

氷盤貫入試験における氷の破壊特性について

パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 中 澤 直 樹
USA CRELL Devinder S. Sodhi

1. 緒 言

耐氷構造物を設計する場合、氷盤の移動により構造物に作用する水平氷力が最も卓越した設計外力となる。中でも氷盤が非常に大きく、氷盤に作用する海流や風による環境力が、氷盤に構造物が貫入する時の破壊力を越えるような場合、構造物に衝突した氷盤は氷の破壊と移動を繰り返しながら構造物を通過して行く。この場合、構造物は氷盤から連続的な水平力を受けるため変形し、その繰り返しで振動を起こすことになる。このような氷と構造物の相互作用を明らかにし、構造物の設計に応用するためには氷の破壊特性が明らかにされなければならない。

著者等は固定された浮き淡水氷盤に鉛直で平面形の鋼製のインデントー（貫入機）を一定速度で貫入させ、氷の破壊特性及び氷盤破壊時の構造物の挙動について詳細な実験を行った。

2. 実験項目及び実験装置

氷盤が構造物に衝突し貫入する時の氷の破壊特性を明らかにするために、以下に示す項目の観察及び測定を行った。

- ①氷盤のマイクロクラック発生から破壊までの過程の記録。
- ②Acoustic Emission(A.E.) によるマイクロクラックの発生の記録。
- ③インデントーを氷盤に貫入させることによりインデントーに作用する氷力の測定。
- ④インデントー前方の氷盤上にDisplacement Transducer を設置することによるインデントーの変位及び氷盤破壊時のインデントーの挙動の観察。

実験は米国寒冷地理工学研究所の長さ34m、幅 9mの氷海水槽で行われた。図-1 に実験装置を示す。インデントーはStructural Supportに取付けられ、このSupport はHigh Force Module(H.F.M.) に取付けられている。インデントーの移動速度及び移動距離はH.F.M.と氷盤上に設置されたDisplacement Transducer により計測された。これにより、Carriageの変位とインデントーの氷盤に対する相対変位が記録された。

氷盤とインデントーの接触により発生するマイクロクラックの発生からその伝播、そして氷盤の破壊までの過程はカメラ及びビデオで記録された。更に、A.E.をインデントーの前方 1m程の氷盤の中に埋め込むことによりマイクロクラックの伝播と氷盤の破壊の関係をモニターした。

氷力は、図-2 に示すようにインデントーの背面に取付けられた3個のロードセルにより計測された。この氷力の測定法によりStructural Supportの振動に影響されない氷力を計測することが可能となった(Sodhi and Nakazawa, 1988; Nakazawa, 1989)。インデントーの幅は50, 100, 150mmである。貫入速度は 1mm/secから9mm/sec、氷厚は30mmから60mmまで変化させた。

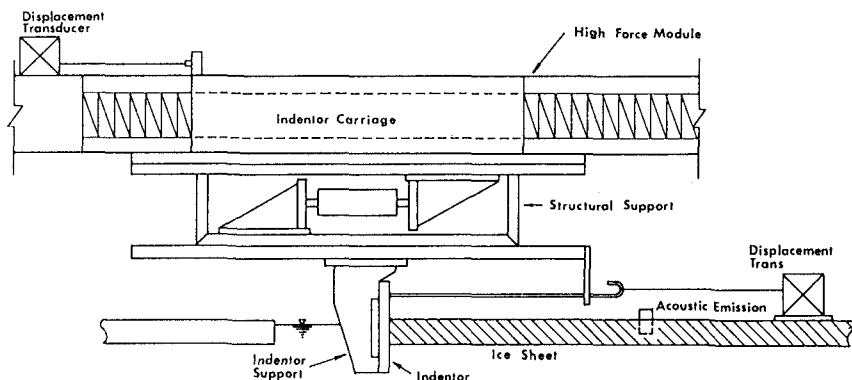


図-1 実験装置

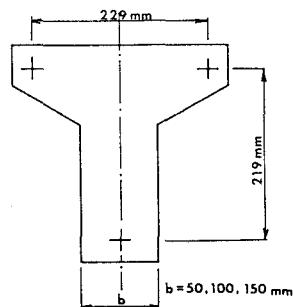


図-2 貫入盤とロードセルの位置

3. 実験手順

水槽の水盤が予定の厚さになった時点で、水盤の中央に荷重を置き、水盤の鉛直変位を測定することにより、水盤のヤング係数を算出する。次にチェーンソーで水盤に貫入装置が移動できる幅の水路を作り、実験地点までインデントーを移動する。実験はクラックのない水盤を選んで行われた。インデントー前方 70cm 程の水盤にドリルで 1cm 深の穴をあけ A. E. を設置する。Displacement Transducer をインデントー前方 150cm 程の所に設置し、インデントーの前面に連結させる。これらの準備の後、実験が行われた。

