

杭構造物に作用する鉛直方向氷力の低減方法について Vertical Ice Forces on Pile Structures and Its Design Method

寺島貴志*, 中澤直樹*, 木岡信治**, 渡辺靖憲**, 佐伯浩***

Takashi Terashima, Naoki Nakazawa, Shinji Kioka, Yasunori Watanabe, Hiroshi Saeki

This presentation is titled Vertical Ice Forces on Pile Structures and Its Design Method. In cold offshore regions, changes in water level can induce vertical forces on structures when sea ice cover interacts with the structures. A rise in water level generates an upward force on pile structures; likewise, a drop generates a downward force. These forces are induced on pile structures due to changes in water level if the ice cover adheres to structures. In this presentation, I propose a method of calculation that estimates the vertical ice forces on pile structures due to changes in water level.

Keywords: vertical ice forces, pile structures.

1. はじめに

寒冷地の河川、湖、貯水池、海岸に建設される、杭、橋脚、取水塔等の直立構造物に氷盤が凍着している場合、水位の変動により鉛直方向に氷力が作用する。また、氷盤が凍着していない場合においても、氷盤との接触面が傾斜している構造物については、水位変動により鉛直方向の氷力が作用する場合がある。このような氷力によって、栈橋構造の杭が引き抜かれたり、取水塔が倒壊する例が過去に見受けられた。したがって、氷の作用を受ける構造物を設計する際には、このような鉛直方向氷力を考慮する必要がある。

今まで、Kerr⁽¹⁾、Christensen⁽²⁾、佐伯・中澤等⁽³⁾によって、直立構造物に作用するこの種の氷力の理論及び計算法が発表されている。また、傾斜構造物に作用する鉛直方向氷力については、榎等⁽⁴⁾⁽⁵⁾により理論及び計算法が発表されている。しかし、これらの過去の研究については、フラッディング状態における詳細な検討がなされているものが少ない。

本研究では、種々の条件下における鉛直方向氷力の算定に際してフラッディング状態を考慮し、フラッディングの起こらない場合との比較検討を行ない、氷力の低減方法について考察したものである。

2. フラッディング状態でない場合の鉛直方向氷力

2.1 浮氷盤の撓み

浮氷盤の撓み式は次式で表される。

$$D \cdot \nabla^4 W + K_w \cdot W = 0 \quad \text{..... ①}$$

ここで、 W は距離 r における撓み、 K_w は水の単位体積重量、 D は平板剛度で次式で表される。

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{..... ②}$$

ここで、 E , h , ν はそれぞれ氷盤の弾性係数、氷厚、それにポアソン比である。

2.2 フラッディング状態でない場合の鉛直方向氷力

フラッディング状態でない場合の氷盤の撓みの一般解は、Kelvin関数を用いると次式により表すことができる(図2-1)。

$$W(r) = A_1 \text{ber}(r/\ell) + A_2 \text{bei}(r/\ell) + A_3 \text{ker}(r/\ell) + A_4 \text{kei}(r/\ell) \quad \text{..... ③}$$

ここで、 r は構造物中心からの距離、 ℓ は特性長で次式により表すことができる。

$$\ell = (D/K_w)^{0.25} \quad \text{..... ④}$$

③式において、 $r = \infty$ のとき $W(\infty) = 0$ であることから、 $A_1 = A_2 = 0$ となる。したがって、

$$W(r) = A_3 \text{ker}(r/\ell) + A_4 \text{kei}(r/\ell) \quad \text{..... ⑤}$$

また、 r/ℓ がゼロに近づくとき $\text{ker}(r/\ell)$ は ∞ となるため、 r/ℓ がゼロの近傍においては、

$$W(r) = A_4 \text{kei}(r/\ell) \quad \text{..... ⑥}$$

となる。一方、フラッディング状態でない場合の鉛直方向氷力は、次式で表すことができる。

$$P = \int_0^\infty K_w 2\pi r W(r/\ell) dr = -2\pi K_w \ell^2 A_4 \quad \text{..... ⑦}$$

*正会員 パシフィックコンサルタンツ(株)北海道支社 (060 札幌市中央区北4条西6丁目)

