

浮氷盤の利用と氷盤耐荷力増加に関する研究

Study on the Utilization of Floating Ice and the Increase in Bearing Capacity of Floating Ice

岡本 智*・原 文宏**・石井千万太郎***

Satoshi Okamoto, Fumihiro Hara, Chimatarou Ishii

山下 俊彦****・佐伯 浩****

Toshihiko Yamashita Hiroshi Saeki

Positive Utilization of floating ice is recommended for the construction of marine structures in the oceans of polar and subpolar regions.

In this study, the main subject is to systematize the utilization methods of floating ice in the marine construction of sea areas with ice. In addition, with respect to short-time loading, we report on results of systematic experiments on the improvements of bearing capacity and safety as a traffic road when geotextile is applied, and with respect to long-time loading, we discuss the use of air mats to prevent ice deflection and flooding due to such deflection.

keywords: Floating Ice, Utilization of Ice sheet, Geotextile, Bearing capacity

1. はじめに

極地や亜極地の海洋における海洋構造物等の建設においては、浮氷盤を積極的に利用することが望ましい。実際にカナダの北極諸島では、浮氷盤の上にポンプアップした海水を散水して人工的に氷厚を増加させて人工氷床を作り、石油掘削のプラットフォームとして利用している例がある。このような、浮氷盤の利用方法としては以下の項目が考えられる。

- ①人工的に氷厚を増加させ、浮力を増大させ人工氷床として石油掘削等の作業基地としての利用。
- ②海洋工事にかかわる資材の集積場としてや、資材・人員輸送用のヘリポートとしての利用。
- ③資材運搬のための交通路としてや航空機の滑走路としての利用。

本研究は主に、氷海域における海洋工事に伴う浮氷盤の利用方法を体系化するとともに、上述した項目③の短期載荷については、ジオテキスタイルを用いた氷盤の耐荷力の向上と交通路としての安全性向上に関する系統的な実験結果を報告するとともに、②の長期載荷に対しては、氷盤のたわみとそれによるFlooding防止のためにエアマットの利用方法について述べる。

2. 浮氷盤の利用形態

浮氷盤の利用方法としては、表-1に示すように、利用目的別に大きく3つに大別される。具体的には、人工氷床としての利用、建設資材ヤードとしての利用、交通路としての利用である。

北極海等の冬期間結氷する海域における石油の探査において、浮氷盤に掘削リグを設置することがある。北極海に面したカナダの北極諸島近海では、石油の探査が活発に行われているが、そこでは図-1に示すように浮氷盤がアイスプラットフォームとして用いられている。

アイスプラットフォームは、長期載荷となるため浮氷盤がクリープ変形を起こす。その対策として図-1のように掘削リグ設置位置の浮氷盤に孔を開け、そこからポンプで海水を汲み上げスプリンクラーで浮氷盤上に海水

表-1 浮氷盤の利用形態

利用目的	利用方法	検討項目	荷重条件
人工氷床としての利用	Ice platform	沈下 たわみ 耐荷力 浮力	長期載荷 大荷重 振動
建設資材ヤードとしての利用	建設機械の設置 建設資材ヤード 資材運搬用 ヘリポート	沈下 たわみ 耐荷力 浮力	長期載荷 大荷重 振動
交通路としての利用	運送路 Ice Bridge 滑走路	たわみ 浮力 耐荷力 共振	短期荷重 移動荷重 大荷重

* 正会員 東亜建設工業

** 正会員 北海道大学大学院

*** 正会員 秋田大学工学部

**** 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)

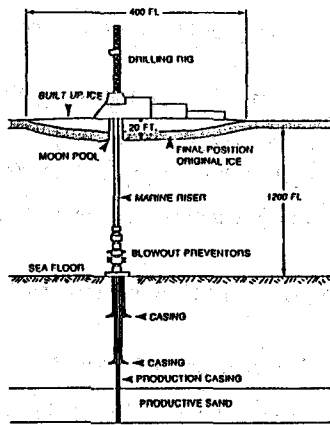


図-1 アイスプラットホーム

を敷き、凍結を促進し氷厚を増し浮力を増加させることによってクリープ変形を小さくしている。

浮氷盤は建設機械の足場としても利用されてきた。冬期結氷した氷盤上に通常は陸上で用いられる建設機械を氷盤上に設置し、施工の効率化と経費の節減を図っている。我が国でも、網走市の鱒浦漁港の鋼矢板施工に際して杭打機が浮氷盤上から打設した他、河川工事でも同様の施工実績を有している。また、シベリヤの湿地帯では、夏期は重機の移動が不可能な所が多い。そのため冬期の氷盤を利用した施工が活発に行われている。

