

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

On the interaction of structure with ice sheet in medium scale field indentation tests

竹内貴弘^{*}、青島正和^{*2}、松下久雄^{*3}、中沢直樹^{*4}、寺島貴志^{*4}、赤川敏^{*}、酒井雅史^{*2}、佐伯浩^{*5}Takahiro Takeuchi, Masakazu Aoshima, Hisao Matsushita, Naoki Nakazawa,
Takashi Terashima, Satoshi Akagawa, Masafumi Sakai and Hiroshi Saeki

The construction of structure in ice infested area requires the proper evaluation of design ice load on structure. For that, it is required to clarify that the scale effect, that indentation ice pressure decreases as an area of structure with ice sheet increases, is caused by the nonsimultaneous failure of ice sheet. Medium scale field indentation tests (MSFIT) in JOIA project includes ice indentation tests, tests on physical properties of ice sheet and image sensing on ice deformation. In this paper, the whole plan of MSFIT and the results of ice indentation tests conducted in 1996 winter are reported.

Keywords: nonsimultaneous failure, ice indentation tests, ice load

1 はじめに

氷海域において海洋構造物を建設する場合、設計荷重として構造物に作用する氷荷重を的確に評価する必要がある。しかしながら、既存の各種氷荷重の推定法では、評価法あるいは算定に関する運用上の条件などが明確になっておらず、基準となる推定法が確立されていないのが現状である（中沢ら、1986）。このため、構造物に及ぼす氷荷重を的確に評価し、設計荷重として運用可能な荷重推定法を開発整備することが求められている。このような背景から、平成5年度より5ヶ年計画で通商産業省からの受託事業として（社）日本海洋開発産業協会（通称：JOIA）にて、「海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究」（委員長：北大 佐伯浩教授）が開始された。このプロジェクトでは、技術動向調査により国内外の氷海技術の研究状況を把握するとともに、室内水槽試験及び野外実験により得られた構造物と氷盤の相互作用に関する各種の系統的な試験結果に基づき、新たな氷荷重推定法を確立することを目的としている。ここでは、天然氷を用いた中規模野外実験の全体計画と試験内容を示し、平成7年度に実施した主に構造物と氷盤の相互作用についての試験結果を報告する。この種の実験としては、過去最大規模の試験である。

2 中規模野外実験

中規模野外実験は、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目的である。この実験は、貫入試験を中心に、物理試験、画像計測から成り立っている。貫入試験では、受圧面積を最大 1.44m^2 として氷盤と構造物の相互作用時の氷荷重、氷盤破壊特性を把握する。物理試験では、氷盤の強度や物理的性質を把握する。また、画像計測では、貫入試験時の氷盤の破壊様式と氷盤内の歪領域を把握する。さらに、これらの試験相互の関係についても検討を行った。この中規模野外実験は、平成7年度と8年度で、表-1に示す試験ケースを実施する予定である。実験場所は、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り、場所の選定は環境条件を考慮して決定した。ここでは、平成7年12月～平成8年3月初旬に実施した野外実験のうち、貫入試験の結果について報告する。

3 貫入試験の内容

3-1 貫入試験装置

貫入試験装置の概要を図-1に示す。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。供試模型は、幅 1.5m を基本とし、最大幅 3.0m とすることができる。サーボジャッキの最大加力能力は、 100tonf である。また、供試模型の貫入速度は、 $0.1\text{cm/sec} \sim 3.0\text{cm/sec}$ の範囲で設定可能である。試験を実施した港内は、潮汐の影響を受け試験氷

* 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 パシフィックコンサルタンツ（株）

*5 フェロー 北海道大学工学部土木工学科

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出来るように配慮されている。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（角柱）である。