**学生会員 北海道大学 工学部

***正会員 北海道大学 工学部

したがって、⑥及び⑦式より A_4 を消去すると、撓み $W(r)$ は次式となる。

$$W(r) = \frac{-P}{2\pi K_w \ell^2} \text{Kei}(r/\ell) \quad \text{⑧}$$

⑧式において、 $\text{Kei}(0) = -\pi/4$ のとき撓みは最大となるため

$$P = 8K_w \ell^2 W_{\max} \quad \text{⑨}$$

⑧式に⑨式を代入して整理すると、

$$W(r) = -\frac{4W_{\max}}{\pi} \text{Kei}(r/\ell) \quad \text{⑩}$$

ここで、 $W_{\max} = \Delta$ (Δ は水位変化量) であるから

$$W(r) = -\frac{4}{\pi} \Delta \text{Kei}(r/\ell) \quad \text{⑪}$$

3. フラッディング状態における鉛直方向氷力

3.1 フラッディング状態における浮氷盤の撓み

図3-1に示す様に、フラッディング状態における水位上昇時の浮氷盤の撓みは、フラッディング領域 ($r \leq r_0, W_1$) とそれ以外の領域 ($r > r_0, W_2$) に分けて次式で表すことができる。

$$\nabla^4 W = -K_w \cdot nh/D \quad \text{⑫}$$

$$\nabla^4 W = -K_w \cdot W_2/D \quad \text{⑬}$$

ここで、 $n = (1 - K_i/K_w)$ で K_i は氷の単位体積重量である。⑫、⑬式の一般解は次式となる。

$$W_1(r) = A_1 + A_2 \ell \log(r) + A_3 r^2 \ell \log(r) + A_4 r^2 - \frac{K_w \cdot nh}{64D} \cdot r^4 \quad \text{⑭}$$

$$W_2(r) = B_1 \text{ker}(r/\ell) + B_2 \text{kei}(r/\ell) \quad \text{⑮}$$

また、フラッディング状態における水位下降時の浮氷盤の撓みの一般解は、フラッディング領域 ($r \geq r_0, W_1$) については次式で表すことができる。 ($r > r_0, W_2$ については⑮式)

$$W_1(r) = A_1 + A_2 \ell \log(r) + A_3 r^2 \ell \log(r) + A_4 r^2 \quad \text{⑯}$$

3.2 境界条件

(1) 凍着している場合

構造物の半径を a 、フラッディング領域境界の距離を r_0 とすると、氷盤が構造物に凍着している場合の境界条件は次の様になる。

$$W_1(a) = \Delta (r=a \text{ で水位変化と撓みが同じ}) \quad \text{⑰}$$

$$W_1'(a) = 0 (r=a \text{ で傾斜角ゼロ}) \quad \text{⑱}$$

$$W_1(r_0) = nh, W_2(r_0) = nh (r=r_0 \text{ で同一の撓み}) \quad \text{⑲⑳}$$

$$W_1'(r_0) = W_2'(r_0) (r=r_0 \text{ で同一の傾斜角}) \quad \text{㉑}$$

$$W_1''(r_0) + \frac{\nu}{r_0} W_1'(r_0) = W_2''(r_0) + \frac{\nu}{r_0} W_2'(r_0) (r=r_0 \text{ で } r \text{ 方向モーメントが同一}) \quad \text{㉒}$$

$$\frac{d}{dr} \left[W_1''(r_0) + \frac{1}{r} W_1'(r_0) \right] = \frac{d}{dr} \left[W_2''(r_0) + \frac{1}{r} W_2'(r_0) \right] (r=r_0 \text{ で } r \text{ 方向剪断力が同一}) \quad \text{㉓}$$