実験は、水路に沿って数回行われた。貫入試験は 1 地点の水に対して 2 回行われた。すなわち、最初の貫入はマイクロクラックのない水盤に対して行われ、一旦、貫入を止めた後その延長上で貫入を再開し実験を行った。氷海水槽における 1 つの水盤で通常 9 回の貫入試験が行われ、それらはカメラ及びビデオで記録された。貫入試験は合計約 100 回行われた。水温は実験を通して -1°C である。

4. 実験結果

4. 1 マイクロクラックの発生と氷盤の破壊

本実験では、インデントーと氷盤の接触から破壊に至るまで、氷のマイクロクラックの伝播が注意深く観察された。

インデントーと氷盤が接触するとすぐインデントー前面にマイクロクラックが発生する。インデントーによる荷重が大きくなるにつれ、マイクロクラックはインデントー前面で密になり、広がりを増して行く。マイクロクラックの広がりとともに、インデントーの前方に radial crack が発生する。その後もマイクロクラックは増加を続け、インデントー前面の氷はマイクロクラックにより、ミルク色になり、広がりの方に行くにつれてその密度は薄くなる。

氷はインデントーの荷重の増加により時間とともに変形量を増し、ついには破壊に至るのであるが歪速度 ($\dot{\epsilon} = v/d$, v : 貫入速度、 d : インデントーの幅) が $\dot{\epsilon} > 1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ ではぜい性破壊、 $\dot{\epsilon} < 5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ では延性破壊の破壊形態を示した。ぜい性破壊ではインデントーはマイクロクラックの発生により強度の弱くなった氷を前方にはじき飛ばしながら断続的に進む。この際、断続的な破壊の前にはインデントー前方の氷にマイクロクラックが発生し、それを破壊して前方に進んではマイクロクラックを発生させるという動作を繰り返す。延性破壊ではこのようなインデントーの断続的な前進はみられず、氷力もなだらかな増加・減少となる。破壊された氷の観察により、マイクロクラックは氷の結晶間に発生していることが確認された。

マイクロクラックと Acoustic Emission Signal (A. E. Signal) の関係を図-3 (a), (b) に示す。(a) は歪速度 $2.5 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ のぜい性破壊の場合であるが、氷力の増加とともに A. E. の反応は激しくなり、その累積も氷盤が破壊に至るまで増加する。一方 (b) の歪速度が $2.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ の場合は、氷力の増加とともに A. E. Signal の累積も増加し、氷力がピークの値を示した後も A. E. は反応し続けている。これはなだらかな氷力の増加と減少を示す延性破壊の性状を示している。

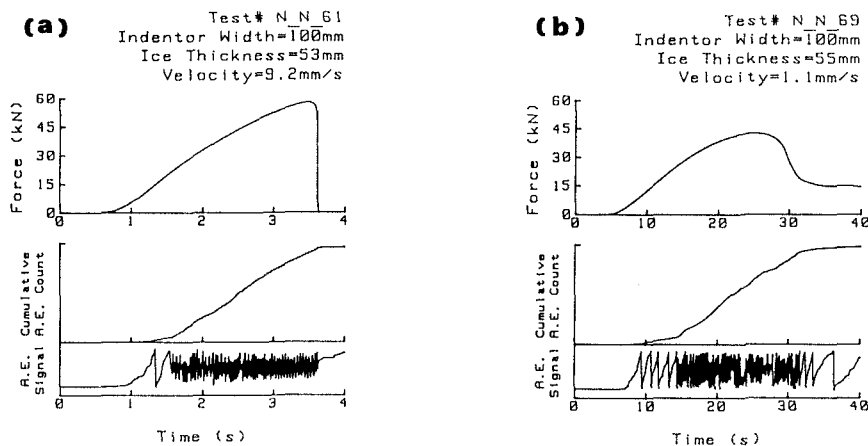


図-3 A. E. Signal と氷力の関係

4. 2 貫入速度と氷の破壊形態

氷は粘弾性物質であるため、その強度は歪速度に影響される。

図-4に貫入速度と破壊形式の関係を示す。貫入速度が9.4mm/sの場合は氷力の急上昇の後、氷の破壊により氷力が零に戻るという、ぜい性破壊を繰り返しながらインデントアが氷盤に貫入して行くのに対し、貫入速度が小さくなるにつれ破壊の周期は減少し、貫入速度が2.2mm/s以下では氷力が緩やかに上昇し、ピークの値を示した後も零に戻ることがない。

