

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)

On the interaction of structure with ice sheet in medium scale field indentation tests (part 2)

赤川敏*、河村宗夫*、竹内貴弘*、酒井雅史*²、青島正和*²、勝井秀博*²、
松下久雄*³、中沢直樹*⁴、寺島貴志*⁴、平山健一*⁵、佐伯浩*⁶

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

The proper evaluation of ice load on offshore structure in ice-infested area makes it possible to construct the structure. It is the key 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 had been conducted to evaluate the ice load since 1996 winter, using natural sea ice in Lake Noto. This paper shows the results of ice indentation tests conducted in 1997 winter.

Keywords: nonsimultaneous 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方法では、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)。このために、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荷重推定法を開発整備することが求められている。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」では、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。平成7年度の計測結果は、前報において既に報告している(竹内ら、1996)。平成8年度の貫入試験は、最大供試模型幅6mと拡大され、天然氷を使用したこの種の実験としては国際的にみても過去最大規模となる。実験場所は、両年で同様の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された((社)JOIA、1995)。本研究では、平成8年度の貫入試験時(平成8年12月～平成9年3月の期間)の氷盤の破壊状況、氷荷重計測結果を主に報告する。

2 貫入試験の内容

2-1 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。一本のサーボジャッキに取り付けられる供試模型は、最大幅3.0mとすることができ、また、最大加力能力は、100tonfである。供試模型の貫入速度は、0.1cm/sec～3.0cm/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、二本のサーボジャッキを接合することにより供試模型幅を4.5m、6.0mとすることができる。

2-2 貫入試験方法

野外実験サイトの配置を、図-3に示す。試験氷盤は、自然氷盤中に新たに成長させた氷盤(図中のS1～S7)

* 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 ハシフィクソンサルタンツ(株)

*⁵ フェロー 岩手大学工学部建築環境工学科、*⁶ フェロー 北海道大学工学部土木工学科

と沖合い約20～30mの位置の氷盤（図中のNo.1～3）を利用したものがある。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、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。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可能な限り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、貫入試験前に同一地点の試験氷盤から供試体を切り出し、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。

2-3 貫入試験ケース

平成8年度の試験ケースを、表-2に示す。なお、貫入速度 V は初期の計画通りに、有効歪速度 $V/(2W)$ が 10^{-3}sec^{-1} のオーダーとなるように決定した。

2-4 貫入試験計測項目

計測項目は、昨年と同様に、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、気温である。

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-3に示す。試験期間中の現地の気温を図-4に示す。平成8年度は、昨年に比較して積雪、地吹雪の影響を受けたため、作成した試験氷盤の多くの使用が妨げられた。図-5は、試験氷盤の鉛直氷温分布を示し、温度勾配が小さく概ね海水温度付近である。供試模型表面のパネルの凹凸は、図-6に示すように1mm以内と小さい。これは、試験氷盤に接触する供試模型表面の凹凸が、可能な限り平坦であることが必要で、氷盤の破壊状態に影響を与えることが予想されるためである。

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、3/4と3/6の場合、水平面内のcleavage crackを伴ったspalling (flaking, 楔) とcrushing破壊に相当する（鉛直断面の破壊、図-7）。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。2/15の場合は、アスペクト比 (W/h) が45.1と非常に大きな試験条件であったが、供試模型の貫入開始から継続氷荷重発生後の約15 secの間は、3/4や3/6と同様にcrushing破壊が卓越したが、その後はbucklingと判断される破壊が発生し、接触条件に応じて他の領域では曲げ破壊も発生していた。また、2/21は、積雪の影響を受けた試験氷盤で、自然氷盤との接合部分で破壊が発生し、破壊した氷盤部分が背後の試験氷盤に乗り上げて移動する状態となった。したがって、供試模型と接触している氷盤の破壊は、発生しなかった。3/4と3/6の場合は、図-7に示した破壊となり、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6 mの場合であっても平成7年度の試験結果や過去の小規模貫入試験($W=1\text{m}$ 以下) 結果と同様であった(Saeki and Ozaki, 1980)。

