

様々な载荷条件における浮氷盤の耐荷力について

Bearing Capacity of Ice sheet under the Various Load Conditions

大久保泰宏* 本田秀樹** 山下俊彦*** 黒木幹男*** 佐伯浩***

Yasuhiro Okubo, Hideki Honda, Toshihiko Yamashita, Mikio Kuroki, Hiroshi Saeki

Ice sheets in harbors, rivers, lakes and ponds in cold regions are used for a variety of purpose. For example, tracks on the ice, roads for automobiles, runways for airplanes, footholds for the construction of structures. Using ice sheets, it is important to estimate the bearing capacity of an infinite ice sheet in order to ensure their safety. In this study, the authors show method to estimate the bearing capacity of an infinite ice sheets by graphs and charts. And compare with the bearing capacity under the condition of three types of loads.

Keywords: the bearing capacity, safety, ice sheets

1. はじめに

北方圏諸国において冬期間に、漁港、港湾、河川、湖沼、ダム湖のほとんど全てが結氷する。近年、その結氷盤は

- ①建設支持材：橋脚上部工の支持、Ice Platform、建設機械の設置
- ②スポーツ、レクリエーション：魚釣り、スケート、スノーモービル、氷上カーレース
- ③交通路：滑走路、氷上軌道、Ice Platform

として、北欧、カナダ、ロシア等において実際に利用されている。特に最近では、国内においてもスポーツやレクリエーションとして魚釣り、スケート、スノーモービル、氷上カーレースが行われている。しかし、結氷盤の利用が盛んになるとともに氷盤上での事故も多く報告されている。公の水面をレクリエーションやスポーツ、その他に利用する場合には安全性が重視されなければならない。実際の浮氷盤上での事故のほとんどは氷上を歩行または走行中に氷盤がたわみ、曲げ破壊を起こし氷盤が割れて水中へ転落することが多い。しかし、寒冷地域のレクリエーションは限られていることから、冬期の結氷盤を利用したレクリエーションも重要であり、今後ますます盛んになると思われる。

本研究では、単位荷重を作用させた氷盤のたわみから現地での円形の等分布荷重が作用した時の浮氷盤の耐荷力の推定法を示した。また、様々な载荷条件に関して、円形の等分布荷重が作用した時の耐荷力との比較を行った。

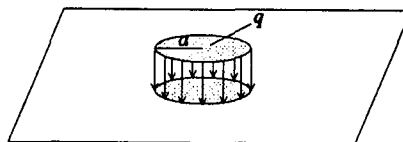
2. 半径 a の円形等分布荷重が作用する無限氷盤の耐荷力

半径 a の等分布荷重 $q = P / \pi a^2$ が作用した場合の無限氷盤の耐荷力については、佐伯らの研究から氷盤上に既知の荷重 Pa を作用させた時のたわみより推定することができる。

よって、以下の手順によって氷盤の耐荷力を推定する。

①氷厚 h の測定

まず使用する氷盤の氷厚を測定する必要がある。氷厚の測定は、市販のアイスオーガーによって穴を開け氷厚を測定する。



円形等分布荷重が作用する場合の氷盤の耐荷力

耐荷力の推定の手順

- ①氷厚の測定
- ② K の値の設定
- ③载荷半径、载荷重の設定
- ④たわみ量の測定
- ⑤氷盤の耐荷力の推定

* 五洋建設(株)

** 学生会員 北海道大学大学院

*** 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)

② K の値の設定

曲げ弾性率と曲げ強度の比 E/σ_f を K とすると、 K の値は氷の強度特性を表すパラメータとして重要である。過去の実験によって海水について K の値は3000程度（サロマ湖等）、多雪地帯における淡水氷は4000程度となっている。また、砕氷船のモデルテストにおける氷盤の K の値は3000とされている。この K の値をその地域にあった適切な値に設定する。

$K = E/\sigma_f$ の値	
桂沢湖等の多雪地帯の淡水氷	→ 4000
サロマ湖、能取湖	
オホーツク海の流水などの海水	→ 3000
雪の少ない地域の淡水氷	
砕氷船のモデルテスト	→ 3000