(2) 凍着していない場合

氷盤が構造物に凍着していない場合の境界条件は、次式の他に⑰式及び⑲～㉓式となる。

$$W_1''(a) + \frac{\nu}{a} W_1'(a) = 0 (r=a \text{ で曲げモーメントゼロ}) \quad \text{㉔}$$

3.3 フラッディング状態における鉛直方向氷力

(1) 凍着している場合

⑭、⑮式より境界条件⑰～㉓式を整理すると次の様になる。

$$A_1 + A_2 \ell \log a + A_3 a^2 \ell \log a + A_4 a^2 = \Delta + \frac{K_w \cdot nh}{64D} \cdot a^4 \quad \text{㉕}$$

$$A_2/a + A_3 a(1 + 2 \ell \log a) + 2A_4 a = \frac{K_w \cdot nh}{16D} \cdot a^3 \quad \text{㉖}$$

$$A_1 + A_2 \ell \log r_0 + A_3 r_0^2 \ell \log r_0 + A_4 r_0^2 = nh + \frac{K_w \cdot nh}{64D} \cdot r_0^4 \quad \text{㉗}$$

$$B_1 \text{Ker}(r_0/\ell) + B_2 \text{Kei}(r_0/\ell) = nh \quad \text{㉘}$$

$$A_2/r_0 + A_3 r_0(1 + 2 \ell \log r_0) + 2A_4 r_0 - \frac{B_1}{\ell} \text{Ker}(r_0/\ell) - \frac{B_2}{\ell} \text{Kei}'(r_0/\ell) = \frac{K_w \cdot nh}{16D} \cdot r_0^3 \quad \text{㉙}$$

$$A_2 \left(\frac{\nu-1}{r_0^2} \right) + A_3 (3+\nu+2(1+\nu) \ell \log r_0) + 2A_4 (1+\nu) + \frac{B_1}{\ell} \left\{ \frac{1}{\ell} \text{Kei}(r_0/\ell) + \frac{1-\nu}{r_0} \text{Ker}'(r_0/\ell) \right\} - \frac{B_2}{\ell} \left\{ \frac{1}{\ell} \text{Ker}(r_0/\ell) - \frac{1-\nu}{r_0} \text{Kei}'(r_0/\ell) \right\}$$

$$= \frac{(3+\nu)Kw \cdot nh}{16D} \cdot r_0^2 \dots\dots\dots 30$$

$$4A_3/r_0 + \frac{B_3}{\ell^3} \text{kei}'(r_0/\ell) - \frac{B_4}{\ell^3} \text{Ker}'(r_0/\ell) = \frac{Kw \cdot nh}{2D} \cdot r_0 \dots\dots\dots 31$$

(2) 凍着していない場合

同様に、⑭、⑮式より境界条件②式を整理すると次の様になる。

$$(\nu-1)A_2/a^2 + A_3\{(3+\nu+2(1+\nu)\ell \log a)\} + 2(1+\nu)A_4 = \frac{(3+\nu)Kw \cdot nh}{16D} \cdot a^2 \dots\dots\dots 32$$

以上に示した様に、氷盤が構造物に凍着している場合には、②⑤～③①式を、また凍着していない場合には②⑤式、②⑦～③②式を $A_1 \sim A_4$, B_3 , B_4 , r_0 の7つの未知数について解くことになる。ここで、 r_0 は Kelvin 関数の変数となっているため、あらかじめ r_0 の近似解を与えて収束計算を行うのが合理的である。ここで、 $r = r_0$ のとき $W(r_0) = nh$ であることから、⑪式に代入して整理すると、

$$\text{Kei}(r_0/\ell) = -\frac{\pi nh}{4\Delta} \dots\dots\dots 33$$

となり、これを r_0 の近似解とし、図3-2に nh/Δ と r_0/ℓ との関係を示す。これによると、 $\Delta/nh = 5$ 程度まで r_0/ℓ は急増するが概ね $\Delta/nh = 10$ 程度以降では $r_0/\ell = 3$ に漸近する。

図3-3に、フラッディング状態における鉛直方向水力の計算フローチャートを示す。この手順により、7つの未知数が既知となると、フラッディング状態における剪断力 (Q) 及び鉛直方向水力 (P) を次式により求めることができる。

$$Q = -D \cdot \frac{d}{dr} \left[\frac{d^3 W}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right]_{r=r_0} = -D \left[\frac{4A_3}{r} - \frac{Kw \cdot nh}{2D} \cdot r \right]_{r=r_0} \dots\dots\dots 34$$

$$P = -2\pi a \cdot Q \dots\dots\dots 35$$

4. フラッディング状態の有無による鉛直方向水力の比較

次に、フラッディングの起こる場合の水力を P_f 、起こらない場合の水力を P_n とし、 $K (= E/(1-\nu^2))$ と P_f/P_n との関係を図4-1～図4-3に示す。 P_f/P_n の算定に際してはポアソン比 $\nu = 1/2$ とし、 $K = 5,000, \sim 100,000$ (ヤング率 $E = 4,000 \sim 90,000 \text{ kg/cm}^2$) について計算を行った。

