

氷盤貫入試験における氷と構造物の動的相互作用について

中 澤 直 樹*・Devinder S. Sodhi**

1. 緒 言

氷海域に建設される海洋・海岸構造物の設計においては、移動する浮氷盤により構造物に作用する水平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、構造物に氷盤が連続的に貫入する場合、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。この過程において構造物は変形し、繰り返し荷重により振動を起こすことになる。従来、このような構造物の振動は海中燈台や橋脚のような鉛直柱状構造物においてのみ発生すると考えられていたが、近年、北極海に設置された石油掘削用 platform のような大型海洋構造物（長さ 100 m×幅 100 m）においても振動による被害が報告されている（Jefferies・Wright, 1988）。従って、氷の影響を受ける構造物の設計のためには、構造物の剛性を考慮に入れた構造物の変形と氷盤破壊の挙動が明らかにされなければならない。本研究は淡水氷盤に鉛直で平坦な鋼製 indenter（貫入盤）を貫入させることにより、氷と構造物の動的相互作用を次の項目に主眼を置いて明らかにしたものである。Fig. 1 に構造物に対する氷盤貫入問題の概念図を示す。

- ①氷力の大きさと貫入速度及び構造物の剛性の関係
- ②氷盤破壊時の構造物の動的挙動
- ③構造物の剛性と氷盤破壊の周期

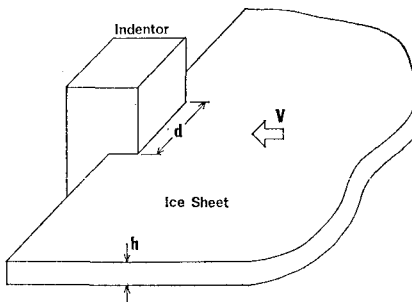


Fig. 1. Schematic drawing of indentation geometry.

2. 実験装置

本実験は米国寒冷地理工学研究所の長さ 34 m×幅 9 m×深さ 2.5 m の氷海水槽で行なわれた。Fig. 2 に実験装置を示す。実験装置は①氷盤に直接貫入する indenter、②下部に indenter が固定される、spring によって剛性を変えることができる structural support、そして③ structural support が固定される indenter carriage 及び motor からなる high force module (H.F.M.) からなっている。

indenter plate は厚さ 25 mm の鋼製板で、その背面に load cell が 3 個取り付けられている。この方法により貫入構造物の振動の影響を受けない真の氷の作用力を計測することが可能となる。更に、3 個の load cell の氷力を合計することをより全氷力を求めることができるとともに、indenter と氷の接触面内における氷力の作用中心を求めることができる（Sodhi・Nakazawa, 1988）。indenter は load cell を介して indenter support に固定され、それが structural support の bottom plate に取り付けられる。

structural support は top plate と bottom plate が 4 個のヒンジで連結されている。更に、それらは図に示すように spring で連結されている。spring は長さ 1800 mm×高さ 152 mm×厚さ 25 mm の 2 枚のアルミニウム板を長さ 100 mm のアルミニウム棒で連結する構造で、この棒の本数を増減することにより spring の剛性を 0.9 から 3.2 MN/m まで変えることができる。

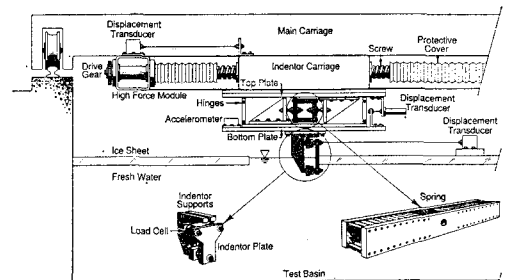


Fig. 2. Schematic sketch of the experimental set-up.

