

氷荷重に関する中規模野外実験における構造物と氷盤の相互作用について (その3)

On the ice/structure interaction in medium scale field indentation tests (part 3)

○竹内 貴弘^{*1}、赤川 敏^{*1}、河村 宗夫^{*1}、酒井 雅史^{*2}、勝井 秀博^{*2}、
松下 久雄^{*3}、寺島 貴志^{*4}、中沢 直樹^{*5}、平山 健一^{*6}、佐伯 浩^{*7}

Takahiro Takeuchi, Satoshi Akagawa, Muneco Kawamura, Masafumi
Sakai, Hidehiro Katsui, Hisao Matsushita, Takashi Terashima,
Naoki Nakazawa, Ken-ichi Hirayama and Hiroshi Saeki

Abstract

Medium scale field indentation tests (MSFIT) in JOIA project had been conducted to evaluate the ice load on structure since 1996 winter, using natural sea ice in Lake Notoro. The key of the ice load evaluation is to understand the ice failure characteristics during indentation process. The effects of indentation velocity on ice failure were examined, using natural sea ice frozen in two ways. Also, ice failure process in detail is examined by the use of plane pressure sensor. This paper shows the test results in 1998 winter.

Keywords: ice failure, ice indentation tests, ice load

1 はじめに

極地の海洋開発においては、氷海に建設される海洋構造物に作用する設計氷荷重の的確な評価法の確立が必要である。しかしながら、これまでの氷荷重推定法では、各種の氷荷重推定式が提案されてはいるものの、基準となる推定法が確立されていなく、それらを使用するにあたっての条件が明確になっていないのが現状である(中沢ら、1986)。また、最近オホーツク海北部海域での天然資源の探掘が、再び脚光を浴びつつある。これらの状況から、氷海域の海洋構造物に作用する氷荷重を的確に評価し、設計荷重として運用可能な精度の荷重推定法を開発整備することが早急に求められてきた(JOIA年度報告書、1995, 1996, 1997)。以上の背景により、平成5年度から5ヵ年計画で(社)日本海洋開発産業協会(通称JOIA)からの受託事業として、海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究プロジェクトが実施されている。ここでは、構造物の氷盤との受圧面積の増大に伴って氷荷重(圧力)が減少することを調査し、この要因が氷盤の非同時的破壊現象によるものかを把握することが主目的である。このプロジェクトの中心的な位置を占める「中規模野外実験」は平成7年度より実施され、それらの結果は既に報告されてきた(竹内ら1996、赤川ら1997)。この貫入試験は、天然氷に対するサーボ変位制御装置の使用、試験規模、系統的な試験、室内氷海水槽試験に対応しうる試験精度、の面においてこれまでには例を見ないものである。本研究では、より自然の状態に近い天然氷を用い、特に、貫入速度の試験条件を拡大して実験を実施した。ここでは平成9年度に実施した試験から、氷盤の破壊状況、氷荷重に与える貫入速度の効果、さらにこの分野では初の試みである平面圧力パネルの野外計測結果、さらに破壊サイズの速度影響について報告する。

2 貫入試験の内容

実験場所は、これまでと同様に北海道網走市能取湖の能取漁港二見ヶ岡地区の港内である。

2-1 貫入試験装置

貫入試験装置は、図-1に示すようにこれまでと同様のものを使用した。この装置は、サーボジャッキ先端に取り付けられた構造物供試模型の氷盤への貫入速度が、油圧サーボによりコントロールされた変位制御タイプである。平成9年度は、制御変更を行い設定貫入速度 V を、 $0.03\text{ cm/s} \sim 3\text{ cm/s}$ の範囲に拡大した。試験を実施した港内は、潮汐の影響を受け試験氷盤の位置を変化させるため、試験装置はサーボジャッキの高さを調節することができる。供試模型は、表面処理したステンレスパネル背後に局部荷重計測用ロードセル

*1 正会員 清水建設(株)(135 東京都江東区越中島3丁目4番17号)、*2 正会員 大成建設(株)、

*3 正会員 三井造船(株)、*4 正会員 ハ・ソフィックコンサルタンツ(株)、*5 正会員 フォレストワークス(有)

