

フラッディング状態の氷盤の耐荷力に関する研究

Bearing Capacity of Ice Sheets under the condition of Partial Flooding around a load

本田秀樹* 大久保泰宏** 木岡信治*** 寺島貴志**** 橋治国***** 佐伯浩*****
 Hideki Honda, Yasuhiro Okubo, Shinji Kioka, Takashi Terashima, Harukuni Tachibana, Hiroshi Saeki

Ice sheets in rivers, lakes, lagoons in cold regions are used for a variety of purposes. They are used as tracks on the ice, as roads for automobiles, as runways for airplanes, and as footholds for the construction of structures. Knowledge of physical and dynamic characteristics of natural ice sheets and techniques to estimate the bearing capacity of natural ice sheets against vertical loads are required to safely use ice sheets. In this study, the authors indicate the theoretical values of the bearing capacity and the deflection of ice sheets under the condition of partial flooding, and compare with the experiments values.

Keywords: Flooding Condition, Bearing Capacity,

1. はじめに

最近、サロマ湖などの湖沼や港湾、漁港において魚釣り、スノーモービル等浮氷盤を利用した冬期のレクリエーションが活発になってきている。また、寒冷地海岸における石油や天然ガスなどのエネルギー開発においては、浮氷盤を人工氷床として直接掘削施設の支持材として用いたり、建設資材置き場としての利用も行われている。浮氷盤の耐荷力は一般に弾性床上的の平板として取り扱われていて、数多くの研究成果が発表されている。しかし、北海道などのように比較的雪の多い所では、浮氷盤が雪に覆われ氷盤全体が沈み込む現象が見られる。このような状態の浮氷盤の表面に荷重が作用すると、氷盤の撓んだ領域に水が滲み出てくる現象が見られる。このような領域では、氷盤の撓みに比例した下からの反力は期待できなくなり弾性床上の板としての取り扱いができなくなる。このように氷盤上に水が存在する状態をフラッディング状態という。このフラッディング状態での氷盤の耐荷力及び撓みについての研究はまだ発表されていない。本研究は、このフラッディング状態での耐荷力及び撓みの理論式を求めるとともに北海道中央部に位置する鹿の子ダムでの実測値と比較し、その理論の妥当性を検証した。さらに、氷盤は長期的には粘弾性的な性質も知られていることから、長期載荷に対する氷盤の撓みについても実験により明らかにした。

2. フラッディング状態における浮氷盤の撓み式と耐荷力の理論式

2. 1 浮氷盤の撓み

図-1において、フラッディング領域 ($r \leq r_0$) とフラッディングでない領域 ($r \geq r_0$) における撓みの基本微分方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \text{フラッディング領域} \quad (r \leq r_0) \\ \nabla^4 W = -Kw \cdot nh/D \quad (1) \end{aligned}$$

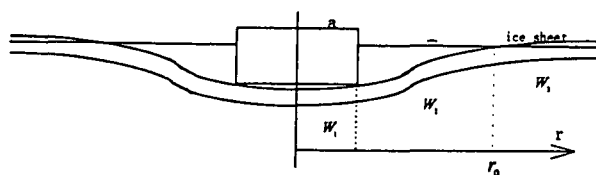


図-1 浮氷盤断面図

* 学生会員 北海道大学大学院

** 五洋建設(株)

*** 日立造船(株)

**** パシフィックコンサルタンツ(株)

***** 正会員 北海道大学工学部土木工学科 (060 札幌市北区北13条西8丁目)

フラッディングでない領域 ($r \geq r_0$)

$$\nabla^4 W = -Kw \cdot W/D \quad (2)$$

ここで、 W は距離 r における撓み、 D は平板剛度、 kw は水の単位体積重量、 h は氷厚であり、それぞれ次式で表される。

$$n = 1 - \frac{ki}{kw}, \quad D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2)}, \quad l = (kw/D)^{0.25}$$