3-3 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、平成7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（例を図-8(a)に示す）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。このために、実験に先立ちこの接触状態が可能な限り一樣になるように、チェンソーでの整形に注意を払った。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。ただし、氷盤の破壊にも記した様に、3/4、3/6 の場合に上記の破壊が明確となり、2/21, 2/15の場合には破壊モードの状態から、そのまま同様に比較する事はできない。また、経過時間と変位量から計算した貫入速度（図-8(b)）を示した。尚、変位計のワイヤーが破壊氷片の積み重ねにより影響を受けた場合には、図には記載していない。

(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作用面積（供試模型幅×氷厚）で除した値をそれぞれ全体初期氷圧力、全体継続氷圧力とする。これらの関係を図-9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。ここでは、3/4, 3/6の試験結果と平成7年度の結果をあわせて記載した。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非一樣な接触状態となり、氷盤の破壊と関連している。

3-4 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.1～62までが（Z成分、ただし、W=4.5mの場合には、No.9～No.54）を、No.79、82、85、88が（X成分）を、No.80、83、86、89が（Y成分）を検出できる。局部氷荷重のZ方向の計測結果の例を図-10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で、ほとんどの局部氷圧力の時系列で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、各パネル相互間で同時ではない。

(2) 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、及び継続氷荷重が作用時間に分割し、これら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。ここでは、3/4, 3/6のデータに関しての計算結果を示す。パネル番号31と32は、幅が5cmであるため、これらの荷重を加えあわせて1つのパネルとして相関係数をしらべた。すなわち、no2-no61のうち合計59パネル(W=6m相当)の場合は、1770ケース、no9-no54のうち合計45パネル(W=4.5m相当)の場合は1035ケースである。相関係数が同時破壊の場合は絶対値が1に、非同時性が強い場合はゼロに近い値を示す。計算結果を図-11（初期氷荷重時）、図-12（継続氷荷重時）に示す。さらに、あるパネルを基準とし、それに隣り合うパネル（1）、その次（2）、その次（3）と云うようにパネル個数を離れた部分の荷重時系列間の相関係数（平均値）を平成7年度（H7）の結果も含めてプロットしたのが図-13（継続氷荷重時）である。氷厚が大きいかつ貫入速度が小さくなるにつれて、相関係数の大きい部分の範囲が広がる傾向がある。これから、氷盤非同時破壊に関連する独立破壊領域の大きさが氷厚と貫入速度に影響を受けると推測される（Sodhi, 1997）。

3-5 非同時破壊時の氷荷重

供試模型前面の各パネルからそれぞれ図-14の様に隣接する任意の大きさと任意の位置におけるパネルを取り上げ（フラッシュした領域を考慮）、これらと氷盤との相互作用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-15、図-16に示す。これらの図には、平均値、極値（平均+3×標準偏差、1%超過確率値相当）および最大値の結果がプロットされている。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(1978)の仮定に従うものであり、これは、平成7年度と同様の結果となった（図-17）。また、極値と最大値は、受圧面積の増大にともなってなだらかに減少し、Scale Effectの様相を呈している。図-16と図-17の同一面積において、それらの（ P/σ_c ）を比較すると、3/6の方が大きい値となる。これは、独立破壊領域の数が少ないことに因るものと考ええると、氷厚の増大に伴って隣接するパネル間の相関係数が増大して独立破壊領域のサイズが大きくなることに対応している。

4 まとめ

供試模型幅が4.5mと6.0m、氷厚13cm～27cm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) 供試模型幅4.5mで氷厚16cm（3/4）、および供試模型幅6.0mで氷厚27cm（3/6）の試験において、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。この結果は、平成7年度の結果と一致する。また、供試模型幅6.0mで氷厚13cm（2/15）とアスペクト比（W/h）が45.1と大きい場合には、はじめにcrushingが発生し、その後buckling, bendingへと供試模型と氷盤の接触条件に応じて破壊モードが変化した。