*6 フォロー 岩手大学工学部建築環境工学科、*7 フォロー 北海道大学工学部土木工学科

を取り付けたもので、図-2に示すような寸法、方向、配置、形状（垂直壁）、ロードセル番号とし、また、A, B, C, Dで示された平面圧力パネル（測定範囲 $7\text{kgf/cm}^2 \sim 70\text{kgf/cm}^2$ 、最大4枚、計測点数最大7744点）を氷盤との接触部分に取り付け、破壊状態を詳細にとらえることとした。このパネルは、Tekscan社製でフィルム上に感圧インクと電極塗料を取り付け、感圧インクの抵抗値が圧力とともに変化することを利用して圧力を計測するものであり、室内の氷海水槽での使用実績（泉山ら、1997）はあるものの野外での使用は初の試みである。

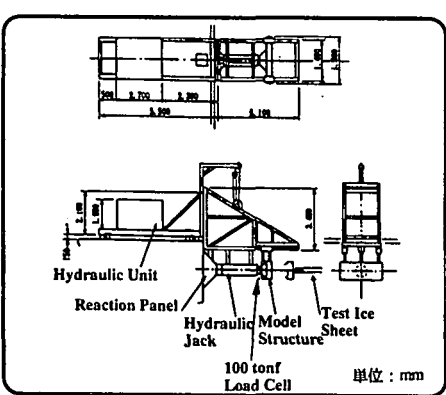


図-1 貫入試験装置

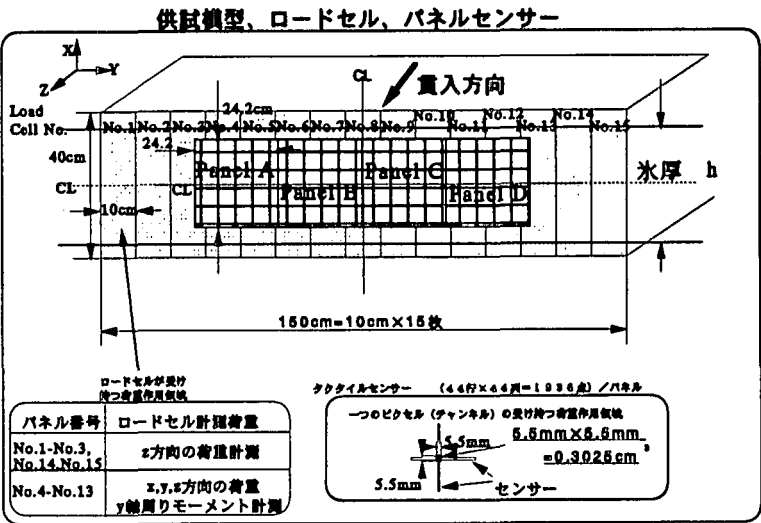


図-2 供試模型概要に取り付けたロードセル、平面パネルセンサー

2-2 貫入試験方法

試験氷盤は2種類あり、自然氷盤中に新たに成長させたもの（均質氷盤と呼ぶことにする、平成7、8年度は均質氷盤）と自然氷盤をそのまま用いたもの（不均質氷盤と呼ぶことにする）である。今年度は、貫入開始時の氷盤と供試験模型の接触状態を理想的に100%を目標とせず、ある速度で供試験模型を氷盤内に貫入させて氷盤を破壊させ、氷盤先端部分の形状を不規則な状態とし、この状態から試験を実施し、比較対象とした。これは、実海域の氷盤先端部分形状は一樣ではないこと（竹内ら、1997）、試験目的が継続氷荷重の評価であるためである。試験氷盤には、氷厚方向の氷温計測を目的に熱電対を取り付けたプラスチック棒をセットした。貫入試験は、貫入試験装置本体及び、トラック上に置かれた移動計測ハウス、ジェネレーターを所定の試験位置に移動させてから実施した。試験直前には、ビデオ撮影準備、変位計をワイヤーで供試模型と連結、氷厚方向氷温計測を開始した。また、物理試験用供試体は、貫入試験前に同一地点の試験氷盤から切り出し、貫入試験氷盤と同様の環境条件とするために海水プール中に保存し、陸上にて整形して物理試験を実施した。貫入試験終了後は、破壊氷片の結晶写真・寸法、破壊氷盤先端部分の形状計測を行った。