3-2 貫入試験方法

野外実験サイトの配置を、図-3に示す。図中のNo.1～8までは、新たに作成した試験氷盤の位置を示している。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、目標の試験氷厚に達するまで試験氷盤上の除雪および管理を行った。目標試験氷厚に達すると判断された試験氷盤は、表面上に断熱材を置き、スケルトンレイヤーの成長を抑える配慮を行った。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試験予定日の前日までに移動させてから実施した。試験直前には、供試模型と試験氷盤先端部分が平行になるように調整を行うとともに、ビデオ撮影準備（画像処理装置含む）、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。貫入試験は、可能な限り午前中の気温の低い時間帯に実施できるように配慮した。また、物理試験用の計測機器は、物理試験計測室に収められ、貫入試験終了後に同一地点の試験氷盤から供試体を切り出し、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、破壊氷片の観察、破壊氷盤の形状観察を行った。これらの作業を試験ケースごとに繰り返した。

3-3 貫入試験ケース

平成7年度の試験ケースを、表-2に示す。なお、貫入速度 V は、有効歪速度 $V/(2W)=10^{-3}\text{sec}^{-1}$ オーダーを目標に決定した。

3-4 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、氷盤破壊モード観測、氷厚、氷温である。

4 試験結果と考察

4-1 氷盤破壊様式

氷盤の破壊様式は、一般的に貫入速度、供試模型幅、氷厚によって分類されることが知られている。本試験において発生した継続氷力時の氷盤破壊モードは、多くの場合水平面内のcleavage crackを伴った、spalling（flaking, 楔）破壊とcrushing破壊に相当する(Saeki and Ozaki, 1980)。これらの破壊は、供試模型幅方向の各領域において独立に発生しており、過去の小規模貫入試験($W=1\text{m}$ 以下)結果と同様である(Takeuchi and Saeki, 1995)。初期氷力作用時の氷盤破壊モードは、試験開始時の氷盤先端部形状の影響を受け、供試模型と氷盤の接触が開始した部分から順に上記の破壊が発生する。図-4は、氷盤破壊様式の概要図である。写真-1は、試験時の氷盤破壊状況である。貫入により破壊した氷盤は、供試模型幅×貫入量×氷厚の部分であり、これ以外の顕著なクラックの発生は目視では確認できなかった。なお、T-1の試験条件時には、氷厚が小さくかつ、試験中の潮位変化などの影響のため曲げ破壊が発生し、現地の試験条件（氷厚が小さい）としては適当ではなかったと判断される。また、各試験時の氷厚方向の氷温は、 $-1.5\sim-2.6$ （度）の分布を示し、温度勾配が小さく海水温度付近であった。

4-2 全体氷荷重

(1) 全体氷荷重

供試模型に作用する全体氷荷重（Z方向）は、全体荷重計測用ロードセル測定値と局部荷重計測用ロードセル測定値の総和の二通りの方法から評価できる。これらを比較し、整合することを確認した後、比較的測定精度の高い局部計測用荷重ロードセルの総和を用いて全体氷荷重(F)を評価することにした。表-3は、4実験ケースの試験結果を示している。全体氷荷重の時系列（図-5）は、供試模型の貫入開始から上昇し高いピーク値を示す。これは、初期氷力（初期氷荷重）と呼ばれ、実験開始時の氷盤先端部と供試模型先端部の接触状態に依存する。次に、初期氷力（初期氷荷重）発生後には、初期氷力を超えることのない小さな変動を伴った力が発生する。これは、継続氷力（継続氷荷重）と呼ばれ、氷盤の局所的な破壊と関連している。

(2) 全体初期氷圧力と全体継続氷圧力の関係

全体初期氷荷重と全体継続氷荷重を受圧面積（供試模型幅×氷厚）で除した値をそれぞれ全体初期氷圧力、全体継続氷圧力とし、これらの関係を図-6に示す。これは、全体初期氷荷重が発生する時の供試模型と氷盤の接触状態を一樣とし、全体継続氷荷重が発生する時のそれらの接触状態の度合を勾配として示したものである。全体継続氷荷重は、最大値と平均値が作用する場合を考慮した。これから全体継続氷荷重が供試模型に作用する時は一樣ではない接触状態となり、氷盤の破壊と関連していることが分かる。

