

海洋構造物に作用する鉛直方向氷荷重の 算定方法に関する研究

STUDY ON VERTICAL ICE LOADS ACT ON PILE STRUCTURES

寺島貴志¹・成田恭一²・大島香織³・宇佐美宣拓³・佐伯浩⁴

Takashi TERASHIMA, Kyo-ichi NARITA, Kaori OHSHIMA, Norihiro USAMI and Hiroshi SAEKI

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) (〒060-0807 札幌市北区北7条西1丁目2-6)

²正会員 島田建設(株) (〒093-0007 網走市南7条東1丁目5番地)

³学生会員 北海道大学 大学院工学研究科 (〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目)

⁴フェロー会員 工博 北海道大学教授 大学院工学研究科 (〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目)

When ice sheets adfreeze to pile structures, vertical ice loads act on them as the water level changes due to the tides. The ice loads on structures grow greater with increased changes in water level. However, when the change in water level reaches a certain degree, the ice sheets fracture. The modes of failure are classified roughly as bending failure as adfreezing bond failure whereby the ice sheet is exfoliated from the surface of the structures. Furthermore, bending failure can be subdivided into two forms of cracking: radial cracking and circumferential cracking. We developed theoretical equations to give the vertical ice loads, which correspond to each mode of failure, and verified the equations through field experiment although a limited number of experiment was made in this research.

Key Words: Mode of ice failure, bending failure, adfreeze bond failure, vertical ice load, pile structure

1. はじめに

氷海域に建設された直立構造物には、潮汐や波浪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場合がある。Kerr¹⁾の理論式によれば、水位変動量（氷盤のたわみ量）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が、佐伯ら²⁾及び中澤ら³⁾は水位変動量がある一定量に達すると氷盤は破壊し、この時の氷荷重が最大となることを示している。ここで、氷盤の破壊形態は曲げにより氷盤が放射状と同心円状に割れる曲げ破壊と、構造物と氷盤との界面で剥離する凍着破壊の2つに大別できる。したがって、鉛直方向氷荷重を算定するためには、これらの破壊形態はもちろんのこと、同時に破壊過程を考慮しなければならない。しかし、破壊形態と破壊過程を同時に考慮した鉛直方向氷荷重の算定方法は存在しない。

一方、鉛直方向氷荷重に関する実験的研究は、Christensen⁴⁾の室内実験と Doud⁵⁾の野外計測を除く

とほとんど実施例は見当たらない。

このような背景から、本研究では著者ら^{6), 7)}がここ数年取り組んできた氷盤の破壊形態と破壊過程を同時に考慮した鉛直方向氷荷重の新しい算定方法を体系化し、更に1997年及び1998年1月に実施した初めての実規模での野外実験により、理論の妥当性の検証を試みることにする。

2. 鉛直方向氷荷重の理論解析

(1) 氷盤の破壊形態と氷荷重

円断面形の直立構造物に氷盤が凍着している場合に水位変動が生ずると、構造物に鉛直方向氷荷重が作用する。そして、水位変動量（氷盤の撓み量）がある一定量に達すると、氷盤は破壊する。これまで、氷盤の破壊過程は、凍着破壊が先に起こるか、それとも曲げ破壊が先に起こるかのいずれかであると考えられていた。すなわち、曲げ破壊の場合には初めに放射状クラックが発生し直ちに同心円状のク

ラックが発生するという前提のもとに算定式が導かれていた。しかし、著者らは氷厚や構造物の半径などの関係によっては、放射状クラックが発生後、凍着破壊が発生し、同心円状クラックが発生する前に氷盤が破壊する場合が存在することを想定し、以下に示すとおり鉛直方向氷荷重の算定式を体系化した。

(2) 鉛直方向氷荷重の算定方法

円形断面を有する単一の直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重は、破壊形態と破壊過程を考慮すると、以下の5つに分けて算定する必要がある。

- 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 $P_{\max 2}$
- 凍着破壊時の氷荷重 P_B