2-3 貫入試験ケース

平成9年度の試験条件を表-1に示す。なお、貫入速度Vは、既存の評価法による有効歪速度 $V/(2W)$ が 10^{-4}sec^{-1} , 10^{-3}sec^{-1} , 10^{-2}sec^{-1} のオーダーとなり既存の報告による氷荷重が最大値を与える条件を含み、氷荷重の貫入速度(V)への影響を広い範囲でとらえられるように計画されている。このため、 $V=0.03\text{cm/s}$, 0.3cm/s , 3cm/s とした。

2-4 貫入試験計測項目

計測項目は、全体氷荷重、局部氷荷重、貫入速度、装置の傾斜、貫入方向の加速度、氷盤破壊モード観測、氷厚分布、氷温、気温、試験氷盤の塩分量、密度、結晶構造、および平面圧力パネルでの局部氷荷重分布であり、氷荷重評価に必要な基礎データの収集を行った。

3 試験結果と考察

3-1 試験結果の概要

試験結果のまとめを表-2に示す。試験氷盤の鉛直氷温は、これまで同様温度勾配が小さく概ね海水温度（ -1.8°C ）付近であった。また、供試模型表面中央部分の凹凸の最大は、1.1mm以内と小さくほぼ平坦であった。

表-1 試験ケース

Test Type	供試模型幅(W)cm	氷厚(h)cm	貫入速度(V)(cm/s)	Load Cell Sampling(Hz)	初期接触状態	氷質	Panel sensor A,B,C,D	Panel sensor Sampling(Hz)
F1	150	24.1	0.3	50	一様	不均質	(A,B,C,D)	12.5
F2	150	24.1	0.03	5	非一様	不均質	(A,B,C,D)	0.625
F3	150	24.1	3	200	非一様	不均質	(A,B,C,D)	100
K1	150	23.8	0.3	50	一様	均質	(A,C,D)	6.25
K2	150	18.6	0.03	5	一様	均質	(A,B,C,D)	5
K3	150	23.8	3	200	非一様	均質	failed	invalid

表-2 試験結果のまとめ

Test Type	測定貫入速度 V (mm/s)	初期最大氷力 (kN)	継続最大氷力 (kN)	継続最大氷圧力 (MPa)	一軸圧縮強度平均 (MPa)	試験後形状計測	塩分量 ppt	密度 (g/cm ³)
F1	3.079	284.16	152.8	0.42	1	yes	6.2	0.843
F2	0.297		270.64	0.75	1	flat	6.2	0.843
F3	29.043		112.72	0.31	1	yes	6.2	0.843
K1	2.966	1013.9	236.07	0.66	1.56	yes	5.4	0.895
K2	0.35		429.92	1.54	1.4	flat	5.9	0.879
K3	29.076		208.79	0.58	1.56	yes	5.4	0.895

3-2 氷盤破壊様式

貫入試験において発生した継続氷力時の氷盤破壊モードは、貫入速度(V)に大きく依存している。これは、氷盤との一様接触状態での試験において、既に確認されていた(たとえば、Saeki and Ozaki, 1980)。これに対して平成9年度の試験条件は、氷盤先端部分の形状が自然の状態(障害物があるという意味)において非一様な状態からの貫入試験であった。これらを各速度条件ごとに整理すると図-3となる。低速の場合には、供試模型の接触開始から氷盤は変形し接触面積を増大させ、接触が氷厚全体に亘った状態になると、circumferential cracksとともに下方のcreep buckling変形が発生する。中・高速の場合には、水平面内のcleavage cracksを伴ったflakingとcrushing破壊に相当する。これらの破壊が、供試模型幅方向の各領域において独立に発生していた。さらに、中速度に比較して高速の場合には、crushing面の長さ及びflakingの大きさが小さくなり、cleavage cracksの本数は減少する傾向にある。これらの破壊が発生する場合には、供試模型幅×貫入量×氷厚の体積部分だけ破壊され、他の顕著なクラックの発生は目視では確認されなかった。これは、供試模型の幅が最大6m、氷厚27.3cmの場合である平成8年度の試験結果と同様であった。以上の破壊は、均質氷、不均質氷の両方の場合において、顕著な違いはない。