ここで、 ki は氷の単位体積重量、 E は氷の曲げ弾性率、 ν は氷のポアソン比、 l は特性長である。

また、(1) (2) 式の撓みの一般解は、次式のようになる。

$$W_{1,2}(r) = A_1 + A_2 \cdot \log(r) + A_3 \cdot r^2 \cdot \log(r) + A_4 \cdot r^2 - \frac{kw \cdot nh}{64D} \cdot r^4 \quad (r \leq r_0) \quad (3)$$

$$W_3(r) = B_1 \cdot \ker(r/l) + B_2 \cdot \kei(r/l) + B_3 \cdot \ber(r/l) + B_4 \cdot \bei(r/l) \quad (r \geq r_0) \quad (4)$$

これより、載荷半径を a とすると図-1に示すように浮氷盤の撓みは、フラッディング領域 ($0 \leq r \leq a$ での撓み W_1 、 $a \leq r \leq r_0$ での撓み W_2) と、それ以外の領域 ($r_0 \leq r$ での撓み W_3) として表せる。その一般式は、 W_1 、 W_2 は (3) 式、 W_3 は (4) 式である。

2. 2 境界条件

以上より、 W_1 、 W_2 、 W_3 のそれぞれの撓み式における12個 ($A_1 \sim A_4$ 、 $B_1 \sim B_4$ 、 $C_1 \sim C_4$) の未知量に対する12個の境界条件は次のようになる。

①② $r = 0$ において W' 、 W は、有限な物理量である。

③ $W_1(a) = W_2(a)$ ($r=a$ で同一の撓み)

④ $W_1'(a) = W_2'(a)$ ($r=a$ で同一の撓み角)

⑤ $W_1''(a) + \frac{\nu}{a} W_1'(a) = W_2''(a) + \frac{\nu}{a} W_2'(a)$ ($r=a$ で r 方向のモーメントが同一)

⑥ $\frac{d}{dr} \left[W_1''(a) + \frac{1}{r} W_1'(a) \right] = \frac{d}{dr} \left[W_2''(a) + \frac{1}{r} W_2'(a) \right] = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot a}$ ($r=a$ でのせん断力の差が $P/2\pi a$)

⑦⑧ $W_2(r_0) = W_3(r_0) = n \cdot h$ ($r=r_0$ で同一の撓み)

⑨ $W_2'(r_0) = W_3'(r_0)$ ($r=r_0$ で同一の撓み角)

⑩ $W_2''(r_0) + \frac{\nu}{a} W_2'(r_0) = W_3''(r_0) + \frac{\nu}{a} W_3'(r_0)$ ($r=r_0$ で r 方向のモーメントが同一)

⑪ $\frac{d}{dr} \left[W_2''(r_0) + \frac{1}{r} W_2'(r_0) \right] = \frac{d}{dr} \left[W_3''(r_0) + \frac{1}{r} W_3'(r_0) \right]$ ($r=r_0$ で r 方向のモーメントが同一)

⑫ $r = \infty$ において $W_3(\infty) = 0$

2. 3 フラッディング状態での撓み式

上式①～⑫の12個の境界条件を整理すると、それぞれの撓み式は次のように表される。

$$W_1(r) = A_1 + \frac{1}{4} A_4 \cdot r^2 - \frac{kw \cdot nh}{64 \cdot D} \cdot r^4 \quad (0 \leq r \leq a)$$

$$W_2(r) = B_1 + B_2 \cdot \log(r) + B_3 \cdot r^2 \cdot \log(r) + B_4 \cdot r^2 - \frac{kw \cdot nh}{64 \cdot D} \cdot r^4 \quad (a \leq r \leq r_0)$$

$$W_3(r) = C_1 \cdot \ker(r/l) + C_2 \cdot kei(r/l) \quad (r_0 \leq r)$$

2. 4 フラッディング状態での耐荷力

耐荷力を求める場合、載荷点 $r = a$ において、曲げ応力 σ と曲げ強度 σ_f が等しくなった時の荷重 P が耐荷力 P_σ となる。

$$\sigma = \sigma_f \rightarrow P = P_\sigma$$

ここで、上式における σ 、 σ_f は次の式で表される。

$$\sigma_f = \sigma = \frac{M(a)}{I} \cdot y = \frac{6 \cdot M(a)}{h^2}, \quad M(a) = \frac{nh \cdot kw}{4} \cdot a^2 - \frac{2 \cdot D}{3} \cdot A_1 \quad (M: \theta \text{ 方向の曲げモーメント})$$