以上述べてきた2通りの利用方法は、浮氷盤を支持材として利用している。この場合、大きな上載荷重を同一の場所に比較的長期間にわたって載荷されることとなる。また、建設機械や石油掘削リグの場合は荷重と同時に振動の影響も浮氷盤に受けることになる。したがって、浮氷盤を支持材として利用する場合には、浮氷盤全体の浮力の確認、浮氷盤の短期・長期荷重に対する耐荷力と浮氷盤のたわみ量の推定、

及び浮氷盤中への沈下量の予測が必要となる。この他、浮氷盤が振動を受けることから氷盤の疲労現象の解明も必要となる。

次に浮氷盤を通行・運搬に利用する例としては、アイスブリッジ、滑走路及び氷上軌道がある。アイスブリッジの例としては、サロマ湖において、戦前は木材を満載したトラックがサロマ湖の氷上を横断したことが知られている。北米やシベリヤでは、現在も冬期に結氷した河川を交通路として利用している。また、氷上軌道については、戦前に南滿洲鉄道側の久保義光等が中心となって、松花江を利用して大規模な氷上軌道の実物実験を行っている。

滑走路としての利用は、北極海や南極の海水氷盤を滑走路として利用して研究調査のための物資や人員の輸送に利用している。また、旧ソ連の人工衛星コスモス954がカナダに落下し、それに小型の原子力発電機が用いられていたことから、カナダ政府は捜索活動を行った。その時“コスモス湖”（人工衛星にちなんで名付けられた）の結氷した湖上を大型輸送機のC-130ハーキュリーズ（全重量59トン）用の滑走路として利用した例がある。

以上述べたように浮氷盤を通行、運搬のために利用する場合の荷重条件は、載荷荷重が大きくて、移動荷重であることが特徴である。また、検討項目としては浮氷盤の全浮力、氷盤の耐荷力それに移動荷重による氷盤と下部流体の連成振動があげられる。上述した結果をまとめると、浮氷盤を利用するためには、長期載荷、短期載荷に対する浮氷盤の耐荷力、移動荷重に対する氷盤の振動問題の解明が必要となる。

3. ジオテキスタイルによる氷盤の補強とエアマットを利用した変形防止対策

前節で浮氷盤の利用形態について述べたが、利用にあたっての安全対策や事故防止対策が課題となる。わが国においても主に結氷した河川や湖沼で浮氷盤での事故が数多く報告されている。事故の内容は浮氷盤上で遊んでいた幼児やわかさぎ釣りをしにきた人が氷盤が割れて水死する事故や氷上を走行中にスノーモービルや自動車在水中に転落したケースもある。このような事故は外気温の上昇による氷盤強度の低下や氷盤内にクラックが発生し耐荷力が減少するときに発生する場合が多い。

一般に結氷した水域では、岸の近くで氷盤が曲げ破壊し、クラックが発生している。また、氷温の急激な変化による熱膨張や収縮によってクラックが入る。特に、海岸においては潮位変化によって同様のクラックが発生する。このようなクラックが発生していると、その近くの荷重に対しては氷盤エッジ部の耐荷力となり、耐荷力が小さく危険である。

浮氷盤を利用するにあたって、このようなクラックの発生があらかじめ予想される場合には、結氷前に補強材を浸しておき、結氷後の強度増加を図ることが対策の一つとして考えられる。

本研究は、氷盤の補強材としてジオテキスタイルを用い、その補強法に関する基礎的な実験を行った。ジオテキスタイルを補強材として採用したのは氷の補強ばかりでなく、氷が割れても人や物が水中に転落することの防止にも役立ち、安全対策の面からも有効であると考えたからである。

(1) 実験の概要

ジオテキスタイルで補強した氷盤の耐荷力とその破壊挙動を調べるために、今回の実験ではジオテキスタイルを補強材として用いた氷の桁を作製し、曲げ破壊試験を行って曲げ強度、耐荷力について検討するとともに、桁