* 正会員 M.Sci. パシフィックコンサルタンツ(株)

** Ph.D. USA CRREL Ice Eng. Res. Branch

Structural support は H.F.M. の indenter carriage に固定される。この indenter carriage は motor により回転する screw により推進力を与えられ、spring を通して indenter が氷盤に貫入する。

変位は ① indenter carriage の移動距離、② indenter carriage と indenter の relative displacement (spring の変形量)、そして ③ indenter の氷盤に対する変位一が測定された。更に、structural support の変形の加速度も計測された。

3. 実験手順

水槽の氷盤が予定の厚さになった時点で、移動滑車に固定されたチェーンソーで氷盤に実験装置が移動できる幅の水路を作り、実験地点まで indenter を移動する。indenter の前方 150 cm 程の所に displacement transducer を設置し、indenter の前面に連結させる。これらの準備の後、貫入試験が行われた。実験は Fig. 3 に示すようにひとつの氷盤に対し水路に沿って、お互いの貫入の影響を受けないよう 3 から 5 m 離して数回行われた。本実験の indenter の幅は 50, 100, 150 mm であったが、主に 50 mm を使用した。貫入速度は 0.5 から 150 mm/s、氷厚は 15 から 60 mm まで変化させた。氷温は本実験を通して -1°C から 0°C の間であった。実験の様子は写真、ビデオ、そして水中ビデオカメラで記録され、各実験の後に破壊された氷の詳細な観察が行われた。

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 indenter と氷盤の接触から破壊に至るまでの氷のマイクログラックの発生と伝播の過程が写真及びビデオカメラを使い注意深く観察された。indenter と氷盤が接触すると直ぐに indenter 前面にマイクログラックが発生する。マイクログラックが発生した氷は白色に変わり、荷重が増加するにつれて広がりが増して行く。マイクログラックの広がりとともに indenter 前面から直線状のマクロクラックが数メートルの長さで発生する。マイクログラックの密度は indenter 前面で最も大きく、遠ざかるにつれ小さくなる。

マイクログラックの発生の模様を観察するために、indenter plate として 50 mm 幅の透明なアクリル板を用い、その背後に水中カメラを設置し、indenter と氷盤の接触から貫入の模様を記録した。それによると、クリープ破壊の歪速度 ($\epsilon = v/4d$, v : 貫入速度, d : indenter の幅) の実験では、接触開始時は氷荷重が等分布には作用しないものの、氷の変形が進むにつれ等分布の荷重となる。それとともに接触面いっぱいにマイクログラックが広がり、破壊 (crush) の直前にはマイクログラックにより氷は結晶単位に分解されている。断続的なぜい性破壊を起こす歪速度の実験では、最初の破壊以後は破壊された氷の存在により、それ以後の現象を詳しく観察することはできないが、断続的な破壊ごとに氷 (crushed ice) が indenter 前面の上下方向に押し出されるのが認められた。Fig. 4 に貫入試験の写真を示す。indenter の前面にマイクログラックが広がり、直線状のマクロクラックが見られる (a)。荷重の増加とともにマイクログラックが密になり、indenter の前面は白色に変わる (b)。

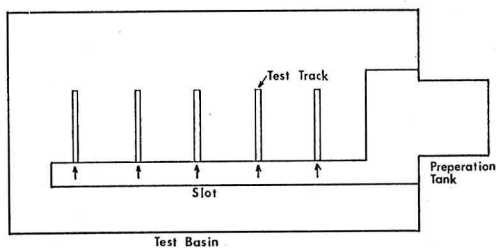


Fig. 3. Test track location in the basin.

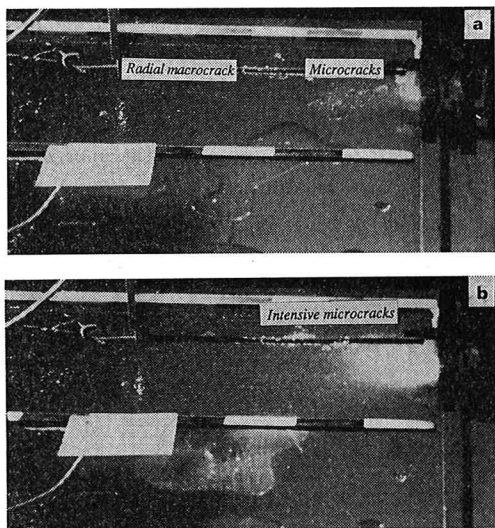


Fig. 4. Photographs showing progress of an indentation test: (a) microcracks in the immediate vicinity of the indenter and (b) intensive microcracks near the indenter.