図-5に氷力とインデントアの変位（移動距離）の関係を示す。図中の上位5つの記録は貫入速度が9.3mm/sから1.2mm/sの、インデントアと氷盤の接触から移動距離40mmまでの記録であるが、最下端の図はそれら5つの記録を1つにプロットしたものである。ぜい性破壊の貫入速度の範囲では最初の破壊の後、インデントアが前進し、2回目のピークへの立ち上がり地点は貫入速度に関わりなく氷盤のほぼ同じ地点である。これは、貫入速度が違っていても最初の貫入によりダメージを受ける氷の範囲はほぼ同程度であることを示している。

4. 3 氷盤の破壊エネルギー

本実験では、氷盤上にDisplacement Transducerを設置し、インデントアの氷盤に対する変位を測定したため、氷力とこの変位の積を積分することにより、氷盤の破壊に費やされたエネルギーを算出することが可能となった。図-6は氷力の最初のピークまでの氷盤に費やされたエネルギーを貫入速度別に示したものである。貫入速度の違いによるエネルギーの違いは見られず、200Jの近傍を示している。他の氷厚、インデントア幅の実験においても同様の傾向が見られた。これより、例えば構造物に衝突する氷盤の速度が異なっても、他の条件が同じであれば氷を破壊するために必要なエネルギーはほぼ同じであるということがわかる。つまり、氷盤に作用する風や海流等による環境力が大きく、移動氷盤のもつエネルギーが氷盤破壊のためのエネルギーをはるかに越えた時でも、構造物に作用する氷力は、氷盤破壊に必要なエネルギー以上にはならないことを示している。

