $\tau_B=0.0715$ MPa である。これらの

値を用いて杭径が $a=25$ cm と $a=40$ cm の場合には氷厚が 30 cm と大きくなると理論的には $P_{\max 2}$ は $P_{\max 1}$ に比べて非常に大きくなり、 $P_{\max 1} < P_B < P_{\max 2}$ となることから、放射状クラック発生後に凍着破壊が起こり、最大氷荷重は放射状クラック発生後の凍着破壊時に作用することがわかった。

(3) 実験では理論から予想されたように、まず放射状クラックが発生し、そして同心円状クラックが発生する前に凍着破壊が起こり杭が引き抜かれ、その時点の氷荷重が最大となった。また、それぞれの時点において実測値と計算による $P_{\max 1}$ 及び P_B がほぼ一致していた。つまり、実験により理論の妥当性が実証された。

(4) 以上の理論解析と実証実験により、新しい破壊モードを考慮した鉛直方向氷荷重の算定方法を明らかにした。

(5) 以上により、実際の円断面構造物の設計時に鉛直方向氷荷重を軽減するためには、人工的に構造物表面と氷盤の凍着力を小さくすればよいことが明らかとなった。具体的には氷盤と構造物表面の接触面積を小さくするために断面の直径を構造上可能な限り小さくすることや、中澤ら (1985) が示したように、構造物表面に凍着強度の小さい塗料 (INERTA 160 や ZEBRON など) や合成材料を被覆するなどの方法により氷荷重の軽減が可能である。

しかし、凍着強度は表面の粗さにより決まることから、腐食や塗装の剝離などにより時間の経過とともに設計時に比べて表面の粗さが増し、凍着強度も増加する傾向がある。したがって、設計時には構造物の耐用年数に応じて、安全側となるよう凍着強度を推定する必要がある。

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.
- 中澤直樹・五十嵐昇・竹内貴弘・小野敏行・佐伯 浩 (1985): 海水と構造物材料表面間の凍着強度について, 第 1 回寒地技術シンポジウム講演論文集, pp. 172-177.
- 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): Ice Forces on Structures Due to a Change of the Water Level, Proc. 3rd International Symposium on Ice Problems, pp. 396-400.
- Nevel, D. E. (1972): The Ultimate Failure of a Floating Ice Sheet, Proc. IAHR Ice Symposium 1972, pp. 17-22.