これらの計算結果より、いずれの場合も P_f/P_n は1以下であり、 K が増加すると P_f/P_n が微増する傾向がある。杭半径と氷厚が一定の場合、水位変化量が大きくなるにつれて P_f/P_n は小さくなり、杭半径と水位変化量が一定の場合、氷厚が小さくなるにつれて P_f/P_n は小さくなる。また、氷厚と水位変化量が一定の場合、杭半径が大きくなるにつれて P_f/P_n は小さくなる傾向があるが、大きな差はなく、 P_f/P_n は杭半径に大きくは依存しないものと考えられる。

5. 鉛直方向水力の低減方法

以上に示したように、フラッディング状態における鉛直方向水力は通常の水力よりも小さい。したがって、杭構造物に作用する鉛直方向の低減方法として、

- (1) 意図的にフラッディング状態とする。
- (2) 杭構造物表面に凍着強度の小さい材料を用いる。
- (3) 杭構造物と氷盤とを凍着させない。

などの方法が考えられる。以下に、各方法の具体的内容を示す。

(1) 意図的にフラッディング状態する方法

- 1) 構造物に熱源を埋設し、H.W.L から L.W.L の氷厚分下方まで縦に Heating することで、構造物と氷盤との凍着面に最低1ヶ所穴をあける。
- 2) 構造物のごく近傍の海底にエアバルブを設置することで、構造物と氷盤との凍着面に最低1ヶ所穴をあける。

(2) 杭構造物表面に凍着強度の小さい材料を用いる方法

- 1) 杭構造物がスチール製の場合には、INERTA160, ZEBRON 等の凍着強度の小さいペイント材料を塗布する。
- 2) 杭構造物がコンクリート製の場合には、表面処理を行なって表面粗さを小さくする。

(3) 杭構造物と氷盤とを凍着させない方法

- 1) 構造物に熱源を被覆することで、構造物と氷盤とを凍着させない。
- 2) 構造物周辺にエアバルブを設置することで、構造物と氷盤とを凍着させない。

6. おわりに

本研究で得られた主要な結論を要約すると以下の様である。

- (1) フラッディング状態における撓みの理論解より、構造物と氷盤とが凍着している場合としていない場合の鉛直方向水力の計算方法を明らかにした。
- (2) 氷厚、構造物の直径、予想水位変動量等の各種条件を変化させてフラッディング状態における鉛直方向水力の数値計算を行った結果、氷厚に比べて予想水位変動量が小さい場合にフラッディング状態が生ずる。
- (3) フラッディング状態の有無について鉛直方向水力を比較すると、 P_i/P_o は常に1以下である。また、 P_i/P_o は氷厚とは比例、水位変化量と杭半径とは逆比例の関係にある。
- (4) 以上のことから、構造物の設計に際してはフラッディングの起こらない場合の条件で外力を想定するのが安全側であるが、以下のような方法により鉛直方向水力を低減することで、経済的断面とすることも可能である。
 - 1) 意図的にフラッディング状態とする方法
 - 2) 杭構造物表面に凍着強度の小さい材料を用いる方法
 - 3) 杭構造物と氷盤とを凍着させない方法