の破壊の挙動について詳しく観察した。

1) 供試体

供試体の作製は北大工学部開発科学実験所内の低温室で行った。供試体は図-2に示すような供試体を作製した。補強材を水中に浸した状態で凍結させ、その後、偏心荷重を生じさせないため、上、下面が平行になるように表面をかんんで仕上げた。供試体の寸法は、スパン $L=60\text{cm}$ 、幅 $B=約10\text{cm}$ 、桁高 $h=約12\text{cm}$ 。上端から補強材の位置までの距離を h' (cm)とし、 h' を変化させた供試体を用意した。

用いたジオテキスタイルはテンサーSS2というタイプのものである。強度特性は、

引張強度 $\sigma_s=964\text{ (kg/cm}^2\text{)}$ 弾性率 $E=48000\text{ (kg/cm}^2\text{)}$

となっている。また、テンサーの材質はポリプロピレンである。

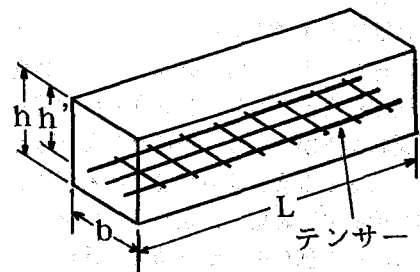


図-2 供試体の形状

2) 実験条件

実験には淡水氷を用いた。淡水氷を使用したのは、破壊の状況や内部のクラックの発生状況が観察しやすいためである。氷（海水、淡水氷）の曲げ強度は氷温、応力速度、歪速度に依存することが過去の佐伯等、平山等の研究で明らかになっており、曲げ強度は歪速度 $\dot{\epsilon}=10^{-3}\text{ (1/sec)}$ の近傍でピークをとり、氷温の低下にともない増加することがわかっている。今回の実験で歪速度は曲げ強度がピークをとる $\dot{\epsilon}=4.2\times10^{-4}\sim1.4\times10^{-3}\text{ (1/sec)}$ の範囲、氷温については $T=-3^\circ\text{C}$ と -10°C の2種類で行った。また、試験方法は単純桁の中央に集中荷重を載荷する方法を用いた。

実験は基準となる補強していない供試体が $T=-3^\circ\text{C}$ 、 -10°C ともに7本ずつ、補強した供試体は各温度20本余り実験を行った。供試体に含まれるテンサーであるがストランド3本分、断面積にして $A=0.204\text{ (cm}^2\text{)}$ である。今回の実験では破壊時の荷重、たわみ量をロードセル、ダイヤルゲージで測定するとともに、その時の破壊の状況をカメラ、ビデオカメラで撮影し、また、目視による観察も同時に行った。

(2) 実験結果と考察

1) 耐荷力、たわみ量と破壊の形態について

図-3はテンサーで補強した供試体の曲げ試験を行った際の載荷点のたわみ量 $\delta\text{ (mm)}$ とその時の荷重 $P\text{ (kgf)}$ の関係であり、図-4はそれに対応した典型的な破壊の状況である。

補強していない供試体の破壊時の荷重の様子は図-3の一番下の直線で示されている部分であり、初期の破壊後は荷重を支持することができない。

大半の供試体は図-3の真中の線で示されるような破壊をしていたが、上側の線で示されるような破壊（初期の破壊より2次、3次的な破壊の方が耐荷力大きい）もみられた。これは氷温が -10°C でテンサーが下にある場合（圧縮側の断面が大きい）に見ら