ラックが広がり、破壊 (crush) の直前にはマイクログラックにより氷は結晶単位に分解されている。断続的なぜい性破壊を起こす歪速度の実験では、最初の破壊以後は破壊された氷の存在により、それ以後の現象を詳しく観察することはできないが、断続的な破壊ごとに氷 (crushed ice) が indenter 前面の上下方向に押し出されるのが認められた。Fig. 4 に貫入試験の写真を示す。indenter の前面にマイクログラックが広がり、直線状のマクロクラックが見られる (a)。荷重の増加とともにマイクログラックが密になり、indenter の前面は白色に変わる (b)。

4.2 貫入速度と氷の破壊特性

氷は歪速度の違いにより異なった破壊形態を示す。Fig. 5 (a), (b) そして (c) に貫入速度がそれぞれ 0.6, 41.1 そして 143.2 mm/s の実験結果を示す。indenter の幅は 50 mm、氷厚は 25 mm である。各実験結果において、上から (i) 氷力、(ii) 相対変位 (spring の変形量)、(iii) structural support の変位の加速度、そ

して (iv) indenter carriage と indenter の移動距離をそれぞれ経過時間に対して示したものである。

(a) の貫入速度 0.6 mm/s (歪速度 $\dot{\epsilon} = 3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$) の実験では氷力の緩やかな増加・減少、そして安定した一定値の氷力を示すというクリープ破壊の性状が示されている。相対変位はピーク時氷力で最大となり、その後は一定変位のまま貫入を続ける。この時、氷と indenter は常時接触した状態であり、indenter はマイクロラックにより平均強度の減少した氷を押し分けながら前進する。

(b) の貫入速度 41.1 mm/s ($\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) の実験では氷力の直線的な上昇とピーク氷力後の氷の破壊による急激な降下が繰り返され継続的に見られる。この急激な氷力の解放は氷のぜい性破壊の性状を示している。相対変位が正の値となるのは氷の破壊により indenter がゆり戻しを受けて indenter carriage の移動距離よりも前方へ瞬間的に変位することを示している。また、加速度の記録より、structural support が振動していることがわかる。

(c) の貫入速度が 143.2 mm/s ($\dot{\epsilon} = 7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) の実験では、ほぼ一定で連続した氷力が作用している。又、相対変位及び加速度もほぼ一定で、ほとんど振動がみられない。

(a), (b), そして (c) の氷力を比較した場合、(a) のクリープ破壊ではピーク時で 9 MPa 、その後は 3 MPa の一定値の氷圧力を示した。(b) の断続的なぜい性破壊では、ピーク時で 8 から 12 MPa の値を示した。(c) の連続的な破壊では 1.5 MPa のほぼ一定した値を示している。このような氷圧力の違いは氷の粘弾性的性質によるものである。ここで留意しなければならないのは、(b) の貫入速度は一連の貫入過程の平均値としての速度を表わしているのであるが、indenter の氷への接触から氷の破壊直前までの貫入距離と経過時間から貫入速度を算出した場合は 10 から 15 mm/s という値である。