(3) 全体継続氷圧力とアスペクト比の関係

図-7は、全体継続氷圧力／圧縮強度（無次元継続氷圧力）とアスペクト比（供試模型幅／氷厚）の関係を示している。アスペクト比の増大にともなって無次元継続氷圧力は減少しており、これは、貫入係数がアスペクト比

の増大にともなう減少することに対応する。

4-3 局部氷荷重

(1) 局部氷荷重の時系列

図-2に示した局部荷重計測用のロードセルは、No.1～15までが3成分(X,Y,Z)を検出でき、No.36～42、D1～D4までが1成分のみの検出となる。局部氷荷重のZ方向の計測結果の例を図-8に示す。これらの図において、全体氷荷重が初期のピークを与える時刻において、局部氷圧力でもピークが発生している。その後、全体氷荷重が継続氷圧力を与える時間領域では、各パネルにはランダムに複数のピーク（力）が作用し、このピークが作用する時刻は、各パネル相互間において同時ではない。

(2) 局部氷圧力の分布

全体初期氷荷重を受圧面積（氷厚×供試模型幅）で除した値を(Paf)とし、各パネルに作用する初期ピーク時の局部氷圧力を(Pif)とする。これらの比(Pif/Paf)と、各パネルのY軸方向中心位置を供試模型進行方向左端からの距離でプロットしたものを図-9に示す。この(Pif/Paf)は、供試模型表面と氷盤先端部の初期の接触状態に依存しており、氷盤の整形状態が均一であると1に近くなる。

同様に、全体継続氷荷重の平均値を受圧面積（氷厚×供試模型幅）で除した値を(Pas)とし、各パネルに作用する継続氷荷重時の局部氷圧力（平均、極値、最大）を(Pis)とする。ここで極値とは、（平均+3×標準偏差）である。これらの比(Pis/Pas)と、各パネルのY軸方向中心位置を供試模型進行方向左端からの距離でプロットしたものの例を図-10に示す。この図において平均値の場合は、(Pis/Pas)は1近傍に一様に分布している。極値、最大値の場合は、非同時破壊に対応して局部的に高い値を示している。

(3) 局部氷荷重間の相関係数

全体氷荷重の時系列において、貫入開始から初期氷荷重が発生するまでの時間に注目し、この時間領域での各パネルに作用する局部氷荷重相互間の相関係数を計算することにより、パネル前面の氷盤破壊の同時性、非同時性を調べた。同時破壊の場合は相関係数の絶対値が1に、非同時破壊の場合はゼロに近い値を示す。計算結果を図-11に示す。これらの図は、多くが高い相関係数を示し、氷盤の同時破壊の様子を示している。

同様に、初期氷荷重発生後から貫入終了までの時間における各パネルに作用する局部氷荷重相互間の相関係数を求めた。計算結果を図-12に示す。図-11の場合に比較して大幅に相関係数は0に近づく。氷厚が大きい（図-12）の場合には、隣り合うパネル相互は比較的大きい相関係数を示し、近接するパネル前面の氷盤は同時破壊に近い。これは、氷厚と独立破壊領域の大きさが互いに関連していることを示している。

4-4 非同時破壊時の氷荷重

供試模型前面の各パネルを図-13のような領域に分割し、氷盤と相互作用する部分を受圧面積とする。これらの受圧面積に働く氷荷重（継続氷荷重）を受圧面積で除した値（P）をさらに一軸圧縮強度（ σ_c ）で無次元化した値を（ P/σ_c ）とする。この無次元化した値（ P/σ_c ）と受圧面積の関係を調べたものを図-14、15に示す。これらの図には、最大値、平均値および極値（平均+3×標準偏差、1%超過確率値相当）をプロットしてある。これらの図において平均値は、受圧面積に無関係にほぼ一定値を示している。これは、Kryの仮定(1978)を満足している。極値と最大値は、受圧面積の増大にともなう減少し、寸法効果の様相を呈している。また、アスペクト比が同一な図-14と図-15で受圧面積が 0.2m^2 より小さい範囲で比較すると、氷厚が大きい場合（図-15）の方が勾配が急になる傾向を示す。これは、氷厚が大きい場合の方が、独立破壊領域の数が少なくなることによると推定され、また、相関係数の結果（図-12）から隣接するパネルの相関係数が比較的大きいために独立破壊領域は氷厚の小さい場合に比較し大きくなるためである。