— 参 考 文 献 —

- (1) Kerr, A.D. : "Ice Forces on Structure due to a Change of the Water Level", Proceeding, IAHR, Third International Symposium on Ice Problems, Hanover, 1975.
- (2) F. T. Christensen : "Interaction Between Floating Ice Sheets and Vertical Structures due to Water Level Fluctuations", Tech. Univ. of Denmark, S. Paper 5, No.38, 1986
- (3) 中澤, 山田, 浜中, 佐伯 : 「直立円断面構造物に作用する鉛直方向水力」, 寒地技術シンポジウム, 1985年
- (4) 榎, 寺島, 山崎, 中澤, 佐伯 : 「水位変化による傾斜構造物に作用する鉛直方向水力について」, オホーツク海と流水に関するシンポジウム, 1991年
- (5) 榎, 寺島, 岡本, 佐伯, 吉浦 : 「円錐・逆円錐形海洋構造物に作用する鉛直方向水力に関する研究」, 海洋開発論文集, Vo7, 1993年
- (6) 寺島, 中澤, 佐伯 : 「フラッディング状態におけるコーン型構造物に作用する鉛直方向水力」, 寒地技術シンポジウム, 1993年
- (7) 寺島, 中澤, 佐伯 : 「フラッディング状態における鉛直円断面構造物に作用する鉛直方向水力について」, オホーツク海と流水に関するシンポジウム, 1994年
- (8) 寺島, 中澤, 木岡, 佐伯 : 「フラッディング状態における鉛直方向水力の数値計算」, 海洋開発論文集, VOL10, 1994年
- (9) 木岡, 寺島, 大久保, 原, 佐伯 : 「氷盤凍着時の円断面構造物に作用する鉛直方向水力の計算」, 寒地技術シンポジウム, 1994年
- (10) 寺島, 中澤, 木岡, 渡部, 佐伯 : 「種々の条件下における鉛直方向水力の計算方法について」, 寒地技術シンポジウム, 1994年
- (11) 木岡, 寺島, 佐伯 : 「杭状構造物に作用する鉛直方向水力について」, オホーツク海と流水に関するシンポジウム, 1995年
- (12) 寺島, 中澤, 木岡 : 「フラッディング状態における杭構造物に作用する鉛直方向水力と低減方法について」: オホーツク海と流水に関するシンポジウム, 1995年