③ 載荷半径 a 、載荷重 Pa の設定

既知の円形の荷重を作用させる載荷半径は50cmとする。氷盤に作用させる荷重については、たわみ量が測定可能な値を持つように、測定した氷厚により決定する。レベルと標尺を用いて測定可能なたわみ量は0.1cmが限界である。海水及び雪氷に関しては、氷厚が15cm以下の時には100kgの荷重を使用する。この場合には、ソリ（半径50cm程度）に荷重を乗せ、ソリを載荷位置まで移動させて載荷する。氷厚が15cm以上の時には載荷板を作成し、載荷時に、スノーモービルを載荷板上に移動させて載荷する。

④ たわみ量 W の測定

たわみ量の測定は、レベルと標尺を用いて測定を行う。レベルの設置位置に関しては、荷重によるたわみの影響を考慮して、載荷位置から30m以上離れた位置から測定を行う。

⑤ 氷盤の耐荷力 P_{cr} の推定

前述の方法のより一定荷重 Pa を与えたときの氷盤の撓み量 W を測定し、 W/Pa を与えることにより氷盤の特性長 lc および氷盤の円形の等分布荷重による耐荷力 P_{cr} を図より求めることができる。図-1 は W/Pa と lc との関係を示す。図-2 (a) (b) においては、載荷半径を50cm、氷厚が20cm、40cm、60cm、80cmの場合の W/Pa と P_{cr} の関係を示す。 K の値はそれぞれ3000、4000である。

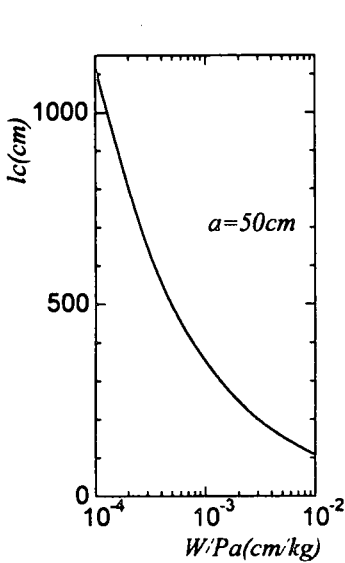


図-1

W/Pa と氷盤の特性長 lc との関係

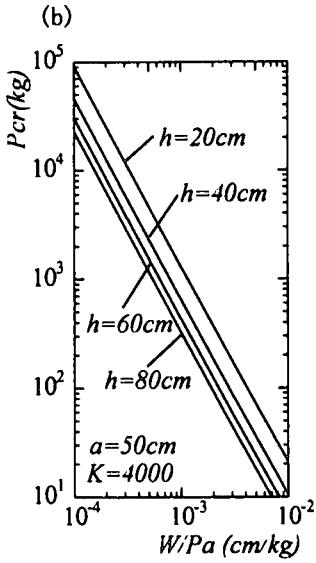
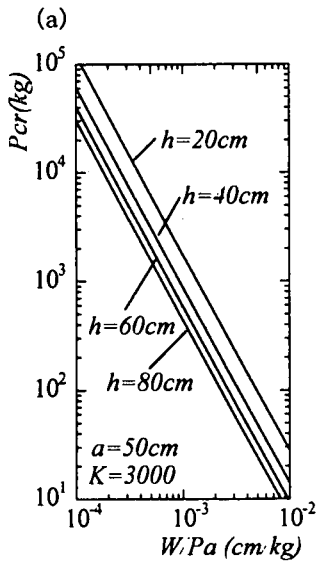


図-2 氷盤の耐荷力の推定図

3. 様々な載荷条件の氷盤の耐荷力の推定

氷盤の耐荷力は載荷条件によって異なる。ここでは、無限氷盤に半径 a の円の等分布荷重を作用させた場合の耐荷力の式を基本として、以下の三つの載荷条件における耐荷力の式との比較を行いその結果を図とともに示す。

- ① 一辺 b の正方形等分布荷重が作用する無限氷盤の耐荷力 P_{crS}
- ② 半径 a_1 の穴の縁に線荷重が作用する無限氷盤の耐荷力 P_{cra}

③半無限氷盤に長さ b_1 の線荷重が作用する耐荷力 P_{cr1}

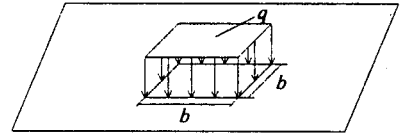
無限氷盤に半径 a の円の等分布荷重を作用させた場合の耐荷力は次の式（１）である。

$$P_{cr} = \frac{\pi \sigma_f \lambda a h^2}{3(1+\nu) \text{kei}'(a/lc)} \left[lc^4 = \frac{D}{w_0} \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \right] \quad (1)$$