(2) 全体氷荷重の時系列（3/4と3/6）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

(3) 局部氷荷重の時系列(3/4と3/6)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。これは、平成7年度の結果と同様であった。

(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。さらに、平成7年度の結果を考慮すると、氷盤の独立破壊領域の大きさは氷厚と貫入速度に影響を受ける。

(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。この結果は、平成7年度の結果と一致し、また、同一面積下の氷圧力（継続氷圧力）の値は、独立破壊領域の数（すなわち、氷厚）で説明できると推定される。さらに、独立破壊領域の大きさに与える貫入速度の効果を詳細な破壊状態と関連づけて検討すべきである。

(1) 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.18、pp.115-120、1986

(2) 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

(3) (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

(4) Saeki, H. and Ozaki, A. : Ice Force on Piles, Physics and Mechanics of Ice, Ed. Per Tryde, Springer-Berlag, pp.342-350, 1980

(5) Sodhi, D.S.: Correlation of Ice Crushing Forces in Segments of an Indentor, Proc. OMAE, Vol.4, 1997

(6) Kry, P.R. (1978): A Statistical Prediction of effective Ice Crushing Stresses on Wide Structure, Proc. IAHR, Part 1, pp.33-47, 1978

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、寒冷地において冬期に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、の各位には低温環境条件下にもかかわらず多大なご協力を頂きました。平成8年度は、積雪の影響で計画の大幅な変更が余儀なくされました。これらの方々のご協力無しでは、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。

No.	供試模型幅 W (m)	水深 h (cm)	7.5% 外比 W/h ²	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年度
2	3.0	12~24	12.5~25	0.6	100	平成7年度
3	4.5	12~18	25~37.5	0.9	100	平成8年度
4	6.0	12~24	25~50	1.2	100	平成8年度

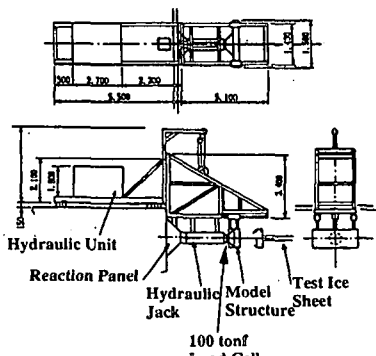
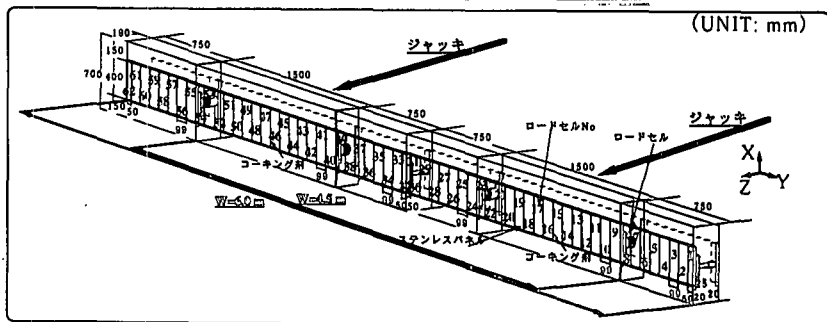


図-1 貫入試験装置の寸法



【4.2 供試模型 (4.5m、6.0m) の概要とロードセル番号

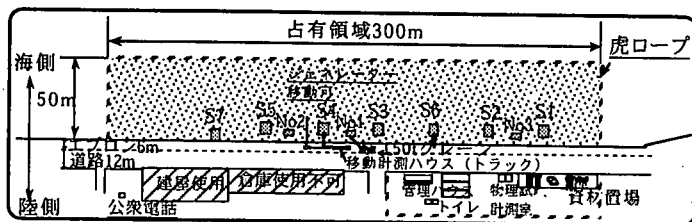


図-3 野外実験サイトの配置

表-2 平成8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)	アスペクト比 W/h	貫入速度 V (cm/sec)	歪速度 (sec ⁻¹)	貫入量 (cm)	計測時間(sec)
V45012	4.5	12	0.54	37.5	0.9	10 ⁻³	100	111
V45018	4.5	18	0.81	25	0.9	10 ⁻³	100	111
V60012	6.0	12	0.72	50	1.2	10 ⁻³	100	83
V60024	6.0	24	1.44	25	1.2	10 ⁻³	100	83