これより、 E 、 σ_f 、 h 、 a を測定することにより耐荷力 P_σ の理論値を求めることができる。

3. 現地実験

次に、今まで述べてきた理論値と比較するために、北海道常呂郡置戸町鹿の子ダムにおいて実験を行った。

3. 1 実験方法

実験 1) 短期載荷実験として図-2 に示す様に、半径 50cm の載荷盤に FRP タンクをのせ 25m 離れた所に設置した水中ポンプでタンクに水を注入し、任意の荷重をかける。その時の撓みを載荷中心点より半径方向に 10 点 (2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 22m) の地点においてレベルを用いて測定した。

実験 2) 次に、FRP タンクが短期載荷実験であるのに対して長期載荷実験を行った。これは、半径が 50 (cm) の 2 種類の TANK に一定の水を入れ、その時の撓みを載荷中心点と載荷中心点より 2 m、6 m の地点でレベルにより測定する。

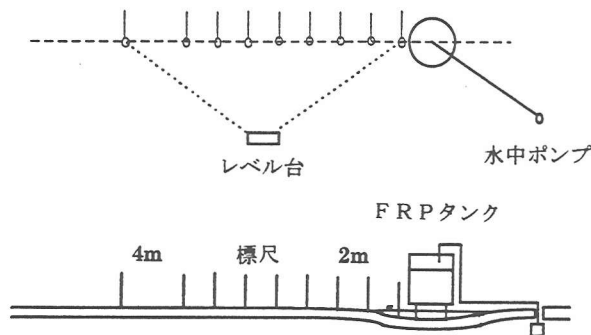
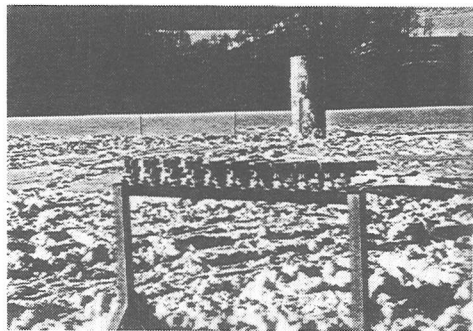
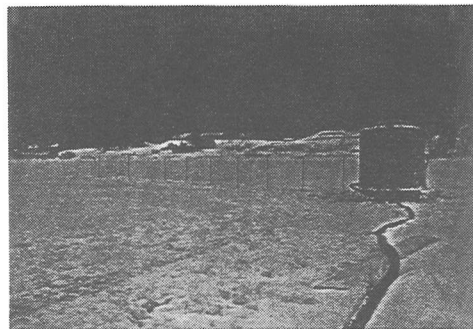


図-2 実験の概略図

3. 2 実験条件

実験条件として、現地において 3 点曲げ試験を行ったところ曲げ強度 σ_f と曲げ弾性率 E の平均値はほぼ 10 kgf/cm^2 、 30000 kgf/cm^2 であった。これは、過去に満州で行われた実験より得られた式とほぼ一致していることより、曲げ強度 σ_f 、曲げ弾性率 E はこの値を用いることにした。

下式は満州における実験式と曲げ強度と曲げ弾性率の関係を示した式である。



$$\sigma_f = 10 + \frac{T}{1.25 + 0.0197 \cdot T} \quad (\text{温度と曲げ強度との関係})$$

$$E = K \cdot \sigma_f \quad (K=3000) \quad (\text{曲げ強度と曲げ弾性率の関係})$$

ここで、式中の σ_f (kgf/cm²)、 T (°C) である。

また、耐荷力の実験においては、氷盤下面で破壊が始まり氷盤下面の温度は水温と同じくほぼ0°Cである。よって、この氷盤の3点曲げ試験においては、氷盤をそのまま切出し下面から破壊するようにして強度試験を行った。また、この時の氷温は0°Cであった。