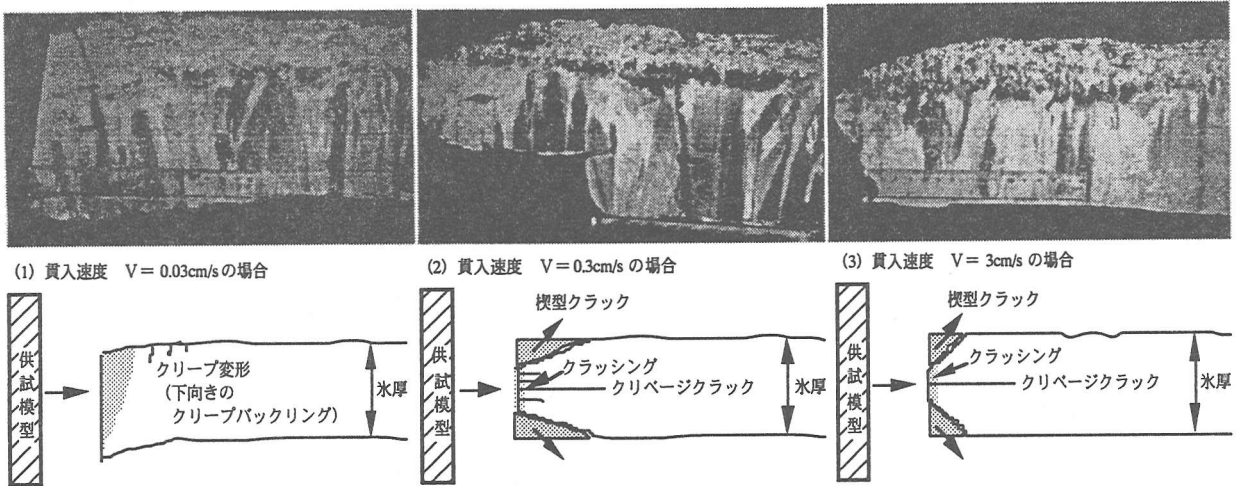
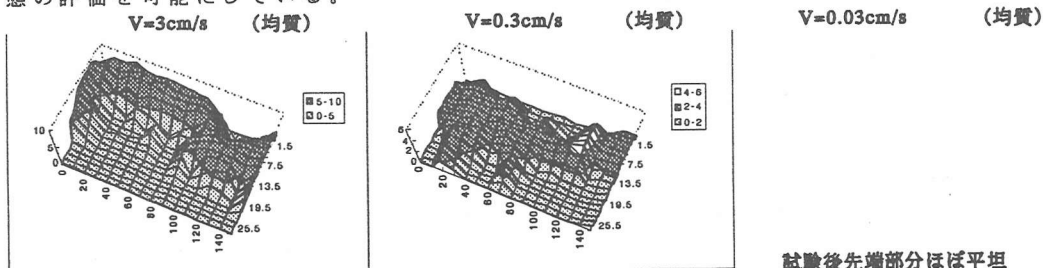


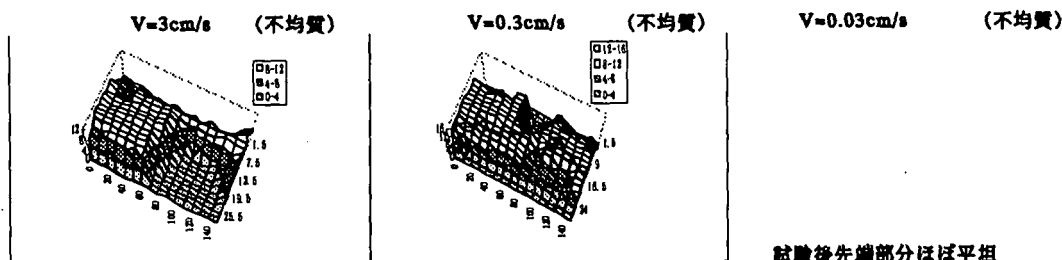
図-3 氷盤破壊様式概要図

3-3 氷盤破壊形状

試験後の氷盤先端部分の破壊形状を均質、不均質の場合について計測した(図-4、5)。両場合に関し、の違いは、氷盤破壊様式の場合と同様に認め難い。また、貫入速度の影響が大きく、低速では平坦となりcreep変形(同時変形)に対応し、接触領域の増大が伺われた。また、中・高速では、凹凸が発生して非同時破壊に対応し、接触領域の減少が伺われる。また、同一貫入速度条件下で一旦装置を停止し再度貫入した場合には、氷荷重は同程度の値を示したことから、氷盤形状計測は、貫入過程の氷盤形状を代表し、接触状態の評価を可能にしている。