5 まとめ

供試模型幅が1.5mと3.0m、氷厚6cm,12cm,24cmという過去最大規模の貫入試験を能取漁港二見ヶ岡地区で実施した。これにより得られた知見を以下にまとめる。

(1) 氷厚が6cmの場合を除いた試験において、氷盤の破壊モードは、水平面内のcleavage crackを伴ったspalling (flaking、楔)破壊とcrushing破壊であった。また、氷盤が破壊する領域は、供試模型幅×氷厚×貫入長さであり、目視で確認できる顕著な他のクラックの存在は認められなかった。

(2) 全体氷荷重の時系列は、初期に顕著なピーク値（初期氷荷重）を示し、その後は、変動をともなった継続氷荷重が発生していた。これは、過去の小規模貫入試験（供試模型幅が1.0m以下）の結果と同様であった。

また、アスペクト比の増大に伴い、全体継続氷圧力/圧縮強度は減少する。

(3) 局部氷荷重の時系列は、初期に顕著なピーク値が発生し、その後はランダムにピークが発生する。このランダムなピークは、各パネル毎に発生が特定できず、氷盤の複数領域での非同時破壊に対応する。また、継続氷荷重領域では、各パネルに作用する局部氷圧力/全体氷圧力は、供試模型両端部分を除きほぼ一様に1付近であった。

(4) 各局部氷圧力間の相関係数は初期氷荷重領域では高く、同時破壊の様相を呈している。これに対して、継続氷荷重領域では小さな値を示し、非同時破壊の様相を呈している。また、氷厚が2パネル幅に相当する試験では、隣合うパネル相互の相関係数は大きくなり同時破壊と評価できる。これから、氷盤の独立破壊領域の大きさは、氷厚と密接に関連しているものと推定される。

(5) 各試験において考慮するパネル幅を変化させ参照する面積（受圧面積）に作用する氷圧力（継続氷圧力）と受圧面積の関係を評価した。この結果、局部氷荷重の平均値を考慮した場合、受圧面積と無関係に継続氷圧力は一定値を示す。これは、Kryの仮定を満足する。また、極値、最大値の場合は、受圧面積の増大に伴い継続氷圧力は減少する傾向を示し、氷荷重の寸法依存性をデータは示している。

<参考文献>

(1)中沢直樹、竹内貴弘、小野敏行、佐伯浩(1986)：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。
(2)Saeki, H. and Ozaki, A. (1980)：Ice Force on Piles, Physics and Mechanics of Ice, Ed. Per Tryde, Springer-Berlag, pp.342-350。
(3)Takeuchi, T. and Saeki, H. (1995)：Indentation Pressure in Ice /Vertical Structure Interaction, Int. Jour. Offshore and Polar Eng., Vol.5, No.4, Dec.,pp.279-285。
(4)Kry, PR. (1978)：A Statistical Prediction of effective Ice Crushing Stresses on Wide Structure, Proc. IAHR, Part 1, pp.33-47。

表-1 中規模野外実験の予定試験ケース

No.	供試模型幅 W (m)	氷厚 h (cm)	7ス°外比 W/h	貫入速度 V(cm/sec)	貫入量 (cm)	実施年度
1	1.5	6～12	12.5～25	0.3	100	平成7度
2	3.0	12～24	12.5～25	0.6	100	平成7度
3	4.5	12～18	25～37.5	0.9	100	平成8度
4	6.0	12～24	25～50	1.2	100	平成8度

表-2 平成7年度の試験ケース

実験ケース	供試模型幅 W (m)	氷厚 h (cm)	受圧面積 A(m ²)	7ス°外比 W/h	貫入速度 V(cm/sec)	計測時間 (sec)
T-1	1.5	6	0.09	25	0.3	333
T-2	1.5	12	0.18	12.5	0.3	333
T-3	3.0	12	0.36	25	0.6	167
T-4	3.0	24	0.72	12.5	0.6	167