4.3 構造物の剛性と氷の破壊特性

本実験では構造物の剛性が氷と構造物の相互作用に与える影響を調べるために貫入機の中に spring を設け、その剛性を変えることができるよう設計した。Fig. 6

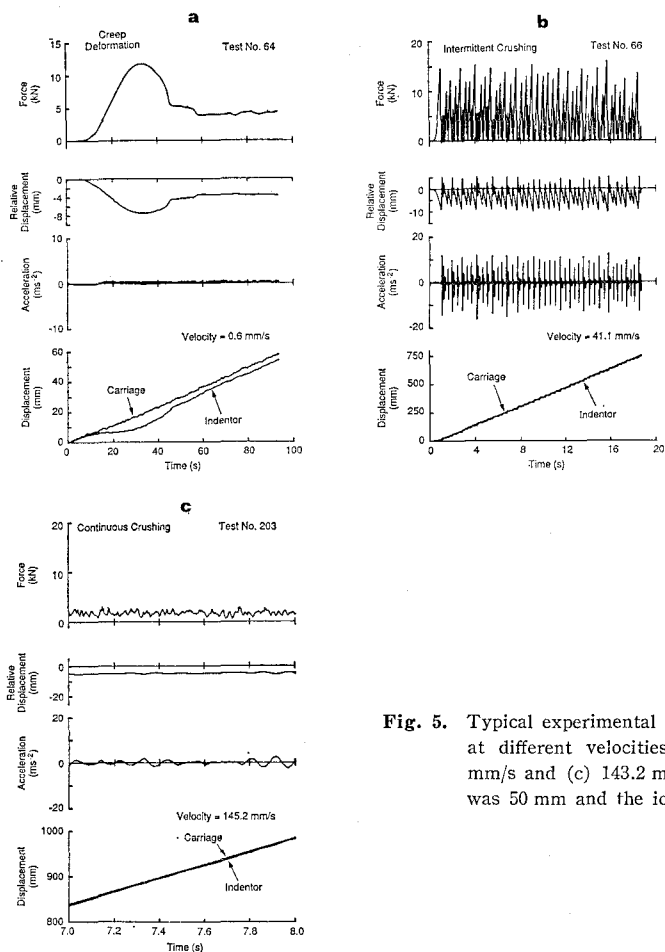


Fig. 5. Typical experimental results of indentation tests at different velocities: (a) 0.6 mm/s , (b) 41.1 mm/s and (c) 143.2 mm/s . The indenter width was 50 mm and the ice thickness was 27 mm .

(a), Fig. 5 (b), そして Fig. 6 (b) は spring の剛性をそれぞれ 3.23, 1.71, 0.89 MN/m としたときの実験結果である。貫入速度は 41 mm/s, indenter の幅は 50 mm, 氷厚は 28 mm である。これらの結果から氷の破壊周波数を求めると, spring の剛性が大きい順に 3.0, 2.0, そして 1.3 Hz となる。従って, 構造物の剛性が大きい程, 氷の破壊周波数も増加することがわかる。又, 剛性が大きい程, indenter と indenter carriage の相対変位は小さくなる。氷力の大きさについては剛性の影響は見られず, 3 者ともピーク時氷圧力で約 10 MPa の値を示している。

4.4 氷のぜい性破壊時の Indenter の挙動

Fig. 7 に断続的な氷のぜい性破壊を示す実験結果の氷力の立ち上がりから氷の破壊までの 1 サイクルを示す。貫入速度は 107.4 mm/s, indenter の幅は 100 mm, 氷厚は 24 mm である。氷力の記録と相対変位の記録における A 点から E 点はそれぞれ対応している。

A 点において氷と接触の始まった indenter は B 点で氷が破壊するまで, indenter carriage が移動しているにもかかわらず, その移動量は非常に小さい。この間に氷力はピークに対し, B 点で氷力から解放された indenter はより戻しのため B 点から C 点へと急激に移動し, C 点では indenter carriage の移動量より大きくなる。この時, indenter は破壊された氷を前方に押し出すため B 点から C 点の氷力が作用する。C 点で前方に出た indenter はその振動で今度は D 点までより戻されるが, この時, indenter は氷との接触から解放されるため, 氷力の記録は零となる。この振動の間に indenter carriage は一定速度で前方へ進んでいるため, indenter は次の氷との接触を始め, 氷力の立ち上がりが示すように E

点から貫入を開始する。氷荷重の急激な上昇とぜい性破壊による解放によって起こる構造物の振動を伴うような現象においては, 以上のような応答を繰り返しながら氷盤は構造物を通過して行くものと思われる。

4.5 氷の破壊エネルギー

本実験においては indenter と indenter carriage の移動距離を別々に計測したため, indenter carriage から伝えられたエネルギーと, indenter から氷に伝えられたエネルギーを算出することが可能となった。エネルギーは氷力と変位の積を積分することにより求められ, それを indenter の貫入によって破壊された氷の量 (接触面積×indenter の移動距離) で割ることにより単位

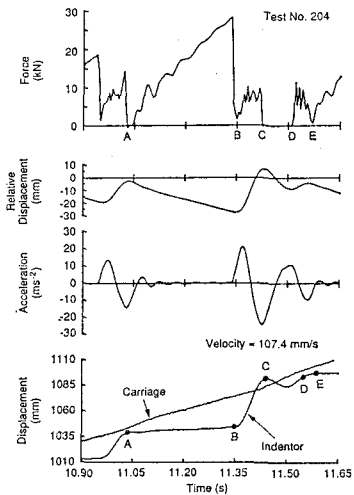


Fig. 7. Detailed plots of a few cycles of loading and ice failure.