試験後先端部分ほぼ平坦
図-4 試験後の氷盤破壊形状(均質)
(構造物供試模型幅1.5m、氷厚23.8cm)



試験後先端部分ほぼ平坦

図-5 試験後の氷盤破壊形状 (不均質)
(構造物供試模型幅1.5m、氷厚24.1cm)

3-4 全体氷荷重

供試模型に作用する全体氷荷重 (Z方向) は、平成7、8年度同様に、局部荷重計測用ロードセル測定値の総和から評価した。全体氷荷重の時系列を各速度条件のみ (氷厚と強度は一定) を変化させて示したものを図-6に示す。高・中速度領域では、変動をともなった連続crushing破壊となるのに対して、低速域では、徐々に接触面積が増大するcreep変形に対応する。これらの結果から、不規則な接触状態で貫入試験を実施した場合には、貫入速度が既存の評価法による有効歪速度 $V/(2W)$ が 10^{-4}sec^{-1} の場合に氷荷重の最大値を与えている。しかし、初期の接触状態が一様でかつ有効歪速度 $V/(2W)$ が 10^{-3}sec^{-1} の場合に最大値 (初期最大氷力) を与えることが知られており、これは表-2にあるように低速域の最大荷重よりも大きい値を与えている。

3-5 局部氷荷重

局部氷荷重の時系列を貫入速度のみ (氷厚と強度は一定) 変化させたものを図-7 (図-2に於けるNo.8パネルに作用する荷重) に示す。局部氷荷重の速度依存性は、全体氷荷重の場合と同様である。また、同一速度条件において、水平方向 (パネルNo.1~15) それぞれの荷重時刻歴は類似した傾向を示すが、高・中速度領域では発生する変動ピークに同時性がなかった。これらの傾向は、15枚のパネル相互間時系列の相関係数を計算することによりさらに裏付けられている。

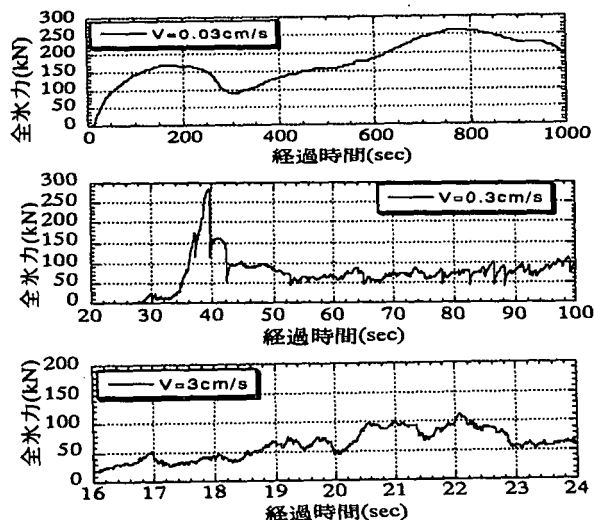


図-6 全体氷荷重の時系列 (W=1.5m、氷厚24.1cm、不均質)

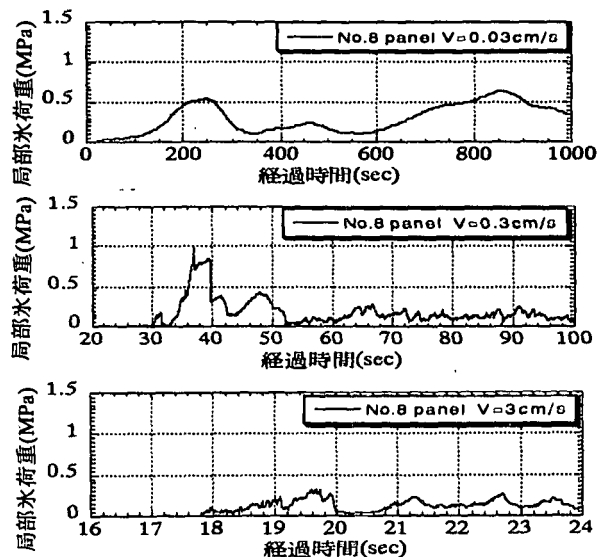


図-7 局部氷荷重の時系列の例 (W=1.5m、氷厚24.1cm、不均質、No.8)