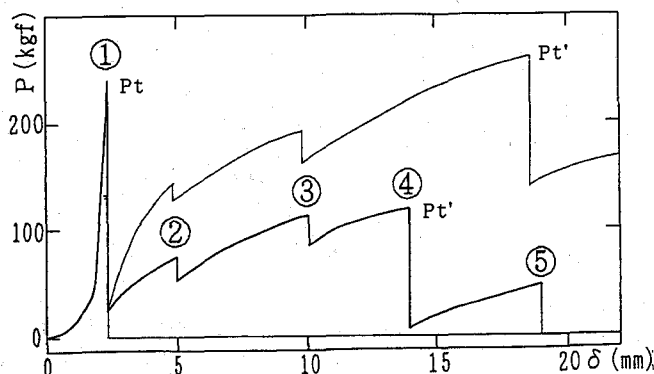


図-3 破壊時のたわみ量と荷重の関係

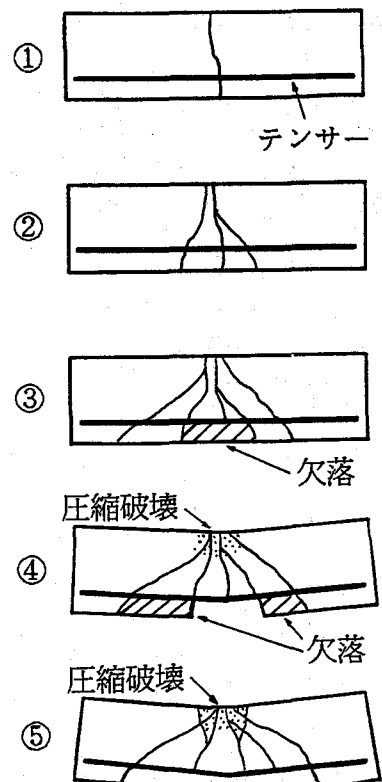


図-4 破壊の形状

れた。引張応力についてはセンサーが受け持つがセンサーが降伏することは今回の場合なく、最終的な破壊は圧縮断面で起こっているために氷の一軸圧縮強度が非常に重要となってくる。氷の一軸圧縮強度は氷温に強く依存し、氷温が低くなるにつれ増加することから、このようなケースが見られたと思われる。

図-4は破壊の状態である。載荷後、供試体にクラックが入り、初期の荷重のピークを迎える。これが①の状態である。通常、氷だけで、補強していない場合にはこの時に桁は荷重を支持できなくなってしまう。②はさらに載荷を続けた場合であり、センサーの付着によるせん断力でひび割れが入った状況である。その後、さらにせん断ひび割れが広がり、5mm程度たわんだ時点で③のような状態になって、センサーより下側の斜線部分の氷が欠落した。④はその後、4mm程度たわんだ状態で、この時中立軸より上

側の断面で圧縮応力により氷が圧縮破壊を起こした。⑤は最終的な段階で、圧縮側の断面がさらに圧縮破壊を起こし、その部分の氷が欠落し、荷重を支持することができなくなった状態である。この時のたわみ量が19mm程度であった。

2) 補強材の位置と耐荷力についての検討

図-2に示すようにセンサーで補強した場合の初期の破壊時の荷重(耐荷力)を P_t 、初期の破壊後の破壊における荷重(耐荷力)のピーク値を P_t' 、その時の見かけ上の曲げ強度を σ_{ft}' 、また、各供試体の補強していないと仮定した時の初期の耐荷力を補強していない供試体の曲げ強度から温度ごとに計算した値を P とする。

図-5は (h'/h) と (P_t/P) の関係である。この図から氷温、 (h'/h) に関わらず、 (P_t/P) は1の近傍の値をとっており、補強した効果は見られない。センサーの弾性率と氷の弾性率との比 n が $n=2\sim3$ 程度であることと、センサーの断面積が氷の断面積に比べて非常に小さい(0.2%程度)であったことによるとと思われる。本実験結果は氷の曲げ強度のばらつきの範囲内と考えられ、センサーによる補強は初期の耐荷力にはほとんど効果がないと言える。

図-6は (h'/h) と (P_t'/P_t) の関係である。この図から初期の破壊時の耐荷力に比べて、初期の破壊後の耐荷力は小さいが (h'/h) が増加する、すなわち補強材の位置が下であればあるほど初期の破壊後の耐荷力 P_t' は大きくなり、氷温によらず、その傾向が見られる。

図-7は (h'/h) と (P_t'/P) の関係である。縦軸は初期の破壊後の耐荷力と補強していない氷の耐荷力の比であり、図-6と同様 (h'/h) の増加にともない初期の破壊後の耐荷力は増加していることがわかる。