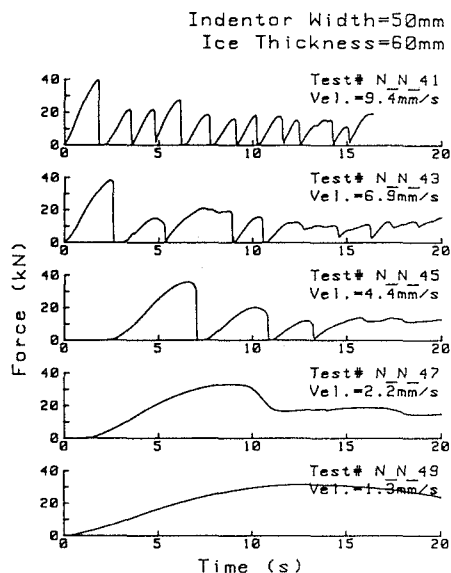


図-4 破壊形式と貫入速度の関係

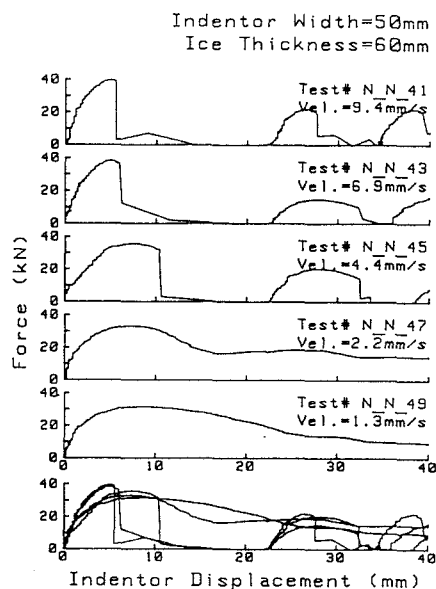


図-5 氷盤の破壊とインデントアの移動距離の関係

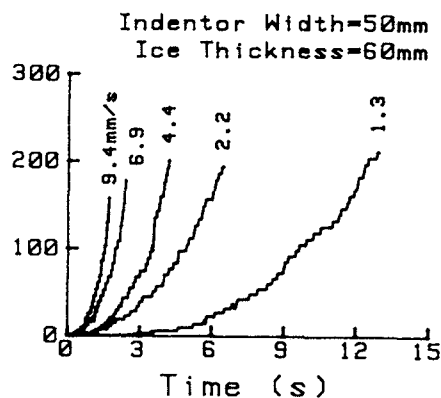


図-6 氷盤破壊に必要なエネルギーと貫入速度の関係

4. 4 氷圧力と接触面積の関係

過去の多くの貫入試験の結果より、アスペクト比 (d/h , d :インデンターの幅、 h :氷厚) 又は氷とインデンターの接触面積 ($d \times h$) が増加する程、最大氷圧力は減少することが知られている。図-7は最大氷圧力とアスペクト比の関係を示したものである (Timco, 1986)。アスペクト比の増加とともに最大氷圧力は対数的に低下している。本実験結果も、Timcoが得た $P_{max} = 8.9(d/h)^{-0.39}$ によく一致していることが示された。

4. 5 氷力の中心位置

本実験ではインデンターの背面に直接ロードセルを3個設置したことにより、氷とインデンターの接触から氷の破壊に至るまでの接触面内における氷力の中心位置の動きをモニターすることが可能となった。図-8に接触面における15kN以上の氷力の中心位置を“X”印で示す。15kN以上の氷力の中心位置は接触面のほぼ中央に位置していることがわかる。コンピューター画面によるとインデンターと氷盤の接触開始時は、必ずしも中央に位置していない氷力の作用中心も氷力が増大するにつれ、中央に近づいて来る。そして、ある氷力以上から破壊に至るまで作用中心はほぼ中央に位置する。しかし、氷の破壊によりインデンターが前進し、次の氷との接触時には作用中心は接触幅の中央には位置せず、前述のように氷力の増加と共に中央に移動するという過程を繰り返す。

4. 6 ピーク時の氷力

本実験では1つの実験地点において、同じ貫入速度で2回の貫入が行われた。最初はクラックのない (undamaged) 氷に対して貫入が行われ、一旦インデンターを止めた後、その場所から再度貫入を行った。これはクラックのない (undamaged) 氷と既にクラックのある (damaged) 氷による氷力を比較するためである。図-9に示すように、全てのケースにおいて最初の貫入 (First Run) の最初の破壊時の氷力が最も大きく、その後の破壊時の氷力は、一旦貫入を停止した後の2回目の貫入 (Second Run) を含め、最初の最大氷力以上にはならない。これは、2回目以降の破壊は、全て貫入によって発生したマイクロクラックの存在する平均強度の小さくなった氷 (damaged ice) の破壊であるためである。断続的なぜい性破壊では、最初の最大の氷力に対する2回目以降のピーク時の氷力の比は0.3から0.6の間であった。

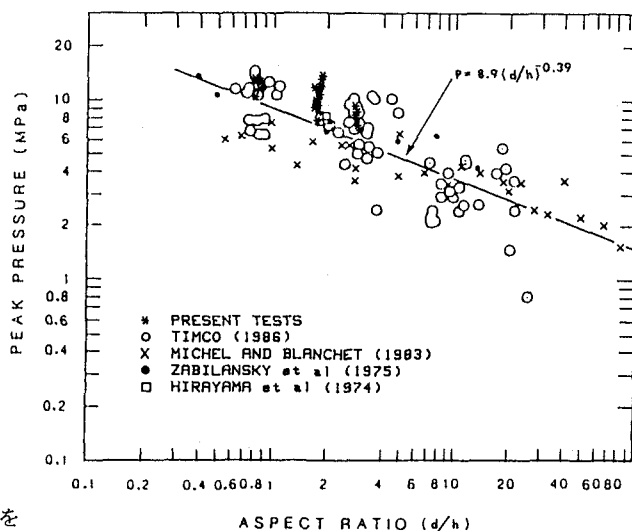


図-7

最大氷圧力とアスペクト比の関係 (Timco, 1986)