3-6 平面圧力パネルによる荷重圧力分布

図-8と図-9に低速および中速度域における圧力分布の計測結果を、パネル計測点全体に作用する荷重の合計とともに示す。低速域では、接触面積の増大にともない荷重が増大し、荷重作用領域が氷厚下方へ移動していく下方のcreep buckling変形が伺われる。また、中速度域では、cleavage crack, flakingの発生過程および安定した継続荷重作用領域では氷厚の中央部におけるline-like contactの発生状況が観測できた。このline-like contactは、貫入方向(Z)の氷荷重とy軸回りのモーメントから計算される荷重作用点が氷厚の中央部分 ($h/3$) の領域内で変動することからも推定されていた (Takeuchi et al., 1997)。また、line-like contact内での圧力分布は、ある幅をもつ山形の分布形状となり非同時にランダムな状態で繰り返し発生していたことが、新たに用いた平面圧力パネルではじめて捉えることができた。

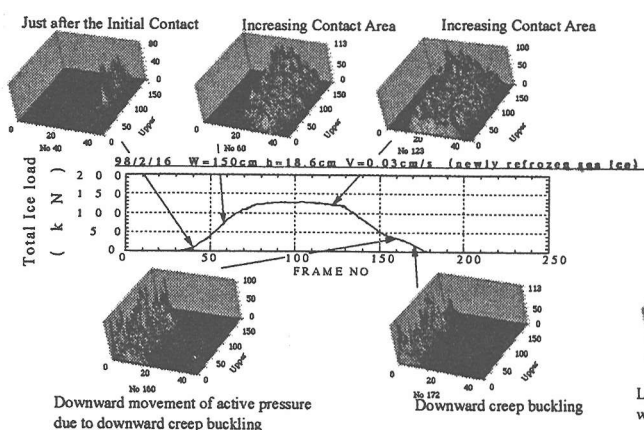


図-8 平面圧力パネルの計測結果
(低速域、 $W=1.5\text{ m}$ 、氷厚 18.6 cm 、均質)

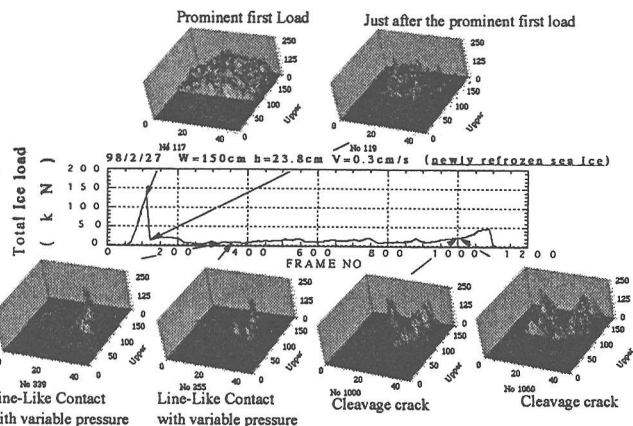


図-9 平面圧力パネルの計測結果
(中速域、 $W=1.5\text{ m}$ 、氷厚 23.8 cm 、均質)

3-7 相関係数による氷盤の破壊

ロードセルで計測された任意の2つの局部氷荷重時系列相互間の相関係数とそれら2つの時系列間の水平距離の関係を図-10に示す。ここでは、同一水平距離(L)に対して幾つかの相関係数が計算されるため、その平均値をプロットしてある。同様に、平面圧力パネルの場合には、同一鉛直方向列上の圧力センシングポイントの合計を計算し幅 5.4 mm ×高さ 23.8 cm を一つのパネルとし、これに作用する荷重時系列相互間の相関係数を計算した。すなわち、4枚パネルを用いた場合には176枚のパネルに相当し、15576個の相関係数値を計算した。同様に、同一水平距離(L)に対する幾つかの相関係数の平均値を図-11に示した。中・高速度域では、低い相関係数を与え非同時破壊に対応し、低速度域では、高い相関係数を与え同時変形に対応する。低速度域の均質の場合には、表-1にあるように初期の接触状態が一樣であるため L/h の増大に応じてわずかに減少していくのに対して、不均質の場合には、試験条件が非一樣な初期の接触状態のために L/h の増大にともない減少しその後0.5付近で一定値を示す結果となった。