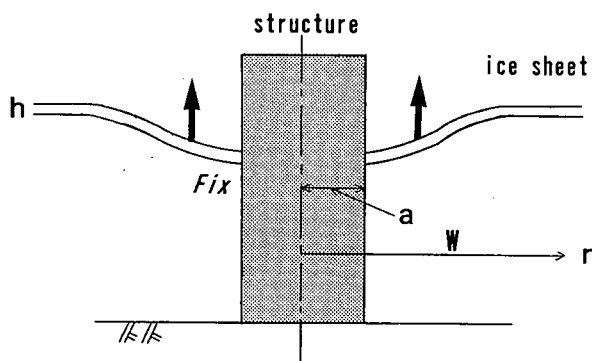


図2-1 概念図（フラッディングなし）

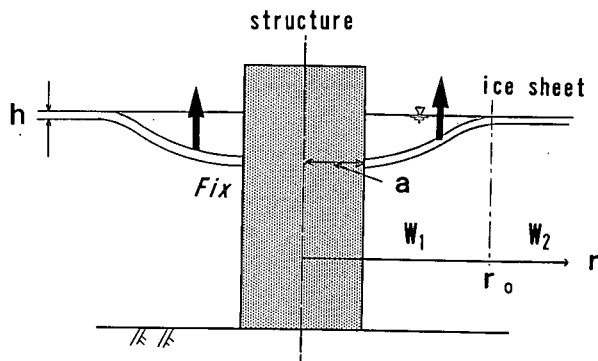


図3-1 概念図（フラッディングあり）

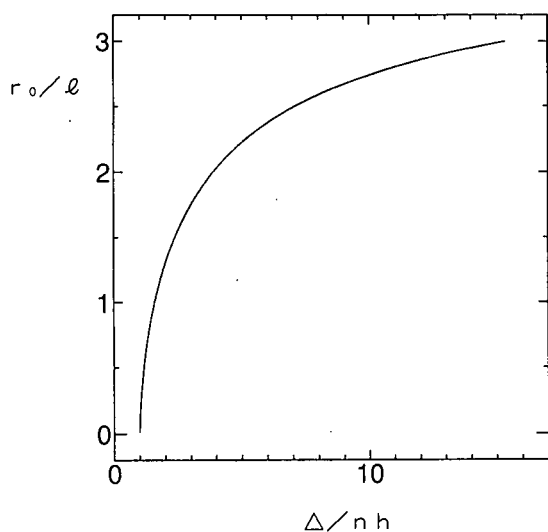


図3-2 nh/Δ と ro/l の関係図

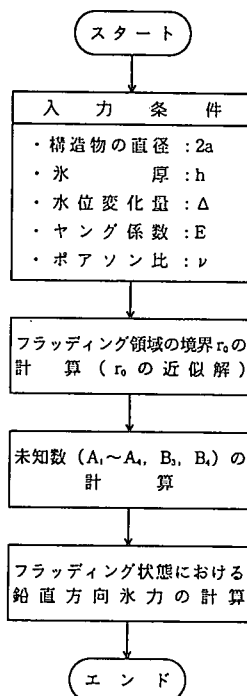


図3-3 鉛直方向氷力計算フローチャート

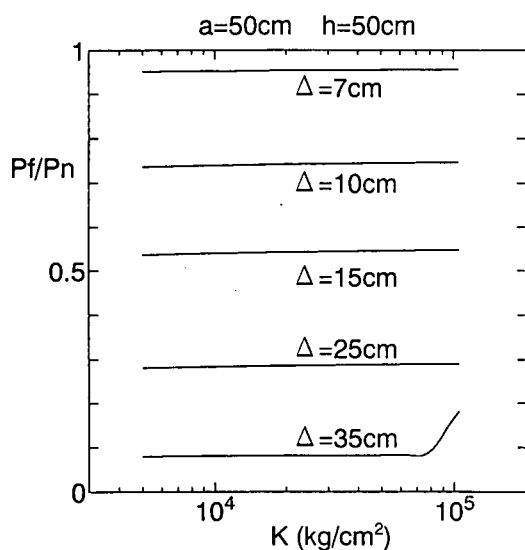


図4-1 鉛直方向氷力計算結果 (水位変化量)

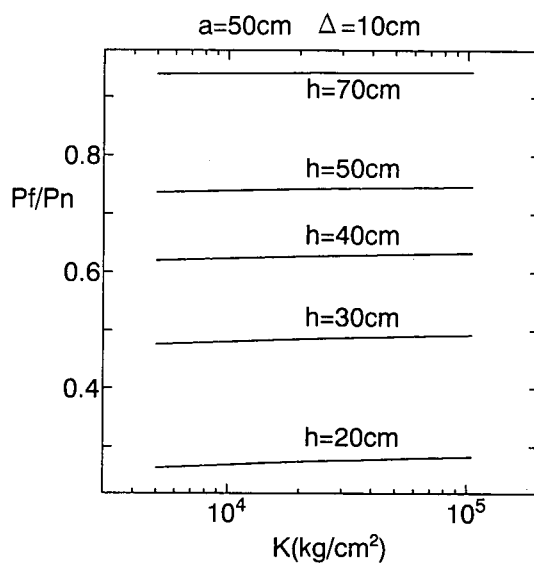


図4-2 鉛直方向氷力計算結果 (氷厚)

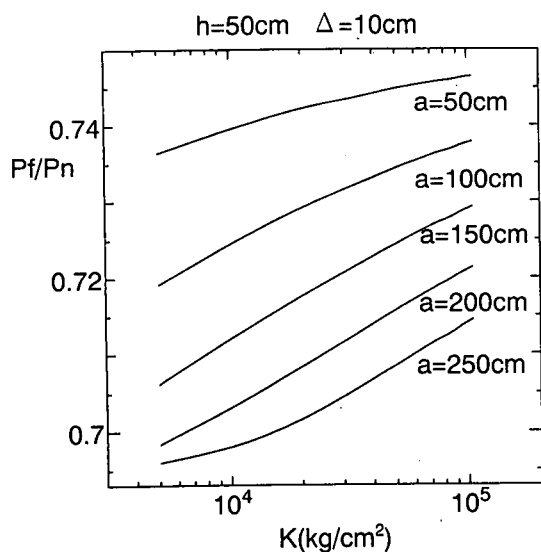


図4-3 鉛直方向氷力計算結果 (杭半径)