表-3 平成8年度の試験結果のまとめ

試験 ケース	W (m)	h (cm)	初期氷力 (kN)	継続氷力 (kN)			V (mm/sec)	試験 サイト (日付)	圧縮強度 (MPa)
				最大	平均	標準 偏差			
V60012	6	13.3	446.91	450.79	287.17	63.54	12.39 12.79	S4 2/15	0.72
V45012	4.5	14.0	(128.23)	-----	-----	-----	9.72 9.63	S1 2/21	0.35
V45018	4.5	16.0	325.10	258.76	182.77	24.78	9.66 9.59	No.2 3/4	1.21
V60024	6	27.3	1303.8	615.75	367.44	85.65	----- 12.39	No.3 3/6	0.97

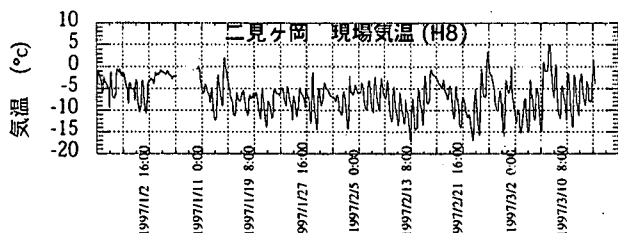


図-4 試験期間中の現地の気温

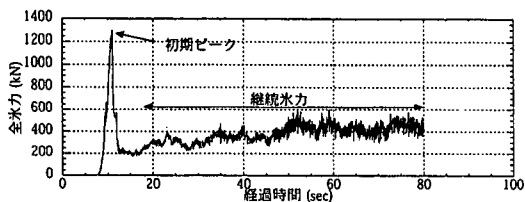


図-8 (a) 全体氷荷重の時系列
(供試模型幅W=6.0m、氷厚27.3cm、3/6)

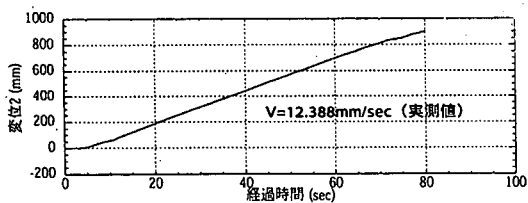


図-8 (b) 供試模型貫入量 (変位) の時系列
(供試模型幅W=6.0m、氷厚27.3cm、3/6)