以下に各々の場合の氷荷重の算定方法を示す。

a) 放射状クラックが発生するまでの氷荷重 P_1

Kerr¹⁾によれば、構造形式が直立型で断面形状が円形の場合には、構造物に作用する氷荷重は弾性理論により Kelvin 関数を用いて次式で表すことができる。

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

ここで、 $\lambda = \sqrt{\frac{k_w}{D}}$ 、 a は構造物の半径、 Δ は水位変化量である。式(1)によれば、水位変動量が増加すると氷荷重は無限に増加することになる。しかし、佐伯ら²⁾及び中澤ら³⁾は水位変動量がある程度に達すると、氷盤が破壊することに着目して、放射状クラックが発生する時点の氷荷重の算定方法を以下に示すように提案した。

b) 放射状クラックが発生する時点の氷荷重 $P_{\max 1}$

佐伯ら²⁾によると、放射状クラックが発生する時点の氷荷重 $P_{\max 1}$ は次式で表すことができる。

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

また、この時の水位変動量は次式で表すことができる。

$$\Delta_{\max 1} = \frac{\sigma_f h^2}{6D\lambda^2} \frac{kei(\lambda a) ker'(\lambda a) - kei'(\lambda a) ker(\lambda a)}{kei'(\lambda a) kei(\lambda a) + ker'(\lambda a) ker(\lambda a)} \quad (3)$$

c) 同心円状クラックが発生するまでの氷荷重 P_2

これまで氷盤を無限に大きな連続した平板と仮定していたが、放射状クラックの発生後は氷盤をくさび形の半無限大の平板と見なすべきである。

Christensen⁴⁾によると、放射状クラックの発生後同心円状クラックが発生するまでの氷荷重 P_2 は次式

で表される。

$$P_2 = \frac{2\pi k_w \Delta}{\lambda^2} \frac{Dn_3''(\lambda a) I_2 - Dn_2''(\lambda a) I_3}{Dn_2(\lambda a) Dn_3''(\lambda a) - Dn_2''(\lambda a) Dn_3(\lambda a)} \quad (4)$$

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

$$I_3 = -0.45694 - \int_0^{\lambda a} x Dn_3(x) dx \quad (5)$$

ここで、 Dn_2 と Dn_3 は Nevel⁸⁾ によって定義された関数である。

d) 同心円状クラックが発生する時点の氷荷重 $P_{\max 2}$

同心円状クラックが発生する時点で完全に曲げ破壊が終了し、この時、氷荷重が最大となる。この最大氷荷重 $P_{\max 2}$ は Nevel⁹⁾ によると、近似的に次式のよう表される。

$$P_{\max 2} = 1.154 \sigma_f h^2 \left[1.05 + 2\lambda a + (\lambda a)^3 / 2 \right] \quad (6)$$

また、この時点の水位変動量 $\Delta_{\max 2}$ は次式で表すことができる。

$$\Delta_{\max 2} = \frac{1.154 \sigma_f h^2 \lambda^2}{2\pi k_w} \frac{[1.05 + 2\lambda a + (\lambda a)^3 / 2] [Dn_2(\lambda a) Dn_3''(\lambda a) - Dn_2''(\lambda a) Dn_3(\lambda a)]}{Dn_3''(\lambda a) I_2 - Dn_2''(\lambda a) I_3} \quad (7)$$

e) 凍着破壊時の氷荷重 P_B

構造物表面と氷盤の凍着力 P_B は凍着強度 τ_B と接触面積 $2\pi ah$ から次式で表される。

$$P_B = 2\pi ah \tau_B \quad (8)$$

3. 野外実験

(1) 実験方法と実験ケース

1997年1月と1998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行った。実験に使用した模型杭は半径10.8、25.4及び40.0cmの3種類のスチール製の円断面杭である。模型杭はクレーンにより鉛直方向上向きに速度0.13mm/sec(46.8cm/hr)で引き上げ、ロードセルにより引き抜き力(鉛直方向氷荷重に相当)を計測すると同時に3台のレベルにより氷盤の変位(水位変動量に相当)を測定し、氷盤からの発音、振動及び目視により氷盤のクラック発生状況を確認した。また、単純桁の3点曲げ試験により現地の平坦氷の曲げ強度を計測した。

実験ケースは表-1に示すとおり氷厚が30cmの場合が4ケース、20cmの場合が5ケース、合計9ケースである。

表-1 実験ケース

ケース名	半径 a (cm)	氷厚 (cm)	備 考
CASE 1, 2	25.4	30	1997 年の野外実験
CASE 3, 4	40.0	30	1997 年の野外実験
CASE 5	10.8	20	1998 年の野外実験
CASE 6, 7	25.4	20	1998 年の野外実験
CASE 8, 9	40.0	20	1998 年の野外実験