次に、Sodhi(1997)の報告にある氷盤個々の破壊大きさを表わすcorrelation length(L_c) (ここでは、無次元化した L_c/h を使用)を算定した。これは、図-10、図-11の(L/h)-軸がゼロの時の曲線の接線と、(L/h)-軸との交点から計算される。このために、これらの曲線を多項式で近似し、その(L/h)=0に於ける微分から(L_c/h)を計算した。これらをまとめたものを表-3に示す。速度が大きくなるにつれて L_c/h が減少し、小さくなると L_c/h が大きくなる。さらに、比較可能な中・高速度域の L_c/h に関しては、不均質・均質による違いは認め難い。また、平面パネルセンサーの方が精度の高い L_c/h を与えており、この L_c はline-like contact内の山形分布の大きさとも対応しうる。

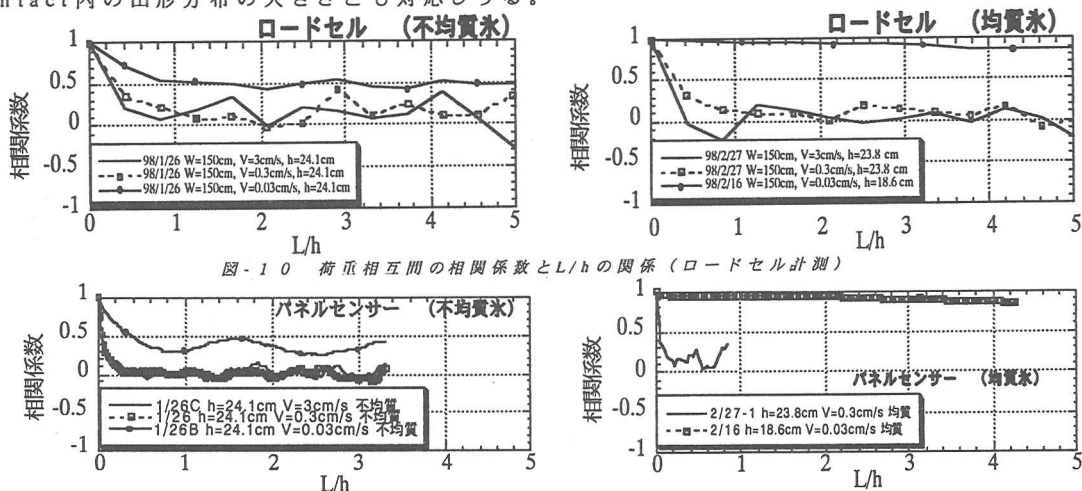


図-10 荷重相互間の相関係数と L/h の関係 (ロードセル計測)

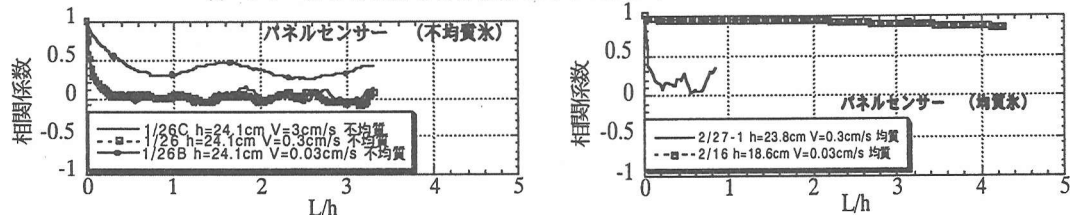


図-11 荷重相互間の相関係数と L/h の関係 (平面圧力パネル計測)

表-3 L_c/h の計算結果

	均質		不均質	
	Load Cell	Panel Sensor	Load Cell	Panel Sensor
貫入速度小 0.03cm/s	29.2	5.77	0.88	0.49
貫入速度中 0.3cm/s	0.27	0.04	0.39	0.13
貫入速度大 3cm/s	0.24	-----	0.18	0.12