以上のことをまとめると、補強材の水換算断面積が非常に小さい場合は氷盤を補強することによって、初期の

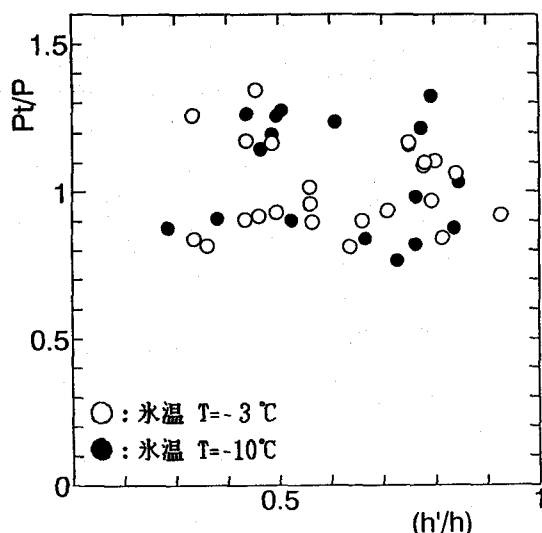


図-5 (P_t/P) と (h'/h) の関係

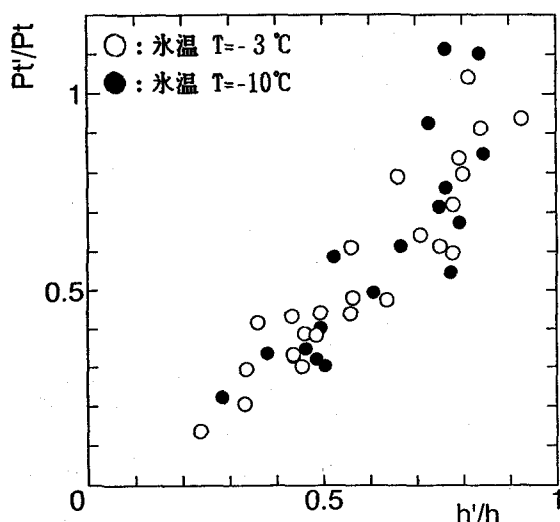


図-6 (h'/h) と (P_t'/P_t) の関係

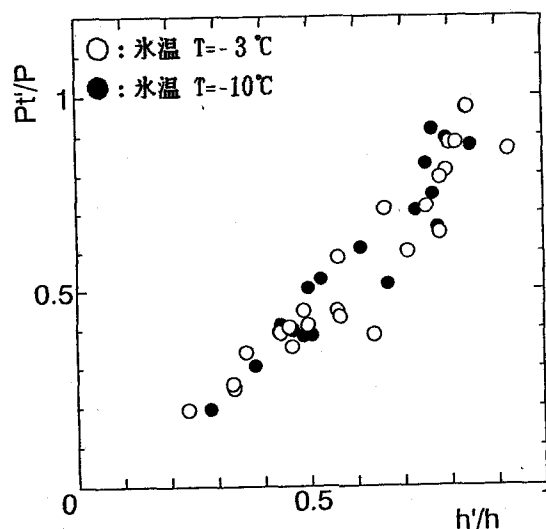


図-7 (h'/h) と (P_t'/P) の関係

破壊時の耐荷力にはほとんど影響を与えないが、初期の破壊後の耐荷力には効果があり安全性を高めることになる。また、補強材の位置が下であればあるほどその効果は大きいことがわかった。

3) 初期破壊後の耐荷力についての検討

図-8は (Tt'/Tt) と (Pt'/Pt) の関係である。 Tt' は初期破壊後の破壊における耐荷力のピーク値の時間で Tt は初期破壊時の時間を示す。

耐荷力と時間の関係においては、初期破壊から時間が経つほど、以後の耐荷力が高く出る傾向が若干見えるが明瞭ではない。また、図-10は (Pt'/Pt) と To の関係である。 To は、氷盤が荷重を支持することが出来なくなった時間である。明瞭ではなかったが、40秒以下で耐荷力がゼロになった供試体に、初期破壊後の耐荷力のピーク値が高い傾向がある。

ほぼ全ての供試体が耐荷力がゼロになるまでに最低でも20秒かかっていることから、仮に人間が氷盤に乗っていて破壊が起きたとしても、避難する時間は十分にあると思われる。

4) エアマットを利用した氷盤の変形防止対策

次に、アイスプラットホームや建設資材ヤードとしての利用のように長期荷重の場合の氷盤耐荷力とその変形防止対策について述べる。運搬路としての利用のような短期的な荷重の場合の氷盤は、弾性体と考えて耐荷力を検討することができるが、氷盤上に長期間荷重するような場合には、浮氷盤のクリープ変形と氷盤の粘弾性的力学特性を考慮して検討する必要がある。