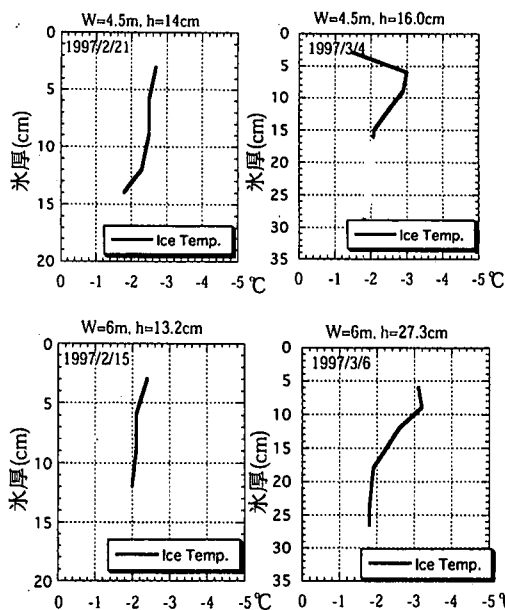


図-5 試験氷盤の鉛直温度分布

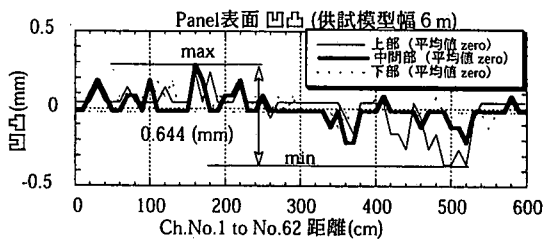


図-6 供試模型表面パネルの凹凸計測結果

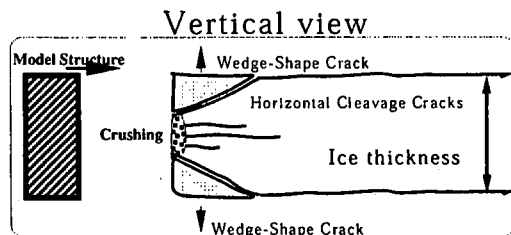


図-7 鉛直方向の氷盤破壊様式概要図

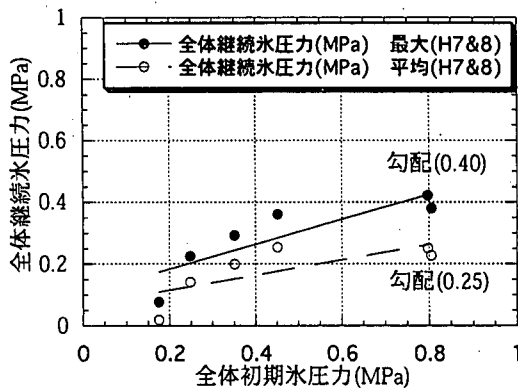


図-9 全体初期氷圧力と全体継続氷圧力の関係

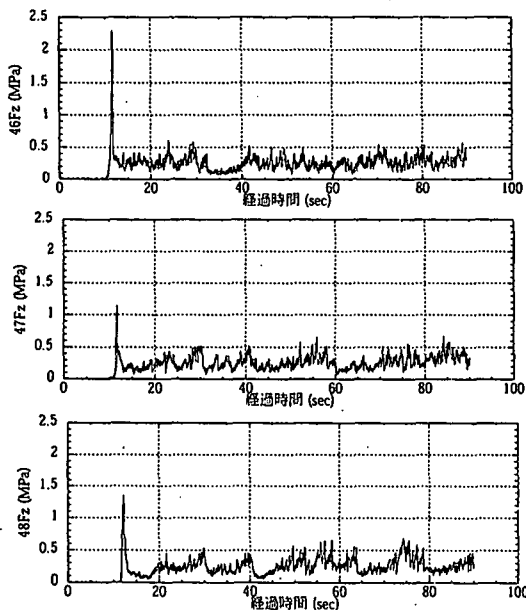


図-1 0 局部氷荷重の時系列の例 (貨入(Z)方向)
(供試模型幅 $W=4.5\text{m}$ 、氷厚 16cm 、No.46--No.48)