3. 3 実験結果

1) 実験1において、 $r=200, 400, 800$ (cm)における撓みと荷重との関係を図-3に示す。

図-3より $r=200$ (cm)の地点における荷重と撓みの関係をとると、 $P=2000$ (kg)あたりまでは線形だが、それ以後は傾きが急になっている。また、実験時においても $P=1800$ (kg)あたりからかなりクラックが発生していたことより耐荷力は $P_{\sigma}=1800$ (kg)である。これは、曲げ強度 $\sigma_f=10$ kgf/cm²、曲げ弾性率 $E=30000$ kgf/cm²、氷厚 $h=15.5$ cmとした時の上述した式より求めてきた耐荷力の理論値 $P_{\sigma}=1700$ (kg)とほぼ一致している。なお、氷盤のクラックの発生状況は冠雪のため、目視はできなかったが載荷点付近で氷盤の破壊が聞こえることから、音により判断した。

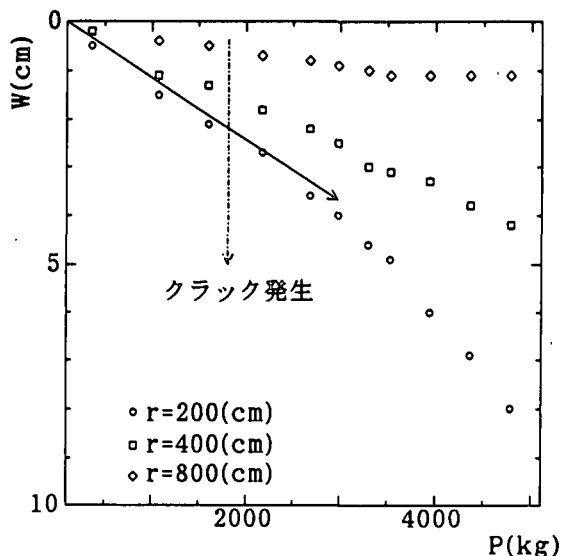


図-3 荷重と撓みの関係

次に、耐荷力は1800 (kg)であるので $P=1600$ (kg)における実験値と理論値の撓みの比較を示したのが図-4である。

図-4に示す様に、荷重 $P=1600$ (kg)においても実験値と理論値の撓み形状がほぼ一致している。この時の載荷点での撓みは20mmを越え、載荷点付近においては氷盤上に水がたまっている状態で、フラッディングの影響範囲は半径6m程度に及んでいた。このフラッディングの範囲も理論から計算される範囲とほぼよい一致を示していた。以上のことより、上述したようなフラッディング状態での耐荷力及び撓みの理論式は妥当であることが確認できた。

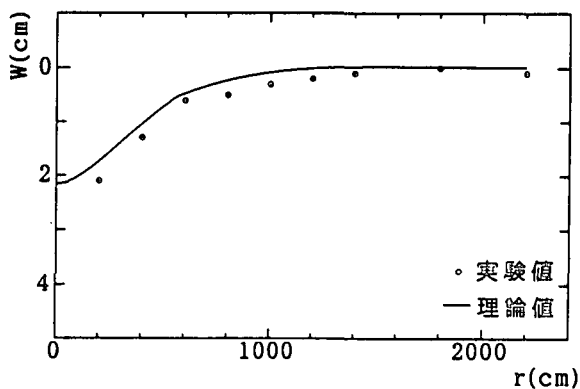


図-4 実験値と理論値の撓みの比較

本条件と同一の氷の条件においては、フラッディングが発生しない条件での耐荷力に比べて約1割程小さい耐荷力となる。よって、氷盤の耐荷力を推定する場合には、積雪の多い状態の場合、フラッディングが発生すると条件で推定した方が安全側の推定値を得ることができる。

2) 実験2の長期載荷実験における荷重は、氷盤の耐荷力の約半分である1 (tf)と8割程度である1.5 (tf)で行った。その時の $r=0, 200, 600$ (cm)における撓みと載荷してからの経過時間との関係を図-5、図-6に示す。