表-3 平成7年度の試験結果

実験 ケース	W (m)	h (cm)	初期氷力 (kN)	継続氷力(kN)			V (mm/sec)	圧縮強度 (MPa) 物理試験より
				最大	平均	標準 偏差		
T-1	1.5	6.5	17.10	7.53	1.97	1.45	3.03	1.41
T-2	1.5	12.0	44.58	40.43	25.35	4.84	3.04	1.36
T-3	3.0	12.0	126.35	105.55	71.86	9.60	6.08	1.89
T-4	3.0	24.0	573.75	303.17	181.38	50.12	6.11	1.82

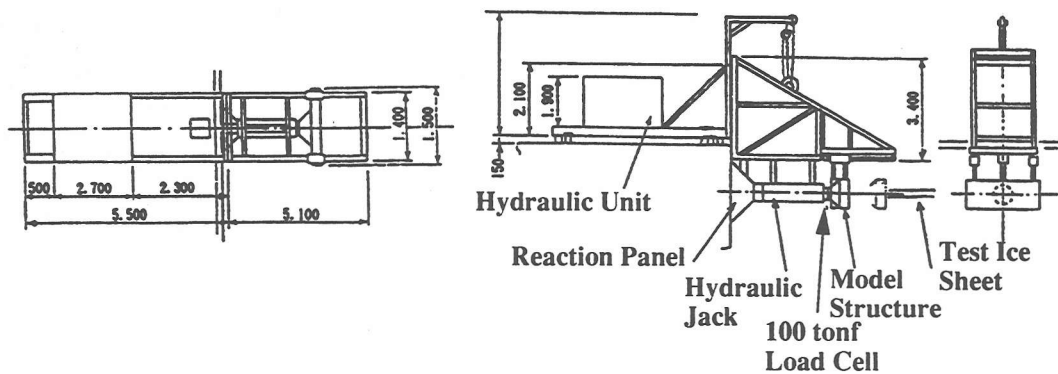


図-1 荷入試験装置

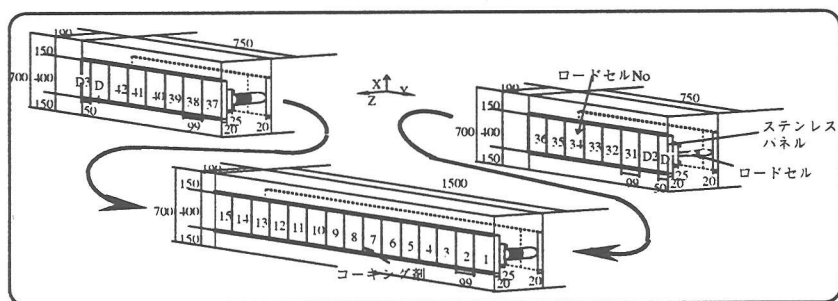


図-2 供試模型 (1.5m、3.0m)