(2) 実験結果

a) 曲げ試験結果

1997 年の上曲げ試験では、曲げ強度の平均値は 0.99MPa、最小値は 0.85MPa、最大値は 1.31MPa、分散は 0.29 (Mpa)²、標準偏差は 0.17MPa であった。また、曲げ弾性率は約 2,650MPa であった。

1998 年の下上曲げ試験では、曲げ強度の平均値は 1.06MPa、最小値は 0.93MPa、最大値は 1.32MPa、分散は 0.15MPa、標準偏差は 0.12MPa であった。また、曲げ弾性率は約 2,300MPa であった。

いずれの場合にも、氷盤の曲げ強度にはバラツキがあることがわかる。

b) 氷荷重の理論値と実測値

氷厚と氷荷重との関係の理論値と実測値の比較を図-1～図-5 に示す。これらによると、構造物の半径がいずれの場合においても、理論的には放射状クラックが発生し次に同心円状クラックが発生するのは、現地の氷盤の物性値を用いれば氷厚は約 10cm 未満の氷厚が薄い場合に限られる。氷厚がそれ以上厚くなると放射状クラックが発生後、引き続いて凍着破壊が発生することから理論的には同心円状クラックは発生しない。

野外実験においては理論解析の予測と同様に、氷厚が 20cm と 30cm の場合にははじめに放射状クラックが発生し、次に凍着破壊が起こり同心円状クラックは発生しなかった。最大氷荷重は凍着破壊時に生じ、この時の実測値は理論値とほぼ一致している。

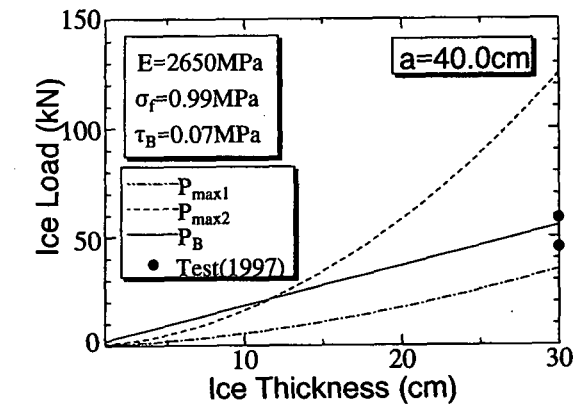


図-2 氷厚と氷荷重の関係 (a=40.0cm, h=30cm)

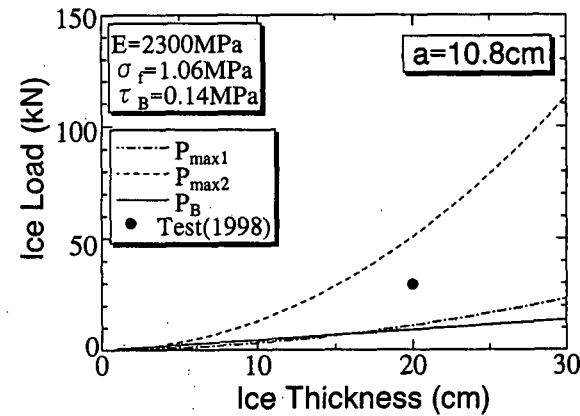


図-3 氷厚と氷荷重の関係 (a=10.8cm, h=20cm)

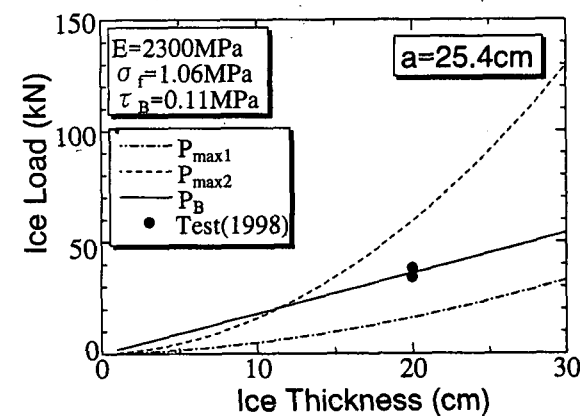


図-4 氷厚と氷荷重の関係 (a=25.4cm, h=20cm)