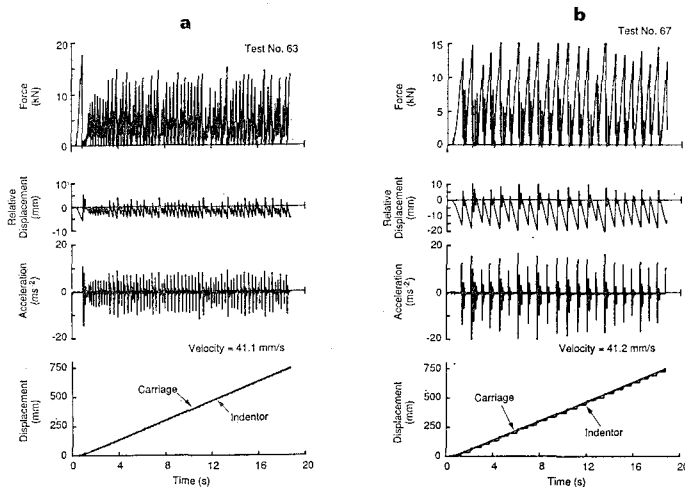


Fig. 6. Experimental results of indentation tests which had the following spring stiffness: (a) 3.23 MNm⁻¹ and (b) 0.89 MNm⁻¹.

仕事量 (Nm^{-2} 又は Pa) が求められる。これによると、クリープ破壊と連続的な破壊のモードでは indenter carriage による仕事量に対する indenter の仕事量の比はほぼ 1.0 であったが、断続的な破壊のモードではその比は 0.7 前後であった。これは indenter carriage から indenter に伝わったエネルギーの内、約 7 割は氷の破壊に費やされるものの、残りの 3 割は indenter (又は spring) の振動に費やされたことを意味している。

5. ま と め

本研究では構造物と氷盤の動的相互作用を調べるために淡水氷に対する貫入試験が行われ、以下の結論を得た。

①水中カメラによるマイクロクラックの観察により、氷と indenter の接触面ではマイクロクラックがほぼ全面に発生し、一定以上の氷荷重のもとではほぼ等分布に氷力が作用する。

②氷の破壊様式は貫入速度 (歪速度) によって異なり、本実験では歪速度が $\dot{\epsilon}=3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ でクリープ破壊、 $\dot{\epsilon}=2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$ で鋭い氷力のピークを断続的に繰り返すぜい性破壊、 $\dot{\epsilon}=7 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$ で一定な氷力を示す連続的な破壊を示した。

③貫入により indenter に作用する氷力は貫入速度により異なる値を示した。クリープ破壊ではピーク時の後の一定値が 3 MPa なのに対し、断続的なぜい性破壊では約 10 MPa、連続的な破壊では 1.5 MPa の値を示した。

④氷の断続的なぜい性破壊において、歪速度が同じであっても、構造物の剛性により氷の破壊周波数は異なり、剛性が大きい程、破壊周波数は大きくなる。

⑤ indenter carriage から indenter に伝わるエネルギーの内、クリープ破壊や連続破壊では、ほぼ全てのエネルギーが氷の破壊エネルギーとなるのに対し、断続的なぜい性破壊では、約 7 割が氷の破壊エネルギーとなり、残りのエネルギーは indenter の振動に費やされる。この振動が断続的であるがゆえに、構造物にとっては不利な状態となる。

参 考 文 献

- Jefferies, M. G. and W. H. Wright (1988): Dynamic Response of "Molikpaq" to Ice-Structure Interaction, Proc. 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Vol. IV, pp. 201~220.
- Sodhi, D. S. and N. Nakazawa (1988): Results from Indentation Test on Freshwater Ice, Proc. 9th International Symposium on Ice (IAHR), Vol. 1, pp. 341~350.