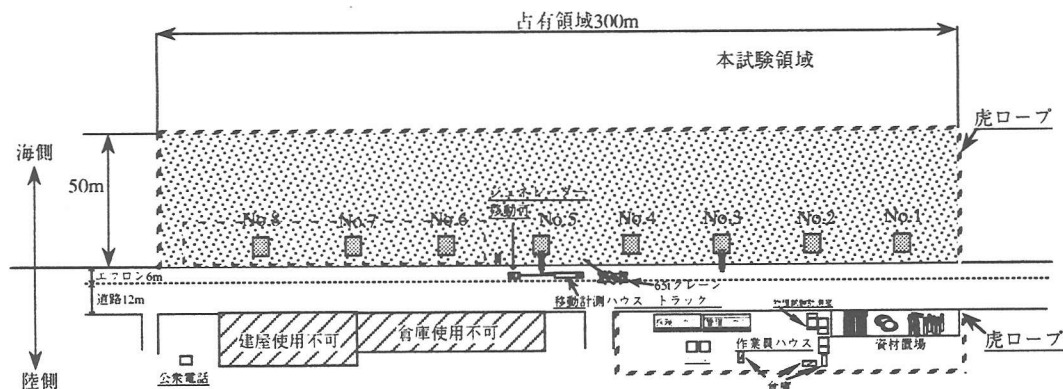


図-3 野外実験サイトの配置

鉛直方向

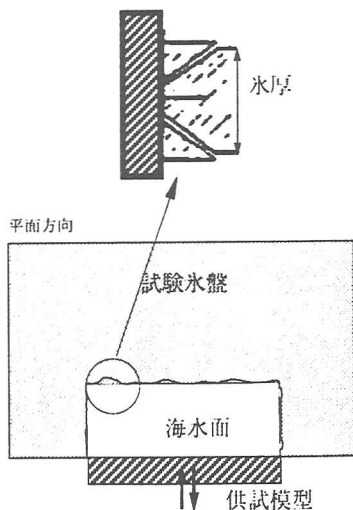


図-4 氷盤破壊様式の概要図



写真-1 試験時の氷盤破壊状況 (供試模型幅W=3.0m、氷厚12cm)