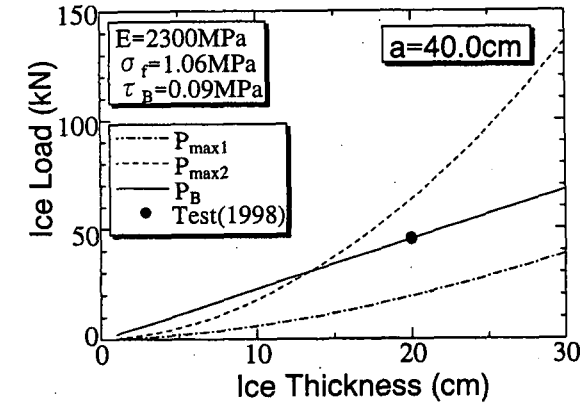


図-5 氷厚と氷荷重の関係 (a=40.0cm, h=20cm)

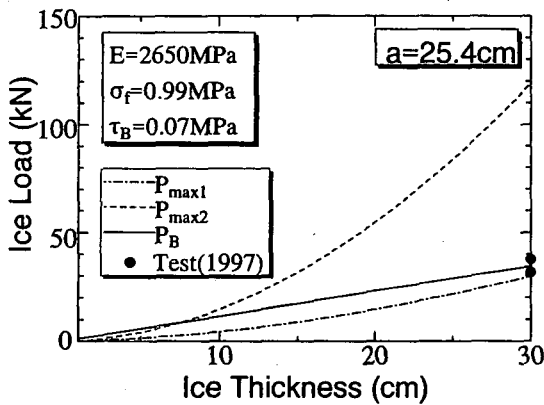


図-1 氷厚と氷荷重の関係 (a=25.4cm, h=30cm)

4. おわりに

本研究により得られた主要な結論を要約すると次の通りである。

(1) 1997 年と 1998 年 1 月に、氷荷重を計測するための杭の引き抜きに関する初めての実規模の野外実験を実施した。2 ヶ年の実験時における氷厚は約 30cm 及び 20cm、曲げ強度は 0.99MPa 及び 1.06MPa、曲げ弾性率は 2,650MPa 及び 2,300MPa であった。

(2) 現地における氷盤の物性値より、理論的にははじめに放射状クラックが発生し、引き続いて凍着破壊が発生するものと予測された。そして、実際に予測と全く同じ現象を野外実験により確認した。

(3) 弾性理論による理論値と実測値を比較した結果、理論値と実測値は比較的一致しているといえる。

(4) 以上より、著者らの方法により現場での氷盤の物性値から氷盤の破壊過程及び破壊形態が予測可能であり、更に氷盤の破壊形態に対応した氷荷重が算定可能である。

参考文献

- 1) Kerr, A. D.: The Bearing Capacity of Floating Ice Plates Subjected to Static or Quasi-Static Loads, *Journal of Glaciology*, 1976.
- 2) 佐伯浩, 小野敏行, 山田満, 尾崎晃: 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, 1981.

- 3) 中澤直樹, 五十嵐昇, 竹内貴弘, 小野敏行, 佐伯浩: 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, 1985.
- 4) Christensen, F. T.: Interaction between Floating Ice Sheets and Vertical Structures Due to Water Level Fluctuations, Technical University of Denmark, 1986.
- 5) Doud, J. O.: Ice sheet loads on marina piles, *Canadian Geotechnical Journal* 15(4), pp.599-604, 1978.
- 6) 寺島貴志, 西畑昭史, 成田恭一, 川合邦広, 本田秀樹, 佐伯浩: 直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重に及ぼす断面形状の影響について, 海洋開発論文集, VOL.13, pp.819-824, 1997.
- 7) 寺島貴志, 犬塚勉, 成田恭一, 本田秀樹, 大島香織, 宇佐美宣拓, 佐伯浩: 鉛直方向氷力に及ぼす断面形状と凍着強度の影響に関する研究, 海洋開発論文集, VOL.14, pp.411-416, 1998.
- 8) Nevel, D. E.: The Narrow Free Infinite Wedge on an Elastic Foundation, CRREL Research Report 79, 1961.
- 9) Nevel, D. E.: The Ultimate Failure of a Floating Ice Sheet, Proceedings of IAHR Ice Symposium, pp.17-22, Leningrad, USSR, 1972.

(1999. 4. 19 受付)