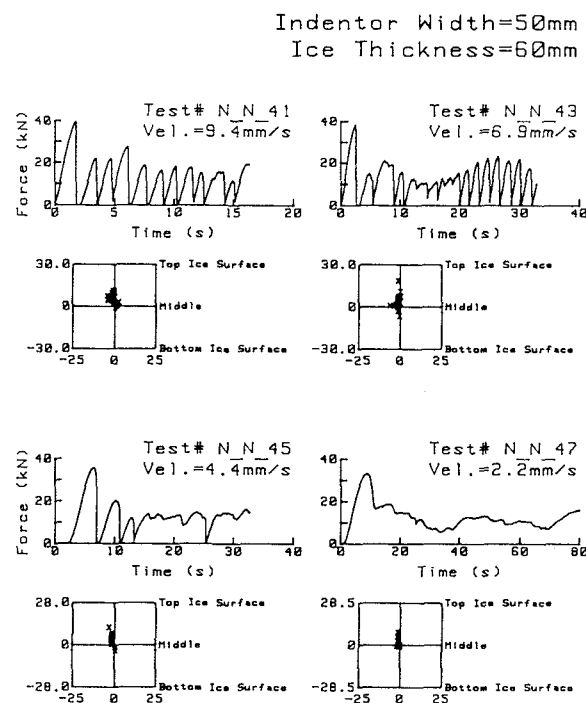


図-8 接触面内における氷力の作用中心位置

4. 7 氷の破壊周期

断続的な氷の破壊によって起こる構造物の振動は、その設計において考慮されるべき重要な要素の一つである。図-10に周期的な氷の破壊を示す実験結果をもとに、氷の破壊周波数と無次元貫入速度 (v/h , v : 貫入速度、 h : 氷厚) の関係を示す。無次元貫入速度の増加とともに、氷の破壊周波数は直線的に増加する。この結果は鉛直円筒形のインデントーでのSodhi and Marris(1984)の実験結果とも一致する。図-11にインデントーの水盤貫入時の無次元振動周波数 ($v/f \cdot h$) と無次元貫入速度の関係を示す。無次元振動周波数は無次元貫入速度の変化に無関係にほぼ一定で、その値は約 0.2である。これにより、貫入速度と氷厚を与えることにより、氷盤貫入に伴う構造物の振動周波数を求めることができる。また、 $v/f \cdot h$ は1回の氷盤破壊によりインデントーの進む距離を氷厚との比で示したものであるが、本実験においては1回の破壊においてインデントーが氷厚の約20%進むということがわかる。

5. ま と め

本報告は淡水氷盤に鉛直でフラットな鋼製インデントーを貫入させることによる氷の破壊形態とインデントーの挙動について述べたものである。実験の条件としてはインデントーの幅を50, 100, 150mm、貫入速度を1から 9mm/s、氷厚を20から60mmと変化させた。

5. 1 実験装置

- ①氷力の測定方法として、ロードセルをインデントーの背面に取りつけたことにより、貫入装置全体の振動の影響を含まない氷力を測定することが可能となった。
- ②Displacement Transducer を氷盤上に設置し、インデントー前面と連結させたことにより、氷盤破壊時のインデントーの挙動が明らかになった。また、この方法により氷盤破壊に費やされるエネルギーの解析が可能となった。
- ③Acoustic Emission(A.E.) を氷盤中に埋め込むことによりマイクロクラックの発生と氷力の関係が明らかにされた。