3.1 一辺 b の正方形等分布荷重が作用する無限氷盤の耐荷力

一辺 b の正方形の等分布荷重が作用する無限氷盤の耐荷力は、式（２）で表される。

$$P_{crS} = 0.396(1+2.26 \cdot b/lc) \cdot q \cdot h^2 \quad (2)$$



正方形等分布荷重が作用する場合

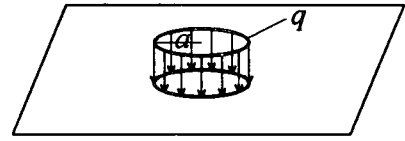
まず円形の等分布荷重を作用させた場合と正方形の等分布荷重が作用させた場合の耐荷力を比較するとき、載荷面積 S が一定となるように、 $S = \pi a^2 = b^2$ とおくと a 、 b はそれぞれ以下のようにになる。

$$a = \sqrt{S/\pi} \quad b = \sqrt{S}$$

この値を式（１）、（２）に代入することによって、無限氷盤に、面積 S の円の等分布荷重を作用させた場合と面積 S の正方形の等分布荷重を作用させた場合の耐荷力の比較ができる。その計算結果を図－３に示す。 $\sqrt{S}/lc < 0.6$ においては二つの耐荷力は同程度であるが、 $0.6 < \sqrt{S}/lc$ で正方形の等分布荷重を作用させた場合の耐荷力の方が小さくなる。

3.2 半径 a_1 の穴の縁に線荷重が作用する無限氷盤の耐荷力

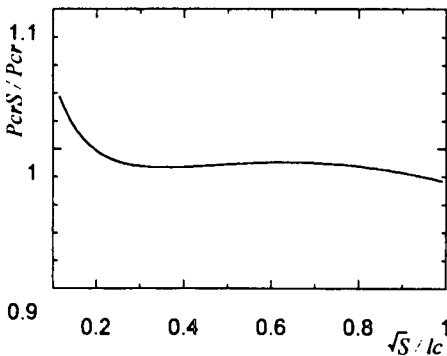
氷盤を魚釣りなどに利用する場合には、アイスオーガーあるいは突き棒などで穴をあけ、その穴を利用して魚釣りをする。そのような場合を考慮して、無限氷盤に半径 a_1 の穴をあけた場合について考え、穴の縁に対しては線荷重として $P/2\pi a_1$ を作用させることとする。ここで $\alpha = a_1/lc$ とすると P_{cra} は α の関数となり耐荷力 P_{cra} は式（３）で表される。



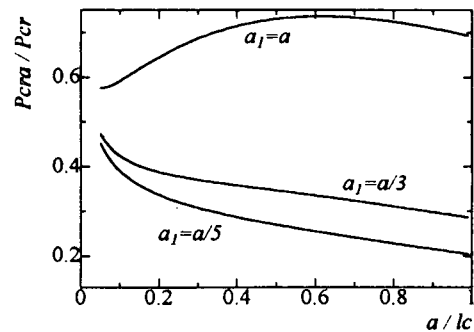
穴の縁に線荷重が作用する場合

$$P_{cra} = \frac{\pi \sigma_f h^2 (\alpha)^2 \{ \text{kei}(\alpha) \text{ker}'(\alpha) - \text{kei}'(\alpha) \text{ker}(\alpha) \} + (1-\nu) \lambda a \{ (\text{ker}'(\alpha))^2 - (\text{kei}'(\alpha))^2 \}}{3(1-\nu^2) \{ \text{kei}(\alpha) \text{kei}'(\alpha) + \text{ker}(\alpha) \text{ker}'(\alpha) \}} \quad (3)$$