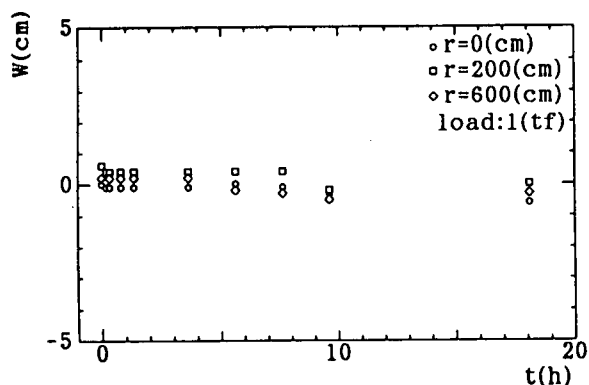


図-5 TANK1における時間と撓みの関係

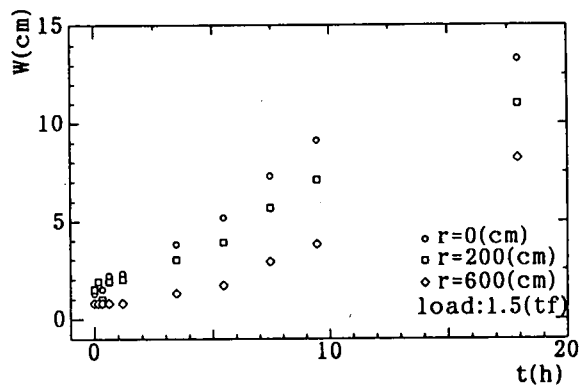


図-6 TANK2における時間と撓みの関係

これより、図-5に示した様に、耐荷力の半分の荷重においては、20 時間経過後も撓みの変化はほとんどない。しかし、図-6に示した様に、耐荷力の 8 割程度の荷重をかけた時は、載荷後 2 時間を越えると急激に撓みが増加している。これは、耐荷力を 1.8(t)とした時の中心の撓みが 2.4(cm)であり、載荷 2 時間を越えると 2.4(cm)以上撓むため氷盤が破壊したものである。また実験後、載荷盤の下には多数のクラックが入っていた。これより、耐荷力の 8 割程度の荷重をかける時は、一定の位置に 2 時間以上置くのは危険である。

Panfilov も同様の実験を行っている。それによると、弾性体としての耐荷力（短期載荷の耐荷力）の半分の荷重であれば、載荷後 6 時間経ってもほとんど耐荷力には変化がないとしていることから、我々の結果とも一致している。結論として、短期載荷時の氷盤の耐荷力の半分以下の荷重であれば、かなりの長時間安全に載荷可能であることを示している。また、短期載荷時の耐荷力の 8 割程度の場合には、氷盤の撓みの進行が激しく、いずれフラッディング状態になり、浮氷盤としての利用が困難となることを示している。

4. 結論

- 1) フラッディングが発生するような浮氷盤の撓み及び耐荷力の理論式を求めた。
- 2) 弾性床上の氷盤では荷重と撓みは直線の関係が得られるが、フラッディングが発生する場合には氷盤の弾性率・曲げ強度によってその関係が異なる。
- 3) 鹿の子ダムでの実験の結果、理論から得られる氷盤の撓み・耐荷力は実験値とよい一致を示した（図-3，図-4）。これより、理論の妥当性が示された。
- 4) 長期載荷実験においても上述の実験と同一の載荷面積で行った。短期荷重の耐荷力の 50%の場合、載荷 24 時間後も撓みの変化はなく氷盤の耐荷力の低下は見られなかった（図-5）。しかし、耐荷力の 80%の場合には、載荷 2 時間以降急速に氷盤が撓み、載荷中心では 13cm に達しており完全なフラッディング状態になっていて、載荷域には氷盤に網状のクラックが発生していた（図-6）。以上より、長期載荷の場合の耐荷力は短期荷重の耐荷力の 50%程度以下を目安と考えたほうがよいことが明らかになった。

参考文献

寺島、中澤、木岡、渡部、佐伯等: Vertical Ice Forces on Pile Structures Under Flooding Condition and Its Design Method, THE TENTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON OKHOTSK SEA, SEA ICE & PEOPLE, p100-105, 1995