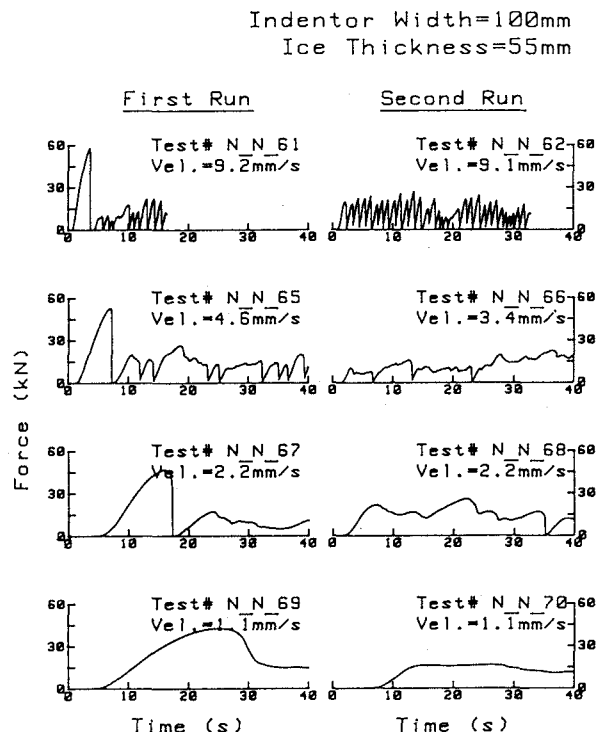


図-9

“Undamaged” と “Damaged” な氷による氷力の違い

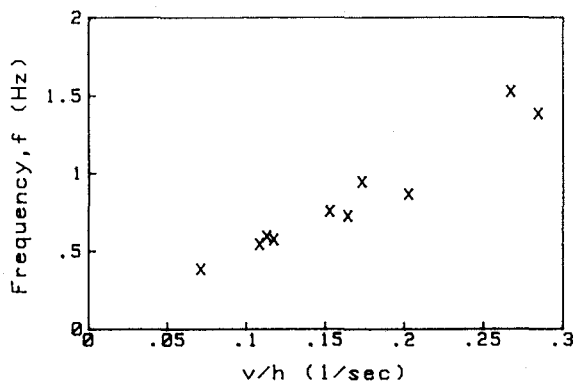


図-10 氷盤の破壊周波数と無次元貫入速度の関係

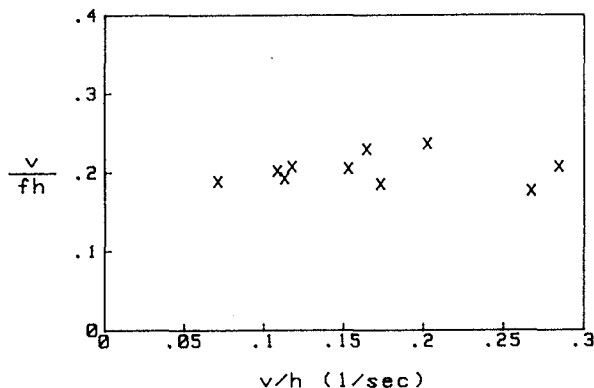


図-11 無次元振動周波数と無次元貫入速度の関係

5. 2 実験結果

- ①貫入速度と氷盤破壊の観察から氷盤の破壊形態の分類を行った結果、歪速度 ($\dot{\epsilon}$) が $\dot{\epsilon} < 5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ では延性破壊、 $\dot{\epsilon} > 1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ ではぜい性破壊の破壊形態を示した。
- ②ぜい性破壊の歪速度では、インデントーは氷盤近傍のマイクロクラック発生により平均強度の低下した氷をインデントーの貫入方向に押し飛ばしながら断続的に前進する。この時、インデントーは激しく振動する。
- ③貫入速度が異なっても、インデントーの幅、氷厚といった条件が同じであれば、氷盤の破壊に必要なエネルギーはほぼ同程度の大きさである。
- ④接触面内における氷力の中心は、接触開始時点では必ずしも接触面の中央付近ではないが、貫入が進み氷の変形が大きくなるにつれ中央付近に近づき、氷の破壊時では接触幅のほぼ中央に作用する。
- ⑤貫入による氷盤の断続的なぜい性破壊では最初の破壊時の氷力が最も大きく、その後の破壊時の氷力はそれ以上にはならない。
- ⑥最大氷圧力はアスペクト比の増加と共に対数的に低下し、Timcoが得た $P_{\max} = 8.9(d/h)^{-0.39}$ によく一致している。
- ⑦インデントーの氷盤貫入時の無次元振動周波数はインデントーの無次元貫入速度やアスペクト比の変化に無関係にほぼ一定で、その値は $v/f \cdot h \approx 0.2$ である。これにより、氷盤貫入に伴う構造物の振動周波数を求めることができる。

参考文献

- Nakazawa, N. (1989) : Factors Influencing the Ice Forces on Flat Vertical Indentors Pushed Through a Floating Ice Sheet. Master Thesis, U of Alaska Fairbanks.
- Sodhi, D.S. and Morris, C.E. (1984) Ice Forces on Rigid, Vertical, Cylindrical Structures. CRREL Report No. 84-33.
- Sodhi, D.S. and Nakazawa, N. (1988) : Results from Indentation Tests on Freshwater Ice. Proc., IAHR 9th International Symposium on Ice, Vol.1, pp.341-350, Sapporo, Japan.
- Timco, G.W. (1976) : Indentation and Penetration of Edge-Loaded Freshwater Ice Sheets in the Brittle Range. Proc., 5th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE) Symposium, Vol. IV pp.444-452, Tokyo, Japan.