4 まとめ

(1) 不均一な接触状態で開始された貫入試験時の氷盤破壊モードは、貫入速度が大きい場合はflakingとcleavage cracksを伴うcrushing破壊が卓越し、flakingとcrushing面サイズは速度が大きくなるにつれ減少する。また、貫入速度が小さい場合は下方creep buckling変形が卓越する。これらは、試験後の氷盤先端部分の形状計測結果、平面圧力パネルの圧力分布計測結果、および結晶写真からも裏付けられた。(2) 全体および局部氷荷重の時系列特性を把握するとともに、各局部荷重データ間の相関を求めた。これから、氷盤の破壊は、貫入速度が大きくなるに従い、同時から非同時へと変化することが確認された。(3) 氷盤と構造物の接触は、貫入速度が小さくなるに従い大きくなることが確認された。また、これは、試験後の氷盤先端部分の破壊形状観測結果からも確認され、貫入速度が小さくなるにつれて凸型からflatとなることに対応している。(4) 非一様な接触状態で貫入試験を開始した場合、全体氷荷重が最大となる有効速度は、既報告の評価法 $V/(2W)$ では、 10^{-3} ではなく 10^{-4} (1/s)の領域であった。氷荷重は、氷盤と構造物の接触状態に大きく影響を受けている。(5) 氷盤個々の破壊大きさを表わすcorrelation length (L_c) (Sodhi, (1997)) は、貫入速度が大きくなるにつれ減少し、小さくなるにつれ増大する。また、均質氷と不均質氷の違いは認め難い。平面圧力パネルの使用は、十分な精度での破壊長の算定を可能にしている。

<謝辞>

中規模野外実験を実施するにあたり、(社)JOIAをはじめとする委員会関係各位、また、実験場の使用許可に関して各種公共機関、漁組の各位、にご協力を頂きました。また、寒冷地での冬期実験を行うにあたり、島田建設(株)、計測業者、北海道大学の学生、の各位には多大なご協力を頂きました。これらの方々ひとり一人のご協力無しに、野外でのデータは取得できませんでした。記して感謝の意を表わします。

<参考文献>

- (1) 赤川敏、河村宗夫、竹内貴弘、酒井雅史、青島正和、勝井秀博、松下久雄、寺島貴志、中沢直樹、平山健一、佐伯浩、「氷荷重に関する中規模野外実験における構造物と氷盤の相互作用について(その2)」、海洋開発論文集、網走、1997、6月
- (2) 泉山ら、：氷荷重分布に関する実験的研究、第13回寒地技術論文・報告集、1997
- (3) 竹内貴弘、青島正和、松下久雄、中沢直樹、寺島貴志、赤川敏、酒井雅史、佐伯浩、「氷荷重に関する中規模野外実験における構造物と氷盤の相互作用について」、海洋開発論文集、東京、1996、6月
- (4) 中沢直樹、竹内貴弘、小野敏行、佐伯浩：海洋構造物に作用する氷力式の評価、海洋開発論文集 Vol.8、pp.115-120、1986
- (5) (社)日本海洋開発産業協会：極限海域における海洋構造物の基礎調査研究、海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究 成果報告書-平成6年度-、平成7年3月、1995
- (6) (社)日本海洋開発産業協会：極限海域における海洋構造物の基礎調査研究、海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究 成果報告書-平成7年度-、平成8年3月、1996
- (7) (社)日本海洋開発産業協会：極限海域における海洋構造物の基礎調査研究、海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究 成果報告書-平成8年度-、平成9年3月、1997
- (8) Saeki, H. and Ozaki, A. : Ice Force on Piles, Physics and Mechanics of Ice, Ed. Per Tryde, Springer-Berlag, pp.342-350, 1980
- (9) Sodhi, D.S. : Correlation of Ice Crushing Forces in Segments of an Indentor, Proc. OMAE, Vol.4, 1997
- (10) Takeuchi, T., Masaki, T., Akagawa, S., Kawamura M., Nakazawa N., Terashima, T., Honda, H., Saeki, H. and Hirayama, K. : MEDIUM SCALE FIELD INDENTATION TESTS (MSFIT) -Ice Failure Characteristics in Ice/Structure Interactions, ISOPE97, Vol. 2, pp. 376-382, 1997