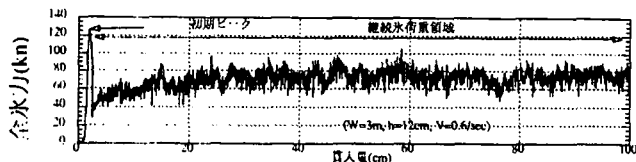


図-5 全体氷荷重の時系列（供試模型幅W=3.0m、氷厚12cm）

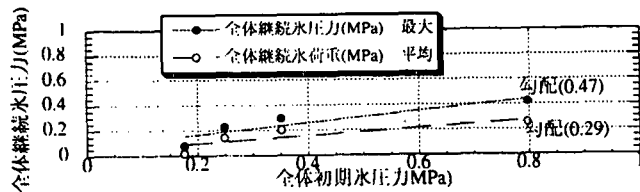


図-6 全体初期氷圧力と全体継続氷圧力の関係

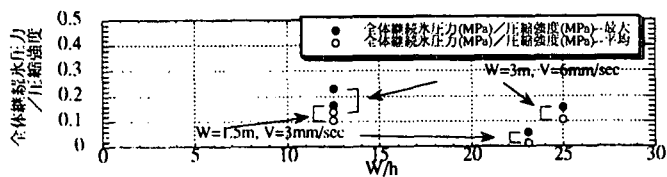


図-7 全体継続氷圧力／圧縮強度とアスペクト比の関係

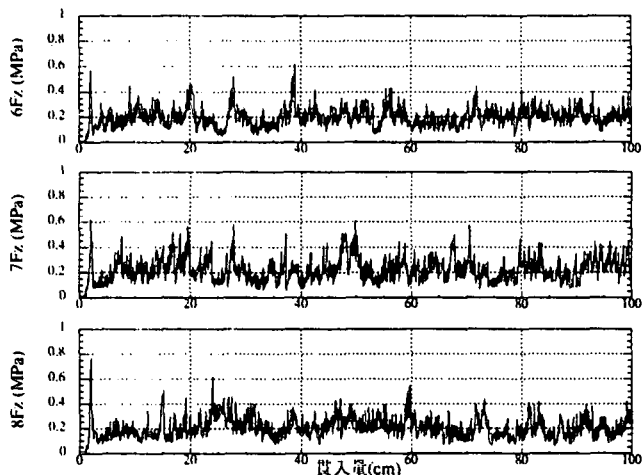


図-8 局部氷荷重（氷圧力）（供試模型幅W=3.0m、氷厚12cm）

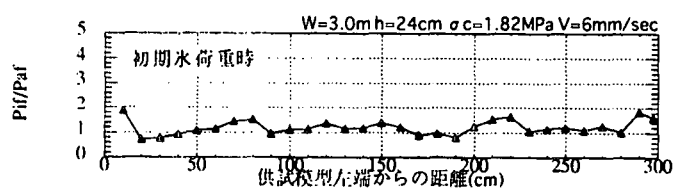


図-9 供試模型進行方向左端からの距離と(Pi/Paf)の関係

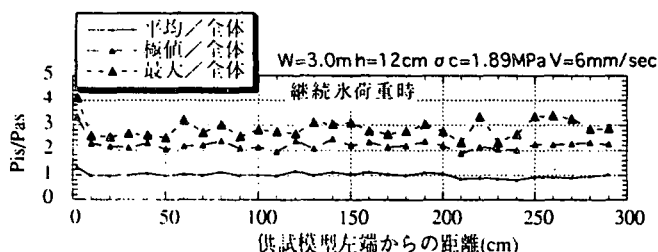


図-10 供試模型進行方向左端からの距離と(Pis/Pas)の関係

初期氷荷重時
W=3.0m、氷厚24cm

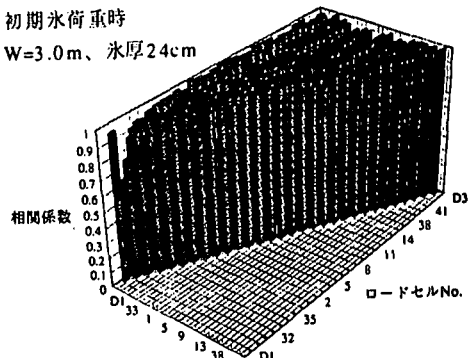


図-11 局部氷荷重相互間の相関係数

継続氷荷重時
W=3.0m、氷厚24cm

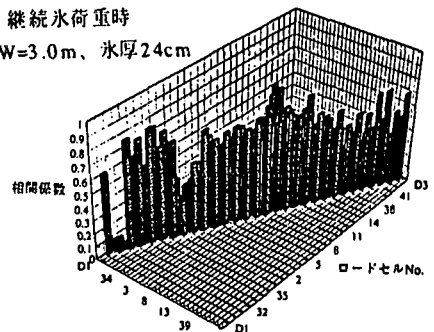


図-12 局部氷荷重相互間の相関係数

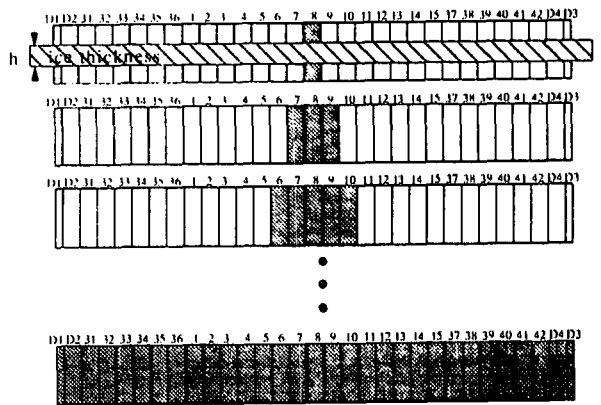


図-13 参照受圧面積の領域

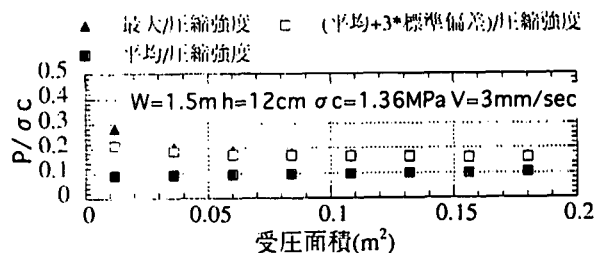


図-14 P/σ_c と受圧面積の関係(W=1.5m、h=12m)

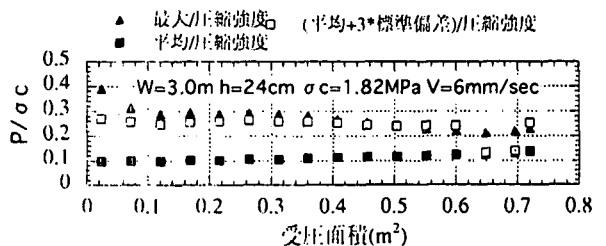


図-15 P/σ_c と受圧面積の関係(W=3.0m、h=24m)