一般に氷盤上の同一地点に長期間荷重を載荷すると、クリープ変形による氷盤のたわみが徐々に進行し、ついには破壊にいたる。その対策として、アイスプラットホームでは、海水を汲み上げ散水することによって氷厚を増加させ、浮力を大きくすることによってクリープ変形をおさえているが、作業時間がかかる上に、かなりの設備を必要とする。

もう少し簡便にかつあまり設備を必要としない方法としてエアマットによる方法を図-10に示す。氷盤に穴を開けそこから袋状になったエアマットを氷盤下面に設置し、ポンプを使ってエアマット内に空気を入れ、その浮力によって氷盤の変形を防止する方法である。

エアマットの規模は荷重するものの重量と氷盤厚から算出することは可能である。

ただし、氷が粘弾性体のため、荷重がかかっている直下の氷盤が側方に流動し、時間の経過とともに荷重直下の氷盤が薄くなることから、荷重物の設置面積を広くとり、荷重分散を行うなどのことも検討する必要がある。

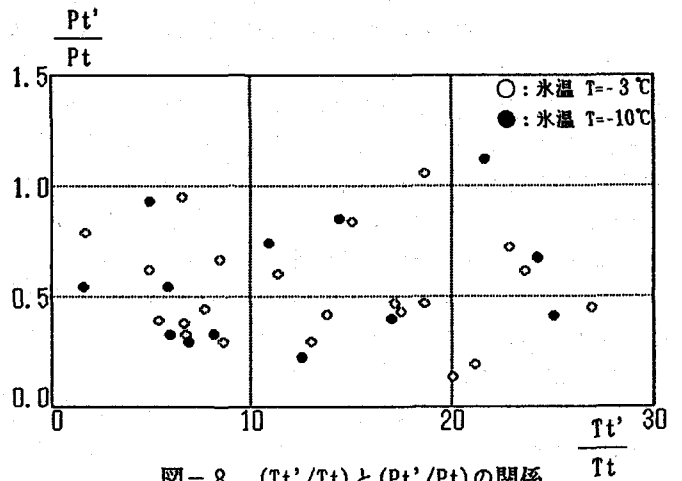
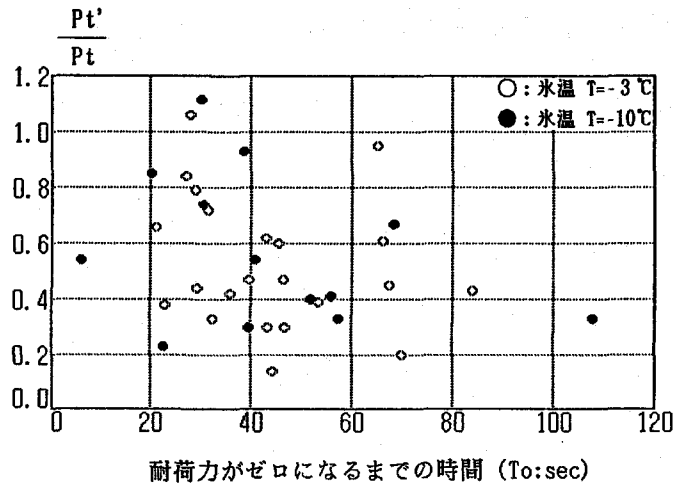


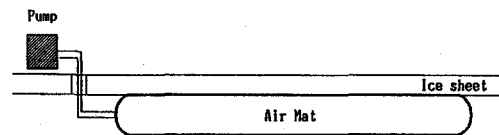
図-8 (Tt'/Tt) と (Pt'/Pt) の関係



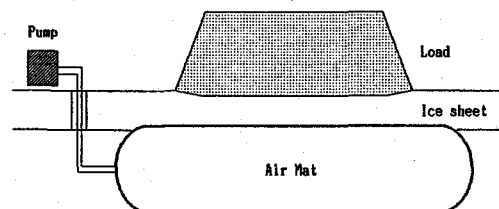
耐荷力がゼロになるまでの時間 (To :sec)