穴のない場合についてと穴の縁に線荷重が作用する耐荷力の比 P_{cra}/P_{cr} を求めたものが図－４である。穴の半径 a_1 が a 、 $a/3$ 、 $a/5$ の場合であり、 a をの50cmとするとそれぞれ穴の半径が50cm、16.6cm、10cmの場合であり、魚釣りの際に開けられる穴の大きさとほぼ同じである。 P_{cra}/P_{cr} の値は a/lc により変化する。 $a_1 = a$ の場合、 a/lc が0.6程度のとき P_{cra}/P_{cr} は最大値を示し約72%で、 a/lc が小さいときが約58%となる。以上から、氷盤に穴を開けたときの耐荷力は、穴のない場合の58～72%に低下する。



図－３ 載荷面積 S と耐荷力の比 P_{crS}/P_{cr} の関係

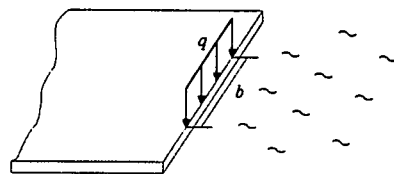


図－４ 耐荷力の比 P_{cra}/P_{cr}

3.3 半無限氷盤に長さ b_l の線荷重が作用する耐荷力

半無限氷盤に長さ b_l の線荷重が作用する耐荷力 P_{crl} はPanfilovにより式(4)が示されている。

$$P_{crl} = 0.160(1 + 2.30 \cdot b_l / lc) \cdot \sigma_f \cdot h^2 \quad (4)$$



半無限氷盤の縁に線荷重が作用する場合

無限氷盤に半径 a の等分布荷重を作用させた場合との耐荷力の比較した図を図-5に示す。このとき線荷重の長さ b_l は a 、 $a/2$ 、 $a/3$ としてあり、 a を50cmとするとそれぞれ50、25、16.6cmである。

無限氷盤に半径 a の等分布荷重を作用させた場合と比べて半無限氷盤に長さ $b_l = a$ の線荷重が作用する耐荷力は約3割程度に減少する。このことは他の載荷条件と比べても非常に弱いことを示している。実際の氷盤の事故を考慮しても、陸上から氷盤上に移るときが最も危険であり、耐荷力の推定にも注意が必要である。また線荷重の長さが短いほど荷重が集中するために氷盤の耐荷力は小さくなる。

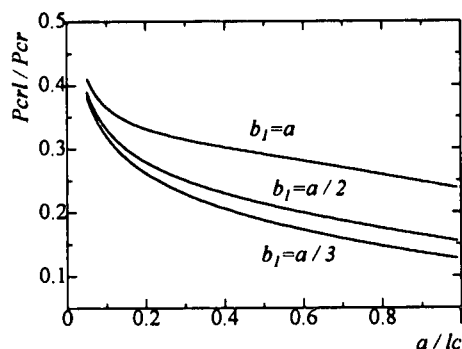


図-5 a / lc と耐荷力の比 P_{crl} / P_{cr} との関係

4. おわりに

既知の荷重を氷盤に作用させた場合のたわみを測定することによって、図-2より W/Pa から円形の等分布荷重における耐荷力である P_{cr} を推定することが可能となった。また既知荷重 Pa を作用させた載荷半径 a 、そのたわみより求められる氷盤の特性長 lc 、半径 a の等分布荷重の耐荷力の推定図である図-2を用いて、正方形等分布荷重が作用するときの耐荷力 P_{crS} 、穴の縁に線荷重が作用するときの耐荷力 P_{cra} 、半無限氷盤の縁に線荷重が作用するときの耐荷力 P_{crl} はそれぞれ図-3、4、5より円形の等分布荷重の耐荷力との比較から推定できるようになった。特に氷盤に穴を開ける場合、氷盤の縁に荷重が作用する場合は、氷盤上を利用する上で最も危険な状況であり、そのことによる氷盤の耐荷力の低下を十分に把握しておかなければならない。

参考文献

- 1) Kerr A.D. : The bearing capacity of floating ice plate subjected to static or quasi-static loads, Journal of Glaciology, Vol 17, No. 76, p 229 - 268, 1976
- 2) 佐々木等 : 浮氷盤上における交通の安全性について、寒地技術シンポジウム86'、p.192-200、1986
- 3) 北条、原、佐伯 : 浮氷盤の利用と課題、寒地技術シンポジウム92'、p406-412、1992
- 4) 大久保、木岡等 : 結氷盤の利用と安全に関する研究、寒地技術シンポジウム94'、p.471-476、1994