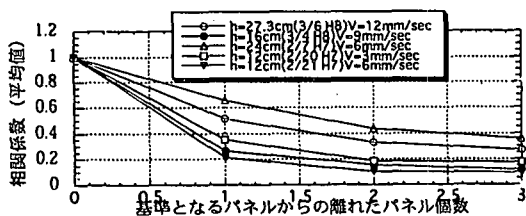


図-1 3 パネル相互間の距離と相関係数の関係

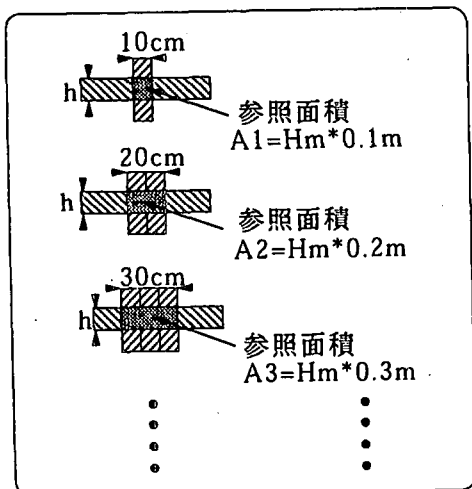


図-1 4 参照するパネルの任意の位置と任意の受圧面積の説明

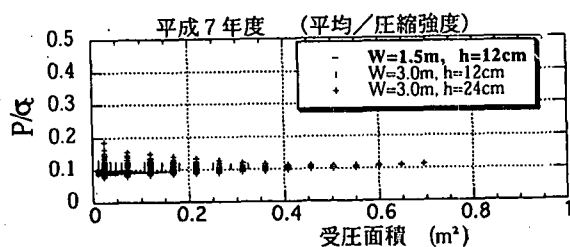


図-1 7 P/σ_c と受圧面積の関係 (平成7年度)

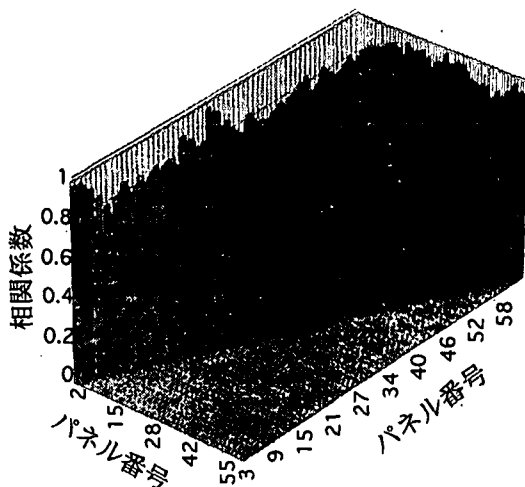


図-1 1 局部氷荷重相互間の相関係数(初期氷荷重時)($W=6\text{m}$ $H=27.3\text{cm}$)

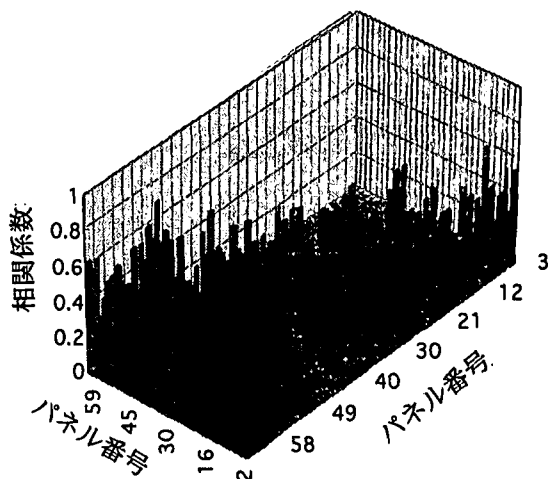


図-1 2 局部氷荷重相互間の相関係数(継続氷荷重時) ($W=6\text{m}$ $H=27.3\text{cm}$)

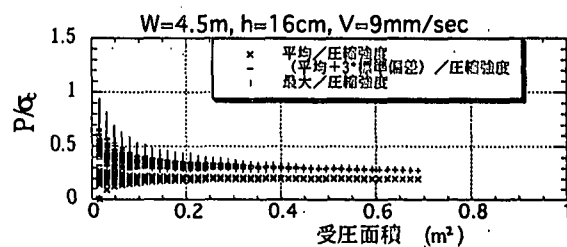


図-1 5 P/σ_c と受圧面積の関係($W=4.5\text{m}$, $h=16\text{cm}$, 3/4)

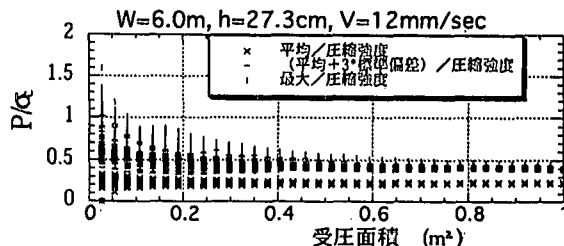


図-1 6 P/σ_c と受圧面積の関係($W=6.0\text{m}$, $h=27.3\text{cm}$, 3/6)