図-9 (Pt'/Pt) と To の関係

①所定の場所の氷盤下面に Air Mat を設置する。



②所定の氷厚が得られた時点で、荷重（建設機械や資材等）を載荷する。



③作業終了後、Air Mat 上面と氷盤を分離するために温風を循環させながら徐々に空気を抜き、開口部から回収する。

図-10 エアマットによる氷盤の変形防止対策

4. 結 論

- (1) 浮氷盤の利用にあたっては、荷重条件によって沈下、たわみ、耐荷力、浮力、共振などについて検討する必要がある、気象条件や現場条件によっては、氷盤の補強やたわみ防止対策を行う必要がある。
- (2) テンサーで補強した供試体は、初期の破壊後も荷重を支持し、たわみ量が2～4 cm程度、時間にして30～50秒間荷重を支持した。
- (3) 破壊の形態は、初期の破壊後の断続的な破壊はテンサーと氷の付着によるせん断力による破壊、最終的には圧縮断面の氷が曲げ圧縮応力による破壊をおこし、荷重を支持できなくなった。
- (4) 大半の供試体は、初期の破壊時の耐荷力(P_t)に比べて、初期の破壊後の耐荷力(P_t')の方が小さいが、逆の場合も見られ、これは氷温が低く、補強材の位置が下である(h'/h が大きい) 場合に見られた。
- (5) 今回のように補強材の氷換算断面積が非常に小さい場合は、補強した初期の破壊時の耐荷力は補強していない場合とほとんど変わらず、氷の曲げ強度のばらつきの範囲内であり、補強の効果は見られない。
- (6) 初期の破壊後の見かけ上の曲げ強度のピーク値は(h'/h)の増加にともない直線的に増加しているが、氷温に対する依存性は見られない。
- (7) 補強することにより、初期の破壊時の耐荷力、補強していない場合の耐荷力に対して、初期の破壊後の耐荷力は小さいが、(h'/h)の増加にともない直線的に増加する。言い換えれば、テンサーで補強することは、初期の破壊後の耐荷力には効果があり、補強材の位置が下であるほど、その効果は大きい。
- (8) 補強材の氷換算断面積が非常に小さい場合は、補強したことによる曲げ弾性率の増加はほとんど見られなかった。
- (9) エアマットを利用したたわみ防止対策はクリープ変形をおさえるため有効な手段であり、現在、細部構造の検討を行っている。

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, Vol 17, No. 76, pp229-268, 1976
- 2) Nevel D.E.: Moving loads on a floating icesheet, CRREL Res. Rep. 261, 1975
- 3) Saeki, H., Ozaki, A., and Y. Kubo: Experimental study on flexural strength and elastic modulus of sea ice Proc. of 6th Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. Under arctic condition, Vol 1, pp536-547, 1981
- 4) Assur, A.: Traffic over frozen or crusted surfaces, Proc. of 1st Intern. Conf. Mechanics of Soil Vehicle Systems., pp913-923, 1961
- 5) 久保義光: 氷工学序説
- 6) 滝沢孝俊: 水に浮いた氷盤の運動荷重による変形, 寒地技術シンポジウム, pp133-137, 1985
- 7) Beltaos, S.: Field Studies on the Response of Floating Ice Sheets to Moving Loads, Proc. of Workshop on the Bearing Capacity of Ice Covers, pp1-13, 1979
- 8) McCutcheon, Lt.D.: Use of Ice Cover as an Airstrip in the Thelon River Valley by the Canadian Armed Forces, Proc. of Workshop on the Bearing Capacity of Ice Cover, pp224-231, 1979
- 9) McCutcheon, Lt.D.: Use of Ice as structural Support in the Construction of the Eagle River Bridge, Proc. of Workshop on the Bearing Capacity of Ice Covers, pp232-237, 1979
- 10) 北条紘次, 小浜 等, 折谷徳弘, 佐伯 浩, 渡辺一男: 貯水池の結氷に関する研究—桂沢ダム貯水池—, 第6回寒地技術シンポジウム講演論文集, pp239-243, 1990
- 11) Saeki, H., S. Saito, K. Hamanaka and A. Ozaki: Experimental Study on the Testing Methods of Strength and Mechanical Properties for Sea Ice, Proc. of 4th IAHR Symposium on Ice, part 1, pp135-149, 1978
- 12) 高橋陽一, 寺島貴志, 折谷徳弘, 中沢直樹, 佐伯 浩: 淡水氷の強度について, 第7回寒地技術シンポジウム講演論文集, pp579-585, 1991